

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication / Office fédéral des routes

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni / Ufficio federale delle strade

Optimierungsprozesse im Management der Strassenerhaltung (MSE)

Processus d'Optimisation dans le cadre du Système de Gestion de l'Entretien Routière (SGE)

Process of optimization in Maintenance and Rehabilitation Management System of Roads (MMSR)

**RAFI Managementberatung (RMB), Zürich
Ali- A. Rafi, Dr. sc. Techn. ETHZ, Dipl. Bauingenieur ETHZ**

**Infrastructure Management Consultants, Zürich
Rade Hajdin, Dr. sc. Techn. ETHZ, Dipl. Bauingenieur**

**Amstein und Walthert AG, Zürich
Urs Welte, Dipl. Elektroingenieur ETHZ**

Forschungsauftrag VSS 1999 / 293 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

September 2005

.....

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG	5
RESUME	6
SUMMARY	7
1. AUSGANGSLAGE	8
1.1 Einleitung	8
1.2 Abgrenzung	9
1.3 Auftrag	10
1.4 Forschungsziel	10
1.5 Begriffe zur Optimierung	10
1.6 Optimierungsprozess	13
1.6.1 Grundlagen der Optimierung bei den Fahrbahnen	14
1.6.2 Grundlagen der Optimierung im BMS	17
1.6.3 Grundlagen der Optimierung im EMT	17
1.6.4 Grundlagen der Optimierung im Gesamtsystem Erhaltungsmanagement	18
2. SITUATIONSANALYSE	19
2.1 Arten der Optimierungsverfahren	19
2.1.1 Multikriterielle Optimierung	20
2.1.2 Wirtschaftliche Optimierung	22
2.2 Anwendung der Optimierungsverfahren in der Schweiz	22
2.3 Literaturstudie	23
3. KONZEPT (THEORETISCHE GRUNDLAGEN DER OPTIMIERUNG)	24
3.1 System und sein Aufbau	24
3.2 Kriterien	25
3.3 Massnahmen	25
3.4 Zeitliche Entwicklung	25
3.5 Wertsystem	26

Beispiel 1: Wertsystem	26
3.5.1 Zeitliche Präferenz	27
Beispiel 2: Zeitliche Präferenz	27
3.5.2 Probabilistische Aspekte	28
3.6 Ermittlung der optimalen Massnahme für ein Bauwerk	28
3.6.1 Nicht-monetäre Verfahren	28
3.6.1.1 Gewichtete Summation	29
3.6.1.2 Multiattributive Nutzwertfunktion	29
Beispiel 3: Nutzwertfunktion für Leistungsfähigkeit	30
Beispiel 4: Massnahmenwahl 1	31
3.6.1.3 Analytischer Hierarchieprozess	31
Beispiel 5: Hierarchische Struktur	32
Beispiel 6: Berechnung der Kriteriumsgewichte	33
Beispiel 7: Konsistenzverhältnis	35
Beispiel 8: Globale Gewichte	35
3.6.1.4 Multiattributive Nutzentheorie	35
Beispiel 9: Massnahmenwahl 2	36
3.6.2 Wirtschaftliche Verfahren	37
3.6.2.1 Sicherheit	37
3.6.2.2 Leistungsfähigkeit und Betriebsbereitschaft	38
3.7 Ermittlung von optimalen Massnahmen für mehrere Bauwerke	40
3.7.1 Nicht-monetäre Verfahren	40
Beispiel 10: Bauwerksgewichte	41
3.7.2 Monetäre Verfahren	41
3.7.3 Schlussfolgerungen	42
3.8 Wirtschaftliche Optimierung bei Technischen Ausrüstungen	42
3.8.1 Arbeiten an EM-Anlagen ohne Verkehrsbehinderung	43
3.9 Kritische Beurteilung	43
3.10 Verfahren der wirtschaftlichen Optimierung	43
3.10.1 Kurzbeschreibung	43
3.10.2 Inkrementelles Nutzen/ Kosten Verfahren	44
Beispiel 11: Inkrementelles Nutzen/ Kosten-Verfahren	45
Beispiel 12: Anpassungen des inkrementellen Nutzen/ Kosten Verhältnisses	46
Beispiel 13: Anwendung im BMS	48
3.11 Genereller Ablaufprozess der Optimierung	50
3.12 Optimierungsprozess auf Stufe Teilsystem	53
3.12.1 Anforderungen des Teilsystems PMS	53
3.12.2 Anforderungen des Teilsystems BMS	54
3.12.3 Anforderungen des Teilsystems EMT	54
3.12.4 Charakteristische Merkmale der Massnahmenvarianten	55
3.13 Optimierungsprozess auf Stufe Gesamtsystem	56
3.13.1 Bestimmung der Vorgaben und Randbedingungen	56
3.13.2 Bildung der Erhaltungsabschnitte und Gruppierung der Massnahmen	57
3.13.3 Ziele der Optimierung auf Stufe Gesamtsystem	57

3.13.4 Selektion der Varianten aus den Teilsystemen	58
3.13.5 Bestimmung des Vorrangs der Anforderungen	58
3.13.5.1 Beispiel 14: Ermittlung des Vorrangs	59
3.13.6 Bildung von Varianten von Massnahmenpaketen	60
3.13.6.1 Kriterien	60
Beispiel 15: Bestimmung des optimalen Erhaltungsabschnitts	64
3.14 Massnahmenmanagement (örtliche Optimierung)	65
3.14.1 Einleitung	65
3.14.2 Problemstellung	66
3.14.3 Definition von Massnahmenoptionen aus den Teilsystemen	67
3.14.4 Mathematischer Lösungsansatz	68
3.14.4.1 Problemanalyse	68
3.14.4.2 Grundlagen: Problem des kürzesten Pfades	69
Beispiel 16: Problem des kürzesten Pfades	70
3.14.4.3 Problemformulierung	71
3.14.4.3.1 Netzwerkmodell	71
3.14.4.3.2 Kantenparameter	72
Beispiel 17: Nettonutzen	74
3.14.4.4 Zielfunktion und Kontinuitätsbedingungen	74
Beispiel 18: Zielfunktion	74
Beispiel 19: Kontinuitätsbedingungen	76
3.14.4.5 Weitere Randbedingungen	78
Beispiel 20: Budgetbegrenzung	78
Beispiel 21: Randbedingung zur Längebegrenzung des Erhaltungsabschnittes	79
Beispiel 22: Massnahmenoptionen in beiden Fahrrichtungen	81
3.14.4.6 Lösungsverfahren	82
3.14.4.7 Ergebnisse	83
Beispiel 23: Örtliche Optimierung	83
3.14.4.8 Zeitaspekte	85
3.14.5 Wahl des optimalen Erhaltungsabschnitts	86
3.14.5.1: Beispiel 24: Planung von Erhaltungsabschnitten in der Praxis	86
3.15 Zeitliche Optimierung	89
3.15.1 Nutzen	89
3.15.2 Vorgehen	92
3.15.2.1 Beispiel 25: Berechnung des Nutzens für Strasseneigentümer	92
3.15.2.2 Ablauf des Verfahrens der „Zeitliche Optimierung“	93
3.15.2.3 Spezifische Bedürfnisse der Technischen Ausrüstungen	96
3.15.2.4 Kommentar	97
3.15.2.5 Beispiel 26: Zeitliche Optimierung	97
3.15.2.6 Getroffene Annahmen	97
3.15.2.7 Erläuterungen zu dem Beispiel	99
3.15.2.8 Interpretation der Ergebnisse	101
4. NORMUNG	102
5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND DAS WEITERE VORGEHEN	103
6. LITERATURVERZEICHNIS	105

ANHANG	106
A OPTIMIERUNGSPROZESSE FÜR DAS TEILSYSTEM KUNSTBAUTEN	107
A 1 Unterhaltsplanung - Annahmen	107
A 2 Unterhaltsplanung im KUBA-MS	107
A 2 1 Zustandserfassung	108
A 2 2 Zustandsprognose	109
A 2 3 Unterhaltsoptionen	110
A 2 4 Arbeitsprogramm und Budgetvorschläge	111
A 2 5 Kataloge	112
A 3 Optimierung auf Katalogebene (Netzoptimierung)	112
A 3 1 Verfalls- und Massnahmenmodell	112
Beispiel A-1: Verfallsmodell	113
Beispiel A-2: Wirksamkeit	113
Beispiel A-3: Unterhaltspolitik	114
A 3 2 Mathematische Formulierung und Lösung	114
Beispiel A-4: Entscheidungsmatrix	114
Beispiel A-5: Berechnung von Kosten	115
Beispiel A-6: Aufstellung des Kostenvektors	115
Beispiel A-7: Mathematisches Programm zur Ermittlung der optimalen Unterhaltspolitik	117
Beispiel A-8: Duale Formulierung der Katalogoptimierung	118
A 3 3 Lösungsumsetzung und Finanzbedarf	118
A 4 Optimierung auf Bauwerksebene	118
A 4 1 Mathematische Formulierung	118

Zusammenfassung

Die Forschungsarbeit befasst sich mit den multikriteriellen und wirtschaftlichen Optimierungsverfahren bei der Realisierung von Erhaltungsmaßnahmen und zeigt deren Einsatzmöglichkeiten und –grenzen.

Da sich in der Praxis der Bedarf für den Einsatz von Optimierungsverfahren im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen erst in jüngster Zeit, vor allem aufgrund beschränkter finanzieller Mittel im Unterhalt, entwickelte, liegen bzgl. Einsatz und Verfahren noch keine Erfahrungen vor.

Seit kurzem befassen sich auch Tiefbauämter mit der Koordination und Optimierung von Erhaltungsmaßnahmen mit dem Ziel, die Baustellenzahl und –dauer zu reduzieren und die Erhaltungskosten zu verringern. Die Koordination allein führt jedoch nicht zur Bildung optimaler Massnahmenpakete und Bauprogramme. Die Aufgabe kann systematisch unter Verwendung entsprechender Optimierungsverfahren gelöst werden.

Die Vielfalt der Anforderungen, Systemkriterien und Randbedingungen der Teilsysteme für Optimierung im Gesamtsystem erfordert den Einsatz von verschiedenen Optimierungsverfahren. Einige dieser Verfahren werden im vorliegenden Forschungsbericht vorgestellt.

Dazu bieten die Resultate dieser Forschungsarbeit Möglichkeiten für verschiedene, typische Aufgabenstellungen von Tiefbauämtern, wie z.B. Massnahmenplanung, Massnahmenmanagement, Baustellenplanung, Koordination bei der Realisierung von Massnahmen u.a.m., geeignete Optimierungsverfahren auszuwählen und einzusetzen.

Die Anwendung der Optimierungsprozesse bringt in erster Linie für Strassennetze mit hoher Verkehrsbelastung (Autobahnen, Hochleistungs- und Hauptverkehrsstrassen ausserorts) markante Vorteile.

Die Forschungsarbeit zeigt, dass grundsätzlich für die Optimierung (Bildung von Massnahmenpaketen) die Massnahmen aus den Teilsystemen Fahrbahnen und Kunstbauten relevant und zu verwenden sind. Die Massnahmen aus anderen Teilsystemen wie Technische Ausrüstungen müssen nur in seltenen Fällen vollständig im Optimierungsprozess berücksichtigt werden.

Die Einführung von Optimierungsverfahren bei der systematischen Durchführung des Erhaltungsmanagements von Verkehrsanlagen soll einerseits über entsprechende Normen und andererseits mittels Weiterbildungsveranstaltungen erfolgen.

Résumé

Le projet de recherche s'occupe des méthodes de l'optimisation multicritères et économiques en cas de réalisation des mesures de maintenance routière. Il présente aussi leurs possibilités et limites.

Parce que la demande d'utilisation des méthodes d'optimisation par les administrations routières est développée depuis quelque année (sur tout à cause de manque de moyen financement), il n'existe pas assez d'expérience concernant l'utilisation de ces méthodes.

Quand même il n'y a pas long temps, que les administrations routières s'occupent de coordination des mesures pour réduire de nombre et durabilité des chantiers, autant que les coûts globaux de maintenance. Mais la coordination seule n'est pas suffisante d'atteindre ces buts et de générer l'optimal paquet des mesures. Cette tâche doit être réalisé systématiquement par les méthodes de l'optimisation.

A cause de grande variété des exigences des systèmes partiels pour l'optimisation au niveau du système global, ainsi que l'existence de pluriel conditions cadre de l'optimisation, en particulière dont des éléments du réseau routier, il n'y a pas une seule procédure générale, valable pour toutes les méthodes de l'optimisation. Quelques méthodes de l'optimisation sont expliquées dans ce rapport.

Les résultats de cette recherche donnent plutôt les possibilités de choisir la plus favorable méthode d'optimisation pour différents types de tâche des administrations routières, comme planification des mesures, gestion des mesures, gestion des chantiers, coordination des mesures, etc.

L'usage des méthodes de l'optimisation apporterait premièrement des bénéfices considérables pour les routes avec une grande charge de trafic (autoroutes, routes à grand débit et routes principales rurales et urbaines).

En plus cette recherche explique, que les causes initiales de l'optimisation (détermination des paquets optimales de mesures), sont surtout les mesures tirées des systèmes partiels PMS (gestion de la maintenance des chaussées) et BMS (gestion de la maintenance des ouvrages d'arts). Par contre les mesures des autres systèmes partiels comme EMS (gestion de la maintenance de l'équipe électromécanique) doivent être rarement considérés entièrement par le processus de l'optimisation.

L'usage des méthodes de l'optimisation en cadre du système de gestion de la maintenance routière faut être protégé par les normes correspondantes et les actions de renseignement.

Summary

Over the last few years highway agencies have increasingly tried to coordinate highway interventions in order to reduce both their number and duration, and global maintenance costs. The coordination of these interventions alone, however, is not sufficient to determine optimal groupings of interventions or optimal long term intervention strategies. These tasks are only systematically possible by using appropriate optimisation methods.

Since it has only recently become desirable to use optimisation methods in highway agencies, due to the increasing power of computers and increasingly restrained budgets, there is not yet sufficient knowledge with respect to their suitability to specific problems. The research work presented herein has therefore been conducted to elaborate on the use of multi-criteria and economic optimisation methods to plan interventions, including discussion of the possibilities and limits of their use. A number of optimisation methods are discussed in this report, since no one optimisation method is applicable for all of the sub-systems that comprise highway infrastructure.

In addition to the elaboration of a number of optimisation methods to be used in the management of highway infrastructure, this research shows that the use of optimisation methods to plan interventions results in the most significant improvements for roads with high traffic volume (freeways, inter-urban and urban express ways,), i.e. user costs are the highest. It is also shown that the optimal intervention packages are normally triggered by either pavement or bridge intervention needs. The intervention needs of other sub-systems, such as the EMS (Equipment Maintenance System) rarely trigger such packages.

The results of this research can be used by highway agencies to determine the suitable optimisation methods for the management of their infrastructure.

The use of these optimisation methods should be supported by appropriate standards and training.

1. Ausgangslage

Das Erhaltungsmanagement der Strassenverkehrsanlagen (EM), bzw. das Management der Strassenerhaltung (MSE) ermöglicht ein vereinheitlichter und systematisierter Ablauf zur optimalen Bewirtschaftung und Erhaltung der Infrastrukturanlagen von Strassennetzen.

Eine Verkehrsanlage als Gesamtsystem umfasst mehrere Teilsysteme. Diese sind das Teilsystem Fahrbahnen, das Teilsystem Kunstbauten (inkl. Tunnel) und das Teilsystem technische Ausrüstungen, bzw. elektromechanische Einrichtungen.

Im Erhaltungsmanagement dieser Teilsysteme werden verschiedene Verfahren angewendet, mit dem Ziel jeweils die zweckmässigste Massnahme zum optimalen Zeitpunkt zu realisieren. Dadurch kann beispielsweise ein Optimum zwischen den Objektkosten (Betreiberkosten) einzelner Teilsysteme und der Lebensdauer dieser Objekte ermittelt werden.

Im Strassennetz können infolge der Baustellen Verkehrsbehinderungen auftreten, welche zusätzliche Fahr-, bzw. Wartezeiten für die Verkehrsteilnehmer und Immissionen für die Anwohner und Umgebung bewirken. Damit steigen die Strassennutzerkosten und Kosten Dritter und folglich die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten der Erhaltungsmassnahmen (vgl. [1] und [2]), womit auch der Gesamtnutzen sinkt.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass bei Strassen mit geringer Verkehrsbelastung die so entstehenden zusätzlichen Strassennutzerkosten und Kosten Dritter relativ gering bleiben und dementsprechend für solche Strassen die Optimierung oder sogar Koordination auf Stufe Teilsysteme in der Regel zu einem ausreichenden Resultat führt.

1.1 Einleitung

Die Planung von Erhaltungsmassnahmen im Strassenwesen hat sich in den letzten 30 Jahren grundlegend verändert. In der fernen Vergangenheit wurde die Erhaltung im Strassenwesen weltweit auf ziemlich unterschiedliche Art und Weise geplant und ausgeführt. Meistens wird der Zeitpunkt für eine Erhaltungsmassnahme aufgrund einer Zustandsbeurteilung festgelegt. Die Art der Massnahme und die entsprechende Grobkostenschätzung werden im Rahmen der Inspektion vorgeschlagen.

Das Ergebnis dieser Arbeitsweise war vom Land zu Land unterschiedlich und gerade in der Schweiz keineswegs schlecht. Einerseits kennen die Verantwortlichen ihre Objekte samt ihren schwachen Stellen genau und andererseits stand bisher genügend Geld für die Erhaltung zur Verfügung. In den anderen Ländern wie z. B. in den USA wurde die Erhaltung teilweise arg vernachlässigt. Die Finanzierung von Erhaltungsmassnahmen war kaum sichergestellt und die Verantwortlichen konnten ihre Budgetanträge von der politischen Instanz nur sehr selten bewilligen lassen. Es bedurfte einiger katastrophaler Unfälle bis man erkannt hat, dass die Erhaltung sorgfältig geplant und ausreichend finanziert werden muss. In der Schweiz ist man von derartigen Unfällen bis anhin verschont geblieben aber die angespannte wirtschaftliche Situation des Bundes und der Kantone machte es erforderlich im Bereich der Bauwerk-erhaltung neue Wege zu beschreiten. Dazu eine Bemerkung von Prof. Hans Grob aus dem Jahre 1987:

“ ... Die älter werdenden Strassen leiden unter dem immer noch zunehmenden Verkehr und erfordern vermehrten Unterhalt, demgegenüber werden in einer Zeit des Sparens und der grünen Welle keine Unterhaltsbudgets erhöht, sondern gehen unter den Einfluss der Teuerung real zurück. Die für die Strassenerhaltung Verantwortlichen werden künftig ihren Bedarf immer mehr sachlich begründen müssen, besonderes auch, wenn der Bund mit Beiträgen einspringen soll. er wird sich nicht mit Schätzungen der Kantone begnügen können, sondern braucht zahlenmässig begründete Prognosen und Prioritäten. ... “

Die letzten zwanzig Jahre waren, auch in der Schweiz durch die Bemühungen gekennzeichnet die Erhaltungsplanung im Strassenwesen auf eine wissenschaftliche Basis zu stellen. Die Planungsverfahren und die hierfür erforderlichen Software wurden für den Strassenoberbau, für die Kunstbauten und für die elektromechanischen Einrichtungen entwickelt. Das Ziel dieser Entwicklungen war es jeweils die vorteilhafteste Erhaltungsmassnahme zum optimalen Zeitpunkt auszuführen. Die vorteilhaftesten Erhaltungsmassnahmen für den Strassenoberbau, für Kunstbauten und für die elektromechanischen Einrichtungen werden dabei unabhängig voneinander ermittelt.

Die Ermittlung der vorteilhaftesten Erhaltungsmassnahme erfolgt somit auf der Stufe der Teilsysteme. Der offensichtliche Nachteil dieser Praxis besteht darin, dass die optimale Erhaltungsmassnahme auf der Stufe eines Teilsystems keinesfalls die optimale Wahl auf der Stufe des Gesamtsystems sein muss. Diese unkoordinierte Planung der Erhaltungsmassnahmen kann viele Verkehrsbehinderungen infolge Baustellen verursachen, welche zusätzliche Fahrzeit, d.h. auch zusätzliche Kosten für die Verkehrsteilnehmer bedeuten. Die Erhaltungsmassnahmen in den Teilsystemen müssen folglich so gewählt werden, dass sie auf der Stufe des Gesamtsystems ein Maximum des Nutzens bewirken. Anderes ausgedrückt, es soll ein Paket von Erhaltungsmassnahmen ermittelt werden, welches den Gesamtnutzen maximiert.

In diesem Forschungsbericht wird ein methodischer Ansatz vorgestellt, welcher die Ermittlung dieses optimalen Pakets von Erhaltungsmassnahmen aus allen Teilsystemen ermöglicht. Dieses Erhaltungspaket wird in der Regel einen zusammenhängenden Strassenabschnitt behandeln, welcher als Erhaltungsabschnitt bezeichnet wird. Die Bildung von solchen Erhaltungsabschnitten, wo mehrere Massnahmen aus verschiedenen (oder denselben) Teilsystemen zur Ausführung gelangen, stellt die zentrale Optimierungsaufgabe dar.

Der Ausführungszeitraum für die einzelnen Erhaltungsmassnahmen des Erhaltungspakets sind in den Teilsystemen bestimmt. Innerhalb dieses Zeitraums können die einzelnen Erhaltungsmassnahmen zeitlich geschoben werden. Der genaue Realisierungszeitpunkt der einzelnen Erhaltungsmassnahmen wird somit zusammen mit der Bildung der Erhaltungsabschnitte festgelegt. Der gesamte Prozess wird als Optimierung auf Stufe Gesamtsystem bezeichnet.

Die Festlegung der Erhaltungsabschnitte und die Ermittlung des optimalen Realisierungszeitpunktes erfolgt nach den Regeln der Optimierungsverfahren, welche den Gesamtnutzen maximiert. Der Nutzen kann dabei entweder monetär oder nicht monetär ausgedrückt werden. Die monetären Optimierungsverfahren werden sehr oft als wirtschaftliche Optimierungsverfahren und die nicht-monetäre als multikriterielle Optimierungsverfahren bezeichnet. Diese an sich falschen Begriffe sind sehr verbreitet, so dass sie auch in diesem Bericht verwendet werden.

1.2 Abgrenzung

Dieser Forschungsauftrag befasst sich mit der Optimierung auf Stufe Gesamtsystem „Erhaltungsmanagement der Strassenverkehrsanlagen“. Die Optimierung in den Teilsystemen Fahrbahnen, Kunstbauten etc. ist nicht Gegenstand dieser Forschungsarbeit und wird nur soweit behandelt als sie die Optimierung im Gesamtsystem beeinflusst.

Die Anwendung der Optimierungsverfahren auf Stufe Gesamtsystem wird primär für Strassen mit hohem Verkehrsaufkommen (Hochleistungsstrassen wie Nationalstrassen, Teile der Kantonsstrassen, Stadtstrassen, etc.) zu einer deutlichen Reduktion der Gesamtkosten und Steigerung des Gesamtnutzens führen.

Für Strassen mit wenig Verkehrsaufkommen soll die Optimierung auf Stufe der Teilsysteme durchgeführt werden (vgl. [Abbildung 1](#)).

1.3 Auftrag

Die Aufgabe dieses Forschungsauftrages besteht darin einen methodischen Ansatz zur Bildung optimaler Erhaltungsabschnitte herzuleiten, an welchen die Erhaltungsmassnahmen örtlich und zeitlich koordiniert realisiert werden, so dass gesamthaft die Erhaltungskosten minimiert bzw. den Gesamtnutzen maximiert werden.

Auf Antrag des VSS hat das Bundesamt für Strassen ASTRA per Verfügung vom 20. Juli 2001 beschlossen:

- Dr. Ali-A. Rafi, RAFI Managementberatung (RMB), Feldeggstrasse 36, 8008 Zürich, Projektleitung
Mail- Adresse: ali.rafi@bluewin.ch
- Dr. Rade Hajdin, Infrastructure Management Consultants (IMC), Zürich, [früher Dr. J. Grob & Partner AG, Winterthur]
Mail- Adresse: rade.hajdin@imc-ch.com
- Urs Welte, Amstein und Walthert AG, Zürich Mail- Adresse: urs.welte@amstein-walthert.ch

mit der Durchführung dieses Forschungsprojekt zu beauftragen.

1.4 Forschungsziel

Die vorliegende Forschungsarbeit untersucht die möglichen Optimierungsverfahren mit unterschiedlichen Zielfunktionen und unter Berücksichtigung des gesellschaftlichen Umfeldes. Es soll insbesondere durch Auswertung praxisbezogener Beispiele die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren abgeklärt und gegebenenfalls quantifiziert werden.

Im Einzelnen sind die Forschungsziele in der Verfügung des ASTRA vom 20. Juli 2001 wie folgt formuliert:

- Erarbeitung von Grundlagen für optimale Massnahmenwahl und Koordination der Entscheidungsprozesse im MSE und seinen Teilbereichen PMS, BMS und EMS durch Vergleich von möglichen Verfahren, sowie
- Erarbeitung der Grundlagen zur Normung sowie Aus- und Weiterbildung der MSE- Fachkräfte.

Diese Formulierung wurde im Rahmen der Situationsanalyse und aufgrund der Diskussionen innerhalb der Begleitkommission wie folgt konkretisiert:

- Erarbeitung von Grundlagen zur optimalen Kombination von mehreren Massnahmen aus den Teilsystemen PMS, BMS und EMS zu Massnahmenpaketen im Gesamtsystem und zur Ermittlung ihrer optimalen Realisierungszeitpunkt.
- Erarbeitung von Grundlagen zur Normierung und zur Aus- und Weiterbildung.

1.5 Begriffe zur Optimierung

Die Durchführung dieses Forschungsauftrages setzt voraus, dass vorerst die Definitionen verschiedener Begriffe, welche häufig im Zusammenhang mit der Optimierung angewendet werden, hier aufgelistet werden. Die entsprechenden Beschreibungen der Definitionen wurden der Norm SN 640 900a, Begriffssystematik entnommen. Für einige neuen Begriffe, welche im Rahmen dieses Forschungsauftrages häufig verwendet werden, wurden neue Definitionen formuliert.

Begriff

Definition

Baustellenplanung

Die Baustellenplanung beinhaltet die zeitliche und örtliche Koordination von ausgewählten Erhaltungsmassnahmen auf bestimmten Abschnitten der Strassenverkehrsanlage an Fahrbahnen und Wegen, Kunstbauten, Technischen Ausrüstungen, Werklei-

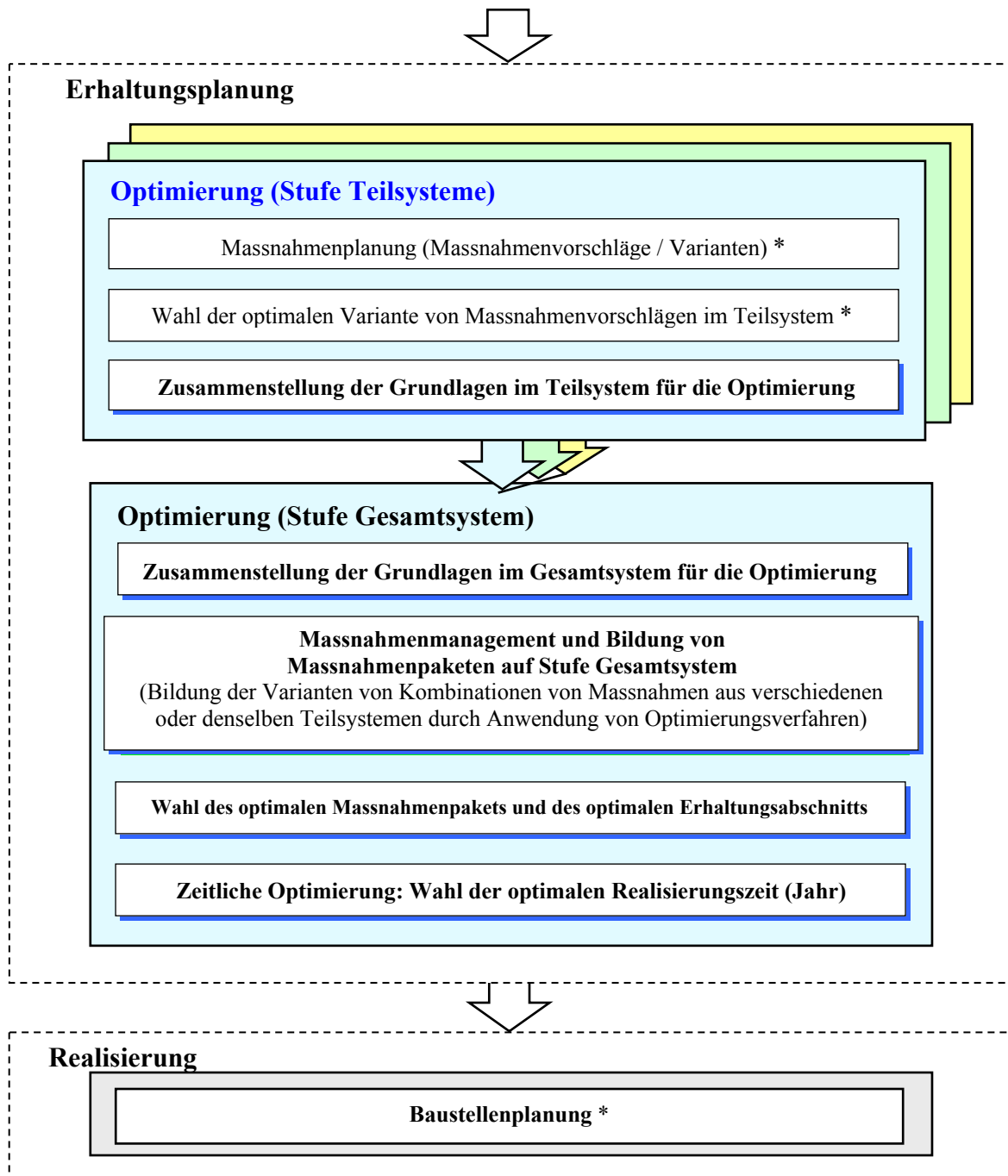
	tungen, Nebenanlagen und sonstigen Anlagen, (SN 640 900a).
Erhaltung	Die Erhaltung umfasst die Gesamtheit aller Massnahmen zur Gewährleistung der Betriebs- und Bauwerksicherheit sowie der Sicherstellung der Anlagesubstanz und des Anlagewertes der Strassenverkehrsanlage, (SN 640 900a).
Erhaltungsabschnitt	Der Erhaltungsabschnitt ist jener Strassenabschnitt, worauf ein Massnahmenpaket durchgeführt wird ¹ . Die Einzelmassnahmen eines Massnahmenpakets befinden sich entlang eines Strassenstückes, das als Erhaltungsabschnitt definiert wird ("UPLaNS").
Gesamtkosten	Die Gesamtkosten eines Objektes setzen sich zusammen aus den Komponenten „Objektkosten, bestehend aus Neubau- und Erhaltungskosten“ (auch Betreiberkosten genannt), „Strassenutzerkosten, bestehend aus Zeit-, Fahrzeugbetriebs- und Unfallkosten“ (auch Benutzerkosten genannt) sowie „Kosten Dritte“. Diese Kosten werden durch Baustellen und Zustand des Objektes verursacht und beziehen sich auf eine definierte Zeitperiode.
Lebenszykluskosten	Umfasst die Zeitperiode die gesamte Lebensdauer des Objektes, werden die Gesamtkosten als die Lebenszykluskosten bezeichnet.
Gesamtsystem Erhaltungsmanagement	Das Erhaltungsmanagement umfasst alle Führungsaufgaben, die zur Erhaltung und Bewirtschaftung der Strassenverkehrsanlagen notwendig sind. Dabei werden bautechnische, ökologische und ökonomische Kriterien berücksichtigt, (SN 640 900a).
Indikatoren der Massnahmen	Indikatoren der Massnahmen sind die charakteristischen quantifizierbaren Eigenschaften der Einzelmassnahmen, welche für die Optimierung auf Stufe Gesamtsystem relevant sind.
Koordination	Koordination bedeutet Realisierung von Erhaltungsmassnahmen an Fahrbahnen, Kunstbauten und Technischen Ausrüstungen auf einem Erhaltungsabschnitt im gleichen Zeitfenster. Durch die Koordination wird eine Verbesserung des gesamten Nutzen-/ Kostenverhältnisses des Massnahmenpaketes angestrebt.
Management der Strassenerhaltung (MSE)	Synonymer Begriff für Erhaltungsmanagement der Strassenverkehrsanlagen
Massnahmen	Unter Massnahmen werden alle organisatorischen, baulichen und technischen Tätigkeiten der Überwachung, des betrieblichen und baulichen Unterhalts sowie der Veränderung verstanden, (SN 640 900a).
Massnahmenmanagement	Das Massnahmenmanagement im Gesamtsystem umfasst alle Tätigkeiten zur kurz-, mittel- und langfristigen optimalen Wahl und Anordnung von Massnahmen. Es zielt auf eine Minimierung der Gesamtkosten ab und zeigt die Auswirkungen (Zustandsveränderung, Mehrkosten usw.) einer Abweichung von der optimalen Massnahmenwahl auf, (SN 640 900a). Das Ergebnis des Massnahmenmanagements ist das Massnahmenpaket (Erhaltungsabschnitt).
Massnahmenoptionen	Die Massnahmenoptionen (vor allem bei Kunstbauten verwendeter Begriff) sind potentielle Einzelmassnahmen zur Erhaltung (Instandsetzung) eines Bauwerks, welche durch die Massnahmenplanung generiert werden.
Massnahmenpaket	Ein Massnahmenpaket ist eine Kombination von Einzelmassnahmen aus verschiedenen Teilsystemen oder demselben Teilsystem, welcher zur gleichzeitigen Realisierung gebildet wird. Ein Massnahmenpaket bezieht sich auf einen Erhaltungsabschnitt.
Massnahmenplanung	Die Massnahmenplanung in den Teilsystemen umfasst die technische Abklärung bzw. Festlegung der Massnahmen (bzw. -optionen) aufgrund der Bewertung und Beurteilung von Zuständen und Zustandsentwicklungen unter Berücksichtigung von

¹ In der Regel liegt dieser Abschnitt auf der gleichen Strassenachse. Eine Ausnahme kann bei Kreuzungen vorkommen, wo sich der Erhaltungsabschnitt auf mehreren Strassenachsen verteilen kann.

	Erhaltungsstrategien, (SN 640 900a).
Monetäre Bewertung	Diese Methode besteht aus monetärer Quantifizierung aller Kriterien. Diese Methoden erfordern die Ermittlung von genauen Kostenansätzen und Einschätzung von Lebensdauer (Gebrauchsdauer) der Objekte, sowie Anwendung eines (über längeren Betrachtungszeitraum als durchschnittlich geltenden) Zinsfusses (Diskontsatz).
Monetarisierung	Monetarisierung bedeutet die Quantifizierung eines Wertes (oder eines Ergebnisses) in Geldeinheiten.
Multikriterielle Bewertung	Bei der multikriteriellen Bewertung werden nebst monetär quantifizierbaren Eigenschaften der Massnahmen (Gesamtkosten, Gesamtnutzen, etc.) auch weitere Merkmale berücksichtigt, welche quantitativ jedoch nicht ausschliesslich monetär beschrieben und erfasst werden (z.B. Eignung zur Erreichung von funktionalen Erhaltungszielen).
Optimierung im Gesamtsystem	Optimierung bedeutet örtliche und zeitliche Koordination von Erhaltungsmaßnahmen über einen längeren Betrachtungszeitraum, mit dem Ziel den gesamten Nutzen zu maximieren. Bei der Optimierung werden je nach Realisierungszeitpunkt unterschiedliche Einzelmaßnahmen der verschiedenen Teilsysteme verwendet.
Optimierung innerhalb eines Teilsystems	Optimierung innerhalb eines Teilsystems bedeutet die Ermittlung (Planung) von multikriteriell oder wirtschaftlich optimaler Einzelmaßnahme in dem Teilsystem.
Realisierungszeitplan	Der Realisierungszeitplan ist eine Liste der Realisierungszeitpunkte der Massnahmen. Diese Liste enthält pro Lösungsvariante bestimmte Merkmale wie Identifikation, Objektkosten, Strassennutzerkosten, Zeit der Ausführung u. a. m.
Teilsysteme	Bausteine des Gesamtsystems Erhaltungsmanagement, welche sowohl objektbezogen (für Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen, Kunstbauten, Technischen Ausrüstungen, Nebenanlagen, etc.), als auch nicht-objektbezogen (Baustellenplanung) gegliedert sind (SN 649 900a).
Zeitliche Optimierung	Die zeitliche Optimierung bedeutet die Ermittlung des optimalen Zeitpunktes der Realisierung eines Massnahmenpakets.
Zielfunktion	Zielfunktion ist der der mathematische Ausdruck eines Wertes, der zu optimieren (maximieren oder minimieren) ist.

1.6 Optimierungsprozess

Im Erhaltungsmanagement kann der Ablauf der Optimierung generell wie folgt angegeben werden (vgl. Abbildung 1):



*: Nicht Gegenstand des Forschungsauftrags

Abbildung 1: Ablauf des Optimierungsprozesses im Erhaltungsmanagement

Die einzelnen Stufen werden nachfolgend erläutert.

Stufe Teilsysteme: Zunächst werden auf Stufe Teilsysteme die optimalen Massnahmenvarianten ermittelt und bei Bedarf auch ein (provisorischer) Realisierungszeitplan erstellt.

Auf dieser Stufe erfolgt die Optimierung, je nach Verfahren, in der Regel so-

wohl nach den objektbezogenen Kriterien, wie „baulicher Zustand“, „Rest-Lebensdauer“ und „funktionelle Bewertung der Objekte“ [3], als auch nach den massnahmenbezogenen Kriterien, wie „Ursachen“, „Kosten“, „Wirkungsdauer“ und „Verkehrsbehinderungen“.

Ergebnis: Varianten von optimalen (und sub-optimalen) Massnahmen pro Teilsystem

Stufe Gesamtsystem: Die für die Teilsysteme relevanten Kriterien werden auf der Stufe Gesamtsystem teilweise wieder berücksichtigt (z.B. der „bauliche Zustand“ der Objekte bei der Wahl des optimalen Erhaltungsabschnitts und seines Realisierungszeitpunktes). Zusätzlich wird auf dieser Stufe das Kriterium „Nutzen der Massnahme“ herangezogen.

Auf dieser Stufe werden die Vorschläge bezüglich Massnahmenvarianten (Massnahmenvorschläge) aus den Teilsystemen miteinander so kombiniert, dass dadurch den Erhaltungsabschnitt festgelegt und ein definitiver Realisierungszeitplan erstellt werden kann.

Ergebnis: Abgegrenzter Erhaltungsabschnitt mit optimalem Massnahmenpaket und optimalem Realisierungszeitpunkt

Die beiden Schritte „Massnahmenmanagement und Bildung von Massnahmenpaketen“ sowie „Wahl des optimalen Erhaltungsabschnitts“ werden nachfolgend erläutert.

Im Schritt „Massnahmenmanagement und Bildung von Massnahmenpaketen“ werden mehrere Varianten des Erhaltungsabschnitts generiert. Danach wird die vorteilhafteste nach folgenden Kriterien bestimmt.

Die für die Stufe Gesamtsystem relevanten Kriterien sind vor allem „Nutzen“, „Kosten“ und „Priorität der Massnahmen“ (ermittelt im Teilsystem).

Das Kriterium „Priorität“ ist ein von den Zustandsmerkmalen abgeleitetes Kriterium und berücksichtigt die wirtschaftliche und funktionale Wirkung einer zeitlich auf- oder vorgeschobenen Massnahme.

Mit dem Kriterium „Kosten“ wird bei der Wahl des Erhaltungsabschnitts die finanziellen Randbedingungen (Budget) der Massnahmen überprüft.

Das Kriterium „Nutzen“ wird als Gegengewicht zum Kriterium „Kosten“ bei der Berechnung des Nutzen/Kosten- Verhältnisses der optimierten Massnahmenpakete herangezogen.

Der Schritt „Wahl des optimalen Erhaltungsabschnitts“ wird die vorteilhafteste Variante von Massnahmenpaket ausgewählt und anschliessend seine optimale Realisierungszeit ermittelt.

Nachfolgend werden zunächst die Grundlagen und Kriterien der Optimierung in den Teilsystemen beschrieben.

1.6.1 Grundlagen der Optimierung bei den Bahnbahnen

Im Teilsystem Bahnbahnen (PMS) werden sowohl multikriterielle, als auch wirtschaftliche Optimierungsverfahren angewendet. Als Beispiel für die Anwendung der multikriteriellen Optimierung wird das Konzept, wie es im Kanton Graubünden angewendet wird, kurz erläutert.

Gemäss diesem Konzept werden die Massnahmenvarianten aufgrund ihrer Eignung zur Erreichung der funktionalen gewichteten EM- Ziele beurteilt und bewertet. Damit wird eine Rangfolge für die Massnahmenvarianten gebildet [6]. Die Gewichtung der Ziele erfolgt subjektiv. Es könnten dazu aber auch objektive Bewertungsverfahren verwendet werden. Entsprechende Methoden sind im Abschnitt 3.6.1 dieses Berichtes erläutert (u.a. gewichtete Summation, analytischer Hierarchieprozess, usw.).

Das im betrachteten Kanton angewendete Optimierungsverfahren für Bahnbahnen beinhaltet zwei Grundlagen- Modelle, nämlich:

▪ Massnahmen- Modell

Das Massnahmen- Modell ist ein strukturierter Katalog von den in diesem Kanton angewendeten „standardisierten“ Erhaltungsmassnahmen für die Fahrbahnen mit Angaben über:

- Eignung zur Erreichung der funktionalen² Ziele des Erhaltungsmangements
- durchschnittliche Einheitskosten
- erwartete Wirkungsdauer (bzw. Gebrauchs- oder Lebensdauer)
- weitere charakteristische (technische) Eigenschaften.

In diesem Modell werden die Massnahmen nach Massnahmentypen und Massnahmenarten unterschieden, wobei die Massnahmenarten zu den Massnahmentypen zugeordnet sind, (vgl. Tabelle 1).

Die quantifizierbaren charakteristischen Eigenschaften der Massnahmenarten (Einheitskosten, Wirkungsdauer, Zielerreichungsgrad) bilden die Elemente von spezifischen Kennzahlen, welche zur Selektion der optimalen Massnahmenart des vom System empfohlenen Massnahmentyps führen. Damit ist es möglich auch mehrere Massnahmenvarianten (1. Option mit der höchsten Kennzahl, 2. Option mit der zweithöchsten Kennzahl, u.s.w.) zu generieren.

▪ Optimierungs- Modell

Dieses Modell besteht aus einer Tabelle von definierten (massgebenden) Zustandsbereichen der Fahrbahn (differenziert für einzelne Strassentypen wie Nationalstrassen sowie kantonale Haupt- und Verbindungsstrassen), zu welchen ein optimaler Massnahmentyp (oder eine optimale Massnahmenart) zugewiesen wird.

Der definierte (massgebende) Zustandsbereich ist durch "Schadenschwere" und "Schadenausmass" der Zustandsmerkmale beschrieben.

Die Angaben darüber, welcher Massnahmentyp für welchen Zustandsbereich als optimal gilt, kann aufgrund der kleinen Anzahl der standardisierten Massnahmen und der Möglichkeit ihrer eindeutigen Differenzierung objektiv festgelegt werden. Die Massnahmentypen werden in den darauf folgenden Planungsperioden systematisch überprüft und gegebenenfalls angepasst, (vgl. Tabelle 2).

Der Optimierungsprozess wird durch die Analyse der Veränderung der Eigenschaften (und Kennzahlen) der optimalen Massnahme in Abhängigkeit des Zustandsbereichs durchgeführt. Dadurch werden Erkenntnisse bzgl. Auswirkungen der zeitlichen Verschiebung der Realisierung der geplanten Massnahme gewonnen und ausgewertet.

In der Tabelle 2 „Optimierungs- Modell“ wird zwischen dem Kriterium Zustand (ausgedrückt in Zustandsbereich, der in Abhängigkeit von Schadenausmass und Schadensschwere, gemäss SN 640 925b ermittelt wird) und der optimalen Massnahme ein Bezug hergestellt (Zuweisung).

Dadurch wird es möglich, je nach Zustand, alle wichtigen Eigenschaften der als optimal geltenden Massnahmenart aus dem Massnahmen- Modell, unter Anwendung der Kennzahlen zu ermitteln.

Die so ermittelten Einzelmassnahmen aus dem Teilsystem Fahrbahnen können dann zur Bestimmung des optimalen Erhaltungsabschnitts auf Stufe Gesamtsystem mit Einzelmassnahmen aus anderen Teilsystemen kombiniert werden (Bildung von Massnahmenpaketen).

Anschliessend wird der optimale Zeitpunkt für die Realisierung der Erhaltungsmassnahmen (bestehend aus einem Massnahmenpaket) ermittelt. Dabei wird der im Teilsystem geplante Zeitpunkt der Realisierung der Einzelmassnahme in der Regel angepasst werden müssen.

² Diese sind gemäss der Norm SN 640 901 „Erhaltungsmangement: Zielsystem“: Betriebsbereitschaft, Leistungsfähigkeit, Verkehrssicherheit, Benutzerfreundlichkeit, Substanzerhaltung und Umweltverträglichkeit

Planungsrelevante Eigenschaften der Massnahmen (Teil I)														
Bauliche Massnahmen für flexible Beläge				Nr. <i>1)</i>	1 (Erfüllung funktionaler Ziele) Gewichtete Funktionale Hauptziele [%] Max. Zielerreichungsgrad (G) <i>4)</i>							Lebensdauer (Jahr)	Technische Eignung	
Massnahmentyp	Nr. <i>1)</i>	Massnahmenart (Beispiele)			BB 20	LF 5	VS 25	BF 10	SE 30	UV 10	Σ G		Be-lags-schicht-en	Zu-stands-merk-male
1	2	3		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Reparaturen	1.0	Rissanierung		1.01										
			1.04										
OB und Kaltmikobelag <i>3)</i>	2.0	Örtliche OB (= <20%)		2.01										
			2.06										
Instandsetzung	3.1	Erneuerung DS, 2 – 4 cm <i>2)</i>		3.05										
			3.12										
	3.5	Erneuerung Deck- und Binderschicht, 8 – 11 cm		3.51										
Teilweise Erneuerung	5.0	Teilweise Erneuerung Fahrbahnbelag, 10 – 22 cm (40% der Fläche)		5.01										
			5.04										
Neukonstruktion gesamter Oberbau	6.0	Erneuerung Fahrbahnoberbau, 60 cm		6.01										
			6.04										

1) Identifikationsnummer der einzelnen Massnahmen
2) DS = Deckschicht
3) OB = Oberflächenbehandlung
4) BB = Betriebsbereitschaft, LF = Leistungsfähigkeit, VS = Verkehrssicherheit, BF = Benutzerfreundlichkeit, SE = Substanzerhaltung, UV = Umweltverträglichkeit
5) K₁ = Lebensdauer/Kosten, K₂ = Lebensdauer x [G] / Kosten

Planungsrelevante Eigenschaften der Massnahmen (Teil II)												
Wirtschaftliche Effizienz					Umweltverträglichkeit				Zusatz- Kriterien			Bemerkungen
Kosten / m2 (CHF)	Kennzahl K ₁	Kennzahl K ₂ <i>5)</i>	Weitere Kennzahl K ₃	Rangfolge (K ₂)	Baustellendauer (W)	Ressourcenverbrauch	Deponiebedarf	Lärmverhalten	Spez. Beding. Für Realisier.	Zusätzliche Oberbaudicke (cm)	Folge-Massnahmen	
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27

Tabelle 1: Beispiel des Massnahmen- Modells des Kantons Basel- Stadt für Planung optimaler Erhaltungsmassnahmen für bitumenhaltige Beläge (ohne Daten)

Merkmalgruppe	Merkmale (Verhalten)	Zu-stands-bereich <i>1)</i>	Optimale Massnahme pro Strasse			Bemerkungen
			Verkehrslastklasse I (T5 / T6)	Verkehrslastklasse II (T3 / T4)	Verkehrslastklasse III (T1 / T2)	
Oberflächenglätte	Abgedrückte Ränder, Längsrisse, Belagsrandrisse	Kleine Schäden	Rissanierung	Rissanierung	-	
		Mittlere Schäden	Teilweise Erneuerung Fahrbahnbelag	Teilweise Erneuerung Fahrbahnbelag	Rissanierung	
		Grosse Schäden	Erneuerung Fahrbahnbelag	Erneuerung Fahrbahnbelag	Erneuerung Fahrbahnbelag	

1): "Kleine Schäden", wenn [A] * [S] <= 2.0; "Mittlere Schäden", wenn [A] * [S] > 2.0 und <= 4.0; "Grosse Schäden", wenn [A] * [S] > 4.0, nach SN 640925b

A = Schadenausmass, S = Schadenshöhe (nach SN 640 925b)

Tabelle 2: Optimierungs- Modell für Fahrbahnen des Kantons Basel- Stadt für bitumenhaltige Beläge für die einige Merkmale der Merkmalgruppe „Strukturelle Schäden“

1.6.2 Grundlagen der Optimierung im BMS

Das Teilsystem Kunstbauten umfasst Brücken, Viadukte, Durchlässe, Galerien, Tagbautunnels, Stütz- und Schutzkonstruktionen. Diese Bauwerke (aus der Systemoptik Objekte) werden in der Regel in Bauwerksteile gegliedert. Entsprechend beinhaltet eine Massnahme am Bauwerk eine oder mehrere Bauwerksteilmassnahmen.

Bei der Erhaltungsplanung von Kunstbauten wird grundsätzlich zwischen dem Unterhalt und der Umgestaltung unterschieden. Mit dem Unterhalt sollen die sicheren und funktionstüchtigen Strassenverbindungen langfristig erhalten bleiben. Im Grundsatz wird dabei keine zusätzliche (erhöhte) Nutzung ermöglicht. In diesem Sinne kann der **Unterhalt** wie in der Norm SIA 469 [13] definiert werden:

Der Unterhalt bezweckt das Bewahren oder Wiederherstellen eines Bauwerks ohne wesentliche Änderung der Anforderungen.

Mit der Umgestaltung wird hingegen eine zusätzliche (erhöhte) Nutzung ermöglicht. In der Norm SIA 469 [13] ist die **Umgestaltung** wie folgt definiert:

Die Umgestaltung (Veränderung) bezweckt die Erhaltung des Bauwerks durch den Einbezug von neuen Anforderungen.

Das Ziel der Umgestaltungsmassnahmen ist somit eine Verbesserung der Systemindikatoren eines Objektes über den Neubauwerten. Mit der Brückenerweiterung z. B. wird die Leistungsfähigkeit dieser Brücke über den ursprünglichen Neubauwert erhöht oder mit einer Brückenverstärkung beispielsweise wird die Tragsicherheit erhöht und damit der Neubauwert gesteigert. Die Umgestaltungsmassnahme bewirkt eine langfristige Reduktion von Benutzerkosten. Mit den Unterhaltsmassnahmen wird im Wesentlichen der Neubauzustand wiederhergestellt. Dies bedeutet, dass die Systemindikatoren eines Objektes auf die Neubauwerte gebracht werden. Die Unterhaltsmassnahmen haben in der Regel keine Veränderung der Benutzerkosten zur Folge.

Bedingt durch die unterschiedliche Natur von Unterhalts- und Umgestaltungsmassnahmen werden sie bei der Optimierung unterschiedlich behandelt. Die Unterhaltsplanung (Ermittlung von optimalen Unterhaltsmassnahmen) wird weitgehend unabhängig von der Umgestaltungsplanung (Ermittlung von optimalen Umgestaltungsmassnahmen) erfolgen. Da der Unterhaltsbedarf in der Schweiz den Umgestaltungsbedarf weit übersteigt liegt der Schwerpunkt der Erhaltungsplanung und darin eingebetteten Optimierungsprozesse bei der Unterhaltsplanung. In den darauf folgenden Abschnitten wird deshalb v. a. die Unterhaltsplanung behandelt.

Weitere detaillierte Angaben über die Optimierung im Teilsystem Kunstbauten(BMS) befinden sich im Anhang zu diesem Bericht.

1.6.3 Grundlagen der Optimierung im EMT

Seit mehreren Jahren sind einige Kantone dazu übergegangen, die EM-Anlagen systematisch zu „bewirtschaften“, d.h. die Erhaltung mit einem Informatikwerkzeug zu unterstützen. Dieses Instrument beinhaltet auch die Zustandserfassung und –Bewertung und ermöglicht dadurch eine Abwägung und Optimierung verschiedener Massnahmen.

Die Zustandsbewertung der Anlagen basiert auf dem Ansatz, pro Anlage eine Anzahl von Kenngrössen zu definieren und mit diesen eine Zustandsbewertung durchzuführen. Die richtige Wahl der Kenngrössen wird zum entscheidenden Faktor. Die Kenngrössen sollten unabhängig voneinander sein (orthogonal), relevant für das betreffende System und auch mit vertretbarem Aufwand messbar.

Die mathematische Erfassung des Zustands über probabilistische Kenngrössen (Ausfallwahrscheinlichkeit, Zuverlässigkeit, MTBF: Mean Time Between Failures, MTTR: Mean Time To Repair, etc) ist in der Schweiz nicht üblich und wird auch international im Strassenumfeld kaum angewandt. Der Grund liegt darin, dass EM-Anlagen im Strassenbereich immer eine Sammlung von verschiedensten Systemen sind, und eine rechnerische Bewältigung ausserordentlich aufwendig (bis unmöglich) wird. Zudem sind von den Systemlieferanten immer noch kaum Wahrscheinlichkeits-Kennzahlen auf Systemebene erhältlich. Derartige Werte liegen höchstens auf Komponenten-Ebene vor. Eine andere

Möglichkeit, die Zuverlässigkeit von elektronischen Systemen mit Markov- Prozessen zu beschreiben, scheidet ebenso an der mangelnden Verfügbarkeit von Ausfall- und Reparatur-Raten sowie an der Komplexität der Systeme.

In der Praxis werden deshalb zumeist zwei Typen von Kenngrößen angewandt: heuristische und physikalische Kenngrößen. Mit *heuristischen* Kenngrößen wird zum Beispiel der Rostbefall einer Aufhängung beurteilt (stark, mittel, klein) oder auch das damit verbundene Risiko eines Schadens (gering, mittel, gross). *Physikalische* Kenngrößen sind am meisten verbreitet, da sie auch meistens klar messbar sind: Temperatur, Spannung, Stromstärke, Betriebsstunden.“

Eine weitere Möglichkeit, die Zustandsbeurteilung durchzuführen, wurde im Fachkonzept EM für UPLaNS erarbeitet. Die Zustandsbeurteilung mit den Methoden der Fuzzy- Theorie. Dieser Ansatz erlaubt die Entwicklung von Zustandsprofilen über alle Teilanlagen eines Strassenabschnitts. Der Wahl der Zustandskenngrößen haftet allerdings der Nachteil an, dass sie nicht voneinander unabhängig sind; dafür haben sie einen sehr guten Praxisbezug. Nachfolgend sind Beispiele für die Kenngrößen angegeben.

