



Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen

Procédure de création de tronçons homogènes de l'infrastructure routière pour la gestion de l'entretien des chaussées

Sectioning technique of Road Data for Pavement Management

Infrastructure Management Consultant (IMC GmbH)
Dr. R. Hajdin, dipl. Bauing.
Dipl.-Inform. (Univ.) M. Botzen

ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Prof. em. H.P. Lindenmann, ETH Zürich
Dr. F. Schiffmann, IMC GmbH, vormals IVT

Forschungsprojekt VSS 2009/705 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen

Procédure de création de tronçons homogènes de l'infrastructure routière pour la gestion de l'entretien des chaussées

Sectioning technique of Road Data for Pavement Management

Infrastructure Management Consultant (IMC GmbH)
Dr. R. Hajdin, dipl. Bauing.
Dipl.-Inform. (Univ.) M. Botzen

ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Prof. em. H.P. Lindenmann, ETH Zürich
Dr. F. Schiffmann, IMC GmbH, vormals IVT

Forschungsprojekt VSS 2009/705 auf Antrag des Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Prof. em. H.P. Lindenmann,
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich

Mitglieder

Dr. Rade Hajdin, Infrastructure Management Consultant (IMC GmbH)
Matthias Botzen, Infrastructure Management Consultant (IMC GmbH)
Dr. Frank Schiffmann, Infrastructure Management Consultant (IMC GmbH), vormals IVT

Federführende Fachkommission

Fachkommission 7: Erhaltungsmanagement

Begleitkommission

Präsident

Hans Bär

Mitglieder

Andreas Flück
Dr. Ali Rafi
Dr. Margarita Rodriguez
Christoph Rosenthaler
Luzia Seiler
Fridolin Vogel
Roland Wyss

Antragsteller

Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	9
Summary	11
1 Einleitung	13
1.1 Ausgangslage	13
1.2 Forschungsziel	14
1.3 Organisation und Partner	14
1.4 Literaturrecherche	15
1.5 Diskussion	17
2 Vorgehen und Methodik	19
2.1 Vorgehen	19
2.1.1 Erkenntnisgewinn	19
2.1.2 Modellgestaltung	19
2.1.3 Realisierbarkeitstest	20
2.1.4 Ergebniszusammenfassung	20
2.2 Methodik	20
2.3 Grundlagen der Zustandserfassung und –bewertung von Fahrbahnen	21
2.3.1 Einzelner Zustandsindex	21
2.3.2 Zusammengesetzter Zustandsindex	21
2.3.3 Mehrere Zustandswerte bzw. –indizes	22
2.3.4 Zustandsentwicklung	22
2.3.5 Fazit für den Umfang von Zustandsdaten beim Realisierbarkeitstest	22
2.4 Grundlagen der Erhaltungsplanung von Fahrbahnen	23
2.4.1 Typisierte Erhaltungsmaßnahmen	23
2.4.2 Kostenstruktur	24
2.5 Grundlagen der Optimierung	26
2.5.1 Optimierungsprobleme	26
2.5.2 Ganzzahlige Lineare Programmierung	28
2.5.3 Heuristische Verfahren	29
2.5.4 Angewandte Methode	29
3 Ergebnisse	30
3.1 Herleitung eines Verfahrens zur Bildung von homogenen Strecken bei Fahrbahnen	30
3.1.1 Zielsetzung	30
3.1.2 Problemstellung	30
3.1.3 Lösungsansatz	30
3.2 Systemdefinition	31
3.2.1 Strecken	31
3.2.2 Massnahmen	32
3.2.3 Schlechter Zustand	33
3.2.4 Massnahmenzuordnung	34
3.2.5 Folgekosten	34
3.2.6 Netzgesamtkosten	35
3.2.7 Weitere Randbedingungen	35
3.2.8 Ablauf	36
3.3 Mathematische Formulierung (Algorithmus)	37
3.3.1 Definitionen	37
3.3.2 Vorbereitungen	38
3.3.3 Für jede Massnahme	38
3.3.4 Kleine Lücke	47

4	Anwendung des Algorithmus an Fallbeispielen.....	49
4.1	Auswahl der Fallbeispiele	49
4.1.1	Geographische Lage und verkehrstechnische Bedeutung	49
4.1.2	Zustandsdaten und Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche.....	50
4.1.3	Erhaltungsmassnahmen	51
4.1.4	Kostenkenngrössen	52
4.2	Ergebnisse der Aggregationen	54
4.2.1	Bildung von Planungseinheiten für ein Jahr	54
4.2.2	Diskussion der Ergebnisse	64
4.2.3	Bildung von Planungseinheiten für mehrere Jahr.....	64
5	Erkenntnisse	66
5.1	Vorbemerkungen	66
5.2	Erkenntnisse aus den Untersuchungen und Entwicklungen	66
5.2.1	Algorithmus zur Bildung von homogenen Strecken.....	66
5.2.2	Anwendung des Algorithmus	67
5.2.3	Beispielberechnungen	68
5.2.4	Ausdehnung des Homogenisierungsprozesses	68
6	Folgerungen und Empfehlungen	69
	Abkürzungen	72
	Literaturverzeichnis.....	74
	Projektabschluss	77
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	80

Zusammenfassung

Die langfristige Erhaltungsplanung im Bereich des Teilsystems Fahrbahnen beruht auf der Grundlage der netzweiten Zustandserhebung und –bewertung im zu unterhaltenden Strassennetz. Bei diesem teilsystembezogenen langfristigen Planungsprozess dienen unterschiedliche Zustandseigenschaften der Fahrbahnoberfläche als Kenngrösse für eine Planung von Erhaltungsmaßnahmen. Diese Zustandsinformationen liegen jeweils für Bewertungseinheiten vor, deren Grösse für eine Zustandserhebung und –bewertung zweckmässig erscheint. Für eine langfristige Planung von Erhaltungsmaßnahmen sind die Längen der vorhandenen Bewertungseinheiten der Fahrbahnoberfläche in der Regel zu klein und damit nicht praktikabel. Deshalb werden aus den Bewertungseinheiten Planungseinheiten gebildet, sogenannte homogene Strecken. Die Anwendung bekannter Verfahren zur Bildung von Planungseinheiten für die langfristige Erhaltungsplanung von Fahrbahnen zeigt Schwächen in Bezug auf die Streckenlänge. Die in der Praxis gewählten Längen von auszuführenden bzw. ausgeführten Erhaltungsmaßnahmen am Strassenoberbau weichen zum Teil erheblich von den Ergebnissen aus der Anwendung der bisherigen Verfahren ab.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung eines Verfahrens, das zu einer praxisorientierten, wirtschaftlich optimalen Bildung von Planungseinheiten, sogenannte homogene Strecken, bei Fahrbahnen unter Berücksichtigung von Zustand und daraus folgenden technisch sinnvollen Erhaltungsmaßnahmen führt.

Im vorliegenden Forschungsprojekt erfolgte die Entwicklung eines Algorithmus für die Aggregation von Bewertungseinheiten zu Planungseinheiten im Teilsystem Fahrbahnen. Bisherige bekannte Verfahren betrachten fast ausschliesslich die Zustandsdaten der Bewertungseinheiten. Kein bekanntes Verfahren berücksichtigt Randbedingungen, welche durch unterschiedliche Erhaltungsmaßnahmen vorgegeben werden können. Zur Verbesserung der erkannten Schwäche der bisherigen Verfahren in Bezug auf die Länge der gebildeten Planungseinheiten wurden deshalb die Erhaltungsmaßnahmen und deren Wirtschaftlichkeit in den Mittelpunkt gestellt.

Der im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Algorithmus verwendet Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche, Entwicklung der Zustände mit Hilfe von Prognosemodellen, typisierte Erhaltungsmaßnahmen und ein vollständiges Kostenmodell und erlaubt zumindest theoretisch die Herleitung von optimalen Planungseinheiten für Erhaltungsmaßnahmen. Er basiert auf einem heuristischen Verfahren, das sofern eine zulässige Lösung vorliegt, eine solche auch findet und in begrenztem Umfang optimiert. Genauere Aussagen über die Qualität der gefundenen Lösung in Bezug auf das Optimum lassen sich leider nicht treffen. Im Rahmen eines Realisierbarkeitstests erfolgte die Anwendung des Algorithmus an zwei Fallbeispielen. Dafür wurden im Vorfeld einerseits Zustandsdaten in Form eines fiktiven Indexes IX künstlich generiert und andererseits beispielhaft Typen von Erhaltungsmaßnahmen mit relevanten Randbedingungen und Auswirkungen für diesen Index IX definiert. Anhand dieser Daten konnte mit dem Algorithmus die Aggregation durchgeführt werden. Diese Zusammenfassung der Bewertungseinheiten zu Planungseinheiten bei Minimierung der Gesamtkosten war erfolgreich und führte zu sinnvollen Ergebnissen.

Das entwickelte und an Beispielen getestete Verfahren zur Bildung von Planungseinheiten bzw. homogenen Strecken für die Erhaltungsplanung von Fahrbahnen erlaubt in der vorliegenden Fassung keine Verwendung in der Praxis, da eine allgemein anerkannte Kombination von Indizes zur Festlegung von Erhaltungsmaßnahmen noch nicht vorliegt. Der Algorithmus ist an sich praxistauglich und kann an jede noch festzulegende Kombination von Zustandsmerkmalen angepasst werden. Dabei sollten definierte Randbedingungen von gewählten Typen von Erhaltungsmaßnahmen durch ausreichendes Datenmaterial plausibilisiert werden.

Résumé

La planification sur le long terme de l'entretien dans le domaine du système partiel des chaussées repose sur le relevé et l'évaluation de l'état de l'ensemble du réseau dans le réseau routier à entretenir. Dans le cadre de ce processus de planification à long terme relatif au système partiel, diverses caractéristiques de l'état de la surface de roulement servent de valeurs de référence pour planifier des mesures d'entretien. Ces informations sur l'état existent pour des unités d'évaluation dont les dimensions sont considérées comme appropriées pour effectuer un relevé et une évaluation de l'état. Pour planifier des mesures d'entretien sur le long terme, les longueurs des unités d'évaluation existantes de la surface de roulement sont généralement trop petites et ne peuvent donc pas être utilisées dans la pratique. Ainsi, à partir de ces unités d'évaluation, des unités de planification – appelées sections homogènes – sont créées. L'utilisation de procédures connues afin de former des unités de planification pour planifier sur le long terme l'entretien de chaussées montre des faiblesses quant aux longueurs des sections. Les longueurs, qui ont été choisies dans la pratique, des mesures d'entretien sur la superstructure des routes à mettre œuvre ou déjà appliquées diffèrent parfois considérablement des résultats issus des procédures utilisées jusqu'à présent.

L'objectif du projet de recherche était d'élaborer, étant axé sur la pratique et avec la meilleure rentabilité, une procédure afin de créer des unités de planification, dites sections homogènes, pour les chaussées en tenant compte de leur état. Le but étant, dans un second temps, d'obtenir ainsi des mesures d'entretien pertinentes techniquement.

Le présent projet de recherche a permis de développer un algorithme pour l'agrégation d'unités d'évaluation en unités de planification dans le système partiel des chaussées. Les procédures connues auparavant considéraient presque uniquement les données relatives à l'état des unités d'évaluation. Aucune procédure connue ne prend en compte des contraintes connues pouvant être issues de mesures d'entretien diverses. Afin de pallier aux faiblesses reconnues des procédures appliquées jusqu'à présent quant aux longueurs des unités de planification formées, le projet s'est concentré sur les mesures d'entretien et leur rentabilité.

L'algorithme développé dans le cadre de ce travail de recherche utilise des données relatives à l'état de la surface de roulement, l'évolution des états à l'aide de modèles de prévisions, des mesures d'entretien standardisées et un modèle de coûts complet. Il permet, du moins en théorie, d'en déduire des unités de planification optimales pour les mesures d'entretien. L'algorithme se base sur une procédure heuristique, qui – pour autant qu'elle existe – trouve une solution admissible et l'améliore de manière limitée. Des déclarations plus précises sur la qualité optimale de la solution trouvée ne peuvent malheureusement pas être établies. Dans le cadre d'un test de faisabilité, l'algorithme a été appliqué sur deux exemples de cas. Pour ce faire, d'une part, des données liées à l'état ont au préalable été générées artificiellement sous la forme d'un indice IX fictif. D'autre part et à titre d'exemple, des types de mesures d'entretien avec des contraintes importantes et les répercussions pour cet indice IX ont été définis. Ces données ont permis d'appliquer l'agrégation avec l'algorithme. Cette agrégation des unités d'évaluation dans des unités de planification, tout en réduisant les coûts globaux, a été une réussite et a fourni des résultats pertinents.

La procédure développée et testée sur des exemples afin de créer des unités de planification, à savoir des sections homogènes, pour la planification d'entretien de chaussées ne peut pas être mise en pratique dans sa version actuelle. En effet, une combinaison largement reconnue d'indices pour définir des mesures de l'entretien n'existe par encore. L'algorithme est cependant applicable dans la pratique et peut être adapté à chaque combinaison de caractéristiques d'état encore à déterminer. Dans ce contexte, des contraintes définies de types de mesures d'entretien sélectionnés devraient être rendues plausibles grâce à une quantité de données suffisante.

Summary

Long-term pavement management is based on a network wide condition survey and assessment of the relevant road network. Various pavement surface characteristics are the basis for planning future road maintenance measures. This condition data is available for assessment units, which have a practicable length for measuring the pavement surface condition performance. This unit length is mostly not applicable or too short for planning the future road maintenance measures. Thus, the assessment units need to be aggregated to planning units, so-called homogeneous sections. The weakness of existing methods is that their unit length differs substantially from existing road maintenance measures length in practice.

Therefore, the objective of this research was the development of a method to generate road maintenance planning units, so-called homogeneous sections, which are based on both pavement condition data and technical maintenance measures. The resulting homogeneous sections are practice-oriented and optimal for pavement management.

The present study develops an algorithm to aggregate condition assessment units into planning units for pavement management. The previously known procedures considered almost solely condition data of assessment units. There is no consideration of parameter and constraints from road maintenance measures yet. To improve this weakness regarding the lengths of planning units, the project focused on road maintenance measures and their economic viability.

The algorithm uses pavement condition data, a model of pavement condition prediction, types of maintenance measures and a longtime total cost model. It allows at least theoretically to generate optimal planning units for maintenance measures in the pavement management process. The algorithm is based on a heuristic method, which will find for a feasible optimization problem a solution and will improve this in a limited way. Unfortunately, a more precise statement about the quality of the optimal solution cannot be made. The algorithm was applied in two case studies. First, data of dummy condition index IX has been generated. In a second step, types of maintenance measures with constraints and effects on this index IX were defined. These data were used to apply the algorithm. The aggregation of condition assessment units into planning units while reducing overall costs was successful and provided reasonable results.

The developed and tested algorithm to generate planning units, so-called homogeneous sections, for road maintenance planning cannot be put into practice in its current version since a combination of pavement surface characteristics is still not available. The algorithm is generally applicable. However, it can be adapted to each combination of pavement surface characteristics. In this context, the defined constraints for selected types of maintenance measures should be validated on real data.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die langfristige Erhaltungsplanung im Bereich des Teilsystems Fahrbahnen beruht auf der Grundlage der netzweiten Zustandserhebung und –bewertung im zu unterhaltenden Strassennetz. Bei diesem teilsystembezogenen, langfristigen Planungsprozess dienen unterschiedliche Zustandseigenschaften der Fahrbahnoberfläche als Kenngrösse für eine Planung von Erhaltungsmaßnahmen [z.B. 1; 2; 3]. Die netzweit erhobenen Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche können einerseits als sogenannte Rohdaten in einer hohen Granularität in Form der Ausgabedaten eines Messgerätes vorliegen. Je nach Messverfahren beziehen sich diese Rohdaten auf einen Laufmeter der Radspur (z.B. gemittelte Griffigkeit) oder des Fahrstreifens (z.B. gemittelttes Querprofil) oder 10 cm der Radspur (gemittelte Höhenlage des wahren Längsprofils). Andererseits existieren vor allem in der Schweiz bei den Strassenverwaltungen bereits aggregierte Zustandsdaten auf der Grundlage der Normierung [2] für Bewertungseinheiten¹ nach einem Raster von 100 m eines Fahrstreifens, 50 m der Fahrbahn oder nach eigenem definierten Streckenraster.

Die Grösse der einzelnen Bewertungseinheiten (vgl. Abb. 1, links) ist für eine langfristige Planung von Erhaltungsmaßnahmen in der Regel zu klein und damit nicht praktikabel. Aus diesem Grund besteht die Notwendigkeit aus den Bewertungseinheiten durch Aggregation Strecken für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen zu bilden, sogenannte „homogene Abschnitte“² [5]. Diese Strecken dienen als Planungseinheit³ für Erhaltungsmaßnahmen im Rahmen der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung von Fahrbahnen.

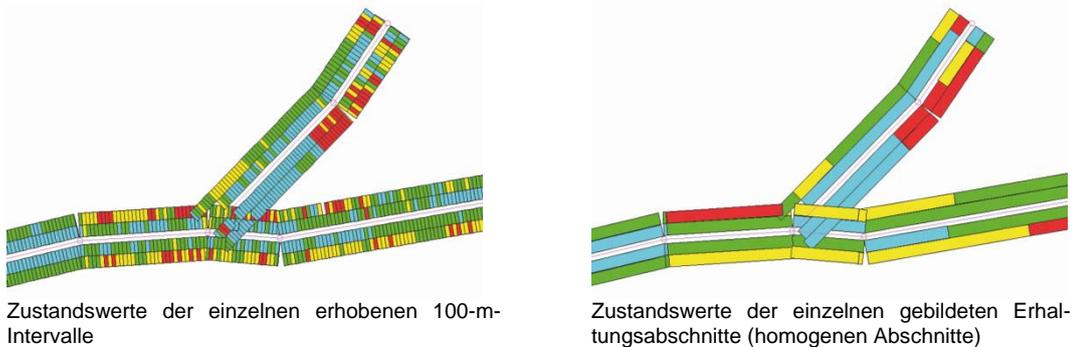


Abb. 1 Bildung von homogenen Strecken an Autobahnen [6]

Aus der Literatur ist bekannt (vgl. Kap. 1.4), dass die Bildung von Planungseinheiten oftmals nur aufgrund der momentanen Zustände der Fahrbahn bzw. des Fahrstreifens in

¹ Bewertungseinheit: Bezugsgrösse eines Objektes für dessen Beurteilung

² In Anlehnung an die VSS-Terminologie bei Strasseninformationssystemen wird in diesem Zusammenhang die Bezeichnung Strecken verwendet. Eine Strecken beginnt und endet jeweils an einem beliebigen Ort auf der Fahrbahnachse. Als ein Abschnitt wird eine Strecke bezeichnet, welche durch zwei Verkehrsknoten begrenzt ist [4].

³ Planungseinheit: Bezugsgrösse eines Objektes zur langfristigen Planung von Erhaltungsmaßnahmen

Längsrichtung ohne Berücksichtigung der technisch sinnvollen Erhaltungsmassnahmen an Fahrbahnen erfolgt.

In der Schweiz existiert bisher einerseits ein zustandsunabhängiges, funktionales Verfahren zur Bildung von Strecken, welches auf der Grundlage einer Bewertung mit nachfrage- und angebotsorientierten Kriterien beruht [7]. Dabei erfolgt zusätzlich eine subjektive Gewichtung der verschiedenen Kriterien. Andererseits werden in der Schweiz am häufigsten Planungseinheiten aufgrund von Erfahrungen und äusseren Randbedingungen durch eine manuelle, ingenieurmässige Beurteilung festgelegt. Diese Aggregation von Bewertungseinheiten lässt sich für eine begrenzte Anzahl von Planungseinheiten lösen. Wächst jedoch die Komplexität der Verkehrsanlage, ist ein Verfahren zur automatischen Bearbeitung und Evaluation der Planungseinheiten notwendig.

Da immer häufiger Strassenbetreiber eigene Strassendatenbanken, welche alle verfügbaren Informationen zum Strassennetz beinhalten [8; 9] führen, ist eine automatische Bearbeitung inzwischen auch weitgehend möglich.

Mit dem Forschungsprojekt wird ein auf die Bedürfnisse der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung von Fahrbahnen ausgelegtes Verfahren zur Bildung von Planungseinheiten bzw. homogenen Strecken entwickelt. Dabei werden die relevanten Kriterien bzw. Einflussfaktoren berücksichtigt. Dies schliesst, neben den Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche, die Kriterien bezüglich Wirtschaftlichkeit von Längen von Erhaltungsmassnahmen mit ein. Damit lässt sich eine praxisnahe Bildung von Planungseinheiten erzielen.

Die heute verwendeten Ansätze liefern für sich allein keine zufriedenstellende Lösung. Gerade bei zu grossen Streuungsbereichen verschiedener Zustandsindikatoren ergeben sich sehr kurze Erhaltungsabschnitte. Eine Bestimmung von Massnahmen und deren Realisierungszeitpunkte ohne Berücksichtigung der Zustandsentwicklung über einen langfristigen Betrachtungszeitraum führt zu Lösungen, welche einem wirtschaftlichen Optimum nicht genügen. Aus diesem Grund erscheint ein Ansatz zweckmässig, welcher eine Kombination beider Verfahren berücksichtigt. Das heisst, es werden zustandsbezogenen und massnahmenbezogenen Aspekte berücksichtigt.

1.2 Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung eines Verfahrens, das zu einer praxisorientierten, wirtschaftlich optimalen Bildung von Planungseinheiten, sogenannte homogenen Strecken, bei Fahrbahnen unter Berücksichtigung von Zustand und daraus folgenden technisch sinnvollen Erhaltungsmassnahmen führt.

1.3 Organisation und Partner

Das Forschungsprojekt wurde interdisziplinär vom Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) und der Firma Infrastructure Management Consultants (IMC) GmbH durchgeführt.

Die Gesamtleitung des Projektteams und die wissenschaftliche Betreuung durch das IVT oblagen Herrn Prof. Hans Peter Lindenmann. Die wissenschaftliche Konzeption, Modellierung und Betreuung erfolgte durch Dr. Rade Hajdin der Firma IMC. Für die Projektdurchführung waren auf Seiten des IVT Herr Frank Schiffmann und auf der Seite der Firma IMC Herr Matthias Botzen zuständig.

Die Auftragserteilung erfolgte am 10. Mai 2010. Die Durchführung des Forschungsauftrages gestaltete sich infolge verschiedener Umstände in Bezug auf die an der Forschung Beteiligten leicht anders als ursprünglich geplant.

Grundsätzlich konnte der Zeitplan infolge zweier einschneidender personeller Veränderungen von Anstellungen der ehemals für die Durchführung des Forschungsauftrages vorgesehenen Beteiligten des IVT nicht eingehalten werden. Dies waren:

- Emeritierung von Prof. H. P. Lindenmann per 31.7.2011 an der ETH Zürich (Projektleiter der Forschungsarbeit)
- Ausscheiden von Herr Frank Schiffmann beim IVT, Stellenwechsel zur Firma IMC, Zürich (Sachbearbeiter der Forschungsarbeit)

Diese Umstände führten dazu, dass der Bearbeitungsteil des IVT unter bleibender Leitung von Prof. Lindenmann in Zusammenarbeit mit Herrn Schiffmann verspätet fortgeführt wurde. Ungeachtet der zeitlichen Verzögerungen gelang es die Forschungsarbeit gemäss den Zielsetzungen fachlich ohne Einschränkungen durchzuführen.