- Lebensdauerkoeffizient
- Sicherheitskoeffizient
- Störungskoeffizient
- Spezifische technische Kenngrößen
- Hardware- und Software-Version
- Ersatzteile
- Externer Support
- Energieverbrauch

1.6.4 Grundlagen der Optimierung im Gesamtsystem Erhaltungsmanagement

Grundlagen der Optimierung im Gesamtsystem sind Informationen und Methoden, welche einerseits für die Bildung von Erhaltungsabschnitten und andererseits für die Ermittlung des optimalen Zeitpunktes der Realisierung von Massnahmenpaketen erforderlich sind.

Diese Informationen sind Elemente der Optimierung und beinhalten nebst übergeordneten Vorgaben und Randbedingungen auch die Ziele der Optimierung sowie die Indikatoren der Massnahmen, (charakteristischen Eigenschaften der Einzelmassnahmen) welche für die Optimierung relevant sind.

Weitere Elemente der Optimierung, welche für die Optimierung auf Stufe Gesamtsystem als der Grundlagen gelten, sind:

- Kriterien für die Selektion der Massnahmen, bzw. Massnahmenvorschläge aus den Teilsystemen
- Grundlagen für die Bestimmung des Vorranges der Anforderungen der Teilsysteme.

Als Resultat der Optimierung auf Stufe Gesamtsystem werden Erhaltungsabschnitte gebildet, welche die Einzelmassnahmen zu Massnahmenpaketen gruppieren (örtliche Koordination).

Siehe dazu noch folgende Abschnitte:

- 3.11: „Genereller Ablaufprozess der Optimierung“, Abbildung 11 sowie
- 3.14.3: „Definition von Massnahmenoptionen aus den Teilsystemen“.

2. Situationsanalyse

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Arten der Optimierungsverfahren vorgestellt. Anschliessend werden die in der Schweiz bisher angewendeten Verfahren der multikriteriellen und wirtschaftlichen Optimierung näher beschrieben. Zudem werden Ergebnisse aus Literaturstudien zu diesen Themen aufgezeigt.

Das Ziel der Situationsanalyse ist die Schaffung von Grundlagen für das Konzept der Optimierung auf Stufe Gesamtsystem des Erhaltungsmanagements.

2.1 Arten der Optimierungsverfahren

Allgemein werden die Optimierungsverfahren den Methoden des Operations Research zugeordnet, welche selbst ein Teil der Entscheidungsmethoden sind (vgl. [Abbildung 2](#)).

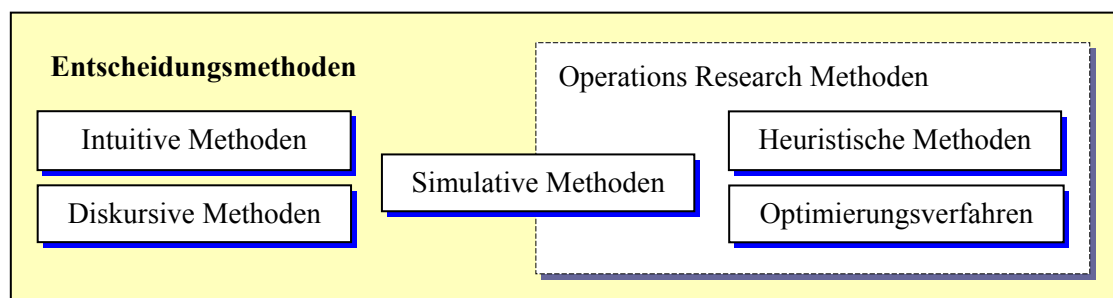


Abbildung 2: Entscheidungsmethoden

Die *intuitiven Methoden* wie Brainstorming, 635³ oder Delphi⁴ charakterisieren sich dadurch, dass in relativ kurzer Zeit Lösungsvorschläge für ein Problem erarbeitet werden können. Sie verzichten jedoch auf eine Analyse und Problemstrukturierung, womit sie sich in der Regel nur für einfachere Problemstellungen eignen.

Die *diskursiven Methoden* sind gekennzeichnet durch systematische (und hierarchisch gegliederte) Problemstrukturierung mit Analyse und Beschreibung der System- Elemente sowie ihrer gegenseitigen Beziehungen.

Die *simulativen Methoden* (Simulationen) werden immer häufiger für Lösung komplexer Aufgabenstellungen eingesetzt. Sie bilden wirklichkeitsäquivalente Lösungsszenarien durch Abstraktion der Realität (Elimination von nicht-lösungsrelevanten Parametern) und eignen sich gut für die Computer-Programmierung.

Die *heuristischen Methoden* sind Verfahren, bei denen die Schritte zur Lösungssuche eindeutig festgelegt sind und entsprechend angegeben, bzw. programmiert werden können (so genannte Methode der heuristischen Programmierung). Sie zählen wie die Optimierungsmethoden zu den Verfahren des Operations Research⁵.

Alle *Methoden des Operations Research* (heuristische Methoden und Optimierungsverfahren) eruiieren mit mathematischen Entscheidungsmodellen die vorteilhafteste (optimale) Lösung innerhalb einer Menge von Lösungsvarianten.

³ 6 Personen unterbreiten je 3 Lösungsvorschläge innerhalb 5 Minuten für ein Problem.

⁴ Systematische Bewertung der Antworten von Fachexperten zu einer Reihe von Fragebögen über bestimmtes Thema sowie iterative Aggregation der Antworten zu einer Gruppenantwort, die nach jeder Fragebogenaktion den Fachexperten, zur sukzessiven Ermittlung der optimalen Lösung, mitgeteilt wird.

⁵ Heuristik wird in der Literatur als Prinzipien oder Regeln definiert, die dazu beitragen, den Aufwand der Lösungssuche zu verringern.

Die Optimierungsverfahren legen zunächst die Lösung als Konzept vor (konzeptioneller Schritt), das im weiteren Schritt "normalisiert" und als mathematische Funktionen umgeschrieben (logischer Schritt) wird. Das Lösungskonzept kann dann im letzten Schritt als Software programmiert werden.

In diesem Forschungsauftrag wird primär der konzeptionelle Schritt der Optimierungsverfahren behandelt.

Die *Optimierungsverfahren* sind zahlreich. Die am häufigsten angewendeten Verfahren sind die Kosten/ Nutzen-Analyse und multikriterielle Verfahren. Neuerdings werden auch gesellschaftlich relevante Kriterien bei der Optimierung berücksichtigt. Die letztgenannten Verfahren können auch als erweiterte multikriterielle Verfahren bezeichnet werden.

Jedes dieser Verfahren hat bestimmte Stärken und Schwächen. Je nach Situation wird ein bestimmtes Verfahren (allein oder in Kombination mit anderen) die optimale Lösung erbringen. Die Wahl des Verfahrens hängt stark von der Zielsetzung der Optimierung sowie von der Verfügbarkeit und Beschaffung der relevanten Daten ab.

Während für die wirtschaftliche Optimierung der Nutzen der Massnahmen vollumfänglich monetär berechnet werden muss, ist dies bei der multikriteriellen Bewertung nicht zwingend. In diesem Fall können die Massnahmen bezüglich ihrer Eignung zur Erreichung verschiedener Ziele sorgfältig analysiert und quantitativ oder qualitativ beurteilt werden.

Nachfolgend werden die beiden Verfahren der multikriterielle und der wirtschaftliche Optimierung näher beschrieben.

2.1.1 Multikriterielle Optimierung

In diesem Verfahren werden die Massnahmenoptionen (Lösungsvarianten) aufgrund ihrer Eignung zur Erreichung einer Anzahl von Zielen beurteilt. Diese Beurteilung kann für einige der Ziele quantitativ, durch festgesetzte Indikatoren, wie Geldeinheit, Zeiteinheit, Anzahl Personal, etc. oder nur qualitativ (verbale Beschreibung) erfolgen.

Die Erreichung der Ziele gilt für die Massnahmenoptionen als ihr Nutzen und wird als solcher quantifiziert und den Kosten gegenübergestellt (Gesamtkosten oder Lebenszykluskosten).

Dieses Verfahren bietet (dank der Gewichtung der Ziele) dem Entscheidungsträger ein Steuerungsinstrument, womit die Erreichung einzelner Ziele verfolgt und gesteuert werden kann.

Die Gewichtung der Ziele erfolgt in der Regel subjektiv oder methodisch objektiv (vgl. Abschnitt 3.6.1.2 „Methode der gewichteten Summation“). Es besteht zudem die Möglichkeit einer sachlich objektiven Gewichtung, aufgrund der im Voraus festgelegten Kriterien, wie funktionale Bedeutung der Ziele, Aufwand zur Erreichung der Ziele oder Durchführung gezielter Ursachen- und Kostenanalysen der Kriterien.

Die Ziele können auch als ungewichtete Grössen in diesem Verfahren verwendet werden. Das folgende Beispiel zeigt das Ergebnis einer multikriteriellen Analyse von 4 Varianten, bzgl. ihrer Rangfolge der Zielerreichung für ungewichtete und gewichtete Ziele.

In diesem Beispiel sind die Rangfolgen der Varianten in beiden Fällen fast dieselben, der quantitative Unterschied der Varianten ist im Falle der ungewichteten Ziele jedoch viel ausgeprägter (Abbildungen 3 und 4).

Beispiel für ZEG der Varianten (%), (ungewichtete Ziele)				
MSE- Ziel	A	B	C	D
BB	85	70	85	65
LF	80	90	50	60
VS	70	75	80	95
BF	60	80	70	90
SE	65	75	90	85
UV	70	60	65	80
Summe	430	450	440	475
Rang	4	2	3	1

Beispiel für ZEG der Varianten (%), (gewichtete Ziele)					
	A	B	C	D	Gewicht
BB	21.25	17.50	21.25	16.25	0.25
LF	4.00	4.50	2.50	3.00	0.05
VS	14.00	15.00	16.00	19.00	0.20
BF	9.00	12.00	10.50	13.50	0.15
SE	16.25	18.75	22.50	21.25	0.25
UV	7.00	6.00	6.50	8.00	0.10
Summe	71.5	73.75	79.25	81.00	
Rang	4	3	2	1	

LEGENDE: ZEG = Zielerreichungsgrad, BB = Betriebsbereitschaft, LF = Leistungsfähigkeit, VS = Verkehrssicherheit, BF = Benutzerfreundlichkeit, SE = Substanzerhaltung, UV = Umweltverträglichkeit

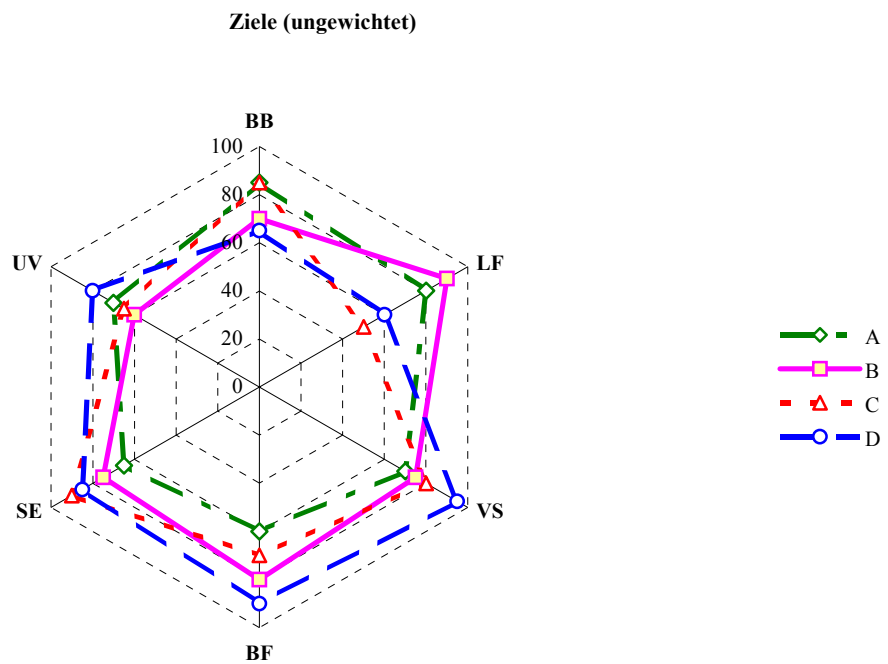


Abbildung 3: Vergleich- der Varianten mit ungewichteten Zielen im Radialdiagramm

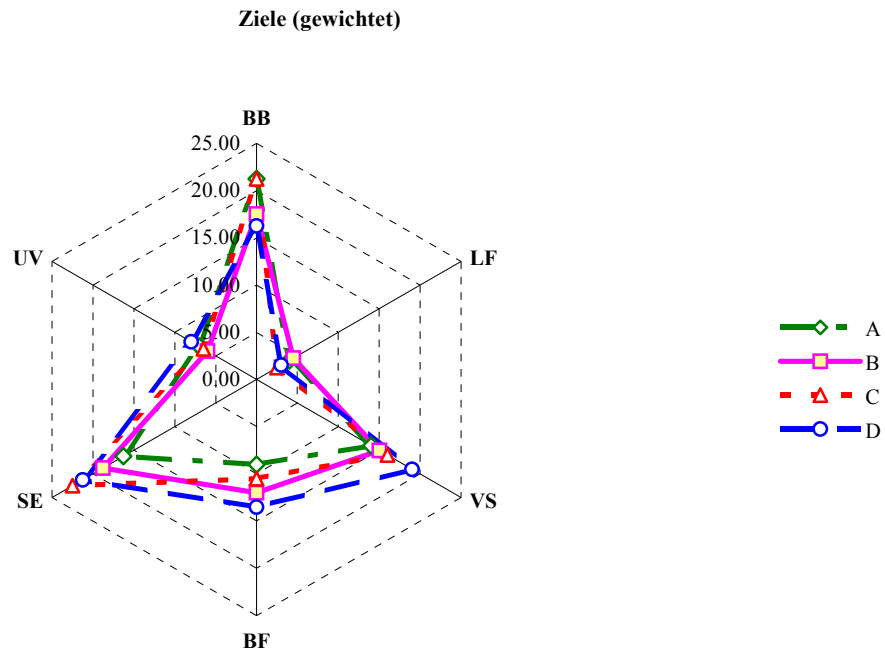


Abbildung 4: Vergleich der Varianten mit gewichteten Zielen im Radialdiagramm

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen eine Möglichkeit zur Darstellung der Ergebnisse einer multikriteriellen Bewertung, Radialdiagramm (auch als "Spinnennetz-Diagramm" bekannt). Dieses Diagramm eignet sich, dank der Visualisierung des Verhaltens einzelner Varianten, sehr gut zur Darstellung der verschiedenen Ziele

2.1.2 Wirtschaftliche Optimierung

Die ausführliche Beschreibung der theoretischen Grundlagen der wirtschaftlichen Optimierung, d.h. der Optimierung auf der Basis einer monetären Bewertung, bildet den Inhalt des Kapitels 3 dieses Berichtes. Im Anhang des Berichtes ist die Anwendung dieses Verfahrens am Beispiel des Teilsystems Erhaltungsmanagement der Kunstbauten erläutert.

2.2 Anwendung der Optimierungsverfahren in der Schweiz

In der Schweiz werden Optimierungsverfahren auf Stufe Teilsysteme durch nur wenige kantonale Verwaltungen, welche ein systematisches Erhaltungsmanagement praktizieren ansatzweise angewendet. Dazu werden zum Teil auch Software-Produkte verwendet. Es betrifft dies sowohl wirtschaftliche als auch multikriterielle Optimierungsverfahren. Insbesondere die Möglichkeiten der Kombination der einzelnen Verfahren sollen u.a. hier im Rahmen dieser Forschungsarbeit untersucht werden.

Bei den multikriteriellen Optimierungsverfahren ist zu beachten, dass die Gewichtung der Kriterien häufig Änderungen unterworfen ist, welche zum Teil gesellschaftspolitisch bedingt sein können. So haben die verheerenden Tunnelkatastrophen in den Jahren 1999 und 2001 z.B. zu einer grossen Änderung von Anforderungen (und Richtlinien) bez. der technischen Ausrüstungen geführt. Dadurch wurde die Gewichtung des Ziels Verkehrssicherheit sofort erhöht (mit dem speziellen Aspekt der Sicherheit des Verkehrsteilnehmers im Brandfall) und allen anderen Zielen vorangestellt.

2.3 Literaturstudie

Die Optimierungsverfahren werden, wie bereits erläutert, generell zu den Entscheidungsmethoden zugeordnet, wozu in der Mathematik (Operations Research) zahlreiche Literatur existiert. Für die Optimierung der Massnahmenplanung und Massnahmenwahl im Erhaltungsmanagement gibt es jedoch noch nicht viel Literatur. Immerhin existieren in einigen Kantonen gewisse Optimierungswerkzeuge, die im Erhaltungsmanagement von Teilsystemen eingesetzt werden. Über diese Produkte gibt es in der Regel keine veröffentlichten Angaben, da sie produktspezifisch sind. Oft existieren jedoch Berichte oder Anleitungen, die für ihre Benutzer verfasst wurden.

Zur Ermittlung der Dringlichkeitsreihung der Massnahmen liegt ein Forschungsbericht vom VSS vor [6]. Darin werden die Massnahmen aufgrund ihrer Fähigkeit zur Erreichung der gesetzten Ziele bewertet. Diese Bewertung gilt zusammen mit der funktionellen Bewertung des Objektes, wofür die Massnahme vorgesehen ist, als massgebende Faktoren zur Bestimmung der Dringlichkeit der Massnahme.

Auch bezogen auf die Technischen Ausrüstungen von Strassen/Tunnelanlagen gibt es wenig Literatur, ausser Publikationen und Richtlinien von Tiefbauämtern, staatlichen Betreiberorganisationen sowie Unterlagen für die Nationalstrassen des ASTRA.

Betrachtet man die Teilsysteme Fahrbahnen, Kunstbauten und Technische Ausrüstungen rein technischen, gibt es eine Flut von Publikationen und Studien, wobei ein Trend von der optimalen Erhaltung (Maintenance Excellence) zum Asset Management (life-cycle Analysis, life-cycle cost Analysis LCCA) festzustellen ist.

In der Regel spielten bis heute die Technische Ausrüstungen im Asset Management eher eine untergeordnete Rolle – Beispiel Federal Highway Administration (USA): In ihrer Publikation „Asset Management Primer“ gibt es ein Pavement Management System PMS (Teilsystem Fahrbahnen) und ein Bridge Management System BMS (Teilsystem Kunstbauten), aber nichts Vergleichbares für die Technische Ausrüstungen.

Im Kapitel 6 „Literaturverzeichnis“ sind Hinweise auf die für diesen Bericht relevanten Literaturangaben zu finden.

3. Konzept (Theoretische Grundlagen der Optimierung)

In diesem Kapitel werden zwei Optimierungsverfahren (multikriterielle und wirtschaftliche, bzw. nicht-monetäre und monetäre Optimierung) beschrieben und miteinander verglichen, um daraus Empfehlungen für ihre Anwendung abzuleiten. Anschliessend werden Methoden und Beispiele für die Ermittlung des optimalen Zeitpunktes der Realisierung eines Massnahmenpakets (zeitliche Optimierung auf Stufe Gesamtsystem) aufgezeigt.

3.1 System und sein Aufbau

In der Systemtheorie wird das System als ein aus mehreren Elementen (Teile) zusammengesetztes und gegliedertes Ganzes definiert. Ein System besteht im Allgemeinen aus folgenden Komponenten:

1. Objekten, welche sowohl physisch als auch abstrakt sein können
2. Attribute, welche die Eigenschaften des Systems and dessen Elemente oder Teile beschreiben
3. Beziehungen zwischen den Objekten des Systems
4. Umwelt, welche das System beeinflussen kann

Das System kann separate Einheiten enthalten, welche wiederum als ein Ganzes betrachtet werden können. Diese Einheiten werden als Teilsysteme verstanden. Im Rahmen dieses Forschungsauftrags umfasst das System „Strasse“, d. h. das Gesamtsystem mehrere Teilsysteme, nämlich: Strassenoberbau (Fahrbahnen), Kunstbauten, Tunnels und elektromechanische Anlagen (Teil der technischen Ausrüstungen).

Diese Teilsysteme bestehen aus physischen Objekten. Das Teilsystem Kunstbauten umfasst z. B. die Gesamtheit aller Kunstbauten, das Teilsystem Strassenoberbau umfasst die gesamte Strasse ausserhalb der Kunstbauten usw. Jede Kunstbaute, jedes Strassenstück und jede elektromechanische Anlage ist wiederum ein System bzw. ein Teilsystem, welches weiter gegliedert werden kann.

So bestehen eine Kunstbaute aus Bauwerksteilen, ein Fahrbahnoberbau aus mehreren Schichten und eine elektromechanische Anlage aus diversen Komponenten.

Die Eigenschaften des Systems, der Teilsysteme und Objekte werden durch Attribute beschrieben. Die Eigenschaften des Gesamtsystems werden z. B. mit den messbaren Attributen wie das Verkehrsaufkommen, Anzahl Fahrspuren, Spurbreiten usw. beschrieben.

Die Attribute eines Bauwerksteils beschreiben unter anderem dessen Geometrie, Beschaffenheit, gegenwärtigen Zustand usw. Jedes System oder jedes Objekt hat in der Regel eine relativ grosse Anzahl von Attributen, welche unter Umständen im Rahmen der Erhaltungsplanung keine Bedeutung haben. Die Attribute wie z. B. die Farbe der Leitplanken spielen bei der Erhaltungsplanung mit Sicherheit keine Rolle. Solche Attribute können weggelassen werden.

Die Wechselwirkung zwischen den Systemen und Objekten wird durch die Beziehungen beschrieben. Das Versagen eines Bauwerksteils kann z. B. eine ganze Reihe von Konsequenzen für das System haben. Diese kausalen Zusammenhänge werden mit den Beziehungen modelliert. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sind vor allem die Beziehungen unter den Objekten der Teilsysteme auf einem Strassenabschnitt von Bedeutung.

Die Umwelteinwirkungen, worauf das System reagiert oder welche das System verändern können (sei es in seiner Zusammensetzung oder in seinen Eigenschaften) müssen ebenfalls berücksichtigt und entsprechend modelliert werden. Für das System Strasse umfassen diese Umwelteinwirkungen das Verkehrsaufkommen sowie die mechanischen und chemischen Einwirkungen. Diese Umwelteinwirkungen können auch die Werte der Kriterien verändern. Die Verfallgeschwindigkeit eines Bauwerksteils d. h. die Geschwindigkeit der Zustandsverschlechterung ist stark durch die Umwelteinwirkungen beeinflusst.

3.2 Kriterien

Bei der Wahl der Kriterien ist darauf zu achten, dass sie eindeutig und überschneidungsfrei sind. Die Anforderung nach Eindeutigkeit bedeutet, dass jedes Kriterium eine atomare d. h. nicht weiter zerlegbare Eigenschaft beschreibt. Die Überschneidungsfreiheit von zwei Kriterien bedeutet, dass sich diese Kriterien nicht gegenseitig beeinflussen. Falls zwei Kriterien nicht überschneidungsfrei sind bedeutet dies, dass mindestens ein Kriterium nicht eindeutig ist. Im Weiteren müssen die Kriterien subjektiv oder objektiv messbar sein.

Die Steuerzahler d. h. die Eigentümer der öffentlichen Strasseninfrastruktur sind an einem sicheren, wirtschaftlichen und behinderungsfreien Transport interessiert. Aus ihrer Sicht ergeben sich vor allem drei wichtige Kriterien für das System Strasse: Sicherheit, Betriebsbereitschaft und Leistungsfähigkeit. Diese Kriterien können relativ leicht quantitativ erfasst werden und bieten eine Grundlage zur Charakterisierung eines Strassenstückes.

Die quantitative Erfassung des oft zitierten Kriteriums Umweltverträglichkeit gestaltet sich für das System Strasse als eine kaum lösbare Aufgabe. Die Frage „wie viel“ eine Strasse umweltverträglich ist, enthält hinzu noch eine politische Brisanz. Aus diesem Grund wird auf eine Quantifizierung dieses Kriteriums verzichtet und folglich wird oft die Umweltverträglichkeit des Systems Strasse im Optimierungsprozess nicht berücksichtigt.

Die Kriteriumswerte beschreiben den Zustand des Systems, weshalb sie oft als Zustandsindikatoren bezeichnet werden. In der Regel werden für jedes Kriterium die zulässigen Werte definiert. Diese Werte dürfen nicht überschritten bzw. nicht unterschritten werden. Bei der Optimierung werden hierfür die entsprechenden Randbedingungen definiert.

3.3 Massnahmen

Die Massnahmen oder Interventionen dienen zur Verbesserung des Systemzustandes. Dies bedeutet, dass die Massnahmen eine vorteilhafte Veränderung von Zustandsindikatoren bewirken sollen. Für jeden beliebigen Systemzustand kann man mehrere Massnahmenvarianten erarbeiten. Die Erarbeitung dieser Massnahmen kann aufgrund des Zustandes entweder automatisch oder durch einen Experten manuell erfolgen. Das Ziel des Erhaltungsmanagements ist es die optimale Massnahme zu ermitteln.

Die Massnahmen haben in der Regel eigene Kriterien, welche den Erfolg der Massnahme in Bezug auf die Kriterien messen. Jede Massnahme wird quantitativ durch die voraussichtliche Veränderung der Werte von Kriterien beschrieben. Das wichtigste Kriterium einer Massnahme sind allerdings die Kosten der Massnahme. Hier unterscheidet man zwischen den Massnahmekosten, welche die direkten Kosten für die Planung und Ausführung der Massnahme umfassen und Massnahmenfolgekosten, welche als Kosten nach der Ausführung der betreffenden Massnahmen anfallen. Diese Massnahmenindikatoren sind Hauptparameter bei der Wahl der optimalen Massnahme.

Die Umweltverträglichkeit aller Massnahmenvarianten wird im Rahmen dieser Arbeit vorausgesetzt. Es wird angenommen, dass alle Umweltvorschriften bei der Ausführung der Massnahmen eingehalten werden.

3.4 Zeitliche Entwicklung

Die Werte der Systemkriterien verändern sich mit der Zeit. Einerseits bewirkt eine Massnahme eine vorteilhafte Veränderung der Systemindikatoren und andererseits werden sich die Systemindikatoren durch den natürlichen Verfall und/oder durch die wachsende Nachfrage jenem Niveau annähern, bei welchem eine Massnahme erforderlich ist. Die Veränderung der Systemkriterien zwischen zwei Massnahmen ist mit einer **Verfallsfunktion** definiert.

Die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt unmittelbar nach der Massnahmenausführung und jenem Zeitpunkt in welchen das System den Zustand vor der Massnahme erreicht hat, wird als **Wirkungsdauer** der Massnahme bezeichnet.

Von Interesse ist auch die Zeitspanne in welcher das System vom Neubauzustand bis zur dessen Sperrung verfällt. Diese Zeitspanne wird oft als **Nutzungsdauer** bezeichnet.

Die Nutzungsdauer kann abgeschätzt oder ermittelt werden. Hierfür kann man die statistischen Angaben verwenden oder die relevanten Verfallsprozesse mathematisch modellieren. Die Ermittlung der Nutzungsdauer ist ein sehr aktuelles Forschungsthema und wird in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

3.5 Wertsystem

Um eine optimale Massnahme zu ermitteln, muss man diverse Massnahmenoptionen vergleichen können. Es bedarf einer gemeinsamen Basis für verschiedene Massnahmen- und Systemkriterien, d. h. ein Wertsystem.

Ein Wertsystem ist eine mehr oder weniger verbreitete Konvention, welche den Massstab für den Vergleich aller Massnahmen- und Systemkriterien festlegt.

Untersucht man mehrere Massnahmenoptionen, deren Kriterien sowie deren Auswirkung auf Systemkriterien bekannt sind, stellt sich die Frage: wie man diese Massnahmen vergleichen kann?

Soll man die kostengünstigere Massnahmen mit einer geringeren positiven Auswirkung wählen oder jene, die teurer ist, dafür eine vorteilhaftere Auswirkung aufweist.

Wie vergleicht man z. B. die Kosten einer Massnahme mit den Systemkriterien wie Leistungsfähigkeit und Sicherheit?

Ein Wertsystem beantwortet diese Frage. Es gibt an wie man z. B. die Leistungsfähigkeit kostenmässig bewerten soll.

Beispiel 1: Wertsystem

Durch eine Massnahme, welche 100'000 CHF kostet, wird die Leistungsfähigkeit einer Strasse von 4'000 Fz./Std. auf 5'000 Fz./Std. erhöht. Es stellt sich hier die Frage, ob diese Massnahme ausgeführt werden soll.

Diese Massnahme muss daher mit dem bestehenden Zustand (Massnahme „Nichtstun“) verglichen werden. Das Wertsystem legt einen „Wechselkurs“ zwischen den Kosten und Steigerung der Leistungsfähigkeit fest.

Dieser „Wechselkurs“ kann intuitiv gewählt, diskursiv bestimmt oder berechnet werden. Auf jeden Fall kann man mit Hilfe dieses „Wechselkurses“ die Erhöhung der Leistungsfähigkeit monetär ausdrücken. Legt man fest, dass eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit um 1000 Fz./Std. gleichbedeutend ist wie 200'000 CHF, so wird der Nutzen der Massnahmen wie folgt berechnet:

$$N = 200'000 - 100'000 = 100'000$$

Da der Nutzen der Massnahmen „Nichtstun“ gleich Null ist, führt die untersuchte Massnahme zu einer Nutzensteigerung und ist deshalb auszuführen. Man könnte selbstverständlich den Nutzen anstatt monetär durch die Leistungsfähigkeit ausdrücken. Das Resultat wäre das Gleiche.

Ein Wertsystem erlaubt eine einheitliche, meistens numerische Bewertung der Massnahmenoptionen. In der Regel werden die Massnahmen- und Systemindikatoren dafür verwendet, einen einzigen numerischen Wert für jede Massnahmenoption zu berechnen.

Bei der Wahl der optimalen Massnahme geht es darum jene Massnahmenoption zu finden, welche diesen Wert optimiert. Dies ist die klassische Aufgabe der mathematischen Programmierung.

Das mathematische Programm besteht aus einer Zielfunktion und aus in der Regel mehreren Randbedingungen, welche sowohl Gleichungen als auch Ungleichungen sein können.

Die Variablen der Zielfunktion basieren dabei auf den System- bzw. Massnahmenkriterien. Je nach Formulierung der Zielfunktion unterscheidet man heute zwischen der wirtschaftlichen und

der multikriteriellen⁶ Optimierung. Der Hauptunterschied zwischen diesen zwei Vorgehen besteht in der Wahl der Messeinheit für die Bewertung von Massnahmenoptionen.

3.5.1 Zeitliche Präferenz

Bei der zeitlichen Präferenz stellt sich die Frage ob zwei identische Massnahmen, welche in unterschiedlichen Zeitpunkten ausgeführt werden, gleich zu bewerten sind. Mit anderen Worten: Besteht eine zeitliche Präferenz für die Ausführung von ansonsten identischen Massnahmen?

In der ökonomischen Literatur wird diese Frage in der Regel mit ja beantwortet. Es ist auch nahe liegend, dass man jene Massnahmen, welche einen Nutzen bringen so bald wie möglich ausführen will und jene Ereignisse, welche einen Schaden verursachen, möglichst lang aufschieben will.

Sowohl der Nutzen, als auch der Schaden, welche unmittelbar bevorstehen werden als grösser angesehen als jene, welche in der Zukunft eintreten werden.

Wählt man Geld als Messeinheit für den Nutzen und den Schaden (Kosten), so wird die zeitliche Präferenz mittels Diskontierung modelliert.

Diskontieren ist in der Ökonomie eine weitgehend anerkannte Methode, um den Zeitwert der Geldflüsse zu ermitteln. Die Nutzen und Kosten, welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, werden dabei auf einen gemeinsamen Zeitpunkt diskontiert.

In anderen Worten kann man mittels Diskontierung eine zeitliche Abfolge von Geldflüssen mit einem einzigen Wert ersetzen. Wählt man die Gegenwart für diesen gemeinsamen Zeitpunkt, so redet man von Gegenwartswerten. Der Gegenwartswert einer Abfolge vom künftigen Nutzen kann wie folgt berechnet werden:

$$GW = \int_{t=0}^{\infty} N(t) \cdot \frac{1}{(1+r)^t} dt$$

Der Koeffizient r ist positiv und wird als Diskontrate oder monetäre Zeitpräferenzrate bezeichnet.

Falls man eine nicht monetäre Messeinheit verwendet (Punkte, Prozente usw.), muss man die zeitliche Präferenzrate diskursiv ermitteln. Dies ist auch die Hauptschwäche der nicht monetären Optimierung, da dafür ein systematisches Vorgehen fehlt, mit welchem der Zeitwert der System- und Massnahmenkriterien bestimmt werden können.

Beispiel 2: Zeitliche Präferenz

Es wird die gleiche Massnahme wie im Beispiel 1 behandelt. Der Entscheidungsträger überlegt dabei zwei Optionen: Die Massnahme sofort oder erst in 5 Jahren auslösen. Es wird auch das gleiche Wertsystem wie im Beispiel 1 angenommen. Man legt einen „Wechselkurs“ zwischen den Kosten und Steigerung der Leistungsfähigkeit fest. Der Nutzen der Massnahmen bei sofortiger Auslösung ist gleich wie im Beispiel 1:

$$N_0 = 200'000 - 100'000 = 100'000$$

Der Nutzen der gleichen Massnahme, welche erst in 5 Jahren ausgeführt wird, wird wie folgt berechnet:

$$N_5 = (200'000 - 100'000) \cdot \frac{1}{(1+r)^5} = 90'573$$

Bei dieser Berechnung wurde die Diskontrate von 2% angenommen. Der rationale Entscheidungsträger soll die Massnahmen sofort auslösen.

⁶ Der Begriff ist eigentlich etwas unglücklich gewählt, da die wirtschaftliche Optimierung ebenfalls multikriteriell ist. Die Kriteriumswerte werden in die monetären Beträge umgesetzt. Es wäre treffender, wenn man zwischen der monetären und nicht-monetären Optimierung unterscheiden würde.

Man könnte selbstverständlich den Nutzen anstatt monetär durch die Leistungsfähigkeit ausdrücken. Die Zeitpräferenzrate für das Systemkriterium Leistungsfähigkeit ist vorher zu bestimmen. Dies kann aufgrund von Umfragen erfolgen oder durch ein Gremium von Experten. Wählt man dabei eine positive Präferenzrate, so erhält man das gleiche Resultat wie bei monetären Betrachtungen.

Bei der Wahl der optimalen Massnahmenoption muss der Verlauf der Systemindikatoren nach der ausgeführten Massnahme berücksichtigt werden.

3.5.2 Probabilistische Aspekte

Die Systemindikatoren sowie die Massnahmenindikatoren sind in den meisten Fällen probabilistische Grössen (Zufallsgrössen).

Die Werte der Kriterien wie Sicherheit und Leistungsfähigkeit können kaum mit absoluter Genauigkeit ermittelt werden.

Ein, wenn auch kleines, Risiko wird immer bestehen und seine Quantifizierung ist bei der Entscheidungsfindung von grosser Bedeutung.

Die Sicherheit und Leistungsfähigkeit werden durch den Verfall beeinträchtigt, dessen Geschwindigkeit wiederum von Umwelteinwirkungen und Materialeigenschaften abhängig ist.

Da sowohl die Umwelteinwirkungen als auch die Materialeigenschaften Zufallsgrössen sind, müssen auch die abgeleiteten Grössen wie Sicherheit und Leistungsfähigkeit Zufallsgrössen sein.

In der Praxis der Erhaltungsplanung wird die probabilistische Natur der System- und Massnahmenkriterien zurzeit selten berücksichtigt. Hierfür fehlen noch die Grundlagen, weshalb das probabilistische Infrastrukturmanagement⁷ ein sehr aktuelles Forschungsthema ist.

3.6 Ermittlung der optimalen Massnahme für ein Bauwerk

3.6.1 Nicht-monetäre Verfahren

Bei der nicht-monetären Optimierung wird die Auswirkung der Massnahmenoptionen quantitativ bewertet. Diese Bewertung kann

- direkt erfolgen für jene System- oder Massnahmenkriterien, welche objektiv messbar sind, oder
- indirekt durchgeführt werden für jene System- bzw. Massnahmenkriterien, welche nicht objektiv gemessen werden können. Man muss in diesem Fall die Veränderung der Systemkriterien intuitiv oder diskursiv, d. h. subjektiv bewerten. Der Erfolg der Massnahme wird in diesen Fällen mit Hilfe einer Noteskala quantifiziert. Alternativ kann der Erfolg der Massnahmen als Zielerreichungsgrad (in Prozenten), d.h. relativ zu einem idealen Zustand ausgedrückt werden.

Die Wahl eines Wertsystems ist dabei die Voraussetzung für die Definition der Zielfunktion. In den darauf folgenden Abschnitten werden Methoden zur Gewinnung eines Wertsystems erläutert. Manche nicht-monetäre Verfahren kombinieren die Systemindikatoren und Massnahmenindikatoren bei der Formulierung der Zielfunktion.

Berücksichtigung von Zeitpräferenzen erfolgt in einigen Verfahren indirekt. Es wird eine unendliche Abfolge von gleichen Massnahmen vorausgesetzt, welche am Ende der Wirkungsdauer bei gleichen Werten von Systemindikatoren ausgeführt werden. Man kann sich dadurch nur auf eine Periode zwischen zwei Massnahmen beschränken.

Die optimale Massnahme wird aufgrund von **Entscheidungsvariablen**⁸ bestimmt, welche wie folgt berechnet werden können:

- Die massnahmenbedingte Veränderung der Systemindikatoren sowie Massnahmenindikatoren durch die ermittelte Lebensdauer dividieren und dieses Verhältnis als Entscheidungsvariable verwenden.

⁷ In der Literatur werden auch folgende Begriffe verwendet: Risikobasiertes Infrastrukturmanagement (Risk-based Infrastructure Management), Zuverlässigkeitsorientiertes Infrastrukturmanagement (Reliability-based Infrastructure Management)

⁸ Benannt auch als „Kennzahlen“!

- Den durchschnittlichen Systemindikatoren über die Lebensdauer als Entscheidungsvariablen behandeln.
- usw.

Die Berücksichtigung von Lebensdauer und Massnahmenkosten ist dabei besonderes wichtig. Es sind nämlich folgende Möglichkeiten gegeben:

- Die Lebensdauer und die Kosten als zusätzliche Kriterien behandeln.
- Die Systemindikatoren inklusive Kosten durch die ermittelte Lebensdauer dividieren und dieses Verhältnis als Entscheidungsvariable verwenden.
- Den durchschnittlichen Systemindikatoren über die Lebensdauer als Entscheidungsvariable behandeln.

Diese Verfahren sind alle mehr oder minder plausibel, bzw. empirisch. Dazu bedarf es ein systematisches Vorgehen, mit welchem den Zeitwert der Kriterien bestimmt werden kann.

Manche multikriteriellen Verfahren kombinieren die Kriterien (Optimierungs- oder Systemkriterien) und Massnahmenindikatoren (Charakteristiken der Massnahmen) bei der Formulierung der **Zielfunktion**. Diese Kombination ist zulässig, sofern die Veränderungen der Systemkriterien und Massnahmenindikatoren vor und nach der Massnahme dabei berücksichtigt werden. Nachfolgend werden drei dieser Verfahren näher beschrieben.

3.6.1.1 Gewichtete Summation

Bei dieser Methode wird die Zielfunktion als eine gewichtete Summe der Systemindikatoren bzw. Massnahmenindikatoren formuliert. Die Erhaltungsoption, welche diese gewichtete Summe maximiert, ist die optimale Erhaltungsoption.

Dieses Vorgehen setzt eine vorgängige Ermittlung der Gewichte für jedes Kriterium voraus. Diese Gewichte werden in der Regel intuitiv oder diskursiv festgelegt. Das Wertesystem wird auf diese Weise intuitiv festgelegt.

Untersucht man m Massnahmenoptionen für ein Objekt oder ein System, kann man die gewichtete Summe wie folgt bilden:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_j x_{ij} = \max! \quad (1)$$

Der Parameter w_k ist das Gewicht des Systemkriteriums bzw. Massnahmenkriteriums k und die Variablen x_{ij} sind die Werte⁹ des Systemkriteriums bzw. Massnahmenkriteriums j infolge Massnahmenoption i . Aufgrund der Gewichte kann man nun zwei beliebige Kriterien miteinander vergleichen:

$$w_i \cdot I = w_j \cdot x_{j,x=I} \quad \Rightarrow \quad x_{j,x=I} = \frac{w_i}{w_j} \quad (2)$$

Eine Einheit des Systemindikator i ist gleichwertig wie w_i/w_j Einheiten des Systemindikator j . So kann man aufgrund der Gewichte die „Wechselkurse“ zwischen verschiedenen Systemkriterien berechnen.

3.6.1.2 Multiattributive Nutzwertfunktion

Bei der gewichteten Summation geht man davon aus, dass die Beträge der Kriterien der Zielfunktion linear proportional zu den entsprechenden System- bzw. Massnahmenindikatoren sind. Dies muss nicht der Fall sein. Im allgemeinen Fall kann die Zielfunktion eine beliebige Funktion der System- und Massnahmenindikatoren sein.

⁹ Falls man die zeitliche Präferenz berücksichtigt sind diese die Gegenwartswerte.

Falls diese Funktion nur Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, spricht man von einer Nutzwertfunktion¹⁰.

Die Bestimmung der Nutzwertfunktion mit mehreren Kriterien ist in der Regel sehr mühsam. Die Entscheidungsträger sollen in der Lage sein, beibehaltene Kombinationen von Massnahmen- und Systemindikatoren nach ihrer Präferenz zu ordnen. Dies ist sogar bei einer kleinen Anzahl von Kriterien kaum möglich.

Aus diesem Grund werden zuerst die Nutzwertfunktionen für alle Kriterien bestimmt, womit die Entscheidungsträger keine Probleme haben. Daraufhin wird die multiattributive Nutzwertfunktion als eine gewichtete Summation der Nutzwertfunktionen für einzelne Kriterien gebildet. Die Gewichtung der einzelnen Kriterien müssen die Entscheidungsträger intuitiv oder diskursiv bestimmen.

Die Bestimmung der Nutzwertfunktion für ein Attribut ist im folgenden Beispiel erklärt:

Beispiel 3: Nutzwertfunktion für Leistungsfähigkeit

Es wird die Nutzwertfunktion für einen Strassenabschnitt bestimmt, auf welchem das Verkehrsaufkommen mit einer Ganglinie dargestellt ist. Die Analyse des Verkehrsflusses ergibt, dass die erforderliche Leistungsfähigkeit dieses Strassenabschnittes 5'000 Fz./Std. sein sollte. Dieser Leistungsfähigkeit wird ein Nutzwert = 1.0 zugewiesen.

Einer Null Leistungsfähigkeit wird der Nutzwert = 0.0 zugewiesen. Nun wird der Entscheidungsträger gefragt einen Mittelwert zu bestimmen. Dieser Mittelwert ist wie folgt definiert:

Die Erhöhung der Leistungsfähigkeit von 0 Fz./Std. auf den Mittelwert wird als gleich nützlich empfunden wie die Erhöhung der Leistungsfähigkeit vom Mittelwert auf 5'000 Fz./Std.

Dieser Mittelwert kann zur Gewinnung weiterer Werte verwendet werden bis die Nutzwertfunktion ausreichend genau beschrieben wurde. Diese Prozedur ist in der [Abbildung 5](#) erläutert.

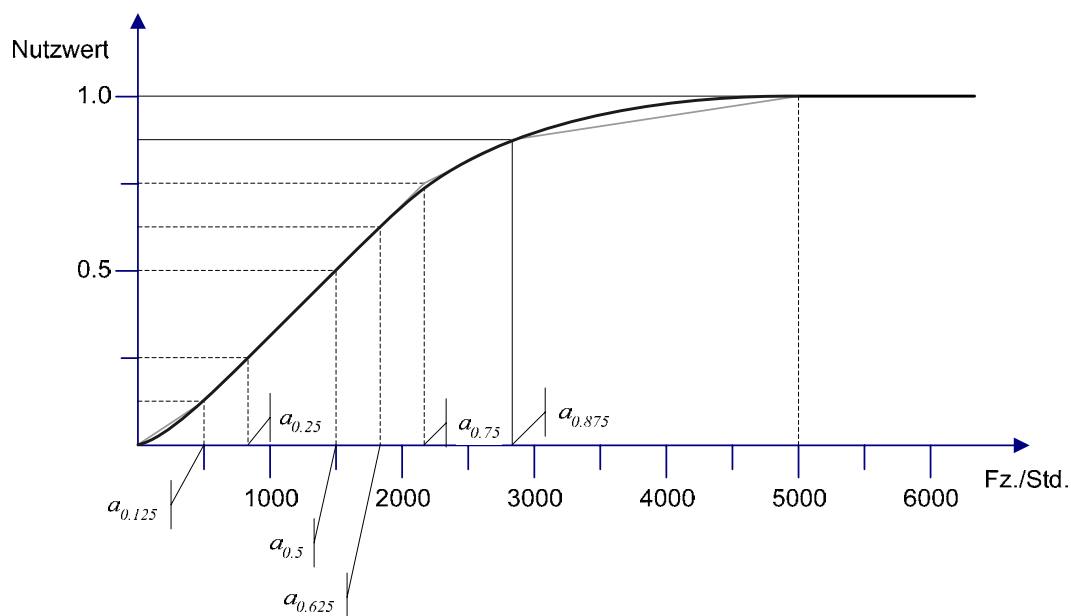


Abbildung 5: Nutzwertfunktion

In diesem Fall hat der Entscheidungsträger als Mittelwert ($a_{0.5}$) eine Leistungsfähigkeit von 1500 Fz./Std. Dies bedeutet, dass er die Leistungserhöhung von 0 Fz./Std. auf 1500 Fz./Std. gleich nützlich einstuft wie eine Leistungserhöhung von 1500 Fz./Std. auf 5000 Fz./Std.

¹⁰ In englischsprachiger Literatur wird diese Funktion als value function bezeichnet.

Analog werden die weitere Werte $a_{0.25}$, $a_{0.75}$, $a_{0.625}$, $a_{0.875}$ und $a_{0.125}$ bestimmt. Diese Nutzwertwerte bilden eine stückweise lineare Funktion (graue Linie), welche mit einer nichtlinearen algebraischen Funktion angenähert werden kann (schwarze Linie).

Die multiattributive Nutzwertfunktion lautet:

$$v(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n k_i v(x_i) \quad \text{wobei} \quad \sum_{i=1}^n k_i = 1$$

Im schlechtesten Fall, wenn alle einzelnen Nutzwertfunktionen v_i den Wert 0 annehmen wird die multiattributive Nutzwertfunktion die Null ergeben.

Im besten Fall wenn alle Nutzwertfunktionen den maximalen Wert 1.0 erreichen wird die multiattributive Nutzwertfunktion ebenfalls den Wert 1.0 aufweisen.

Die Koeffizienten k_i können so interpretiert werden: Sie definieren den Wert der multiattributiven Nutzwertfunktion für den besten Wert des Kriteriums i und die schlechtesten Werte der übrigen Kriterien.

In folgendem Beispiel wird die Verwendung der Nutzwertfunktion für die Bestimmung der optimalen Massnahmenoption verwendet.

Beispiel 4: Massnahmenwahl 1

In diesem Beispiel werden nur zwei Kriterien Leistungsfähigkeit und Sicherheit vorausgesetzt. Die Nutzwertfunktion für die Leistungsfähigkeit wurde bereits bestimmt und die Nutzwertfunktion für die Sicherheit wird wie folgt angenommen:

$$v(x) = e^{-0.5x} \quad \text{wobei} \quad x \geq 0$$

Falls es keine Unfälle gibt, nimmt die Nutzwertfunktion den maximalen Wert 1. Mit der steigenden Anzahl der Unfälle pro Jahr reduziert sich rasch der Nutzwert.

Es wird eine Massnahme untersucht, welche eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von 2000 Fz./Std. auf 5000 Fz./Std. bewirkt und eine Erhöhung der Anzahl Unfälle pro Jahr von 0.5 auf 0.75 erhöht. Die Nutzwerte lassen sich wie folgt berechnen:

Optionen	Sicherheit: $k_1=0.7$			Leistungsfähigkeit: $k_2=0.3$			Gesamtnutzwert
	Indikator	Nutzwert (v)	Gewichteter Nutzwert (v x k)	Indikator	Nutzwert (v)	Gewichteter Nutzwert (v x k)	
Nichtstun	0.5	0.779*	0.545	2000	0.7	0.21	0.755
Massnahme	0.75	0.687**	0.481	5000	1.0	0.3	0.781

$$* = e^{-0.5}, \quad ** = e^{-0.75}$$

Die Koeffizienten k_1 und k_2 wurden intuitiv bestimmt. Durch die Massnahme steigt der Gesamtnutzwert von 0.755 auf 0.781. Die Massnahme soll deshalb ausgeführt werden.

3.6.1.3 Analytischer Hierarchieprozess

Der analytische Hierarchieprozess ist eine einfache und dennoch eine mathematisch strenge multikriterielle Methode zur Wahl der optimalen Massnahmenoption.

Diese Methodologie zur Entscheidungsfindung wurde in vielen unterschiedlichen Bereichen wie z. B. Portfoliomanagement, Verkehrsplanung, Produktion usw. verwendet.

Die Stärke des analytischen Hierarchieprozesses (AHP) liegt in seiner Eignung komplexe, hierarchische Probleme auf jede Hierarchiestufe zu analysieren.

In einem ersten Schritt wird die hierarchische Struktur aufgestellt werden. Beim AHP wird die unterste Stufe der Hierarchie durch Massnahmenoptionen belegt.

Die übrigen Stufen enthalten die Beurteilungskriterien. Die Anzahl Stufen ist nicht begrenzt.

Der AHP wird bei dieser Anwendung anhand eines Beispiels erklärt.

Beispiel 5: Hierarchische Struktur

Für ein Strassenobjekt werden zwei Massnahmenoptionen untersucht. Die Massnahmen sollen die optimale Nutzung der Strassen wiederherstellen, d. h. die Sicherheit und Leistungsfähigkeit nach der Massnahme sollen verbessert werden. Die Kosten der Massnahme sollen dabei so tief wie möglich gehalten werden.

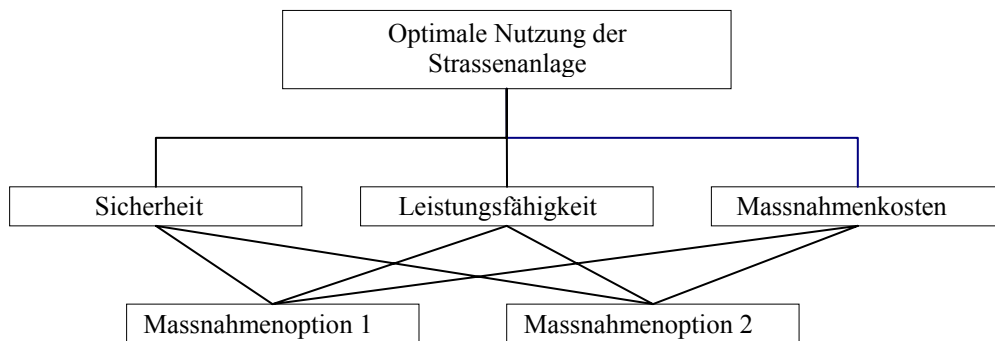


Abbildung 6: Hierarchische Struktur

Die hierarchische Struktur für dieses Problem ist in der Abbildung 6 abgebildet. Die Wirkungs-dauer der Massnahmenoption ist hier bewusst weggelassen, um dieses Beispiel zu vereinfachen.

Der AHP beruht auf einem paarweisen Vergleich aller Kriterien und Optionen, sofern sie die gleiche Hierarchiestufe belegen. Dabei gelten folgende 2 Axiomen:

Axiom 1: Der Entscheidungsträger soll in der Lage sein zwei beliebige Kriterien oder Massnahmenoptionen auf gleicher Hierarchiestufe in Bezug auf das übergeordnete Kriterium zu vergleichen. Dabei wählt er einen Vergleichskoeffizient a_{ij} , welcher grösser als 1 ist, wenn das Kriterium i bedeutender ist als das Kriterium j bzw., wenn die Massnahmenoption i besser als die Massnahmenoption j eingestuft wird. In diesem Fall gilt die folgende Beziehung:

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$$

Axiom 2: Beim Vergleich zweier Kriterien oder Massnahmenoptionen darf ein Kriterium nicht unendlich wichtiger als der andere bzw. eine Massnahmenoption nicht unendlich besser als die andere sein.

In der Regel wird der Vergleichskoeffizient zwischen 1 und 9 gewählt. Dabei schlägt Saaty [4] folgende Definitionen vor:

Vergleichskoeffizient	Definition	Erklärung
1	Gleiche Bedeutung / Qualität	Beide Kriterien / Massnahmenoptionen sind gleich wichtig bzw. gleich gut
3	Schwache Präferenz	Durch die Erfahrung wird ein Kriterium bzw. eine Massnahmenoption als geringfügig wichtiger bzw. besser als das / die Andere eingeschätzt.
5	Bedeutende Präferenz	Durch die Erfahrung ist ein Kriterium bzw. eine Massnahmenoption als wichtiger bzw. besser als das / die Andere.
7	Starke Präferenz	Durch die Erfahrung und Analyse ist ein Kriterium bzw. eine Massnahmenoption als bedeutend wichtiger bzw. besser als das / die Andere.
9	Absolute Präferenz	Die starke Überlegenheit eines Kriteriums / einer Massnahmenoption steht ausser Frage.
2, 4, 6, 8	Interpolationswerte	Diese Werte sind bei den Kompromissentscheidungen zu verwenden.

Tabelle 3: Vorschläge für paarweise Vergleiche

Durch die paarweisen Vergleiche wird eine Vergleichsmatrix A gebildet. Diese Matrix ist eine positiv definite Matrix¹¹, welche die Präferenzen abbildet. Falls man die Vergleichskoeffizienten bzw. die Präferenzen konsistent gewählt hat, muss die folgende Beziehung gelten:

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}$$

Diese Beziehung besagt, dass wenn man das Kriterium i a_{ik} -Mal wichtiger findet als das Kriterium k , und das Kriterium k a_{kj} -Mal wichtiger einschätzt als das Kriterium j , dann muss das Kriterium i $a_{ik} \cdot a_{kj}$ -Mal wichtiger sein als das Kriterium j .

Andernfalls ist die Wahl der Vergleichskoeffizienten inkonsistent. In der Praxis wird diese Bedingung nur in seltensten Fällen erfüllt. Man sucht deshalb Gewichte für jedes Kriterium, welche die Vergleichskoeffizienten optimal annähern. Die Gewichte der einzelnen Kriterien bzw. der Massnahmenoptionen werden als Elemente des grössten Eigenvektors der Matrix A berechnet. Die genaue mathematische Begründung dieses Sachverhaltes würde den Rahmen dieses Berichtes sprengen und wird hier nicht aufgeführt. Die interessierten Leser können die Einzelheiten in [4] finden.