1.4 Literaturrecherche

Schon 1986 [10] erfolgte die Veröffentlichung eines praktisch einsetzbaren praxisorientierten Verfahrens zur Streckenbildung für die Erhaltungsplanung von Fahrbahnen auf der Grundlage von Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche. Dabei handelt es sich um das Verfahren der kumulativen Summen (englisch: Cumulative Sum CUSUM oder Cumulative Difference Approach CDA), welches zum Teil in erweiterter Form heute noch Anwendung findet [11]. In diesem Verfahren wird die laufende, kumulative Abweichung des jeweiligen Zustandswertes an einer Stelle oder eines Intervalls vom Mittelwert der betrachteten Strecke angegeben. Eine Grenze zwischen zwei zu bildenden homogenen Strecken wird durch eine Änderung des Vorzeichens im Anstieg der kumulierten Summenkurve der Abweichung festgelegt [12].

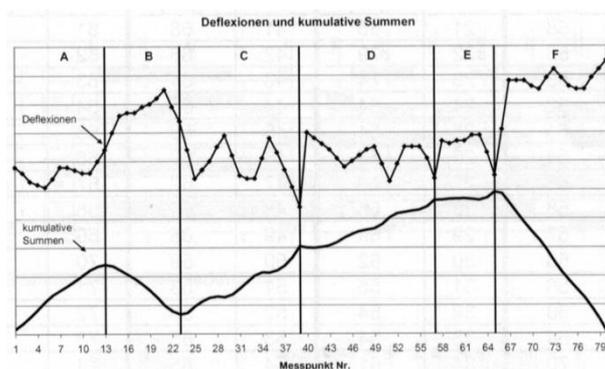


Abb. 2 Verfahren kumulierte Summen [11]

Dies kann bei einem homogenen Datensatz von Zustandsdaten zu sehr kleinen Unterabschnitten führen, weshalb die einzelnen Strecken gegeneinander einem t Signifikanztest unterzogen werden sollten [11; 13]. Im Jahr 1997 ergänzte Divinsky [14; 15] dieses Verfahren durch einen vorherigen Glättungsfilter (gleitender Mittelwert) um die vorhandenen Schwankungen der Messrohdaten des jeweiligen Zustands der Fahrbahnoberfläche auszugleichen [12]. Kennedy [16] nutzte einen gewichteten Mittelwert im Zusammenhang mit dem Verfahren der kumulativen Summen für eine

dynamische Segmentierung von Zustandsdaten. Eine sehr einfache Variante der kumulativen Summen entwickelte Misra [17] durch die zusätzliche Nutzung von Entscheidungsbäumen [18].

Thomas [12; 18] nutzte für die Analyse von Ebenheitsmessungen einen Algorithmus, welcher aufbauend auf einem Bayes'schen Netzwerk zur Identifikation von Beziehungen zwischen zwei Strecken mit Hilfe einer Heuristik homogene Strecken bildet.

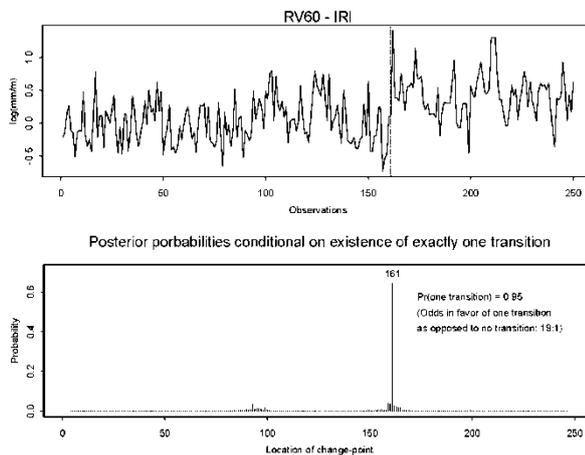


Abb. 3 Verfahren Bayes'sche Netzwerke [12]

In Deutschland wird zur Bildung der homogenen Strecken aus den Zustandsdaten, welche in der Zwischenzeit nicht mehr als aggregierte Daten sondern auf der Stufe der Rohmessdaten abgespeichert werden [19], unter anderem das Verfahren des gleitenden Mittelwertes (Glättungsfiler) und dessen Absolutdifferenz zur Anwendung favorisiert. Dieses Verfahren wurde 1996 durch Rübensam [5] entwickelt und erzeugt homogene Strecken auf der Grundlage einer zustandsunabhängigen Netzeinteilung mit Hilfe von Ordnungs-, Bestands- und Verkehrsdaten unter Anwendung des Glättungsfilters und der Absolutdifferenz der Werte der verschiedenen in Deutschland verwendeten Zustandsindizes. Die Zustandsindizes sind in ihrem Bewertungsmaßstab von 0 bis 5 den in der Schweiz verwendeten Zustandsindexwerten vergleichbar. Durch eine Analyse der massgebenden Zustandswerte und Dringlichkeiten ergeben sich die homogenen Strecken.

Ein weiterer in Deutschland entwickelter Algorithmus [20] bezieht sich auf die Aufbaudaten. Dabei werden die über das gesamte Strassennetz sehr inhomogenen Aufbaudaten (Oberbau) für das Erhaltungsmanagement in homogene Abschnitte eingeteilt. Das Vorgehen gliedert sich dabei in drei Schritte, einer vertikalen Schichtzusammenfassung sowie jeweils einer horizontalen Zusammenfassung in Fahrbahnquer- und längsrichtung.

Die Erfahrungen in Deutschland zu den beiden Verfahren unter Berücksichtigung einerseits des Schichtenaufbaus und andererseits des Oberflächenzustands haben gezeigt, dass die so festgelegten homogenen Strecken den Homogenitätsanforderungen in einem weiten Mass in Bezug auf den Zustand genügen. Die Ergebnisse dieser Streckenbildung entsprachen jedoch nicht der gängigen Erhaltungspraxis, da die Länge von Erhaltungsstrecken als Planungseinheit in diesen beiden Verfahren sekundär betrachtet wird. Im Jahr 2007 wurde aus diesem Grund in einer weiteren Forschungsarbeit [21] der Schwerpunkt auf die Bildung von homogenen Strecken mit für die Ausführungspraxis geeigneten Längen von Planungseinheiten gelegt und die vorhandenen Algorithmen durch einen Einbezug von übergeordneten Randbedingungen erweitert. Anschliessend erfolgte die Einführung dieses zusätzlichen Verfahrens zur Bildung von homogenen Strecken in den Erhaltungsprozess. Die Eingabeseite wurde

ausserdem um die Möglichkeit erweitert, gemessene oder visuell bestimmte Zustandsgrössen in die Abschnittsbildung mit einzubeziehen. Mit diesem kombinierten Verfahren konnte die Festlegung der homogenen Strecken in Deutschland verbessert werden.

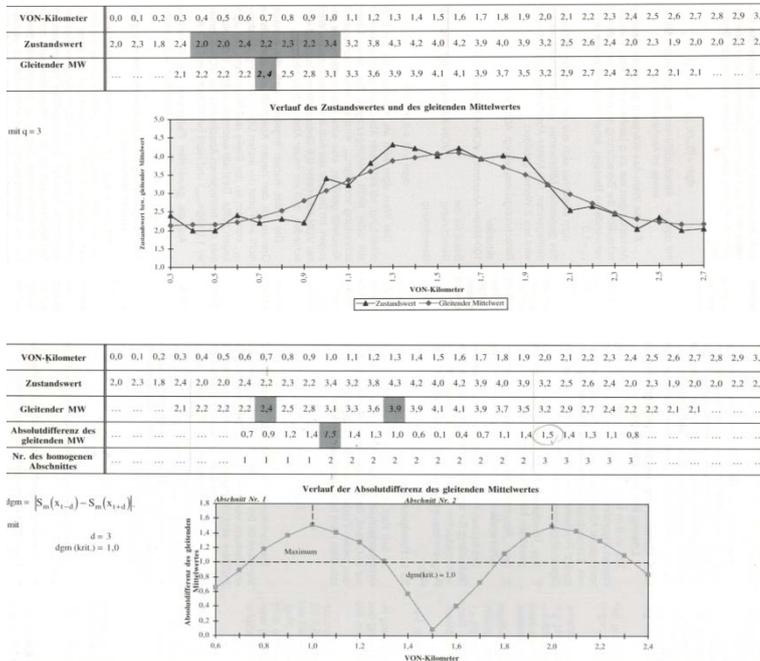


Abb. 4 Verfahren gleitender Mittelwert und Absolutdifferenz [5]

El Gendy [22; 23] stellte ein Verfahren zur Bildung von homogenen Strecken auf Grundlage von Zustandsdaten unter Nutzung eines Instruments aus dem Qualitätsmanagements vor. Die Qualitätsregelkarte (QRK, englisch: C-Chart) oder kurz Regelkarte bedient sich ähnlich wie Rübensam [5] der Methodik der Absolutdifferenz, jedoch sind hier die Abschnittsgrenzen nicht durch ein definiertes gleitendes Fester definiert, sondern durch die jeweiligen Signifikanzgrenzen gekennzeichnet. Cafiso [24] schlägt zusätzlich die Methode der Minimierung der Summe der Fehlerquadrate vor.

Der Bedarf an geeigneten Verfahren zur Aggregation von Datensätzen ist nicht nur auf das Erhaltungsmanagement oder die Strassenverkehrsanlage [25] beschränkt. So werden beispielsweise im Bereich des Projektmanagements ähnliche Algorithmen benötigt [26; 27]. Und auch im Bereich der Bilderkennung werden homogene Cluster (Bildbereiche) eingesetzt [28].

1.5 Diskussion

Wie die internationale Literatur zeigt, existieren unterschiedliche Verfahren zur Bildung von Planungseinheiten für das Erhaltungsmanagement. Alle diese Verfahren haben vor allem den Bezug zu Zustandsdaten, aber berücksichtigen keine Erhaltungsmaßnahmen aufgrund des vorhandenen Zustands. Die Praxis zeigt jedoch, dass bei den bisherigen Verfahren die Ergebnisse der Aggregation zu Planungseinheiten nicht immer direkt verwendet werden können.

Grundsätzlich sollen homogene Strecken als Planungseinheit für Erhaltungsmaßnahmen dienen. Deshalb müssen bei der Bildung dieser Planungseinheiten eventuell

vorhandene Randbedingungen für die Wahl von Erhaltungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Diese Randbedingungen werden einerseits vom vorhandenen Zustand und andererseits vom Massnahmentyp der Erhaltungsmaßnahme bestimmt.

2 Vorgehen und Methodik

2.1 Vorgehen

Das Vorgehen in diesem Forschungsauftrag wurde in die Forschungsphasen Erkenntnisgewinn, Modellgestaltung, Realisierbarkeitstest und Ergebniszusammenfassung gegliedert (vgl. Abb. 5).

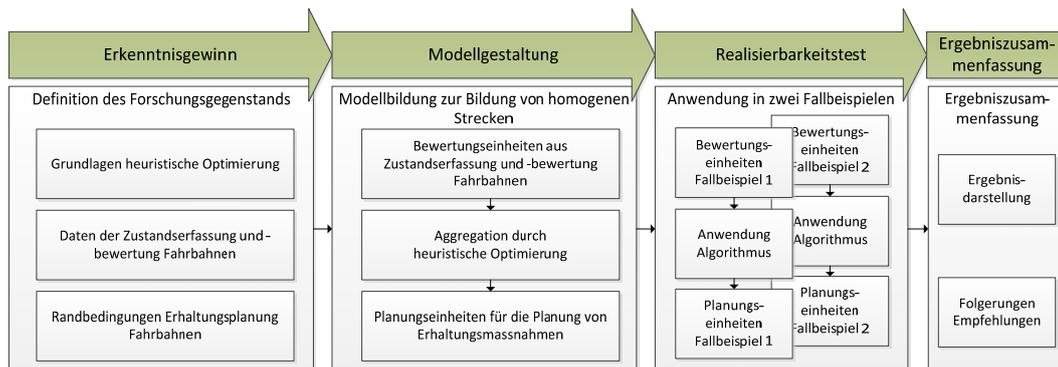


Abb. 5 Forschungsphasen des Forschungsauftrag

Vor der ersten Forschungsphase erfolgte eine Literaturrecherche über bisherige Verfahren zur Bildung von homogenen Strecken (vgl. Kapitel 1.4). Die Ergebnisse dieser Recherche bilden die Ausgangslage für die erste Forschungsphase.

2.1.1 Erkenntnisgewinn

In der ersten Forschungsphase zur Definition des Forschungsgegenstandes wurden grundlegende Betrachtungen der heuristischen Optimierung durchgeführt und einerseits in der Regel vorhandene Daten der Zustandserfassung und -bewertung bei Fahrbahnen in der Schweiz [vgl. 29] durch einen fiktiven Index I_x berücksichtigt. Andererseits erfolgte eine Definition von Randbedingungen für frei gewählte Typen von Erhaltungsmaßnahmen [vgl. 30], welche für die Bildung von Planungseinheiten relevant sind. Die Erhaltungsmaßnahmen wurden aus der Erhaltungsplanung von Fahrbahnen abgeleitet. Durch diese Definition wurde ein Zusammenhang zwischen dem fiktiven Zustandsindex I_x und der Typen von Erhaltungsmaßnahmen hergestellt.

2.1.2 Modellgestaltung

Das Modell ergibt sich aus den für den Algorithmus benötigten Eingabedaten. Diese sind einerseits die Bewertungseinheiten und andererseits Erhaltungsmaßnahmen die auf den Bewertungseinheiten angewandt werden können. Auf diese Eingabedaten wird der entwickelte Algorithmus angewandt, welcher durch eine heuristische Optimierung vorhandene Bewertungseinheiten, d.h. Streckenintervalle der Fahrbahnoberfläche mit Zustandsdaten, in Planungseinheiten, d.h. homogene Strecken von Fahrbahnen aggregiert. Dies erfolgt durch die Auswahl von durchzuführenden Erhaltungsmaßnahmen auf den Bewertungseinheiten.

Die Zielfunktion wird aus den Gesamtkosten über alle betrachteten Bewertungseinheiten bei einem Betrachtungszeitraum von 40 Jahren gebildet. Mittels eines heuristischen Optimierungsverfahrens wird diese Zielfunktion minimiert. Damit erfolgt die Abstützung auf ein monetäres Wertesystem. Dieses Wertesystem und der Umfang von definierten Randbedingungen stützen sich auf bereits durchgeführte Forschungsarbeiten [31] und Normen [32]. Das Ergebnis sind Planungseinheiten in Form von homogenen Strecken.

2.1.3 Realisierbarkeitstest

Nach der Entwicklung des Algorithmus erfolgte ein Realisierbarkeitstest an zwei Fallbeispielen. Dafür wurden im Vorfeld Zustandsdaten eines fiktiven Index I_x für jede Bewertungseinheit künstlich generiert und Typen von Erhaltungsmaßnahmen mit relevanten Randbedingungen definiert. Anhand dieser Eingangsdaten kann der Algorithmus die Aggregation durchführen.

2.1.4 Ergebniszusammenfassung

Am Schluss erfolgte eine Zusammenfassung der Ergebnisse in der Ergebnisdarstellung sowie Folgerungen und Empfehlungen aus dieser Forschungsarbeit. Dabei wird auf den Einsatz und die Anwendung in der Praxis sowie einen allfälligen weiteren Forschungsbedarf hingewiesen.

2.2 Methodik

Die Grundlage für die Entwicklung eines Verfahrens zur Bildung von homogenen Strecken bilden die Zustandsdaten der zu berücksichtigenden Bewertungseinheiten der Fahrbahnen und auf diesen je nach Zustand technisch sinnvolle Erhaltungsmaßnahmen. Die Erhaltungsmaßnahmen unterliegen jedoch definierten Randbedingungen, wie z.B. einer Mindestlänge oder Einsatzgrenzen in Bezug auf den Zustand (vgl. Kapitel 3.2.2).

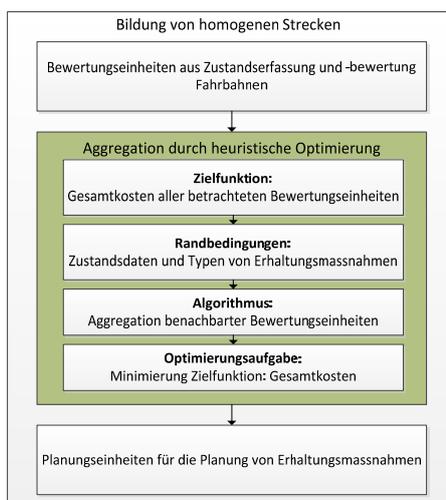


Abb. 6 Methodik zur Bildung von homogenen Strecken

Somit wird einerseits der Zustandsbezug nicht vernachlässigt, aber andererseits auch der Bezug zu Erhaltungsmaßnahmen gewährleistet. Grundlegendes Ziel der Bildung von homogenen Strecken bei Fahrbahnen ist die Minimierung der Gesamtkosten, wodurch gleichzeitig eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bei der Aggregation gewährleistet ist. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird sich auf ein Zustandsmerkmal bzw. einen Zustandsindex beschränkt, da weder abgestützte Modelle der Zustandsentwicklung noch anerkannte Definitionen von Randbedingungen für Erhaltungsmaßnahmen existieren.

Das entwickelte Verfahren stützt sich auf eine heuristische Optimierungsmethode. Das heisst, es wird zuerst eine Zielfunktion definiert. Diese stellt die Gesamtkosten über alle betrachteten Bewertungseinheiten innerhalb eines Betrachtungszeitraums von 40 Jahren dar. Dazu dienen Parameter bzw. Kennwerte von Erhaltungsmaßnahmen in Bezug auf Kosten und Zustandsentwicklung sowie optimaler Anwendungsbereich. Die Randbedingungen werden durch eine definierte Mindestlänge und Eingreifgrenzen der Erhaltungsmaßnahmen gebildet. Die Aufgabe des Algorithmus besteht im Suchen einer Lösung mit möglichst minimalen Gesamtkosten.

2.3 Grundlagen der Zustandserfassung und –bewertung von Fahrbahnen

Es ist üblich für die langfristige Erhaltungsplanung netzweit zerstörungsfrei Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche zu erheben. Den relevanten Bewertungshintergrund liefert dafür [2]. Für die Anwendung des Algorithmus ist mindestens ein Kennwert der Fahrbahnoberfläche zur Quantifizierung des Zustands notwendig. Wichtig ist, dass vorhandene Zustandswerte einen klaren Bezug zu Erhaltungsmaßnahmen aufweisen. Das heisst, die Bedeutung des Zustands und die mögliche Verbesserung durch Erhaltungsmaßnahmen müssen bekannt bzw. definiert sein.

Für die Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmen sind folgende Varianten der Zustandsbewertung möglich

- Einzelner Zustandswert bzw. –index
- Zusammengesetzter Zustandsindex
- Mehrere Zustandswerte bzw. –indizes

2.3.1 Einzelner Zustandsindex

Die Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmen erfolgt aufgrund eines einzigen erhobenen Zustandsindex. Für diesen einen Index existiert ein Prognosemodell. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht in einer begrenzten Anforderung an die Datenerfassung und -analyse. Nachteilig ist die sehr ungenaue Abbildung der realen Zustandsverhältnisse und –entwicklung.

2.3.2 Zusammengesetzter Zustandsindex

Die Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmen erfolgt aufgrund eines zusammengesetzten Zustandsindex der erhobenen Zustandsmerkmale. Dabei existiert für den Gesamtindex ein Prognosemodell. Der Vorteil besteht in einer genaueren Abbildung der vorhandenen Zustandsverhältnisse. Die Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmen erfolgt aufgrund des Gesamtindex und muss nicht einzeln für jedes Merkmal definiert werden. Der Nachteil besteht in einer beschränkten Abbildung der realen Zustandsentwicklung. Die Bildung des Gesamtindex geschieht meist subjektiv durch unterschiedliche Gewichtung der

Einzelindizes. Ein direkter Zusammenhang von Zustandsmerkmal und Erhaltungsmaßnahme besteht nicht und führt zu einer beschränkten Genauigkeit.

2.3.3 Mehrere Zustandswerte bzw. –indizes

Die Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmen erfolgt aufgrund mehrerer Zustandswerte bzw. –indizes. Dabei existieren für jedes Zustandsmerkmal bzw. für jeden Zustandsindex separate Prognosemodelle und Zuordnungsbedingungen von Erhaltungsmaßnahmen. Der Vorteil liegt in einer höheren Genauigkeit der Abbildung der örtlichen Verhältnisse. Damit besitzt auch die Planung eine bessere Grundlage. Nachteilig ist hierbei, dass ein erheblicher Aufwand bei der Datenerfassung und -analyse betrieben werden muss. Dies gilt für die Zustandsmerkmale als auch für die Randbedingungen der Erhaltungsmaßnahmen. Grundsätzlich bestehen für den Algorithmus keine Einschränkungen.

2.3.4 Zustandsentwicklung

Je nachdem, ob ein Zustandsmerkmal bzw. –index oder mehrere verwendet werden, ist mindestens ein Modell der Zustandsentwicklung für diese zu berücksichtigen. Die Zustandsentwicklung wird in der Regel mit sogenannten Verfallskurven modelliert (vgl. [33]). Es wäre grundsätzlich auch denkbar, nicht nur den Zustand im Rahmen der Zustandsentwicklung in Abhängigkeit der Erhaltungsmaßnahmen zu verbessern, sondern auch durch eine Erhaltungsmaßnahme den Zustandsverlauf zu ändern. Das heisst, dass sich z.B. durch eine kleine Massnahme der Zustand zwar verbessert, der Zustandsverlauf jedoch einen schnellen Verfall über die Zeit nimmt. Wird hingegen eine grosse Massnahme angesetzt, die die Struktur massgeblich in den Neuzustand versetzt, verändert sich die Zustandsentwicklung zu einem langsameren Verfall. Dieses Vorgehen ist ausführlich auch in [1] beschrieben. Für eine Umsetzung sind dann natürlich nicht nur Rücksetzwerte für jedes Zustandsmerkmal sondern auch Kennwerte bezüglich des Einflusses auf den Verlauf der Zustandsentwicklung für jeden Typ von Erhaltungsmaßnahme notwendig.

2.3.5 Fazit für den Umfang von Zustandsdaten beim Realisierbarkeitstest

Für die Anwendung des Algorithmus ist es letztlich egal, welche Variante für die Bewertung und die Zuordnung von Erhaltungsmaßnahmen gewählt wird. Wichtig ist nur, dass für die definierten Zustandsmerkmale jeweils ein Prognosemodell vorhanden ist und die Zuordnung und Auswirkung von Erhaltungsmaßnahmen für jedes Zustandsmerkmal definiert sind. Mit der Anwendung des Algorithmus in zwei Fallbeispielen soll die Realisierbarkeit des entwickelten Verfahrens aufgezeigt werden. Der grundsätzliche Ablauf des Algorithmus in Bezug auf die Bildung der Planungseinheiten unterscheidet sich nicht wesentlich, ob nun ein Zustandsmerkmal, z.B. ein Index, oder mehrere bei der Planung Verwendung finden.

In diesem Forschungsprojekt kann die Frage nach einer breit abgestützten Methode zur Kombination von unterschiedlichen Zustandsmerkmalen nicht beantwortet werden. Um die Komplexität gering zu halten, wird für den Realisierbarkeitstest nur ein künstlich erzeugter Zustandsindex I_x betrachtet mit lediglich einer Verlaufskurve der Zustandsentwicklung. Die Frage nach einer Methode der Kombination von unterschiedlichen Zustandsmerkmalen für die Erhaltungsplanung von Fahrbahnen wird hingegen offen gelassen, da dafür umfassende Analysen notwendig werden, welche in einem separaten Forschungsprojekt durchgeführt werden müssen. In der Praxis fehlen abgestützte Kennwerte von Erhaltungsmaßnahmen in Bezug auf Eingreifgrenzen und optimale Anwendungsbereiche für Zustandsmerkmale. Gleiches gilt für Rücksetzwerte

und Wirkungen auf den Verlauf der Zustandsentwicklung. Zusätzlich existiert noch kein Bewertungshintergrund für die Verwendung von unterschiedlichen Zustandsmerkmalen. Gerade im Rückschluss auf technisch sinnvolle Erhaltungsmaßnahmen sind hier noch Grundlagen zu schaffen.