Beispiel 6: Berechnung der Kriteriumsgewichte

Zuerst werden die Kriterien durch den Entscheidungsträger miteinander verglichen und in der folgenden Matrix $[A]$ dargestellt.

Kriterien	Sicherheit	Leistungsfähigkeit	Massnahmenkosten
Sicherheit	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>7</i>
Leistungsfähigkeit	<i>1/3</i>	<i>1</i>	<i>5</i>
Massnahmenkosten	<i>1/7</i>	<i>1/5</i>	<i>1</i>

Die Eigenwerte dieser Matrix A können als Lösungen folgender charakteristischer Gleichung gewonnen werden:

¹¹ Eine definite Matrix ist eine Matrix, bei der alle Sub-Determinanten positiv sind.

$$\| [A] - \lambda \cdot [I] \| = 0 \quad \| \square \| = \text{Determinante einer Matrix}$$

$[I]$ = Einheits-Matrix (eine Matrix, deren Diagonale aus 1 und andere Elemente aus 0 bestehen.)

Weil die charakteristische Gleichung eine kubische Gleichung ist, gibt es dafür in der Regel drei Lösungen. Für die hier angenommene Vergleichsmatrix ergeben sich folgende:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 3.065 \\ \lambda_2 &= -0.032 + 0.445 \cdot i \\ \lambda_3 &= -0.032 - 0.445 \cdot i\end{aligned}$$

Der grösste Eigenwert ist gleichzeitig die einzige reale Lösung. Der zugehörige normierte Eigenvektor ist wie folgt:

$$([A] - \lambda_1 \cdot [I]) \cdot w = 0 \quad \Rightarrow \quad w = \begin{pmatrix} 0.649 \\ 0.279 \\ 0.072 \end{pmatrix}$$

Die Elemente dieses Eigenvektors sind absolute Gewichte der Kriterien, welche die durch den Entscheidungsträger gewählten Vergleichskoeffizienten optimal annähern.

Im Weiteren müssen die Massnahmenoptionen in Bezug auf alle Kriteriumswerte verglichen werden. In der unterliegenden Tabelle sind Vergleichsmatrizen für alle drei Kriterien angegeben.

	Sicherheit		Leistungsfähigkeit		Massnahmenkosten	
	Massnahmenoption 1	Massnahmenoption 2	Massnahmenoption 1	Massnahmenoption 2	Massnahmenoption 1	Massnahmenoption 2
Massnahmenoption 1	1	2	1	1/4	1	4
Massnahmenoption 2	1/2	1	4	1	1/4	1

Die Gewichte der Massnahmenoptionen in Bezug auf drei Kriterien lassen sich direkt, d. h. ohne Eigenwertanalyse ermitteln. Die Konsistenzprüfung ist nicht erforderlich da eine 2 x 2 Matrix automatisch konsistent ist. Die Massnahmengewichte sind in der folgenden Tabelle angegeben:

Optionen	Sicherheit	Leistungsfähigkeit	Massnahmenkosten
Massnahmenoption 1	0.666	0.2	0.8
Massnahmenoption 2	0.333	0.8	0.2

Der Grad mit welchem die Elemente des Eigenvektors die gewählten Vergleichskoeffizienten annähern wird mit dem so genannten Konsistenzindex ausgedrückt:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Dabei ist CI der Konsistenzindex, λ_{\max} ist der grösste Eigenwert und n ist die Ordnung der Vergleichsmatrix A . Um eine Wahl der Vergleichskoeffizienten als zuverlässig zu betrachten, muss der CI gewisse Bedingungen erfüllen. Hierfür wird ein Mittelwert der Konsistenzindices für eine grosse Zahl von Matrizen mit Zufallskoeffizienten berechnet. Dieser Mittelwert ist der so genannte Zufallsindex (ZI), und er wurde für Matrizen bis zur Ordnung 10 in [4] angegeben:

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ZI	0.00	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Das Konsistenzverhältnis wird nun wie folgt gebildet:

$$CR = \frac{CI}{ZI}$$

Falls dieses Konsistenzverhältnis kleiner ist als 0.1, kann man die Resultate als zuverlässig betrachten, d. h. die Kriteriumsgewichte die Präferenzen des Entscheidungsträgers recht gut abbilden können.

Beispiel 7: Konsistenzverhältnis

Der Konsistenzindex für die Vergleichsmatrix im Beispiel 6 wird wie folgt berechnet:

$$CI = \frac{3.065 - 3}{3 - 1} = 0.033$$

Das Konsistenzverhältnis ist nun wie folgt:

$$CR = \frac{CI}{ZI} = \frac{0.033}{0.58} = 0.056 < 0.1$$

Da das Konsistenzverhältnis kleiner ist als 0.1, sind zuverlässige, widerspruchsfrei Resultate des AHP zu erwarten.

Nachdem die relativen Gewichte auf jeder Hierarchiestufe bekannt sind, kann man die globalen Gewichte, d. h. den Vorrang der Kriterien bzw. der untersuchten Massnahmenoptionen auf jeder Stufe bestimmen. Das globale Gewicht des Kriteriums i auf Stufe l wird wie folgt berechnet:

$$w_i^l = \sum_{j=1}^{n_{l-1}} w_{ij}^l \cdot w_j^{l-1} \quad (3)$$

Die Anzahl der Kriterien bzw. der Massnahmenoptionen auf Stufe l ist n_l . Das Gewicht des Kriteriums bzw. der Massnahmenoption i auf Stufe l in Bezug auf das Kriterium j auf Stufe $l-1$ ist w_{ij}^l . Auf diese Weise lassen die globalen Gewichte die Hierarchie hinunter berechnen.

Beispiel 8: Globale Gewichte

Die globalen Gewichte für die Massnahmenoptionen im diesem Beispiel werden mit Hilfe der Gleichung (3) berechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle angegeben:

Optionen	Gewichte für einzelne Kriterien			Globale Gewichte
	Sicherheit (0.649)	Leistungsfähigkeit (0.279)	Massnahmenkosten (0.072)	
Massnahmenoption 1	0.666	0.2	0.8	0.546
Massnahmenoption 2	0.333	0.8	0.2	0.454

Weil die Massnahme 1 ein grösseres Gewicht aufweist, sollte sie die Wahl des Entscheidungsträgers sein.

Die Ergebnisse des AHP, d. h. die globalen Gewichte soll man nicht mit den Gewichten in der Nutzwertfunktion verwechseln. Die globalen Gewichte im AHP drücken lediglich die relativen Präferenzen zwischen den Massnahmenoptionen aus. Streng genommen können sie nicht für die Berechnung des Nutzwertes verwendet werden.

3.6.1.4 Multiattributive Nutzentheorie

Die multiattributive Nutzentheorie ist, vereinfacht ausgedrückt, eine Erweiterung der Nutzwerttheorie, wenn das Ergebnis der Massnahmenoption unsicher ist.

Die System- und Massnahmenindikatoren nach der Massnahme sind stochastische Grössen, welche bestimmten Verteilfunktionen unterliegen.

Die multiattributive Nutzentheorie ist eine relativ komplexe Theorie, welche auf einer strikten mathematischen Grundlage beruht. Diese Grundlage wird in diesem Abschnitt nicht ausführlich erläutert und die interessierten Leser werden hierfür auf [20] verwiesen.

Ähnlich wie bei der Nutzwertfunktion wird in der multiattributiven Nutzentheorie eine mathematische Funktion,

$$U(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$$

formuliert, welche für jede beliebige Kombination von System- und Massnahmenindikatoren einen Wert zwischen 0 und 1 ergibt. In der Regel wird diese Funktion als additive Funktion der Nutzenfunktionen einzelner Kriterien gebildet. Es wird dabei angenommen, dass man für jedes Kriterium so eine Funktion formulieren kann und dies erfolgt ähnlich wie die Ermittlung der Nutzwertfunktion¹². So muss man für alle Systemkriterien wie Leistungsfähigkeit und Sicherheit solche Funktionen formulieren.

Sind Nutzenfunktionen für alle Kriterien formuliert, kann die multiattributive Nutzenfunktion ähnlich wie die Nutzwertfunktion wie folgt ausgedrückt werden:

$$U(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n k_i U_i(x_i) \quad \text{wobei} \quad \sum_{i=1}^n k_i = 1$$

Im schlechtesten Fall, wenn alle Nutzenfunktionen die Null annehmen, wird die multiattributive Nutzenfunktion Null ergeben. Im besten Fall, wenn alle Nutzenfunktionen den maximalen Wert 1.0 erreichen, wird die multiattributive Nutzenfunktion ebenfalls den Wert 1.0 aufweisen. Die Koeffizienten k_i werden ähnlich wie bei der Nutzwertfunktion ermittelt.

Für jede Massnahmenoption wird der erwartete Nutzenwert wie folgt ermittelt:

$$E[U(x)] = \sum_{i=1}^n k_i \int_{-\infty}^{\infty} U_i(x_i) \cdot f_i(x_i) dx_i$$

Die Funktion der Verteilungsdichte des System- oder Massnahmenindikators x_i ist f_i . Jene Massnahmenoption, welche diesen Erwartungswert optimiert, ist die optimale Massnahmenoption. Die Verwendung der multiattributiven Nutzentheorie wird anhand des folgenden Beispiels erläutert.

Beispiel 9: Massnahmenwahl 2

Es wird das gleiche Problem wie im vorher erwähnten Beispiel betrachtet und es wird vorausgesetzt, dass die Nutzenfunktionen mit den Nutzwertfunktionen identisch sind¹³. Es wird die gleiche Massnahme untersucht, welche eine Steigerung der Leistungsfähigkeit von 2000 Fz./Std. auf 5000 Fz./Std. bewirkt. Die Erhöhung der Anzahl Unfälle pro Jahr ist allerdings unsicher und kann nach der Massnahmen zwischen 0.5 auf 1.0 liegen. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist mit der folgenden Tabelle angegeben:

Intervalle mit uniformer Verteilungsdichte			
	0.5-0.65	0.65 – 0.85	0.85-1.0
Wahrscheinlichkeitsdichte	1.333	3.0	1.333

Der erwartete Nutzen in Bezug auf Sicherheit lässt sich wie folgt berechnen:

¹² Der einzige Unterschied besteht darin, dass man die Auftrittswahrscheinlichkeiten der möglichen Ergebnisse miteinander vergleichen muss (siehe [20]).

¹³ Dies muss nicht der Fall sein. In diesem Bericht wird auf diese Thematik nicht weiter eingegangen, sie ist ausführlich in [20] behandelt.

$$\begin{aligned}
 E[U(x_1)] &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{-0.5 \cdot x_1} \cdot f_1(x_1) dx_1 = \\
 &= 1.333 \cdot \int_{0.5}^{0.65} e^{-0.5 \cdot x_1} dx_1 + 3 \cdot \int_{0.65}^{0.85} e^{-0.5 \cdot x_1} dx_1 + 1.333 \cdot \int_{0.85}^1 e^{-0.5 \cdot x_1} dx_1 = \\
 &= 0.689
 \end{aligned}$$

Der Gesamtnutzen wird nun ähnlich wie der gesamte Nutzwert berechnet. Für die Koeffizienten k_1 und k_2 werden die gleichen Werte gewählt wie im vorherigen Beispiel.

Optionen	Sicherheit: $k_1=0.7$			Leistungsfähigkeit: $k_2=0.3$			Gesamtnutzen
	Indikator	Nutzen	Gewichteter Nutzen	Indikator	Nutzen	Gewichteter Nutzen	
Nichtstun	0.5	0.779	0.545	2000	0.7	0.21	0.755
Massnahme	Verteilung	0.689	0.482	5000	1.0	0.3	0.782

Der Nutzen der Massnahme ist leicht grösser als der berechnete Nutzwert und die Massnahme soll deshalb ausgeführt werden. Es muss beachtet werden, dass sich die Massnahmen mit einer Wahrscheinlichkeit von 18.5% als unvorteilhaft erweisen kann. Im Durchschnitt ist die Massnahme jedoch vorteilhaft.

3.6.2 Wirtschaftliche Verfahren

Bei wirtschaftlichen Verfahren versucht man die Kriterien bzw. Massnahmen- Charakteristiken monetär zu erfassen. Dies ist ohne weiteres für die Kriterien wie Sicherheit und Leistungsfähigkeit möglich.

3.6.2.1 Sicherheit

Der Begriff Sicherheit bezieht sich in erster Linie auf die Sicherheit von Personen. Sicherheit gilt als vorhanden, wenn das Risiko für Personenschäden auf vergleichbar kleine und damit akzeptierte Werte beschränkt bleibt. Im Zusammenhang mit dem System Strasse unterscheidet man die Betriebssicherheit und Tragsicherheit.

Die Betriebssicherheit gilt als vorhanden, wenn die Unfallrate einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet. Die Häufung der Unfälle auf einer bestimmten Strecke kann unter anderen auf mangelnde Strassenqualität hinweisen.

Falls eine Sicherheitsanalyse einen solchen Zusammenhang (Schlaglöcher, rutschige Fahrbahn, exzessive Unebenheiten usw.) bestätigt, muss man die entsprechenden Massnahmen planen.

Die Reduktion der Unfallrate durch eine geplante Massnahme wird dabei monetär ausgedrückt. Hierfür werden die Unfallkosten berechnet d. h. Anzahl der mutmasslichen Verletzte und Tote mit den monetären Werten (Kostensätze) multipliziert.

Die Differenz zwischen den Unfallkosten vor und nach der Massnahme wird als Nutzen bezeichnet.

Die Tragsicherheit bezieht sich vor allem auf Kunstbauten. Die Tragsicherheit gilt als vorhanden, wenn das Risiko für Personenschäden ausreichend klein ist. Hierfür ist es erforderlich das Schadenpotential infolge eines Versagens monetär zu ermitteln. Dieses Schadenpotential besteht aus folgenden Anteilen:

- Personenschaden, d.h. Anzahl Verletzte und Tote, welche mit einem nominellen monetären Wert erfasst werden.
- Sachschäden inkl. Räumung und Wiederaufbau
- Wirtschaftliche Verluste infolge Verkehrsunterbruch

Die Sachschäden inkl. Räumung und Wiederaufbau sind relativ einfach monetär zu ermitteln.

In den meisten Fällen kennt man die ursprünglichen Baukosten des eingestürzten Objektes, welche als eine gute Abschätzungsgrundlage dienen können.

Die wirtschaftlichen Verluste infolge Verkehrsunterbruchs sind weit schwieriger abzuschätzen und bedürfen einer wirtschaftlichen Analyse der betroffenen Region. Die Ansätze hierfür sind in [11] und [12] zu finden.

Die Personenschäden werden ähnlich wie bei der Betriebssicherheit berechnet. Die Wahrscheinlichkeit der Personenschaden durch die versagte Infrastruktur ist allerdings sehr klein¹⁴. Dies bedeutet, dass der entsprechende Beitrag zum Schadenpotential klein bleibt, sogar dann, wenn man dem Menschenleben einen viel höheren monetären Wert als im Versicherungswesen beimisst.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Strasseninfrastruktur ausserordentlich klein ist. Die Mehrheit dieser Versagen ist durch die Naturkatastrophen verursacht, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden. Die Versagenswahrscheinlichkeit infolge mangelnden Unterhalts hingegen ist ausserordentlich klein. In den meisten Infrastruktur-Managementssystemen wird die Tragsicherheit als Optimierungskriterium deshalb nicht berücksichtigt. Die Massnahmenvarianten werden hingegen stets so geplant, dass eine ausreichende Tragsicherheit vorhanden ist.

Die hier verwendete monetäre Erfassung von Personenschäden verursacht womöglich in breiter Öffentlichkeit viele Widerstände, welche durchaus verständlich sind. Schliesslich muss man eigentlich die Wahrscheinlichkeit von Personenschäden durch die schadhafte Infrastruktur ausschliessen.

Dies ist bekanntlich nicht möglich, so dass man die Personenschäden irgendwie gewichten muss. Bei der Erhaltungsplanung geht es tatsächlich darum die Personenschäden im Verhältnis zu anderen Schäden zu setzen. In diesem Zusammenhang muss man noch festhalten, dass diese Praxis im Versicherungswesen sehr verbreitet ist.

3.6.2.2 Leistungsfähigkeit und Betriebsbereitschaft

Die Leistungsfähigkeit bestimmt das maximale Verkehrsaufkommen, welche ein Strassenabschnitt ohne Staus aufnehmen kann. Falls die Leistungsfähigkeit durch das Verkehrsaufkommen überschritten wird, sind die Staus zu erwarten. Die Staus verursachen ihrerseits Benutzerkosten, welche wie folgt gegliedert werden können:

- Zeitverluste, d.h. die Verluste der produktiven Zeit
- Betriebskosten, d.h. die Zusatzkosten, welche durch die langsame Fahrt und/oder Umleitungen verursacht werden
- Umweltkosten

Die Methodik zur Berechnung dieser Kosten ist in [11] und [12] ausführlich beschrieben. Die Verbesserung der Leistungsfähigkeit durch eine Massnahme wird zur Reduktion dieser Kosten führen. Diese Differenz wird als Nutzen dieser Massnahme bezeichnet.

Die Leistungsfähigkeit umfasst eigentlich die Betriebsbereitschaft. Die Betriebsbereitschaft eines Strassenabschnittes kann zu einem gegebenen Zeitpunkt nur zwei Werte annehmen: bereit oder nicht bereit. Die fehlende Leistungsfähigkeit ist gleichbedeutend wie (langfristig) nicht betriebsbereite Strasse. Aus diesem Grund könnte man eventuell auf das Kriterium Betriebsbereitschaft¹⁵ verzichten.

Nachdem alle relevanten funktionellen Merkmale entweder monetär erfasst oder als Randbedingungen berücksichtigt wurden, kann man das Optimierungsproblem formulieren. Man unterscheidet hier zwischen den Massnahmenkosten und Massnahmenfolgekosten.

¹⁴ Die Anzahl Tote infolge aller Tragwerksversagen per 100 Millionen ist lediglich 0.002. Zum Vergleich ist die Anzahl Tote infolge Haushaltunfälle bei 0.7 und die Anzahl Tote infolge Flugzeugsunfälle bei 120. Für weitere Daten siehe [10].

¹⁵ Die Betriebsbereitschaft hat bei den elektromechanischen Anlagen eine ganz andere Bedeutung. Die Betriebsbereitschaft (Engl. Availability) misst den prozentuellen Anteil der Zeit, während der das System zur Verfügung steht (Engl. up-time).

Die Massnahmekosten sind jene Kosten, welche die Projektierungs- und Ausführungskosten der geplanten Erhaltungsmassnahme umfassen.

Die Massnahmefolgekosten sind jene Kosten welche nach der Abnahme über eine sehr lange Zeitspanne anfallen werden. Bekanntlich hat jede Massnahme ihre Lebensdauer und daraufhin muss die gleiche, oder eine andere Massnahme erneut ausgeführt werden. Die Kosten dieser späteren Massnahmen sowie die Kosten des allfälligen betrieblichen Unterhalts werden auf Gegenwartskosten diskontiert und zu Massnahmenfolgekosten aufaddiert.

In einer Wirtschaftlichkeitsanalyse wird üblicherweise die Investition (Initialkosten) mit den Einnahmen abzüglich wiederkehrenden Kosten verglichen.

Diese Methodik wird auch hier verwendet, wobei die Einnahmen als die, durch das Nichtausführen der teuersten Massnahmenoption (Massnahmekosten + Massnahmefolgekosten) erzielten Ersparnisse verstanden werden.

Diese Ersparnisse sind somit betragsmässig gleich wie die höchste Summe der Massnahmekosten und Massnahmefolgekosten. Der Nutzen einer Massnahmenoption wird berechnet als Differenz dieser Ersparnisse und der jeweiligen Massnahmefolgekosten. Falls eine Massnahmenoption eine Veränderung der Benutzerkosten bewirkt, so kann diese Differenz (Benutzernutzen) ebenfalls als Nutzen betrachtet werden. Die Benutzerkosten werden dabei als Summe von Unfallkosten, Zeitkosten und Betriebskosten definiert.

Der Nutzen kann wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} N_{ij} &= C_{i\max} - C_{ij}^I + B_{ij} \\ C_{ij} &= C_{ij}^I + C_{ij}^F \end{aligned} \quad (4)$$

Die Massnahmekosten sind hier mit C_{ij}^I , die Massnahmefolgekosten mit C_{ij}^F , die Gesamtkosten des teuersten Massnahmenoption für das Bauwerk i mit $C_{i\max}$, der Benutzernutzen mit B_{ij} und der Nutzen der Massnahmenoption mit N_{ij} bezeichnet. Auf diese Weise gelingt es das übliche Vergleichformat für eine wirtschaftliche Analyse zu erhalten.

Wie üblich in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse wird jene Massnahmenoption, welche den Nettonutzen, d. h. den Nutzen abzüglich der Massnahmekosten maximiert, gewählt. Der Nettonutzen \bar{N}_{ij} wird wie folgt berechnet:

$$\bar{N}_{ij} = C_{i\max} - C_{ij} + B_{ij} \quad (5)$$

Jene Massnahmenoptionen, welche den Nettonutzen maximieren, werden mit Hilfe von Optimierungsverfahren ermittelt. Geht man davon aus, dass ein System n Bauwerke (Objekte) umfasst und, dass jedes Bauwerk m Massnahmenoptionen aufweist. Jede Massnahmenoption wird eine binäre Variable y_{ij} zugewiesen, welche den Wert 1 annimmt, wenn die Massnahmenoption j des Bauwerks i ausgeführt werden soll und umgekehrt den Wert 0 annimmt, wenn diese Massnahmenoption nicht die optimale Lösung ist.

Die Zielfunktion kann man nun wie folgt formulieren:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \bar{N}_{ij} = \max! \quad (6)$$

Es darf nur eine Massnahmenoption pro Bauwerk (Objekt) ausgeführt werden:

$$\sum_{j=1}^m y_{ij} = 1 \quad i = 1 \dots n \quad (7)$$

Falls man die Summe der Massnahmenkosten C_{ij} (Budgetbegrenzung) auf einen Wert R begrenzt, muss auch folgende Bedingung erfüllt werden:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \cdot C_{ij} \leq R \quad (8)$$

Ähnlich wie bei multikriterieller Optimierung definieren die Ausdrücke (6) bis (8) ein binäres Programm. In der Praxis wird auch hier das inkrementelle Nutzen / Kosten - Verfahren verwendet, welches die Lösung des obigen binären Programms recht gut annähern kann. Dieses Näherungsverfahren ist im Abschnitt 3.4 eingehend beschrieben. Ohne Budgetbegrenzung kann hingegen jedes Objekt separat behandelt werden, d.h. für jedes Objekt wird jene Massnahme optimal welche die Zielfunktion maximiert.

3.7 Ermittlung von optimalen Massnahmen für mehrere Bauwerke

Im vorherigen Abschnitt wurden verschiedene Methoden gezeigt wie man eine optimale Massnahmenoption für ein Bauwerk ermittelt. Betrachtet man mehrere Bauwerke, d. h. ein Bauwerksinventar sucht man jedoch einen Satz von Massnahmen, welche optimal sein werden. Intuitiv kann man behaupten, dass dieser Satz von Massnahmenoptionen genau jene Massnahmenoptionen enthält, welche man für Einzelbauwerke ermittelt hat. Dies ist auch zutreffend wenn folgende Bedingungen erfüllt werden:

- Die Massnahmen sind ausschliesslich bauwerksbezogen, d. h. alle System- und Massnahmenindikatoren an einem Bauwerk sind unabhängig von jenen an einem anderen Bauwerk. Mit anderen Worten wird die gegenseitige Beeinflussung von Massnahmen an zwei Bauwerken ausgeschlossen.
- Es wird keine summarische Einschränkung eingeführt wie z. B. die Begrenzung der Initialkosten, d. h. eine Budgetvorgabe.

Diese Bedingungen sind fast nie erfüllt. Der Satz der optimalen Massnahmenoptionen wird deshalb nicht jene Massnahmenoptionen erhalten, welche an den Einzelbauwerken ermittelt wurde. Die Modellierung der gegenseitigen Beeinflussung von Massnahmenoptionen an zwei Bauwerken ist eine anspruchsvolle Aufgabe, welche für das System Strasse im Abschnitt 3.7.1 behandelt wird. Dies ist auch der Hauptbeitrag dieser Forschung. Die Einführung einer summarischen Einschränkung z. B. einer Budgetvorgabe ist hingegen relativ einfach und wird in diesem Abschnitt diskutiert.

3.7.1 Nicht-monetäre Verfahren

Dieser Abschnitt bezieht sich auf alle vier Methoden welche in den Abschnitten 3.6.1.1 bis 3.6.1.4 erläutert wurden.

Es wird angenommen, dass ein System n Objekte umfasst und, dass m Massnahmenoptionen für jedes Objekt berücksichtigt werden können. Jeder Massnahmenoption wird eine binäre Variable y_{ij} zugewiesen, welche den Wert 1 annimmt, wenn die Massnahmenoption j des Bauwerks i ausgeführt werden soll und umgekehrt den Wert 0 annimmt, wenn diese Massnahmenoption nicht die optimale Lösung ist. Die Zielfunktion kann man nun wie folgt formulieren:

$$Z = \sum_{i=1}^n \omega_i \sum_{j=1}^m y_{ij} \sum_{k=1}^l w_k N(x_{ijk}) = \max! \quad (9)$$

Der Parameter w_k ist das Gewicht (für die gewichteten Summation und AHP) bzw. der Skalierungskoeffizient (für Nutzwertfunktion und Nutzenfunktion) des Systemkriteriums bzw. Massnahmenkriteriums und die Variablen x_{ijk} sind die Werte des Systemkriteriums bzw. Massnahmenkriteriums k nach ausgeführter Massnahmenoption j des Bauwerks i . Die Funktion $N(x_{ijk})$ wird wie folgt definiert:

$$\begin{array}{ll}
 x_{ijk} & \text{für gewichtete Summation} \\
 N(x_{ijk}) = \frac{v_k(x_{ijk})}{I} & \text{für Nutzwertfunktion} \\
 & \text{für AHP} \\
 \int_{-\infty}^{\infty} U_k(x_{ijk}) \cdot f_k(x_{ijk}) dx_{ijk} & \text{für Nutzentheorie}
 \end{array}$$

Der Koeffizient ω_i drückt das Gewicht des Bauwerks i im Vergleich zu übrigen Bauwerken. Die Notwendigkeit eines solchen Koeffizienten wird im folgenden Beispiel deutlich:

Beispiel 10: Bauwerksgewichte

Betrachtet werden zwei Bauwerke: Eine bedeutende Brücke und eine kleine Stützmauer. Die optimale Massnahmenoption wird mit einer der beschriebenen Methoden ermittelt. Die hierfür erforderlichen numerischen Beträge¹⁶ drücken lediglich die relativen Präferenzen der Massnahmenoptionen an gleichen Bauwerken aus. Sie haben keine Bedeutung, wenn sie mit den Massnahmenoptionen an anderen Bauwerken verglichen werden.

So können z. B. die Nutzwerte der optimalen Massnahmenoptionen für die Brücken und den Durchlass durchaus gleich sein. Ohne den Koeffizienten ω_i würden sie auch als gleichwertig behandelt. In der Praxis wird dies aber kaum der Fall sein: Die Brückenmassnahmen werden in der Regel als gewichtiger betrachtet als die Massnahme an einem Durchlass.

Die Randbedingungen werden wie folgt formuliert:

$$\begin{array}{l}
 x_{ijk} \leq b_k^+ \quad i = 1..n, j = 1..m \\
 x_{ijk} \geq b_k^- \quad i = 1..n, j = 1..m
 \end{array} \quad (10)$$

Die Werte b_k^+ und b_k^- definieren den zulässigen Bereich der Werte der Systemkriterien. Im Weiteren darf nur eine Massnahmenoption pro Bauwerk (Objekt) ausgeführt werden:

$$\sum_{j=1}^m y_{ij} = 1 \quad i = 1..n \quad (11)$$

Falls die Summe der Massnahmenkosten C_{ij} mit einem Wert R (Budgetvorgabe) begrenzt wird, muss auch die folgende Bedingung erfüllt werden:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \cdot C_{ij} \leq R \quad (12)$$

Die Ausdrücke (10) bis (12) definieren ein binäres Programm, welches auch heute für eine grosse Anzahl der Bauwerke ($> 5'000$) kaum lösbar ist. In der Praxis werden deshalb diverse Näherungsverfahren eingesetzt.

3.7.2 Monetäre Verfahren

Es wird davon ausgegangen, dass ein System n Bauwerke (Objekte) umfasst und, dass jedes Bauwerk m Massnahmenoptionen aufweist. Jede Massnahmenoption wird eine binäre Variable y_{ij} zugewiesen, welche den Wert 1 annimmt, wenn die Massnahmenoption j des Bauwerks i ausgeführt werden soll und umgekehrt den Wert 0 annimmt, wenn diese Massnahmenoption nicht die optimale Lösung ist. Die Zielfunktion kann nun wie folgt formuliert werden:

¹⁶ Gemeint sind hier entweder die gewichtete Summe, die Nutzwerte, die globale Gewichte bei AHP oder der Nutzen.

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \bar{N}_{ij} = \max! \quad (13)$$

Es darf nur eine Massnahmenoption pro Bauwerk (Objekt) ausgeführt werden:

$$\sum_{j=1}^m y_{ij} = 1 \quad i = 1 \dots n \quad (14)$$

Falls die Summe der Massnahmenkosten C_{ij} (Budgetbegrenzung) auf einen Wert R begrenzt ist, muss auch folgende Bedingung erfüllt werden:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \cdot C_{ij} \leq R \quad (15)$$

Ähnlich wie bei nicht-monetärer Optimierung definieren die Ausdrücke (6) bis (8) ein binäres Programm. In der Praxis wird auch hier das inkrementelle Kosten/Nutzen Verfahren verwendet, welches die Lösung des obigen binären Programms recht gut annähert.

Dieses Näherungsverfahren ist im Abschnitt 3.4 eingehend beschrieben. Ohne Budgetbegrenzung kann hingegen jedes Objekt separat behandelt werden, d.h. für jedes Objekt wird jene Massnahme optimal welche die Zielfunktion maximiert.

3.7.3 Schlussfolgerungen

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen zur Ermittlung der optimalen Massnahmen beschrieben. Hierzu wurden die häufigsten Verfahren kurz erläutert. Dabei wird zwischen den monetären und den nicht-monetären Verfahren unterschieden. Es wird auch als Vorteil der nicht-monetären Verfahren aufgeführt, dass sie die Berücksichtigung der qualitativen Kriterien erlauben. Dies ist in der Tat nur möglich, wenn man sie quantifiziert und in das Wertsystem integriert. Diese „qualitativen“ Kriterien können dadurch, wie bereits erklärt, mit allen anderen, d. h. auch mit den monetären Kriterien verglichen werden. Das Wertsystem erlaubt somit diese „qualitativen“ Kriterien monetär auszudrücken. Es stellt sich somit aus dieser Betrachtungsweise die Frage über den Zweck der nicht-monetären Formulierung des Optimierungsproblems. Dies insbesondere weil:

- Die zeitliche Präferenz für jedes Kriterium definiert werden muss und
- Die relativen Gewichte für Massnahmenoptionen, Kriterien und Objekte ermittelt werden müssen. Diese werden intuitiv und diskursiv gewonnen und können unter Umständen zu inkonsistenten Ergebnissen führen.

Die monetäre Formulierung bedeutet nicht, wie oft kritisiert wird, dass das Menschenleben oder die Umwelt einen Preis haben. Das monetäre Wertsystem definiert hingegen wie viel die Gesellschaft bereit ist zu investieren, um einen Systemindikator um eine Messeinheit zu verändern.

Folglich besagt das Wertsystem, wie viel die Gesellschaft bereit ist zu investieren um ein Menschenleben zu retten, oder um die Treibhausgase um eine Messeinheit zu reduzieren.

3.8 Wirtschaftliche Optimierung bei Technischen Ausrüstungen

Für die wirtschaftliche Optimierung im Teilsystem Technische Ausrüstungen (elektromechanische Anlagen(EM)) ist zwischen Arbeiten mit oder ohne Verkehrsbehinderung zu unterscheiden.

Theoretische Grundlagen der Optimierung Derartige Arbeiten sind beispielsweise Arbeiten, die nur bei der Sperrung von Tunnelröhren möglich sind und damit zu Stau, Umwegfahrten, etc. führen. Damit werden zusätzliche Strassennutzerkosten erzeugt, die sich wie folgt zusammensetzen [2]:

- Zeitkosten (Zeitverlust-Kosten)
- Fahrzeugbetriebskosten
- Unfallkosten
- Umweltkosten
- Verkehrsregelungskosten

- Weitere Kosten

Die wirtschaftliche Optimierung versucht, die Gesamtkosten auf ein Minimum zu bringen. Da die grössten Kostenanteile in den Zeitverlustkosten (Stau, Umweg) stecken, ist hier der Optimierungsspielraum am grössten.

3.8.1 Arbeiten an EM-Anlagen ohne Verkehrsbehinderung

Viele technische Ausrüstungen (elektromechanische Anlagen) befinden sich nicht im Verkehrsraum, sondern in technischen Räumen, Leitzentralen und anderen abgesetzten Standorten. Arbeiten an diesen Anlagen können derart durchgeführt werden, dass der Verkehr nicht betroffen wird und somit die Strassennutzerkosten nicht verändert werden.

Damit reduziert sich die wirtschaftliche Optimierung auf die Frage der optimalen Erhaltung eines in sich geschlossenen technischen Systems; die Betrachtung kann ohne Einbezug der damit verknüpften technischen und baulichen Anlagen durchgeführt werden.

Allgemein gilt, dass ein System durch den Gebrauch an Wert verliert: der Substanzwert sinkt – nämlich um diejenigen Kosten, die für die Wiederherstellung des Neuwertes nötig wären. Die „Kosten für die vollständige Instandsetzung“ werden nur dann investiert, wenn dies für die Werterhaltung und die geforderte Funktion nötig ist. Bei elektromechanischen Systemen ist dies zumeist erst am Ende der System-Lebensdauer der Fall und bedeutet meistens den vollständigen Ersatz.

Ins Zentrum der Betrachtung rücken bei der wirtschaftlichen Optimierung folglich die Wahl des bestmöglichen Wartungs-Zeitpunktes sowie die Wahl der bestgeeigneten Massnahme. Der Zeitpunkt einer Massnahme wird über die kontinuierliche Zustandserfassung und –Bewertung ermittelt, womit der Einsatz eines Hilfsmittels, wie das EDV-Instrument „EMS“, praktisch zwingend wird. Nur über die kontinuierliche Beobachtung eines Systems und der Erstellung einer schriftlichen Anlagen-„History“ kann der Zeitpunkt optimiert werden. Die Wahl der bestgeeigneten Massnahmen hängt dabei stark von der Art des Systems und der Randbedingungen ab, hier gibt es kaum allgemeingültige Richtlinien.

3.9 Kritische Beurteilung

Die Optimierung in den Teilsystemen ist bauwerksbezogen, d. h. sämtliche Kriterien wie die Kosten der Massnahmoptionen, der Zuwachs in Leistungsfähigkeit infolge Umgestaltung beziehen sich auf ein Bauwerk. Dadurch ist eine logische Berücksichtigung von Benutzerkosten kaum möglich. Die Benutzerkosten beziehen sich auf ein Strassenstück, in der Regel zwischen zwei Knoten. Besteht ein Hindernis auf diesem Strassenstück so ist die Leistungsfähigkeit dieses Strassenstückes durch dieses Hindernis gegeben.

Besteht auf dem gleichen Strassenstück ein zusätzliches Hindernis gleicher Art, werden sich die Leistungsfähigkeit und somit die Benutzerkosten nicht verändern. Die Leistungsfähigkeit bzw. die Benutzerkosten sind somit nicht bauwerksbezogen.

Der Nutzen der gesteigerten Leistungsfähigkeit eines Strassenstückes muss somit mit dafür erforderlichen Umgestaltungskosten an allen Bauwerken dieser Strecke verglichen werden.

3.10 Verfahren der wirtschaftlichen Optimierung

Die Methode der wirtschaftlichen Optimierung beurteilt das Nutzen/ Kosten-Verhältnis der alternativen Massnahmen für ein Objekt.

Als eine relativ weit verbreitete Methode der wirtschaftlichen Optimierung gilt das inkrementelle Nutzen / Kosten- Verfahren, das nachfolgend erläutert wird.

3.10.1 Kurzbeschrieb

Als Nutzen der Massnahmen kann entweder die Verbesserung des Zustandes, oder / und die Reduktion der Strassennutzerkosten infolge Zustandsverbesserung (ausgedrückt als Reduktion der Fahrzeit-, der Fahrzeugbetriebs- und der Unfallkosten) eingesetzt werden [2], (vgl. Abbildung 7).

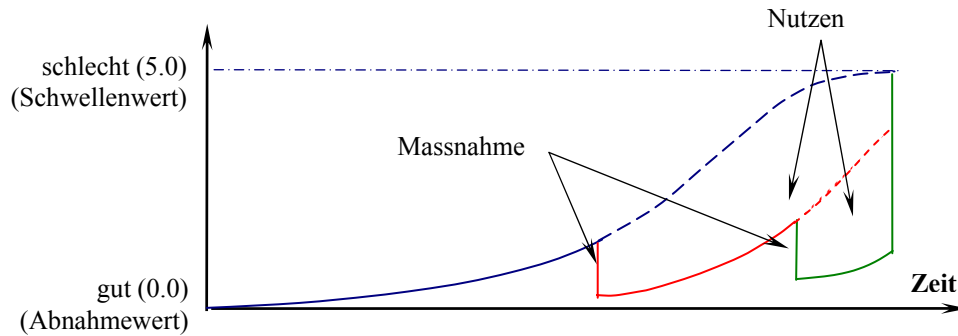


Abbildung 7: Nutzen der Massnahmen

Die Optimierung erfolgt durch Beurteilung der Veränderung des Nutzen/ Kosten- Verhältnisses jeder Massnahme im Vergleich zu anderen alternativen Massnahmen ($\Delta N / \Delta K$).

Somit bekommt jede Massnahme eine (inkrementelle) Verhältniszahl, wobei diejenigen mit negativem Nutzen/ Kosten- Verhältnis ausscheiden.

Die Optimierung erfolgt durch gegenseitigen Vergleich der Massnahmen. Auch hier scheidet diejenige Massnahme mit niedrigerem Nutzen/ Kosten- Verhältnis aus. Dadurch verbleiben (je nach verfügbarem Budget) einige Massnahmen (oder Massnahmenpakete), die als optimal gelten.

Im Folgenden wird diese Methode ausführlicher erläutert.

3.10.2 Inkrementelles Nutzen/ Kosten Verfahren

Das inkrementelle Nutzen/ Kosten Verfahren wird traditionell im Projektmanagement verwendet, wenn ein Projekt unter mehreren gegenseitig ausschliesslichen Projektvarianten gewählt werden muss. Für alle Projektvarianten werden dabei die unmittelbar anfallenden Kosten und der langfristige Nutzen berechnet [17], [18], [19]. Das Verfahren wird in den folgenden Schritten abgewickelt:

1. Alle Projektoptionen mit einem negativen Nutzen/Kosten Verhältnis werden nicht mehr berücksichtigt.
2. Die verbleibenden Projektoptionen werden nach aufsteigenden Kosten nummeriert.
3. Für Projektoptionen 1 und 2, d. h. für Projektoptionen mit den niedrigsten und zweitniedrigsten Kosten wird folgendes inkrementelles Nutzen/ Kosten Verhältnis berechnet:

$$\frac{\Delta N_{12}}{\Delta C_{12}} = \frac{N_2 - N_1}{C_2 - C_1}$$

Wenn dieses Verhältnis ≥ 1.0 ist, wird vorläufig die Projektoption 2 als die beste Projektoption gewählt. Im gegenseitigen Fall, d.h. wenn das Verhältnis < 1.0 ist, bleibt die Projektoption 1 die beste Projektoption.

4. Das inkrementelle Nutzen/Kosten Verhältnis wird für die, bis anhin beste Projektoption und die nächst teure Projektoption berechnet. Wenn dieses Verhältnis ≥ 1.0 ist, wird vorläufig die teurere Projektoption als die beste Projektoption gewählt. Im gegenteiligen Fall, d.h. wenn das Verhältnis < 1.0 ist, bleibt die Projektoption mit niedrigeren Kosten die beste Projektoption.
5. Der Schritt 4 wird so oft wiederholt bis alle Projektoptionen getestet sind. Die verbleibende Projektoption ist die beste Projektoption.

Im folgenden Beispiel wird dieses Verfahren illustriert.

Beispiel 11: Inkrementelles Nutzen/ Kosten-Verfahren

Die wirtschaftliche Analyse der fünf Projektoptionen (A bis E) hat folgende Angaben ergeben:

	Projekte					
	E	C	A	D	F	B
Nutzen (in Millionen CHF)	3.0	11.0	12.0	17.0	19.0	19.0
Kosten (in Millionen CHF)	5.0	7.0	10.0	12.0	16.0	19.0
N/K	0.6	1.57	1.2	1.42	1.19	1.00
Bemerkung	streichen	-	-	-	-	-

Die Projektoptionen werden nach aufsteigenden Kosten aufgelistet und die Projektoption E ist gestrichen, da ihr Nutzen/ Kosten Verhältnis kleiner als 1 ist. Die Verfahrensschritte sind nun wie folgt:

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen C und A: } \frac{12-11}{10-7} = \frac{1}{3} < 1.0 \therefore C \text{ bleibt}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen C und D: } \frac{17-11}{12-7} = \frac{6}{5} > 1.0 \therefore D \text{ gewählt}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen D und F: } \frac{19-17}{16-12} = \frac{2}{4} < 1.0 \therefore D \text{ bleibt}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen D und B: } \frac{19-17}{19-12} = \frac{2}{7} < 1.0 \therefore D \text{ bleibt}$$

Da keine weitere Projektalternativen zur Verfügung stehen, wird das Projekt D als bestes Projekt gewählt. Das Verfahren ist der Abbildung 8 illustriert.

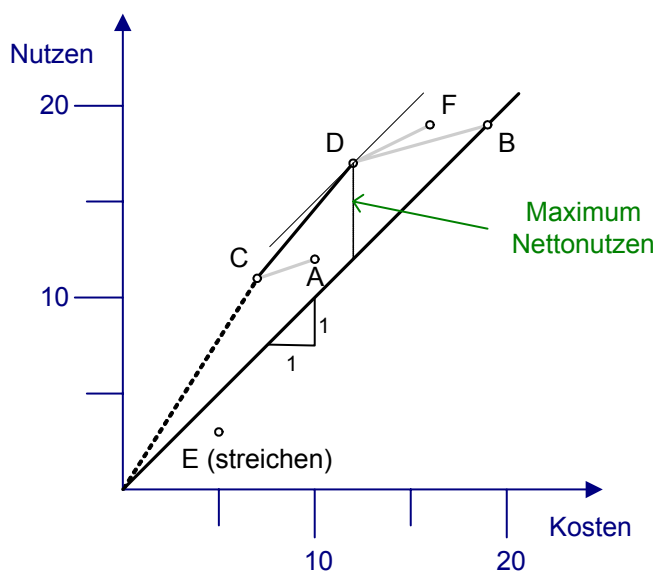


Abbildung 8: Inkrementelles Nutzen/ Kosten Verfahren

Wie aus der Abbildung 8 hervorgeht, ist das Ziel des obigen Verfahrens den Nettonutzen, d.h. die Differenz zwischen dem Gesamtnutzen und den Gesamtkosten zu maximieren.

Mit diesem Verfahren kann für jedes Bauwerk die optimale Erhaltungsoption ermittelt werden. Die Kosten dieser optimalen Erhaltungsoptionen kann man nun aufsummieren und den Finanzbedarf bestimmen. Im idealen Fall wird dieser Finanzbedarf zu 100% budgetiert und das Arbeitsprogramm enthält für jedes Bauwerk die optimale Erhaltungsoption. In der Praxis wird das Budget oft den Finanzbedarf nicht abdecken und somit man die optimalen Erhaltungsoptionen nicht ausführen. Es stellt sich die Frage welche Erhaltungsoptionen ausgeführt werden sollen, wenn das Budget den Finanzbedarf unterschreitet. Diese Aufgabe kann man mit einem binären

mathematischen Programm (Anhang: Gleichungen (46) bis (48)) lösen. Trotz den beeindruckenden Fortschritten auf diesem Gebiet bleiben die verfügbaren Lösungsalgorithmen sehr rechenintensiv und daher relativ langsam. Die Alternative besteht in einer Anpassung der oben beschriebenen inkrementellen Nutzen/Kosten Verfahren (siehe [18] und [19]). Das angepasste Verfahren besteht grob aus folgenden Schritten:

- Das inkrementelle Nutzen/ Kosten Verhältnis wird für jede Erhaltungsoption berechnet. Jene Erhaltungsoptionen mit einem Nutzen/ Kosten Verhältnis kleiner als 1 werden gestrichen. Um dieses Verhältnis für die günstigste Erhaltungsoption zu berechnen wird bei allen Bauwerken eine zusätzliche fiktive Nulloption eingeführt, deren Kosten und Nutzen gleich Null sind. Durch diese Massnahme wird das inkrementelle Nutzen/ Kosten Verhältnis der günstigsten Erhaltungsoption gleich wie das einfache Nutzen/ Kosten Verhältnis ausfallen.
- Alle Erhaltungsoptionen aller Bauwerke werden nach abnehmenden inkrementellem Nutzen/ Kosten Verhältnis in einer Rangliste sortiert.
- Die Erhaltungsoptionen werden dieser Rangliste entlang in das Budget aufgenommen bis das Budget ausgeschöpft wird. Es wird dabei darauf geachtet, dass nur eine Erhaltungsoption pro Bauwerk gewählt wird. Die erste Erhaltungsoption eines Bauwerks auf der Rangliste wird in das Budget aufgenommen mit den entsprechenden Kosten. Die darauf folgende Erhaltungsoption des gleichen Bauwerks erhöht das Budget lediglich um das Kosteninkrement, d.h. um die Kostendifferenz zur vorherigen Erhaltungsoption. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die Budgeteinschränkung eingehalten wird.
- Die Kosteninkremente der ausgewählten Erhaltungsprojekte werden laufend addiert, bis das zur Verfügung stehende Budget aufgebraucht ist. Erhaltungsprojekte, welche das Budget übersteigen, werden übersprungen oder gestrichen.

Um die Kosten jeder Erhaltungsoption richtig in das Budget aufzunehmen, müssen die Erhaltungsoptionen eines gleichen Bauwerks in der Rangliste nach aufsteigenden Kosten sortiert werden. Dies ist im Allgemeinen nicht gewährleistet und somit ist eine zusätzliche Regel erforderlich:

- Betrachtet man zwei Erhaltungsoptionen am gleichem Bauwerk so kann es sein, dass die teurere Option einen grösseren inkrementellen Nutzen/ Kosten Verhältnis aufweist. In diesem Fall wird die günstigere Erhaltungsoption bei der Berechnung des Nutzen/ Kosten Verhältnisses übersprungen. Die übersprungene Erhaltungsoption wird nur dann gewählt, wenn die nächst teure Erhaltungsoption ins Budget nicht passt.

Diese Berechnung der Nutzen/ Kosten Verhältnisse wird am folgenden Beispiel verdeutlicht.

Beispiel 12: Anpassungen des inkrementellen Nutzen/ Kosten Verhältnisses

Die Kosten- und Nutzenangaben für fünf Projektvarianten sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

	Projekte					
	E	C	A	D	F	B
Nutzen (in Millionen CHF)	3.0	11.0	16.0	20	22.0	20.0
Kosten (in Millionen CHF)	5.0	5	9.0	11	16.0	20.0
N/K	0.6	2.2	1.77	1.81	1.38	1.00
Bemerkung	streichen	-	-	-	streichen	streichen
$\Delta N/\Delta K$	0.6	2.2	1.25	2.0	0.4	0.0

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass das inkrementelle Nutzen/ Kosten Verhältnis für das Projekt A tiefer ist als jenes des Projektes D.

Die Erhaltungsoption wird in diesem Fall übersprungen bei der Berechnung des Nutzen/ Kosten Verhältnisses des Projektes D:

	Projekte					
	E	C	A	D	F	B
Nutzen (in Millionen CHF)	3.0	11.0	16.0	20	22.0	20.0
Kosten (in Millionen CHF)	5.0	5	9.0	11	16.0	20.0
N/K	0.6	2.2	1.77	1.81	1.38	1.00
Bemerkung	streichen	-	-	-	streichen	streichen
$\Delta N/\Delta K$	0.6	2.2	-	1.5	0.4	0.0

Die einzelnen Berechnungsschritte sind wie folgt:

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen E: } \frac{3}{5} = 0.6 < 1.0 \therefore E \text{ gestrichen}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen C: } \frac{11}{5} = 2.2 > 1.0$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen A: } \frac{16-11}{9-5} = 1.25 > 1.0$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen D: } \frac{20-16}{11-9} = 2.0 > 1.0 \text{ aber } > 1.25 \therefore A \text{ nur wenn D nicht ins Budget passt}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen D: } \frac{20-11}{11-5} = 1.5 > 1.0$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen F: } \frac{22-20}{16-11} = 0.4 < 1.0 \therefore F \text{ gestrichen}$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta C} \text{ für die Projektoptionen B: } \frac{20-20}{20-11} = 0 < 1.0 \therefore B \text{ gestrichen}$$

Diese Berechnungsschritte sind in der Abbildung 9 illustriert:

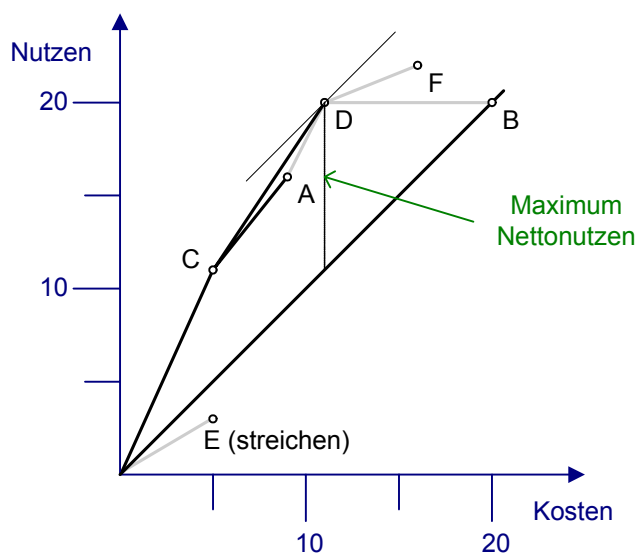


Abbildung 9: Berechnungsschritte des inkrementellen Nutzen/Kosten- Verhältnisses

Der geschilderte Algorithmus ist abgeschlossen, wenn das vorgegebene Budget aufgebraucht ist. Bei unbeschränktem Budget liefert der Algorithmus die wirtschaftlich optimale Auswahl der Erhaltungsprojekte. Bei begrenztem Budget, welches für Erhaltungsprojekte voll ausgeschöpft werden soll, liefert der Algorithmus ein quasi-optimales Ergebnis. Das heisst: die bei einem begrenzten Budget gewählten, wirtschaftlichsten Erhaltungsoptionen sind nicht jene Erhaltungsoptionen, welche bei einem uneingeschränkten Budget gewählt würden.

Der Algorithmus wird im folgenden Beispiel verdeutlicht.

Beispiel 13: Anwendung im BMS

Für 8 Kunstbauten wurden mit je 3 Unterhaltsoptionen erarbeitet: das Nichtstun (eigentlich nur betrieblicher Unterhalt), ein Unterhaltsprojekt und der Ersatz. Die Ausnahme bildet die Kunstbaute 3, für welche nur 2 Unterhaltsoptionen erarbeitet wurden. In der Tabelle 4 sind die für die Optimierung erforderlichen Angaben zusammengefasst:

Tabelle 4: Die Unterhaltsoption von 8 Kunstbauten

Kunstbaute	Unterhaltsoption	Kosten - C_{ij}^i	Kosten - $C_{ij}^i + C_{ij}^l$	Nutzen - N_{ij}	$\Delta N_{ij} / \Delta C_{ij}$
1	Nur betr. Unterhalt	165	658	827	5.012121212
1	Unterhaltsprojekt	742	1243	819	-0.013864818
1	Ersatz	895	1320	895	0.496732026
2	Nur betr. Unterhalt	2	230	92	46
2	Unterhaltsprojekt	40	150	210	3.105263158
2	Ersatz	283	320	283	0.300411523
3	Nur betr. Unterhalt	4	256	548	137
3	Ersatz	520	800	520	-0.054263566
4	Nur betr. Unterhalt	429	1826	1703	3.96969697
4	Unterhaltsprojekt	1550	2138	2512	0.721677074
4	Ersatz	2650	3100	2650	0.125454545
5	Nur betr. Unterhalt	70	463	1600	22.85714286
5	Unterhaltsprojekt	725	1993	725	-1.335877863
5	Ersatz	1400	1967	1426	1.038518519
6	Nur betr. Unterhalt	7	576	363	51.85714286
6	Unterhaltsprojekt	627	932	627	0.425806452
6	Ersatz	548	784	696	-0.873417722
7	Nur betr. Unterhalt	6	2637	1747	291.1666667
7	Unterhaltsprojekt	28	3199	1207	-24.54545455
7	Ersatz	3755	4378	3755	0.68365978
8	Nur betr. Unterhalt	102	476	280	2.745098039
8	Unterhaltsprojekt	289	654	289	0.048128342
8	Ersatz	304	635	323	2.266666667

Die Unterhaltsoptionen mit den inkrementellen Nutzen/ Kosten Verhältnissen kleiner als 1.0 sind in der Tabelle 4 in grauer Farbe angezeigt. Diese Zeilen können gestrichen werden und für die übrigen Unterhaltsoptionen die inkrementellen Nutzen/ Kosten Verhältnisse werden neu berechnet (im vorliegenden Beispiel bleiben sie zufällig unverändert). Die verbleibenden Erhaltungsoptionen sind in der Tabelle 5 zusammengefasst:

Tabelle 5: Unterhaltsoptionen mit den inkrementellen N/K Verhältnis > 1

Kunstbaute	Unterhaltsoption	Kosten - C_{ij}^i	Kosten - $C_{ij}^i + C_{ij}^l$	Nutzen - N_{ij}	$\Delta N_{ij} / \Delta C_{ij}$
1	Nur betr. Unterhalt	165	658	827	5.012121212
2	Nur betr. Unterhalt	2	230	92	46
2	Unterhaltsprojekt	40	150	210	3.105263158
3	Nur betr. Unterhalt	4	256	548	137
4	Nur betr. Unterhalt	429	1826	1703	3.96969697
5	Nur betr. Unterhalt	70	463	1600	22.85714286
6	Nur betr. Unterhalt	7	576	363	51.85714286
7	Nur betr. Unterhalt	6	2637	1747	291.1666667
8	Nur betr. Unterhalt	102	476	280	2.745098039

Die Unterhaltsoptionen müssen nun nach abnehmendem inkrementellen Nutzen/ Kosten Verhältnis sortiert werden. Sie sind in der Tabelle 6 dargestellt:

Tabelle 6: Unterhaltsoptionen sortiert nach abnehmenden inkrementellen N/K Verhältnis

Kunstbaute	Unterhaltsoption	Kosten - C_{ij}^i	Kosten - $C_{ij}^i + C_{ij}^l$	Nutzen - N_{ij}	$\Delta N_{ij} / \Delta C_{ij}$
7	Nur. betr. Unterhalt	6	2637	1747	291.1666667
3	Nur. betr. Unterhalt	4	256	548	137
6	Nur. betr. Unterhalt	7	576	363	51.85714286
2	Nur. betr. Unterhalt	2	230	92	46
5	Nur. betr. Unterhalt	70	463	1600	22.85714286
1	Nur. betr. Unterhalt	165	658	827	5.012121212
4	Nur. betr. Unterhalt	429	1826	1703	3.96969697
2	Unterhaltsprojekt	40	150	210	3.105263158
8	Nur. betr. Unterhalt	102	476	280	2.745098039

Aufgrund dieser Tabelle kann man nun den optimalen Satz von Unterhaltsoptionen für jeden Budgetbetrag bestimmen. Für eine Budgetvorgabe von 500 kCHF werden die optimalen Unterhaltsoptionen wie folgt bestimmt:

Tabelle 7: Arbeitsprogramm für das Budget von 500 kCHF

Kunstbaute	Unterhaltsoption	Budget	Bemerkung
7	Nur. betr. Unterhalt	6.0	< 500 kCHF; wird ins Arbeitsprogramm aufgenommen
3	Nur. betr. Unterhalt	10	< 500 kCHF; wird ins Arbeitsprogramm aufgenommen
6	Nur. betr. Unterhalt	17	< 500 kCHF; wird ins Arbeitsprogramm aufgenommen
2	Nur. betr. Unterhalt	19	< 500 kCHF; wird ins Arbeitsprogramm aufgenommen
5	Nur. betr. Unterhalt	89	< 500 kCHF; wird ins Arbeitsprogramm aufgenommen
1	Nur. betr. Unterhalt	254	< 500 kCHF; wird ins Arbeitsprogramm aufgenommen
4	Nur. betr. Unterhalt	683	> 500 kCHF; wird übersprungen
2	Unterhaltsprojekt	292	< 500 kCHF; wird ins Arbeitsprogramm aufgenommen; die Unterhaltsoption nur betrieblicher Unterhalts wird gestrichen
8	Nur. betr. Unterhalt	394	< 500 kCHF; wird ins Arbeitsprogramm aufgenommen

Aus der Tabelle 7 ist ersichtlich, dass bei einem Budget von 500 kCHF ein Nettonutzen von 5181 CHF erzielt wird. Für die Kunstbaute 4 reicht das Budget nicht aus und sie wird gar nicht unterhalten. Dieses Ergebnis kann durchaus bei Budgetvorgaben vorkommen, welche deutlich unter dem Finanzbedarf liegen. Wie vorher erwähnt, liefert das inkrementelle Nutzen/ Kosten Verfahren bei Budgeteinschränkungen nur Näherungen der genauen Lösungen des binären Programms (Anhang: Gleichungen (46)bis (48)). In Abbildung 10 ist die Näherung (inkrementelles Nutzen/ Kosten Verfahren) sowie die genaue Lösung (binäres Programm) dargestellt.

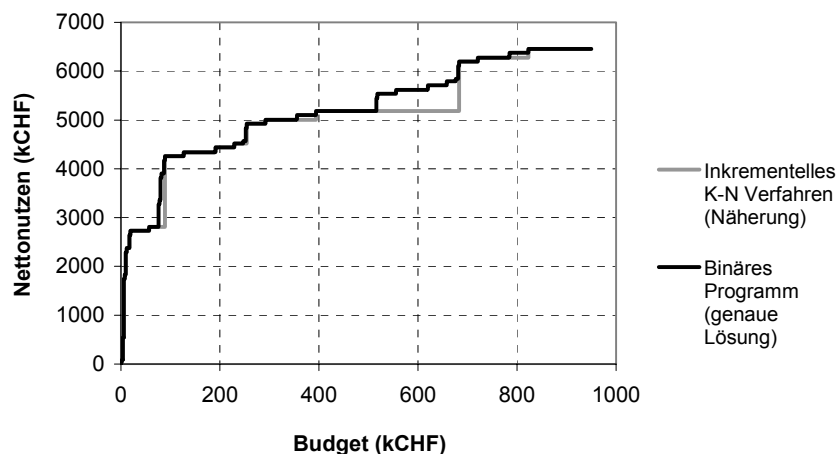


Abbildung 10: Vergleich der Resultate des inkrementellen K/N Verfahrens und der genauen Lösung

Wie aus Abbildung 10 ersichtlich ist, weicht die Näherung deutlich von der genauen Lösung für Budgetvorgaben zwischen 516 kCHF und 658 kCHF ab. Für eine Budgetvorgabe von 650 kCHF schlägt die Näherungslösung den gleichen Satz von Unterhaltsoptionen vor wie bei einem Budget von 500 kCHF und der erzielte Nettonutzen bleibt ebenfalls bei 5181 kCHF. Die genaue Lösung schlägt hingegen den folgenden Satz von Unterhaltsoptionen vor (Tabelle 8):

Tabelle 8: Genaue Lösung für das Budget von 650 kCHF

Kunstbaute	Unterhaltsoption	Kosten - C_{ij}^i	Kosten - $C_{ij}^i + C_{ij}^l$	Nettonutzen
2	Nur. betr. Unterhalt	2	230	90
3	Nur. betr. Unterhalt	4	256	544
4	Nur. betr. Unterhalt	429	1826	1274
5	Nur. betr. Unterhalt	70	463	1530
6	Nur. betr. Unterhalt	7	576	356
7	Nur. betr. Unterhalt	6	2637	1741
8	Nur. betr. Unterhalt	102	476	178

Die Kunstbaute 1, statt Kunstbaute 4, wird nicht unterhalten und die Kunstbaute 2 erhält nur den betrieblichen Unterhalt. Der Nettnutzen beträgt 5713 kCHF, d.h. deutlich mehr als jener Nettonutzen (5181 kCHF), welcher mit dem inkrementellen Nutzen/ Kosten Verfahren ermittelt wird.

Für die praktische Verwendung des inkrementellen Nutzen/Kosten Verfahrens ist vom Interesse, unter welchen Bedingungen dieses Verfahren nicht akzeptable Resultate liefert. In [18] wurden diese Bedingungen aufgezeigt. Die Schwierigkeiten entstehen vor allem, wenn:

- Eine Erhaltungsoption einen relativ grossen Prozentanteil des Budget beansprucht (> 15%)
- Erhaltungsoptionen grosse Kostenunterschiede aufweisen
- Grosse Streuungen des inkrementellen Nutzen/ Kosten-Verhältnisses vorliegen.

Diese Bedingungen sind in der Praxis selten anzutreffen, so dass das inkrementelle Nutzen/ Kosten Verfahren uneingeschränkt angewendet werden kann.

3.11 Genereller Ablaufprozess der Optimierung

Die Anwendung eines dieser Verfahren oder eine kombinierte Anwendung der beiden Verfahren (multikriterielle und wirtschaftliche) hängt von den Zielen, bzw. dem Zweck der Optimierung sowie der Verfügbarkeit der benötigten Daten ab.

Insbesondere für komplexere Strassennetze sollte eher die Kombination der beiden Verfahren in Erwägung gezogen werden, damit die Vorteile beider Verfahren genutzt werden können (transparente Entscheidungswege, Berücksichtigung der Anliegen einer Vielzahl von Betroffenen, monetär ausgewiesene Folgerungen, etc.).

Die Abbildung 11 zeigt den generellen Ablauf des Optimierungsprozesses im Erhaltungsmanagement.

Dieser Ablauf setzt sich aus einzelnen Schritten zusammen, welche zum Teil bereits auf Stufe Teilsystem durchzuführen sind, um anschliessend auf Stufe Gesamtsystem vervollständigt zu werden. Diese Einzelschritte sind in der folgenden Abbildung 11 aufgezeigt:

A: Auf Stufe Teilsystem

Ablaufschritt

- Massnahmenplanung, Variantenvorschläge
- Wahl der optimalen Variante
- Bestimmung eines (provisorischen) Realisierungszeitplans inner-

Bezeichnung

Massnahmenplanung in den Teilsystemen
Optimale Massnahme in den Teilsysteme
Realisierungszeitplan einzelner

halb des betreffenden Teilsystems

- Formulierung der Anforderungen der Teilsysteme an die Optimierung im Gesamtsystem
- Formulierung der charakteristischen Merkmale einzelner Massnahmenvarianten aus den Teilsystemen zur Bestimmung der Spielräume für die Optimierung (kennzeichnende Informationen, welche zur Optimierung auf Stufe Gesamtsystem erforderlich werden)

Teilsysteme

Anforderungen an Optimierung im Gesamtsystem

Charakteristische Merkmale der Massnahmenvarianten für Optimierung im Gesamtsystem

B: Auf Stufe Gesamtsystem

Ablaufschritt

- Bestimmung der Vorgaben und Randbedingungen der Strassenbetreiber für Definition des Erhaltungsabschnitts
- Formulierung der Ziele (der Optimierung) und Bestimmung ihrer Indikatoren (Messgrößen)
- Selektion der vorgeschlagenen Massnahmenvarianten aus den Teilsystemen
- Ermittlung des Vorrangs der Anforderungen der Teilsysteme, Bestimmung der überragenden Anforderungen
- Bestimmung der Varianten von Erhaltungsabschnitten
- Gruppierung der Massnahmen aus allen Teilsystemen für jeden Erhaltungsabschnitt
- Massnahmenmanagement:
Bestimmung der Varianten von Erhaltungsabschnitten durch örtliche Koordination, d.h. Bildung von Massnahmen- Kombinationen für die Erhaltungsabschnitte, unter Berücksichtigung der Ziele/Indikatoren, des Vorrangs der Anforderungen sowie der Vorgaben/ Randbedingungen (vgl. Abbildung 7)
- Wahl des optimalen Erhaltungsabschnitts (e)
 - Überprüfung der Varianten bzgl. Erfüllung der Vorgaben und Randbedingungen
 - Untersuchung der Varianten bzgl. Eignung zur Erreichung der festgesetzten Ziele
 - Auflistung der quantitativ und qualitativ gewonnenen Ergebnisse und Wahl des optimalen Erhaltungsabschnitts
- Bestimmung der optimalen Realisierungszeit für den gewählten Erhaltungsabschnitt
 - Definitiver Realisierungszeitplan

Bezeichnung

Vorgaben und Randbedingungen

Ziele

Selektion

Vorrang

Varianten von Erhaltungsabschnitten

Örtliche Koordination

Varianten von Erhaltungsabschnitten

Optimaler Erhaltungsabschnitt.

Örtliche Optimierung

Zeitliche Optimierung

Die einzelnen Schritte der multikriteriellen Optimierung sind nachfolgend in der Abbildung 11 aufgeführt.

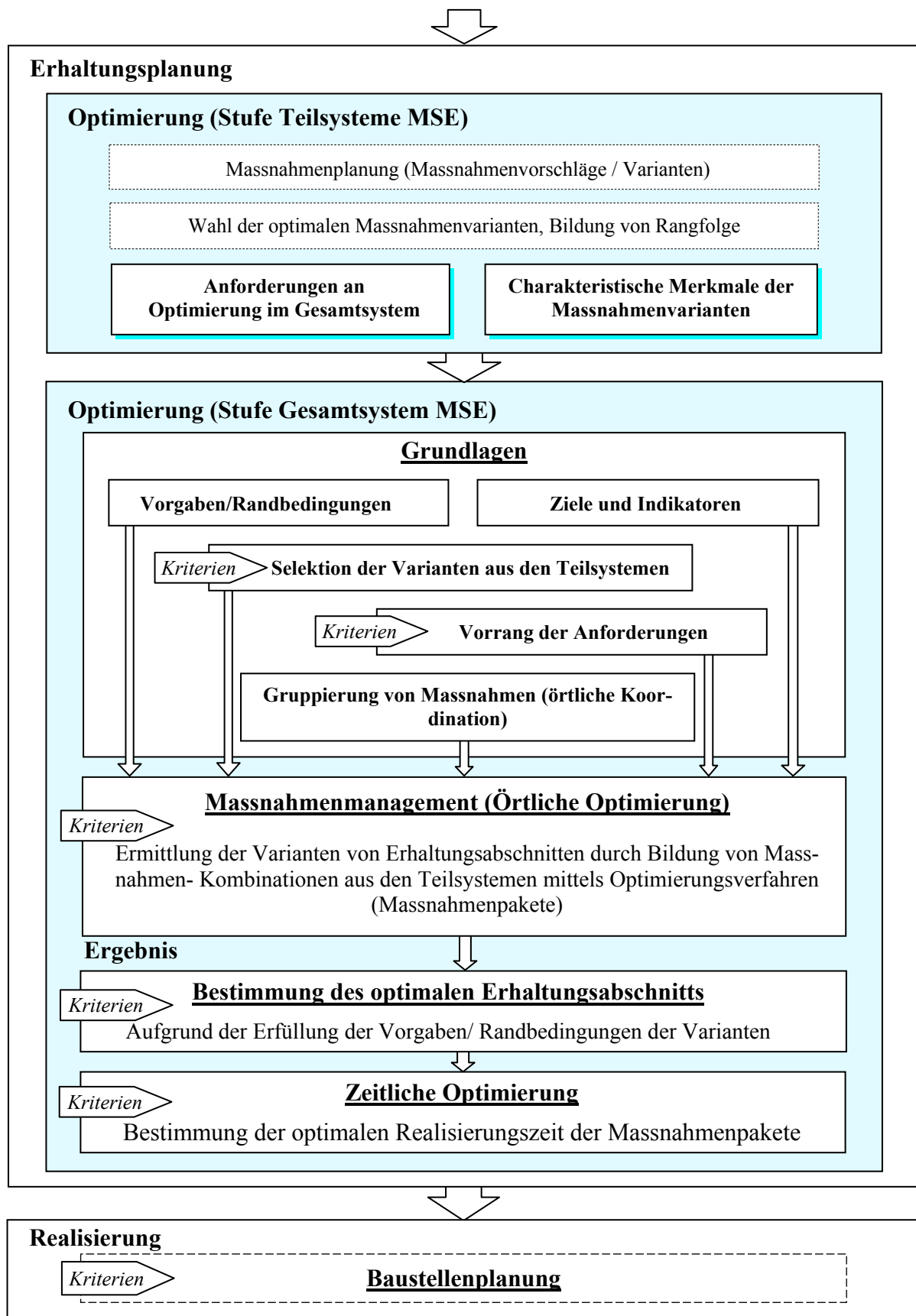


Abbildung 11: Genereller Ablauf des multikriteriellen Optimierungsverfahrens im Gesamtsystem Erhaltungsmanagement

3.12 Optimierungsprozess auf Stufe Teilsystem

Die Optimierung auf Stufe Teilsystem wurde eingehend im Abschnitt 1.6 für PMS (und im Anhang für BMS) erörtert. Es wird nun die Frage der Bestimmung von Anforderungen der einzelnen Teilsysteme an die Optimierung auf Stufe Gesamtsystem sowie ihres Vorranges erörtert.

Für die Optimierung im Gesamtsystem sollen, gemäss Abbildung 11, zunächst die Anforderungen der Teilsysteme, welche als verbindliche und unverbindliche (evtl. als Muss- und Wunsch- Anforderungen) zu differenzieren sind, festgelegt und entsprechend ihrer Bedeutung berücksichtigt werden.

Diese so festgelegten Anforderungen werden anschliessend in mathematische Formeln umgeschrieben, um das Optimierungsverfahren rechnergestützt zu programmieren.

Weil die Anforderungen aus den Teilsystemen oft nicht kohärent sind (wegen unterschiedlichen Bedürfnissen), werden sie mit einem eigens aufzustellenden und gewichteten Kriterienplan objektiv verglichen, damit sie entsprechend ihrer Bedeutung berücksichtigt werden können (siehe Kapitel 3.13.5 „Bestimmung des Vorranges der Anforderungen“).

Das Ergebnis der Festlegung der Anforderungen besteht einerseits in Beseitigung ihrer Widersprüche (Konflikte) aus den Teilsystemen und andererseits in Bestimmung von Spielräumen für die Optimierung. Diese Spielräume sind zu einem Teil durch die Vielfalt der Massnahmenvorschläge (Varianten) aus den Teilsystemen und zum anderen Teil durch die „charakteristischen Merkmale“ der vorgeschlagenen Massnahmen (bzw. "Massnahmenindikatoren" im BMS) definiert.

Es ist noch darauf hinzuweisen, dass sich die Anforderungen je nach Zielsetzung der Strassenbetreiber, Struktur des Strassennetzes und anderen Gegebenheiten ändern, so dass sie nicht „standardisiert“ werden können.

3.12.1 Anforderungen des Teilsystems PMS

Jedes Teilsystem muss für die Optimierung im Gesamtsystem seine Anforderungen formulieren. Diese können sowohl die Bedingungen, unter denen die Massnahme durchzuführen ist, als auch die baustellenbedingten Verkehrsbehinderungen betreffen. Nachfolgend stehen einige Beispiele von Anforderungen aus dem Teilsystem PMS, inkl. ihre Spielräume für Optimierung auf Stufe Gesamtsystem.

<u>Beispiel von Anforderungen im PMS</u>	<u>Kriterien</u>	<u>Formel</u>	<u>Spielraum</u>
<ul style="list-style-type: none"> Keine Verkürzung oder Verkleinerung des Umfangs und keine örtliche Verschiebung der Baustelle 	Ort	$I_{\text{Bau}} \geq I_{\text{Plan}}$	Nein
<ul style="list-style-type: none"> Vergrösserung der Baustelle möglich 	Umfang	$I_{\text{Bau}} \geq I_{\text{Plan}}$	Ja
<ul style="list-style-type: none"> Maximale zeitliche Verschiebung = 2 bis 4 Jahre (je nach Ergebnis der Schadensanalyse) 	Zeitliche Verzögerung	$t_{\text{Realisierung}} \leq t_{\text{Plan}} + (2 \text{ bis } 4 \text{ J})$	Ja
<ul style="list-style-type: none"> Minimale Verkehrsbehinderungen wegen der Baustelle (u.a. durch optimale Verkehrsführung sowie Arbeit in Sonder- Schichten, wie Wochenende oder Nacht) 	Verkehrsbehinderungen	$\Delta t_{\text{Bau}} = \text{Min!}$	Ja
<ul style="list-style-type: none"> Minimale Immissionen für Anwohner infolge Baustelle (hauptsächlich Lärm- Immissionen) 	Immissionen	$\Delta L_{\text{eq}} = \text{Min!}$	Ja
<ul style="list-style-type: none"> Keine Änderung des geplanten optimalen Massnahmentyps 	Massnahmentyp	$\Delta_{(\text{Massnahmentyp})} = 0$	Nein
<ul style="list-style-type: none"> Möglichkeit der Änderung der Massnahmenart (zu jedem Massnahmentyp werden mehrere Massnahmenarten zugeordnet, so dass es immer möglich ist „alternative Massnahmenarten“ festzulegen) 	Massnahmenart	$\Delta_{(\text{Massnahmenart})} > 0$, (Massnahmenart) \in (Massnahmentyp)	Ja
<ul style="list-style-type: none"> Keine Erhöhung der Massnahmenkosten infolge Änderungen der Planung für den definierten Abschnitt um mehr als 10% (exkl. Teuerung) 	Massnahmenkosten	$(\text{Kosten}_{\text{Bau}}) \geq 1.1 (\text{Kosten}_{\text{Plan}})$	Ja
<ul style="list-style-type: none"> Realisierungszeit erst nach der „Auftauperiode“ (Monate April / Mai) bis und mit Monate Oktober / No- 	Jahreszeit	$t_{\text{Realisierung}} =$	Ja

vember (je nach Lage)		01.06. - 01.12.	
<ul style="list-style-type: none"> Keine Belagsaufbrüche innerhalb von definierten Zeitfenstern (z.B. mindestens 5 Jahre) 	Minimale Zeit der Unversehrtheit	$\Delta t_{\text{Massnahme}} \geq 5 \text{ J}$	Nein

Aus den Anforderungen des Teilsystem PMS können für die Optimierung auf Stufe Gesamtsystem z.B. folgende Ziele abgeleitet werden:

Ziel (Teilsystem PMS)	Indikatoren	Formel	Interessen- gruppe
<ul style="list-style-type: none"> Minimierung der Baustellendauer und –häufigkeit im Strassennetz (und demzufolge Minimierung der Verkehrsbehinderungen) 	Zeiteinheit, Geldeinheit	$\sum_{x=1}^3 \text{Teilsysteme} \sum_{t=0}^m K_x \sum_{t=0}^m t$ Bau = Min!*	Strassenbetreiber, Strassenutzer, Umwelt
<ul style="list-style-type: none"> Minimierung der Gesamtkosten, bestehend aus Objektkosten, Strassenutzerkosten und Kosten Dritter, [1], [2] 	Geldeinheit	$G_t = \text{Min!}^{**}$	Strassenbetreiber, Strassenutzer, Umwelt
<ul style="list-style-type: none"> Gewährleistung maximaler Verkehrssicherheit infolge der Baustelle (vollständige Umsetzung der entsprechenden Normen für Verkehrssicherheit auf der Baustelle) 	Anzahl Unfälle (mit Sachschäden, Verletzten, Toten), Geldeinheit	(Anzahl Unfälle) _{Baustelle} = Min!	Strassenbetreiber, Strassenutzer
<ul style="list-style-type: none"> Minimierung der Immissionen der Baustelle in besiedelten Gebieten (Lärm) 	Lärm- Pegel, Geldeinheit	(L_{eq}) _{Baustelle} = Min!	Umwelt

*: Teilsysteme = PMS, BMS, EMT, K_x = Kostenkomponenten: K_1 , K_2 , K_3 , K_1 = Objektkosten, K_2 = Strassenutzerkosten, K_3 = Kosten Dritter, t = Betrachtungszeitraum von t_0 bis t_n

** : $G_t = K_1 + K_2 + K_3$

Diese Ziele müssen mit denjenigen aus den anderen Teilsystemen verglichen und nach Bereinigung allfälliger Zielkonflikte für das Gesamtsystem neu formuliert werden.

3.12.2 Anforderungen des Teilsystems BMS

Diese Anforderungen sind ausführlich im Anhang A beschrieben.

3.12.3 Anforderungen des Teilsystems EMT

Eine Optimierung unter den Teilsystemen ist dann möglich (und auch notwendig), wenn ein Optimierungsspielraum besteht. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn die Erneuerung einer EM-Anlage den Verkehrsraum direkt betrifft, d.h. Arbeiten an der Anlage zu Verkehrsbehinderungen führen. Anlagen, welche den Verkehrsraum nicht betreffen, werden ebenso einer Optimierung unterzogen, allerdings nur innerhalb des Teilsystems; dies betrifft z. B. die Optimierung bez. des günstigsten Zeitpunkts mit Blick auf die Wiederherstellungskosten.

Die folgende Liste gibt einen Überblick über die Systeme, deren Ersatz oder Erneuerung den Verkehrsraum betrifft.

EM-System	Verkehrsraum betroffen?
Installationen im Verkehrsraum	Ja
Installationen im Bankett (auf offener Strecke)	Leicht: Einengung der Fahrbahnbreite, Reduktion Höchstgeschwindigkeit
Installationen im Bankett (Kabelrohranlage, etc.)	Mittel: Sperrung einer Spur
Zentrale Energieversorgung (Tunnel)	Nein
Beleuchtung (Tunnel)	Ja
Lüftung (Tunnel)	Ja
Signalisation	Ja
Mess- und Überwachungselemente (Tunnel)	Ja
Nebenanlagen (Tunnel)	Nein: Arbeiten in der Regel nicht im Verkehrsraum
Steuerungen	Nein
Leitsysteme	Nein

Die Anforderungen des Teilsystems EMT an die Optimierung sind vor allem in zwei Punkten zu berücksichtigen: Ort und Zeitpunkt

Kriterien	Beispiele EMT
Ort	EM-Anlagen müssen zumeist gesamthaft ersetzt oder erneuert werden: Beleuchtungsanlagen (Tunnel), Signalisationseinrichtungen
Umfang	Es ist effizient, im Tunnel mehrere Systeme gleichzeitig zu bearbeiten, wenn sie den Verkehrsraum betreffen: Wartung an TV-Systemen, Messeinrichtungen, Beleuchtungen
Zeitpunkt	Der Zeitpunkt wird über eine Zustandsbewertung ermittelt; Toleranzen von 2.-3 Jahren sind möglich.
Verkehrsbehinderung	Da Arbeiten an EM-Anlagen in Tunneln in der Regel nur bei gesperrten Röhren durchgeführt werden, sind zumeist nur spezielle Zeitfenster möglich: z.B. Sperrwochen im Frühjahr und Herbst. Sperrnächte werden in städtischen Regionen auf Veranstaltungen, Messen, usw. abgestimmt.

Es ist zu beachten, dass die verheerenden Tunnel-Katastrophen in den Jahren 1999 (Montblanc- und Tauerntunnel) und 2001 (Gotthard) weltweit zu vermehrter Aufmerksamkeit gegenüber der Tunnelsicherheit geführt haben.

Die Anforderungen an die technischen Ausrüstungen in Strassentunneln wurden stark erhöht. Dies zeigt sich insbesondere bei der Tunnellüftung und bei der Festlegung der maximalen Fluchtweglänge im Fahrraum einröhriger Tunnel.

3.12.4 Charakteristische Merkmale der Massnahmenvarianten

Eine Massnahme, die in einem Teilsystem für die Optimierung auf Stufe Gesamtsystem generiert wird, muss durch bestimmte Informationen (Attribute) über ihre Art, Kosten, Eignung (zur Erreichung der Ziele) und Wirksamkeit charakterisiert werden können.

Diese Informationen werden als Merkmale (oder technische Eigenschaften der Massnahme) bezeichnet.

Besitzen einige dieser Merkmale äquivalente Alternativen, so ist es vorteilhaft sie anzugeben, damit für die Ermittlung der Erhaltungsabschnitte darauf zurückgegriffen werden kann (Erhöhung des Entscheidungsspielraums).

Als Beispiel kann die Art der Massnahme (beschrieben durch Ausführungsschritte, Schichtdicken, Mischgutsorte und Mischgutzusammensetzung) als ein solches Merkmal genannt werden.

Im PMS werden verschiedene Arten von Massnahmen als Varianten gehandelt, weil sie annähernd gleiche Wirkung erzielen. Diese Massnahmen werden in der Regel dem gleichen Massnahmentyp zugeordnet¹⁷.

Zu beachten ist, dass die charakteristischen Merkmale einer Massnahme voneinander unabhängig sein müssen. Sind jedoch bestimmte Merkmale abhängig voneinander, können sie dann zu einer selbständigen "Merkmalsgruppe" gebündelt werden.

Als Beispiel solcher abhängigen Merkmale können „Baustellendauer“ und „Verkehrsbehinderungen“ genannt werden.

Diese Abhängigkeiten sind aber nicht für jede Massnahmenvariante gleich stark, so dass sie fallweise überprüft werden müssen.

Als Beispiel für unabhängige Merkmale kann der Ortsbezug einer Massnahmenvariante aufgeführt werden.

Die Anzahl der charakteristischen Merkmale der Massnahmen sollte möglichst klein bleiben (Vermeidung von zu grossem Aufwand). Gleichzeitig sollte sie genügend Entscheidungsspielraum für die Optimierung bieten.

3.13 Optimierungsprozess auf Stufe Gesamtsystem

Die Beschreibung des Optimierungsprozesses auf Stufe Gesamtsystem erfolgt nach der Systematik der Abbildung 11. Zunächst werden die einzelnen Schritte beschrieben. Anschliessend werden die Bestimmung der optimalen Erhaltungsmassnahme (örtliche Optimierung) und die Wahl des optimalen Realisierungszeitpunktes (zeitliche Optimierung) erläutert.

3.13.1 Bestimmung der Vorgaben und Randbedingungen

Für die Optimierung auf Stufe Gesamtsystem (zur Bildung optimaler Erhaltungsabschnitte) müssen die Entscheidungsträger (Strassenbetreiber) die politischen, finanziellen, rechtlichen und technischen Randbedingungen festlegen und diese, bei Bedarf, als strategische und evtl. auch operative Vorgaben differenzieren.

Zu welchem Zweck die Vorgaben festgesetzt werden, hängt vom Strassentyp ab.

Während für National- und stark befahrene Kantonsstrassen (auch teilweise für Stadtstrassen) die Vorgaben den Betrieb und die Nutzung der Anlage betreffen und z.B. die Minimierung der Verkehrsbehinderungen infolge Baustellen sowie die Reduktion der Stausituationen oder Immissionen bezwecken, ist für Kantons- und Gemeindestrassen die Substanz der Anlagen die massgebende Grösse und die entsprechenden Vorgaben zielen deshalb auf die Substanzerhaltung und Minimierung des Wertverlustes ab.

Es ist nicht möglich allgemein gültige Vorgaben und Randbedingungen für alle Strassennetze zu definieren, vielmehr muss jeder Strassenbetreiber selbst diese bestimmen.

Nachfolgend werden einige Beispiele für Vorgaben und Randbedingungen präsentiert.

¹⁷ Die PMS- Massnahmen sollten gezielt untersucht und die gleichartigen so gruppiert werden, dass für die Optimierung eine Grundlage gebildet werden kann. Diese Thematik ist bisher aus der Sicht der Optimierung noch zu wenig erforscht und sollte dringend durch VSS angegangen werden.

Kriterien	Indikator	Formel	Beschreibung
<ul style="list-style-type: none"> Minimale Länge desr Erhaltungsabschnitts 	Längeneinheit (m oder km)	$l_i \leq l_{\text{Max}}$	Die minimale Länge der Baustelle wird in Abhängigkeit des Strassentyps und der Anzahl Fahrstreifen bestimmt
<ul style="list-style-type: none"> Minimaler Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Erhaltungsabschnitten 	Längeneinheit (km)	$a_i \leq a_{\text{Max}}$	Masstab für „baustellenfreier“ Fahrt, insbesondere für Hochleistungsstrassen und während bestimmter Jahreszeit (Sommerferien) interessant
<ul style="list-style-type: none"> Minimaler Zeitabstand zwischen zwei aufeinander folgenden Massnahmenpaketen für einen Erhaltungsabschnitt oder Teile davon 	Zeiteinheit (Jahre)	$\Delta (t_{\text{Realisierung } n+1} - t_{\text{Realisierung } n}) \geq T_{\text{Fix}}$	Masstab für zeitliche Dauer der Unversehrtheit des Strassenkörpers, wichtig vor allem für Strassen mit Werkleitungen sowie für Strassen mit hohem Verkehrsaufkommen
<ul style="list-style-type: none"> Lärm (maximal zumutbare Grenze) 	Lärm-Messeinheit dBA	$L_{\text{eq}} \leq L_{\text{eqMax}}$	Erwartetes Ausmass der Immissionen infolge Baustelle, ausgedrückt in "Kosten Dritter" (hauptsächlich Lärmkosten)
<ul style="list-style-type: none"> Verkehrsführung (maximal zumutbare Beeinträchtigung der Betriebsbereitschaft der Strasse) 	Behinderungszeit	$\Delta t_{\text{Baustelle}} = \text{Min!}$	Beschreiben von Notwendigkeit, Art, Umfang und Kosten der Verkehrsführung infolge Baustelle
<ul style="list-style-type: none"> Jahreszeit der Realisierung 	Monat	$t_{\text{Realisierung}} = 01.06. - 01.12.$	Vorgabe bzgl. Jahreszeit der Realisierung, abhängig auch von der Altitude (Höhe über Meer) der Baustelle
<ul style="list-style-type: none"> Ort (Abschnitt), (Anfangs- und Endpunkt) 	Wird im Schritt "Bildung der Erhaltungsabschnitte und Gruppierung der Massnahmen" berücksichtigt.		

3.13.2 Bildung der Erhaltungsabschnitte und Gruppierung der Massnahmen

Je nach Bedeutung der Strassen kann pro Fahrtrichtung ein Erhaltungsabschnitt festgelegt werden (wie für Autobahnen oder Nationalstrassen).

Die Bildung der Erhaltungsabschnitte dient der örtlichen Koordination der Massnahmen als Vorstufe zur eigentlichen Optimierung, d.h. Bildung der Varianten von Massnahmenpaketen verschiedenster optimaler Massnahmen der Teilsysteme Fahrbahnen, Kunstbauten und Technische Ausrüstungen.

3.13.3 Ziele der Optimierung auf Stufe Gesamtsystem

Für die Formulierung der Ziele der Optimierung auf Stufe Gesamtsystem müssen die Anforderungen der Teilsysteme an Optimierung festgelegt werden.

Die langfristigen Ziele des Erhaltungsmanagements sind in den VSS- Normen SN 640 900a (Erhaltungsmanagement- Grundsätze) sowie SN 640 901 (Erhaltungsmanagement - Zielsystem) formuliert. Sie dienen der Aufgabeneffizienz der Strassenbetreiber zu maximieren, unter Gewährleistung von definiertem Mass an Funktionalität, Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit.

Die Fülle dieser Ziele beherbergt die Interessen verschiedener Gruppen, die von den Entscheidungen im Erhaltungsmanagement betroffen sind. Diese sind Strasseneigentümer (bzw. –betreiber), Strassenutzer und Dritte (Anwohner und Umwelt).

Als Beispiel kann das Ziel „Wirtschaftlichkeit“ erwähnt werden, welches die Minimierung der Gesamtkosten vorschreibt, d.h. die Objektkosten (Betreiberkosten) + Strassennutzerkosten + Kosten Dritter [1], [2]. Zur Erreichung dieses Zieles müssen z.B. Massnahmen ergriffen werden, welche kostengünstig sind, zeitlich kürzere Baustellen erfordern und wenig Lärm verursachen. Aus diesen Kriterien lassen sich die Anforderungen der Teilsysteme an die Optimierung im Gesamtsystem ableiten.

Das Ergebnis der Optimierung ist der optimale Erhaltungsabschnitt, wofür der Strassenbetreiber den optimalen Realisierungszeitpunkt zu bestimmen hat (Baustellenplanung, gemäss Abbildung 11).

3.13.4 Selektion der Varianten aus den Teilsystemen

Damit die Anzahl der aus den Teilsystemen gemeldeten Massnahmen zur Optimierung im Gesamtsystem nicht zu gross wird, muss ein objektives Selektionsverfahren für die Zulassung von „geeigneten“ Massnahmen angewendet werden. Die definitive Bestimmung dieser Kriterien hängt von Vorgaben und Randbedingungen ab, welche durch die Strassenbetreiber festzulegen sind.

Nachfolgend sind als Beispiel einige Kriterien für die Selektion der PMS- Objekte aufgelistet und in der Abbildung 12 dargestellt.

Kriterien (PMS)	Grenzwerte und Indikatoren (Beispiele)
▪ Baulicher Zustand	Der bauliche Zustand der für die Optimierung relevanten Objekte liegt zwischen zwei (zu bestimmenden) Grenzwerten (<u>Abbildung 12</u>).
▪ Rest- Lebensdauer	≤ 8 Jahre
▪ Minimale Massnahmekosten	\geq CHF 10'000.00
▪ Zeitlicher Aufwand	≥ 5 Mann Tage

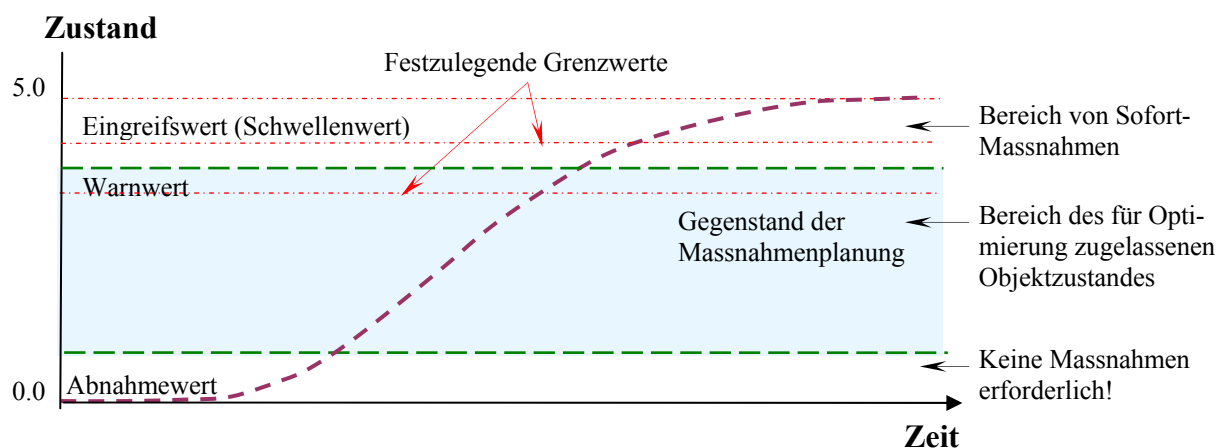


Abbildung 12: Baulicher Zustand als Selektionskriterium für die Optimierung (Beispiel)

3.13.5 Bestimmung des Vorrangs der Anforderungen

Eine wichtige Entscheidungsgrundlage zur Ermittlung des optimalen Erhaltungsabschnitts, bestehend aus Massnahmen für die Objekte aus den verschiedenen Teilsystemen, ist die Abklärung des Vorrangs (oder Vorherrschaft) ihrer Anforderungen.

Der oben angedeutete Vorrang hängt von den Attributen der Massnahme und des Objektes ab, die aufgezeigt (und evtl. gewichtet) werden müssen. Als Beispiel können folgende objektbezogene Attribute genannt werden:

<u>Attribute</u>	<u>Beschreibung</u>
▪ Dauer	Dauer der Massnahme (Baustellendauer)
▪ Kosten	Kosten der Massnahme (Objektkosten)
▪ Verkehrsbehinderung	Erwartetes Ausmass der Verkehrsbehinderungen infolge Baustelle, ausgedrückt in Strassennutzerkosten, welche differenziert nach Zeitkosten, Fahrzeugbetriebskosten und Unfallkosten auszuweisen sind (grösserer Spielraum für Optimierung), [1], [2]
▪ Ursache	Ursache der Massnahme (ungenügende Verkehrssicherheit, Substanzerhaltung, Betriebsbereitschaft,...)
▪ Funktion	Funktion des Objekts im Strassennetz (zu definieren z.B. als primäre und sekundäre Funktion bei der Gewährleistung der Betriebsbereitschaft und Leistungsfähigkeit der Strasse)
▪ Abhängigkeiten	Grad der Abhängigkeit anderer Objekte (bzw. Projekte) von der Massnahme für das Objekt
▪ Wirkungsdauer	Erwartete Wirkungsdauer der Massnahme

Die Anforderungen derjenigen Objektgruppe (z.B. Fahrbahnen oder Kunstbauten) mit dem höchsten Vorrang werden als bestimmende Anforderungen im Optimierungsprozess auf Stufe Gesamtsystem behandelt.

3.13.5.1 Beispiel 14: Ermittlung des Vorrangs

Das folgende Beispiel zeigt, wie der Vorrang der Anforderungen aus den Teilsystemen quantifiziert werden kann (Tabelle 9).

Massnahme aus Teilsystem	Kriterien								Summe	Rangfolge
	Dauer (Woche)	Kosten (10 ³ CHF)	Ausmass V-Behind. (Strassennutzerkosten in 10 ³ CHF)	Ursachen (Gewicht des Zieles in %)	Funktion (Gewicht)	Abhängigkeiten (Grad der Abh. von anderen Massnahmen)	Verkehrsführung (10 ³ CHF)	Wirkungsdauer (J)		
PMS	20	10	5	25	3	0	3	20		
BMS	10	7	2	25	3	10	1	15		
EMS	5	5	0	30	2	10	0	5		
G (%)	10	20	15	10	15	10	10	10	100	
PMS	200	200	75	250	45	0	30	200	1000	1
BMS	100	140	30	250	45	100	10	150	825	2
EMS	50	100	0	300	30	100	0	50	630	3

Tabelle 9: Quantifizierung des Vorrangs der Anforderungen der Teilsysteme (Beispiel)

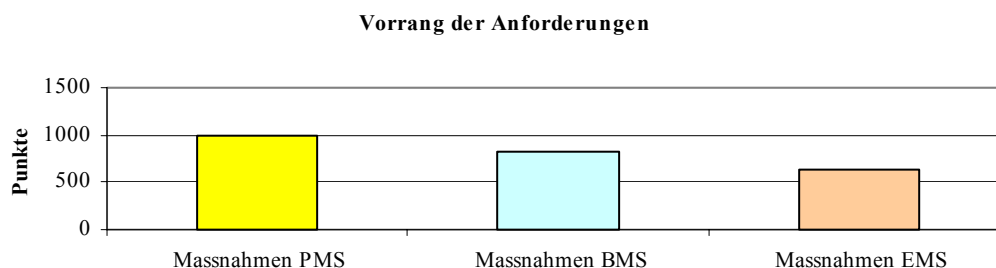


Abbildung 13: Darstellung des Vorrangs der Anforderungen der Teilsysteme (Beispiel)

Zu beachten ist, dass die Kriterien für die Bestimmung des Vorrangs gewichtet werden. Deshalb muss jedes Mal bei Optimierung eines Erhaltungsabschnitts das Ausmass der Schwankung ihrer Maximal- und Minimalwerte so berücksichtigt werden, dass der Einfluss einzelner Kriterien auf das Ergebnis nicht von der gewählten „Bewertungsskala“ abhängig wird.

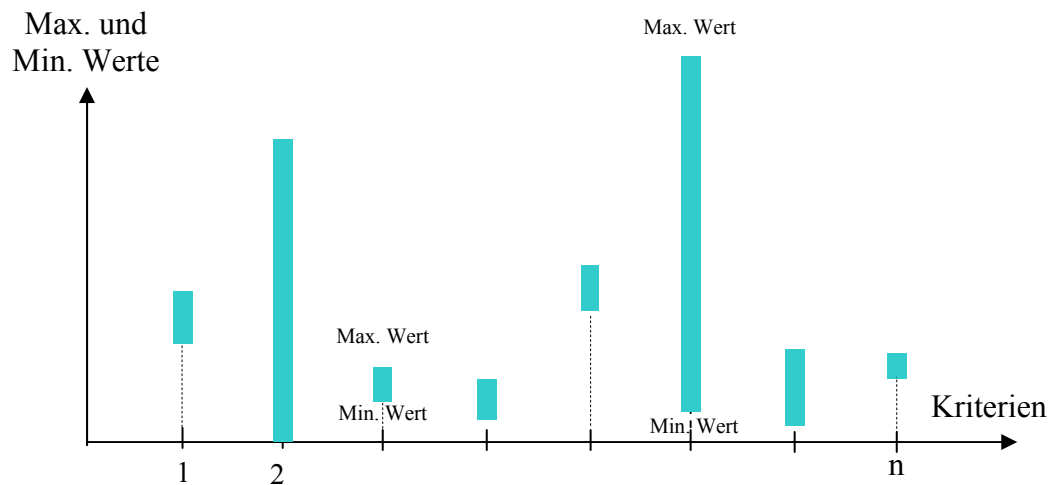


Abbildung 14: Schematisches Beispiel der Schwankungen der Kriterienwerte (die gegebenenfalls für die Korrelation zu „normalisieren“ sind)

3.13.6 Bildung von Varianten von Massnahmenpaketen

Jeder Erhaltungsabschnitt wird durch eine bestimmte Kombination von Massnahmenvarianten (Massnahmenoptionen) aus den Teilsystemen gebildet. Dazu müssen Kriterien angewendet werden, welche der Zielsetzung der Optimierung (gesetzt durch die Strassenbetreiber) genügen.

3.13.6.1 Kriterien

Nachfolgend stehen die Kriterien zur Bestimmung der Massnahmen- Kombinationen und des optimalen Erhaltungsabschnitts. Darunter sind am häufigsten verwendet: „Ort“, „Prioritäten“ und „Kosten“, wobei "Kosten" erst für die Wahl des Erhaltungsabschnitts berücksichtigt wird. Das Kriterium „Zeit“ wird bei der Ermittlung optimaler Realisierungszeit der Massnahmen berücksichtigt.

<u>Kriterien</u>	<u>Beschreibung</u>
Ort	Festlegung der Länge (Anfangs- und Endpunkt, bezogen auf Bezugspunkte) und Breite des Erhaltungsabschnitts
Abhängigkeiten	Projektabhängigkeiten (Gegenseitige Abhängigkeiten sowie Einfluss der Massnahmen auf andere Projekte und Objekte)
Kosten	Verfügbares Budget
Prioritäten	Priorität, bzw. Dringlichkeit der Massnahmen (Funktion von Zustand, Massnahmenziel, Funktionelle Bewertung des Erhaltungsabschnittes, [3], [6])
Zeitliche Häufigkeit	Für den gleichen „Ort“, bzw. gleichen Erhaltungsabschnitt
Örtliche Häufigkeit	Gleichzeitiges Betreiben von mehreren Baustellen auf derselben Strasse
Zustand	Erwartete Rest- Lebensdauer der Objekte
Verkehrsbehinderungen	Abhängig von DTV, Verkehrsführung, Länge der Baustellen, zulässige Höchstgeschwindigkeiten vor und entlang der Baustelle
Baustellendauer	Abhängig von Wahl geeigneter Bauverfahren, Anzahl Arbeitsschichten, Wochenendarbeit, ...
Strassennutzerkosten	Bestehend aus Zeit- und Fahrzeugbetriebs- sowie Unfallkosten, [1], [2]

Immissionen	Hauptsächlich durch Baulärm verursachte Immissionen an Anwohnern
Machbarkeit	Personelle Kapazität der Verwaltung

Die Abbildung 15 visualisiert die Bildung von Varianten der Massnahmenpakete.

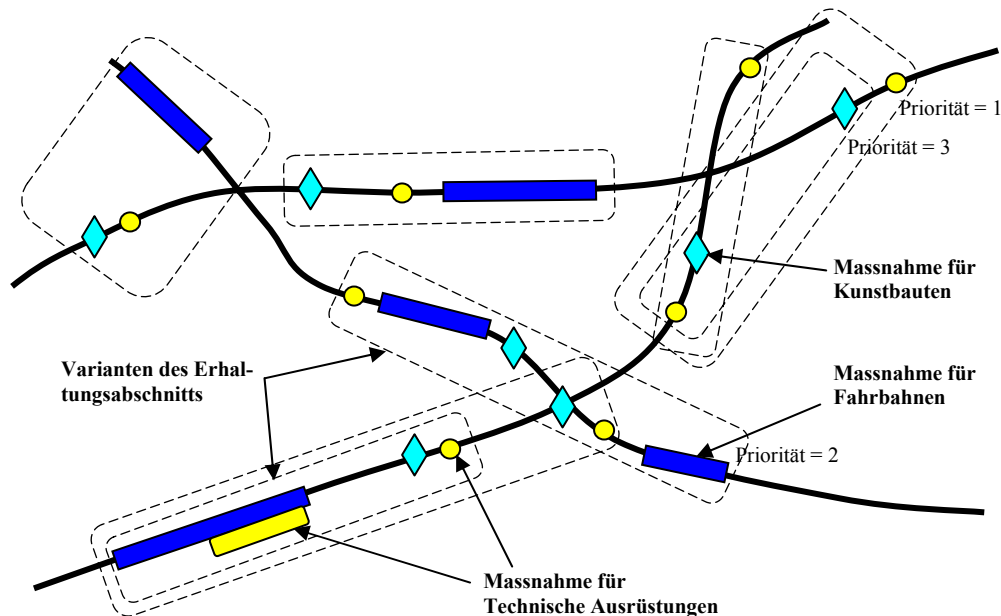


Abbildung 15: Bildung von Varianten der Massnahmenpakete für Erhaltungsabschnitte

Bei der Bildung der Varianten werden in der Regel Massnahmen mit unterschiedlicher Priorität zu Massnahmen- Kombinationen zusammengesetzt. Dies hat zur Folge, dass die einzelnen Massnahmen entweder früher oder später als der vorgesehene optimale Zeitpunkt realisiert werden, was eine Verteuerung der Gesamtobjektkosten bedeutet.

Demgegenüber steht der Nutzen von Massnahmen, welcher kurzfristig durch die Reduktion der Wartezeiten der Verkehrsteilnehmer infolge Baustelle und langfristig durch Verbesserung des Strassenzustands erzielt wird.

Forschungsbedarf¹⁸ Zur Berechnung der angedeuteten Zusatzkosten der Massnahmen infolge zeitlichen Vor- oder Aufschiebs liegen noch keine abgestützten Grundlagen vor und sie sollten dringend erforscht und bereitgestellt werden¹⁹

In der folgenden Abbildung 16 ist der Prozess zur Bildung von Erhaltungsabschnitten durch Massnahmen- Kombinationen aus den Teilsystemen sowie die zeitliche Verschiebung der Realisierung einzelner Massnahmen generell schematisch dargestellt.

¹⁸ Ein entsprechendes Forschungsprojekt ist seitens der VSS- Fachkommission 7 im September 04 ausgeschrieben worden (VSS 2004/715).

¹⁹ Bisher ist einzig in den Kanton Graubünden und Basel-Stadt eine entsprechende Untersuchung durchgeführt worden. Die Ergebnisse müssen aber vertieft und gesamtschweizerisch abgestützt werden. Sie sollen daraufhin die Grundlage für eine entsprechende VSS- Norm bilden.

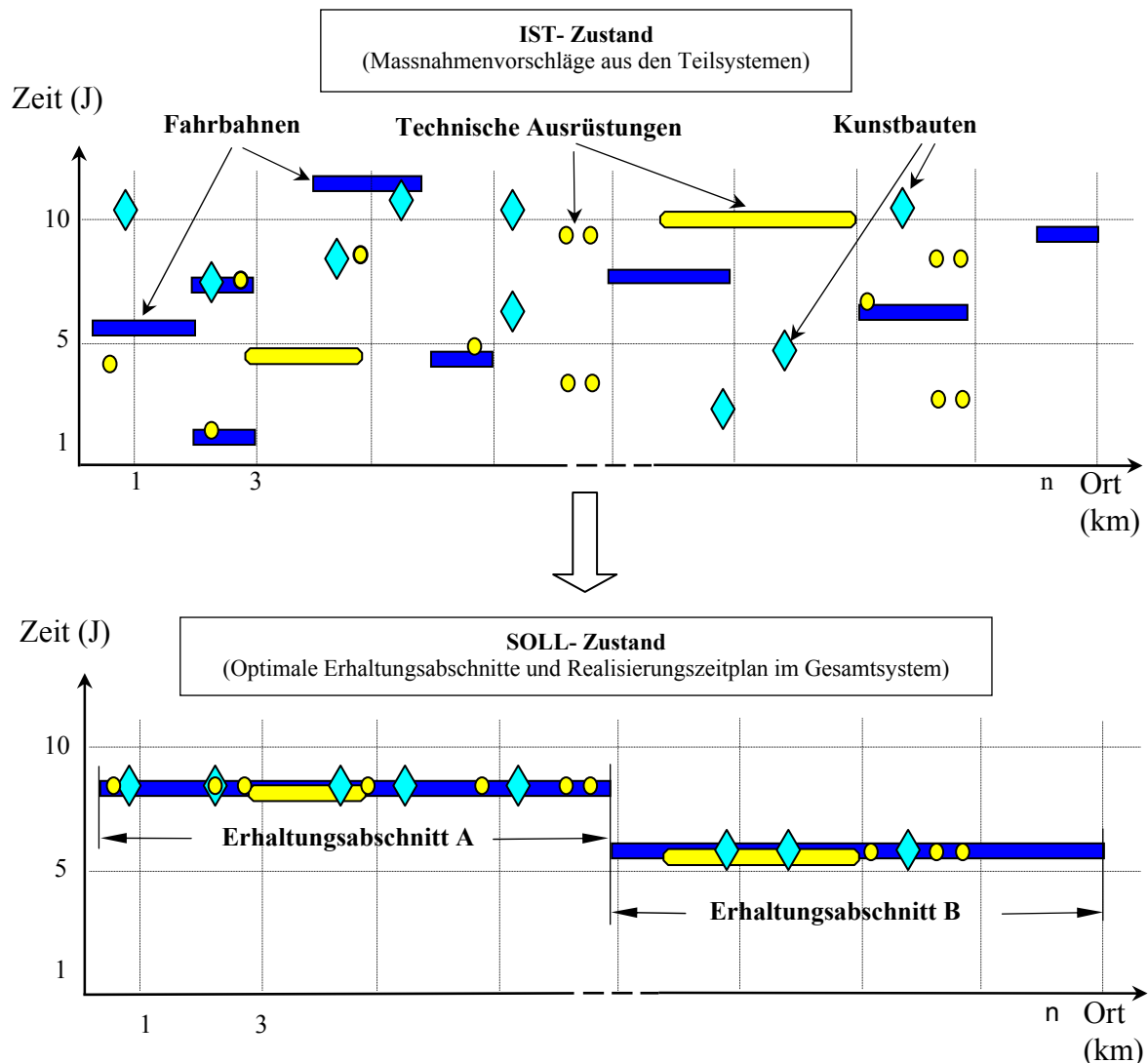


Abbildung 16: Beispiel einer örtlich und zeitlich optimierten Baustellen (Bildung von Massnahmenpaketen)

Die Kriterien zur Wahl des optimalen Erhaltungsabschnitts werden im multikriteriellen Optimierungsverfahren gewichtet. Die Gewichtung muss sorgfältig und unter Berücksichtigung der Interessen aller Beteiligten, durch die Strassenbetreiber vorgenommen werden. Dabei kann dieser Prozess iterativ durchgeführt werden, nämlich in einem ersten Ansatz sollen die Gewichte subjektiv festgelegt und nach jeder Planungsperiode überprüft und bei Bedarf angepasst werden. Für diese erste Gewichtung zeigt die [Tabelle 10](#) einen Vorschlag, der für die einzelnen Entscheidungsfälle die Gewichte mit Toleranzwerten (Streuungsbereichen) angibt.