Sobald die notwendigen Parameter, wie z.B. Verfallskurve, Rücksetzwerte usw., je Massnahme diesen Einfluss definieren, kann dies auch durch Anpassungen im Algorithmus Berücksichtigung finden. Der Algorithmus kann dies in Form von weiteren Parametern bzw. Kennwerten und Randbedingungen, welche dann in den Algorithmus integriert werden müssen, berücksichtigen. Das gleiche gilt für die Implementierung von Sonderfällen innerhalb der Erhaltungsplanung einzelner Strassenbetreiber. Für das Aufzeigen der Methodik und der Realisierbarkeit des verwendeten Ansatzes ist ein einziger fiktiver Zustandsindex mit frei gewählter Verfallskurve ausreichend.

2.4 Grundlagen der Erhaltungsplanung von Fahrbahnen

2.4.1 Typisierte Erhaltungsmaßnahmen

Für eine langfristige Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Fahrbahnen sind Annahmen von Kosten, Ausführungskennwerten und die Auswirkungen der Erhaltungsmaßnahmen auf den Zustand zu treffen. In der Erhaltungsplanung bei Fahrbahnen erfolgt dies über typisierte Erhaltungsmaßnahmen.

Im Rahmen der Fallbeispiele erfolgte eine Definition von 5 unterschiedlichen Typen von Erhaltungsmaßnahmen. Da für den Algorithmus ein Unterlassen von Erhaltungsmaßnahmen explizit definiert werden muss, beinhaltet diese Massnahmenliste auch die generische Massnahme Nichtstun. Dies entspricht der gängigen Praxis bei Pavement Management Systemen.

Für die Schweiz wurde in [30] erstmals ein Massnahmenkatalog von typisierten Erhaltungsmaßnahmen mit unterschiedlichen zustands-, ausführung- und kostenbezogenen Kennwerten entwickelt. Dieser Massnahmenkatalog ermöglicht eine Betrachtung von Erhaltungsmaßnahmen und Zustandsentwicklung im Bereich Fahrbahnen über einen langfristigen Zeitraum. Die folgende Abbildung (vgl. Abb. 7) zeigt die Struktur eines Massnahmenkatalogs für das Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen.

Struktur Massnahmenkatalog

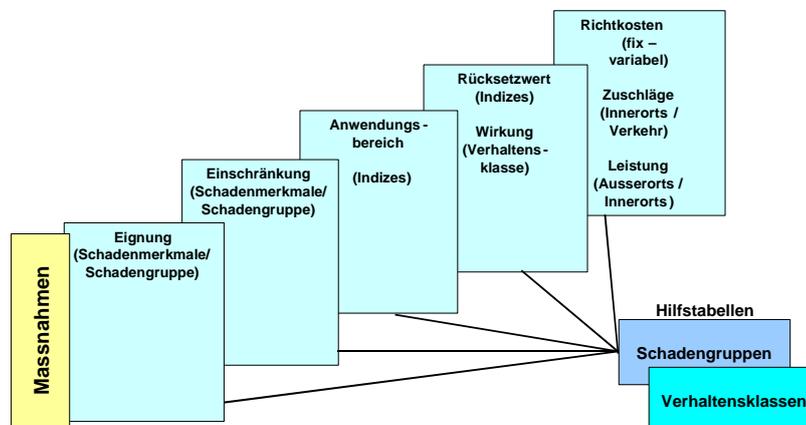


Abb. 7 Struktur eines Massnahmenkatalogs für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen (vgl. [30])

Grundsätzlich erfolgt somit analog [30] eine Definition von Erhaltungsmassnahmen und deren Einsatzgrenzen, Auswirkung und Kosten. Von Bedeutung ist das Vorhandensein eines Zusammenhangs zwischen den gewählten Typen von Erhaltungsmassnahmen und deren Auswirkung auf das jeweils berücksichtigte Zustandsmerkmal, d.h. Index oder Zustandswert. Bisher existieren keine in der Praxis breit abgestützten Ansätze für diese Kennwerte von Erhaltungsmassnahmen. Es war auch nicht Ziel dieses Forschungsprojekts die Gültigkeit eines Massnahmenkatalogs herbeizuführen. Deshalb erfolgt eine freie Definition von Randbedingungen in Bezug auf Kennwerte von Erhaltungsmassnahmen und deren Einfluss auf einen fiktiven Index I_x . Die in [30] vorgeschlagene Struktur eines Massnahmenkatalogs bzw. die verwendeten Kennwerte, wie Rücksetzwert, Eingreifgrenzen bzw. obere Anwendungsgrenze usw. zur Abbildung des Zusammenhangs von Erhaltungsmassnahmen und Zustandsmerkmalen zeigt sich jedoch im Einklang mit internationalen Ansätzen im Bereich der langfristigen Erhaltungsplanung von Fahrbahnen (vgl. z.B. [1; 34]).

2.4.2 Kostenstruktur

Grundsätzlich wird die Kostenstruktur an das Kostenmodell aus [35] und der darin definierten Gesamtkosten für die Baustellenplanung angelehnt. Daraus geht hervor, dass nur objektbezogene Kosten, das heisst Kosten für Strassenbetreiber, Strassennutzer und Dritte infolge der Ausführung von Erhaltungsmassnahmen auf den Bewertungseinheiten bzw. Planungseinheiten, berücksichtigt werden. Kosten infolge von Baustellen werden nicht angesetzt, da diese nicht Gegenstand der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung sind, das sie in Bezug auf die Verkehrsführung variieren können. Unterschiedliche Verkehrsführungen und ihre Auswirkungen auf den Strassenbetreiber, Strassennutzer und Dritte werden jedoch im Rahmen der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung nicht betrachtet. Zusätzlich können diese Kosten nicht den einzelnen Planungseinheiten sondern nur zu bildenden Baustellen zugeordnet werden. Dies ist Gegenstand der Erhaltungsplanung auf Gesamtsystemebene (vgl. [35]).

Aus [35] geht hervor, dass im Bereich der Kosten durch Auswirkungen auf Dritte abgestützte Modelle in Bezug auf die Bautätigkeit und Materialherstellung für den Strassenbau fehlen und lediglich Modelle in Bezug auf die Auswirkungen durch den Verkehr vorhanden sind. Eine alleinige Berücksichtigung der Auswirkungen des Verkehrs bei den Kosten durch Auswirkungen auf Dritte ist für die Planung von Erhaltungsmassnahmen nicht sinnvoll. Sind neben den Kosten der Strassenbetreiber und Strassennutzer auch ausreichend abgestützte Kostenmodelle der Kosten infolge Auswirkung auf Dritte vorhanden können alle drei objektbezogenen Kostenkenngrössen des Gesamtkostenmodells verwendet werden.

In der folgenden Abbildung aus [35] wurden die relevanten Kostenkenngrössen durch eine grüne Markierung hervorgehoben (vgl. Abb. 8). Es sind alle Kosten von Massnahmenstrategien⁴ jeweils für Strassenbetreiber, Strassennutzer und infolge der Auswirkungen auf Dritte. Die Kosten der drei Anspruchsgruppen setzen sich jeweils zusammen aus Kosten der Massnahmen bzw. deren Auswirkungen und Folgekosten.

⁴ Als Massnahmenstrategie wird hier eine Folge von Massnahmen bezeichnet, welche aus einer Initialmassnahme zum Zeitpunkt der Aggregation der Bewertungseinheiten sowie folgende Massnahmen im Betrachtungszeitraum (40 Jahre) an ein und derselben Bewertungseinheit besteht.

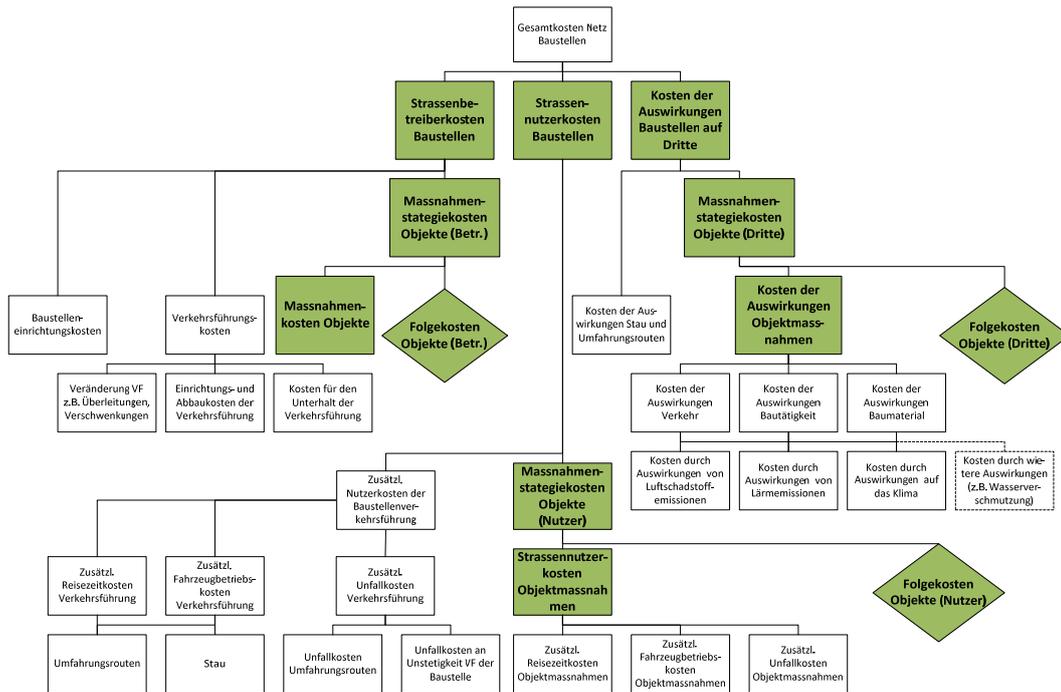


Abb. 8 Kostenstruktur der Gesamtkosten (vgl. [35])

Strassenbetreiberkosten

Es werden alle objektbezogenen Strassenbetreiberkosten zum Zeitpunkt der Massnahmen und deren Folgekosten berücksichtigt. Vereinfachend für die Fallbeispiele erfolgt der Ansatz der in Tab. 3 aufgeführten Kosten der Erhaltungsmassnahmen, d.h. fixer und variabler Teil der Massnahmenkosten. Liegen weitere Objektkosten für Erhaltungsmassnahmen vor, z.B. Planungskosten, Verkehrsführungskosten usw., welche an den Planungs- bzw. Bewertungseinheiten gemäss [35] angesetzt werden können und nicht baustellen-spezifisch sind, ist es ohne weiteres möglich, die Inputdaten zu ergänzen. Baustellenbezogene Kosten nach [35] werden nicht berücksichtigt.

Strassennutzerkosten

Analog zu den Strassenbetreiberkosten werden auch bei den Strassennutzerkosten nur objektbezogene Kostenkenngrössen zum Zeitpunkt der Massnahmen und bei schlechtem Zustand für die Massnahme „Nichtstun“ berücksichtigt. Analog zu den Strassenbetreiberkosten sind keine baustellen-spezifischen Kosten, welche sich in Bezug auf die verschiedenen Verkehrsführungen unterscheiden, anzusetzen. Ebenfalls vereinfachend wurden für die Fallbeispiele allein die Zeitkosten infolge einer Geschwindigkeitsreduktion als Strassennutzerkosten angesetzt, welche objektbezogen auf den Bewertungseinheiten bzw. Planungseinheiten anzusetzen sind. Netzbezogene Kosten, welche z.B. bei Stau an einem Baustellenanfang entstehen, werden hierbei nicht berücksichtigt (vgl. [35]).

Kosten der Auswirkung auf Dritte

Diese Kosten werden in den Fallbeispielen nicht berücksichtigt. Nach [35] fehlen wichtige Faktoren in Bezug auf die Bautätigkeit und die Materialherstellung in diesem Bereich.

Ansatz der Kosten über den Betrachtungszeitraum

Wie in Kapitel 3.2 erläutert erfolgt einerseits der Ansatz von Kosten infolge der Ausführung der Erhaltungsmassnahme für den Strassenbetreiber (A) und Strassennutzer (N) auf der Planungseinheit im Jahr der Streckenbildung. Andererseits werden Folgekosten der Strassenbetreiber (A) und Strassennutzer (N) separat für die Bewertungseinheiten diskontiert angesetzt. Diese fallen in dem jeweiligen Jahr an, in dem auf einer Bewertungseinheit eine Folgemassnahme stattfindet. Dies ist in Abb. 9 nochmals dargestellt.

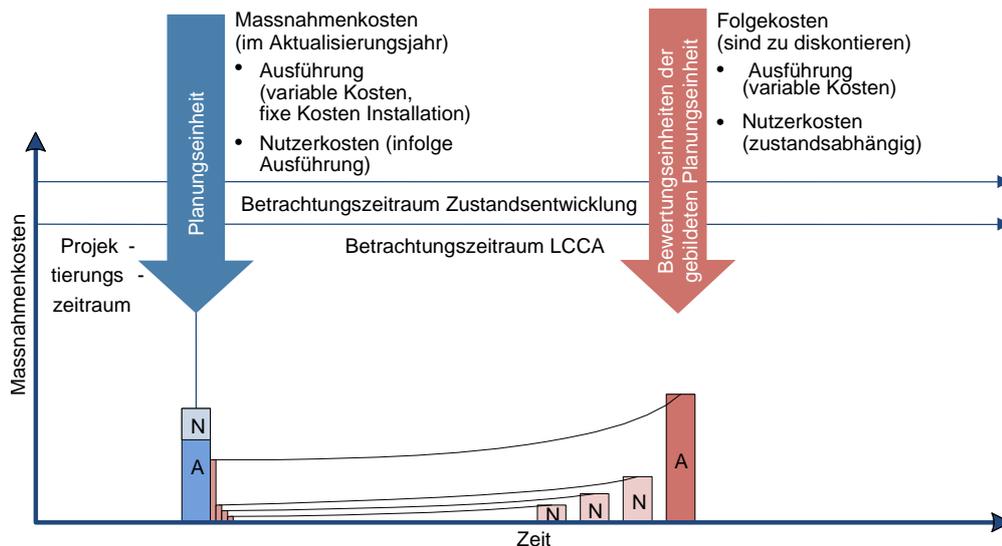


Abb. 9 Schema der Kostenstruktur für die Anwendung des Algorithmus

2.5 Grundlagen der Optimierung

2.5.1 Optimierungsprobleme

Die mathematische Optimierung wird auch „Mathematische Programmierung“ genannt. Die mathematische Modellierung eines Optimierungsproblems wird demnach als mathematisches Programm bezeichnet. Programmierung ist hier aber nicht im Sinne der Programmierung einer Software zu verstehen. Auch wenn heute üblicherweise mathematische Programme mit Hilfe von Computerprogrammen gelöst werden, so gibt es an dieser Stelle keinen Bedeutungszusammenhang.

Es gibt in der mathematischen Optimierung die unterschiedlichsten Probleme. Im Allgemeinen haben sie aber gemeinsam, dass sie sich mathematisch durch eine Zielfunktion und beliebig viele Nebenbedingungen beschreiben lassen. Neben den so beschreibbaren Problemen, gibt es noch die Probleme der sogenannten Pareto-Optimierung, die hier nicht näher betrachtet werden soll. Das besondere bei diesen Problemen ist, dass es mehrere Zielfunktionen gibt die gleichzeitig optimiert werden müssen.

Die Lösung eines mathematischen Programms wird in der Form eines Lösungsvektors dargestellt. Die Zielfunktion bildet von diesem Lösungsvektor auf einen Wert ab und die Nebenbedingungen sind Ungleichungen, die sich auf einzelne seiner Elemente beziehen. Die Anzahl der Dimensionen des Lösungsvektors entspricht der Anzahl der Elemente der Eingabe, also der Anzahl der Elemente, auf denen etwas optimiert werden soll. Der Definitionsbereich des Vektors spiegelt die Auswahlmöglichkeiten wieder, die für jedes Element der Eingabe vorliegen. Häufig ist der Definitionsbereich für alle Elemente des Vektors identisch, dies muss aber nicht so sein.

Jede theoretisch mögliche Belegung des Lösungsvektors ist eine potenzielle Lösung für das Optimierungsproblem. Diese Menge wird durch die Nebenbedingungen mehr oder weniger stark eingeschränkt. Eine Belegung des Lösungsvektors, die die Nebenbedingungen erfüllt, ist eine zulässige Lösung. Die optimale Lösung ist diejenige zulässige Lösung mit dem minimalen bzw. maximalen Zielfunktionswert.

Das Konzept soll anhand eines kleinen Beispiels verdeutlicht werden. Die Differenz zweier ganzer Zahlen soll minimiert werden, wobei der Minuend grösser als 5 und der Subtrahend kleiner als 2 sein soll.

Die zu minimierende Zielfunktion ist somit:

$$f(x_1, x_2) = x_1 - x_2$$

Wobei folgende Nebenbedingungen zu beachten sind:

$$x_1 > 5$$

$$x_2 < 2$$

Der Definitionsbereich für den Lösungsvektor (x_1, x_2) ist \mathbb{Z}^2 .

Zulässige Lösungen sind beispielsweise $(10, -5)$ oder $(15, 0)$. Die optimale Lösung hingegen ist offensichtlich $(6, 1)$ mit einem $f(6, 1) = 5$.

In dem vorliegenden Problem der Aggregation von Bewertungseinheiten zu Planungseinheiten bzw. homogenen Strecken entspricht die Anzahl der Dimensionen des Lösungsvektors der Anzahl der betrachteten Strecken. Der Definitionsbereich der einzelnen Elemente des Vektors ist dann die Menge der zur Verfügung stehenden Massnahmen bzw. eine mathematische Entsprechung dieser Massnahmen (bspw. 0=nichts tun, 1=Einbau einer neuen Deckschicht etc).

Solange der Definitionsbereich endlich ist, ist die zunächst vielleicht naheliegendste Methode die optimale Lösung zu finden, die sogenannte „Brute-Force-Suche“. „Brute Force“, Englisch für „nackte Gewalt“, steht für ein Vorgehen bei dem einfach nach und nach für alle potenziellen Lösungen überprüft wird ob sie zulässig sind und wenn ja ihr Zielfunktionswert berechnet wird. Somit findet man garantiert die beste Lösung. Das Problem das sich dabei ergibt ist jedoch, dass die Anzahl der theoretisch möglichen Lösungen i.A. exponentiell von der Grösse der Eingabe abhängt. Für die homogenen Strecken hiesse das, dass es bei nur 100 Strecken (bei einer Streckenlänge von 100m also nur 10km Strassenlänge) und zwei unterschiedlichen Massnahmen schon 2^{100} potentielle Lösungen gibt. Auch wenn pro Sekunde 100'000'000 potentielle Lösungen abgearbeitet werden könnten, würde dies immer noch eine Laufzeit von 400 Billionen Jahre bedeuten. Diese Art des Vorgehens ist also, mit Ausnahme von kleinen Problemen, nicht praktikabel.

Um in angemessener Zeit eine Lösung zu finden, muss es also ausreichen nur einen Teil der potentiellen Lösungen zu betrachten. Die Frage, die sich dann stellt ist, welche Lösungen ignoriert werden können. Daraus ergibt sich das Wesen aller Optimierungsalgorithmen. Sie versuchen die Menge der potentiellen Lösungen möglichst geschickt einzuschränken, so dass möglichst wenige von ihnen betrachtet werden müssen, um die optimale Lösung zu finden. Diese Einschränkungen ergeben sich während der Laufzeit des Algorithmus und werden aus schon bekannten zulässigen Lösungen berechnet. Wie gut eine solche Einschränkung funktioniert und wie schnell auf den verbleibenden potentiellen Lösungen die optimale gefunden wird, hängt natürlich nicht nur von der Art des Algorithmus sondern auch massgeblich von der Art der Eingabe ab. Vergleichbar mit beispielsweise üblichen Suchalgorithmen kann also auch bei einem Optimierungsalgorithmus nicht zu Beginn gesagt werden, wie viele Schritte er ausführen

muss, um zum Ergebnis zu erlangen. Vereinfacht dargestellt berechnet der Algorithmus eine zulässige Lösung und ihren Zielfunktionswert. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt bis der Algorithmus erkennt, dass keine bessere zulässige Lösung mehr gefunden werden kann.

In den letzten Jahrzehnten haben sich Optimierungsalgorithmen zu einem immer wichtigeren Zweig der Mathematik sowohl in der Forschung als auch in der Anwendung entwickelt. Es wurde eine Vielzahl von Algorithmen entwickelt, die auf den unterschiedlichsten Ansätzen beruhen.

2.5.2 Ganzzahlige Lineare Programmierung

Eine spezielle Form der Optimierung ist die „Lineare Programmierung“. In diesem Teilgebiet sind sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingungen linear. Dies macht die Programme relativ leicht nachvollziehbar.

Viele Probleme können mit Hilfe eines linearen Programms (LP) modelliert werden. Für LPs gibt es verschiedene bekannte effiziente Lösungsstrategien. Die vermutlich bekannteste ist der Simplex-Algorithmus. Dieser hat sich in der Praxis als einer der schnellsten herausgestellt, obwohl seine theoretisch maximale Laufzeit nicht besser als Brute Force ist (vgl. Kap. 2.5.1).

Eine Unterform der Linearen Programmierung ist die ganzzahlige lineare Programmierung. In einem ganzzahligen linearen Programm (ILP) müssen nicht nur die Zielfunktion und Nebenbedingungen linear sein, sondern auch der Definitionsbereich des Lösungsvektors darf nur ganzzahlig sein.

ILPs sind wie LPs nicht nur in der Grundlagenforschung sehr beliebt, sondern werden auch in der Praxis zur Modellierung der unterschiedlichsten Probleme genutzt. Leider sind die ILPs jedoch auch eine sehr schwierige Klasse von Problemen. Genauer ist ein ILP ein NP-schweres Problem. Ohne zu sehr ins Detail zu gehen heisst dies vereinfacht, dass nicht nur kein Algorithmus bekannt ist, der diese Probleme immer in Polynomzeit löst, es ist noch nicht einmal bekannt, ob es einen solchen Algorithmus überhaupt geben kann.

Polynomzeit meint, dass die Anzahl der Schritte, die der Algorithmus durchlaufen muss, als ein von der Grösse der Eingabe abhängiges Polynom dargestellt werden kann. Bei einer Eingabe der Grösse n also bspw. n^3 oder auch $\log(n)$. Algorithmen die in Polynomzeit lösbar sind, gelten in der Informatik als effizient.

Das ein ILP ein deutlich schwierigeres Problem als ein LP ist, lässt sich an einem einfachen Beispiel verdeutlichen. Angenommen eine Fläche soll mit Fliesen unterschiedlicher Grösse möglichst genau belegt werden.

Würde man das Problem als LP formulieren so hiesse das, dass auch Bruchstücke von Fliesen verwendet werden dürfen. Nun ist die Lösung einfach, es wird einfach so lange gefliest bis nur noch eine kleine Lücke übrig bleibt und dann eine Fliese so zurechtgeschnitten, dass sie die Lücke genau ausfüllt.

In einem ILP dürfen jedoch nur ganze Fliesen verwendet werden. Nun kann nicht einfach so gefliest werden, sondern es muss eine Strategie entwickelt werden, welche Fliesen, wie häufig und wo verwendet werden, so dass am Ende keine oder nur eine möglichst kleine Lücke übrig bleibt.

Da in dem Problem der homogenen Strecken jeder Strecke genau einer der definierten Massnahmen zugewiesen werden muss und nicht eine Mischung aus zwei oder sogar mehr Massnahmen, muss dieses Problem auch als ILP modelliert werden.

2.5.3 Heuristische Verfahren

Das ILPs ein schwieriges Problem sind, heisst jedoch nicht, dass sich ein ILP grundsätzlich nicht effizient optimal lösen lassen. Es heisst lediglich, dass kein Algorithmus bekannt ist, der ein ILP immer effizient optimal löst. Anders ausgedrückt lässt sich für jeden bekannten Algorithmus eine Eingabeinstanz kreieren, die dieser nicht effizient lösen kann.

Viele ILPs in der Praxis lassen sich der Erfahrung nach dennoch effizient lösen. Teilweise werden dabei sehr spezielle Algorithmen verwendet, die die Struktur der vorliegenden Daten genau ausnützen. Denn in der Realität ist es meistens nicht so, dass eine Eingabe beliebig aussieht, wahrscheinlich wird sie vielmehr einem bestimmten Grundmuster folgen.

Wenn aber für ein Problem kein Algorithmus gefunden werden kann, der es zumindest häufig genug effizient optimal löst oder aber es ausreichend ist, eine gute Lösung zu finden, gibt es noch einen weiteren Weg: Die sogenannten heuristischen Verfahren. Ziel dieser Verfahren ist es in einer effizienten Laufzeit eine zulässige Lösung bzw. eine möglichst gute zulässige Lösung zu finden. Es wird jedoch darauf verzichtet, die optimale Lösung zu finden. Ein heuristisches Verfahren kann zwar auch die optimale Lösung finden, falls es das getan hat, ist dies aber normalerweise nicht erkenntlich.

Was für ein Ergebnis eine Heuristik liefert hängt von ihrem Aufbau ab. Einige liefern lediglich eine zulässige Lösung, über die keinerlei Aussage getroffen werden kann. Andere liefern eine zulässig Lösung, die maximal um einen festen Faktor schlechter als die optimale Lösung ist. Und wieder andere liefern eine lokal optimale Lösung. Eine lokal optimale Lösung ist eine Lösung, für die gilt, dass es in einer gewissen Umgebung um diese Lösung keine bessere Lösung gibt. Es kann jedoch sein, dass es in grössere Entfernung bessere lokale Optima gibt. In welchem Verhältnis sich das gefundene lokale Optimum zum globalen Optimum befindet, kann üblicherweise nicht überprüft werden.

Neben der einfachen Anwendung eines heuristischen Verfahrens gibt es auch noch verschiedene andere Anwendungsfälle, um die Qualität des Ergebnisses zu verbessern. So kann eine Heuristik mit einer anderen Heuristik kombiniert werden oder auch mit einem traditionellen Optimierungsverfahren indem bspw. über die Heuristik ein Startpunkt für dieses berechnet wird.

2.5.4 Angewandte Methode

Zu Beginn der Ausarbeitung des Algorithmus musste also bestimmt werden, welche dieser Richtungen eingeschlagen werden sollte. Wie oben erklärt ist das Problem der homogenen Strecken ein ILP. Es kann also nicht davon ausgegangen werden, dass ein Algorithmus gefunden wird, der es verlässlich effizient löst.

Weiter ist fraglich, ob es unbedingt nötig ist bzw. einen entscheidenden Vorteil bringt die optimale Lösung zu finden. Es kann davon ausgegangen werden, dass es mehrere Lösungen gibt, deren Wert nur geringfügig schlechter als der der optimalen Lösung ist. Gerade unter diesen Lösungen die optimale zu finden, kann überproportional viel Rechenzeit beanspruchen. Diesem Aufwand stünde unter Umständen aber nur ein sehr geringer Nutzen gegenüber.

Aus diesen Gründen wurde entschieden auf einen Optimierungsalgorithmus zu verzichten. Stattdessen wurde ein heuristisches Verfahren entworfen, das solange eine zulässige Lösung vorliegt eine solche auch findet und in begrenztem Umfang auch optimiert. Genauere Aussagen über die Qualität der gefundenen Lösung lassen sich leider nicht treffen. Die durchgeführten Fallbeispiele zeigen jedoch, dass der Algorithmen zu sinnvollen Ergebnissen führt.

3 Ergebnisse

3.1 Herleitung eines Verfahrens zur Bildung von homogenen Strecken bei Fahrbahnen

3.1.1 Zielsetzung

Die Bildung von Planungseinheiten im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen bildet die Grundlage für die teilsystembezogene Erhaltungsplanung. Aus der netzweiten Zustandserfassung und –bewertung der Fahrbahnoberfläche sind Zustandsdaten von Bewertungseinheiten vorhanden. Diese Bewertungseinheiten müssen für die Planung von Erhaltungsmassnahmen in Planungseinheiten aggregiert werden. Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung eines Verfahrens, das zu einer praxisorientierten, wirtschaftlich optimalen Bildung von Planungseinheiten, sogenannte homogene Strecken, bei Fahrbahnen unter Berücksichtigung von Zustand und daraus folgenden technisch sinnvollen Erhaltungsmassnahmen führt.

3.1.2 Problemstellung

Eine Aggregation von Bewertungseinheiten in Planungseinheiten eines Bauwerks erfolgt weitestgehend aufgrund der vorhandenen Tragwerkstruktur bzw. einer Gliederung bei elektromechanischen Anlagen. Im Gegensatz zu den Teilsystemen Kunstbauten oder Betriebs- und Sicherheitsausrüstung sind im Teilsystem Fahrbahnen die Ausmasse der Tragwerkstruktur des Strassenoberbaus sehr gross. Das heisst, Änderungen im Tragwerk, z.B. aufgrund eines Wechsels von Asphalt- und Betonbauweise, oder eines anderen Strassenoberbautyps, liegen längenbezogen sehr weit auseinander. Aus diesem Grund bilden oftmals Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche eine Grundlage für eine Aggregation.

Den Strassenbetreibern liegen meist Zustandsdaten für definierte Bewertungseinheiten der Fahrbahnoberfläche vor, deren Grösse bzw. Länge für eine Zustandserhebung und -bewertung zweckmässig erscheint. Für eine langfristige Planung von Erhaltungsmassnahmen sind die Längen der vorhandenen Bewertungseinheiten der Fahrbahnoberfläche in der Regel zu klein und damit nicht praktikabel. Deshalb werden aus den Bewertungseinheiten Planungseinheiten gebildet, sogenannte homogene Strecken.

Die Anwendung bekannter Verfahren zur Bildung von Planungseinheiten für die langfristige Erhaltungsplanung von Fahrbahnen zeigt Schwächen in Bezug auf die Streckenlänge. Die in der Praxis gewählten Längen von auszuführenden bzw. ausgeführten Erhaltungsmassnahmen am Strassenoberbau weichen zum Teil erheblich von den Ergebnissen aus der Anwendung der bisherigen Verfahren ab.

3.1.3 Lösungsansatz

Zur Lösung der beschriebenen Problemstellung wird ein neuer Algorithmus zur Bildung von Planungseinheiten entwickelt. Zur Verbesserung der erkannten Schwäche der bisherigen Verfahren in Bezug auf die Länge der gebildeten Planungseinheiten wurden deshalb die Erhaltungsmassnahmen und deren Wirtschaftlichkeit in den Mittelpunkt gestellt.

Es erfolgt somit grundsätzlich eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Das heisst, die Aggregation zu Planungseinheiten erfolgt aus gesamtwirtschaftlicher Sicht. Diese

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird aufgrund von gewählten Erhaltungsmassnahmen und deren Folgekosten in Abhängigkeit vom vorhandenen Zustand der Fahrbahnoberfläche durchgeführt. Die Bildung von Planungseinheiten erfolgt somit massnahmenbezogen und nicht rein zustandsbezogen. Im Folgenden wird dieser Algorithmus detailliert beschrieben.

3.2 Systemdefinition

Damit der Algorithmus durchgeführt werden kann, muss zunächst eine Menge von Bewertungseinheiten, im Folgenden vereinfacht Strecken genannt, gegeben sein, auf denen die Planungseinheiten bzw. homogene Strecken bestimmt werden können. Weiter wird eine Menge von definierten Massnahmen benötigt, die jeweils den Strecken zugeordnet werden können.

Die Strecken und Massnahmen müssen gewisse Bedingungen erfüllen. Diese sind so gewählt, dass sie in der Realität stets erfüllt werden können.

3.2.1 Strecken

Gegeben ist eine Menge von Strecken, die in der realen Welt so aufeinander folgen, dass abgesehen von der ersten und letzten, jede Strecke genau eine Vorgängerin und eine Nachfolgerin hat. Die erste Strecke hat keine Vorgängerin und genau eine Nachfolgerin und die letzte genau eine Vorgängerin und keine Nachfolgerin.

Für jede Strecke ist bekannt, welche andere Strecke ihre Vorgängerin bzw. ihre Nachfolgerin ist. Abb. 10 zeigt ein Beispiel mit 27 benachbarten Strecken, jedes Quadrat repräsentiert also eine Strecke.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Abb. 10 Schematische Darstellung von benachbarten Strecken

Auf dieses Beispiel wird im weiteren Verlauf noch Bezug genommen. Es wird dabei davon ausgegangen, dass jede der 27 Strecken 100m lang ist. Dies muss aber nicht so sein, der Algorithmus kann mit jeder beliebigen Längenverteilung arbeiten.

Für jede Strecke müssen weiter folgende Eigenschaften bekannt sein:

- Länge
- Breite
- DTV und DTV-Steigerung
- Zustandswerte und Zustandsentwicklung (Verfallskurven)
- Nutzerkosten in Abhängigkeit vom Zustand und der Massnahme

Die Berechnung der Nutzerkosten kann dabei z.B. erfolgen, wie in [36] beschrieben. Für die Fallbeispiele wurden hier lediglich die Zeitkosten berücksichtigt.

3.2.2 Massnahmen

Gegeben ist zusätzlich eine Menge von Massnahmen, die auf den Strecken durchgeführt werden können und in Abhängigkeit vom aktuellen Zustand den zukünftigen beeinflussen.

Für jede Massnahme müssen folgende Eigenschaften bekannt sein:

- Kosten (fix und variabel)
- technisch sinnvoller Anwendungsbereich
- Rücksetzwert für das Zustandsmerkmal bzw. den Zustandsindex
- Leistung (in m^2/Tag)
- Mindestlänge
- „optimaler Anwendungsbereich“

Aus der mathematischen Sicht des Modells ist „nichts tun“ ebenfalls eine Massnahme. Der sprachlichen Einfachheit halber wird diese Definition auch in diesem Bericht angewandt. Diese Massnahme ist aber natürlich ein bisschen besonders. Sie hat keine Rücksetzwerte, die Kosten, die Mindestlänge sowie die Leistung sind 0 und der technisch sinnvolle Anwendungsbereich ist das komplette Zustandsspektrum. Diese Massnahme wird mit m_0 bezeichnet.

Die Massnahmen liegen in einer geordneten Reihenfolge von klein nach gross vor. Die Grösse einer Massnahme wird dabei über ihre Mindestlänge definiert, kurze Mindestlänge -> kleine Massnahme, hohe Mindestlänge -> grosse Massnahme. Bei gleicher Mindestlänge erfolgt die Sortierung über die Kosten und wenn auch diese gleich sind über die Leistung. Grundsätzlich kann diese Ordnung auch über einen separaten Kennwert realisiert werden.

Anzahl Zustandsindizes

Je nachdem welche Art von Strassen betrachtet wird, ist der Zustand in unterschiedlichen vielen Zustandsindizes erfasst. Wenn mehr als ein Zustandsindex verwendet wird, müssen natürlich auch Verfallskurven, Rücksetzwerte, etc. entsprechend ausgelegt sein.

Der eigentliche Algorithmus ist völlig unabhängig von der Anzahl der verwendeten Indizes. In der konkreten Umsetzung muss dies aber natürlich berücksichtigt werden. Die genaue Umsetzung ist dabei davon abhängig, wie mit den unterschiedlichen Indizes umgegangen werden soll (sind alle Indizes gleichwertig, gibt es einen Hauptindex, werden die Indizes separat/zusammen betrachtet, etc). Die Darstellung und Beurteilung dieser Möglichkeiten ist nicht Teil dieses Forschungsprojektes, daher wird auch auf die im Algorithmus entstehenden Unterschiede in diesem Bericht nicht näher eingegangen.

Die implementierte Version des Algorithmus verwendet nur einen Index.

Technisch sinnvoller Anwendungsbereich

Der technisch sinnvolle Anwendungsbereich einer Massnahme, beschreibt einen Zustandsbereich, in dem es grundsätzlich sinnvoll ist, diese Massnahme durchzuführen. Unter sinnvoll wird in diesem Fall verstanden, dass allfällige vorhandene Schäden behoben oder zumindest angemessen eingedämmt werden können. Eine Massnahme die mehr macht als notwendig, gilt auch als technisch sinnvoll. Der technisch sinnvolle Anwendungsbereich beginnt also stets beim besten Zustandswert und reicht bis zu einem Zustandswert, bei dem durch die Massnahme gerade eben noch eine Verbesserung erreicht werden kann.

Eine Ausnahme bildet m_0 , aus algorithmischen Gründen ist für diese der komplette Zustandsbereich technisch sinnvoll.

Der technisch sinnvolle Anwendungsbereich wird durch einen oberen Schwellenwert begrenzt. Sobald der Zustand diesen Schwellenwert überschreitet, ist die Massnahme nicht mehr technisch sinnvoll.

Es wird nie eine Massnahme, die auf einer Strecke nicht technisch sinnvoll ist, auf dieser ausgeführt.

Optimaler Anwendungsbereich

Der „optimale Anwendungsbereich“ gibt einen Zustandsbereich an, auf dem die Anwendung der zugehörigen Massnahme als optimal angesehen wird. Die Festlegung dieser Bereiche wurde aus dem Forschungspaket „Massnahmenplanung im EM Fahrbahnen“ abgeleitet.

Natürlich hat auch m_0 einen optimalen Anwendungsbereich.

Die „optimalen Anwendungsbereiche“ der Massnahmen müssen dabei natürlich so gewählt sein, dass sie sich nicht überlappen und den kompletten Bereich vom niedrigsten bis höchsten Wert des Zustandsindex abdecken. Jeder Zustandswert muss also in dem „optimalen Anwendungsbereich“ genau einer Massnahme liegen.

Es kann natürlich auch sein, dass der „optimale Anwendungsbereich“ einer Massnahme leer ist. Dann gibt es keinen Zustand, in dem es sinnvoller ist, diese Massnahme durchzuführen als irgendeine andere.

Für ein Beispiel mit m_0 und vier weiteren Massnahmen könnten die optimalen Anwendungsbereiche wie folgt aussehen. Dabei wird der Zustandsbereich jeweils durch seinen Anfang und sein Ende je Massnahme angegeben (z.B. [Anfang=0, Ende=2.5]):

m_0 -> [0,2]

m_1 -> nie optimal

m_2 -> nie optimal

m_3 -> (2,3.5]

m_4 -> (3.5,5]

3.2.3 Schlechter Zustand

Der „schlechte Zustand“ ist ein Schwellenwert der vom Benutzer gesetzt werden muss. Eine Strecke deren Zustand schlechter als der zugehörige Schwellenwert ist, ist in einem solch schlechten Zustand, dass auf ihr „nichts tun“ keine Alternative mehr ist. Es muss also eine Massnahme durchgeführt werden, die zu einer Zustandsverbesserung führt.

Natürlich muss für diese Massnahme die Mindestlänge eingehalten werden. Es kann also sein, dass durch eine oder mehrere Strecken im schlechten Zustand Massnahmen auf

Strecken erzwungen werden, auf denen eigentlich keine nötig wäre und die nicht zu niedrigeren Kosten führen.

3.2.4 Massnahmenzuordnung

Gesucht ist eine Aufteilung des betrachteten Netzes von Bewertungseinheiten in Planungseinheiten bzw. homogene Strecken auf denen im betrachteten Jahr jeweils die gleiche Massnahme durchgeführt werden kann. Die Auswahl der homogenen Strecken soll dabei derart erfolgen, dass die anfallenden Kosten reduziert werden. Diese homogenen Strecken werden durch den im nächsten Kapitel beschriebenen Algorithmus indirekt geliefert. Das Resultat des Algorithmus ist die Definition einer durchzuführenden Erhaltungsmassnahme für jede betrachtete Strecke. Die Menge dieser Massnahmen wird mit M bezeichnet. Die Massnahmen sind dabei so gewählt, dass sie alle Nebenbedingungen erfüllen. Eine homogene Strecke ergibt sich dann einfach aus aufeinander folgenden Strecken auf denen die gleiche Massnahme vorgeschlagen wird.

Abb. 11 zeigt ein Beispiel für ein solches M . Dargestellt werden die Strecken und in unterschiedlichen Farben die durch M vorgegebenen Massnahmen. Weisse Felder stehen für Strecken auf denen nichts getan wird. In diesem Fall wird die Menge der Strecken also in vier homogene Strecken $\{s_1, \dots, s_6\}$, $\{s_7, \dots, s_{12}\}$, $\{s_{13}, \dots, s_{19}\}$ und $\{s_{20}, \dots, s_{27}\}$ unterteilt.

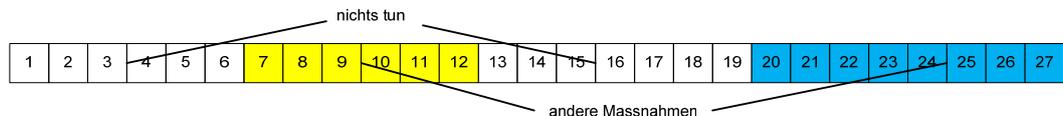


Abb. 11 Eine Menge von Strecken und die durch M zugewiesenen und farblich markierten Massnahmen

Da die homogenen Strecken nur über die ausgeführte Massnahme definiert sind, gelten diese auch nur für das betrachtete Jahr. Bei einer Betrachtung in einem anderen Jahr, kann es zu anderen homogenen Strecken kommen.

3.2.5 Folgekosten

Die Auswahl der Massnahmen ergibt sich über die Suche nach möglichst geringen Kosten. Das Problem, das sich dadurch ergibt, ist dass wenn nur das aktuelle Jahr betrachtet wird stets „Nichts tun“ die günstigste Massnahme ist. Die einzige Ausnahme ist, wenn der Zustand so schlecht ist, dass „nichts tun“ keine zulässige Alternative mehr ist. Um zu verhindern, dass es lediglich Massnahmen an Strecken in einem extrem schlechten Zustand gibt, müssen auch künftig anfallende Kosten berücksichtigt werden.

Um die Folgekosten zu berechnen wird einerseits ein Verfallsmodell des definierten Zustandsmerkmals d.h. Index oder Zustandswert, benötigt und andererseits eine Erhaltungsstrategie.

Das Verfallsmodell gibt an, wie sich der Zustand einer Strecke über die Zeit entwickelt und ist abhängig vom Typ der Strecke, ihrem Alter und ihrer Belastung. Mit Hilfe des Verfallsmodellles kann also aus dem aktuellen Zustand einer Strecke und ihrem Alter der

Zustand an einem beliebigen Punkt in der Zukunft berechnet werden, so lange in der Zwischenzeit keine Massnahmen durchgeführt werden sollen.

Die Folgekosten werden über einen Zeitraum von 40 Jahren betrachtet. Nun ist es aber eher unwahrscheinlich, dass in einem so langen Zeitraum keinerlei Massnahmen durchgeführt werden. Da für alle Massnahmen jedoch bekannt ist, welchen Einfluss sie auf den Zustand einer Strecke haben, kann auch der zukünftige Zustand nach Durchführung einer Massnahme bestimmt werden. Es muss lediglich bekannt sein, wann eine Massnahme durchgeführt werden wird. Dafür ist die Erhaltungsstrategie definiert. Diese ergibt sich aus dem „optimalen Anwendungsbereich“ der für jede Massnahme definiert wird.

Die Erhaltungsstrategie gibt also an, in welchem Zustandsbereich eine definierte Massnahme anzuwenden ist. Die optimalen Anwendungsbereiche zweier Massnahmen überschneiden sich nie. Somit ist eine Massnahme genau dann optimal auf einer Strecke, wenn sich der Zustand der Strecke in dem optimalen Anwendungsbereich der Massnahme befindet. Auf diese Weise kann für jede Strecke und jedes Jahr berechnet werden, in welchem Zustand sie sich gemäss der Erhaltungsstrategie befinden wird und somit auch welche Massnahmen- und Nutzerkosten jeweils anfallen werden. Die Summe dieser Kosten in den 40 auf das aktuelle Jahr folgenden Jahren sind dann die Folgekosten.

Die Folgekosten werden für jede Strecke berechnet. Dabei wird immer nur genau eine Strecke betrachtet und Nebenbedingungen, wie bspw. die minimale Massnahmenlänge, ignoriert. Da die Folgekosten nicht ausgegeben sondern lediglich intern bei der Bestimmung der Massnahmen im aktuellen Jahr benutzt werden sind diese Vereinfachungen zulässig. Die Folgekosten werden natürlich diskontiert.

3.2.6 Netzgesamtkosten

Die Netzgesamtkosten sind die für die Auswahl der Massnahmen relevante Kosten. Sie setzen sich zusammen aus den Massnahmenkosten und Nutzerkosten des aktuellen Jahres sowie den Folgekosten und zwar über alle Strecken gesehen.

Da die Nutzerkosten im aktuellen Jahr nur von den festen Zustandswerten abhängen, sind diese unveränderlich. Die Massnahmenkosten des aktuellen Jahres hängen natürlich von den ausgewählten Massnahmen ab. Und von diesen hängen auch die Zustandsentwicklung und somit die Folgekosten ab.

3.2.7 Weitere Randbedingungen

Je nach Bedarf können noch beliebige weitere Randbedingungen definiert werden. Dabei muss lediglich darauf geachtet werden, dass diese nicht das Finden einer zulässigen Lösung verunmöglichen.

Weitere Randbedingungen würden aber den grundsätzlichen Ablauf des Algorithmus nicht beeinflussen. Da es nicht das Ziel des Forschungsprojektes ist, alle denkbaren Sonderfälle zu beschreiben, wurden nur die entscheidenden Randbedingungen in Bezug auf Zustand und Erhaltungsmassnahmen berücksichtigt.

3.2.8 Ablauf

An dieser Stelle wird der Ablauf sehr allgemein beschrieben. Bei einer tatsächlichen Durchführung müssen jedoch viele Punkte bedacht werden, die bei der Erläuterung des Algorithmus näher erklärt werden (vgl. Kapitel 3.3).

Die grundsätzliche Idee ist, dass es eine Menge von Massnahmen M gibt, die nach und nach so verändert wird, dass jeweils eine Reduzierung der Netzgesamtkosten die Folge ist.

M enthält genauso viele Massnahmen, wie es Strecken gibt. Und jede dieser Massnahmen ist genau einer Strecke zugewiesen. Zu Beginn ist jeder Strecke m_0 zugewiesen, auch den Strecken, die sich in einem schlechten Zustand befinden.

Es werden dann die Massnahmen von klein nach gross durchgegangen. Für jede Massnahme werden alle Strecken betrachtet und es wird überprüft, ob es welche gibt, auf denen es sinnvoller ist, diese Massnahme durchzuführen, als die bisher in M gespeicherte. So wird M nach und nach angepasst. Es kann demnach bspw. passieren, dass sich M mit der Zeit so verändert, dass auf einer Strecke zunächst m_1 dann m_2 und schliesslich m_3 zur Durchführung vorgesehen ist.