Code	Kriterien	Indikatoren	Bewertungseinheit <i>K_i</i> (Fallweise zu bestimmen)	Beispiele zur Gewichtung der Kriterien, differenziert nach Entscheidungsfall		
				Vorrang der Anforderungen [V]	Massnahmenmanagement [M]	Wahl des opt. Erhaltungsabschnitts [E]
				G1 (%)	G2 (%)	G3 (%)
C1	Aktueller Baulicher Zustand	Zustandsindices (SN 640 904)	<i>K1 (zu bestimmen)</i>		10 ± 5 ¹⁾	15 ± 5 ¹⁾
C2	Rest- Lebensdauer	Zeiteinheit	<i>K2 (Jahre)</i>		5 ± 1	5 ± 1
C3	Massnahmenkosten	Geldeinheit	<i>K3 (z.B. 1000 CHF)</i>	20 ± 4		20 ± 4
C4	Zeitliche Dauer der Baustelle	Zeiteinheit	<i>K4 (z.B. Wochen)</i>	15 ± 3	20 ± 4	10 ± 2
C5	Verkehrsbehinderungen	Zeiteinheit (Ø Wartezeit) * Anzahl Fahrzeuge (abhängig von DTV und Ganglinien)	<i>K5 (z.B. Fahrzeuge * h)</i>	15 ± 3		15 ± 3
C6	Lärm / Immissionen	z.B. „zusätzliche“ dBA oder Anzahl der Betroffenen	<i>K6 (zu bestimmen)</i>		10 ± 2	5 ± 1
C7	Funktion des Objekts im Strassennetz	Z.B. als primär / sekundär oder nach einer gezielten Funktionsanalyse	<i>K7 (Gewicht)</i>	20 ± 4		
C8	Ursache der Massnahme	Funktionales Ziel	<i>K8 (gewichtetes Zielertragswert)</i>	10 ± 2		
C9	Abhängigkeiten	Anzahl der von der Massnahme abhängigen Projekte und Objekte	<i>K9 (absolute Zahl)</i>	10 ± 2	15 ± 3	10 ± 2
C10	Verkehrsführung	(V**- Reduktion)	<i>K10 (km/h)</i>			5 ± 1
C11	Wirkungsdauer der Massnahme	Zeiteinheit	<i>K11 (z.B. Jahre)</i>	10 ± 2		5 ± 1
C12	Priorität der Massnahmen in den Teilsystemen	Dringlichkeitswert oder Prioritätsstufe der Massnahmen, [6]	<i>K12 (z.B. 1 bis 4)</i>		25 ± 5	
C13	Strassennutzerkosten	Geldeinheit	<i>K13 (z.B. 1000 CHF)</i>		15 ± 3	10 ± 2
Summe Gewicht (G)				100	100	100

1): Zu differenzieren für Strassen mit hoher und tiefer Verkehrsbelastung

** : V = Zulässige Höchstgeschwindigkeit

Tabelle 10: Kriterienplan der Optimierung auf Stufe Gesamtsystem für verschiedene Entscheidungsfälle mit Vorschlag für die Gewichtung

Berechnung des Vorrangs:

$$[V] = \sum_1^n C_i \times K_i = C_3 \times K_3 + C_4 \times K_4 + C_5 \times K_5 + C_7 \times K_7 + C_8 \times K_8 + C_9 \times K_9 + C_{11} \times K_{11} = \text{Max.}!$$

Optimales Massnahmenpaket:

$$[M] = \sum_1^n C_i \times K_i = C_1 \times K_1 + C_2 \times K_2 + C_4 \times K_4 + C_6 \times K_6 + C_9 \times K_9 + C_{12} \times K_{12} + C_{13} \times K_{13} = \text{Max.}!$$

Wahl des Erhaltungsabschnitts:

$$[E] = \sum_1^n C_i \times K_i = C_1 \times K_1 + C_2 \times K_2 + C_3 \times K_3 + C_4 \times K_4 + C_5 \times K_5 + C_6 \times K_6 + C_9 \times K_9 + C_{10} \times K_{10} + C_{11} \times K_{11} + C_{13} \times K_{13} = \text{Max.}!$$

Beispiel 15: Bestimmung des optimalen Erhaltungsabschnitts

In der Tabelle 11 werden zwei Varianten eines optimalen Erhaltungsabschnitts verglichen.

Co- de	Kriterien	Ge- wich t (%)	Varianten					
			A			B		
			Bewertung	Normali- siert*	Gewich- tet	Bewertung	Normali- siert*	Gewich- tet
C1	Aktueller Baulicher Zustand	15	4.5 = schlecht	3.5	52.5	3.7 = kritisch	2.5	37.5
C2	Rest- Lebensdauer (J)	5	1	1.0	5	5	2.0	10
C3	Massnahmenkosten (CHF)	20	2.5 Mio.	3.0	60	2.0 Mio.	2.0	40
C4	Zeitliche Dauer der Baustelle	10	5 M	2.0	20	4 M	1.5	15
C5	Verkehrsbehinderungen	15	150 h	1.6	24	100 h	1.2	18
C6	Lärm / Immissionen	5	wenig	2.0	10	keine	1.0	5
C7	Funktion des Objekts im Stras- sennetz		-	-	-	-	-	-
C8	Ursache der Massnahme		-	-	-	-	-	-
C9	Abhängigkeiten	10	Abwasserlei- tung	2.5	25	keine	1.0	10
C10	Verkehrsführung	5	Mit LSA	2.0	10	Ohne LSA	1.0	5
C11	Wirkungsdauer der Massnahme (J)	5	15	1.0	5	12	1.5	7.5
C12	Priorität der Massnahmen in den Teilsystemen		-	-		-	-	-
C13	Strassennutzerkosten	10	700'000	2.5	25	600'000	2.0	20
Summe		100			236.5			168
Rangfolge					1			2

*: Alle Werte der Kriterien werden in eine einheitliche Skala von 1 bis 5 (gut bis schlecht) umgerechnet (normalisiert).

LEGENDE: M = Monate, h = Stunden, LSA = Lichtsignalanlagen

Tabelle 11: Beispiel zur Bewertung der Variante des optimalen Erhaltungsabschnitts

3.14 Massnahmenmanagement (örtliche Optimierung)

Nach der Bereitstellung aller Grundlagen kann die Optimierungsaufgabe auf Stufe Gesamtsystem im Rahmen des Massnahmenmanagements angegangen werden. Diese Aufgabe beinhaltet die Bildung von Varianten von Massnahmenpaketen aus den Teilsystemen für die einzelnen Erhaltungsabschnitte.

Zur Lösung dieser Optimierungsaufgabe kann sowohl das multikriterielle, als auch wirtschaftliche Verfahren angewendet werden.

Die Optimierung in den Teilsystemen ist bauwerksbezogen, d. h. sämtliche Kriterien wie die Kosten der Unterhaltsoptionen (Massnahmenvorschläge), der Zuwachs in Leistungsfähigkeit infolge Umgestaltung, beziehen sich auf ein Bauwerk.

3.14.1 Einleitung

Bei der Erhaltungsplanung wird oft angenommen, dass sich die Kriterien vor und nach Erhaltungsmaßnahmen nicht wesentlich unterscheiden.

Diese Annahme spielt eine Schlüsselrolle bei manchen Managementsystemen und kann weitgehend gerechtfertigt werden.

Es stellt sich die Frage, ob man die nachteilige Veränderung der Kriterien während der Erhaltungsmaßnahmen bei der Optimierung vernachlässigen darf.

Die jüngsten Untersuchungen [9] und [10] zeigen, dass man die baustellenbedingte Verminderung der Leistungsfähigkeit und Sicherheit auf keinen Fall vernachlässigen darf.

Ähnlich wie bei den Umgestaltungsmassnahmen sind auch hier die Leistungsfähigkeit und Sicherheit nicht bauwerks- sondern streckenbezogen.

Die nachteiligen Folgen der baustellenbedingten Verminderung der Leistungsfähigkeit und Sicherheit auf einem Strassenstück werden nur durch die Art, Dauer und Länge der gewählten Verkehrsführung bestimmt.

Durch die koordinierte, gleichzeitige Ausführung mehrerer Erhaltungsmaßnahmen auf einer Strecke würden deshalb diese nachteiligen Folgen für die Strassenutzer nur einmal auftreten.

Dieser Vorteil muss man mit dem Nachteil abwägen, dass womöglich einige Massnahmen nicht zu ihrem optimalen Zeitpunkt ausgeführt werden.

Bei den schwer befahrenen Strecken können diese Vorteile, d. h. Reduktion der Staustunden und Unfallverminderung durch die gemeinsame Verkehrsführung viel grösser wiegen als die Nachteile der, zum suboptimalen Zeitpunkt ausgeführten Erhaltungsmaßnahme.

Die gleichzeitige Ausführung möglichst vielen Erhaltungsmaßnahmen kann somit von ganz grosser Bedeutung sein.

Die „Arbeitsgruppe Substanzerhaltung der Nationalstrassenwerke“ erkannte diese Sachverhalte und empfahl im Bericht vom 27. Januar 1998 u.a. folgende Massnahmen:

- Massnahme 10: Minutiöse Planung und Vorbereitung
„Die minutiöse Planung und Vorbereitung von einzelnen Erhaltungsabschnitten beginnt mit einer langfristigen Beurteilung, bei welcher aufgrund einer systematischen und periodischen Zustandserfassung und Bewertung eine Einteilung in Erhaltungsabschnitte und deren Einordnung in ein mittelfristiges, auf zehn Jahre angelegtes Erhaltungsprogramm im Voraus erfolgt.“
- Massnahme 11: Grosse Baulose
„Die Planungsarbeiten für die Erhaltung sind gezielt auf die Bildung geeigneter Objektgruppierungen zu grossen Baulosen auszurichten, deren verschiedene Erhaltungsmaßnahmen umfassend auszuschreiben und zu vergeben und möglichst gleichzeitig durchzuführen sind.“

Eine Kombination von Erhaltungsmaßnahmen auf einem Strassenabschnitt wird als Massnahmenpaket bezeichnet. Die Varianten von Massnahmenpaketen, unter welchen das optimale Massnahmenpaket ermittelt wird, sind die Massnahmenpaketooptionen. Der Erhaltungsabschnitt ist jener Strassenabschnitt, welcher durch eine Massnahmenpaketooption beeinträchtigt wird. Das Ziel der Optimierung auf der Stufe Gesamtsystem ist es jene Massnahmenpaketooption zu wählen, welche den Nutzen maximiert.

3.14.2 Problemstellung

Die Massnahmenoptionen aus den Teilsystemen können beliebig kombiniert werden sofern ihre Zeiträume für die Ausführung identisch sind. Die Massnahmenoptionen welche gleichzeitig ausgeführt werden können bilden Massnahmenpakete. Für die Optimierung auf Stufe Gesamtsystem werden die in Abschnitten 3.2 und 3.3 beschriebenen Kriterien verwendet. Diese sind die Leistungsfähigkeit und die Sicherheit und sie werden hier mit einem stellvertretenden Kriterium (Proxykriterium) ersetzt. Dieses stellvertretende Kriterium ist Benutzerkosten. Das dritte Kriterium ist die Betreiberkosten. Aufgrund dieser zwei Kriterien kann man ein Massnahmenpaket mit einem anderen vergleichen. Die einzelnen Kostenanteile werden wie folgt definiert:

1) Betreiberinitialkosten I

Die Betreiberinitialkosten I umfassen die Summe der Projektierungs- und Baukosten für einzelne Bauwerke auf dem Erhaltungsabschnitt. Sie müssen dabei auf einen gemeinsamen Zeitpunkt umgerechnet.

2) Betreiberfolgekosten I

Die Betreiberfolgekosten I umfassen kapitalisierte Folgekosten der künftigen Erhaltungsmaßnahmen. Für ein Bauwerk werden sie berechnet in dem eine unendliche Folge der gleichen Massnahmen vorausgesetzt wird. Das Intervall zwischen den Massnahmen kann dabei eine deterministische oder stochastische (z. B. Markov- Ketten) Grösse sein. Im letzteren Fall wird der Erwartungswert der Folgekosten berechnet. Die Betreiberfolgekosten I für einen Erhaltungsabschnitt können streng genommen nicht als Summe der Betreiberfolgekosten von einzelnen Bauwerken berechnet werden. Durch die Bündelung von Erhaltungsmaßnahmen werden manche Erhaltungsmaßnahmen an Bauwerken nicht zum optimalen Zeitpunkt ausgeführt. Die Abweichungen vom optimalen Zeitpunkt werden allerdings kaum gross sein, so dass die Betreiberfolgekosten I als Summe der Betreiberfolgekosten an einzelnen Bauwerken berechnet werden können.²⁰

3) Betreiberinitialkosten II

Die Betreiberkosten II umfassen die Kosten für die Einrichtung der Verkehrsführung. Die Kosten sind abhängig von der Art und der Länge der Verkehrsführung. Sie bestehen aus einem fixen Anteil an Anfang und Ende des Erhaltungsabschnittes und einem variablen, längeabhängigen Anteil.

4) Betreiberfolgekosten II

Die Betreiberfolgekosten II umfassen kapitalisierte Folgekosten für die Einrichtung der künftigen Verkehrsführungen. Diese Kosten kann man kaum berechnen da die künftigen Erhaltungsabschnitte nicht bekannt sind. Man kann jedoch diese Kosten eingrenzen. Eine obere Grenze ergibt sich als Summe der Betreiberfolgekosten II aller Erhaltungsmaßnahmen an einzelnen Bauwerken, wenn sie ungebündelt ausgeführt würden. Die untere Grenze ergibt sich, wenn man eine unendliche Folge der gleichen Massnahmenpakete an gleichem Abschnitt voraussetzt. Das Intervall zwischen den Massnahmenpaketen wird dem grössten Intervall zwischen den Erhaltungsmaßnahmen an einzelnen Bauwerken gleichgesetzt. In einer ersten Näherung kann die Obergrenze verwendet werden.

5) Benutzerinitialkosten

²⁰ Der so gemachte Fehler konnte man mit einer Monte Carlo Simulation abschätzen. Eine Voranalyse, welche im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführt wurde hat ergeben, dass diese Abweichung vernachlässigbar ist.

Die Benutzerkosten umfassen die Zeitverlust-Kosten, Betriebskosten der Fahrzeuge, Unfallkosten und Umweltkosten während der Ausführung der Erhaltungsmassnahmen. Die Zeitverlustkosten stellen den grössten Anteil der Benutzerkosten dar. Die Zeitverlustkosten und Betriebskosten sind nur von Verkehrsführung abhängig und bestehen aus einem fixen Anteil (Wartezeiten von der Baustelle) und einem variablen, längeabhängigen Anteil (reduzierte Geschwindigkeit entlang der Baustellen). Die Unfallkosten sind ähnlich modelliert da sie auch aus einem fixen Anteil (Unfälle beim Verkehrsführungswechsel) und einem längeabhängigen Anteil (erhöhte Unfallrate entlang der Baustelle). Die Umweltkosten werden im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt. Die Benutzerkosten sind eigentlich marginale Kosten, d.h. sie sind zusätzliche Kosten, welche durch die baustellenbedingte Verkehrsführung verursacht wurden.

6) Benutzerfolgekosten

Die Benutzerfolgekosten umfassen kapitalisierte Zeitverlust-Kosten, Betriebskosten der Fahrzeuge, und Unfallkosten infolge künftiger Baustellen innerhalb des betrachteten Erhaltungsabschnitts. Diese Kosten können ähnlich wie die Betreiberfolgekosten II abgeschätzt werden.

7) Benutzernutzen

Die Massnahmenpakete können Umgestaltungsmassnahmen umfassen, welche die Leistungsfähigkeit und Sicherheit langfristig vorteilhaft verändern. Diese vorteilhafte Veränderung resultiert in Reduktion der Benutzerkosten. Der Benutzernutzen umfasst kapitalisierte Reduktion der Benutzerkosten zwischen zwei Knoten infolge des geplanten Massnahmenpakets.

Die Erhaltungspakete können noch weiteren Einschränkungen unterzogen werden, wie z. B. eine Begrenzung der Baustellenlänge, eine Vorgabe in Bezug auf den Mindestabstand zwischen den Baustellen, eine Budgetvorgaben, die zeitlichen Vorgaben u. a. m. Für jedes Erhaltungspaket, welche diese Bedingungen erfüllt muss man alle Kostenanteile aufaddieren und jenes Erhaltungspaket mit den tiefsten Kosten bzw. den höchsten Nutzen ist das optimale Erhaltungspaket. Das Optimierungsverfahren soll ein solches Paket ermitteln.

3.14.3 Definition von Massnahmenoptionen aus den Teilsystemen

Die Massnahmenoptionen aus den Teilsystemen müssen die für die Paketbildung erforderlichen Angaben enthalten. Diese Angaben sind wie folgt (siehe auch [5]):

1) Ort der Massnahmenoption

Die Massnahmeoption muss lokalisiert werden. Die Lokalisierung erfolgt via Kilometrierung (Anfangs- km und End- km). Bei richtungstrennten Strassen ist zusätzlich anzugeben, auf welcher Seite einer Strasse gebaut wird (z.B. Fahrtrichtung Zürich -> Chur, Fahrtrichtung Chur -> Zürich, beide Richtungen). Die Lokalisierung ist erforderlich um die Bedingungen in Bezug auch Baustellenlänge, Mindestabstand zwischen den Baustellen usw. zu erfüllen.

2) Zeitraum für die Ausführung

Es ist anzugeben, in welchem Zeitraum (z.B. 2004-2008) eine Massnahmeoption ausgeführt werden kann.

3) Verkehrsbehinderung

Durch die Baustellen wird die Leistungsfähigkeit der Strassen vermindert. Es ist deshalb anzugeben, welche Art der Spurführung (z.B. 4+0, 3+1, 2+1) für die Realisierung der Massnahmenoption vorgesehen ist. Zusätzlich ist das Verkehrsangebot (Anzahl der Fahrspuren, die dem Verkehr pro Fahrtrichtung zur Verfügung stehen mit zul. Geschwindigkeit) anzugeben. Weiter ist Anfang und Ende (Anfangs- km und End- km) und die zeitliche Dauer dieser Spurführung mit einem bestimmten Verkehrsangebot anzugeben.

4) Betreiberkosten I

Für jede Massnahmenoption sind die Betreiberinitialkosten I und Betreiberfolgekosten I anzugeben. Diese Angaben sollen lediglich die Projektierungs- und Baukosten umfassen.

5) Betreiberkosten II

Die Betreiberkosten II umfassen die Kosten für die Einrichtung der Verkehrsführung. Diese Kosten sind so anzugeben als ob diese Massnahmenoption alleine ausgeführt werde. Das gleiche gilt auch für die Betreiberfolgekosten II. Beide Angaben werden zur Abschätzung dieser Kosten für den ganzen Abschnitt verwendet.

6) Benutzerkosten

Die Benutzerkosten sind für jede Massnahmenoption so anzugeben als ob diese Massnahmenoption alleine ausgeführt würde. Das gleiche gilt auch für die Benutzerfolgekosten. Beide Angaben werden zur Abschätzung dieser Kosten für den ganzen Abschnitt verwendet.

7) Benutzernutzen

Falls die Massnahmenoption eine Umgestaltungsmassnahme ist, müssen auch die Benutzernutzen angegeben werden. Dabei ist das betrachtete Bauwerk so zu behandeln als ob die Reduktion der Benutzerkosten infolge dieser Massnahmenoption auf dem ganzen Abschnitt zwischen zwei Knoten auftreten wird.

Mit diesen Angaben zu Massnahmenoptionen an Bauwerken kann man die Massnahmenpakete bilden und mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens das optimale Massnahmenpaket ermitteln. Dieses Optimierungsverfahren wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

3.14.4 Mathematischer Lösungsansatz

3.14.4.1 Problemanalyse

Für die Ermittlung des optimalen Massnahmenpakets ist ein ähnliches Vorgehen denkbar wie bei der Optimierung auf der Stufe des Teilsystems Kunstbauten. Dies würde bedeuten, dass man alle möglichen Kombinationen von Massnahmenoptionen, d.h. alle möglichen Massnahmenpakete samt allen erforderlichen Angaben ermitteln müsste. Die Massnahmenoptionen, welche ein Massnahmenpaket bilden können den Verkehrsfluss negativ beeinträchtigen. Diese Beeinträchtigung kann zudem in beiden Richtungen unterschiedlich sein. Aus diesem Grund muss die Strasse richtungsgrennt modelliert werden. Dies bedeutet, dass jene Massnahmenoptionen, welche beide Richtungen beeinflussen, müssen im Modell in zwei Massnahmenoptionen, je eine pro Richtung unterteilt werden. Diese Sachverhalte werden hier anhand eines Beispiels ([Abbildung 17](#)) näher erläutert.

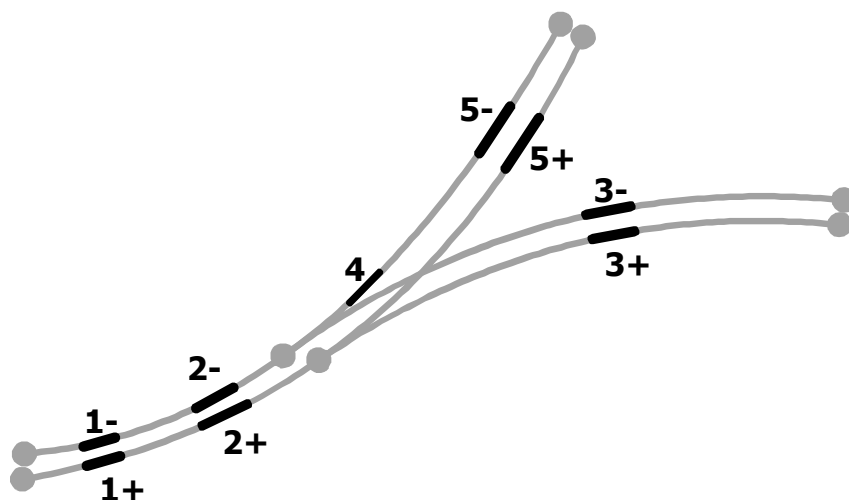


Abbildung 17: Strassennetz mit Massnahmenvorschlägen

Das Strassennetz in [Abbildung 17](#) ist richtungsgrennt dargestellt und die von Teilsystemen erarbeiteten Massnahmenoptionen sind als dicke schwarze Striche dargestellt. Diese Massnahmenoptionen sind in [Abbildung 18](#) mit einem „+“ für die Richtung mit steigender Kilometrierung und mit „-“ für die

Richtung mit abnehmender Kilometrierung dargestellt. Die Massnahmenoptionen können beliebig kombiniert werden, so das 32 Massnahmenpaketen gebildet werden können. Diese Massnahmenpakete sind in der Tabelle 12 aufgelistet:

0 MO	1 MO	2 MO	3MO	4MO	5MO
Nichtstun	1, 2, 3, 4, 5	1-2, 1-3,1-4,1-5 2-3,2-4,2-5 3-4, 3-5 4-5	1-2-3,1-2-4, 1-2-5 1-3-4,1-3-5 1-4-5 2-3-4,2-3-5 2-4-5 3-4-5	1-2-3-4,1-2-3-5 1-2-4-5 1-3-4-5 2-3-4-5	1-2-3-4-5

Tabelle 12: Anzahl möglicher Massnahmenpakete für 5 Massnahmenvorschläge

Diese Anzahl lässt sich im allgemeinen Fall für n Massnahmenvorschlägen wie folgt berechnen:

$$n_p = 2^n \quad (16)$$

Die Kostenanteile für diese Massnahmenpakete können nun berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Benutzerkosten für jede Richtung separat ermittelt werden müssen. Auf diese Weise ermittelt man für jedes Massnahmenpaket alle erforderlichen Kostenanteile und das optimale Massnahmenpaket kann mit Hilfe eines binären Programms oder mit Hilfe einer Kosten/Nutzern Analyse ermittelt werden.

Diese nahe liegende Lösung ist in der Praxis wegen der kombinatorischen Komplexität nicht umsetzbar. Die Anzahl Massnahmenpakete wächst exponentiell mit der Anzahl Massnahmenoptionen. Bereits 50 Massnahmenvorschläge ergeben über eine Trillion mögliche Massnahmenpakete! Unter der Annahme, dass sich zwei oder sogar drei Massnahmenoptionen nur durch die Verkehrsführung unterscheiden, ist die Anzahl der technisch unterschiedlichen Massnahmenoptionen noch viel kleiner. Die Lösung ist auch rechnerisch ineffizient, da den Massnahmen zu Grunde liegendes Strassennetz bei der Optimierung völlig ignoriert wird.

3.14.4.2 Grundlagen: Problem des kürzesten Pfades

Für die weiteren Ausführungen ist eine Einführung in die Ermittlung von kürzesten Wegen in einem Netzwerk (gerichteten Graphen) erforderlich.

Ein **Graph** $G=(N, A)$ besteht aus einer Knotenmenge N , und einer Kantenmenge A .

In einem ungerichteten Graphen sind die Kanten mit ungeordneten Knotenpaaren $\{i, j\} \in A$ definiert, wobei $i, j \in N$.

In einem Netzwerk, d. h. in einem gerichteten Graphen sind die Kanten durch geordnete Knotenpaare $(i, j) \in A$ definiert und es wird der kürzeste Weg zwischen den Knoten k und Knoten l gesucht.

Dieses Problem ist ein lineares Programm, welche sich dank seiner speziellen Struktur sehr effizient mit dem "Dijkstra - Algorithmus" lösen lässt.

Das lineare Programm wird wie folgt formuliert:

$$Z = \sum_{(i,j) \in A} y_{ij} d_{ij} = \min!$$

Randbedingungen:

$$1 + \sum_{j:(j,k) \in A} y_{jk} = \sum_{j:(k,j) \in A} y_{kj} \quad (17)$$

$$\sum_{j:(j,l) \in A} y_{jl} = 1 + \sum_{j:(l,j) \in A} y_{lj}$$

$$\sum_{j:(j,i) \in A} y_{ji} = \sum_{j:(i,j) \in A} y_{ij} \quad \text{für alle } i \in N \wedge i \neq k \wedge i \neq l$$

$$0 \leq y_{ij} \leq 1 \quad \text{for all } (i, j) \in A$$

LEGENDE: \in : „ist Element von“, \wedge : „und“

Im obigen linearen Programm d_{ij} ist die Distanz zwischen Knoten i und j und y_{ij} ist die binäre Variable, welche den Wert 1.0 annimmt wenn sich die Kante (i,j) auf dem kürzesten Weg befindet. Die ersten zwei Randbedingungen beziehen sich auf den Anfangs- bzw. den Endknoten. Der Anfangsknoten kann man als eine Quelle verstehen, aus welcher eine Einheit in das Netzwerk hinein fließt. Diese Einheit fließt durch das Netzwerk und versinkt schliesslich im Endknoten. Die Randbedingungen sind die Kontinuitätsbedingungen in den Knoten, die sicherstellen, dass die Einheit, welchen in einen Knoten hinein fließt aus diesem Knoten auch hinaus fließt. Für das Problem des kürzesten Pfades darf man die Einheit nicht teilen um sicherzustellen, dass die Einheit in einen Knoten nur durch eine eingehende Kante hinein fließt und nur durch eine ausgehende Kante hinaus fließt. Daher müssen die Flüsse im allgemeinen Fall mit binären Variablen dargestellt werden. Dank der speziellen Struktur des obigen mathematischen Programms kann man auf die binäre Einschränkung verzichten und das lineare Programm (17) zur Ermittlung von kürzesten Wegen verwenden, was die rechnerische Behandlung des Problems wesentlich vereinfacht. Das lineare Programm (17) wird dennoch die optimalen Werte der Variablen y_{ij} liefern, welche zwingend entweder 1 oder 0 sind.

Beispiel 16: Problem des kürzesten Pfades

Betrachtet wird ein Netzwerk mit 8 Knoten und 15 Kanten wie in [Abbildung 18](#) dargestellt. Die Nummer auf den Kanten stellen die Distanzen zwischen den Knoten dar. Gesucht wird der kürzeste Weg zwischen den Knoten 1 und 8.

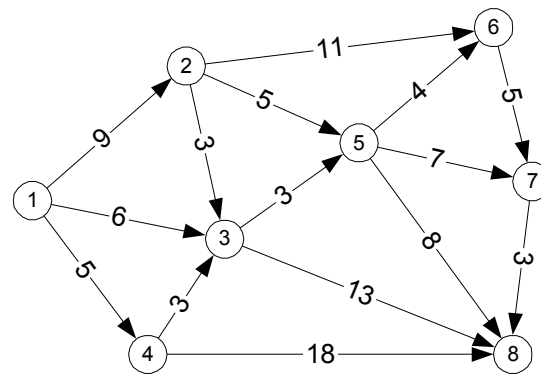


Abbildung 18: Netzwerk

Die Kantenmenge A ist wie folgt:

$$A = \left\{ \begin{array}{l} (1,2), (1,3), (1,4), (2,3), (2,5), (2,6), (3,5), (3,8), \\ (4,3), (4,8), (5,6), (5,7), (5,8), (6,7), (7,8) \end{array} \right\}$$

Das lineare Programm wird wie folgt formuliert:

$$Z = 9y_{12} + 6y_{13} + 5y_{14} + 3y_{23} + 5y_{25} + 11y_{26} + 3y_{35} + 13y_{38} + 3y_{43} + 18y_{48} + 4y_{56} + 7y_{57} + 8y_{58} + 5y_{67} + 3y_{78} = \min!$$

Randbedingungen:

$$1 = y_{12} + y_{13} + y_{14}$$

$$y_{12} = y_{23} + y_{25} + y_{26}$$

$$y_{13} + y_{23} + y_{43} = y_{35} + y_{38}$$

$$y_{14} = y_{43} + y_{48}$$

$$y_{25} + y_{35} = y_{56} + y_{57} + y_{58}$$

$$y_{26} + y_{56} = y_{67}$$

$$y_{57} + y_{67} = y_{78}$$

$$y_{38} + y_{48} + y_{58} + y_{78} = 1$$

$$0 \leq y_{ij} \leq 1 \quad \text{für alle } (i, j) \in A$$

Die optimale Lösung ist

$$y_{13} = y_{35} = y_{58} = 1$$

Der kürzeste Pfad ist somit 1-3-5-8 und beträgt 17 Einheiten.

Mit Netzwerken können auch andere Probleme modelliert werden. Die Kanten kann man als Massnahmenoptionen darstellen und deren Längen als Nutzen betrachten, welchen man durch diese Massnahmenoptionen erzielt. Die Zielfunktion müsste man in diesem Fall maximieren und die Lösung wäre der Kantenzug mit dem maximalen Nutzen.

Das gleiche Lösungsverfahren z. B. Simplex Algorithmus oder Dijkstra Algorithmus könnte man auch für dieses Problem verwenden.

3.14.4.3 Problemformulierung

3.14.4.3.1 Netzwerkmodell

Die Ermittlung des optimalen Massnahmenpakets kann als das Problem des kürzesten Pfades formuliert werden. Das Strassennetz wird dafür als ein Netzwerk modelliert, dessen Knoten entweder

- Start- und Endpunkte der Baustellen für jeden Massnahmenvorschlag oder
- Strassenkreuzungen oder
- Systemgrenzen sind.

In Abbildung 19 sind diese Knoten am gleichen Strassenausschnitt wie in Abbildung 17 dargestellt.

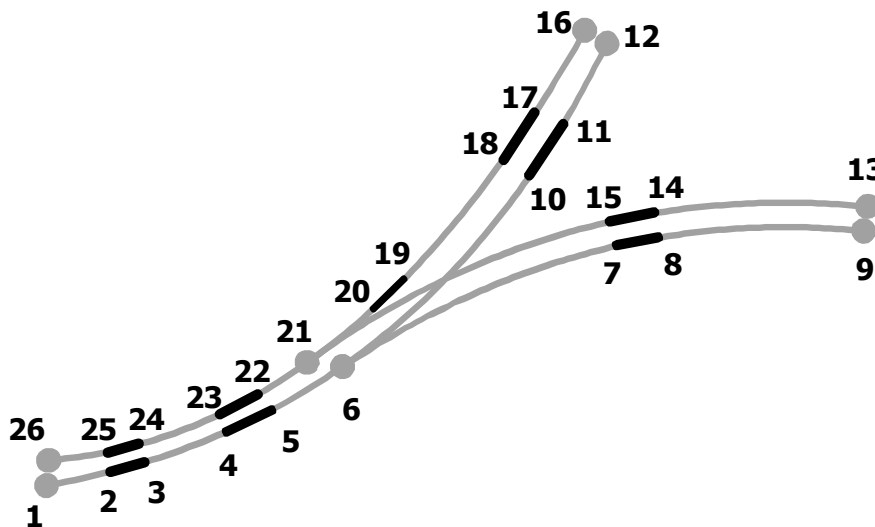


Abbildung 19: Knoten eines Strassenausschnittes

Da das Strassennetz richtungsgrennt modelliert werden muss, werden noch fiktive Start und Endpunkte eingeführt. Das Netzwerkmodell für den Strassenausschnitt in Abbildung 19 ist in Abbildung 20 dargestellt.

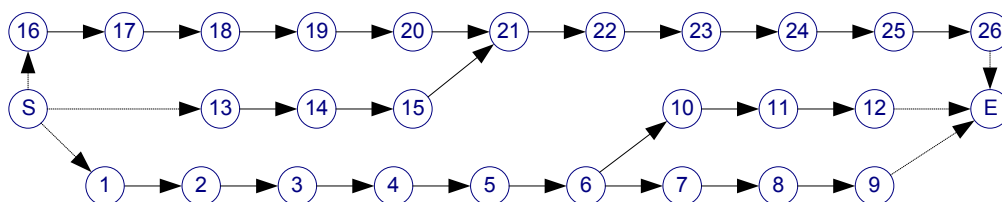


Abbildung 20: Physisches Netzwerkmodell

Die Massnahmenoptionen sind in diesem Netzwerk mit den Kanten definiert, wobei das „Nichtstun“ als eine Massnahmenoption berücksichtigt wird. In der Regel gibt es mehrere Massnahmenoptionen für eine Kunstbaute, einen Strassenabschnitt oder eine elektromechanische Einrichtung. Im Weiteren wird für jede Massnahmenoption mindestens eine passende Spurführung angegeben. Das Netzwerkmodell wird deshalb mit zusätzlichen Knoten und Kanten ergänzt, so dass für jede Massnahmenoption eine Kante dem Netzwerk hinzugefügt wird. Diese Aufblähung des Netzwerks wird anhand des in der [Abbildung 19](#) abgebildeten Beispiels erläutert.

Dieses aufgeblähte Netzwerk ist für den Strassenzug mit aufsteigender Kilometrierung in der [Abbildung 21](#) dargestellt. Es wurde dabei angenommen, dass

- neben dem unbeschränkten Verkehrsfluss nur zwei zusätzliche Spurführungen möglich sind, sowie
- nur eine Massnahmenoption pro Bauwerk und Verkehrsführung angegeben wird.

Die möglichen Spurführungen (z. B. die Spurführung 1 und Spurführung 2) sind durch Knoten definiert, deren Bezeichnung aus der Nummer des physischen Knotens, einem Komma von der Nummer der Spurführung zusammengesetzt wird. Die Spurführung 1 wird mit dem Kantenzug [2,1] – [3,1] – [4,1] usw. modelliert. Es wird in diesem Beispiel weiterhin angenommen, dass der Wechsel der Spurführung auf einer Baustelle nicht möglich ist und die Länge der Baustelle für alle Verkehrsführungen gleich bleibt. Die Kantenlängen sind in [Abbildung 21](#) angegeben.

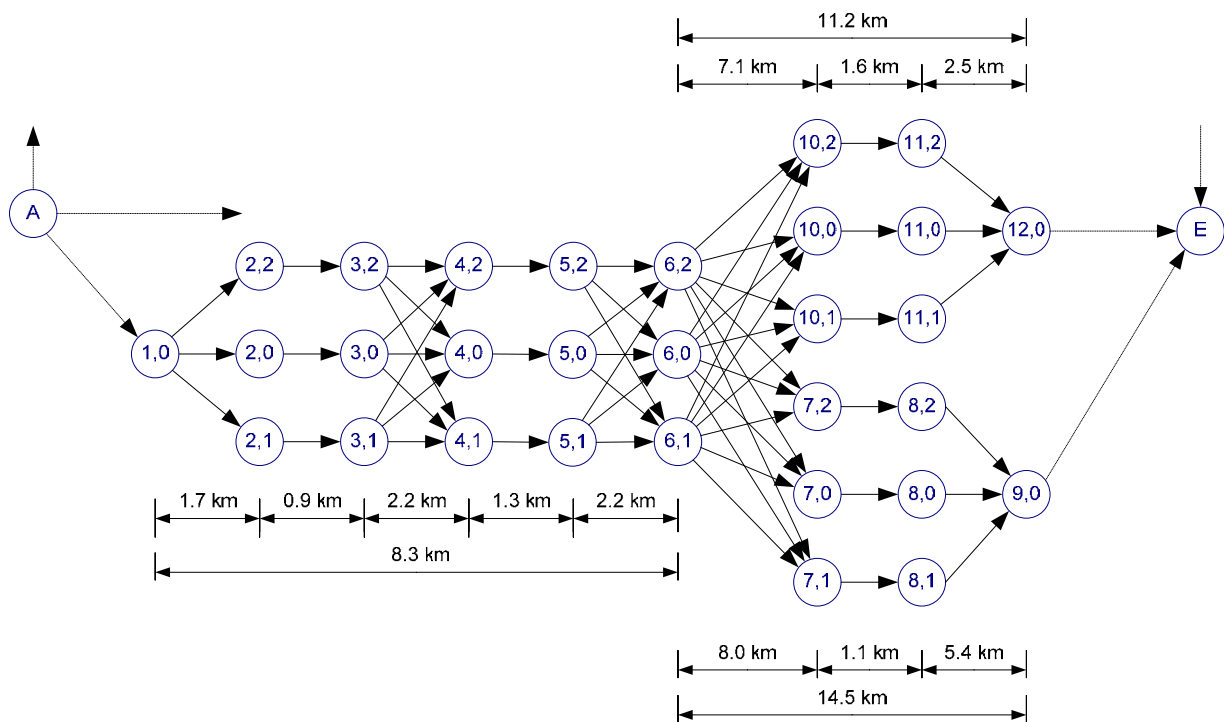


Abbildung 21: Netzwerkmodell mit mehreren Massnahmenoptionen - eine Fahrtrichtung

Das so entwickelte Netzwerk besteht aus einer Knotenmenge N und einer Kantenmenge A . Die Kanten sind dabei mit geordneten Knotenpaare $([i,k],[j,l]) \in A$ und die Spurführungen sind mit k und l bezeichnet. Da die Spurführung auf einer Baustelle ausgeschlossen wird, muss für jene Kanten, auf welchen eine Massnahmenoption geplant wird, $k=l$ sein. Die Untermenge N , umfasst jene Knoten, welche die Strassenverzweigungen darstellen. Für das Netzwerk in [Abbildung 21](#) umfasst diese Untermenge die Knoten [6,1], [6,0] und [6,2].

3.14.4.3.2 Kantenparameter

Es wird ein Satz der Massnahmenoptionen gesucht, welcher den Nettonutzen maximiert. In Bezug auf das Netzwerk wird ein Kantenzug gesucht, welcher den Nettonutzen maximiert. Der Nettonutzen für

eine Kante wird aufgrund der im Abschnitt 3.6.2 aufgelisteten Angaben berechnet. Der Nettonutzen einer Massnahmenoption auf der Kante $[i,k][j,k]$ wird berechnet:

$$\bar{N}_{i:kj:k} = C_{ij,\max} - C_{i:kj:k} \quad \text{wobei} \quad C_{ij,\max} = \max(C_{i:lj:1}, C_{i:2j:2}, \dots, C_{i:Lj:L}) \quad (18)$$

Die Betreiberkosten I auf der Kante $[i,k][j,k]$ sind hier mit $C_{[i,k][j,k]}$ bezeichnet, welche sich aus Betreiberinitialkosten I $C_{[i,k][j,k]}^i$ und Betreiberfolgekosten I mit $C_{[i,k][j,k]}^l$ zusammensetzen. Die Betreiberkosten I der teuersten Massnahmenoption für das Bauwerk ij sind als $C_{ij,\max}$ definiert und L ist die Anzahl der Spurführungen. Der Nettonutzen wird natürlich nur für jene Kanten berechnet, auf welchen Massnahmenoptionen vorgeschlagen werden. Für die übrigen Kanten ist der Nettonutzen gleich Null.

Bei der Berechnung der Betreiberinitialkosten II muss man jene Kanten, welche einen Wechsel der Spurführung zur Folge haben, speziell behandeln. Diese bestehen aus einem fixen Anteil und einem längenabhängigen Anteil, wie folgt:

$$V_{i:kj:l}^i = \tilde{V}_{kl}^i + v_{kl}^i \cdot d_{ij}$$

Die fixen Kosten für einen Wechsel der Spurführung von k auf l ist mit \tilde{V}_{kl}^i bezeichnet. Längeneinheitenkosten für einen Wechsel der Spurführung von k auf l sind mit v_{kl}^i aufgeführt und d_{ij} ist die Länge zwischen den Knoten i und j . Die Betreiberinitialkosten II für Kanten ohne Wechsel der Spurführung sind wie folgt:

$$V_{i:kj:k}^i = v_{kk}^i \cdot d_{ij}$$

Die Längeneinheitenkosten für das Beibehalten der Spurführung k sind mit v_{kk}^i bezeichnet. Die Betreiberfolgekosten II können wie erwähnt, für ungebündelte Bauwerke analog zu Betreiberfolgekosten I berechnet werden. Dies bedeutet, dass für die Kanten mit geplanten Massnahmenoptionen diese Kostenanteile berechnet werden können. Für die übrigen Kanten werden die Betreiberfolgekosten vernachlässigt.

Die Benutzerinitialkosten werden ähnlich berechnet wie Betreiberinitialkosten II. Für die Kanten mit einem Wechsel der Spurführung bestehen die Benutzerinitialkosten aus einem fixen und einem längenabhängigen Anteil, wie folgt:

$$U_{i:kj:l}^i = \tilde{U}_{kl}^i + u_{kl}^i \cdot d_{ij}$$

Die fixen Kosten \tilde{U}_{kl}^i umfassen die Benutzerkosten infolge Staus und Unfälle, welche infolge des Wechsels der Spurführung entstehen. Die variablen Kosten hingegen berücksichtigen die Benutzerkosten infolge Langsamfahrten und erhöhten Unfallrate infolge vorgegebener Spurführung. Die Benutzerkosten für Kanten ohne Wechsel der Spurführung bestehen nur aus einem längenabhängigen Anteil, wie folgt:

$$U_{i:kj:k}^i = u_{kk}^i \cdot d_{ij}$$

Die Benutzerinitialkosten für die Spurführung k sind mit u_{kk}^i bezeichnet. Die Benutzerfolgekosten können für die ungebündelten Bauwerke analog zu Betreiberfolgekosten II berechnet werden. Diese werden demnach nur für die Kanten mit geplanten Massnahmenoptionen berechnet. Für die übrigen Kanten werden sie vernachlässigt.

Beispiel 17: Nettonutzen

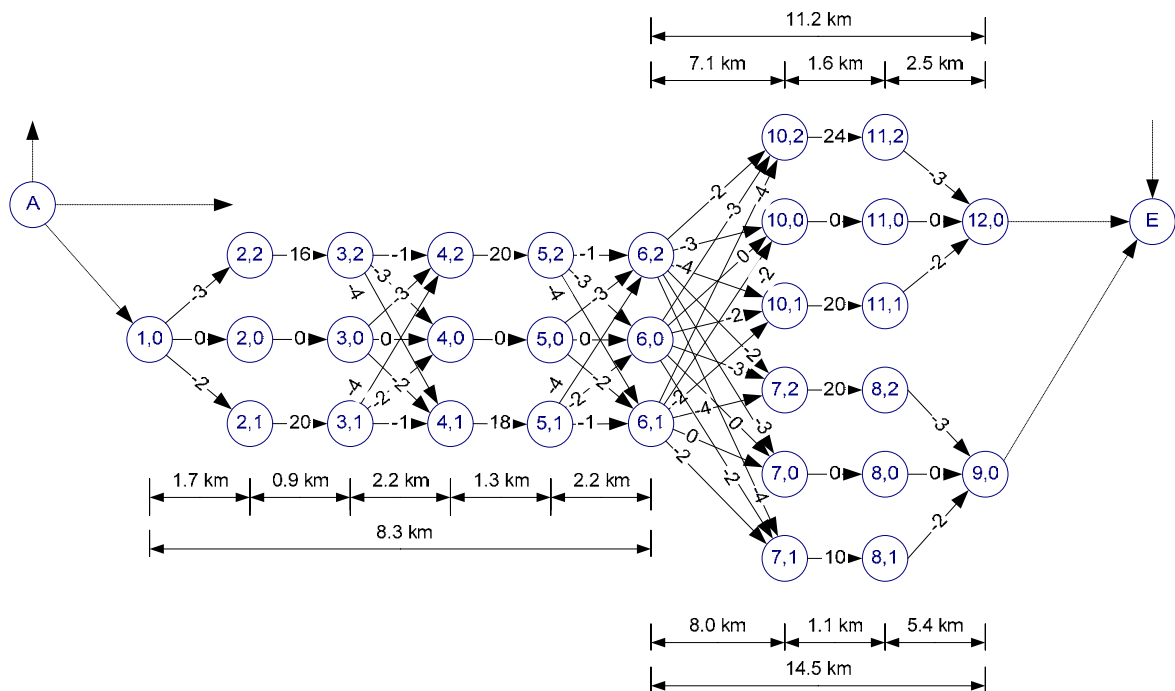


Abbildung 22: Nettonutzen

Betrachtet wird das Netzwerk in Abbildung 21. Der Nettonutzen wurde für jede Kante berechnet und in Abbildung 22 dargestellt. Der Nettonutzen für die Kanten ohne Verkehrseinschränkungen z. B. die Kante [2,0][3,0] ist 0. Der negative Nettonutzen ergibt sich an Kanten mit Verkehrseinschränkungen, an welchen keine Massnahmenoptionen geplant werden. Dieser negative Nettonutzen entspricht der Summe der Betreiberkosten II und der Benutzerkosten. Der positive Nettonutzen entsteht an jenen Kanten, an welchen Massnahmenoptionen geplant werden.

3.14.4.4 Zielfunktion und Kontinuitätsbedingungen

Die Zielfunktion wird wie folgt formuliert:

$$Z = \sum_{([i,k],[j,l]) \in A} y_{[i,k][j,l]} \cdot (\bar{N}_{[i,k][j,l]} - V_{[i,k][j,l]}^i - V_{[i,k][j,l]}^l - U_{[i,k][j,l]}^i - U_{[i,k][j,l]}^l) = \max! \quad (19)$$

In dieser Gleichung sind die Betreiberfolgekosten II mit $V_{[i,k][j,k]}^l$ und Benutzerfolgekosten mit $U_{[i,k][j,k]}^l$ bezeichnet. Die binäre Variable $y_{[i,k][j,k]}$ nimmt den Wert 1.0 an, wenn die Kante $([i,k],[j,l])$ zu Kantenzug gehört, welcher die Zielfunktion maximiert. In anderen Worten es wird den Pfad vom Anfangsknoten bis zum Endknoten gesucht, welcher den Nutzen, d.h. die Zielfunktion maximiert.

Beispiel 18: Zielfunktion

Betrachtet wird das Netzwerk in Abbildung 21. Der Nettonutzen für jede Kante ist in Abbildung 22 dargestellt. Die Zielfunktion lässt sich als Summe der Produkte von Nettonutzen und binären Variablen wie folgt formulieren

$$\begin{aligned}
 & -3y_{[1,0][2,2]} - 2y_{[1,0][2,1]} + 16y_{[2,2][3,2]} + 20y_{[2,1][3,1]} - \\
 & y_{[3,2][4,2]} - 3y_{[3,2][4,0]} - 4y_{[3,2][4,1]} - 3y_{[3,0][4,2]} - 2y_{[3,0][4,1]} - 4y_{[3,1][4,2]} - 2y_{[3,1][4,0]} - y_{[3,1][4,1]} + \\
 & 20y_{[4,2][5,2]} + 18y_{[4,1][5,1]} - \\
 & y_{[5,2][6,2]} - 3y_{[5,2][6,0]} - 4y_{[5,2][6,1]} - 3y_{[5,0][6,2]} - 2y_{[5,0][6,1]} - 4y_{[5,1][6,2]} - 2y_{[5,1][6,0]} - y_{[5,1][6,1]} - \\
 & 2y_{[6,2][7,2]} - 3y_{[6,2][7,0]} - 4y_{[6,2][7,1]} - 3y_{[6,0][7,2]} - 2y_{[6,0][7,1]} - 4y_{[6,1][7,2]} - 2y_{[6,1][7,0]} - y_{[6,1][7,1]} - \\
 & 2y_{[6,2][10,2]} - 3y_{[6,2][10,0]} - 4y_{[6,2][10,1]} - 3y_{[6,0][10,2]} - 2y_{[6,0][10,1]} - 4y_{[6,1][10,2]} - 2y_{[6,1][10,0]} - y_{[6,1][10,1]} + \\
 & 24y_{[7,2][8,2]} + 20y_{[7,1][8,1]} + 20y_{[10,2][11,2]} + 10y_{[10,1][11,1]} - \\
 & 3y_{[8,2][9,0]} - 2y_{[8,1][9,0]} - 3y_{[11,2][12,0]} - 2y_{[11,1][12,0]} = \max!
 \end{aligned}$$

Die Kantenmenge, welche die Zielfunktion maximiert muss auch einen Kantenzug bilden. Dies kann wie bei dem Problem des kürzesten Pfades mit den Kontinuitätsbedingungen sichergestellt:

$$\begin{aligned}
 1 + \sum_{(j,l):(j,l,a) \in A} y_{j,l,a} &= \sum_{(j,l):(a,j,l) \in A} y_{a,j,l} \\
 \sum_{(j,l):(j,l,e) \in A} y_{j,l,e} &= 1 + \sum_{(j,l):(e,j,l) \in A} y_{e,j,l} \\
 \sum_{(j,l):(j,l,i,k) \in A} y_{j,l,i,k} &= \sum_{(j,l):(i,k,j,l) \in A} y_{i,k,j,l} \quad \text{für alle } i : k \in (N \cap N_s) \wedge i : k \neq a \wedge i : k \neq e
 \end{aligned} \tag{20}$$

LEGENDE: \cap : Durchschnitt, \in : „ist Element von“, \wedge : „und“

Die Knoten a und e sind Anfangs- und Endknoten des Netzwerks. Der Anfangsknoten ist ein Quellknoten in welchem die Einheit in das Netzwerk hinein fließt und der Endknoten ist ein Sinkknoten in welchem die Einheit das Netzwerk verlässt. Diese Formulierung bedeutet, dass die Optimierung nur einen Kantenzug zwischen den Knoten a und e als Lösung liefern wird. Bei einer physischen Verzweigung wird sich der Algorithmus nur für einen Zweig entscheiden und somit werden die Massnahmenoptionen nur auf diesem Zweig berücksichtigt. Da die Massnahmenoption durchaus auf beiden Zweigen erlaubt sein, muss man bei jeder physischen Verzweigung eine Quelle einführen.

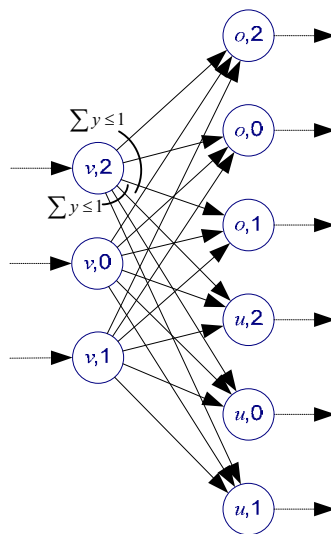


Abbildung 23: Netzwerkmodell: Verzweigung

Eine Verzweigung ist in [Abbildung 23](#) dargestellt. Die Einheit 1 fließt in einen der Knoten $[v, l]$, $[v, 2]$ und $[v, 0]$. Dieser Knoten muss gleichzeitig die neue Quelle sein, aus welcher eine zusätzliche Einheit ausfließen soll. Diese Bedingung wird wie folgt formuliert:

$$\alpha \cdot \sum_{[i,k] \in A} y_{[i,k][v,l]} = \sum_{[i,k] \in A} y_{[v,l][i,k]} \quad \text{für alle } [v,l] \in N_v \quad (21)$$

Menge der Verzweigungsknoten wird mit N_v bezeichnet. Die einflussende Einheit wird mit der Anzahl der Zweige α multipliziert und somit eine Quelle simuliert. Hierfür wird unterschieden zwischen den Verzweigungsknoten und den Zusammenführungsknoten. Die Beziehung (21) erlaubt allerdings, dass zwei Einheiten in den gleichen Zweig fließen. Fließt z. B. eine Einheit in den Knoten $[v, 2]$ so können zwei Einheiten aus diesen Knoten ausfließen, eine zum Knoten $[o, 2]$ und andere zum Knoten $[o, l]$. Dies darf nicht erlaubt werden, dass folgende, zusätzliche Bedingungen eingeführt werden müssen (siehe [Abbildung 23](#)):

$$\begin{aligned} \sum_{[o,k] \in A} y_{[v,l][o,k]} &\leq 1 \\ \sum_{[u,k] \in A} y_{[v,l][u,k]} &\leq 1 \end{aligned} \quad \text{für alle } [v,l] \in N_v$$

Beispiel 19: Kontinuitätsbedingungen

Betrachtet wird ein Netzwerk wie in [Abbildung 21](#) dargestellt. Das Netzwerk hat 12 Knoten und 10 physischen Kanten, welche die Kantenzüge 1-2-3-4-5-6-7-8-9 bzw. 1-2-3-4-5-6-10-11, 12 bilden. Es hat auch einen physischen Verzweigungsknoten 6. Das Netzwerk mit mehreren Massnahamenoptionen hat 30 Knoten und 57 Kanten und dies ist gleichzeitig die Anzahl der binären Variablen. Die Anzahl der Verzweigungsknoten ist 3. Die Kontinuitätsbedingungen für Verzweigungsknoten 6 werden wie folgt formuliert:

$$\begin{aligned} 2(y_{[5,2][6,2]} + y_{[5,0][6,2]} + y_{[5,1][6,2]}) &= y_{[6,2][10,2]} + y_{[6,2][10,0]} + y_{[6,2][10,1]} + y_{[6,2][7,2]} + y_{[6,2][7,0]} + y_{[6,2][7,1]} \\ y_{[6,2][10,2]} + y_{[6,2][10,0]} + y_{[6,2][10,1]} &\leq 1 \\ y_{[6,2][7,2]} + y_{[6,2][7,0]} + y_{[6,2][7,1]} &\leq 1 \\ 2(y_{[5,2][6,0]} + y_{[5,0][6,0]} + y_{[5,1][6,0]}) &= y_{[6,0][10,2]} + y_{[6,0][10,0]} + y_{[6,0][10,1]} + y_{[6,0][7,2]} + y_{[6,0][7,0]} + y_{[6,0][7,1]} \\ y_{[6,0][10,2]} + y_{[6,0][10,0]} + y_{[6,0][10,1]} &\leq 1 \\ y_{[6,0][7,2]} + y_{[6,0][7,0]} + y_{[6,0][7,1]} &\leq 1 \\ 2(y_{[5,2][6,1]} + y_{[5,0][6,1]} + y_{[5,1][6,1]}) &= y_{[6,1][10,2]} + y_{[6,1][10,0]} + y_{[6,1][10,1]} + y_{[6,1][7,2]} + y_{[6,1][7,0]} + y_{[6,1][7,1]} \\ y_{[6,1][10,2]} + y_{[6,1][10,0]} + y_{[6,1][10,1]} &\leq 1 \\ y_{[6,1][7,2]} + y_{[6,1][7,0]} + y_{[6,1][7,1]} &\leq 1 \\ y_{[i,j][k,l]} &\text{ ist binär for } i, k = 1..10 \text{ und } j, l = 0..2 \end{aligned}$$

Die Kontinuitätsbedingungen für die übrigen Knoten sind wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Knoten 1:} \quad &y_{[1,0][2,2]} + y_{[1,0][2,0]} + y_{[1,0][2,1]} = 1 \\ &y_{[1,0][2,2]} = y_{[2,2][3,2]} \\ \text{Knoten 2:} \quad &y_{[1,0][2,0]} = y_{[2,0][3,0]} \\ &y_{[1,0][2,1]} = y_{[2,1][3,1]} \\ &y_{[2,2][3,2]} = y_{[3,2][4,2]} + y_{[3,2][4,0]} + y_{[3,2][4,1]} \\ \text{Knoten 3:} \quad &y_{[2,0][3,0]} = y_{[3,0][4,2]} + y_{[3,0][4,0]} + y_{[3,0][4,1]} \\ &y_{[2,1][3,1]} = y_{[3,1][4,2]} + y_{[3,1][4,0]} + y_{[3,1][4,1]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \mathcal{Y}_{[3,2][4,2]} + \mathcal{Y}_{[3,0][4,2]} + \mathcal{Y}_{[3,1][4,2]} = \mathcal{Y}_{[4,2][5,2]} \\
 \text{Knoten 4:} & \mathcal{Y}_{[3,2][4,0]} + \mathcal{Y}_{[3,0][4,0]} + \mathcal{Y}_{[3,1][4,0]} = \mathcal{Y}_{[4,0][5,0]} \\
 & \mathcal{Y}_{[3,2][4,1]} + \mathcal{Y}_{[3,0][4,1]} + \mathcal{Y}_{[3,1][4,1]} = \mathcal{Y}_{[4,1][5,1]} \\
 & \mathcal{Y}_{[4,2][5,2]} = \mathcal{Y}_{[5,2][6,2]} + \mathcal{Y}_{[5,2][6,0]} + \mathcal{Y}_{[5,2][6,1]} \\
 \text{Knoten 5:} & \mathcal{Y}_{[4,0][5,0]} = \mathcal{Y}_{[5,0][6,2]} + \mathcal{Y}_{[5,0][6,0]} + \mathcal{Y}_{[5,0][6,1]} \\
 & \mathcal{Y}_{[4,1][5,1]} = \mathcal{Y}_{[5,1][6,2]} + \mathcal{Y}_{[5,1][6,0]} + \mathcal{Y}_{[5,1][6,1]} \\
 & \mathcal{Y}_{[6,2][10,2]} + \mathcal{Y}_{[6,0][10,2]} + \mathcal{Y}_{[6,1][10,2]} = \mathcal{Y}_{[10,2][11,2]} \\
 \text{Knoten 10:} & \mathcal{Y}_{[6,2][10,0]} + \mathcal{Y}_{[6,0][10,0]} + \mathcal{Y}_{[6,1][10,0]} = \mathcal{Y}_{[10,0][11,0]} \\
 & \mathcal{Y}_{[6,2][10,1]} + \mathcal{Y}_{[6,0][10,1]} + \mathcal{Y}_{[6,1][10,1]} = \mathcal{Y}_{[10,1][11,1]} \\
 & \mathcal{Y}_{[6,2][7,2]} + \mathcal{Y}_{[6,0][7,2]} + \mathcal{Y}_{[6,1][7,2]} = \mathcal{Y}_{[7,2][8,2]} \\
 \text{Knoten 7:} & \mathcal{Y}_{[6,2][7,0]} + \mathcal{Y}_{[6,0][7,0]} + \mathcal{Y}_{[6,1][7,0]} = \mathcal{Y}_{[7,0][8,0]} \\
 & \mathcal{Y}_{[6,2][7,1]} + \mathcal{Y}_{[6,0][7,1]} + \mathcal{Y}_{[6,1][7,1]} = \mathcal{Y}_{[7,1][8,1]} \\
 & \mathcal{Y}_{[10,2][11,2]} = \mathcal{Y}_{[11,2][12,0]} \\
 \text{Knoten 11:} & \mathcal{Y}_{[10,0][11,0]} = \mathcal{Y}_{[11,0][12,0]} \\
 & \mathcal{Y}_{[10,1][11,1]} = \mathcal{Y}_{[11,1][12,0]} \\
 & \mathcal{Y}_{[7,2][8,2]} = \mathcal{Y}_{[8,2][9,0]} \\
 \text{Knoten 8:} & \mathcal{Y}_{[7,0][8,0]} = \mathcal{Y}_{[8,0][9,0]} \\
 & \mathcal{Y}_{[7,1][8,1]} = \mathcal{Y}_{[8,1][9,0]} \\
 \text{Knoten 12:} & \mathcal{Y}_{[11,2][12,0]} + \mathcal{Y}_{[11,0][12,0]} + \mathcal{Y}_{[11,1][12,0]} = 1 \\
 \text{Knoten 9:} & \mathcal{Y}_{[8,2][9,0]} + \mathcal{Y}_{[8,0][9,0]} + \mathcal{Y}_{[8,1][9,0]} = 1
 \end{aligned}$$

Mit den obigen Bedingungen sind Kontinuitätsbedingungen für alle Knoten formuliert.