Es werden dabei für eine Massnahme nicht alle Strecken gleichzeitig betrachtet. Dafür wird ein sogenanntes Fenster verwendet, das nur den Blick auf einige wenige Strecken gleichzeitig ermöglicht. Dieses Fenster wird von links nach rechts über die Menge der Strecken geschoben. Für jede Position wird ein alternatives M' entworfen, das zunächst eine Kopie von M ist, dann aber für die Massnahmen auf den Strecken im Bereich des Fensters verändert wird. Falls sich durch dieses M' eine Reduktion der Netzgesamtkosten erreichen lässt, wird es als Alternative zu M in Betracht gezogen. Wenn diese Alternative auch noch dem Vergleich mit Alternativen, die gegebenenfalls bei der Betrachtung weiterer Fenster entstehen, standhält, wird M entsprechend angepasst.

In Abb. 12 ist erkennbar, wie das Fenster (grün umrandet) nach und nach einen Blick auf einen anderen Teil der Strecken zulässt. Die für den Algorithmus vorerst „unsichtbaren“ Strecken sind rot überdeckt.

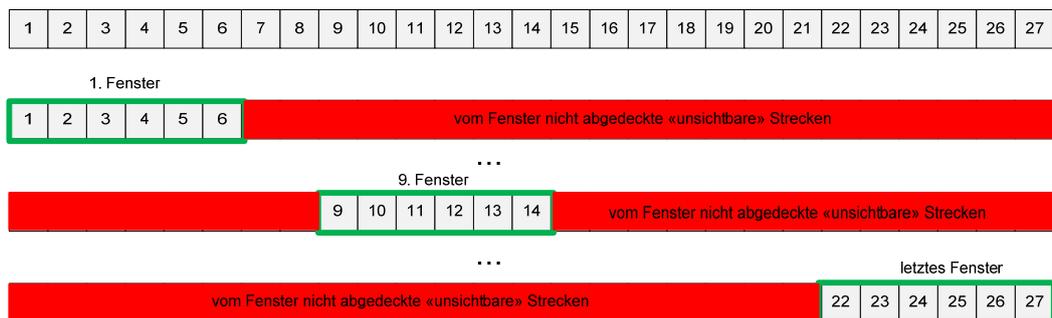


Abb. 12 Das Fenster bewegt sich über die Strecken

Das M , welches nach dem letzten Fenster für die grösste Massnahme entsteht, ist die vom Algorithmus gelieferte Lösung.

Der Algorithmus ist darauf ausgelegt, homogene Strecken für ein betrachtetes Jahr zu finden. Es ist aber natürlich häufig wünschenswert die durchzuführenden Massnahmen für mehrere aufeinanderfolgende Jahre gemeinsam zu bestimmen.

Ausgehend von den bekannten Zustandsdaten und den für das erste betrachtete Jahr bestimmten Massnahmen können über die Rücksetzwerte und Verfallskurven die Zustandsdaten für ein zweites zu betrachtendes Jahr bestimmt werden. Wenn nun der Algorithmus mit diesen Daten als Eingabe ein zweites Mal gestartet wird können die homogenen Strecken für dieses zweite betrachtete Jahr bestimmt werden. Ab dem zweiten Jahr erfolgt dabei ausschliesslich die Berücksichtigung von Massnahmen mit einem optimalen Anwendungsbereich.

Auf diese Weise können die homogenen Strecken für beliebig viele Jahre bestimmt werden. Die Software berechnet sie standardmässig für drei.

3.3 Mathematische Formulierung (Algorithmus)

Wie in Kapitel 3.2.8 dargelegt, werden für jede Massnahme jeweils die Strecken von Anfang bis Ende durchlaufen. Das Vorgehen ist dabei für jede Massnahme grundsätzlich das gleiche. Es ist daher ausreichend diese Schritte einmal zu erläutern. Dies geschieht in Kapitel 3.3.3.

3.3.1 Definitionen

Bevor mit der eigentlichen Erklärung des Algorithmus begonnen werden kann, müssen ein paar Bezeichnungen und Variablen definiert werden:

- m sei die Massnahme für die die Strecken gerade durchlaufen werden
- min_länge sei die Mindestlänge von m
- s_i mit $i \in \{1, \dots, n\}$ sei die i -te Strecke
- laenge_i sei die Länge der i -ten Strecke
- $M(i)$ sei die Massnahme in M die sich auf die i -te Strecke bezieht
- $F_{i,j}$ sei das Fenster das die Betrachtung der Strecken $\{s_i, \dots, s_j\}$ ermöglicht

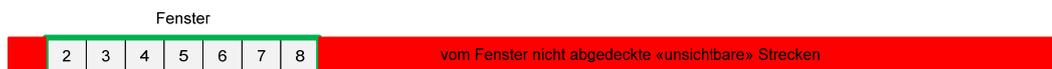


Abb.13 Das Fenster $F_{2,8}$

Geschichte

Wie oben beschrieben, ändert sich die laut M auf einer Strecke vorgesehene Massnahme mit der Zeit. Es gibt Situationen, in denen es wichtig ist zu wissen, welche Massnahme bisher schon einmal auf einer Strecke vorgesehen war. Dafür gibt es die Feld-Variable *Geschichte*. Diese speichert für jede Kombination aus Massnahme und Strecke, ob an irgendeinem Punkt des Algorithmus eine Massnahme m auf einer Strecke s laut M vorgesehen war. Dabei bedeutet $\text{Geschichte}(m,i) = 0$, dass m bisher auf s_i nicht vorgesehen war. $\text{Geschichte}(m,i) = 1$ hingegen zeigt an, dass sie schon einmal vorgesehen war.

3.3.2 Vorbereitungen

Ganz zu Beginn werden M und Geschichte initialisiert. M beinhaltet für jede Strecke m_0 . Also wird auf der zwischenzeitlichen Lösung für alle Strecken m_0 vorgesehen (vgl. Abb.14).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Abb.14 Eine Menge von Strecken jeweils mit der durch das initiale M zugewiesenen m_0

Da dies die initiale Version ist, wurde natürlich eine andere Massnahme bisher noch auf keiner Strecke vorgesehen. Dementsprechend wird Geschichte für m_0 und alle Strecken auf 1 gesetzt und für alle übrigen Massnahmen und Strecken auf 0. (vgl. Gleichung (1)). Das Ergebnis für ein Beispiel mit 27 Strecken und sechs Massnahmen zeigt Tab. 1.

Tab. 1 Beispiel für den Speicher Geschichte bei 27 Strecken und sechs Massnahmen

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
m_0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
m_1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m_2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m_3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m_4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Für Geschichte bei 27 Strecken und sechs Massnahmen gilt

$$\begin{aligned}
 M(i) &= m_0 \forall i \in \{1, \dots, n\} \\
 \text{Geschichte}(m_0, i) &= 1 \forall i \\
 \text{Geschichte}(m, i) &= 0 \forall m \neq m_0 \forall i
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

3.3.3 Für jede Massnahme

Dies Kapitel beschreibt den Teil des Algorithmus der nacheinander für jede Massnahme, beginnend bei der zweitkleinsten und endend bei der grössten, durchlaufen wird. Es wird mit der zweitkleinsten Massnahme begonnen, da ein Durchlauf für m_0 nicht nötig ist

Als erstes wird Netzgesamtkosten(M) für M berechnet. Damit ist ein Kostenreferenzwert gegeben und die Netzgesamtkosten für ein verändertes M' können mit diesem verglichen werden.

Nun kann überprüft werden, ob es Strecken gibt, für die die entsprechende Massnahme in M zu m gewechselt werden sollte. Dies kann nicht einfach für jede Strecke

gesondert gemacht werden, sondern es muss immer ein gewisser Zusammenhang berücksichtigt werden.

Zunächst gilt es dabei min_länge zu berücksichtigen. Um sicherzugehen, dass diese auf keinen Fall unterschritten wird, wird ein Massnahmenwechsel immer mindestens auf so vielen auf einander folgenden Strecken durchgeführt, dass diese Bedingung erfüllt ist. Dabei ist das oben schon erwähnte Fenster behilflich.

Das erste Fenster, das herausgegriffen und genauer betrachtet wird ist $F_{1,a}$. s_a ist dabei die erste Strecke, für die gilt, dass die aufsummierte Länge der Strecken von der ersten bis einschliesslich dieser mindestens min_länge entspricht (vgl. (2)).

$$\sum_{i=1}^a \text{laenge}_i \geq \text{min_laenge} \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{a-1} \text{laenge}_i < \text{min_laenge}$$

Für jede Strecke in $F_{1,a}$ wird nun überprüft, ob m auf ihr technisch sinnvoll ist. Wenn dies für alle Strecken zutrifft, wird mit der Betrachtung von $F_{1,a}$ fortgefahren.

Als nächstes wird M_1 erstellt. In M_1 werden für s_1 bis s_a die zugehörigen Massnahmen auf m gesetzt, ansonsten entspricht es M (vgl. (3)). Abb. 15 zeigt eine mögliche Entwicklung von M_1 aus M für das Fenster $F_{1,6}$. Auf den ersten sechs Strecken ändert sich, angezeigt durch eine andere Farbe, die Massnahme, während der Rest identisch ist.

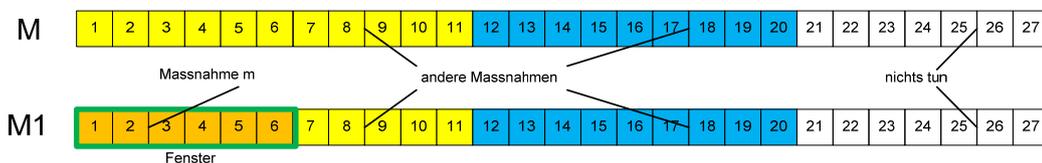


Abb. 15 Referenz M und daraus erstelltes M_1 mit Änderungen in $F_{1,6}$

$$M_1(i) = m \forall 1 \leq i \leq a \wedge M_1(i) = M(i) \forall i > a \tag{3}$$

Nun werden die Strecken $\{s_{a+1}, \dots, s_b\}$ betrachtet. Wobei s_b die erste Strecke ist, für die gilt $M_1(a+1) = M_1(b)$ aber gleichzeitig $M_1(a+1) \neq M_1(b+1)$. $\{s_{a+1}, \dots, s_b\}$ ist also die homogene Strecke, die sich in M_1 rechts an a anschliesst. Die auf dieser homogenen Strecke vorgesehene Massnahme sei m' . Abb. 16 zeigt ein mögliches M_1 für $a=6$ und $b=11$. Die Strecken nach s_{12} sind rot verdeckt, da sie an dieser Stelle nicht betrachtet werden.

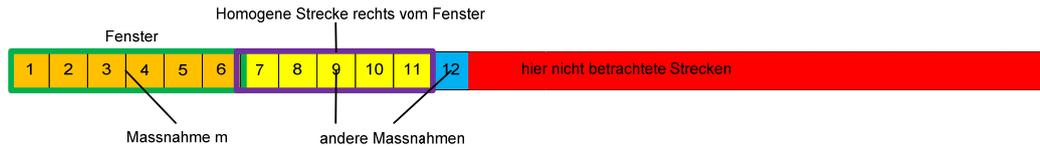


Abb. 16 Die homogene Strecke rechts von $F_{1,6}$

So wie M_1 gebildet wurde, kann es sein, dass die Gesamtlänge von $\{s_{a+1}, \dots, s_b\}$ kleiner als die Mindestlänge von m' ist, da ursprünglich, d.h. in M , bspw. noch auf s_a m' vorgesehen und die homogene Strecke so um eine Strecke länger war. Es muss also überprüft werden, ob die Mindestlänge noch eingehalten wird. Falls dies nicht der Fall ist, muss M_1 angepasst werden. Dies wird automatisch durch den Algorithmus durchgeführt.

Gesucht wird dann eine Massnahme, die auf allen Strecken in $\{s_{a+1}, \dots, s_b\}$ schon einmal ausgewählt wurde und deren Mindestlänge nicht grösser als die Gesamtlänge von $\{s_{a+1}, \dots, s_b\}$ ist. Dazu hilft die Variable *Geschichte*. Die grösste Massnahme m'' für die gilt, dass $\text{Geschichte}(m'', i) = 1$ für alle Strecken $\{s_{a+1}, \dots, s_b\}$ und deren Mindestlänge nicht grösser als die Gesamtlänge dieser Strecken ist, wird als Alternative genommen. Dementsprechend wird M_1 für die Strecken $\{s_{a+1}, \dots, s_b\}$ auf m'' gesetzt (vgl. Gleichung (4)).

$$M_1(i) = m'' \forall i \in \{a+1, \dots, b\} \quad (4)$$

Eine mögliche Belegung für *Geschichte* findet sich in Tab. 2. Bezugnehmend auf das Beispiel in Abb. 16 sind lediglich die Werte für $\{s_7, \dots, s_{11}\}$ angegeben. Die Mindestlänge für die Massnahmen m_3 , m_4 und m_5 sei sechs und für die übrigen Massnahmen fünf. Dann würde in diesem Fall M_1 für die Strecken $\{s_7, \dots, s_{11}\}$ auf m_2 gesetzt.

Tab. 2 *Geschichte* für $\{s_7, \dots, s_{11}\}$

	7	8	9	10	11
m_0	1	1	1	1	1
m_1	0	0	0	0	0
m_2	1	1	1	1	1
m_3	1	1	1	1	1
m_4	0	0	0	0	0
m_5	0	0	0	0	0

Nun können die Netzgesamtkosten(M_1) berechnet werden. Falls $\text{Netzgesamtkosten}(M) \geq \text{Netzgesamtkosten}(M_1)$ ergibt sich durch die Veränderung der Massnahmenmenge keine Verschlechterung in Bezug auf die Netzgesamtkosten. Es wird daher $F_{1,a}$ weiter verwendet. Es wird ebenfalls weiter verwendet, wenn zwar $\text{Netzgesamtkosten}(M) < \text{Netzgesamtkosten}(M_1)$ es aber in $F_{1,a}$ mindestens eine Strecke gibt, die im schlechten Zustand ist und auf der bisher m_0 durchgeführt wurde. Auf einer Strecke, die im schlechten Zustand ist, darf ja, wie oben erläutert, m_0 nicht gewählt werden. Daher muss hier M_1 als Alternative weiter zur Verfügung stehen, auch wenn es zu höheren Kosten führen sollte.

Falls jedoch $\text{Netzgesamtkosten}(M) < \text{Netzgesamtkosten}(M_1)$ und keine Strecke in $F_{1,a}$ im schlechten Zustand ist, wird M_1 verworfen. M_1 wird ebenfalls verworfen, auch wenn $\text{Netzgesamtkosten}(M) \geq \text{Netzgesamtkosten}(M_1)$ gilt, falls mindestens eine Strecke $\{s_{a+1}, \dots, s_b\}$ im schlechten Zustand ist und $m'' = m_0$ ist. Denn in diesem Fall würde auf einer Strecke, auf der eine zu Verbesserungen führende Massnahme durchgeführt werden muss, die durchzuführende Massnahme auf m_0 zurückgesetzt.

Abb. 17 zeigt ein Beispiel für M_1 bei dem im Anschluss an das Fenster die Strecken $\{s_7, \dots, s_{11}\}$ auf m_0 zurück gesetzt wurde. Da sich jedoch s_8 und s_9 in einem schlechten Zustand (rote Schrift) befinden, ist M_1 auch trotz geringerer Kosten als M ungünstig und wird verworfen.

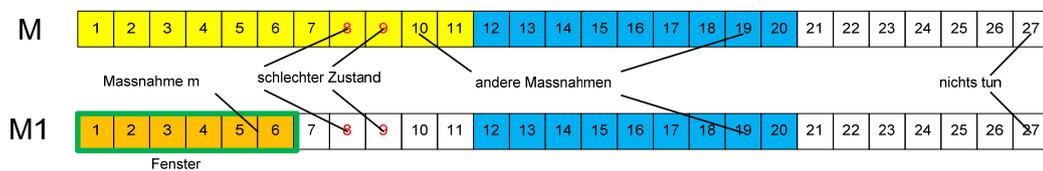


Abb. 17 Referenz M und daraus erstelltes M_1 mit Änderungen in $F_{1,6}$ sowie den folgenden Strecken $\{s_7, \dots, s_{11}\}$

Durch die Struktur des Algorithmus ist es nicht möglich, dass sowohl eine Strecke in $F_{1,a}$ im schlechten Zustand ist und bisher m_0 auf ihr ausgeführt wurde, als auch eine Strecke in $\{s_{a+1}, \dots, s_b\}$ im schlechten Zustand ist und auf m_0 zurückgesetzt würde.

Wenn M_1 nicht verworfen wurde, wird nun überprüft, ob eine Ausdehnung der homogenen Strecke zu einer weiteren Verringerung der Netzgesamtkosten führen würde. Dafür wird $F_{1,a}$ um eine Strecke zu $F_{1,a+1}$ erweitert.



Abb. 18 $F_{1,6}$ wird verlängert zu $F_{1,7}$

Auch für diese neue Strecke s_{a+1} wird zunächst überprüft, ob m auf ihr technisch sinnvoll ist. Wenn ja wird M_1' gebildet, wobei M_1' der Massnahmenbelegung M_1 entspricht bis auf $M_1'(a+1) = m$. Nun muss auch an dieser Stelle die rechts von s_{a+1} liegende homogene Strecke betrachtet werden. Diese deckt nun die Strecken $\{a+2, \dots, b'\}$ ab. Falls für die auf diesen Strecken vorgesehene Massnahme die Mindestlänge unterschritten wird, muss, wie oben beschrieben, eine alternative Massnahme gefunden werden. Falls so die auf einer Strecke im schlechten Zustand vorgesehene Massnahme auf m_0 zurückgesetzt würde, wird M_1' verworfen. Wenn dies nicht der Fall ist und $\text{Netzgesamtkosten}(M_1) \geq \text{Netzgesamtkosten}(M_1')$ oder s_{a+1} im schlechten Zustand und $M_1(a+1) = m_0$ wird M_1 durch M_1' ersetzt (vgl. **Error! Reference source not found.**).

$$M_1(o) = M_1'(o) \forall o \quad (5)$$

Anderenfalls wird M_1' auch verworfen.

Danach wird $F_{1,a+1}$ zu $F_{1,a+2}$ erweitert und die gleichen Schritte auf das neue Fenster angewandt. Solange M_1' nicht verworfen wird oder die letzte Strecke erreicht ist, wird dieses Vorgehen wiederholt und das Fenster Schritt für Schritt um eine Strecke erweitert.



Abb. 19 Schrittweise Erweiterung des Fensters

Sobald ein M_1' verworfen wurde, ist die Betrachtung des ersten Fensters abgeschlossen. Falls M_1 nicht während der Betrachtung verworfen wurde, ist es nun eine potentielle Alternative, die gegenüber M bevorzugt wird. M_1 wird daher gespeichert. Zusätzlich wird zu M_1 noch der Wert ende_1 gespeichert. ende_1 bezeichnet dabei die Strecke, die zuletzt zu dem Fenster hinzugefügt wurde und zu einer Erfüllung der Bedingungen geführt hat.

Es kann noch sein, dass nach der Betrachtung weiterer Fenster M_1 doch noch verworfen wird, da ein anderes M_1 zu noch besseren Resultaten führt. Daher bleibt M vorerst weiter der Referenzwert. Nun erfolgt der Übergang zum nächsten Fenster. Dieses

beginnt an s_2 . Da alle Strecken im Beispiel die gleiche Länge haben, endet es dementsprechend an s_{a+1} . Das nächste Fenster ist also $F_{2,a+1}$.

Das Vorgehen für dieses und die darauf folgenden Fenster ist prinzipiell genauso, wie beim ersten. Nach der Bildung eines neuen M_i muss lediglich bedacht werden, dass nicht nur rechts vom Fenster die Mindestlänge unterschritten werden kann, sondern auch links. Das Vorgehen auf der linken Seite ist aber identisch zu dem auf der rechten Seite, mit dem kleinen Unterschied, dass die homogene Strecke innerhalb des Fensters nicht zwangsläufig am linken Rand des Fensters endet, sondern auch über dies hinausgehen kann. In so einem Fall ist natürlich die Mindestlänge auf jeden Fall eingehalten.

Abb. 20 zeigt zwei Beispiele, wie die homogenen Strecken links und rechts des Fensters aussehen können. Im ersten Beispiel ist auf der homogenen Strecke links des Fensters die gleiche Massnahme vorgesehen wie im Fenster. Eine Überprüfung der Einhaltung der Mindestlänge ist also nicht nötig. Im zweiten Fall hingegen ist die Überprüfung notwendig.

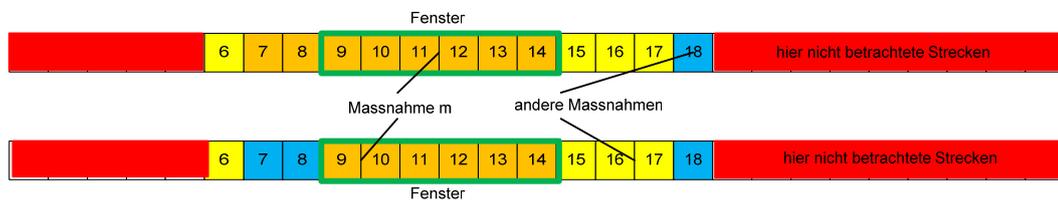


Abb. 20 Schrittweise Erweiterung des Fensters

Ab dem zweiten Fenster kann auch ein allfällig nicht verworfenes M_i unter Umständen nicht mehr einfach nur gespeichert werden, da möglicherweise bereits ein oder zwei gespeicherte Fenster vorliegen. Falls kein weiteres M_j vorliegt, kann M_i als potentielle Alternative zu M gespeichert werden.

Wenn jedoch bereits ein gespeichertes M_j vorliegt, ist klar, dass es sich auf das Fenster F_{j,end_j} bezieht. Für F_{j,end_j} gilt dann, dass es sich mit F_{i,end_i} überschneidet. M_i und M_j sind somit konkurrierende Alternativen und es muss entschieden werden, welche die bessere ist. Wenn sogar zwei gespeicherte Fenster M_j und M_k vorliegen, ist es nochmal unterschiedlich. Es müssen also noch zwei weitere Fälle unterschieden werden.

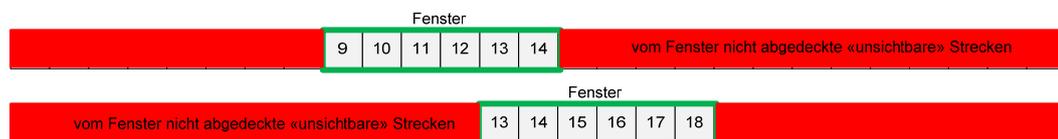


Abb. 21 F_{i,end_i} und F_{j,end_j} überschneiden sich

Für den Fall, dass ein gespeichertes M_j vorliegt:

Bedingt durch die Reihenfolge der Abarbeitung gilt immer $i \geq j$.

Zuerst wird überprüft, ob $\text{ende}_i \leq \text{ende}_j$. Wenn ja ist F_{i,ende_i} eine Teilmenge von F_{j,ende_j} . Es reicht also die Netzgesamtkosten zu vergleichen um herauszufinden, welche Alternative die bessere ist. Wenn $\text{Netzgesamtkosten}(M_j) > \text{Netzgesamtkosten}(M_i)$ gilt, wird M_j gelöscht und M_i gespeichert. Anderenfalls wird M_i verworfen und M_j bleibt gespeichert.

Wenn hingegen $\text{ende}_i > \text{ende}_j$ ist, wird ein neues M_v gebildet, dass quasi eine Vereinigung aus M_i und M_j darstellt. Für den Bereich, in dem sich M_i und M_j überschneiden, sind diese natürlich identisch. Für die Strecken vor s_i entspricht M_v dem gespeicherten M_j und für die übrigen dem neuen M_i (vgl. (6)).

$$\begin{aligned} M_v(o) &= M_j(o) \forall o < i \\ M_v(o) &= M_i(o) \forall o \geq i \end{aligned} \tag{6}$$

In Abb. 22 wird die Bildung der Vereinigung an einem Beispiel verdeutlicht.

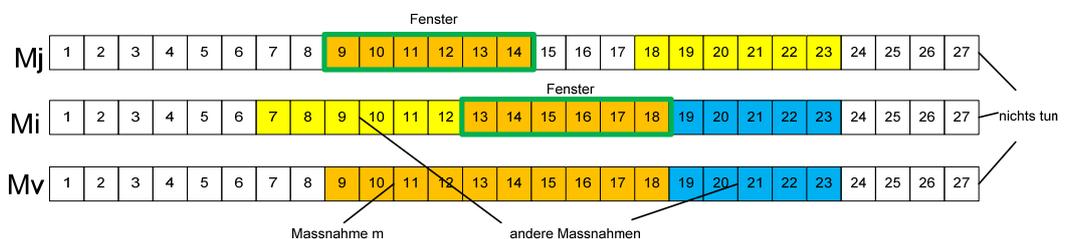


Abb. 22 Bildung von M_v aus M_i und M_j

Nun werden für alle drei Alternativen die Netzgesamtkosten berechnet. Falls M_j die geringsten Netzgesamtkosten hat, werden M_i und M_v verworfen. Falls hingegen die von M_i am geringsten sind, wird M_j gelöscht und stattdessen M_i gespeichert. Wenn jedoch M_v die geringsten Netzgesamtkosten hat, ist das Vorgehen geringfügig unterschiedlich. In diesem Fall wird nicht M_v gespeichert, dies wird nämlich verworfen. Stattdessen wird zusätzlich zu M_j noch M_i gespeichert.

Es gibt jedoch noch eine Sonderregel. Wenn auf einer Strecke s_o , die in einem schlechten Zustand ist, in M_j lediglich m_o vorgesehen wird, in M_i aber eine andere Massnahme, so darf M_i nicht verworfen werden. Die Entscheidung fällt dann nur

zwischen M_i und M_v . Bezogen auf das Beispiel in Abb. 22 hiesse das, wenn eine Strecke aus $\{s_{15}, s_{16}, s_{17}\}$ im schlechten Zustand ist, darf M_i nicht verworfen werden.

Für den Fall, dass gespeicherte M_j und M_k mit $j < k$ und $\text{ende}_j < \text{ende}_k$ vorliegen:

Es gilt immer, dass $k \leq \text{ende}_j$ und $i \leq \text{ende}_j$. Weiter gilt, dass es nur dann zwei gespeicherte M geben kann, wenn bei einer vorangegangenen Überprüfung die „Vereinigung“ von M_j und M_k die geringsten Netzgesamtkosten hatte.

Als erstes wird überprüft, ob $\text{ende}_k \geq \text{ende}_i$. Wenn dies zutrifft, ist F_{i, ende_i} eine Teilmenge von F_{k, ende_k} . Da sich aber F_{i, ende_i} und F_{j, ende_j} überschneiden und in einem vorigen Schritt festgestellt wurde, dass die „Vereinigung“ von M_j und M_k die geringsten Netzgesamtkosten hat, kann ein Austausch von M_k und M_i zu keinen Verbesserungen führen und M_i wird verworfen.

Wenn aber $\text{ende}_k < \text{ende}_i$ werden M_{v1} und M_{v2} als Vereinigung von M_i, M_j bzw. M_j, M_k gebildet. Die Bildung der Vereinigung erfolgt dabei genauso, wie weiter oben bereits beschrieben. Für diese beiden neuen Alternativen werden dann die Netzgesamtkosten berechnet.

Falls $\text{Netzgesamtkosten}(M_{v1}) < \text{Netzgesamtkosten}(M_{v2})$ wird M_k gelöscht und stattdessen M_i gespeichert. Anderenfalls wird M_i verworfen.

Auch hier gilt wieder die Sonderregel, dass M_i nicht verworfen wird, falls in ihm auf einer Strecke im schlechten Zustand erstmals eine andere Massnahme als m_0 vorgesehen ist.

Damit ist die Berechnung der Alternativen abgeschlossen. Nun wird noch überprüft, ob $\text{ende}_j < i+1$ ist. Wenn ja, kann es keine Überschneidung von F_{j, ende_j} mit irgendeinem, der im Verlauf des Algorithmus für m_i noch zu betrachtenden Fenster geben.

Verdeutlicht wird dies in Abb. 23. Sie zeigt beispielhafte Fenster für gespeicherte M_i (mit $i = 14$, blau umrandet) und M_j (mit $j = 9$, grün umrandet). Die violett markierte Strecke s_{15} ist also in diesem Fall die Strecke, an der $(i + 1)$ -ten Position.

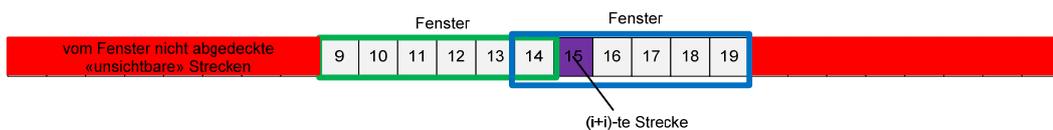


Abb. 23 M_i und M_j im Verhältnis zu s_{i+1}

M_j kann in so einem Fall nicht mehr gelöscht werden. M_j ist somit nicht mehr nur eine potentielle Alternative sondern eine akzeptierte Zwischenlösung. Das heisst, dass die Variable Geschichte für die Strecken, die sich in $F_{j,ende_j}$ befinden, verändert werden muss. Für alle Strecken $\{s_j, \dots, s_{ende_j}\}$ muss zunächst die Massnahme m' bestimmt werden, die laut M bisher auf ihnen vorgesehen war. Dann wird Geschichte von m' und der entsprechenden Strecke auf 1 gesetzt (vgl. (7)).

$$\text{Geschichte}(m', o) = 1 \forall j \leq o \leq \text{ende}_j \wedge M(o) = m' \quad (7)$$

Danach wird M durch M_j ersetzt (vgl. (8)).

$$M(o) = M_j(o) \forall o \quad (8)$$

Dann kann M_j gelöscht werden.

Falls es noch ein gespeichertes M_k gibt, ist es, wie oben bereits erwähnt, klar, dass sich dieses mit M_j überschneidet.

Da aber M_j die neue Referenz ist, unterscheidet sich M_k von dieser nicht mehr im gleichen Fenster wie bisher. Es wird daher ein neues M_{ende_j+1} gebildet. Dieses entspricht bis zu der Strecke ende_j , die auch das Ende der Überschneidung von M_j und M_k darstellt, dem neuen M und danach M_k . M_k wird dann gelöscht.

$$\begin{aligned} M_{\text{ende}_j+1}(o) &= M(o) \forall o < \text{ende}_j + 1 \\ M_{\text{ende}_j+1}(o) &= M_k(o) \forall o \geq \text{ende}_j + 1 \end{aligned} \quad (9)$$

Abb. 24 zeigt die M_{14} und M_9 für das Beispiel aus Abb. 23.

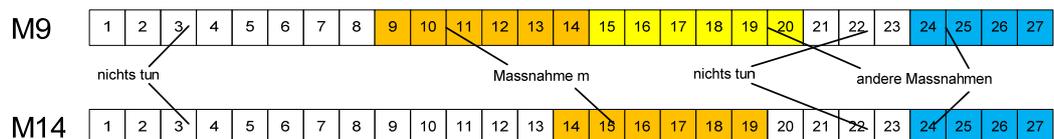


Abb. 24 M_9 und M_{14} für Beispiel aus Abb. 23

In dem Beispiel aus den Abbildungen, kann $F_{9,14}$ sich nicht mehr mit zukünftige Fenster überschneiden. Daher wird M_9 das neue M . Als Konsequenz daraus wird M_{14} wie beschrieben zu M_{15} umgestaltet. Das Ergebnis und das zugehörige Fenster zeigt Abb. 25.

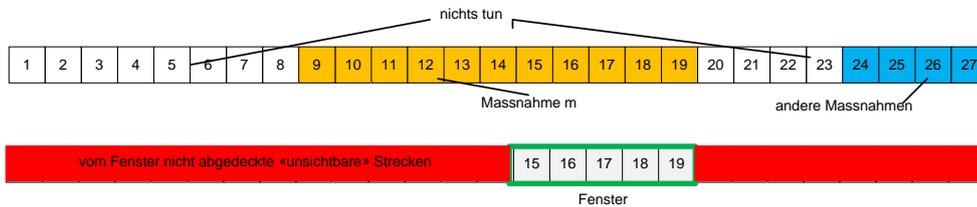


Abb. 25 M_{15} und das neue $F_{15,ende_{14}}$

Das letzte Fenster, das betrachtet wird, ist das Fenster $F_{e,n}$. Wobei n die letzte Strecke ist und e die Strecke, für die gilt, dass die Gesamtlänge der Strecken $\{e, \dots, n\}$ mindestens so gross, wie die Mindestlänge von m ist. Das bedeutet auch, dass die Gesamtlänge der Strecken $\{e+1, \dots, n\}$ kleiner ist als die Mindestlänge von m .

Abb. 26 zeigt das letzte Fenster in diesem Fall für $e = 22$.



Abb. 26 Das letzte Fenster

Am Ende der Betrachtung des letzten Fensters kann es dann noch ein oder zwei gespeicherte potentielle Alternativen geben. Wenn es eine gibt, wird M durch diese ersetzt. Wenn es hingegen zwei gibt, wird M durch die Vereinigung dieser zwei ersetzt, wobei die Vereinigung, wie oben beschrieben, gebildet wird.

3.3.4 Kleine Lücke

So wie der Algorithmus aufgebaut ist, kann es passieren, dass nach einem kompletten Durchlauf für alle Massnahmen eine kleine Lücke in einem relativ schlechten Zustand entsteht.

Eine Lücke ist eine homogene Strecke, auf der die Massnahme m_0 durchgeführt wird. Eine Lücke wird als klein bezeichnet, wenn ihre Gesamtlänge so kurz ist, dass sie kürzer als die Mindestlänge jeder Massnahme, mit Ausnahme von m_0 , ist.

Eine Lücke ist in einem relativ schlechten Zustand, wenn sie mindestens eine Strecke enthält, auf der, bei Anwendung der auf den optimalen Anwendungsbereichen

beruhenden Erhaltungsstrategie, in den nächsten fünf Jahren eine Massnahme durchgeführt werden muss.

Da davon ausgegangen werden kann, dass auf den homogenen Strecken links und rechts der Lücke nicht in den nächsten fünf Jahren schon wieder eine Massnahme durchgeführt werden muss, ist jetzt schon klar, dass dann eine Massnahme auch auf Strecken durchgeführt werden muss, auf denen vor kurzem erst eine durchgeführt wurde. Dies ist natürlich nicht gewünscht. Daher wird die Lücke aufgefüllt, d.h. M wird so angepasst, dass auf den Strecken der Lücke eine andere Massnahme als m_0 vorgeschlagen wird. Zur Auswahl stehen hierbei die auf den homogenen Strecken links und rechts der Lücke vorgeschlagenen Massnahmen. Falls es zwei unterschiedliche sind, wird jene genommen, welche zu niedrigeren Netzgesamtkosten führt.

Das in Abb. 27 präsentierte beispielhafte M hat bei einer angenommenen minimalen Mindestlänge von 400m zwei kleine Lücken. Diese sind (s_{13}, s_{14}) und (s_{25}, s_{26}, s_{27}) . Aber nur die erste ist in einem relativ schlechten Zustand, da auf s_{13} (rote Schrift) in den nächsten fünf Jahren gemäss Erhaltungsstrategie eine Massnahme ausgeführt werden muss. Es muss nun also entschieden werden, ob auf (s_{13}, s_{14}) die orangene oder die gelbe Massnahme durchgeführt werden soll.

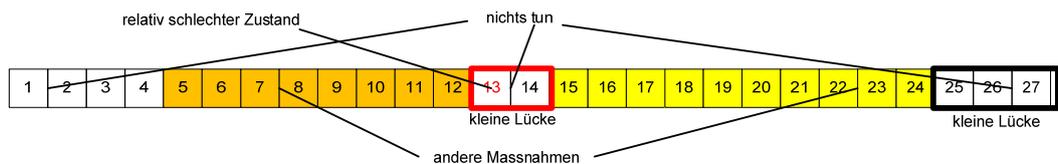


Abb. 27 Zwei kleine Lücken

Falls eine kleine Lücke generell unerwünscht sein sollte, kann auch leicht die zusätzliche Bedingung des relativ schlechten Zustands entfernt werden. Der Algorithmus wird dann alle kleinen Lücken in der oben beschriebenen Art und Weise beseitigen.

4 Anwendung des Algorithmus an Fallbeispielen

4.1 Auswahl der Fallbeispiele

4.1.1 Geographische Lage und verkehrstechnische Bedeutung

Für die Anwendung des Algorithmus wurden zwei Streckenbereiche auf Nationalstrassen ausgewählt (vgl. Abb. 28). Dies betrifft folgende Kilometrierungen:

- N13-: km 0 – km 21 (Verkehrsrichtung entgegengesetzt der Kilometrierung)
- N2-: km 225 – km 265 (Verkehrsrichtung entgegengesetzt der Kilometrierung)



Abb. 28 Auswahl von Nationalstrassenabschnitten für 2 Fallbeispiele (Quelle: <http://map.search.ch/>, 10.10.2011)

Beide Streckenbereiche unterscheiden sich in Bezug auf ihre Verkehrsbelastung und daraus abgeleitet in ihrer verkehrstechnischen Bedeutung. Die folgende Abbildung (vgl. Abb. 29) zeigt die Verkehrsbelastungen über die gesamte Fahrbahn (beide Verkehrsrichtungen) im Jahr 2009 und der daraus hervorgehenden Bedeutung für den Strassennutzer. Es zeigt sich, dass der Streckenbereich auf der N2 eine mehr als doppelt so grosse Verkehrsbelastung hat wie der berücksichtigte Bereich der N13. Gleichzeitig ist die Verkehrsbelastung im Vergleich zum Jahr 2008 auf der N13 um 8.5 % und auf der N2 um ca. 3 % gestiegen.

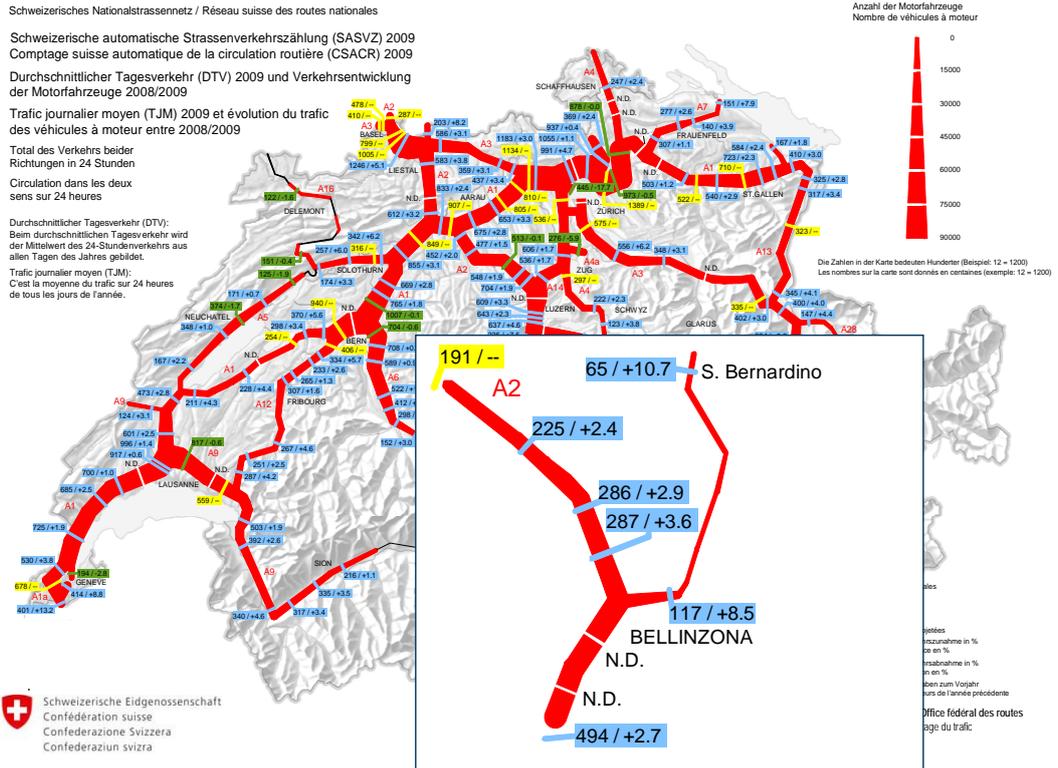


Abb. 29 Verkehrsbelastungen im schweizerischen Nationalstrassennetz (Quelle: <http://www.astra.admin.ch/verkehrsdaten/00299/00301/00364/index.html?lang=de>, 10.10.2011)

4.1.2 Zustandsdaten und Zustandsentwicklung der Fahrbahnoberfläche

Erzeugte Zustandsdaten

Für die Fallbeispiele wurde ein künstlicher Index I_x generiert. Diese Daten sind in den folgenden Diagrammen in Abb. 30 und Abb. 31 dargestellt. Dabei zeigt sich jeweils ein unterschiedliches Zustandsniveau. Dieses ist im Bereich der Nationalstrasse N13 in negativer Kilometrierungsrichtung um etwa 2-3 Zustandsklassen schlechter als auf der Nationalstrasse N2 in negativer Kilometrierungsrichtung. Damit erfolgt die Anwendung des Algorithmus bei einem Streckenbereich mit gutem und einem Streckenbereich mit mittlerem und kritischen bis zum Teil schlechten Zustandsniveau.

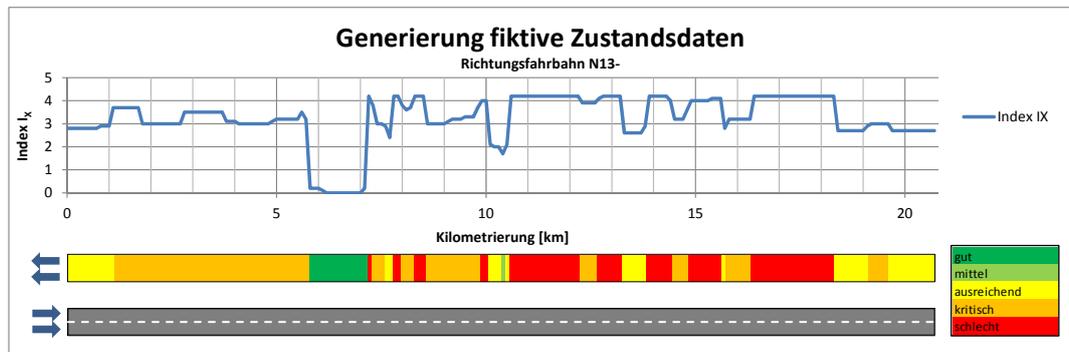


Abb. 30 Fiktive Zustandsdaten Index I_x für das Fallbeispiel der Richtungsfahrbahn N13-

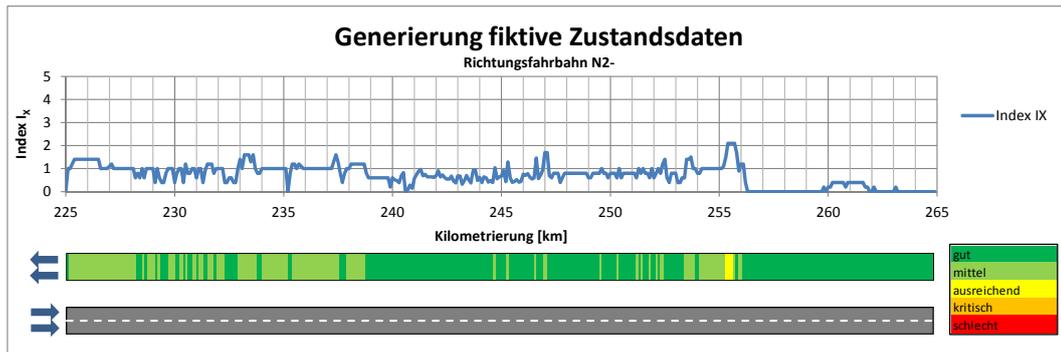


Abb. 31 Fiktive Zustandsdaten Index I_x für das Fallbeispiel der Richtungsfahrbahn N2-

Prognosemodell

Die Entwicklung des Zustands der einzelnen Bewertungseinheiten wird für die Berechnungen mit einem einfachen linearen deterministischen Prognosemodell in Abhängigkeit vom Alter der Fahrbahnoberfläche simuliert. Dabei erfolgt bei jährlicher Berechnung der Kennwerte eine Zustandsverschlechterung ab dem 2. „Lebensjahr“ der Fahrbahnoberfläche, wie die folgende Abbildung zeigt (vgl. Abb. 32).

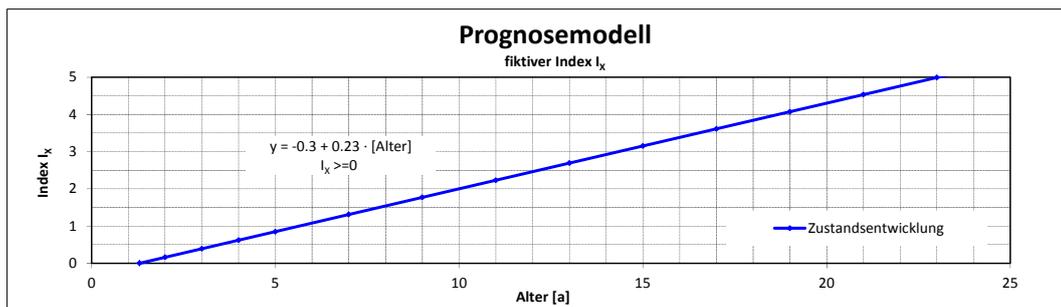


Abb. 32 Verwendetes Prognosemodell bei der Bildung von homogenen Strecken der Fallbeispiele

Bislang ist der Algorithmus auf deterministische Prognosemodelle, wie diese im Bereich der Fahrbahnoberfläche üblich sind, ausgelegt. Dieses wird jeweilig durch eine mathematische Gleichung ausgedrückt und dadurch bei den Berechnungen berücksichtigt.

4.1.3 Erhaltungsmassnahmen

Gemäss Kapitel 3 sind für unterschiedliche Attribute für Erhaltungsmassnahmen (diese wurden im Rahmen der Fallbeispiele frei ausgewählt und definiert) in Bezug auf Mindestlänge, Eingreifgrenzen, Auswirkungen auf den Zustand sowie Leistungs- und Kostenkenngrössen für Typen von Erhaltungsmassnahmen zu definieren. In der folgenden Tabelle (vgl. Tab. 3) werden für die Berechnung einer ersten Variante V1 diese Attribute für die in den Fallbeispielen definierten typisierten Erhaltungsmassnahmen aufgeführt. Diese beziehen sich auf einen fiktiven Index I_x . Bei einer Anwendung sind diese Werte in Abhängigkeit der gewählten Typen von Erhaltungsmassnahmen und in Abhängigkeit der real erhobenen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche sorgfältig zu definieren. Für eine erste überschlägliche Annahme können diese Kennwerte auch aus [30] abgeleitet werden.