Eine Zusammenführung ist [Abbildung 24](#) dargestellt. Eine Einheit fließt aus einem der Knoten $[o, 1]$, $[o, 2]$ und $[o, 0]$ und eine Einheit fließt aus einem der Knoten $[u, 1]$, $[u, 2]$ und $[u, 0]$.

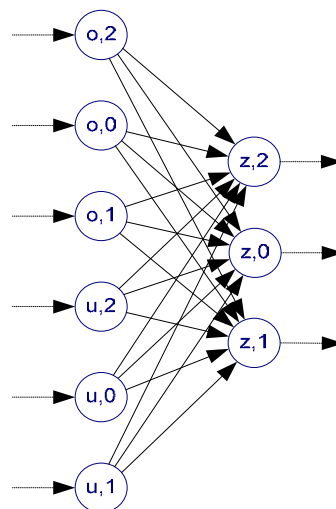


Abbildung 24: Netzwerkmodell: Zusammenführung

Beide Einheiten müssen allerdings in einen der Knoten $[z, 1]$, $[z, 2]$ und $[z, 0]$ einfließen. Die entsprechenden Kontinuitätsbedingungen werden wie folgt formuliert:

$$\frac{1}{\alpha} \cdot \sum_{[j,l] \in A} y_{[j,l][i,k]} = \sum_{[j,l] \in A} y_{[i,k][j,l]} \quad \text{für alle } [i,k] \in N_z \quad (22)$$

Menge der Zusammenführungsknoten wird mit N_z bezeichnet. Die einflussenden Einheiten werden in jedem Knoten mit der Anzahl Zweige α dividiert. Um sicherzustellen, dass beide Einheiten in den gleichen Knoten einfließen müssen die Variablen $y_{[i,k][j,l]}$ binär sein.

3.14.4.5 Weitere Randbedingungen

A) Budgetvorgaben

Das mathematische Programm definiert mit den Gleichungen (19), (20), (21) und (22) einen Kantenzug, d.h. ein Massnahmenpaket ergeben wird, welches sich u. U. über das ganze Netz erstreckt. In der Tat wird das mathematische Programm so viele Massnahmenoptionen wie möglich berücksichtigen. Dies kann zu sehr langen Baustellen und/oder zu hohem Budgetbedarf führen. Aus diesem Grund werden weitere Randbedingungen eingeführt. Eine **Budgetvorgabe** lässt sich wie folgt einführen:

$$\sum_{([i,k],[j,l]) \in A} y_{[i,k][j,l]} \cdot (C_{[i,k][j,l]}^i + V_{[i,k][j,l]}^i) \leq R \quad (23)$$

Die vorgeschriebene Budgetgrenze ist mit R definiert.

Beispiel 20: Budgetbegrenzung

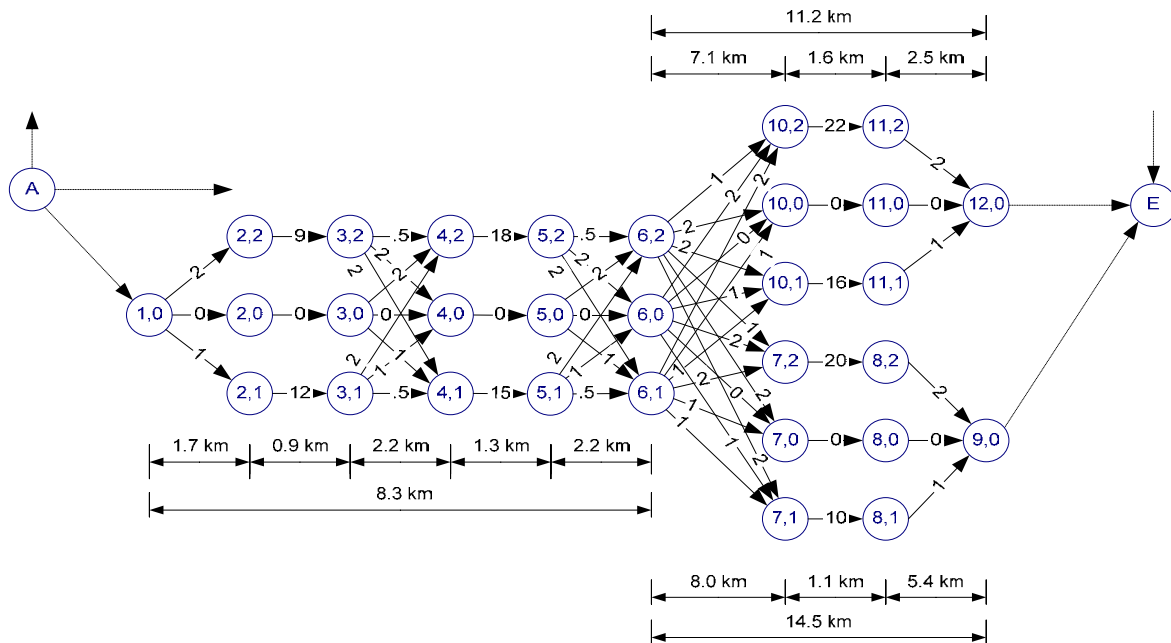


Abbildung 25: Initialkosten

Betrachtet wird das Netzwerk in [Abbildung 21](#). Der Nettonutzen für jede Kante ist in [Abbildung 22](#) dargestellt. Die zugehörigen Initialkosten sind in [Abbildung 25](#) festgehalten. Die Budgetbegrenzung lässt sich wie folgt formulieren:

$$\begin{aligned}
& 2y_{[1,0][2,2]} + y_{[1,0][2,1]} + 9y_{[2,2][3,2]} + 12y_{[2,1][3,1]} + \\
& 0.5y_{[3,2][4,2]} + 2y_{[3,2][4,0]} + 2y_{[3,2][4,1]} + 2y_{[3,0][4,2]} + y_{[3,0][4,1]} + 2y_{[3,1][4,2]} + y_{[3,1][4,0]} + 0.5y_{[3,1][4,1]} + \\
& 18y_{[4,2][5,2]} + 15y_{[4,1][5,1]} + \\
& 0.5y_{[5,2][6,2]} + 2y_{[5,2][6,0]} + 2y_{[5,2][6,1]} + 2y_{[5,0][6,2]} + y_{[5,0][6,1]} + 2y_{[5,1][6,2]} + y_{[5,1][6,0]} + 0.5y_{[5,1][6,1]} + \\
& y_{[6,2][7,2]} + 2y_{[6,2][7,0]} + 2y_{[6,2][7,1]} + 2y_{[6,0][7,2]} + y_{[6,0][7,1]} + 2y_{[6,1][7,2]} + y_{[6,1][7,0]} + y_{[6,1][7,1]} + \\
& y_{[6,2][10,2]} + 2y_{[6,2][10,0]} + 2y_{[6,2][10,1]} + 2y_{[6,0][10,2]} + y_{[6,0][10,1]} + 2y_{[6,1][10,2]} + y_{[6,1][10,0]} + y_{[6,1][10,1]} + \\
& 20y_{[7,2][8,2]} + 10y_{[7,1][8,1]} + 22y_{[10,2][11,2]} + 16y_{[10,1][11,1]} + \\
& 2y_{[8,2][9,0]} + y_{[8,1][9,0]} + 2y_{[11,2][12,0]} + y_{[11,1][12,0]} \leq R
\end{aligned}$$

B) Beschränkung des Erhaltungsabschnittes

Die Berücksichtigung der Längeneinschränkung eines Erhaltungsabschnittes wird im Folgenden behandelt. Der Anfang eines Erhaltungsabschnittes wird durch einen Wechsel der Spurführung von uneingeschränkter Leistungsfähigkeit zu einer reduzierten Leistungsfähigkeit definiert. Dieser Sachverhalt ist in [Abbildung 26](#) dargestellt. Der Erhaltungsabschnitt fängt im Knoten s an und endet im Knoten t . Die Länge des Erhaltungsabschnittes d_{st} muss kleiner als die maximal zulässige Länge Λ sein. Für die Situation in [Abbildung 26](#) muss der längste Erhaltungsabschnitt im Knoten τ enden da der Erhaltungsabschnitt bis zum nächstgelegenen Knoten die maximale Länge Λ bereits überschreiten würde. Dies bedeutet, dass spätestens von Knoten τ' bis zum nächstgelegenen Knoten τ ein Wechsel der Spurführung von eingeschränkter Leistungsfähigkeit zu einer uneingeschränkten Leistungsfähigkeit stattfinden muss, d.h. es gilt wie folgt:

$$\sum_l y_{[\tau,l][\tau',0]} = 1 \quad \text{wobei } ([\tau,l], [\tau',0]) \in A \quad (24)$$

Diese Bedingungen muss für jede Kante des physischen Netzwerkmodells formuliert werden. Falls der Erhaltungsabschnitt in den Knoten s anfängt, dann gilt die folgende Bedingung:

$$\sum_{(s,l) \in A \wedge l \neq 0} y_{[s_p,0][s,l]} = 1 \quad (25)$$

Die Beziehung (24) ist nur dann zwingend, wenn die Beziehung (25) gültig ist. Dieser kausale Zusammenhang kann man wie folgt formulieren:

$$y_{[s,l][s_p,0]} - \sum_l y_{[\tau,l][\tau',0]} \leq 0 \quad \text{für alle } s \in N \text{ und } d_{s\tau} \leq \Lambda < d_{s\tau'} \quad (26)$$

Die Beziehung 26 erlaubt grundsätzlich mehrere Erhaltungsabschnitte zwischen dem Knoten s und dem Knoten \square . Für eine plausible Begrenzung von Erhaltungsabschnitten zwischen 10 und 25 km werden sich allerdings mehrere Erhaltungsabschnitte wegen der hohen Kosten des Verkehrsführungswechsels kaum als optimale Lösung ergeben.

Beispiel 21: Randbedingung zur Längebegrenzung des Erhaltungsabschnittes

Betrachtet wird ein Netzwerk wie in [Abbildung 21](#). Die maximale Länge des Erhaltungsabschnittes beträgt 12 km. Die Randbedingungen müssen für jede physische Kante formuliert werden, nach welcher ein Erhaltungsabschnitt beginnen kann. Für das vorliegende Netzwerk sind dies die Kanten 1-2,3-4,5-6,6-7 und 6-10. Die Randbedingungen sind wie folgt:

$$\begin{aligned}
1-2: \quad & y_{[1,0][2,2]} + y_{[1,0][2,1]} - y_{[6,2][7,0]} - y_{[6,0][7,0]} - y_{[6,1][7,0]} \leq 0 \quad d_{26} = 6.6 \text{ km} < 12 \text{ km} < d_{27} = 14.6 \text{ km} \\
& y_{[1,0][2,2]} + y_{[1,0][2,1]} - y_{[6,2][10,0]} - y_{[6,0][10,0]} - y_{[6,1][10,0]} \leq 0 \quad d_{26} = 6.6 \text{ km} < 12 \text{ km} < d_{210} = 13.7 \text{ km}
\end{aligned}$$

- 3-4: $y_{[3,0][4,2]} + y_{[3,0][4,1]} - y_{[7,0][8,0]} \leq 0 \quad d_{47} = 11.5 \text{ km} < 12 \text{ km} < d_{48} = 12.6 \text{ km}$
 $y_{[3,0][4,2]} + y_{[3,0][4,1]} - y_{[10,0][11,0]} \leq 0 \quad d_{410} = 10.6 \text{ km} < 12 \text{ km} < d_{411} = 12.2 \text{ km}$
 5-6: keine Einschränkung
 6-7: keine Einschränkung
 6-10: keine Einschränkung

Die Bedingungen für die Kante 3-4 besagt, dass der Erhaltungsabschnitt vor dem Knoten 8 bzw. vor dem Knoten 11 abgeschlossen werden kann. Dies bedeutet, dass die Kanten 7-8 und 10-11 keine Verkehrsbehinderung aufweisen dürfen, so dass keine Massnahmenoptionen ausgeführt werden dürfen.

Um die Bedingungen 26 zu formulieren muss man für jede Kante, nach welcher ein Erhaltungsabschnitt anfangen kann, die Knoten τ und τ' ermitteln. Auf der Kante $\tau-\tau'$ befindet sich der Punkt, welcher genau den Abstand Λ von Anfangsknoten s aufweist.

C) Mindestabstand zwischen den Erhaltungsabschnitten

Die Formulierung der Randbedingung zur Einhaltung des Mindestabstandes zwischen den Erhaltungsabschnitten beruht auf ähnlichen Überlegungen wie die Beschränkung der Länge des Erhaltungsabschnittes. Ein Strassenstück zwischen zwei Erhaltungsabschnitte ist in [Abbildung 26](#) dargestellt. Falls der Erhaltungsabschnitt in den Knoten t endet, so gilt die folgende Beziehung:

$$\sum_{(t,l):([t,l],[l',0]) \in A \wedge l \neq 0} y_{[t,l][l',0]} = 1 \quad (27)$$

Der Anfang des anderen Erhaltungsabschnitts ist erst ab den Knoten σ erlaubt. Der Abstand des vorgelagerten Knotens σ_p zum Knoten t ist kleiner als Λ und der Abstand $d_{t\sigma}$ des Knoten σ zum Knoten t ist grösser als Λ . Die Randbedingung des Mindestabstandes zwischen den Erhaltungsabschnitten kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$\sum_{(i,0,j,0) \in A'} y_{i,0,j,0} = v \quad (28)$$

Die Kantenuntermenge A' enthält alle Kanten zwischen den Knoten t und Knoten σ_p und v ist die Anzahl Kanten des physischen Netzwerks zwischen den Knoten t und den Knoten σ_p . Die Beziehung 27 ist nur dann zwingend, wenn die Beziehung (27) gültig ist. Dieser kausale Zusammenhang kann man wie folgt formulieren:

$$\sum_{(i,0,j,0) \in A'} y_{i,0,j,0} \geq \left(\sum_{(t_p,l):([t_p,l],[l,0]) \in A \wedge l \neq 0} y_{[t_p,l][l,0]} \right) v \quad \text{für alle } t \in N \quad \text{und} \quad d_{t\sigma_p} \geq \Lambda > d_{t\sigma} \quad (29)$$

D) Massnahmen mit Verkehrseinschränkungen in beiden Richtungen

In den bisherigen Ausführungen wurde nur eine Fahrriichtung behandelt. In der Regel werden die Massnahmenoptionen in beider Fahrriichtung koordiniert, was zur Verkehrsbbeeinträchtigung in beiden Fahrriichtungen führen kann. Dieser Sachverhalt ist in der [Abbildung 19](#) dargestellt. Die Massnahme zwischen den Knoten 2 und 3 wird zur gleichen Zeit ausgeführt wie die Massnahme zwischen den Knoten 24 und 25. Es werden eigentlich fast alle Massnahmen in beiden Richtungen gleichzeitig ausgeführt. Lediglich die Massnahmen zwischen den Knoten 19 und 20 wird nur in einer Fahrriichtung ausgeführt; Die andere Fahrriichtung wird dadurch nicht beeinträchtigt.

Die gleichzeitige Ausführung von Massnahmen in beider Richtung muss mit zusätzlichen Bedingungen erzwungen werden. Das Netzwerk mit mehreren Massnahmenoptionen in beiden Fahrriichtungen ist in der [Abbildung 27](#) dargestellt. Die Spurführungen in den Knoten sind mit den Zahlen nach dem Komma bezeichnet. Die Spurführung 2 in einer Fahrriichtung bedeutet dabei, dass in der anderen Fahrriichtung auch die Spurführung 2 gewählt werden muss.

Falls eine Massnahme in beider Fahrriichtung Verkehrseinschränkungen verursacht so muss folgende Bedingung aufgestellt werden:

$$y_{[i^+,j][k^+,l]} = y_{[k^-,l][i^-,j]} \quad ([i,j],[k,l]) \in \tilde{A}$$

Die Menge aller Kanten an welchen Massnahmen in beider Richtung ausgeführt werden ist mit \tilde{A} bezeichnet. Dem Knoten i^+ in einer Fahrriichtung entspricht der Knoten i^- in der anderen Fahrriichtung.

Beispiel 22: Massnahmenoptionen in beiden Fahrriichtungen

Betrachtet wird ein Netzwerk wie in Abbildung 26. Die Massnahmen auf den Kanten 2-3, 4-5, 7-8 und 10-11 werden koordiniert mit den Massnahmen 24-25, 23-22, 14-15 und 17-18 ausgeführt. In diesem Fall müssen folgende Bedingungen eingehalten werden:

Kanten 2-3 und 24-25	$y_{[2,2][3,2]} = y_{[24,2][25,2]}$
	$y_{[2,1][3,1]} = y_{[24,1][25,1]}$
Kanten 4-5 und 22-23:	$y_{[4,2][5,2]} = y_{[22,2][23,2]}$
	$y_{[4,1][5,1]} = y_{[23,1][23,1]}$
Kanten 7-8 und 14-15:	$y_{[7,2][8,2]} = y_{[14,2][15,2]}$
	$y_{[7,1][8,1]} = y_{[14,1][15,1]}$
Kanten 10-11 und 17-18:	$y_{[10,2][11,2]} = y_{[17,2][18,2]}$
	$y_{[10,1][11,1]} = y_{[17,1][18,1]}$

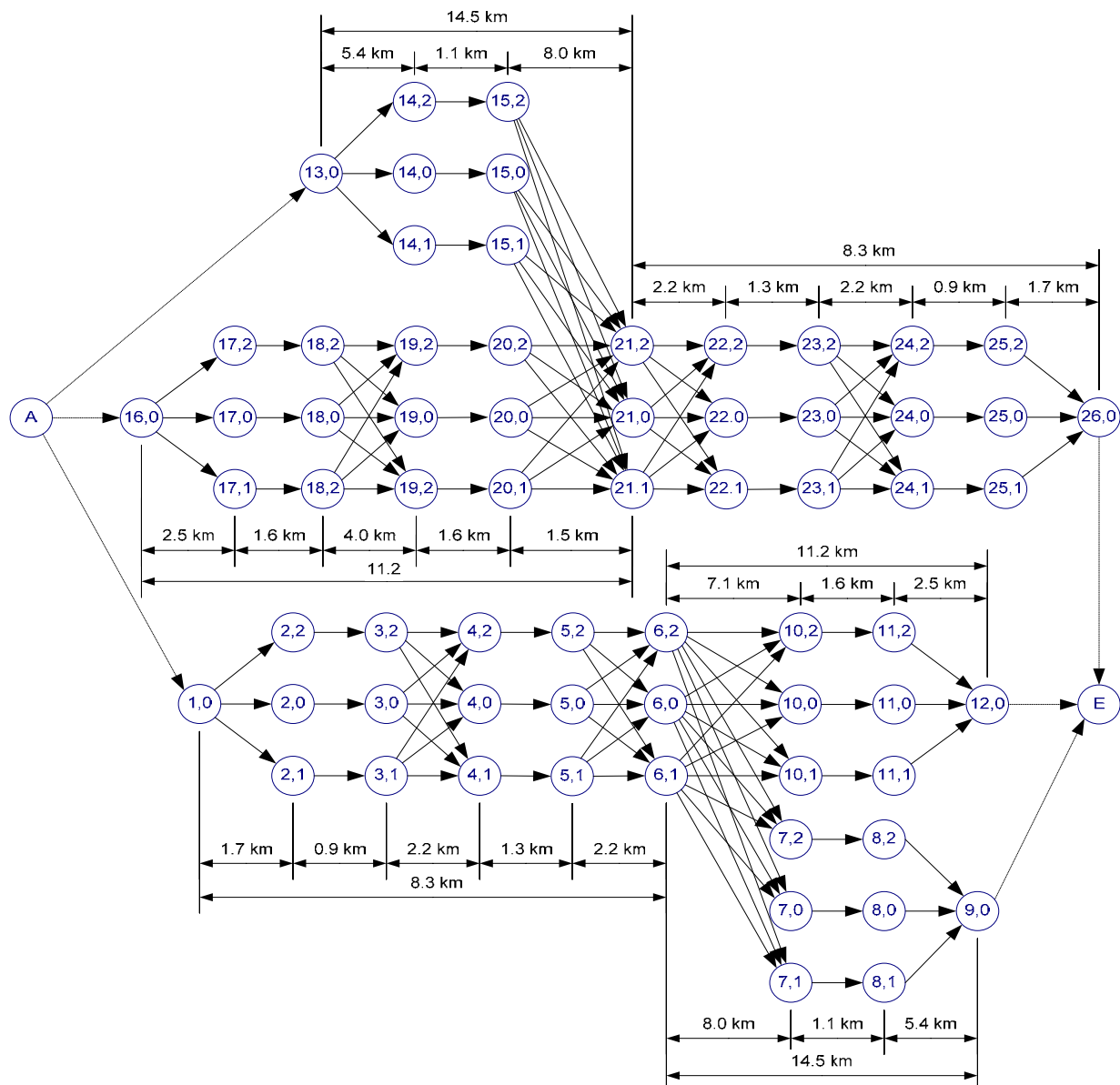


Abbildung 26: Netzwerkmodell mit mehreren Massnahmenoptionen – beide Richtungen

3.14.4.6 Lösungsverfahren

Das mathematische Programm zur Ermittlung der optimalen Erhaltungsabschnitte ist ähnlich wie das Problem des kürzesten Pfades formuliert. Wenn man nur die Kontinuitätsbedingungen (siehe Abschnitt 3.14.4.4) berücksichtigen würde, erhielte man tatsächlich das Problem des kürzesten Pfades. Wie im Abschnitt 3.14.4.3 erwähnt, das Problem des kürzesten Pfades ist ein binäres Programm, welches sich dank seiner speziellen Struktur wie ein lineares Programm lösen kann. Die Lösung des linearen Programms ergibt immer binäre Werte von Entscheidungsvariablen.

Mit der Einführung der zusätzlichen Randbedingungen wie Budgetvorgabe, Begrenzung des Erhaltungsabschnittes, Erhaltung des Mindestabstandes zwischen den Erhaltungsabschnitten und gleichzeitige Ausführung von Massnahmen in beider Richtungen ist diese spezielle Struktur nicht mehr gegeben. Dies bedeutet, dass sich ein so entstandenes mathematisches Programm nicht mehr als lineares Programm lösen lässt. Löse man es mit den Lösungsverfahren für lineare Programme (z. B. Simplex) würde man für Entscheidungsvariablen beliebige Werte zwischen 0 und 1 erhalten. Dies bedeutet, dass man für die Entscheidungsvariablen entweder den Wert 0 oder den Wert 1 erzwingen muss bzw. dass

man auf Lösungsverfahren für binäre Programme ausweichen muss. Leider sind die allgemeine binäre Programme unweit schwieriger zu lösen als lineare Programme und hierfür besteht gegenwärtig kein universelles Lösungsverfahren.

Die bekanntesten Lösungsverfahren für binäre Programme sind die „Branch-and-Bound“²¹ und „Cutting Plane“ Algorithmen. Mit diesen Lösungsverfahren kann man die Probleme bis zu 100 Variablen effektiv lösen. In den achtziger Jahren hat man einen wesentlichen Durchbruch geschafft, welcher allgemeine Probleme mit weit über 1000 Variablen zu lösen erlaubt (siehe [21]). Der zweite Durchbruch erfolgte in neunziger Jahren und mit dem „Branch-and-Cut“ Algorithmus. In [22] berichteten die Autoren, dass sie die Probleme mit 6000 Entscheidungsvariablen erfolgreichen lösen konnten. Im Rahmen dieses Berichtes werden die angewendeten Lösungsverfahren nicht erläutert. Es wird lediglich festgehalten, dass die Grundstruktur des hier vorgestellten Problems setzt keine praktische Grenzen für den Einsatz im Management der Strassenerhaltung.

3.14.4.7 Ergebnisse

Das Resultat des in vorangegangenen Abschnitten erläuterten Optimierungsproblems ist ein optimaler Kantenzug, welche den Erhaltungsabschnitt bzw. die Erhaltungsabschnitte und die auszuführenden Massnahmenoptionen liefert. Wie bei allen binären Programmen kann eine geringfügige Veränderung der Eingangsparameter wie Budgetvorgabe, maximale Länge des Erhaltungsabschnittes usw. zur bedeutenden Veränderung des Resultats, d.h. zur Verschiebung des Erhaltungsabschnittes führen. Es ist deshalb erforderlich eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen um den Spielraum für die gestellten Vorgaben auszuloten.

Beispiel 23: Örtliche Optimierung

Betrachtet wird ein Netzwerk wie in [Abbildung 21](#) mit den Angaben zu Nettonutzen aus dem Beispiel 17, Kontinuitätsbedingungen aus dem Beispiel 19 Initialkosten aus dem Beispiel 20 und Randbedingungen zur Begrenzung des Erhaltungsabschnittes aus dem Beispiel 21. Die Zielfunktion ist im Beispiel 18 formuliert und die Budgetrestriktion beträgt 30 Geldeinheiten.

Die Entscheidungsvariablen müssen zudem auf binäre Werte eingeschränkt werden:

$$y_{[i,j][k,l]} \text{ ist binär for } i, k = 1..10 \text{ und } j, l = 0..2$$

²¹ Zu Deutsch: Verzweigen und Begrenzen; In der deutschsprachigen Literatur wird allerdings der englische Begriff verwendet.

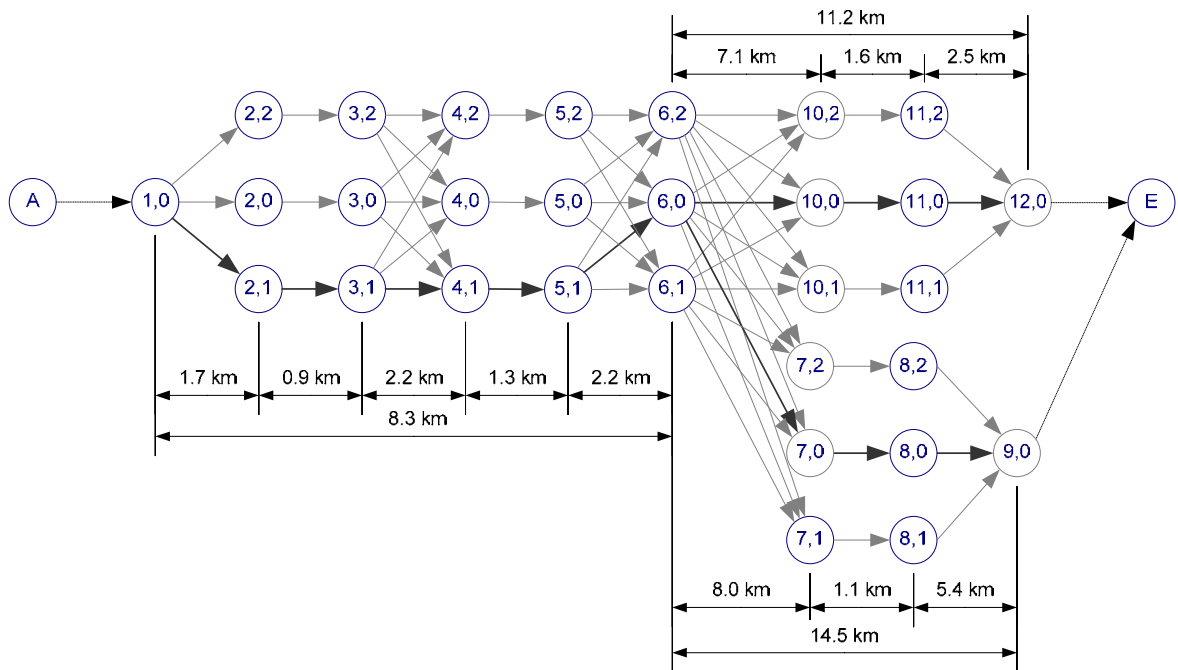


Abbildung 27: Optimaler Erhaltungsabschnitt - max. Länge 12km / Budgetvorgabe 30 GE

Der optimale Erhaltungsabschnitt ist in Abbildung 27 dargestellt. Der Nettonutzen beträgt und die Initialkosten sind 29.5 Geldeinheiten.

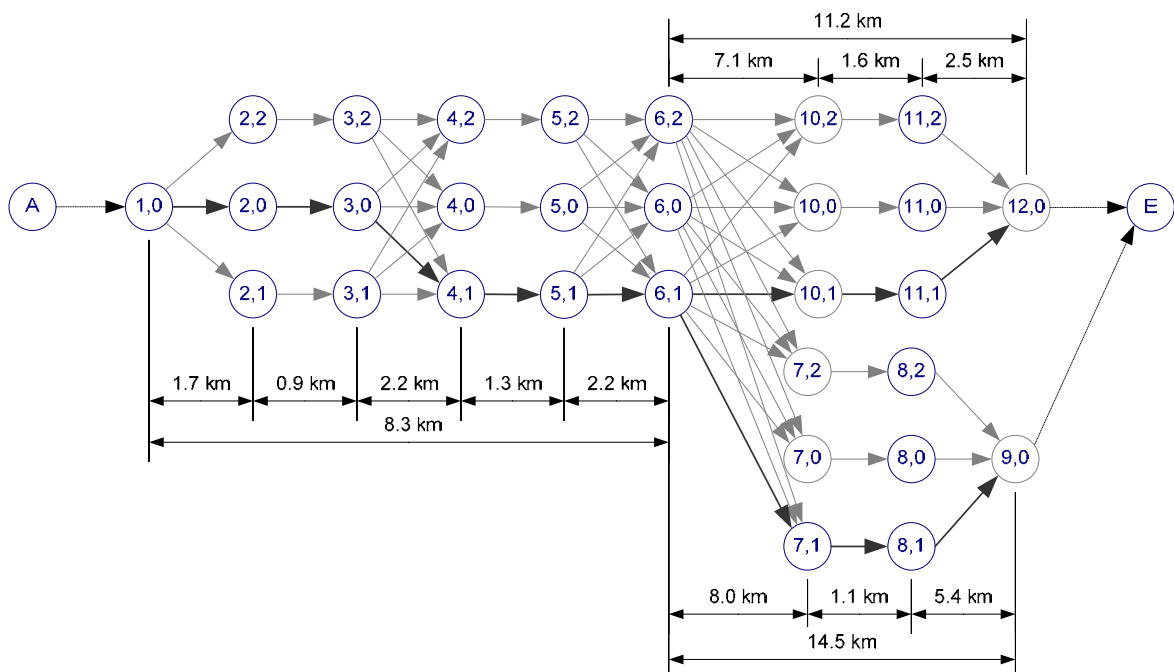


Abbildung 28: Optimaler Erhaltungsabschnitt - max. Länge 15km / Budgetvorgabe 47 GE

Eine Erhöhung der Längebegrenzung für Erhaltungsabschnitte auf 15 km hat keinen Einfluss auf optimale Lösung da die Budgetbegrenzung massgebend ist. Erst die markante Erhöhung der Budgetvorgabe auf 47 Geldeinheiten wird die optimale Lösung wie aus der Abbildung 28 ersichtlich verändern. Der Nettonutzen beträgt 37 und die Initialkosten betragen 46.5 Geldeinheiten.

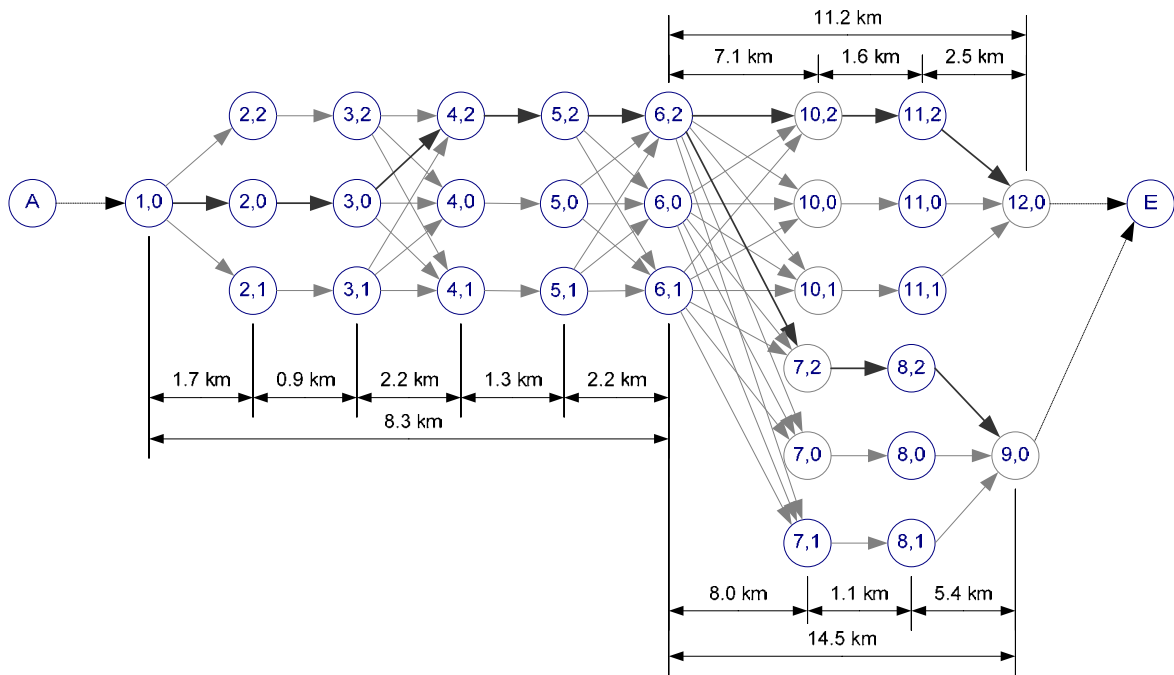


Abbildung 29: Optimaler Erhaltungsabschnitt - max. Länge 15km / keine Budgetvorgabe

Ohne Budgetrestriktionen aber mit einer Längebegrenzung für Erhaltungsabschnitte von 15 km ergibt sich die Lösung wie in Abbildung 29. Der Nettotonnen beträgt nun 50 und die Initialkosten betragen 68.5 Geldeinheiten.

3.14.4.8 Zeitaspekte

In den vorangegangenen Abschnitten hat man bei der Suche nach einem optimalen Erhaltungsabschnitt sowohl den Zeitraum für die Ausführung von Massnahmenoptionen als auch die Dauer der Verkehrsbehinderung nicht berücksichtigt. Streng genommen gilt das oben formulierte mathematische Programm nur wenn der Zeitraum für die Ausführung und die Dauer der damit verbundenen Verkehrsbehinderungen gleich sind. Dies trifft keinesfalls zu und in diesem Abschnitt werden die Konsequenzen dieses Sachverhaltes und die möglichen Lösungsansätze diskutiert.

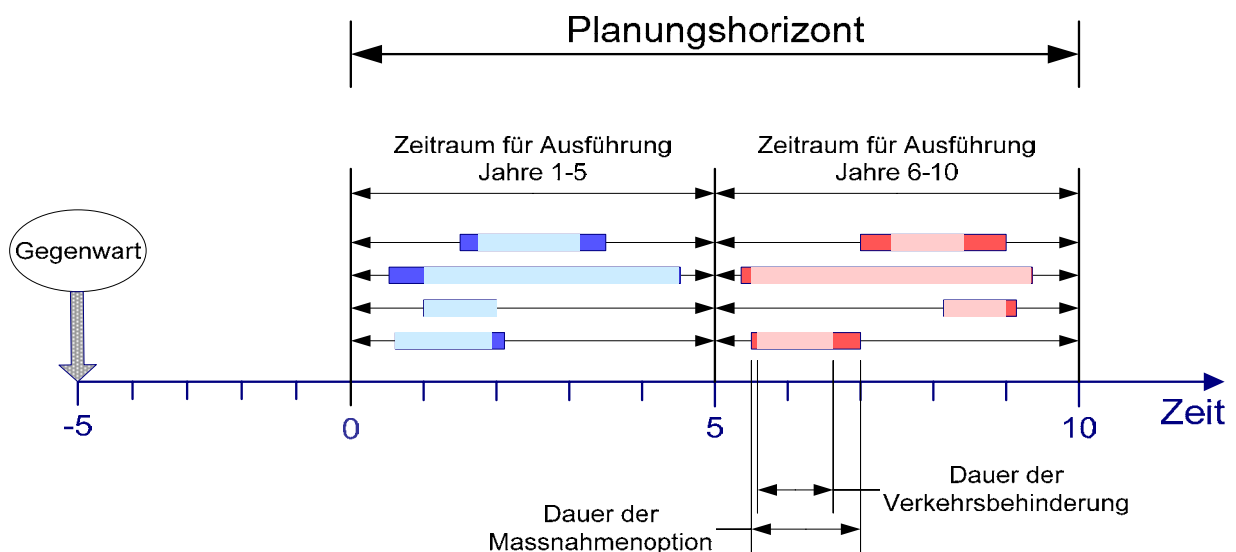


Abbildung 30: Zeitliche Aspekte

Für die weiteren Ausführungen ist es vorteilhaft zu unterscheiden zwischen den Zeitraum für die Ausführung, Dauer der Ausführung und Dauer der damit verursachten Verkehrsbehinderung. Diese drei Grössen sind auf der Zeitachse in der Abbildung 30 dargestellt.

3.14.5 Wahl des optimalen Erhaltungsabschnitts

Nachdem die Massnahmen- Kombinationen und folglich die Varianten der Erhaltungsabschnitte gebildet sind, werden diese aufgrund der Erfüllung der Vorgaben und Randbedingungen analysiert und die optimalen Erhaltungsabschnitte gebildet.

Bei den optimalen Erhaltungsabschnitten wird jede Einzelmassnahme aus den Teilsystemen nur einem Erhaltungsabschnitt zugeordnet, vgl. Abbildung 15 (Abschnitt 3.13.6) und ihr Resultat, dargestellt in der Abbildung 31.

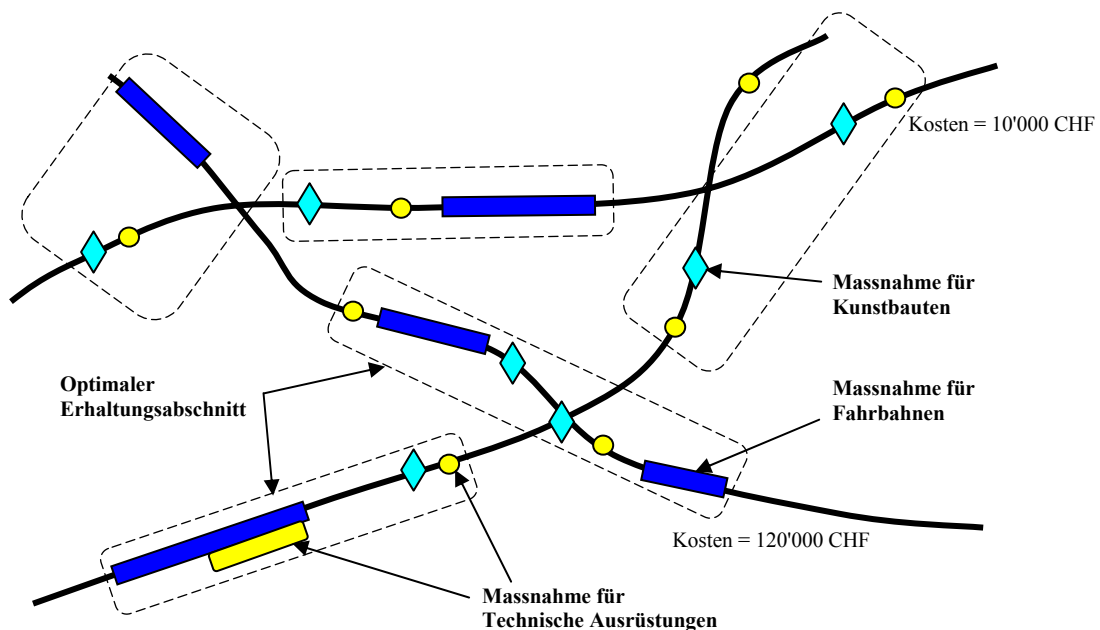


Abbildung 31: Bildung der optimalen Erhaltungsabschnitte

3.14.5.1: Beispiel 24: Planung von Erhaltungsabschnitten in der Praxis

Es gibt in der Praxis noch kein repräsentatives Beispiel für die Anwendung der Optimierungsverfahren seitens der Tiefbauämter. Dennoch wird nachfolgend eine „zusammenhängende Baustelle“ (bzw. ein Massnahmenpaket) vorgestellt, die zur Koordination der Massnahmen im Rahmen des Konzeptes UPlaNS vom Tiefbauamt des Kantons St. Gallen geplant und durchgeführt wurde. In diesem Beispiel sind die Massnahmen, welche in den Teilsystemen geplant wurden (ohne Variantenvorschläge), ohne Veränderung realisiert worden.

Der Zweck der Vorstellung dieses Beispiels ist das Ausmass von möglichen Massnahmenpaketen zu zeigen, um damit das Potential der Optimierung zu erkennen.

Projektbeschreibung

Die A1, Teilstrecke St. Gallen Neudorf – Rheineck wurde Ende 1973 in Betrieb genommen.

Für die Fahrbahnerneuerung der Autobahn A1 zwischen den Autobahnanschlüssen St. Gallen Neudorf und Rheineck (ca. 14 km) soll das Genehmigungsprojekt (Massnahmenprojekt) erstellt werden.

Dieses Projekt umfasst ein Massnahmenpaket, der aus folgenden Einzelmassnahmen zusammengesetzt wurde:

I. Fahrbahnerneuerung (PMS)

Im Abschnitt St. Gallen Neudorf bis Rheineck sind unter Einhaltung der Vorgaben des UPlaNS folgende Massnahmen vorgesehen:

- Sanierung des bestehenden Betonbelages und Schutz der Betonoberfläche durch einen Belagsüberzug
- Neue Standspur Rechts (Breite 2.80m) im Abschnitt Verzweigung Meggenhus bis Rheineck
- Neubau einer 3. Spur / Verzögerungsspur im Abschnitt Unterführung Haltelhus bis Verzweigung Meggenhus (Breite = 3.50m) inkl. Standspur (Breite = 2.80m) und partiell Stützmauer
- Anpassung Mittelstreifen-Überfahrten und Verbreiterung der Fahrbahn für Verkehrsführungen während der Bauphasen
- Anpassung Randabschlüsse und Betonschale
- Anpassung Wildzaun

II. Kunstbauten (BMS)

Die Sanierungen an den Kunstbauten (Hauptobjekte) werden gemäss separatem Genehmigungsprojekt ausgeführt. Bei den anderen Kunstbauten (Nebenobjekte) sind lokale Sanierungen vorgesehen. Die zu sanierenden Brücken sind:

- Objekt Nr. 174, Viadukt Bergbach
- Objekt Nr. 176, Viadukt Untere Waid
- Objekt Nr. 177, Unterführung Haltelhus
- Objekt Nr. 178, Unterführung Biberhund
- Objekt Nr. 179, Unterführung Rampe Konstanz – Chur
- Objekt Nr. 180, Unterführung Rampe St. Gallen – Konstanz
- Objekte 179 und 180 sind bereits mit dem Genehmigungsprojekt Verzweigung Meggenhus – Anschluss Rorschach am 01. Februar 2002 bewilligt worden.
- Objekt Nr. 208, Viadukt Goldach
- Objekt Nr. 214, Unterführung St. Annaschlossstrasse
- Objekt Nr. 218, Brücke Mühletobel
- Objekt Nr. 221, Unterführung Linkolnsbergstrasse
- Objekt Nr. 229, Unterführung SBB Buriel

III. Lärmschutz (BMS)

Die bestehenden Lärmschutzwände im Abschnitt Verzweigung Meggenhus bis Rheineck werden saniert. Im Abschnitt Km 392+010L bis 392+240L wird die bestehende Lärmschutzwand von 2.00m auf 4.00m erhöht.

Zusätzlich werden im Bereich Km 385+110L bis 385+210L und Km 392+010L bis 392+240L neue Lärmschutzwände vorgesehen.

IV. UKK (EMT, Elektromechanik)

Die bestehende UKK- Anlage mit 3 PVC 100 und 1 Gasrohr wird durch eine neue Rohranlage mit 7 PE 120 und 1 Gasrohr 4“ ersetzt. In diesem Zusammenhang werden die elektromechanischen Anlagen erneuert und den neuen Vorschriften in Bezug auf Sicherheit und Personenschutz angepasst.

Im Wesentlichen sind folgende Sanierungsarbeiten vorgesehen:

- Trasse mit neuer Verkabelung inkl. Signalbeleuchtungen, Überfahrten mit Kandelaber und Steckdosen ausrüsten
- NT-Kabelanlage erneuern und neue Notrufsäulen
- LWL- Anlage erneuern
- Glatteiswarnanlage – Messstellen mit neuen Bodensonden ausrüsten
- Verkehrszählungen mit neuen Induktionsschlaufen ausrüsten

V. UKK (EMT, Tiefbau)

In der Standspur Rechts (St. Gallen – Rheineck) ist ein neuer Rohrblock mit 8 Röhren vorgesehen. Die Schächte werden ausserhalb der Standspur erstellt, sofern es die Platzverhältnisse zulassen. Die vorhandenen Querschläge werden weiterhin verwendet und wo notwendig ergänzt.

VI. Entwässerung (EMT, Technische Ausrüstung)

Die bestehende Entwässerung ist mehrheitlich in gutem Zustand. Es ist deshalb keine vollständige Erneuerung der Kanäle notwendig, d.h. das Leitungsnetz kann entweder lokal mit Roboter-einsatz, oder durch Ersatz einzelner Abschnitte instand gesetzt werden. Wo möglich wird die reinigende Wirkung bewachsener Oberflächen genutzt und das Niederschlagswasser über die Schulter zur Versickerung gebracht. In den Grundwasserschutz-zonen werden in Absprache mit dem AfU die Massnahmen für die Zone S3 umgesetzt. Wo es die Platzverhältnisse zulassen, werden als weitere Gewässerschutzmassnahme bei den Einleitstellen vorfabrizierte Ölabscheider für kleine Wassermengen eingebaut.

VII. Leitschranken (EMT, Technische Ausrüstung)

Bis auf wenige Meter entsprechen die heute vorhandenen Leitschranken nicht mehr den aktuellen Normen und Vorschriften. Sie müssen deshalb auf der gesamten Sanierungsstrecke durch neue Systeme ersetzt werden. Beim Viadukt Goldach wird neu eine Beton-Leitmauer erstellt.

VIII. Signalisation / Markierungen (EMT, Technische Ausrüstung)

Die fehlenden Signalisationstafeln werden ergänzt. Die bestehenden Signalisationstafeln werden an die Sicherheitsanforderungen (Abstand, umfahrbar, reflektierend) angepasst. Die bestehenden Markierungen werden entfernt und nach dem Belagsüberzug als retroreflektierende, strukturierte Kaltplastikmarkierungen wieder aufgebracht.

IX. Verkehrsführung während der Bauzeit

Generell ist eine 4/0 und 3/1 Verkehrsführung vorgesehen. Durch das System der Fahrbahnvermietung und durch die Festlegung des Mietpreises wird der Anreiz geschaffen, eine kurze Bauzeit zu erhalten. Es ist vorgesehen die Arbeiten innerhalb von zwei Jahren durchzuführen.

Kosten

Die Kosten inkl. Mehrwertsteuer betragen insgesamt ca. 106 Mio.

3.15 Zeitliche Optimierung

Hier geht es um die Ermittlung des optimalen Realisierungszeitpunktes, bzw. des Realisierungszeitfensters für die Massnahmenpakete.

Die zeitliche Optimierung hat im Erhaltungsmanagement eine grosse Bedeutung. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass die Ergebnisse aus den Teilsystemen (Einzelmassnahmen) als optimale Lösungen ermittelt worden sind, d.h. ihr Nutzen/ Kosten-Verhältnis im Teilsystem optimiert wurde.

Als Kriterium der zeitlichen Optimierung gilt das Nutzen/Kosten- Verhältnis des Massnahmenpakets, das zu maximieren ist. Dieses Kriterium hängt von folgenden Faktoren ab:

- Realisierungszeitpunkte der Einzelmassnahmen
- Alter der einzelnen Objekte
- Zustand und Zustandsentwicklung der einzelnen Objekte

Der Realisierungszeitpunkt des Massnahmenpaketes bewirkt eine Änderung der in den Teilsystemen geplanten Realisierungszeitpunkte der Einzelmassnahmen und somit eine Änderung ihres Nutzen/ Kosten-Verhältnisses.

Die Faktoren Alter, Zustand und Zustandsentwicklung bilden die Grundelemente von Modellen, welche die Berechnung der Veränderungen des Nutzens und der Kosten von Einzelmassnahmen infolge zeitliches Auf- oder Vorschubs ermöglichen, vgl. Abbildung 34 (Beispiel PMS).

Nachfolgend wird mit einem Beispiel gezeigt, dass die Abhängigkeit des Nutzen/ Kosten- Verhältnisses der Massnahmenpakete vom gewählten Zeitpunkt ihrer Realisierung stark sein kann.

3.15.1 Nutzen

Eine Massnahme kann für verschiedene Gruppen von Betroffenen (Strasseneigentümer, Strassennutzer, Dritter) Nutzen generieren. Dieser Nutzen muss daher differenziert für die Betroffenen ermittelt werden [14].

Je nach Zielsetzung der Optimierung werden zur Ermittlung des Nutzens die entsprechenden Gruppen der Betroffenen berücksichtigt.

Nutzen aus der Sicht der Strasseneigentümer Aus der Sicht der Strasseneigentümer lässt sich der Nutzen einer Massnahme in der Substanzerhaltung der Objekte (d.h. Vermeidung ihres Wertverlustes) und Gewährleistung ihrer Funktionsfähigkeit durch drei Komponenten ausdrücken:

- *Wirkungsdauer* der Massnahme
- *Zustandsverbesserung* des zu sanierenden Objektes (als Potential der Qualitätsverbesserung durch die Massnahme)
- *Ausmass* der zu sanierenden Objekte (Fläche, Laufmeter oder Anzahl).

Die drei aufgeführten Komponenten des Nutzens repräsentieren den Aspekt "Substanzerhaltung" und sind in der Abbildung 32 dargestellt.

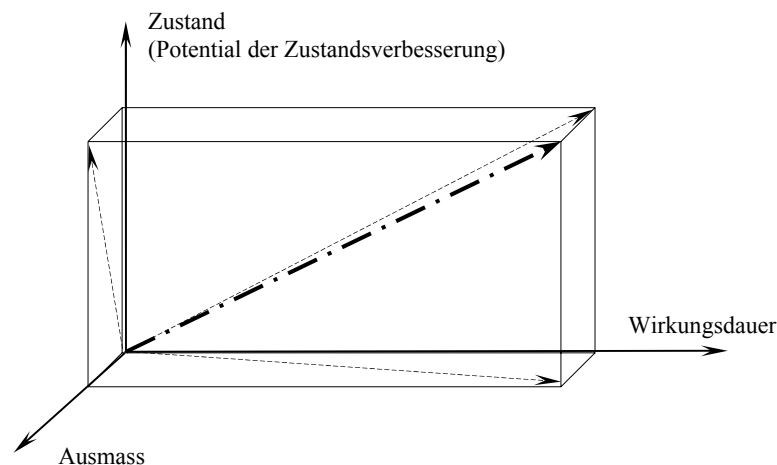


Abbildung 32: Nutzen- Komponenten der Massnahme (aus der Sicht der Strasseneigentümer)

Nutzen aus der Sicht der Verkehrsteilnehmer Nutzen bedeutet für die Verkehrsteilnehmer die *reduzierten Strassennutzerkosten* (Fahrzeitkosten, Fahrzeugbetriebs- und Unfallkosten) infolge des verbesserten Strassenzustandes und der Optimierung der Baustellen.

Nutzen aus der Sicht Dritter (Anwohner und Umwelt) Als Nutzen für die Anwohner und Umwelt gilt die *verminderten Lärm und Abgasimmissionen* (oder generell die *verminderte Umweltschäden*) infolge des verbesserten Strassenzustandes und der Optimierung der Baustellen.

In der Praxis wird der Nutzen bei verschiedenen Konzepten des Erhaltungsmanagements nach unterschiedlichen Ansätzen berechnet.

- 1. Ansatz** In diesem Ansatz bezieht sich der Nutzen einer Massnahme auf die effektive Nutzung des Objektes, wofür die Massnahme durchgeführt wird. Beispielsweise kann der DTV einer Strasse als massgebender Indikator der Nutzung gelten. Demnach wird die Verminderung der Strassennutzerkosten als Indikator des Nutzens angegeben.
- 2. Ansatz** Bei diesem Ansatz werden nebst der Nutzung auch der Substanzerhalt und die Funktionsfähigkeit (bzw. Verfügbarkeit) der Objekte mit berücksichtigt.
Der, von der Massnahme erwartete, Nutzen wird als die „längerfristige Reduzierung der Objektkosten“ beschrieben.

Beispielsweise würde eine Massnahme auf einer sehr selten benutzten Strasse ($DTV \approx 0$) nach dem 1. Ansatz überhaupt keinen Nutzen bringen, im 2. Ansatz jedoch schon, weil diese Strasse z.B. für spezielle Fahrten wie Feuerwehreinsatz benutzt werden könnte und dadurch grosse materielle und nicht-materielle Schäden verhindern würde. Die Massnahme hat also trotz dem sehr niedrigen DTV der Strasse einen unverzichtbaren und potentiell grossen Nutzen.

Der Entscheid, welcher der beiden Ansätze zu wählen ist, hängt letztlich von der Beschaffenheit des betrachteten Strassennetzes und dessen Nutzung ab. Falls das Strassennetz ein heterogenes Netz ist, d.h. darin unterschiedliche Strassentypen, wie Hochleistungsstrassen, Erschliessungsstrassen usw. enthalten sind, sollte der 2. Ansatz gewählt werden. Besteht das Strassennetz hingegen aus nur einem Strassentyp, dann kann der 1. Ansatz genügen.

Die Gesamtmenge aller dieser Nutzen- Komponenten ergibt den Gesamtnutzen der Massnahme, welcher den Gesamtkosten gegenüber zu stellen ist.

Für die Berechnung des Nutzen/ Kosten- Verhältnisses werden in der Praxis von Fall zu Fall nur partielle Berechnungen, z. B. nur aus der Sicht der Strasseneigentümer oder Strassennutzer oder anderer Gruppen vorgenommen.

Die hier berechneten Beispiele setzen die Objektkosten der Massnahmen dem Nutzen aus der Sicht der Strassennutzer (Zeitkosten) sowie Strasseneigentümer (Substanzerhaltung) gegenüber.

Tabelle 13 fasst mögliche Komponenten des Gesamtnutzens und der Gesamtkosten der Massnahmen zusammen.

Gruppe der Betroffenen	Gesamtnutzen der Massnahmen (infolge des verbesserten Zustands)	Gesamtkosten der Massnahmen (infolge der Baustelle)
Strasseneigentümer	- Durchschnittliche Zustandsverbesserung - Verlängerung der Lebensdauer	- Massnahmen- Objektkosten
Strassennutzer	- Verringerung der Fahrzeit - Erhöhung der Fahrkomfort - Erhöhung der Verkehrssicherheit - Verbesserung der Erreichbarkeit	- Zeitkosten infolge Reduktion der Fahrgeschwindigkeit - Fahrzeugbetriebs- und Unfallkosten infolge Reduktion der Fahrgeschwindigkeit
Dritte (Anwohner + Umwelt)	- Verringerung der Lärmimmissionen - Verringerung weiterer Umweltschäden (Luftverschmutzung)	- Immissionskosten infolge Verbesserung des Zustands (Lärmkosten-Reuzierung) - Immissionskosten infolge weiterer Umweltschäden

Tabelle 13: Nutzen und Kosten von Massnahmen für verschiedene Gruppen von Betroffenen

Die Auswirkungen des Vor- oder Aufschubes der Massnahmen sind als Vor- und Nachteile aus der Sicht der Strasseneigentümer in der Tabelle 14 zusammengefasst.

Auswirkungen	Zeitpunkt der Realisierung			
	Vorschub		Aufschub	
	Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Kosten	Reduktion der Massnahmenkosten	Nicht- Nutzung des Restwertes	Nutzung des Restwertes	Erhöhung der Massnahmenkosten
Nutzen	Verbesserung des durchschnittlichen Zustands	Nicht- Nutzung der vollen Lebensdauer	Nutzung der vollen Lebensdauer	Verschlechterung des durchschnittlichen Zustands

Tabelle 14: Vor- und Nachteile der zeitlichen Verschiebung der Massnahmen für Strasseneigentümer

Die Methode der zeitlichen Optimierung befasst sich mit der Ermittlung des optimalen Zeitpunktes der Realisierung eines Massnahmenpakets, das aus Zusammensetzung von Einzelmassnahmen aus den Teilsystemen PMS, BMS, EMS, etc. gebildet ist. Diese Methode beruht auf dem folgenden Grundsatz:

Das Verhältnis der Nutzen aller Einzelmassnahmen zu den Kosten aller Einzelmassnahmen eines Massnahmenpaketes muss im optimalen Realisierungszeitpunkt maximal sein.

$$\Sigma N / \Sigma K \rightarrow \text{MAX!}$$

Die beiden Verfahren (multikriterielle und wirtschaftliche Optimierung) können für die zeitliche Optimierung angewendet werden. Ihre Wahl hängt insbesondere vom Entscheid darüber ab, welche Nutzen-Komponenten der Massnahmen berücksichtigt werden sollen oder können.

3.15.2 Vorgehen

Zur Ermittlung des optimalen Zeitpunktes der Realisierung der Massnahmenpakete wird wie beschrieben vorausgesetzt, dass die vorgeschlagenen Massnahmen innerhalb der Teilsysteme optimiert sind und für sie (als Einzelmassnahme) auch einen optimalen Zeitpunkt der Realisierung (Jahr) im Teilsystem geplant worden ist.

Das Verfahren der zeitlichen Optimierung sucht das Jahr innerhalb einer gegebenen Zeitperiode heraus, in welchem das N/K-Verhältnis des Massnahmenpakets (gebildet als Summe des Nutzens und Summe der Kosten aller Einzelmassnahmen) maximal wird.

Als "Nutzen" der Massnahmen können die erwartete Wirkungsdauer sowie der zu verbessernde Zustand des Objekts berücksichtigt werden (gemäss dem 2. Ansatz).

Bei einigen (wirtschaftlichen) Optimierungsverfahren werden derweil die reduzierten Zeitkosten der Strassennutzer (berechnet als totaler Wert für den Zeitraum der Wirkungsdauer der Massnahmen für alle Fahrzeugkategorien) als deren Nutzen eingesetzt (gemäss dem 1. Ansatz).

Es gibt auch andere wirtschaftliche Optimierungsverfahren, welche als Nutzen der Massnahme nur die reduzierten Fahrzeugbetriebskosten infolge der Zustandsverbesserung berücksichtigen.

3.15.2.1 Beispiel 25: Berechnung des Nutzens für Strasseneigentümer

Das nachfolgend aufgeführte Beispiel berechnet den Nutzen der Massnahmen nach dem 2. Ansatz.

Die Kosten der einzelnen Massnahmen bestehen aus Objektkosten (Massnahmenkosten). Ihre Veränderung wird in Abhängigkeit des Zustands, gemäss der Tabelle 15 verfolgt.

Dabei ist zu beachten, dass für jeden Zustandsbereich in der Regel mehr als ein Massnahmentyp in Frage kommen, so dass die berechneten Werte für Nutzen und Kosten als gewichtete Mittelwerte aller dieser Massnahmen einzusetzen sind. Als Kriterium der Gewichtung wird die Häufigkeit der Anordnung der einzelnen Massnahmen angewendet (z.B. über die Dauer von den letzten 5 Planungsperioden).

Zudem wird das Alter des Objektes als ein bestimmender Faktor der N/K-Berechnung einer Massnahme mitberücksichtigt. Je nachdem, wie alt das Objekt im Zeitpunkt der Realisierung sein wird, befindet sich sein Zustand in einem bestimmten Bereich, der auch einen bestimmten Massnahmentyp mit dazugehörigen Kosten und Nutzen erfordert (Rollende Planung).

Die Untersuchungen in der Praxis haben gezeigt, dass der Kostensprung der, für die einzelnen Zustands- oder Schadensbereiche massgebenden, Massnahmentypen keineswegs konstant ist, sondern grosse Veränderungen erfährt, vgl. Tabelle 15: Beispiel PMS.

Die Tabelle 15 beinhaltet alle Informationen, welche für zeitliche Optimierung im PMS benötigt werden.

Allerdings müssen diese Werte mit weiteren gezielten Forschungsarbeiten noch detaillierter untersucht und konsolidiert werden.

Es werden für die Massnahmenplanung im PMS im Rahmen eines Forschungspaketes die Themen „Standardisierte Erhaltungsmassnahmen“, „Veränderungen der langfristig anfallenden Gesamtkosten und Gesamtnutzen der Erhaltungsmassnahmen infolge zeitlicher Verschiebung“ und „Gesamtnutzen der Erhaltungsmassnahmen“ neu erforscht.

Zustand				Kosten	Nutzen									
Modell der Wirkungs-dauer	Modell der Zustands-bewertung			Scha-dens-Modell	Modell der standardi-sierten Massnah-men	Modell der Ein-heitskost-en	Nutzen- Modell							
Jahr	[A]x[S] (SN 640 925b) [1]	Bewer-tungs-note (SN 640 904)	Zu-stands-bereich (640 904)	Schadens-bereich	Optimaler Massnahmen-typ	Kosten CHF/ m ² (Kantonale Hauptstras-se) [2]	Nutzen (Potential der Zu-stands-verbesserung) [3]	Nutzen (Wir-kungs-dauer), (J)	Gesamtnut-zen (Zustands-verbesserung x Wirkungs-dauer)	Totales N / K-Verhältnis (Kantonale Hauptstras-se)				
0	0	0...1	Gut	Intakt	-	0	0.00	0	0.0	0.00				
2	1			Klein	Reparaturen	10	1.50	4	6.0	0.50				
6	2	1...2	Mittel	Mittel	Instandset-zung	50	2.50	12	30.0	0.75				
10	3	2...3	Ausrei-chend											
13	4													
22	6	3...4	Kritisch	Gross	Oberbauver-stärkung	100	3.50	20	70.0	0.88				
30	9	4...5	Schlech-t		Teilweise Erneuerung	180					4.50	30	135.0	0.75
40	9				Neukonstruk-tion	280								

[1]: A = Schadenausmass und S = Schadensschwere der Merkmalgruppen (gemäss SN 640 925)

[2]: Durchschnittlicher Wert für kantonale Hauptstassen (Beispiel eines Strassentyps)

[3]: Durchschnittlicher Wert aller Merkmalgruppen für kantonale Hauptstassen, bezogen auf Anfang und Ende der Altersperiode

Tabelle 15: Beispiel PMS- Modell zur Entwicklung von Massnahmenkosten und -nutzen in Abhängigkeit vom Alter, Schadensbild und Bewertung der Fahrbahn

Die Spalte „Modell der Wirkungs-dauer“ in der Tabelle 15 beinhaltet Angaben über die durchschnittliche Wirkungs-dauer der Massnahmentypen (Reparaturen = 4 J, Instandsetzungen = 12 J, Oberbauverstärkungen = 20 J, Teilweise Erneuerung = 30 J, Neukonstruktion = 40 J). Diese Werte stammen aus Massnahmendatei zwei Kantone und sind von ihren Belagsspezialisten eruiert und als Mittelwert angegeben worden.

3.15.2.2 Ablauf des Verfahrens der „Zeitliche Optimierung“

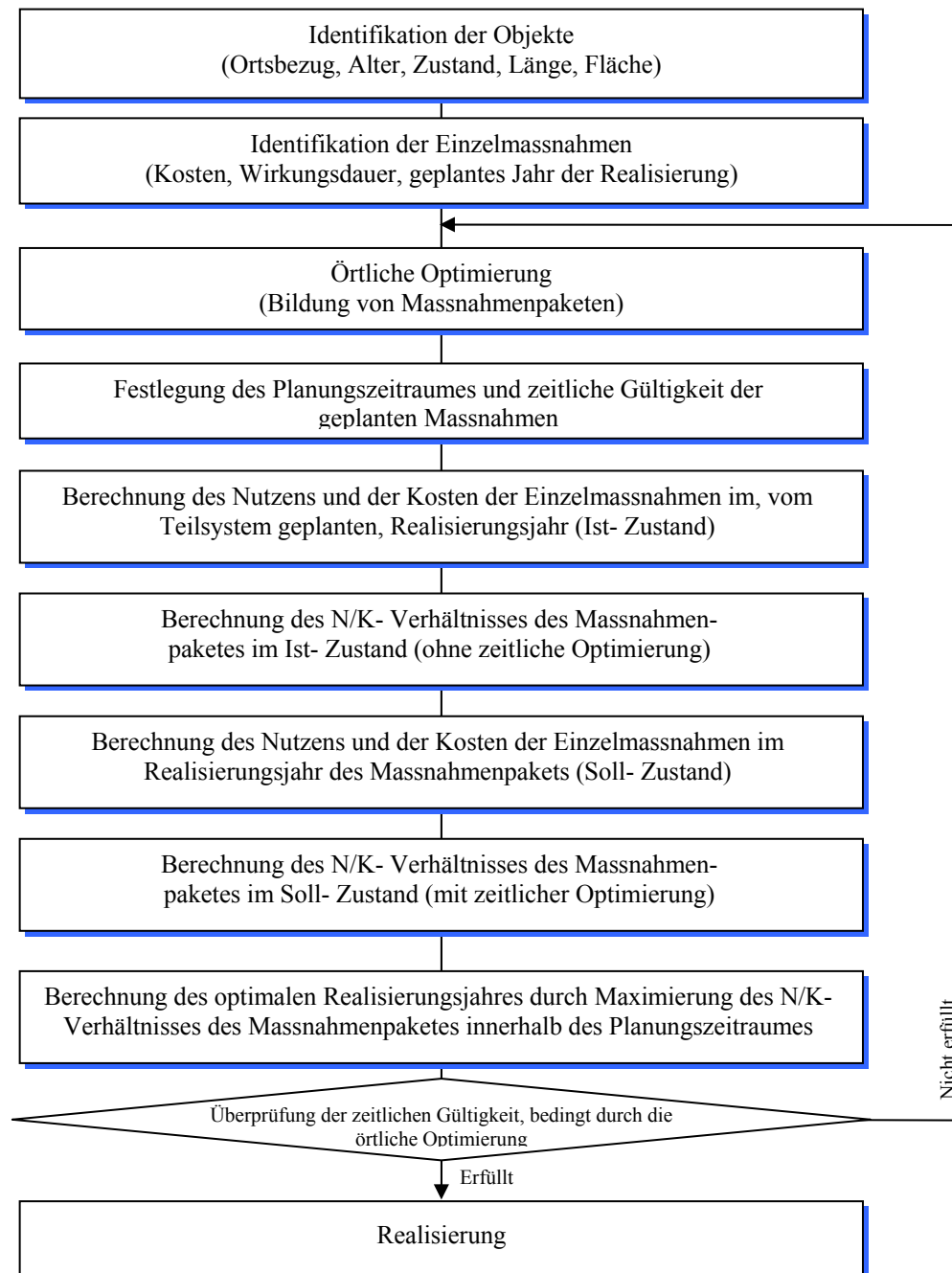
In der Abbildung 33 ist der Ablauf dieses Verfahrens dargestellt. Durch die örtliche Optimierung werden auch die zeitliche Gültigkeit von Massnahmen bestimmt, welche für die Ergebnisse der zeitlichen Optimierung als Bedingung (Restriktion) gelten, die erfüllt werden sollen. Falls diese Ergebnisse die Bedingung nicht erfüllen, wird der Prozess der örtlichen Optimierung wiederholt.

Die Abbildung 34 zeigt den Inhalt der Tabelle 15 graphisch am Beispiel des Teilsystems PMS auf. Daraus ist zu entnehmen, dass während der Lebensdauer des Strassenoberbaus (im Durchschnitt 40 Jahre für den betrachteten Strassentyp) mehrere Zustandsbereiche (in Abhängigkeit der Zeit, bzw. Lebensdauer) auftreten, zu welchen unterschiedliche optimale Massnahmentypen mit entsprechenden Kosten und Nutzen zuzuweisen sind.

Diese Methode zeigt die Ermittlung der optimalen Realisierungszeit der Massnahmenpakete auf, wofür die ermittelten Werte als Mittelwerte von unterschiedlichen Strassentypen eingesetzt werden.

In der Praxis sollte diese Methode, durch Beschreibung von definierten Zustandsbereichen, d.h. Zustände, die eine Änderung des optimalen Massnahmentyps verursachen, vertieft und für verschiedene Strassentypen mit unterschiedlichen Verkehrslastklassen, differenziert erarbeitet werden.

Insbesondere sollte die Zustandsbewertung abhängig von der funktionellen Bewertung der Strassen (Norm SN 640 908) durchgeführt und die Grenzwerte der Zustandsänderung entsprechend der Funktion (bzw. Verkehrslastklasse) der Strasse im Strassennetz festgelegt werden.



LEGENDE: N/K = Nutzen/ Kosten

Abbildung 33: Ablauf des Verfahrens der „Zeitliche Optimierung“

Schadensstärke [A] * [S]
(der massgebenden Merkmalgruppe)

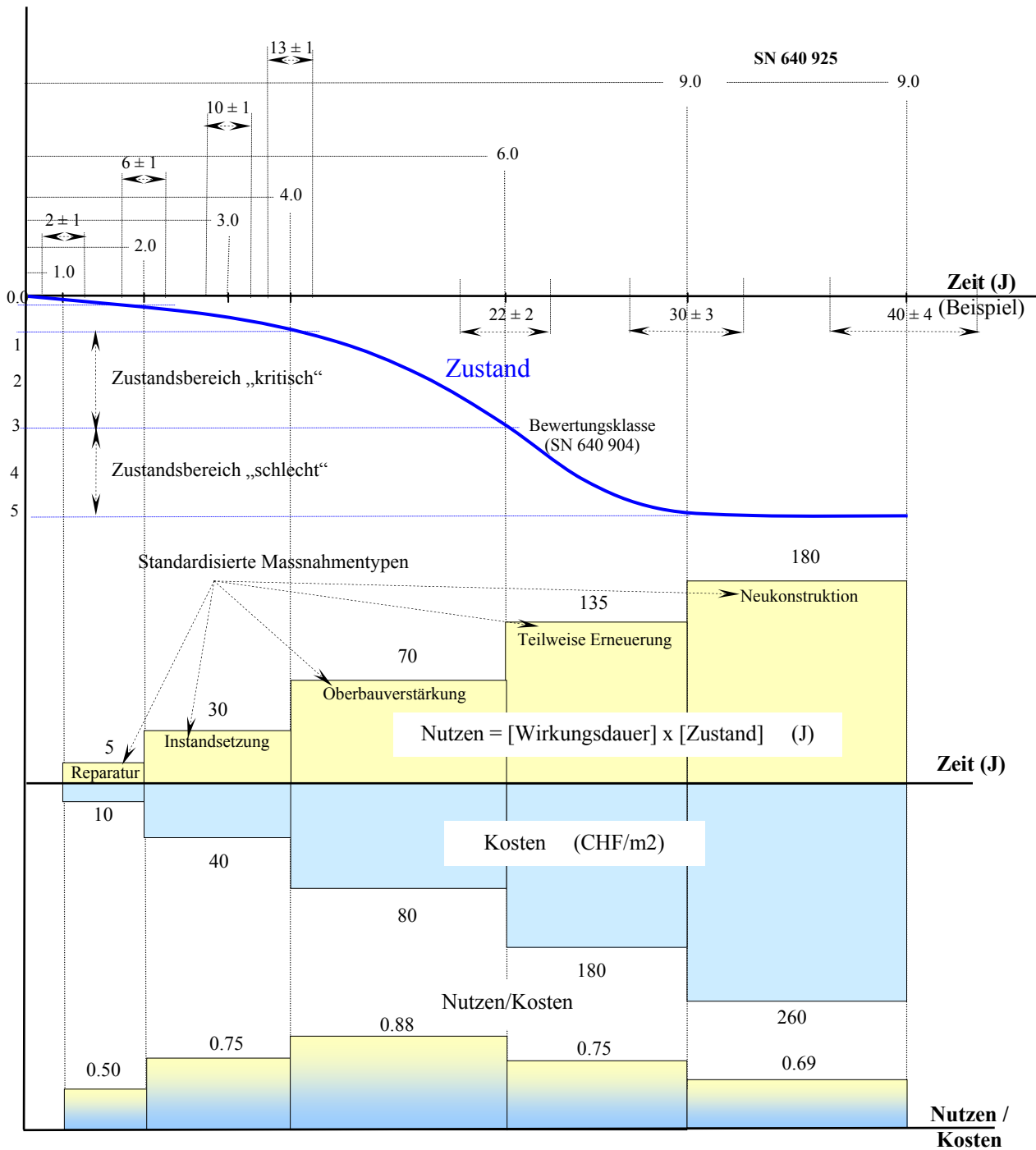


Abbildung 34: Zuweisung von „Standardisierten Massnahmentypen“ zu definierten Zustandsbereichen (Grundlage zur zeitlichen Optimierung im PMS am Beispiel von kantonalen Hauptstrassen)

3.15.2.3 Spezifische Bedürfnisse der Technischen Ausrüstungen

Der Einbezug der „Technische Ausrüstungen“ (elektromechanischen Anlagen) in die zeitliche Optimierung von Massnahmenpaketen hat eine Besonderheit: Technische Ausrüstungen werden in der Regel über eine bestimmte Zeitdauer gewartet (im Rahmen des betrieblichen Unterhalts), bis eine Erneuerung oder ein Ersatz als sinnvoll erkannt wird.

Es ist eher selten, dass Anlagen teilweise erneuert, verstärkt oder ersetzt werden. Der „Teilersatz“ beschränkt sich auf einzelne Komponenten wie Motoren, Lüfter in elektronischen Steuerungen, Schaltelemente; und natürlich auf Verbrauchsteile wie Lampen, Filtermatten. Ein Teilersatz hat damit keinen Einfluss auf die grundsätzliche Qualität des Systems, welche durch spezifische Anforderungen definiert wird.

Der voraussichtliche Ersatztermin eines Systems wird über die regelmässige Zustandserfassung und –Bewertung mittels Kenngrössen ermittelt. Damit ergibt sich zumeist eine Prognose für einen Zeitraum, in dem das System zu ersetzen ist, vgl. [Abbildung 35](#).

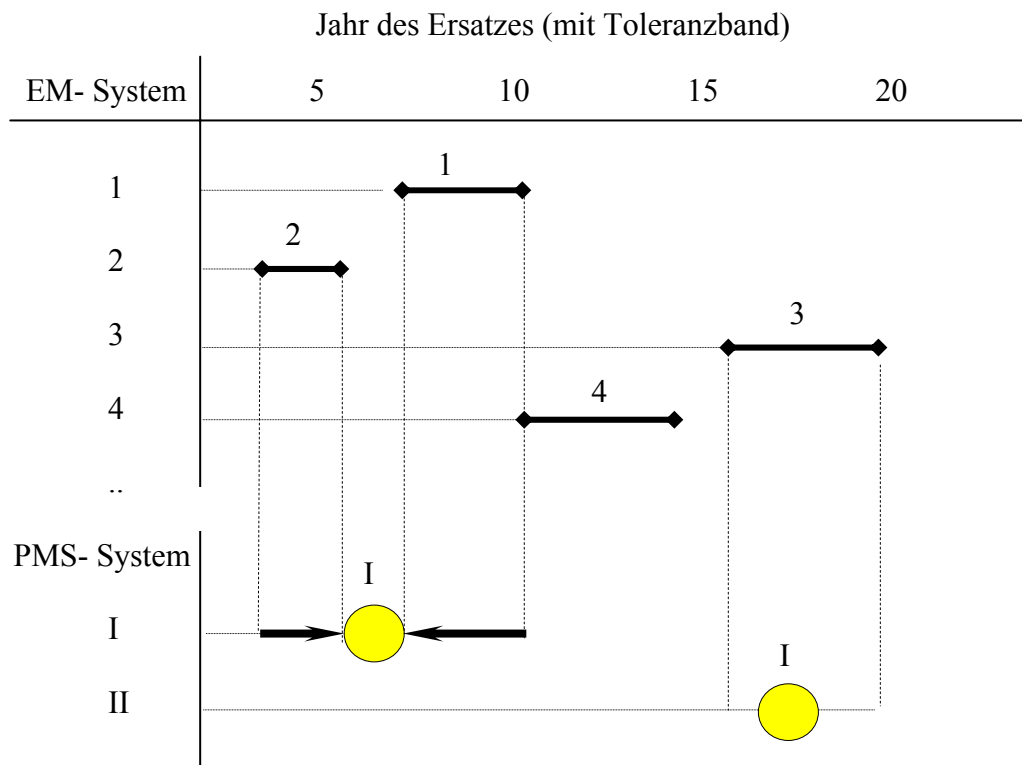


Abbildung.35: Koordination von EMT- mit PMS- Massnahmen (EM-Massnahmen 1 und 2 werden gleichzeitig mit PMS I durchgeführt, 3 mit II, usw.)

3.15.2.4 Kommentar

Für die zeitliche Optimierung bedeutet dies, dass der Nutzen und die Kosten infolge zeitlicher Verschiebung der Massnahme (Ersatz) langfristig unverändert bleiben. Dies bestätigt, dass die Objekte aus dem EMT den Realisierungszeitpunkt in der Regel nicht beeinflussen und somit auf ihre Berücksichtigung verzichtet werden kann. Allerdings gilt die Randbedingung, dass der optimale Realisierungszeitpunkt des Massnahmenpakts früher sein muss als der am spätesten mögliche Zeitpunkt der Realisierung eines EMT- Objektes, d.h. der Toleranzband des am spätesten geplanten EMT- Objektes muss über den optimalen Realisierungszeitpunkt des Massnahmenpakts liegen.

3.15.2.5 Beispiel 26: Zeitliche Optimierung

Dieses Beispiel zeigt die Anwendung der Methode der zeitlichen Optimierung der Realisierung für 4 ausgewählte Massnahmenpakete A, B, C und D, welche aus Kombination von PMS- Einzelmassnahmen bestehen (analoge Grundlagen für Einzelmassnahmen von BMS und EMS müssen erst erarbeitet werden).

Die Tabelle 16 (Teile 1 und 2) zeigt die Daten, Informationen und Schritte, welche der Prozess zur Ermittlung der optimalen Realisierungszeit des Massnahmenpakets beinhaltet.

3.15.2.6 Getroffene Annahmen

- Im Zeitpunkt der Realisierung einer Massnahme wird die, für diesen Zeitpunkt als optimal geltende Massnahme realisiert (abhängig von in diesem Zeitpunkt aktuellem Zustand und nicht die ursprünglich geplante Massnahme)
- Änderung des Nutzens der Einzelmassnahmen, gemäss Abbildung 34 (diese Werte sind für PMS- Massnahmen grob ermittelt worden.)
- Änderung der Kosten der Einzelmassnahmen wie in der Abbildung 34 (diese Werte sind nur für PMS- Massnahmen ermittelt worden, vgl. Abbildung 36.)
- Planungsjahr oder "Ist- Datum": 01
- Zu untersuchende Zeitperiode der Realisierung: Jahre 01 bis und mit 10
- Als Nutzen der Einzelmassnahmen sind die erwartete Wirkungsgrad und der zu verbessernde Zustand des Objekts berücksichtigt worden.

Somit gilt das Ergebnis (ermitteltes optimales Realisierungsjahr des Massnahmenpakets) als optimal bzgl. des Nutzens, bestehend aus den genannten Komponenten.

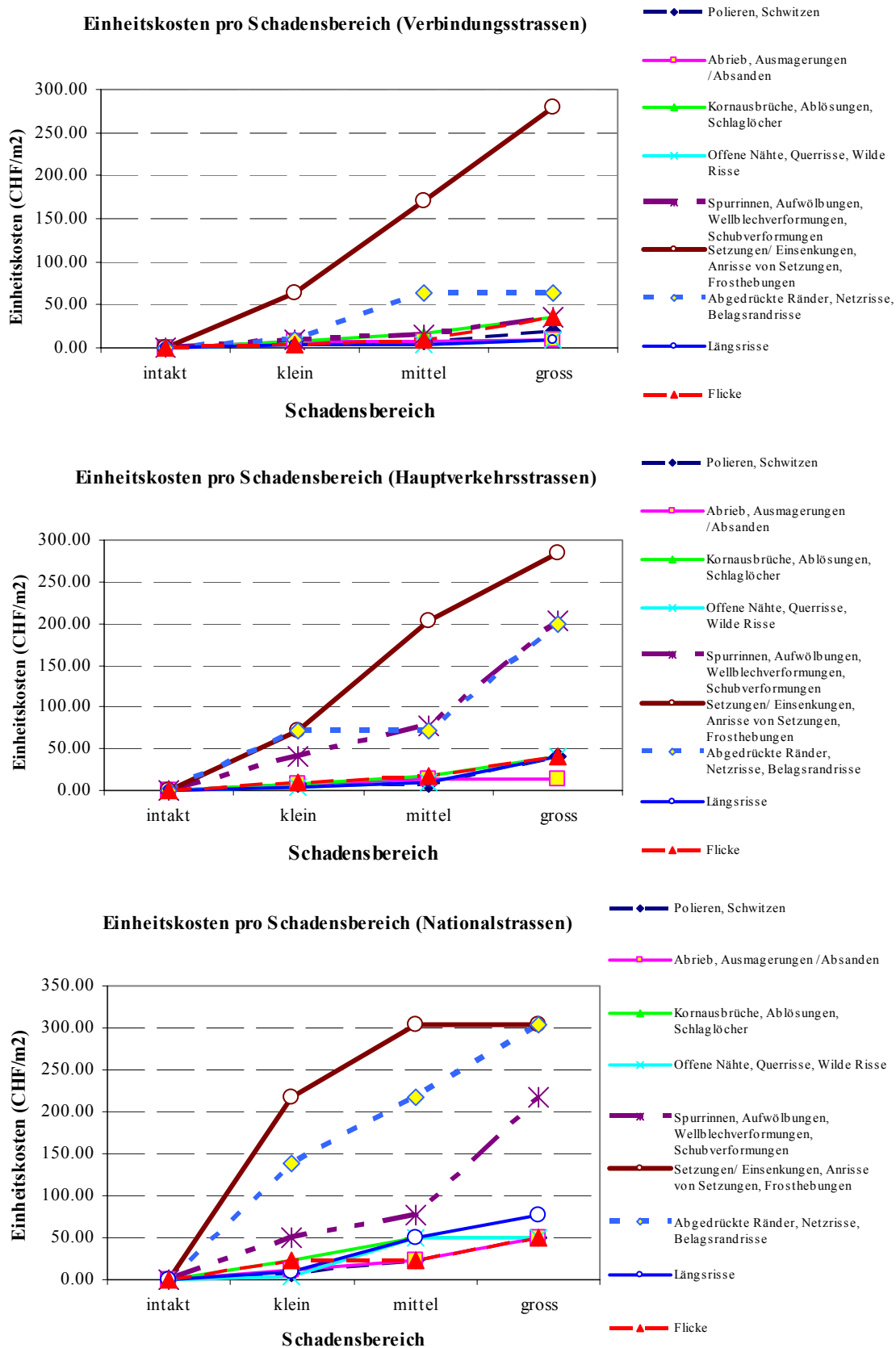


Abbildung 36: Entwicklung der durchschnittlichen Massnahmenkosten im PMS infolge Zustands, bzw. Schadensbereich* (Beispiel aus PMS- Teilsystem eines Kantons)

*: "Kleine Schäden", wenn $[A] * [S] \leq 2.0$; "Mittlere Schäden", wenn $[A] * [S] > 2.0$ und ≤ 4.0 nach SN; "Grosse Schäden", wenn $[A] * [S] > 4.0$, A = Schadenausmass, S = Schadensschwere (SN 640 925b)

3.15.2.7 Erläuterungen zu dem Beispiel

Die einzelnen Spalten dieser Tabelle sind nummeriert. Diese Spalten werden nachfolgend in der Reihenfolge ihrer Nummerierung erläutert.

Spalten- Nr.

1. Bezeichnung des Massnahmenpakets (A bis D)
2. Strassen- Nummer, gültig für das betreffende Strassennetz
3. Nummer des Strassenabschnitts, worauf die Massnahme im Teilsystem geplant wurde
4. Anfangspunkt des Strassenabschnitts (Km- Bezeichnung)
5. Endpunkt des Strassenabschnitts (Km- Bezeichnung)
6. Länge des Strassenabschnitts (Differenz zwischen End- und Anfangspunkt)
7. Länge des Erhaltungsabschnitts (Summe der Länge aller Strassenabschnitte)
8. Fläche des Strassenabschnitts
9. Alter des Objekts im Planungsjahr 01 (Bezugszeitpunkt)
10. Alter des Objekts im Realisierungsjahr des Massnahmenpakets
11. Zustand des Objekts im Realisierungsjahr des Massnahmenpakets (als Komponente der Massnahmennutzen)
12. Laufende Nummer der Einzelmassnahmen im zugehörigen Massnahmenpaket
13. Bezeichnung der Massnahme im Teilsystem (gegeben durch Grundmodelle, wie in der Abbildung 34 für PMS)
14. Im Teilsystem ermitteltes optimales Jahr der Realisierung der Massnahme
15. Erwartete Wirkungsdauer der Massnahme (als Komponente des Massnahmennutzens)
16. Durchschnittliche Einheitskosten der einzelnen Massnahmen in Abhängigkeit des Zustandes (für alle Strassentypen eingemittelt)
17. Kosten der Einzelmassnahmen (für den im Teilsystem geplanten Zeitpunkt)
18. Summe aller Massnahmenkosten eines Erhaltungsabschnitts
19. Summe aller Massnahmenkosten eines Erhaltungsabschnitts, differenziert nach Teilsystemen (falls aus mehreren Teilsystemen Massnahmen kombiniert werden)
20. Massnahmennutzen, bestimmt durch die Komponenten "erwartete Wirkungsdauer" sowie "Zustand des Objekts" für die einzelnen Massnahmen (Multiplikation der Spalten 11 und 15), vor der zeitlichen Verschiebung
21. Gesamtnutzen des Massnahmenpakets, bestimmt durch Addition des einzelnen Massnahmennutzens, vor der zeitlichen Verschiebung
22. Nutzen/Kosten-Verhältnis des Massnahmenpakets vor der zeitlichen Verschiebung ($\Sigma N / \Sigma K$), (Division der Werte aus den Spalte 21 und 18)
23. Nutzen der Massnahme nach der zeitlichen Verschiebung (aus dem Grundmodell in der Abbildung 34, in Abhängigkeit des Alters im Zeitpunkt der Realisierung, Spalte 10)
24. Gesamtnutzen des Massnahmenpakets nach der zeitlichen Verschiebung (Addition der Nutzen einzelner Massnahmen aus der Spalte 23)
25. Durchschnittliche Einheitskosten der Massnahmen, beeinflusst durch zeitliche Verschiebung ihrer Realisierung
26. Effektive Massnahmenkosten auf Grund der zeitlichen Verschiebung
27. Effektive Gesamtkosten des Massnahmenpakets
28. Nutzen/Kosten Verhältnis des Massnahmenpakets (Division der Werte aus den Spalten 24 und 27), das in Abhängigkeit des Realisierungsjahr (Spalte 29) zu maximieren gilt.
29. Realisierungsjahr des Massnahmenpakets (Variable Grösse innerhalb des gegebenen Zeitfensters).

Massnahmenpaket	Strassen-Nummer	Strassenabschnitt-Nr.	Anfangspunkt - km	Endpunkt - km	Länge (km)	Länge Total (km)	Fläche Total (m2)	Alter des Objekts (J) im Ist-Datum = 01	Alter bei der Realisierung	Aktueller Zustand des Objekts (Potential der Zustandsverbesserung)	Massnahmen-Nr.	Optimale Massnahme (Bezeichnung im Teilsystem)	Geplantes Realisierungs-jahr	Erwartete Wirkungs-dauer (J)	Einheitskosten (CHF/m ²)	Kosten (10 ³ CHF)	Gesamtkosten (10 ³ CHF)	Gesamtkosten pro Teilsystem (10 ³ CHF)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
A	1200	107	29.714	29.920	0.206	5.929	1'000	23	29	4.1	1A	Teilw. Erneuerung	05	30	180	180	2'970	2'970
		110	30.836	31.171	0.335		1'200	18	24	3.8	2A	Oberbauverstärkung	02	20	80	96		
		111	31.171	31.396	0.225		600	12	18	2.9	3A	Instandsetzung	06	12	40	24		
		112	31.396	31.914	0.518		6'000	34	40	5.0	4A	Neukonstruktion	08	40	260	1'560		
		114	32.129	32.448	0.319		1'300	25	31	4.3	5A	Teilw. Erneuerung	04	30	180	234		
		118	33.307	33.694	0.387		1'500	12	18	2.8	6A	Instandsetzung	06	12	40	60		
		119	33.694	34.113	0.419		4'000	16	22	3.6	7A	Oberbauverstärkung	07	20	80	320		
		122	34.930	35.204	0.274		2'400	20	26	3.9	8A	Oberbauverstärkung	07	20	80	192		
		123	35.204	35.643	0.439		3'800	14	20	2.4	9A	Oberbauverstärkung	02	20	80	304		
		B	1200	124	35.643	36.128	0.485	5.969	4'300	19	22	3.9	1B	Oberbauverstärkung	05	20	80	344
125	36.128			36.380	0.252		1'000	11	14	3.1	2B	Instandsetzung	03	12	40	40		
136	38.606			39.007	0.401		1'650	08	11	3.0	3B	Instandsetzung	08	12	40	66		
137	39.007			39.100	0.093		470	03	06	2.9	4B	Reparatur	04	04	12	6		
142	40.204			40.360	0.156		760	27	30	4.9	5B	Teilw. Erneuerung	06	30	180	137		
145	40.847			41.197	0.350		1'900	25	28	4.6	6B	Teilw. Erneuerung	05	30	180	342		
147	41.236			41.612	0.376		2'050	23	26	4.6	7B	Teilw. Erneuerung	05	30	180	369		
C	2047			1	0.000	0.495	0.495	5.820	2'900	24	32	4.0	1C	Teilw. Erneuerung	08	30	180	522
		2	0.495	0.900	0.405		2'080	15	23	3.1	2C	Oberbauverstärkung	09	20	80	166		
		3	0.953	1.418	0.465		3'100	36	44	5.0	3C	Neukonstruktion	03	40	260	806		
		4	1.418	2.082	0.664		4'000	22	30	4.1	4C	Oberbauverstärkung	06	20	80	320		
		5	3.420	5.820	2.400		4'500	34	42	5.0	5C	Neukonstruktion	05	40	260	1'170		
D	2048	1	0.000	0.875	0.875	4.873	3'200	30	34	4.1	1D	Teilw. Erneuerung	07	30	180	576	1'768	1'768
		2	0.875	4.505	3.630		5'000	23	27	3.8	2D	Teilw. Erneuerung	03	30	180	900		
		3	4.000	4.873	0.873		3'650	22	26	3.4	3D	Oberbauverstärkung	04	20	80	292		

Tabelle 16: Beispiel der zeitlichen Optimierung der PMS- Massnahmenpakete (Teil 1)

Nutzen (Wirkungs-dauer x Potential) vor zeitl. Verschiebung, [J]	Gesamtnutzen des M-Pakets vor zeitl. Verschiebung, [J]	Nutzen/Kosten-Verhältnis des M-Pakets vor zeitl. Verschiebung [J/Mio. CHF]	Nutzen (Wirkungs-dauer x Potential) nach zeitl. Verschiebung, [J]	Gesamtnutzen des M-Pakets nach zeitl. Verschiebung, [J]	Durchschnittliche Kosten infolge zeitl. Verschiebung [PMS: CHF/m ²]	Totale Kosten nach zeitl. Verschiebung in 1000 CHF	Gesamtkosten nach zeitl. Verschiebung (1000 CHF)	Nutzen/Kosten-Verhältnis des M-Pakets nach zeitl. Verschiebung [J/Mio. CHF]	Optimales Jahr, bzw. Zeitfenster der Realisierung des Massnahmenpakets
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
123.0	794.4	267	135.0	1045	180.0	180	3'518	297	07
76.0			135.0		180.0	216			
34.8			70.0		80.0	48			
200.0			180.0		260.0	1560			
129.0			180.0		260.0	338			
33.6			70.0		80.0	120			
72.0			70.0		80.0	320			
78.0			135.0		180.0	432			
48.0			70.0		80.0	304			
78.0			585.8		449	70.0			
37.2	70.0	80.0		80					
36.0	30.0	40.0		66					
11.6	6.0	12.0		6					
147.0	135.0	180.0		137					
138.0	135.0	180.0		342					
138.0	135.0	180.0	369						
120.0	664.0	222	180.0	810	260.0	754	3'824	212	09
62.0			135.0		180.0	374			
200.0			180.0		260.0	806			
82.0			135.0		180.0	720			
200.0			180.0		260.0	1170			
123.0	305.5	173	180.0	450	260.0	832	2'389	188	05 (02 – 08)
114.0			135.0		180.0	900			
68.0			135.0		180.0	657			

Tabelle 16: Beispiel der zeitlichen Optimierung der PMS- Massnahmenpakete (Teil 2)

3.15.2.8 Interpretation der Ergebnisse

Das optimale Realisierungsjahr für die einzelnen Massnahmenpakete lässt sich durch die angewendete Methode berechnen. Eine Analyse der Berechnungsmethode ergibt, dass sich für die einzelnen Massnahmenpakete unterschiedliche zeitliche Verläufe der Veränderung des Nutzen/ Kosten- Verhältnisses ergeben.

In der Abbildung 37 sind diese Kurven präsentiert. Zu beachten ist, dass für die Massnahmenpaket A und B die Kurve ziemlich eindeutig erkennbaren "Scheitelpunkte" (Maximalwert der totalen N/K-Veränderungen, bzw. optimaler Realisierungszeitpunkt) aufweist (Jahr 07, bzw. 04) und für die Massnahmenpakete C und D ihr Verlauf relativ flach wird (optimales Realisierungszeitfenster).

Dies bedeutet, dass die Massnahmenpakete A und B möglichst im ermittelten optimalen Realisierungsjahr durchzuführen sind, weil im Falle einer zeitlichen Verschiebung ihr Nutzen/ Kosten- Verhältnisses geringer wird. Die Massnahmenpakete C und D sind diesbezüglich weniger empfindlich, so dass aus Gründen der Homogenität der Auslastung des Budgets (oder der Strassenverwaltung) die Verschiebung ihrer Realisierungszeit ohne grosse negative Auswirkungen innerhalb des ermittelten Zeitfensters vorgenommen werden kann.

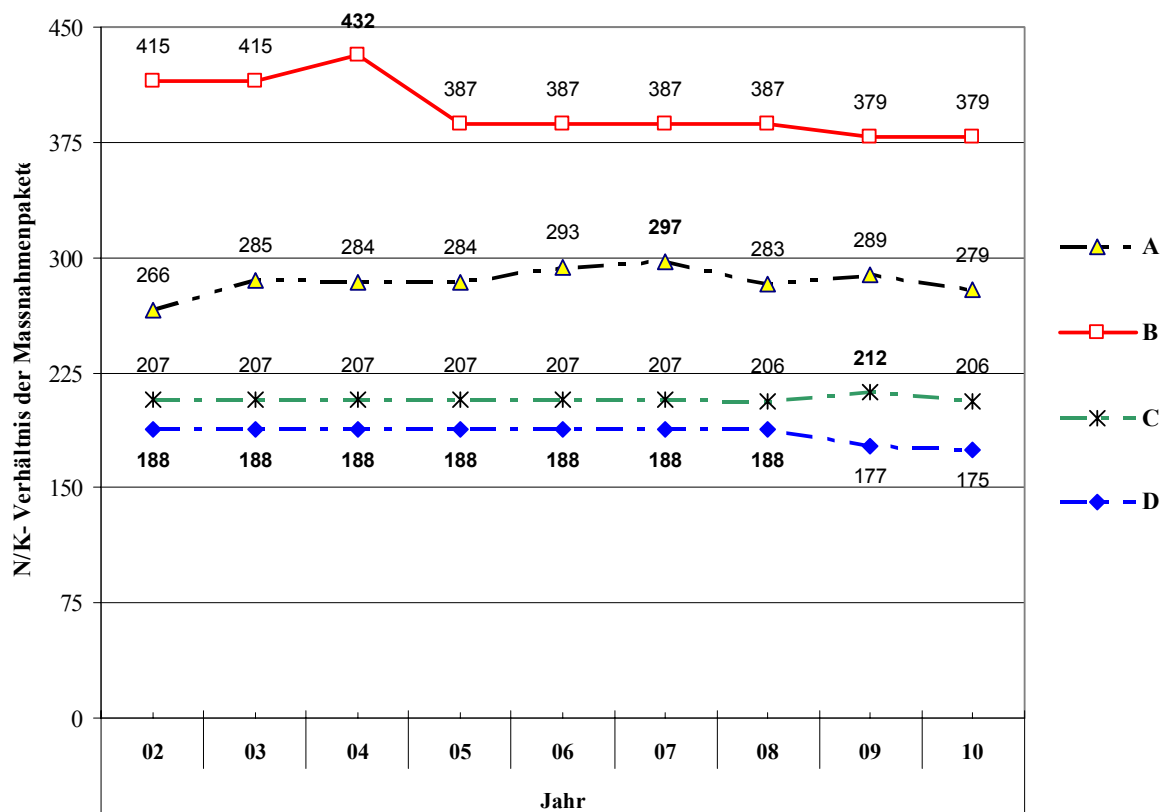


Abbildung 37: Nutzen/ Kosten-Verhältnis der Massnahmenpakete in Abhängigkeit des Realisierungsjahres

4. Normung

Der Inhalt des vorliegenden Forschungsberichts kann in zwei Normen umgesetzt werden. Die erste Norm (Grundnorm) soll generelle Aussagen über die Optimierungsverfahren und ihre Anwendungsmöglichkeiten im Erhaltungsmanagement beinhalten. Die zweite Norm soll die Berechnungsmethoden darstellen und anhand von Beispielen die Anwendungen erläutern.

Diese Normen können folgenden Inhalt aufweisen:

- | <u>• Grundnorm „Grundlagen der Optimierung“</u> | <u>Vgl. Abschnitt</u> |
|---|------------------------|
| ▪ Allgemeines: | |
| ○ Geltungsbereich | |
| ○ Gegenstand | |
| ○ Zweck | |
| ○ Anwendungen der Optimierung im Erhaltungsmanagement | 1.1 |
| ○ Begriffe | 1.5 |
| ▪ Grundlagen: | |
| ○ Genereller Ablauf der Optimierung (als Prozess) | 1.6 (Abbildung 1) |
| ○ Anforderungen der Teilsysteme | 3.12.1 bis 3.12.3 |
| ○ Ziele der Optimierung | 3.13.3 |
| ○ Merkmale der Einzelmassnahmen | 3.12.4 |
| ○ Vorgaben, Randbedingungen | 3.13.1 |
| ○ Bestimmung des Vorrangs der Teilsysteme | 3.13.5 |
| ○ Kriterien der Optimierung | 3.13.6.1 und 3.14.2 |
| ▪ Literaturverzeichnis | |
| <u>• Norm „Optimierungsverfahren“</u> | |
| ▪ Allgemeines: | |
| ○ Geltungsbereich | |
| ○ Gegenstand | |
| ○ Zweck | |
| ○ Begriffe | 1.5 |
| ▪ Grundlagen: | |
| ○ Nicht-monetäre Optimierungsverfahren | 2.1.1, 3.6.1, 3.7.1 |
| ○ Monetäres Optimierungsverfahren | 2.1.2, 3.10 |
| ○ Örtliche Optimierung | 3.13, 3.14 |
| ○ Zeitliche Optimierung | 3.15 |
| ○ Einfluss der zeitlichen Verschiebung der Massnahmen auf deren Nutzen und Kosten | 3.15.2.2, Abbildung 34 |
| ○ Beispiele | Beispiele 23 und 26 |
| ▪ Literaturverzeichnis | |

5. Schlussfolgerungen und das weitere Vorgehen

Die wichtigsten Folgerungen dieser Forschungsarbeit sind:

- Sie zeigt, dass die Anwendung der Optimierungsverfahren auf Stufe Gesamtsystem primär für Strassen mit hohem Verkehrsaufkommen zu einer merklichen Reduktion der Gesamtkosten und zur Erhöhung des Gesamtnutzens führen wird. Der Grund dafür liegt darin, dass höheres Verkehrsaufkommen auch höhere Gesamtkosten und Gesamtnutzen verursacht. Diese führt zu potentiell höherer Möglichkeit der Effizienzsteigerung.

Dies bedeutet aber nicht, dass für andere Strassen kein Optimierungspotential vorhanden wäre. Gerade das Verfahren der zeitlichen Optimierung würde sich genau so gut für Einzelmassnahmen auf allen Strassentypen eignen, für welche der Realisierungszeitpunkt aufgrund der Maximierung vom Nutzen/Kosten- Verhältnis ermittelt werden soll.

- Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Anwendung dieser Verfahren ist die hohe Objektivität der Entscheidungen, welche als überzeugendes Argument zur Kommunikation der Resultate der Optimierungsprozesse gezielt eingesetzt werden können. Insbesondere wenn die Kriterien der Entscheidungsfälle nach objektiveren Verfahren wie gewichtete Summation oder AHP gewichtet werden können.
- Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde zudem festgestellt, dass die Bedeutung der beiden Teilsysteme PMS und BMS für die Optimierung auf Stufe Gesamtsystem dominierend ist. Der Grund dafür liegt insbesondere in der Tatsache, dass die Zustandsänderung der Objekte dieser Teilsysteme stetig oder stufenweise erfolgt. Hingegen ist bei den Objekten des Teilsystems EMT (elektromechanische Anlagen des Teilsystems Technische Ausrüstungen) in fast allen Fällen eine abrupte Zustandsverschlechterung (funktionstüchtig/nicht funktionstüchtig) zu erwarten.
- Die in diesem Bericht berechneten Beispiele zeigen, dass die Anwendung von Optimierungsverfahren das Nutzen/ Kosten- Verhältnis von Massnahmenpaketen erhöht. Insbesondere bewirken diese Verfahren langfristig erhöhte Qualität des Zustandes und niedrigeren Erhaltungsaufwand sowie Strassennutzerkosten infolge Behinderungen von Baustellen.
- Die Zielsetzung der Optimierungsaufgabe ist entscheidend dafür, welche der beiden Methoden der wirtschaftlichen oder multikriteriellen Optimierung einzusetzen sind.
- Es könnte auch eine Kombination der beiden Methoden zur Lösung der Aufgabe führen, indem zunächst nach multikriterieller Methode ein Variantenvergleich durchgeführt wird und dann für eine definierte Anzahl der besten Varianten ein Vergleich nach wirtschaftlicher Optimierung vollzogen wird, um die vorteilhafteste Variante zu ermitteln.
- Eine wichtige Voraussetzung der Anwendung der Optimierungsmethoden ist die Verfügbarkeit der benötigten Daten, welche für viele Strassenverwaltungen nur teilweise zutrifft. Zur Normung der erarbeiteten Grundlagen sind im Kapitel 4 Vorschläge bezüglich Struktur von zwei spezifischen Normen angegeben worden. Ermittlung der zusätzlichen Kosten infolge zeitlicher Verschiebung von Massnahmen.

Das weitere Vorgehen betrifft Massnahmen auf verschiedene Ebenen, nämlich Normung, Forschung und praktische Anwendung.

Zur Normung der erarbeiteten Grundlagen sind im Kapitel 4 Vorschläge bezüglich Struktur und Inhalt von zwei spezifischen Normen präsentiert, welche der Fachkommission 7 vorgelegt werden.

Für die praktische Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse empfiehlt es sich, dass die Tiefbauämter ihr zuständiges Personal gezielt in die Materie Optimierung weiterbilden (Workshops) und dafür sorgen, dass ihr Wissensstand nachhaltig aktuell bleibt.

Auf Ebene Forschung sind weitere Projekte zu starten, welche die aufgedeckten Wissenslücken schliessen sollen. Diese sind über:

- Weitere Optimierungsaufgaben im Erhaltungsmanagement, z.B. Optimierung von Erhaltungsstrategien sind in diesem Forschungsbericht nicht abgehandelt worden, da sie den finanziellen Rahmen des Forschungsauftrages sprengen würden. Die Grundlagen dafür sind jedoch teilweise bereitgestellt, so dass im Rahmen eines eigens zu lancierenden Forschungsauftrages die entsprechende Methodik mit den dazugehörigen Ansätzen und Möglichkeiten aufgezeigt werden kann. Darüber hinaus:
- Optimale Erhaltungsstrategien pro Strassentyp in Abhängigkeit von definierten Zustandsbereichen (Netzebene)
- Optimale Erhaltungsstrategien für Objekte (Strassenabschnitte) in Abhängigkeit von definierten Zustandsbereichen (Projektebene)
- Methode der heuristischen Massnahmenplanung für PMS und BMS (durch eindeutige Festlegung der Planungsschritte)
- Ermittlung der zusätzlichen Kosten infolge zeitlicher Verschiebung von Massnahmen
- Ermittlung des monetären Nutzens von Massnahmen in Abhängigkeit des Strassenzustandes
- Analytisches Verfahren zur Ermittlung optimaler Kombination von Massnahmenvorschlägen aus den Teilsystemen
- Festlegung der „Standardisierten Massnahmen“, (Massnahmen, welche als optimal für definierte Zustände der Fahrbahnen, Kunstbauten und Technische Ausrüstungen gelten.)
- Ermittlung von „Verhaltenskurven“ der Fahrbahnen und Kunstbauten (und evtl. bestimmter Anlagen der Technischen Ausrüstung) für bestimmte Strassentypen und differenziert nach durchgeführten Massnahmen (Instandsetzung, Verstärkung und Erneuerung), als „Grund-Elemente“ zur Definition von Wirkungsdauer der Massnahmen (als ein Grundmodell der zeitlichen Optimierung).