Wenn möglich sollten diese Kennwerte anschliessend anhand von eigenen Daten von ausgeführten Erhaltungsmassnahmen plausibilisiert werden. Die in [30] abgeleitete Kennwerte von typisierten Erhaltungsmassnahmen stellen eine erste Analyse von Erhaltungsmassnahmen in der Schweiz dar. Grundsätzlich sollte jeder Strassenbetreiber im eigenen Strassennetz durchgeführte Erhaltungsmassnahmen systematisch erfassen und einerseits eine Kosten- und zusätzlich eine Wirksamkeitsanalyse durchführen. Dadurch sind abgestützte Aussagen und Ansätze bzw. Randbedingungen für Erhaltungsmassnahmen im betrachteten Strassennetz möglich.

Tab. 3 Kennwerte für die im Rahmen der Fallbeispiele in Bezug auf den fiktiven Index I_x beispielhaft definierten Typen von Erhaltungsmassnahmen

ID	Name	Mindestlänge [m]	Obere Grenze	Rücksetzwert relativ absolut (0-5)	Leistung (+/-) [m ² /Tag]	Massnahmenkosten		Optimale Anwendung	
						Fix [CHF]	Variabel [CHF/m ²]	Untere Grenze	Obere Grenze
0	Nichtstun	0	-	-	-	-	-	0	3
1	DSK 15mm	500	2	-1	4000	3500	6.2	-	-
2	DS tief 40mm	1000	4	-2	4000	5100	30.3	-	-
3	DS/BS/TS 200mm	1500	4.5	1	1000	9600	108.8	3	4
4	Ern 600mm	2000	5	0	300	8000	143.6	4	5

Die Kennwerte aus der obigen Tabelle (vgl. Tab. 3) werden nach der ersten Variantenrechnung an verschiedenen Stellen abgeändert und mit dem veränderten Input erfolgt eine erneute Berechnung von Planungseinheiten durch den Algorithmus. Dadurch soll die Sensitivität der einzelnen Kennwerte aufgezeigt werden.

4.1.4 Kostenkenngrössen

Wie in Kapitel 2.4.2 erläutert, wird die Kostenstruktur an [35] und der darin beschriebenen Gesamtkosten für die Baustellenplanung angelehnt. Die folgende Abbildung zeigt die für die Fallbeispiele berücksichtigten Kostenkenngrössen aus [35] durch die grünen Markierungen (vgl. Abb. 33).

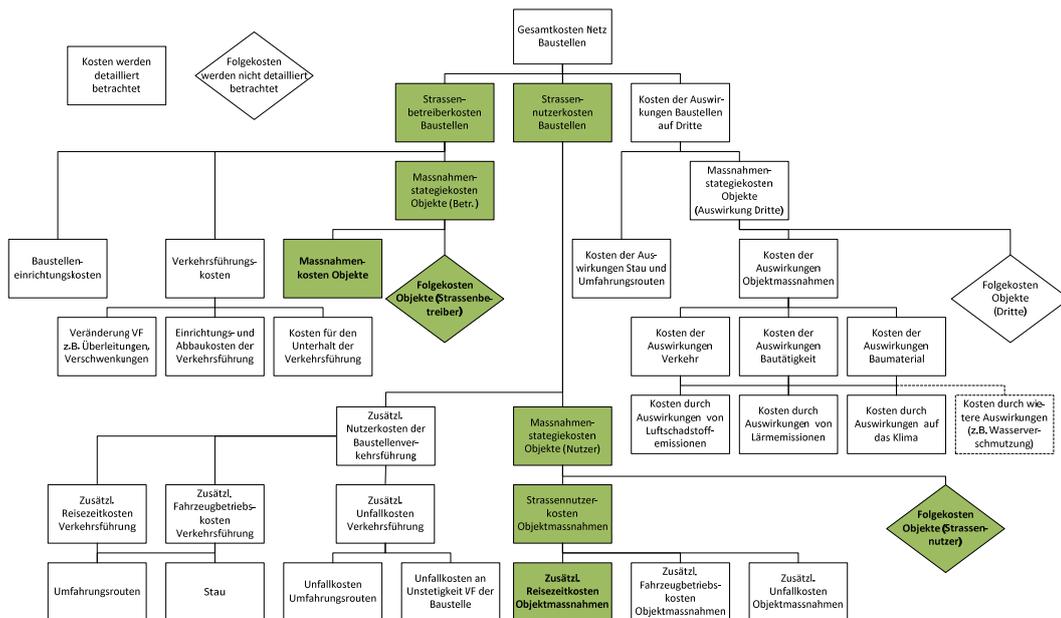


Abb. 33 In den Berechnung verwendete Kostenkenngrössen für die Bildung der Gesamtkosten (vgl. [35])

Strassenbetreiberkosten

Vereinfachend für die Fallbeispiele erfolgt der Ansatz der in Tab. 3 aufgeführten Kosten der typisierten Erhaltungsmassnahmen, d.h. fixer und variabler Teil der Massnahmenkosten. Liegen weitere Objektkosten für Erhaltungsmassnahmen vor, z.B. Planungskosten, Verkehrsführungskosten usw., welche an den Planungs- bzw. Bewertungseinheiten angesetzt werden können und keine Baustellenkosten gemäss [35] sind, ist es ohne weiteres möglich, die Inputdaten zu ergänzen.

Strassennutzerkosten

Ebenfalls vereinfachend wurden für die Strassennutzerkosten allein die Zeitkosten infolge einer Geschwindigkeitsreduktion angesetzt, welche objektbezogen auf den Bewertungseinheiten bzw. Planungseinheiten anzusetzen sind. Dabei wurde angenommen, dass sich das Geschwindigkeitsniveau unter folgenden Strassenbedingungen ändert.

- 120 km/h: Geschwindigkeitsniveau unter Normalbedingungen
- 100 km/h: Geschwindigkeitsniveau wurde bei schlechtem Zustand auf der Nationalstrasse eingerichtet
- 80 km/h: Geschwindigkeitsniveau im Bereich der von der Ausführung der Erhaltungsmassnahme betroffenen Planungseinheit bzw. Bewertungseinheiten, welche eine Planungseinheit bilden

Die Berechnung der Reisezeitkosten infolge der Geschwindigkeitsreduktion erfolgte, wie in [34] beschrieben. Dabei kam die BPR-Formel zur Anwendung unter der Annahme, dass die Nutzerkosten für einen Tag in einer Peakstunde am Abend entstehen. Dafür werden 10% der DTV als Verkehrsbelastung dieser Stunde angesetzt.

Damit ergibt sich für eine 100 m lange Bewertungseinheit unter der Anwendung der obigen Annahmen folgende Berechnung der relativen Zeitkosten bei einer signalisierten Geschwindigkeitsreduktion auf 80 km/h in Bezug zum Normalzustand mit 120 km/h. Dabei wurden vereinfachend die signalisierten Geschwindigkeiten als mittlere Geschwindigkeiten angenommen.

$$\Delta K_{Reise} = \frac{l}{\Delta v_m} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{cap} \right)^\beta \right) \cdot (q_{SV} \cdot K_{Zeit,SV} + q_{PW} \cdot \delta_{PW} \cdot K_{Zeit,PW})$$

$$= \left(\frac{1}{80} - \frac{1}{120} \right) \cdot 0.1 \cdot \left(1 + 0.15 \cdot \left(\frac{0.1 \cdot 12174}{2 \cdot 1800} \right)^4 \right) \cdot 12174 \cdot (0.1 \cdot 15.60 + 0.9 \cdot 1.57 \cdot 19.70)$$

$$= 149.40 \text{ CHF}$$

- mit
- ΔK_{Reise} Reisezeitkosten der Peakstunde
 - Δv_m Differenz der mittleren Geschwindigkeit
 - α, β Parameter der BPR-Funktion
 - q stündliche Verkehrsbelastung der Peakstunde
 - cap Kapazität der Richtungsfahrbahn
 - q_{SV} stündliche Schwerverkehrsbelastung der Peakstunde
 - q_{PW} stündliche PW-Verkehrsbelastung der Peakstunde
 - $K_{Zeit,SV}$ Zeitkostenansatz des Schwerverkehrs
 - δ_{PW} Besetzungsgrad PW
 - $K_{Zeit,PW}$ Zeitkostenansatz einer Privatperson

4.2 Ergebnisse der Aggregationen

4.2.1 Bildung von Planungseinheiten für ein Jahr

Eingabe- und Ausgabedaten

Für die Berechnung und anschliessende Bildung der Planungseinheiten bzw. homogenen Strecken erfolgte die Entwicklung einer Excel-Datei mit Eingabedaten- und Ausgabedatenbereich. Excel ermöglicht durch die Programmiersprache VBA einen entwickelten Algorithmus direkt in der Software umzusetzen. Dadurch enthält eine Datei alle Eingabedaten, den Algorithmus, welcher die Ausgabedaten ebenfalls wieder in diese Datei schreiben kann. Die folgende Abbildung zeigt den Inhalt der Eingabedaten (vgl. Abb. 34, links) und den Bereich der Ausgabedaten (vgl. Abb. 34, rechts). Zusätzlich werden noch die Kenngrössen der Erhaltungsmassnahmen definiert.

Abb. 34 Ein- und Ausgabedaten des Algorithmus in einer Excel-Datei für aufeinanderfolgende Bewertungseinheiten für 1 Jahr

Planungseinheiten Variante 1 der Richtungsfahrbahn N13-

Unter den gegebenen Randbedingungen der typisierten Erhaltungsmassnahmen erfolgte die Berechnung einer ersten Variante V1. Das Ergebnis zeigen die folgende Abbildungen jeweils für die Richtungsfahrbahn N13- (vgl. Abb. 35, Tab. 4) und N2- (vgl. Abb. 36, Tab. 5).

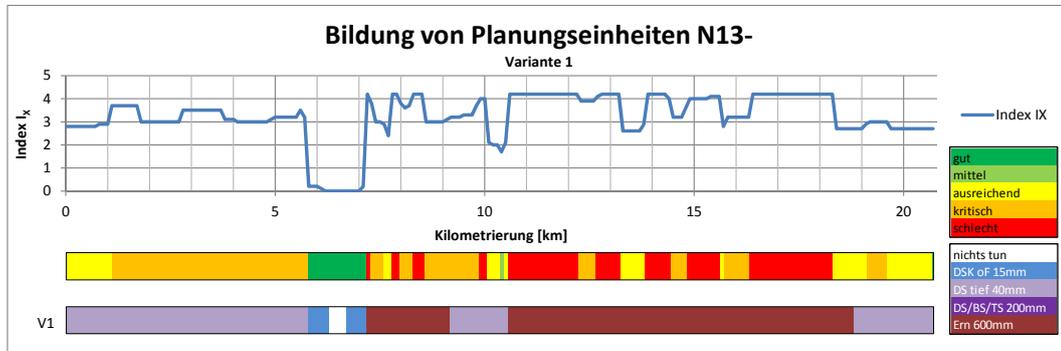


Abb. 35 Bildung von Planungseinheiten der Variante 1 für N13-

Tab. 4 Bildung von Planungseinheiten V1 für N13-

ID	km Anfang	km Ende	Länge [m]	Massnahme
1	0.2	6.0	5800	DS tief 40mm
2	6.0	6.5	500	DSK 15mm
3	6.5	6.9	400	Nichts tun
4	6.9	7.4	500	DSK 15mm
5	7.4	9.4	2000	Ern 600mm
6	9.4	10.8	1400	DS tief 40mm
7	10.8	19.1	8300	Ern 600mm
8	19.1	21.0	1900	DS tief 40mm

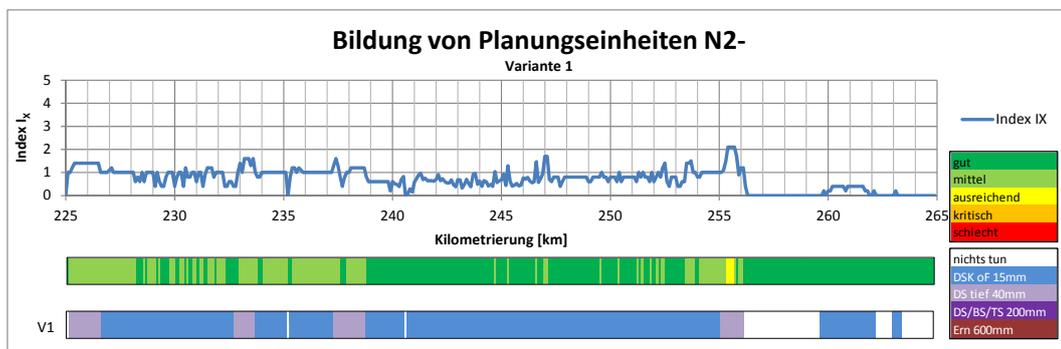


Abb. 36 Bildung von Planungseinheiten der Variante 1 für N2-

Tab. 5 Bildung von Planungseinheiten V1 für N2-

ID	km Anfang	km Ende	Länge [m]	Massnahme
1	225.0	225.1	100	Nichts tun
2	225.1	226.6	1500	DS tief 40mm
3	226.6	232.7	6100	DSK 15mm
4	232.7	233.7	1000	DS tief 40mm
5	233.7	235.2	1500	DSK 15mm
6	235.2	235.3	100	Nichts tun
7	235.3	237.3	2000	DSK 15mm
8	237.3	238.8	1500	DS tief 40mm
9	238.8	240.6	1800	DSK 15mm
10	240.6	240.7	100	Nichts tun
11	255.2	255.2	14500	DSK 15mm
12	255.2	256.3	1100	DS tief 40mm
13	256.3	259.8	3500	Nichts tun
14	259.8	262.4	2600	DSK 15mm
15	262.4	263.1	700	Nichts tun
16	263.1	263.6	500	DSK 15mm
17	263.6	265.0	1400	Nichts tun

Es zeigt sich gesamthaft eine plausible Bildung von Planungseinheiten. Dabei erfolgt eine Wahl der Erhaltungsmassnahme, wie diese in Abhängigkeit der oberen Eingreifgrenzen von I_x definiert sind. Es zeigt sich, dass grundsätzlich die Massnahme „Nichtstun“ bei einem Zustand von $I_x=0$ vorgesehen wird. Auf der N2- im Bereich km 235 bis km 241 zeigen sich zwei kleine Lücken mit der Massnahme „Nichtstun“. Da eine Folgemassnahme durch den sehr guten Zustand erst nach mehr als 5 Jahren erfolgen wird, werden diese kleinen Lücken durch den Algorithmus toleriert.

Bewertungseinheiten mit einem Zustand $I_x>0$ werden Erhaltungsmassnahmen zugeordnet. Es zeigen sich die Planungseinheiten in den jeweiligen Grössen, die die Mindestlängen der zugeordneten Massnahmen nicht unterschreiten.

Es stellt sich die Frage, in wie weit die Kennwerte eine Bildung von Planungseinheiten beeinflussen. Grundsätzlich ist eine Anordnung bzw. Länge der Planungseinheiten abhängig von allen Randbedingungen. Im Folgenden werden einige in einer Sensitivitätsanalyse näher beleuchtet. Dies umfasst die Sensitivität folgender Kennwerte

- Mindestlänge von Massnahmen
- Mindestlänge von Massnahmen bei höheren Nutzerkosten (Erhöhung der DTV)
- Fixkosten von Massnahmen
- obere Eingreifgrenze von Massnahmen
- optimaler Anwendungsbereich für Folgemassnahmen

Sensitivität der Mindestlänge von Massnahmen

Um die Sensitivität der Mindestlänge aufzuzeigen, erfolgte eine Berechnung von drei zusätzlichen Varianten, bei denen die Kennwerte der Mindestlänge im Vergleich zur Variante 1 verändert wurden. Als Vergleich dient die Variante 1. Alle anderen Kennwerte bleiben im Vergleich zur Variante 1 unverändert. Für Variante 2 wurden die

Mindestlängen vergrössert, für Variante 3 verkleinert und für Variante 4 auf Null gesetzt. Da die Mindestlänge im Algorithmus die Ordnung der Massnahmen festlegt, werden diese bei Variante 4 auf annähernd Null gesetzt. Dies zeigt die folgende Tabelle (vgl. Tab. 6).

Tab. 6 Definition der Mindestlänge von Erhaltungsmassnahmen für verschiedene Varianten V1-V4

ID	Massnahmen	Mindestlänge [m]			
		V1	V2	V3	V4
0	Nichtstun	0	0	0	0
1	DSK 15mm	500	1000	200	0.1
2	DS tief 40mm	1000	2000	300	0.2
3	DS/BS/TS 200mm	1500	3000	400	0.3
4	Ern 600mm	2000	4000	500	0.4

Erwartungsgemäss zeigt sich für beide Fallbeispiele N13- und N2-, dass die Mindestlänge einen grossen Einfluss auf die Bildung der Planungseinheiten hat (vgl. Abb. 37 und Abb. 38). Einerseits werden dadurch die Längen der Planungseinheiten beeinflusst und dadurch auch die Anzahl über den Betrachtungsperimeter. Grössere Mindestlängen erzeugen längere Planungseinheiten und kleinere Mindestlängen kürzere. Andererseits zeigt sich teilweise auch eine Veränderung des Massnahmentyps (V2).

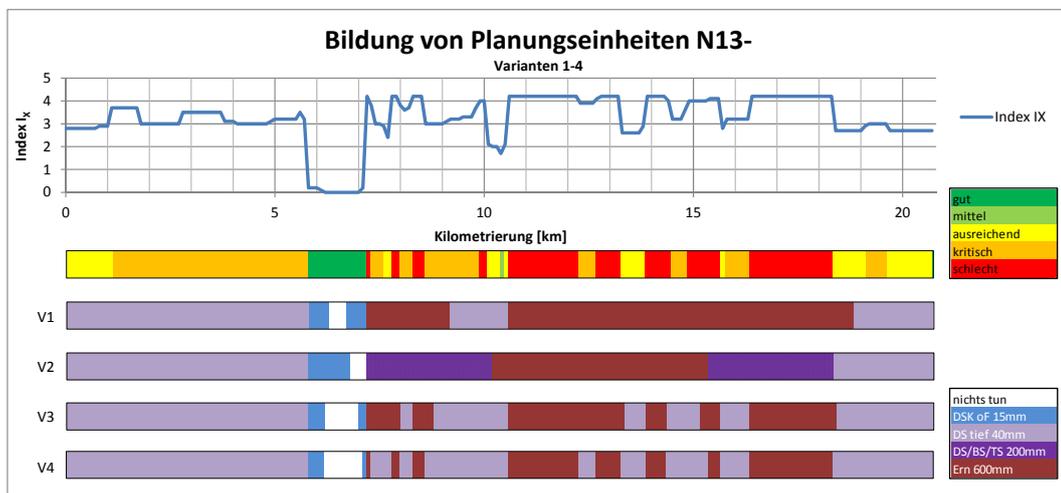


Abb. 37 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 1-4 für N13-

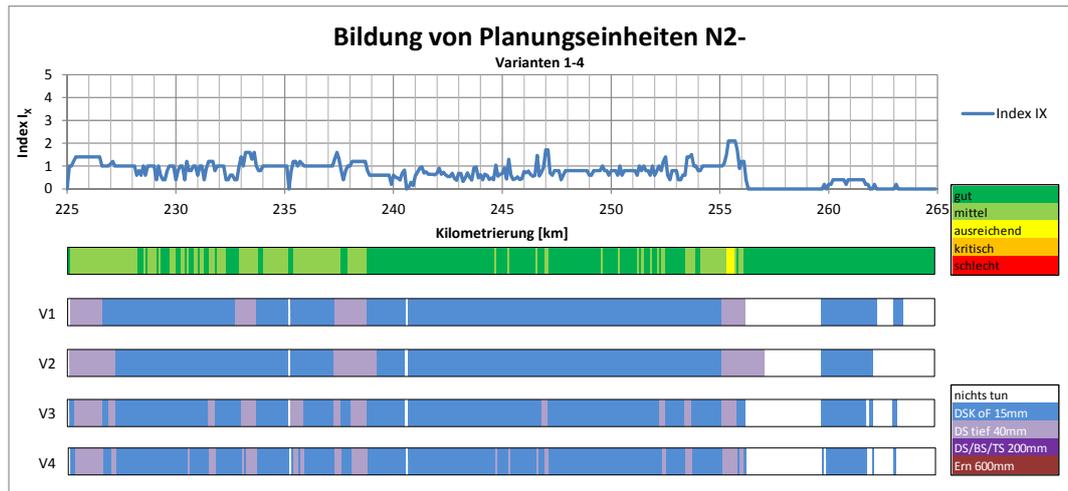


Abb. 38 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 1-4 für N2-

Da die Definition der Mindestlängen einen grossen Einfluss auf die Bildung der Planungseinheiten hat, wurde zusätzlich noch der Einfluss von höheren Nutzerkosten für die Varianten V1 bis V4 getestet. Das Ergebnis wird im folgenden Kapitel aufgezeigt.

Sensitivität der Mindestlänge von Massnahmen bei höheren Nutzerkosten (Erhöhung der DTV)

Die folgende Berechnung erfolgte analog der Varianten 1 bis 4 jedoch mit höherer DTV, was höhere Nutzerkosten hervorruft. Dabei wurde im Fallbeispiel der N13- die DTV auf das 6-fache erhöht, wodurch die Kapazität in der Peakstunde nur um 75% ausgenutzt wurde, da es sich um eine schwach befahrene Strecke handelt. Im Fallbeispiel N2- wurde die DTV auf das 4-fache erhöht, was zum Teil zu einer unrealistischen Überschreitung die Kapazität und sehr hohen Nutzkosten führte. Dies sollte jedoch nur zur Analyse des Einflusses der Nutzerkosten und deren Zusammenhang zur Mindestlänge dienen.

Zu beachten ist, dass die Nutzerkosten grundsätzlich nur objektbezogen anfallen und damit eine baustellenbezogene Betrachtung, bei der Staukosten berücksichtigt werden können, nicht stattfindet. Die Mindestlängen sind nochmals in der folgenden Tabelle aufgezeigt (vgl. Tab. 7). Der Tabelle folgen zwei Abbildungen die die Ergebnisse der Varianten V1 und V5-8 jeweils für die Fallbeispiele N13- (vgl. Abb. 39) sowie N2- (vgl. Abb. 40) aufzeigen.