6. Literaturverzeichnis

- [1] SN 640 907: Erhaltungsmanagement- Grundlagen der Kostenberechnung
- [2] Ali- A. Rafi, Gesamtkostensystem: Eine Entscheidungsgrundlage für das Management der Strassenerhaltung, VSS- Forschungsbericht Nr. 498, Dezember 2001
- [3] SN 640 908: Erhaltungsmanagement- Funktionelle Bewertung der Strassenabschnitte
- [4] T. L. Saaty, The Analytical Hierarchy Process, McGraw-Hill, New York, 1980
- [5] Fachkonzept Unterhaltsplanung Gesamtsystem, Version 2.0, Bundesamt für Strassen, Bern, 2000
- [6] Ali- A. Rafi, Entwicklung einer Methodik zur Dringlichkeitsreihung von Erhaltungsmassnahmen der Strassen, VSS- Forschungsbericht Nr. 152, Juni 1988
- [7] Impact of Transport Infrastructure Investment on Regional Development, OECD Code 772002051P1, OECD, Paris, 2002
- [8] C. Queiroz, S. Gautam, Road Infrastructure and Economic Development – Some Diagnostic Indicators, Working Papers WPS 921, The World Bank, Washington D. C., 1992
- [9] G. Roelfstra, R. Hajdin, E. Brühwiler, Modèle d'évolution de l'état des ponts-routes en béton armé, Bericht Nr. 560 (VSS), Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern, 2001
- [10] P. Thoft-Christensen, M. J. Baker, Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer-Verlag, Berlin, 1982
- [11] Staukosten im Strassenverkehr, Schlussbericht, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern, 1998
- [12] I. Scazziga, Ermittlung der Nutzenkosten für das Management der Strassenerhaltung, Bericht Nr. 427 (VSS), Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern, 1998
- [13] Erhaltung von Bauwerken, Norm SIA 469, Schweizer Ingenieur- und Architekten- Verein, Zürich, 1997
- [14] Ali -A. Rafi, Asset Management System für Strassen, Zeitschrift Strasse und Verkehr, 11/2003
- [15] R. Hajdin, H. Ludescher, F. Salamé, KUBA-MS Ticino – Handbuch für Datenerfassung, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern, 1998
- [16] R. Hajdin, O. Hinz, KUBA-MS Ticino – Beispielhandbuch, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern, 2000
- [17] F. Farid, D. W. Johnston, B. S. Rihani, C. Chen, Feasibility of Incremental Benefit-Cost Analysis for Optimal Budget Allocation in Bridge Management Systems, Transportation Research Record No. 1442, Transportation Research Board, Washington D. C., 1994
- [18] F. Farid, D. W. Johnston, M. A. Laverde, C. Chen, Application of Incremental Benefit-Cost Analysis for Optimal Budget Allocation to Maintenance, Rehabilitation, and Replacement of Bridges, Transportation Research Record No. 1442, Transportation Research Board, Washington D. C., 1994
- [19] F. Farid, D. W. Johnson, C. Chen, M Laverde, B. Rihani, Feasibility of Incremental Benefit-Cost Analysis for Optimal Allocation of Limited Budgets to Maintenance, Rehabilitation and Replacement of Bridges, Research Project DTFH71-87-NC-07, Final Report, Center for Transportation Engineering Studies, Raleigh, 1988
- [20] R. L. Keeney, H. Raiffa, Decisions with Multiple Objectives, John Wiley & Sons, Inc., 1976
- [21] H. Crowder, E. L. Johnson, M. Padberg, Solving Large-Scale-Zero-One Linear Programming Problems, Operation Research, 31, 803-834, 1983
- [22] K. L. Hoffman, M. Padberg, Improving LP-Representation of Zero-One Linear Programs for Branch-and-Cut, ORSA Journal of Computing, 3, 121-134, 1991

Anhang

(Optimierungsprozesse für das Teilsystem Kunstbauten mit KUBA-MS)

A Optimierungsprozesse für das Teilsystem Kunstbauten

Das Teilsystem Kunstbauten umfasst alle Brücken, Viadukte, Durchlässe, Galerien, Tagbautunnels, Stütz- und Schutzkonstruktionen. Diese Bauwerke (aus der Systemoptik **Objekte**) werden in der Regel in Bauwerksteile gegliedert. Entsprechend umfasst eine Massnahme am Bauwerk eine oder mehrere Massnahmen an Bauwerksteile.

Bei der Erhaltungsplanung von Kunstbauten unterscheidet man grundsätzlich zwischen dem Unterhalt und der Umgestaltung. Mit dem Unterhalt sollen die sicheren und funktionstüchtigen Strassenverbindungen langfristig erhalten bleiben. Im Grundsatz wird dabei keine zusätzliche (erhöhte) Nutzung ermöglicht. In diesem Sinne kann der Unterhalt wie in der Norm SIA 469 [13] wie folgt definiert werden: *Bewahren oder Wiederherstellen eines Bauwerks ohne wesentliche Änderung der Anforderungen.* Mit der Umgestaltung wird hingegen eine zusätzliche (erhöhte) Nutzung ermöglicht. In der Norm SIA 469 [13] ist die Umgestaltung wie folgt definiert: *Die Umgestaltung (Veränderung) bezweckt die Erhaltung des Bauwerks durch den Einbezug von neuen Anforderungen.* Das Ziel der Umgestaltungsmassnahmen ist somit eine Verbesserung der Systemindikatoren eines Objektes über den Neubauwerten. Mit der Brückenerweiterung z. B. wird die Leistungsfähigkeit dieser Brücke über den ursprünglichen Neubauwert erhöht oder beispielsweise mit einer Brückenverstärkung wird die Tragsicherheit den Neubauwert übersteigen. Die Umgestaltungsmassnahme bewirkt eine langfristige Reduktion von Benutzerkosten. Mit den Unterhaltsmassnahmen wird im Wesentlichen der Neubauzustand wiederhergestellt. Dies bedeutet, dass die Systemindikatoren eines Objektes auf die Neubauwerte gebracht werden. Die Unterhaltsmassnahmen haben in der Regel keine Veränderung der Benutzerkosten zur Folge. Bedingt durch die unterschiedliche Natur von Unterhalts- und Umgestaltungsmassnahmen werden sie bei der Optimierung unterschiedlich behandelt. Die Unterhaltsplanung (Ermittlung von optimalen Unterhaltsmassnahmen) wird weitgehend unabhängig von der Umgestaltungsplanung (Ermittlung von optimalen Umgestaltungsmassnahmen) erfolgen. Da der Unterhaltsbedarf in der Schweiz den Umgestaltungsbedarf weit übersteigt, liegt der Schwerpunkt der Erhaltungsplanung und der darin eingebetteten Optimierungsprozesse bei der Unterhaltsplanung. In den darauf folgenden Abschnitten wird deshalb v. a. die Unterhaltsplanung behandelt.

A 1 Unterhaltsplanung - Annahmen

Die im Abschnitt 3.1 des Berichtes erwähnten Kriterien behalten auch bei der Unterhaltsplanung von Kunstbauten ihre Gültigkeit. In der Praxis werden allerdings die Unterhaltsmassnahmen ausgeführt, bevor es zu einer nennenswerten Veränderung von Kriterien kommt. Dies bedeutet, dass sich die Systemindikatoren wie Leistungsfähigkeit und Sicherheit bei einer Kunstbaute während der Nutzungsdauer nicht verändern. Für die Optimierung der Unterhaltsplanung kann man deshalb diese Kriterien nicht direkt verwenden. Sie werden mit einem stellvertretenden Kriterium (Proxykriterium) ersetzt. Dieses stellvertretende Kriterium ist der **Bauwerkszustand**. Der Bauwerkszustand wird anhand einer diskreten Skala gemessen. Die einzelnen Werte dieser Skala werden dabei mit Text und Bild beschrieben, so dass ein Fachmann eine möglichst objektive Bewertung durchführen kann. Obwohl die Bewertung nach dem Erscheinungsbild erfolgt, kann man mit dem Bauwerkszustand auf Leistungsfähigkeit und Sicherheit zurück schliessen: Falls sich der Bauwerkszustand gegen unteres Ende der Skala bewegt, steigt die Wahrscheinlichkeit eines Leistungsfähigkeitseinbruches oder einer Gefährdung der Betriebssicherheit.

Die Bewertung von Kunstbauten auf der Bauwerksebene reicht als Grundlage für die Festlegung von Massnahmenvarianten nicht aus. Die Unterhaltsmassnahmen auf Bauwerksebene bestehen aus Unterhaltsmassnahmen an Bauwerksteilen und um diese zu bestimmen, muss man den Zustand der Bauwerksteile kennen. Die Bewertung erfolgt deshalb bei den meisten Kunstbautenmanagement-Systemen auf der Ebene von Bauwerksteilen. Dies hat noch einen zusätzlichen Vorteil, dass man die möglichen Unterhaltsmassnahmen an Bauwerksteilen typisieren und katalogisieren kann.

A 2 Unterhaltsplanung im KUBA-MS

In einer frühen Phase hat das ASTRA entschieden, die Erhaltungsplanung und damit auch die Unterhaltsplanung durch eine Software zu unterstützen. Dies erlaubte eine grössere Freiheit bei der Wahl

der Methoden und Verfahren. Die gewählten Methoden und Verfahren ermöglichen eine weitgehende Automatisierung der Vorgehensschritte im Konzept.

Der Ausgangspunkt für die Unterhaltsplanung ist der Zustand der Bauwerksteile. Die gewählten Methoden und Verfahren erlauben den Zustand der Bauwerksteile (im Wesentlichen die festgestellten Schäden und deren Ausmass) mit den technisch plausiblen Unterhaltsmassnahmen und deren Kosten automatisch zu verknüpfen.

Unterhaltsprojekte für ein Bauwerk können aus technisch plausiblen Unterhaltsmassnahmen an den einzelnen Bauwerksteilen zusammengesetzt werden. Somit können Unterhaltsoptionen automatisch generiert werden. Ohne diese automatische Generierung von Unterhaltsoptionen ist weder eine mittel- bis langfristige Unterhaltsplanung noch die Berücksichtigung von jenen Unterhaltsoptionen möglich, für welche keine Kostenschätzungen vorhanden sind.

Im darauf folgenden Abschnitt wird auf einzelne Schritte der Unterhaltsplanung im KUBA-MS näher eingegangen.

A 2 1 Zustandserfassung

Bei Inspektionen und Überprüfungen wird der Bauwerkszustand mit Aufnahme der Schäden und deren Ausmass erfasst sowie eine Bewertung von Bauwerk und Bauwerksteilen durchgeführt. Für den hier gewählten Lösungsansatz ist die Bewertung der Bauwerksteile von Bedeutung. Die Gliederung eines Bauwerkes in Bauwerksteile erfolgt vor der ersten Zustandserfassung und wird nicht verändert. Auf diese Weise ist die Vergleichbarkeit der Resultate gewährleistet. Die Zustandserfassung erfolgt periodisch im Rahmen regelmässiger Inspektionen. Im Zuständigkeitsbereich des ASTRA (Nationalstrassen) werden die Inspektionen alle 5 Jahre durchgeführt.

Die wesentlichen Ergebnisse der Zustandserfassung in Bezug auf Unterhaltsplanung sind:

- Schadensschwere
- Schadenausmass
- Schadenprozess

Die Bewertung der Schadensschwere erfolgt entsprechend der üblichen Praxis in 5 Zustandsklassen (gut/annehmbar/schadhaft/schlecht/alarmierend). Die Bauwerksteile im alarmierenden Zustand²² werden grundsätzlich nicht erfasst, sondern es werden umgehend geeignete Massnahmen eingeleitet. Wichtig ist dabei, dass diese Bewertung so weit wie möglich objektiv erfolgt. Eine uneinheitliche Zustandserfassung wird die Resultate der Unterhaltsplanung verfälschen. Die Bewertung muss deshalb aufgrund einer einheitlichen Beschreibung des Schadens, welcher mit einem charakteristischen Photo verdeutlicht wird, erfolgen.

Die Beschreibung einer Zustandsklasse ist vom Verfallsprozess (Schadenprozess) abhängig. So wird die Beschreibung der Zustandsklasse 4 infolge Korrosion der Bewehrung im Stahlbeton unterschiedlich ausfallen als jene infolge Ausspülung. Für jede Kombination von

- Schadenprozess
- Zustandsklasse

werden die entsprechenden Beschreibungen und charakteristischen Photos in einem Handbuch für Datenerfassung zusammengefasst [15]. Mit dieser Hilfe kann man während der Inspektion die Schadensschwere und den aufgetretenen Schadenprozess objektiv erfassen.

Die Schadenprozesse werden demnach katalogisiert. Grundsätzlich sind die Schadenprozesse an die Bauart geknüpft (siehe Abbildung A-1), d. h. es wird im Handbuch für Datenerfassung nicht unterschieden ob ein Schadenprozess an einem Widerlager oder an einer Stütze auftritt, wenn

- beide aus gleicher Bauart und
- in gleicher Qualität hergestellt wurden.

Es ist deshalb erforderlich auch die Bauarten zu katalogisieren.

Neben der Schadensschwere und dem Schadenprozess wird auch das Schadenausmass erfasst. In der Regel wird dieses Ausmass in m² quantifiziert. Die Einheit, in welcher das Schadenausmass erfasst wird, ist vom Typ des Bauwerksteils abhängig

²² Relativ grosse Wahrscheinlichkeit des Leistungsfähigkeitseinbruches und/oder eine unzulässige Reduktion der Sicherheitswerte.

A 2 2 Zustandsprognose

Der zukünftige Zustand der Bauwerksteile ist für die Unterhaltsplanung von grosser Bedeutung. Eine Prognose der Schadensschwere und des Schadenausmasses würde erlauben Unterhaltmassnahmen mit

Beispiel aus dem Katalog von Schadenprozessen

Die Zustandsklasse (Schadenschwere) zum Schadenprozess „**Bewehrungskorrosion bei Stahlbeton**“ wird wie folgt beschrieben:

<i>Zustandsklasse</i>	<i>Beschreibung</i>
1: gut (keine/ geringfügige Schäden)	Keine nennenswerten Schäden; nur feine Oberflächenrisse; keine Spuren von Korrosion.
2: annehmbar (unbedeutende Schäden)	Sichtbare Korrosionsspuren (Rostflecken) und / oder lokale Abplatzungen; feine Risse infolge von Korrosion an Bewehrungsstäben und / oder Nassstellen; geringfügige mechanische Schäden.
3: schadhaft (bedeutende Schäden)	Abplatzungen mit freiliegenden Bewehrungsstäben, Korrosionsabtrag unbedeutend, im Mittel weniger als 10 % der freiliegenden Bewehrungsstäbe; Risse und / oder Nassstellen.
4: schlecht (grosse Schäden)	Abplatzungen mit freiliegenden Bewehrungsstäben, Korrosionsabtrag bedeutend, im Mittel mehr als 10 % der freiliegenden Bewehrungsstäbe und / oder Lochfrass; Risse und / oder Nassstellen.
5: alarmierend (dringliche Massnahme)	Die Sicherheit ist gefährdet; Massnahmen sind vor der nächsten Hauptinspektion erforderlich; dringliche Massnahme.

Zu jeder Zustandsklasse wird noch im Handbuch für Datenerfassung ein repräsentatives Photo abgebildet.

den beliebigen Ausführungszeitpunkten zu berücksichtigen.

In der Regel ist ein Bauwerksteil der Abnutzung oder einem natürlichen Verfallsprozess unterworfen. Eine ungenügende Qualität des Baumaterials, Werkmängel u. a. m. kann die Verfallsgeschwindigkeit beeinflussen.

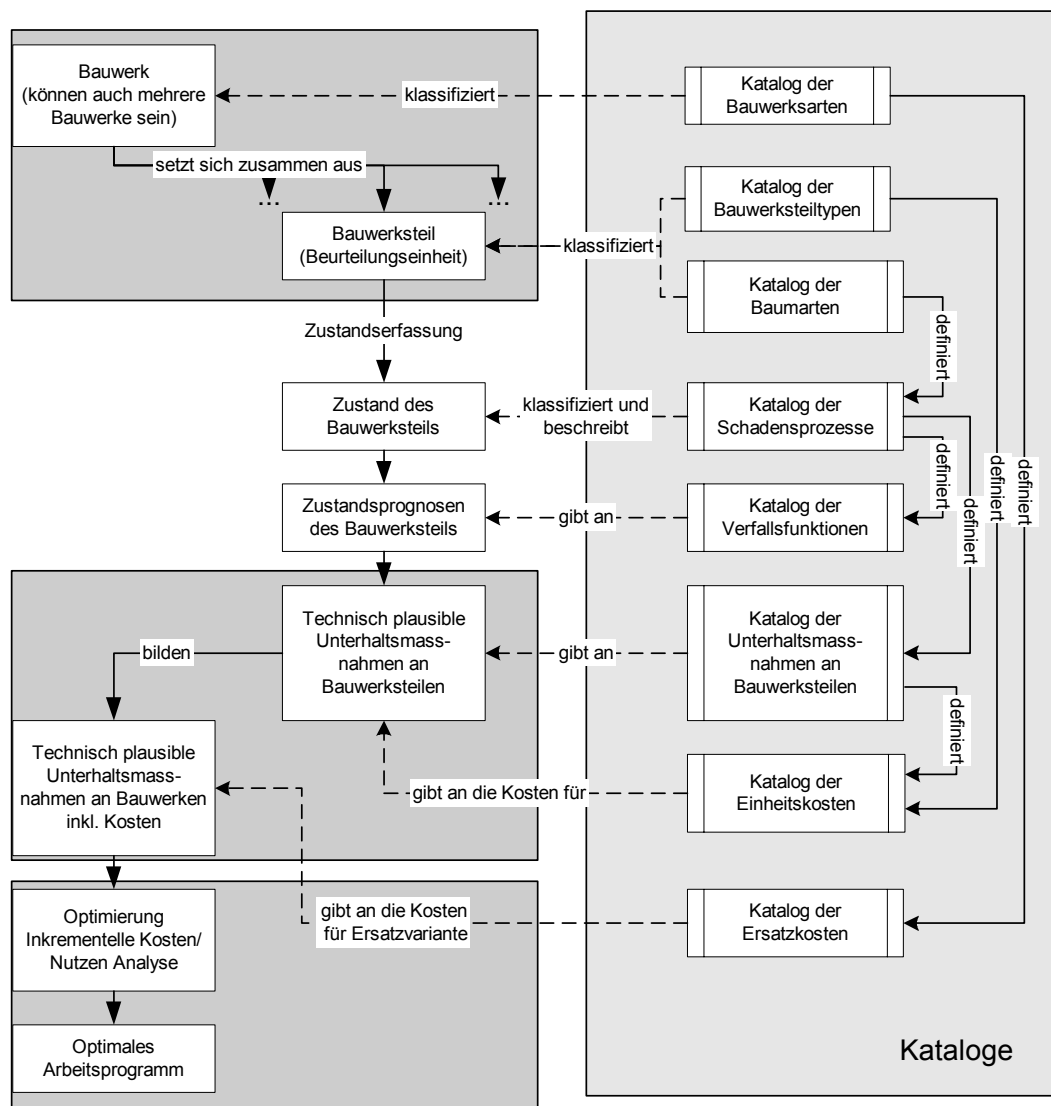


Abbildung A-1: Vereinfachter Ablauf der Unterhaltsplanung im KUBA-MS

Die Zustandsprognose ist demnach durch den aufgetretenen Schadenprozess bestimmt, dessen Verfallsgeschwindigkeit von Einflüssen wie Werksmängel, Umwelt u.a.m. abhängig ist. Um diese Zusammenhänge zu modellieren, werden neben den Schadenprozessen auch Einflüsse (in [Abbildung A-1](#) nicht dargestellt) katalogisiert. Jeder Kombination der Einträge aus diesen drei Katalogen wird eine Verfallsfunktion zugewiesen. Die übrigen Einflüsse werden dabei pauschal mit drei Einträgen günstig/mittel/ungünstig erfasst. Die Einzelheiten zu diesen Verfallsfunktionen sind in [16] zu finden.

Bei gewissen Bauwerkteilen, wie Lager und Fahrbahnübergänge, ist dies nicht möglich und es wird ein Bauwerkteil-spezifischer Schadenprozess verwendet. Die Verfallsfunktion ist deshalb vom Bauwerksteiltyp abhängig. Dies ist einer der Gründe, weshalb eine Katalogisierung der Bauwerksteiltypen erforderlich ist.

A 2 3 Unterhaltsoptionen

Unterhaltsoptionen für ein Bauwerk werden aus technisch plausiblem Unterhaltmassnahmen an den einzelnen Bauwerkteilen zusammengesetzt. Die Unterhaltmassnahmen an Bauwerkteilen sind vom Zustand des Bauwerkteils, Schadenprozess und Baumaterial abhängig. Für jede Kombination von Bauwerkteil-Zustand und Schadenprozess sind eine oder mehrere (in der Regel drei) technisch plausible Unterhaltmassnahmen katalogisiert. Die Einheitskosten für diese Unterhaltmassnahmen sind zusätzlich noch von Bauwerksteiltyp abhängig (siehe [Abbildung A-1](#)). Dies bedeutet, dass die gleiche Unterhaltmassnahme an einem Widerlager und an einem Träger nicht gleich viel kostet.

Grundsätzlich ist es möglich die katalogisierten, technisch plausiblen Unterhaltsmassnahmen an Bauwerksteilen beliebig zu kombinieren und so eine gewaltige Zahl von Unterhaltsmassnahmen an Bauwerken, d. h. von Unterhaltsoptionen zu generieren. Dies ist zwar mit den modernen Computern eine lösbare Aufgabe, produziert aber ein unnötiges Ausmass an Informationen. Um die Anzahl der technisch plausiblen Unterhaltsmassnahmen zu reduzieren, kann man eine Optimierung der Katalogeinträge einsetzen. Das Ergebnis dieser Optimierung ist ein reduzierter Massnahmenkatalog, mit einer einzigen, d.h. optimalen Unterhaltsmassnahme für jede beliebige Kombination von

- Zustand des Bauwerksteils,
- Schadenprozess und
- Bauwerksteiltyp.

Die hier grob beschriebene Methode wird oft als Netzwerkoptimierung bezeichnet und ist eingehend im Abschnitt 3.1 beschrieben.

A 2 4 Arbeitsprogramm und Budgetvorschläge

Die Liste der generierten Unterhaltsoptionen wird um das so genannte „Nichtstun-Option, den Ersatz und die Umgestaltungsoptionen erweitert. Die Kosten für den Ersatz eines Bauwerkes werden aufgrund der Richtpreise, welche für jede Bauwerksart katalogisiert werden (siehe Abbildung A-1) ermittelt. Typische Bauwerksarten sind z.B. Plattenbrücke, Bogenbrücke, Stützwand, Galerie usw. Diese Richtpreise werden für Brücken in CHF / m² angegeben.

Um das optimale Arbeitsprogramm zu ermitteln, sind folgende Eingaben für jede Erhaltungsoption nötig:

- Bauwerksidentifikation: Pro Bauwerk können mehrere Unterhaltsoptionen generiert werden oder mehrere Bauwerke können zu einer Unterhaltsoption gehören.
- Betreiberkosten: Summe der Kosten der Unterhaltsmassnahmen an Bauwerksteilen
- Benutzernutzen: Diese Angabe ist nur bei den Umgestaltungsmassnahmen erforderlich.

Diese Angaben werden auch für die hinzugefügten Ersatz und „Nichtstun-Option automatisch berechnet und können manuell jederzeit verändert werden. Für kürzere Planungshorizonte können die automatisch generierten Unterhaltsprojekte (auch Ersatzprojekte) anhand von Kostenschätzungen bzw. Kostenvoranschlägen modifiziert werden. Ebenso ist möglich, Unterhaltsmassnahmen direkt zu erfassen.

Das gestellte Optimierungsproblem kann auf unterschiedliche Art gelöst werden. Im KUBA-MS wurde schon die erwähnte inkrementelle Kosten/ Nutzen Methode verwendet. Diese Methode hat sich als schnell und zuverlässig erwiesen.

Die Ergebnisse dieser Optimierung ergänzt das Arbeitsprogramm mit den regulären, d.h. nicht dringlichen Unterhaltsmassnahmen. Die Reihenfolge entspricht dem wirtschaftlichen Nutzen einzelner Erhaltungsoptionen.

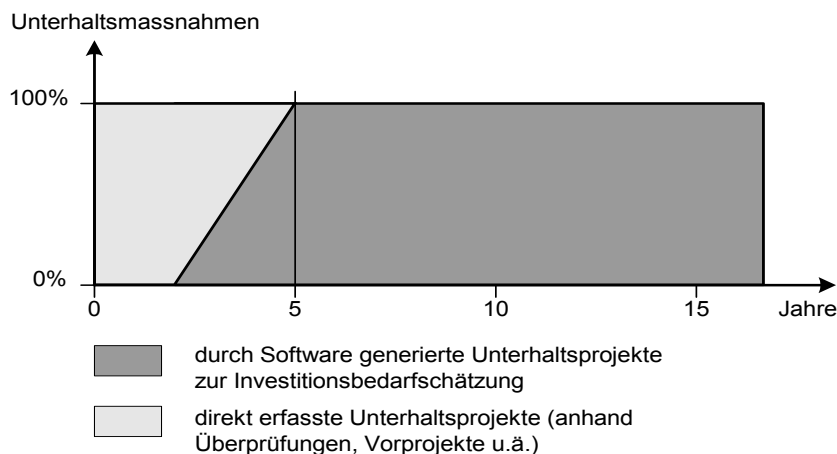


Abbildung A-2: Generierte und direkt erfasste Unterhaltsprojekte

A 2 5 Kataloge

IM KUBA-MS spielen die Kataloge eine sehr wichtige Rolle. Sie strukturieren das Fachwissen, welches für die Unterhaltsplanung nötig ist. Die Kataloge sollen dabei möglichst wenige Einträge enthalten und gleichzeitig eine zuverlässige Unterhaltsplanung ermöglichen.

Die wichtigsten Kataloge für den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Ablauf sind:

- Katalog der Schadenprozesse
- Katalog der Bauwerksteiltypen
- Katalog der Unterhaltsmassnahmen an Bauwerksteiltypen
- Katalog der Einheitskosten

Die Erstellung dieser Kataloge muss auf einer fundierten Untersuchung beruhen. Der Katalog der Bauwerksteiltypen soll z. B. nur jene Bauwerksteile klassifizieren, mit welchen die Kosten der Unterhaltsmassnahmen genügend genau abgeschätzt werden können. Diese kostenbestimmenden Bauwerksteiltypen sind eng verknüpft mit dem Katalog der Unterhaltsmassnahmen an Bauwerksteiltypen und dem Katalog der Einheitskosten. Der Katalog der Schadenprozesse muss sämtliche relevante Schadenprozesse umfassen. Für die Datenerfassung ist dieser Katalog von grösser Wichtigkeit. Das Handbuch für Datenerfassung enthält im Wesentlichen diesen Katalog.

Die Kataloge welche Rechenwerte enthalten, d.h.

- Katalog der Verfallsfunktionen bzw. deren Parameter und
- Katalog der Einheitskosten

werden laufend aktualisiert. Die Verfallsfunktionen werden durch eine statistische Auswertung der erfassten Zustandsdaten berechnet. Streng genommen sollte man nach jeder Zustandserfassung eines Bauwerksteiles die Verfallsfunktionen neu berechnen. In der Tat wird man es von Zeit zu Zeit, typischerweise alle 6 Monate, tun. Wenn die Menge der Zustandsdaten gross ist fällt eine Zustandserfassung bei einer statistischen Auswertung wenig ins Gewicht.

Eine ähnliche Methode wird für die Einheitskosten eingesetzt. Hierfür muss jede ausgeführte Unterhaltsmassnahme erfasst werden, in dem deren Kosten nach den kostenbestimmenden Bauwerksteilen aufgeschlüsselt werden. Die auf das jeweilige kostenbestimmende Bauwerksteil anfallenden Kosten werden daraufhin als Rohdaten für eine statistische Gewinnung der Einheitskosten verwendet. Hierfür müssen auch genaue Verfahrensanweisungen ausgearbeitet werden. Zurzeit liegen sie nicht vor. Im Rahmen der Ermittlung der kostenbestimmenden Bauwerksteilen werden Ansätze für dieses Verfahren konzipiert.

A 3 Optimierung auf Katalogebene (Netzoptimierung)

Mit dieser Optimierung wird je eine optimale Unterhaltsmassnahme für jede beliebige Kombination von Bauwerksteilzustand, Schadenprozess und Bauwerksteiltyp ermittelt. Diese optimale Unterhaltsmassnahme weist die minimalen langfristigen Kosten auf.

A 3 1 Verfalls- und Massnahmenmodell

Der Verfall eines Bauwerksteiltypes ist vom einwirkenden Schadenprozess abhängig und wird mit einer diskreten Markov - Kette modelliert. Die diskreten Zeitpunkte sind dabei eine Inspektionsperiode voneinander entfernt. Die Markov - Kette ist ein stochastischer Prozess bei welchem der zukünftige Zustand ausschliesslich vom gegenwärtigen Zustand abhängig ist. Bezeichnet man den gegenwärtigen Zustand eines Bauwerksteils mit dem Vektor \mathbf{s}^t dann wird der Zustand nach einer Periode wie folgt berechnet:

$$\mathbf{s}^{t+1} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{s}^t \quad (30)$$

Die Elemente des Vektors \mathbf{s}^{t+1} definieren die Zustandsverteilung nach einer Periode. Das erste Element des Vektors \mathbf{s}^{t+1} bezeichnet z. B. die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Bauwerksteil in Zustandklasse 1 befinden wird. Die Matrix \mathbf{D} wird für jeden Schadenprozess katalogisiert. Die Koeffizienten dieser Matrix werden durch die statistische Auswertung des tatsächlichen Verfalls ermittelt. Die Matrix \mathbf{D} wird deshalb auch die Verfallmatrix genannt.

Beispiel A-1: Verfallsmodell

Durch die Inspektion wurde ermittelt, dass sich ein Bauwerksteil in Zustandsklasse 2 befindet. Es wird hier der Einfachheit halber angenommen, dass es nur 3, anstatt 5 Zustandsklasse gibt. Die Verfallsmatrix ist wie folgt:

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.0 \\ 0.0 & 0.2 & 1.0 \end{bmatrix}$$

Der Zustand des Bauwerksteils lässt sich somit wie folgt ermitteln:

$$\mathbf{s}^{t+1} = \mathbf{D} \cdot \mathbf{s}^t = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.0 & 0.0 \\ 0.1 & 0.8 & 0.0 \\ 0.0 & 0.2 & 1.0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 0.0 \\ 1.0 \\ 0.0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0.0 \\ 0.8 \\ 0.2 \end{Bmatrix}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass das Bauwerksteil in Zustandsklasse 2 bleibt ist 0.8 und, dass es in Zustandsklasse 3 verfällt ist 0.2.

Es ist aus dem Beispiel A-1 leicht ersichtlich, dass sich ein Bauwerksteil allmählich mit einer Wahrscheinlichkeit von 1.0 in Zustandsklasse 3 befinden wird. Diesem Verlauf kann man mit den Unterhaltmassnahmen entgegen. Hierfür sind Unterhaltmassnahmen mit ihren Wirksamkeiten im KUBA-MS katalogisiert. Die Wirksamkeit steht hier für den Zustand des Bauwerksteils nach einer ausgeführten Unterhaltmassnahme. Befindet sich ein Bauwerksteil in Zustandsklasse i , dann wird der Zustand dieses Bauwerksteiles nach einer Unterhaltmassnahme wie folgt berechnet:

$$s_{j,k}^{t+1} = a_{ij,k} \cdot s_i^t \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (31)$$

Der Koeffizient $a_{ij,k}$ bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Bauwerksteil, welches gegenwärtig in Zustandsklasse i ist, nach der ausgeführten Unterhaltmassnahmenvariante k in Zustandsklasse j befinden wird.

Beispiel A-2: Wirksamkeit

Durch die Inspektion wurde ermittelt, dass sich ein Bauwerksteil in Zustandsklasse 2 befindet. In dieser Situation setzt man voraus, dass zwei Unterhaltmassnahmenvarianten ausgeführt werden können. Die Wirksamkeiten dieser zwei Unterhaltmassnahmenvarianten wird mit folgender Wirksamkeitsmatrix zusammengefasst:

$$\mathbf{A}_2 = \begin{array}{cc} \text{UM1} & \text{UM2} \\ \begin{bmatrix} 0.9 & 0.8 \\ 0.1 & 0.2 \\ 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} & \begin{array}{l} \text{ZK1} \\ \text{ZK2} \\ \text{ZK3} \end{array} \end{array}$$

Der Zustand des Bauwerksteils nach diesen Unterhaltmassnahmenvarianten lässt sich somit wie folgt ermitteln:

$$s_{j,k}^{t+1} = a_{2j,k} \cdot s_2^t = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.8 \\ 0.1 & 0.2 \\ 0.0 & 0.0 \end{bmatrix} \cdot 1.0 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.8 \\ 0.1 & 0.2 \\ 0.0 & 0.0 \end{bmatrix}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Bauwerksteil nach der Unterhaltmassnahmenvariante 1 in Zustandsklasse befinden wird ist 0.9. Es besteht allerdings eine Wahrscheinlichkeit von 0.1, dass es trotz Unterhaltmassnahmenvarianten 1 in Zustandsklasse 2 bleibt.

In jeder Zustandklasse hat man nun mehrere Entscheidungsoptionen: Entweder nichts tun (ausser in der niedrigsten Zustandklasse) oder eine der k Unterhaltmassnahmen auszuführen. Wählt man je eine Entscheidungsoption pro Zustandklasse, so entsteht eine neue Übergangsmatrix, welche jeweils aus Kolonnen der Verfallsmatrix und den Wirksamkeitsmatrizen zusammengesetzt wird. Diese zusammengesetzte Übergangsmatrix definiert die Unterhaltspolitik für eine bestimmte Kombination von

Schadenprozess und Bauwerksteiltyp. Bezeichnet man diese Matrix mit \mathbf{P} so gilt die folgende Beziehung

$$\mathbf{s}^{t+1} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{s}^t \quad (32)$$

Die Anzahl der Unterhaltspolitiken lässt sich wie folgt bestimmen:

$$N_{up} = K^1 \cdot K^2 \cdot \dots \cdot K^n \quad (33)$$

Die n_{up} ist die Anzahl Unterhaltspolitiken und K^i ist die Anzahl Optionen in i -ten Zustandsklasse. Für fünf Zustandsklasse und jeweils 3 Optionen pro Zustandsklasse beträgt die Anzahl Unterhaltspolitiken $3^5 = 243(!)$.

Beispiel A-3: Unterhaltspolitik

Die Unterhaltspolitik wird wie folgt definiert: In Zustandsklasse 1 werden keine Unterhaltmassnahmen, in der Zustandsklasse 2 wird die Unterhaltmassnahmenvariante 2 und in der Zustandsklasse 3 wird das Bauwerksteil ersetzt. Die Übergangsmatrix lässt sich nun wie folgt aufstellen:

$$\mathbf{P} = \begin{array}{ccc|l} & \text{NT} & \text{UM2} & \text{Ersatz} \\ \hline & 0.9 & 0.8 & 1.0 \\ \hline & 0.1 & 0.2 & 0 \\ \hline & 0.0 & 0.0 & 0 \\ \hline & \text{ZK1} & \text{ZK2} & \text{ZK3} \end{array}$$

Die Anzahl solcher Unterhaltspolitiken hängt von der Anzahl möglicher Unterhaltmassnahmenvarianten für jede Zustandsklasse. Als Beispiel werden folgende Annahmen getroffen:

- Das Nichtstun ist die einzige Option in Zustandsklasse 1.
- Das Nichtstun sowie zwei Unterhaltmassnahmenvarianten sind die Optionen in Zustandsklasse 2.
- Der Ersatz ist die einzige Option in Zustandsklasse 3.

Die Anzahl möglicher Unterhaltspolitiken ist 3, bestimmt durch die Anzahl der Optionen in Zustandsklasse 2.

A 3 2 Mathematische Formulierung und Lösung

Eine bestimmte Unterhaltspolitik, d. h. eine Unterhaltsoption pro Zustandsklasse lässt sich mit folgender Entscheidungsmatrix darstellen:

$$\mathbf{Y} = \begin{array}{ccc|l} & \text{Opt 1} & \text{Opt 2} & \dots & \text{Opt K} \\ \hline & y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1K} \\ \hline & y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2k} \\ \hline & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline & y_{M1} & y_{M2} & \dots & y_{MK} \\ \hline & \text{ZK 1} & \text{ZK 2} & & \text{ZK M} \end{array} \quad (34)$$

Wählt man die Option 1 (z. B. Nichtstun) für die Zustandsklasse 1 so wird die Variable y_{11} den Wert 1 annehmen und die übrigen Werte in dieser Zeile werden zu Nullen. Die Variablen sind somit binär und ihre Zeilensumme muss 1 betragen:

$$\sum_k y_{ik} = 1 \quad (35)$$

Beispiel A-4: Entscheidungsmatrix

Die Unterhaltspolitik definiert im vorherigen Beispiel sieht die Entscheidungsmatrix wie folgt aus:

$$\mathbf{Y} = \begin{array}{ccc|l} & \text{Opt 1} & \text{Opt 2} & \text{Opt 3} \\ \hline & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ \hline & 0.0 & 0.0 & 1.0 \\ \hline & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ \hline & \text{ZK1} & \text{ZK2} & \text{ZK3} \end{array}$$

Obwohl, gemäss der Unterhaltspolitik nur eine Option in Zustandsklassen möglich ist, hat die Entscheidungsmatrix 3 Kolonnen, da drei Optionen in Zustandsklasse 2 zur Verfügung stehen. In diesen Fällen werden binäre Variablen zu diesen nicht vorhandenen Optionen auf Null gesetzt.

Die Übergangsmatrix, welche alle Optionen berücksichtigt, kann nun wie folgt ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \begin{bmatrix} p_{111}y_{11} + p_{112}y_{12} + \dots + p_{11K}y_{1K} & \dots & p_{1M1}y_{M1} + p_{1M2}y_{M2} + \dots + p_{1MK}y_{MK} \\ p_{211}y_{11} + p_{212}y_{12} + \dots + p_{21K}y_{1K} & \dots & p_{2M1}y_{M1} + p_{2M2}y_{M2} + \dots + p_{2MK}y_{MK} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{M11}y_{11} + p_{M12}y_{12} + \dots + p_{M1K}y_{1K} & \dots & p_{MM1}y_{M1} + p_{MM2}y_{M2} + \dots + p_{MMK}y_{MK} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^K p_{11k}y_{1k} & \dots & \sum_{k=1}^K p_{1Mk}y_{Mk} \\ \sum_{k=1}^K p_{21k}y_{1k} & \dots & \sum_{k=1}^K p_{2Mk}y_{Mk} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{k=1}^K p_{M1k}y_{1k} & \dots & \sum_{k=1}^K p_{MMk}y_{Mk} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Die Unterhaltmassnahmen verursachen Kosten und sie werden im KUBA-MS als Einheitskosten katalogisiert. Für eine Unterhaltspolitik werden diese Einheitskosten in einem Vektor \mathbf{c} zusammengefasst. Die Unterhaltskosten C^t für eine Periode können somit wie folgt berechnet werden:

$$C^t = \mathbf{s}^t \cdot \mathbf{c} \quad (36)$$

Diese Beziehung gilt für eine bestimmte Unterhaltspolitik. Diese Kosten beziehen sich auf eine Messeinheit des Bauwerksteils.

Beispiel A-5: Berechnung von Kosten

Für die Unterhaltspolitik im Beispiel A-4 sind folgende Einheitskosten im KUBA-MS katalogisiert:

$$\mathbf{c} = \begin{cases} 0.0 & \text{ZK1 / Opt 1 (in CHF)} \\ 300 & \text{ZK2 / Opt 3 (in CHF)} \\ 1000 & \text{ZK3 / Opt 1 (in CHF)} \end{cases}$$

Die Unterhaltskosten für eine Periode betragen wie folgt (das Bauwerksteil befindet sich in Zustandsklasse 2):

$$C^t = \{0 \quad 1 \quad 0\} \cdot \begin{Bmatrix} 0 \\ 300 \\ 1000 \end{Bmatrix} = 300 \text{ Fr.}$$

Definiert man die Unterhaltspolitik mit Hilfe von binären Variablen y_{ik} , so stellt sich der Kostenvektor \mathbf{c} wie folgt dar:

$$\tilde{\mathbf{c}} = \begin{Bmatrix} \sum_{k=1}^K c_{1k}y_{1k} \\ \sum_{k=1}^K c_{2k}y_{2k} \\ \sum_{k=1}^K c_{3k}y_{3k} \end{Bmatrix}$$

Beispiel A-6: Aufstellung des Kostenvektors

Die Kosten für drei Optionen in Zustandsklasse 2, wie dargestellt im Beispiel A-4, sind wie folgt:

$$\tilde{\mathbf{c}} = \begin{Bmatrix} 0.0 \\ y_{21} \cdot 0 + y_{22} \cdot 500 + y_{23} \cdot 300 \\ 1000 \end{Bmatrix}$$

Die langfristigen, diskontierten Unterhaltskosten der mit Matrix $\tilde{\mathbf{P}}$ definierten Unterhaltspolitik können wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} C &= \sum_{t=0}^{\infty} C^t = \mathbf{s}^0 \cdot \tilde{\mathbf{c}} + \alpha \tilde{\mathbf{P}} \cdot \mathbf{s}^0 \cdot \tilde{\mathbf{c}} + \alpha^2 \tilde{\mathbf{P}}^{(2)} \cdot \mathbf{s}^0 \cdot \tilde{\mathbf{c}} + \dots + \alpha^\infty \tilde{\mathbf{P}}^{(\infty)} \cdot \mathbf{s}^0 \cdot \tilde{\mathbf{c}} = \\ &= \left(\sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t \tilde{\mathbf{P}}^{(t)} \right) \cdot \mathbf{s}^0 \cdot \tilde{\mathbf{c}} \quad 0 > \alpha < 1.0 \end{aligned} \quad (37)$$

In der Gleichung (37) α ist der Diskontfaktor und \mathbf{s}^0 ist der gegenwärtige Zustandsvektor. Das Ziel der Optimierung auf Katalogebene ist es jene Unterhaltspolitik zu finden, welche die langfristigen, diskontierten Kosten minimiert. Es lässt sich zeigen, dass die Elemente des folgenden Vektors endliche Werte annehmen.

$$\tilde{\mathbf{x}} = \left(\sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t \tilde{\mathbf{P}}^{(t)} \right) \cdot \mathbf{s}^0 \quad 0 > \alpha < 1.0 \quad (38)$$

Ein Element \tilde{x}_i dieses Vektors ist die diskontierte erwartete Anzahl Perioden, in welchen sich das Bauwerkteil in Zustandsklasse i befinden wird. Die endliche Summe in Gleichung (37) kann man wie folgt umschreiben:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}} &= \left(\sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t \tilde{\mathbf{P}}^{(t)} \right) \cdot \mathbf{s}^0 = \mathbf{s}^0 + \alpha \tilde{\mathbf{P}} \left(\sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t \tilde{\mathbf{P}}^{(t)} \right) \cdot \mathbf{s}^0 \Rightarrow \text{und weiter} \\ &\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{s}^0 + \alpha \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{x}} \end{aligned} \quad (39)$$

Die Gleichung (39) gilt für alle Unterhaltspolitiken. Skalar lässt sich die Gleichung (39) wie folgt umschreiben:

$$\tilde{x}_i = s_i^0 + \alpha \sum_{j=1}^M \sum_k p_{ijk} y_{jk} \tilde{x}_j \quad i = 1 \dots M \quad (40)$$

Die langfristigen diskontierten Kosten kann man auch skalar wie folgt ausdrücken:

$$C = \sum_{i=1}^M \tilde{x}_i \tilde{c}_i = \sum_{i=1}^M \tilde{x}_i \sum_k y_{ik} c_{ik} = \sum_{i=1}^M \sum_k c_{ik} y_{ik} \tilde{x}_i \quad (41)$$

Das Produkt $y_{ik} \tilde{x}_i$ wird mit einer neuen Variable x_{ik} ersetzt. Sie kann als der Erwartungswert der Anzahl Perioden, in welcher sich das Bauwerkteil in Zustandsklasse i befinden und Option k ausgeführt wird, sein. Die langfristigen diskontierten Kosten sind nun:

$$C = \sum_{i=1}^M \sum_k c_{ik} x_{ik} \quad (42)$$

Schliesslich da

$$\tilde{x}_i = \tilde{x}_i \sum_k y_{ik} = \sum_k \tilde{x}_i y_{ik} = \sum_k x_{ik} \quad i = 1 \dots M$$

kann man die Gleichung (40) wie folgt umschreiben:

$$\sum_k x_{ik} = s_i^0 + \alpha \sum_{j=1}^M \sum_k p_{ijk} x_{jk} \quad i = 1 \dots M \quad (43)$$

Das Ziel der Optimierung ist es die langfristigen diskontierten Unterhaltskosten zu minimieren, d.h. die Zielfunktion ist definiert mit der Gleichung (42). Das lineare Programm kann nun wie folgt formuliert werden:

$$C = \sum_{i=1}^M \sum_k c_{ik} x_{ik} = \min!$$

Randbedingungen:

$$\sum_k x_{ik} - \alpha \sum_{j=1}^M \sum_k p_{ijk} x_{jk} = s_i^0 \quad i = 1 \dots M \quad (44)$$

$$x_{i,k} \geq 0 \quad i = 1 \dots M, k = 1 \dots K$$

Beispiel A-7: Mathematisches Programm zur Ermittlung der optimalen Unterhaltspolitik

Das lineare Programm zur Ermittlung der optimalen Unterhaltspolitik unter jenen Unterhaltspolitiken, welche im Beispiel A-4 aufgeführt wurden, lässt sich wie folgt formulieren:

$$C = 0 \cdot x_1 + 0 \cdot x_{21} + 500 \cdot x_{22} + 300 \cdot x_{23} + 1000 \cdot x_3 = \min!$$

Randbedingungen:

$$x_1 - \alpha(0.9 \cdot x_1 + 0.0 \cdot x_{21} + 0.9x_{22} + 0.8x_{23} + 1.0x_3) = 0$$

$$x_{21} + x_{22} + x_{23} - \alpha(0.1 \cdot x_1 + 0.8 \cdot x_{21} + 0.1x_{22} + 0.2x_{23} + 0.0x_3) = 1$$

$$x_3 - \alpha(0.0 \cdot x_1 + 0.2 \cdot x_{21} + 0.0x_{22} + 0.0x_{23} + 0.0x_3) = 0$$

$$x_{2,k} \geq 0 \quad k = 1 \dots K \quad x_i \geq 0 \quad i = 1, 3$$

Die minimalen langfristig diskontierten Kosten von CHF 961.3 ($\alpha = 0.95$) werden erreicht für Lösung:

$$x_1 = 16.976$$

$$x_{21} = 0.0 \quad x_{22} = 0.0 \quad x_{23} = 3.204$$

$$x_3 = 0.0$$

Die Entscheidungsvariablen können nun wie folgt berechnet werden:

$$y_1 = 1 \quad \text{Die einzige Option}$$

$$y_{21} = \frac{x_{21}}{x_{21} + x_{22} + x_{23}} = 0 \quad y_{22} = \frac{x_{22}}{x_{21} + x_{22} + x_{23}} = 0 \quad y_{23} = \frac{x_{23}}{x_{21} + x_{22} + x_{23}} = 1$$

$$y_3 = 1 \quad \text{Die einzige Option}$$

In Zustandsklassen 1 und 3 wird die einzige Option ausgeführt und in Zustandsklasse 2 die dritte Option, d.h. die Unterhaltsmassnahmenvariante 2.

Das lineare Programm (44) wird in der Regel nicht direkt gelöst; wegen der einfachen Anwendung, dafür wird die duale Formulierung verwendet. Das duale Programm kann man wie folgt herleiten:

$$C = \sum_{i=1}^M f_i s_i^0 = \max!$$

Randbedingungen:

$$f_i - \alpha \sum_{j=1}^M p_{ijk} f_j \leq c_{ik} \quad i = 1 \dots M, k = 1 \dots K \quad (45)$$

Die duale Variable f_i lässt sich mit Hilfe der Zielfunktion interpretieren. Die Zielfunktionen ergeben in beiden Programmen die optimalen langfristig diskontierten Kosten. Da s_i^0 für den gegenwärtigen Zustand steht, bezeichnet die duale Variable f_i langfristig diskontierte Kosten einer Messeinheit, welche sich zurzeit in Zustandsklasse i befindet. Die duale Formulierung hat $M \cdot K$ Ungleichungen und beim Optimum M davon, werden sie zu Gleichungen (bindende Randbedingungen) und zwar je eine pro Zustandsklasse. Diese bindenden Randbedingungen definieren die optimale Unterhaltspolitik.

Beispiel A-8: Duale Formulierung der Katalogoptimierung

Das duale lineare Programm lässt sich wie folgt formulieren:

$$C = 0 \cdot f_1 + 1 \cdot f_2 + 0 \cdot f_3 = \max!$$

Randbedingungen:

$$f_1 - \alpha(0.9 \cdot f_1 + 0.1 \cdot f_2) \leq 0 \quad \text{ZK1 / Option 1}$$

$$f_2 - \alpha(0.8 \cdot f_2 + 0.2 \cdot f_3) \leq 0 \quad \text{ZK2 / Option 1}$$

$$f_2 - \alpha(0.9 \cdot f_1 + 0.1 \cdot f_2) \leq 500 \quad \text{ZK2 / Option 2}$$

$$f_2 - \alpha(0.8 \cdot f_1 + 0.2 \cdot f_2) \leq 300 \quad \text{ZK2 / Option 3}$$

$$f_3 - \alpha(1.0 \cdot f_1) \leq 1000 \quad \text{ZK3 / Option 1}$$

Die minimalen langfristig diskontierten Kosten von CHF 961.3 ($\alpha = 0.95$) werden erreicht für die folgende Lösung:

$$f_1 = 629.83 \quad f_2 = 961.33 \quad f_3 = 1598.34$$

Die bindenden Randbedingungen sind ZK1/Option 1, ZK2/Option 3 und ZK3/Option 3, welche gleichzeitig die optimale Unterhaltspolitik definieren. Die dualen Variablen, welche den nicht bindenden Randbedingungen entsprechen, müssen daher null sein. Dies ist auch der Fall.

Das lineare Programm (45) kann man sehr effizient mit dem Simplex Algorithmus lösen. Dieser Algorithmus wird im KUBA-MS verwendet.

A 3 3 Lösungsumsetzung und Finanzbedarf

Die beschriebene Optimierung hat an sich mit dem Netzwerk, d.h. mit einer Menge von Bauwerken wenig zu tun. Es handelt sich eher um eine Reduktion der Katalogeinträge durch eine Optimierung auf der Katalogebene.

Der Name „Netzwerkoptimierung“ rührt von einem zusätzlichen, sehr nützlichen Ergebnis dieser Optimierung her. Der Zustand aller Bauwerksteile im Strassennetz kann mit Hilfe von Markov - Ketten für jeden beliebigen Zeitpunkt vorhergesagt werden. Da sich der Schadenprozess, Bauart und Bauwerksteiltyp dieses Bauwerksteiles mit der Zeit nicht ändern, sind die optimalen Unterhaltsmassnahmen und die zugehörigen Kosten nur vom Zustand des Bauwerksteils abhängig. Man kann somit für jeden Bauwerksteil die Unterhaltskosten als Funktion der Zeit darstellen. Zählt man diese Kosten für alle Bauwerksteile zusammen, so erhält man den Finanzbedarf als Funktion der Zeit.

A 4 Optimierung auf Bauwerksebene

A 4 1 Mathematische Formulierung

Das Ziel der Optimierung auf Bauwerksebene ist es optimale Unterhaltsmassnahmen an Bauwerken (d.h. Unterhaltsoptionen) zu bestimmen. Zur Wahl stehen pro Bauwerk mindestens drei Unterhaltsoptionen: Nichtstun, Unterhaltsoption aufgrund der Ergebnisse der Katalogoptimierung und Ersatzprojekt. Bei der Optimierung werden folgende Angaben für jede Option verwendet:

- Kosten für die Planung und Realisierung von Unterhaltsoptionen
- Folgekosten, d. h. diskontierte langfristige Kosten, welche nach der Ausführung der betreffenden Option

Für die Unterhaltsoptionen „Nichtstun“ und „Unterhaltsoption aufgrund der Ergebnisse der Katalogoptimierung“ können diese Angaben durch eine einfache Summierung der entsprechenden Kosten von Unterhaltsmassnahmen an Bauwerksteilen berechnet werden. Beim Ersatz kann man die Folgekosten aufgrund einer Abschätzung der Restlebensdauer berechnen. Neben diesen drei Optionen können weitere Optionen wie Umgestaltungsmassnahmen und weitere ad hoc definierte Unterhaltsoptionen hinzukommen. Für diese zusätzlichen Optionen müssen allerdings die Kosten und die Folgekosten durch den Kunstbautenmanager bereitgestellt werden. Für die Umgestaltungsmassnahmen ist dazu noch die Angabe zum langfristigen Nutzen dieser Massnahme erforderlich.

Die Problemstellung entspricht im Wesentlichen jener Formulierung, welche im Abschnitt A 3 diskutiert wurde. Das entsprechende mathematische Programm kann wie folgt dargestellt werden:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \bar{N}_{ij} = \max!$$

Randbedingungen: (46)

$$\sum_{j=1}^m y_{ij} = 1 \quad i = 1 \dots n$$

Mit N_{ij} wird hier der Nettonutzen einer Option bezeichnet und wird wie folgt berechnet:

$$N_{ij} = C_{i\max} - C_{ij}^i + B_{ij} \quad (47)$$

Dabei sind C_{ij}^i die Optionskosten, C_{ij}^l die Optionsfolgekosten, $C_{i\max}$ die Kosten + Nachfolgekosten der teuersten Option für das Bauwerk i und B_{ij} der langfristige Nutzen der allfälligen Umgestaltungsmassnahmen. Diese Formulierung erlaubt jedes Bauwerk separat zu behandeln, was zu einer trivialen Lösung führt. Es gilt lediglich für jedes Bauwerk jene Option zu finden, welche den Nettonutzen maximiert.

Das Problem wird allerdings viel schwieriger, falls bei der Optimierung eine Budgeteinschränkung R auferlegt wird. Dies führt zu folgender zusätzlichen Randbedingung:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m y_{ij} \cdot C_{ij} \leq R \quad (48)$$

In der Praxis wird dieses mathematische Programm mit Hilfe des inkrementellen Kosten/ Nutzen Verfahrens effizient gelöst. Streng genommen lässt sich allerdings mit diesem Verfahren nur eine Näherung der genauen Lösung bestimmen.