Tab. 7 Definition der Mindestlänge von Erhaltungsmassnahmen für verschiedene Varianten V1, V5-V8

ID	Massnahmen	Mindestlänge [m]				
		V1	V5	V6	V7	V8
0	Nichtstun	0	0	0	0	0
1	DSK 15mm	500	500	1000	200	0.1
2	DS tief 40mm	1000	1000	2000	300	0.2
3	DS/BS/TS 200mm	1500	1500	3000	400	0.3
4	Ern 600mm	2000	2000	4000	500	0.4

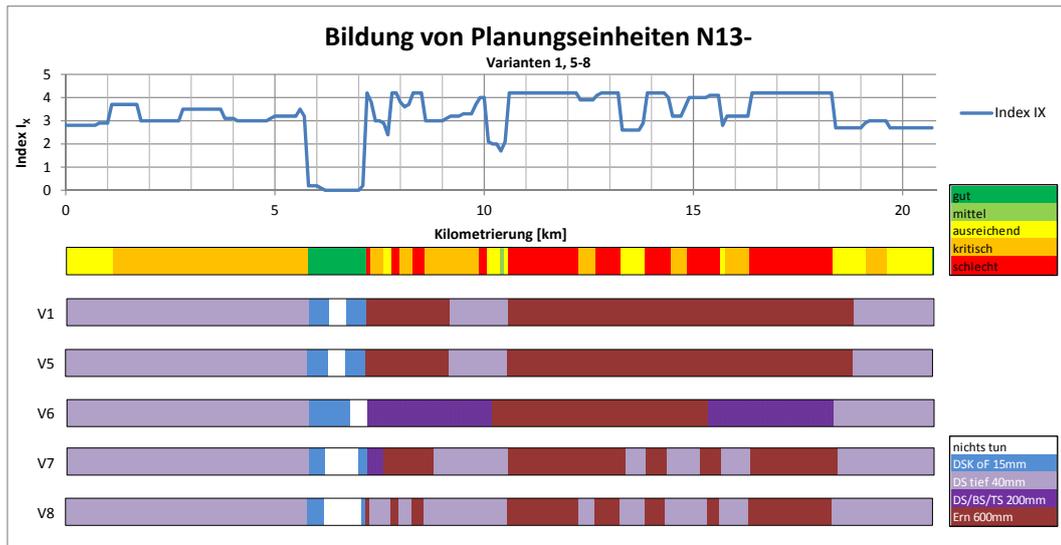


Abb. 39 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 1 und Variante 5-8 für N13- mit 6-facher DTV im Vergleich zur Variante 1

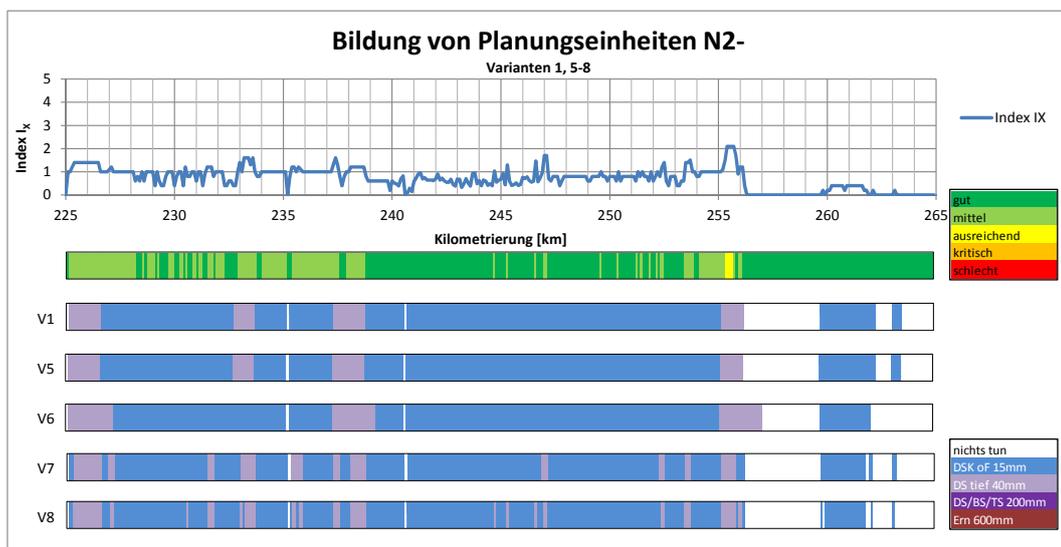


Abb. 40 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 1 und Variante 5-8 für N2- mit 4-facher DTV im Vergleich zur Variante 1

Es zeigt sich, dass trotz höherer (N13-) und zum Teil unrealistisch hohen Nutzerkosten keine Veränderung der Ergebnisse stattgefunden hat. Die Varianten V1 und V5, V2 und V6, V3 und V7 sowie V4 und V8 zeigen jeweils die gleichen Ergebnisse.

Sensitivität der Fixkosten von Massnahmen

Nach der Analyse der Mindestlängen erfolgte ein Vergleich von unterschiedlich hohen Fixkosten der Massnahmen. Zum Vergleich wird die Variante 4 herangezogen. Das heisst, für die Analyse werden die Mindestlängen analog Variante 4 annähernd Null gesetzt und die Fixkosten schrittweise erhöht. Die jeweiligen Kennwerte der Erhaltungsmaßnahmen zeigt folgende Tabelle (vgl. Tab. 8).

Tab. 8 Definition der Fixkosten von Erhaltungsmassnahmen für verschiedene Varianten V4, V9-V11

ID	Massnahmen	Mindestlänge [m]	Fixkosten [CHF]			
			V4, V9-11	V4	V9 (3-fach)	V10 (5-fach)
0	Nichtstun	0		0	0	0
1	DSK 15mm	0.1	3500	10500	17500	35000
2	DS tief 40mm	0.2	5100	15300	25500	51000
3	DS/BS/TS 200mm	0.3	9600	28800	48000	96000
4	Ern 600mm	0.4	8000	24000	40000	80000

Die Ergebnisse der Aggregation für die Varianten V4 und V9-11 zeigen die folgenden Abbildungen (vgl. Abb. 41 für N13- sowie Abb. 42 für N2-). Es zeigt sich, dass sich die Längen der Planungseinheiten bei einer Erhöhung der Fixkosten teilweise vergrössern. Dies zeigt sich gerade beim im Bereich von guten bis ausreichenden (N2-) und noch bis zum Teil kritischen Zuständen (N13-). Sind jedoch Bereiche mit schlechten Zuständen ($I_x \geq 4$) vorhanden existieren ab $I_x > 4$ gleichwohl kleinere Planungseinheiten für Erhaltungsmassnahmen mit grösserem Umfang. Dies ist auf die die Regel zurückzuführen, dass bei einem Zustand von $I_x > 4$ immer eine Massnahme gemacht werden muss.

Obwohl sich die Längen der Planungseinheiten nur geringfügig ändern, zeigt sich eine Änderung des Massnahmentyps. Infolge der langfristigen Betrachtung über 40 Jahre werden die Gesamtkosten niedriger. Fixkosten werden für die Folgemassnahmen nicht berücksichtigt.

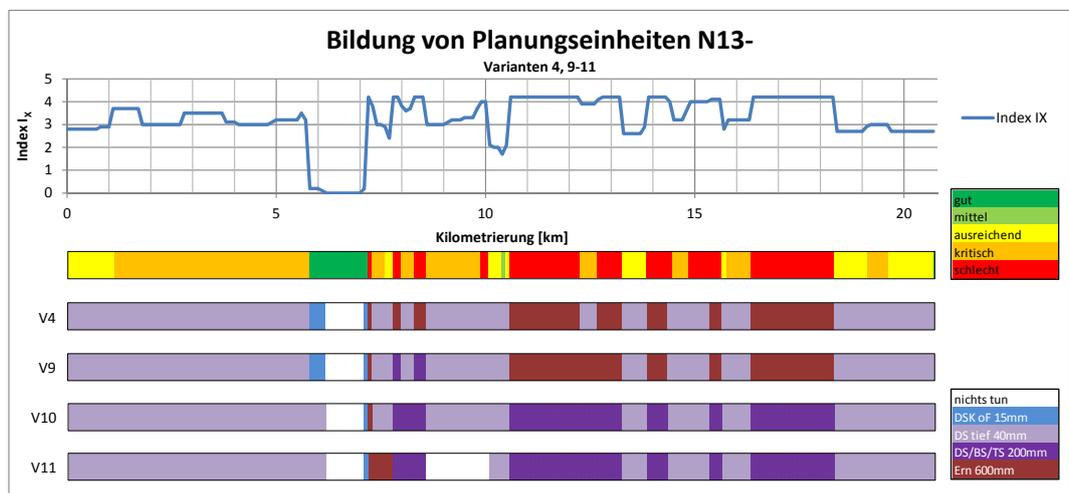


Abb. 41 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 4 und Variante 9-11 für N13- mit unterschiedlichen Fixkosten

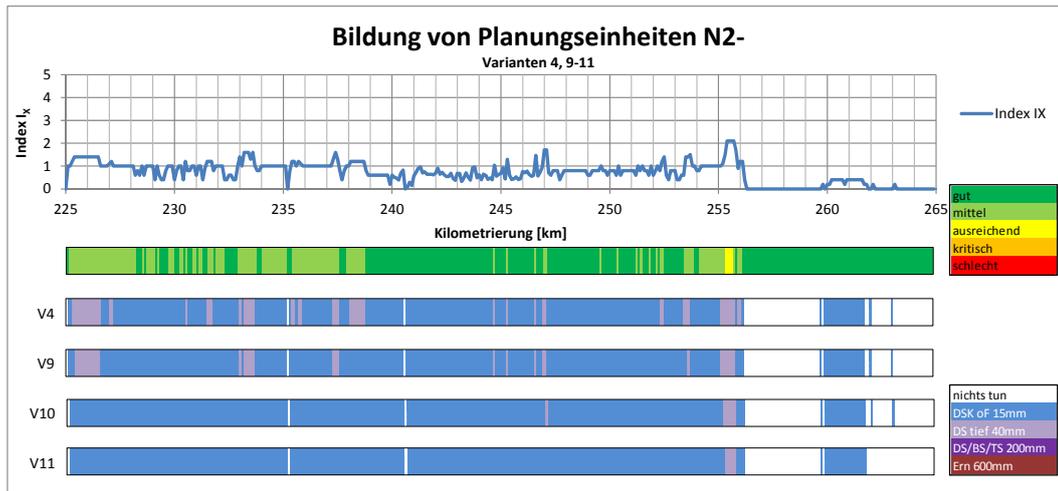


Abb. 42 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 4 und Variante 9-11 für N2- mit unterschiedlichen Fixkosten

Die Fixkosten zeigen einen Einfluss auf die Bildung der Planungseinheiten. Kleiner Strecken verschwinden jedoch nur zum Teil. Durch den Einfluss der Folgemaßnahmen, in denen keine Fixkosten berücksichtigt werden, auf die Gesamtkosten ist der Einfluss der Fixkosten nur begrenzt vorhanden.

Nach einer Untersuchung der Kostenkennwerten erfolgten weitere Analysen an den Kennwerten der Erhaltungsmaßnahmen im Zusammenhang mit dem Zustand.

Sensitivität der oberen Anwendungsgrenze

Für eine Überprüfung der Sensitivität der oberen Anwendungsgrenzen erfolgte im Vergleich zur Variante 1 eine unterschiedliche Definition für die Erhaltungsmaßnahmen. Für die Varianten V1 und V12-14 sind diese in folgender Tabelle dargestellt (vgl. Tab. 9).

Tab. 9 Definition der oberen Anwendungsgrenzen von Erhaltungsmaßnahmen für verschiedene Varianten V1 und V12-14

ID	Massnahmen	Obere Anwendungsgrenzen für I_x			
		V1	V12	V13	V14
0	Nichtstun	0	0	0	0
1	DSK 15mm	2	1	1	1
2	DS tief 40mm	4	3	3	2.5
3	DS/BS/TS 200mm	4.5	4.5	4	3.5
4	Ern 600mm	5	5	5	5

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der Aggregation für die N13- (vgl. Abb. 43) und die N2- (vgl. Abb. 44). Diese Ergebnisse sind klar auf die definierten oberen Grenzen zurückzuführen. Für die Massnahme „DS tief 40mm“ werden die Möglichkeiten im Bereich der kritischen Zustände stark beschnitten. Es können nur noch Bewertungseinheiten mit einem Zustand 3 belegt werden (V12, V13). Dadurch kann in V14 praktisch nur noch eine Massnahme „Ern 600mm“ durchgeführt werden. Die Massnahme „DS/BS/TS 200mm“ wird nicht gewählt, da deren Gesamtkosten unter den definierten Randbedingungen für V1, V12-14 höher sind.

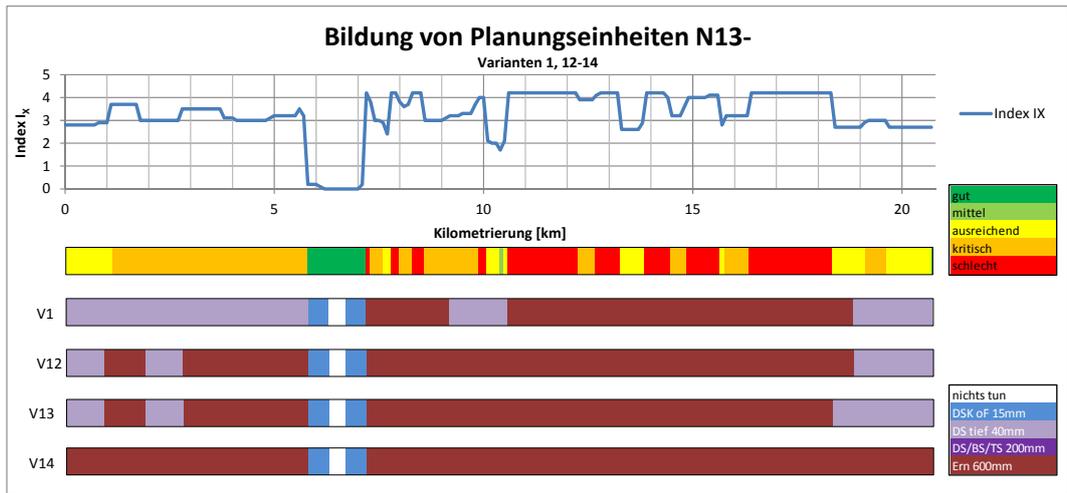


Abb. 43 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 1 und Variante 12-14 für N13- mit unterschiedlichen oberen Anwendungsgrenzen

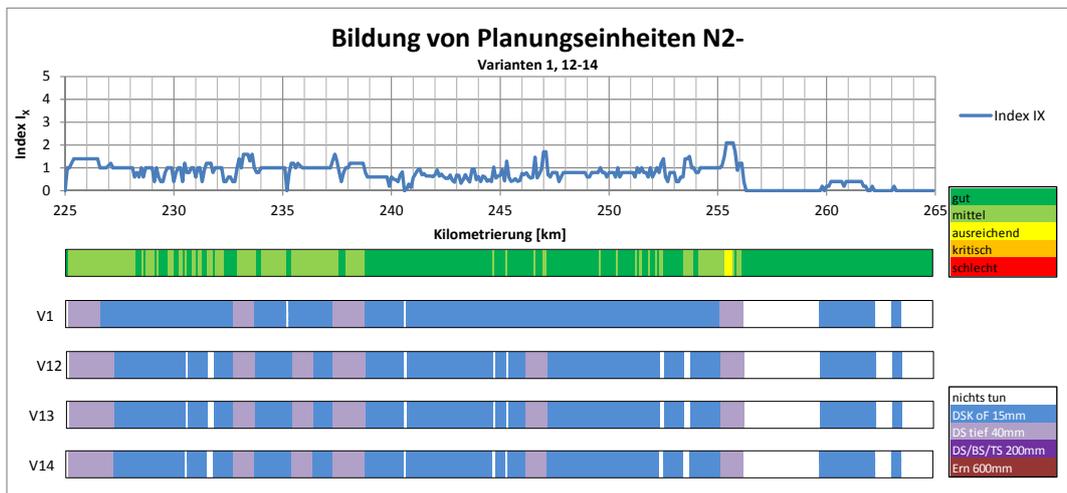


Abb. 44 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 1 und Variante 12-14 für N2- mit unterschiedlichen oberen Anwendungsgrenzen

Sensitivität des optimalen Anwendungsbereichs

Als letzter Kennwert wurde der optimaler Anwendungsbereich analysiert. Dafür erfolgte zuerst eine Verringerung der Bandbreite für Massnahme 3 und 4 (Variante 15). In einer Variante 16 erfolgte ausschliesslich die Anwendung der Massnahmen 4 für Folgemassnahmen. Schliesslich wurde noch für die Massnahme 2 eine Bandbreite für einen optimalen Anwendungsbereich definiert (Variante 17). Dies zeigt die folgende Tabelle (vgl. Tab. 10). Dieser Tabelle folgen 2 Abbildungen, welche die Ergebnisse für die N13- (vgl. Abb. 45) und die N2- (vgl. Abb. 46) darstellen.

Tab. 10 Definition des optimalen Anwendungsbereichs von Erhaltungsmassnahmen für verschiedene Varianten V1 und V15-17

ID	Massnahmen	Optimaler Anwendungsbereich für I _x							
		V1	V15	V16	V17	V16	V17	V16	V17
0	Nichtstun	0	3	0	4	0	4.5	0	2
1	DSK 15mm								
2	DS tief 40mm							2	3
3	DS/BS/TS 200mm	3	4	4	4.5			3	4
4	Ern 600mm	4	5	4.5	5	4.5	5	4	5

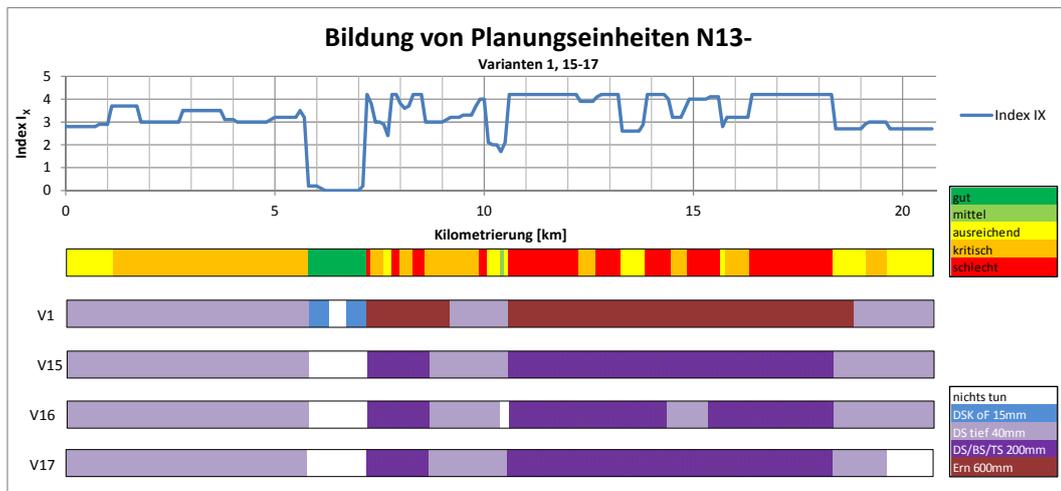


Abb. 45 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 1 und Variante 15-17 für N13- mit unterschiedlichen optimalen Anwendungsbereichen

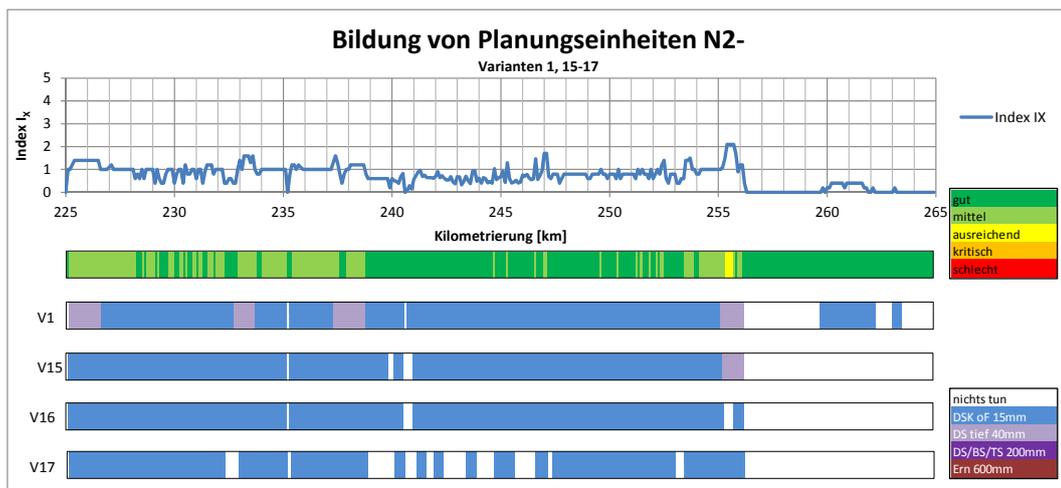


Abb. 46 Bildung von Planungseinheiten der Varianten 1 und Variante 15-17 für N2- mit unterschiedlichen optimalen Anwendungsbereichen

Die Ergebnisse zeigen, dass der optimale Anwendungsbereich ebenfalls einen grossen Einfluss auf die Bildung von Planungseinheiten hat. Diese Bandbreite eines Kennwerts

Dabei wurden analog zur Variante 1 folgende Kennwerte für die Erhaltungsmassnahmen gesetzt (vgl. Tab. 11).

Tab. 11 Kennwerte der beispielhaft definierten Typen von Erhaltungsmassnahmen für die Berechnung von 3 Jahren

ID	Name	Mindestlänge [m]	Obere Grenze	Rücksetzwert	Leistung [m ² /Tag]	Massnahmenkosten		Optimale Anwendung	
						Fix [CHF]	Variabel [CHF/m ²]	Untere Grenze	Obere Grenze
0	Nichtstun	0	-	-	-	-	-	0	3
1	DSK 15mm	500	2	-1	4000	3500	6.2	-	-
2	DS tief 40mm	1000	4	-2	4000	5100	30.3	-	-
3	DS/BS/TS 200mm	1500	4.5	1	1000	9600	108.8	3	4
4	Ern 600mm	2000	5	0	300	8000	143.6	4	5

Nachdem der Algorithmus die Berechnungen durchgeführt hat, werden alle entsprechenden Zellen mit den berechneten Erhaltungsmassnahmen belegt. Dies ermöglicht die Bildung der Planungseinheiten, was in der folgenden Abbildung dargestellt ist (vgl. Abb. 48).

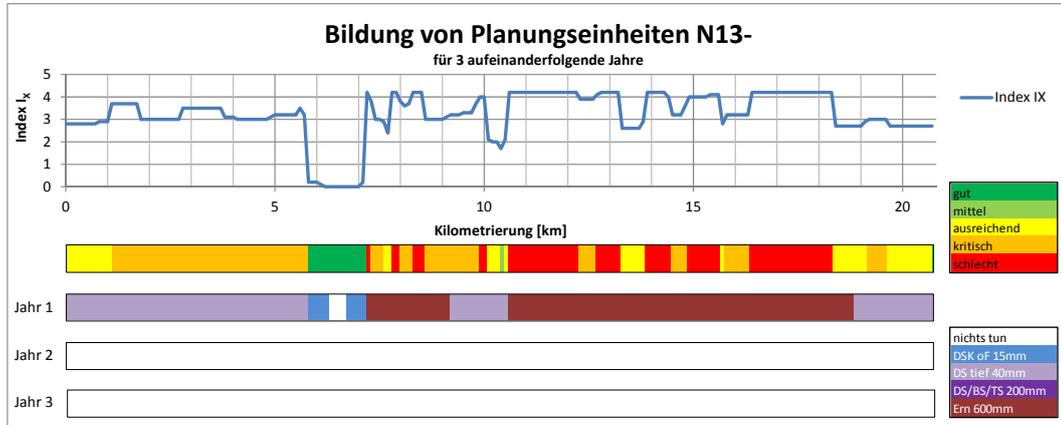


Abb. 48 Darstellung der Bildung von Planungseinheiten für 3 aufeinanderfolgende Jahre

5 Erkenntnisse

5.1 Vorbemerkungen

Mit periodischen, netzweiten Zustandserhebungen der Fahrbahnoberfläche wird ein zweckmässiger Kenntnisstand bezüglich des Fahrbahnzustandes für definierte Bewertungseinheiten erreicht. Dieser Kenntnisstand bildet eine der Grundlagen für eine langfristige Planung von Erhaltungsmassnahmen, wofür im Bereich des Teilsystems Fahrbahnen aus den Bewertungseinheiten mit ihren vorhandenen Zustandsinformationen Planungseinheiten zu bilden sind.

Die Anwendung bekannter Verfahren zur Bildung von Planungseinheiten für die langfristige Erhaltungsplanung von Fahrbahnen zeigt Schwächen in Bezug auf die Streckenlänge. Die in der Praxis vorhandenen Längen von auszuführenden Erhaltungsmassnahmen am Strassenoberbau weichen zum Teil erheblich davon ab. Grundsätzlich wurden typisierte Erhaltungsmassnahmen bei Fahrbahnen in Bezug auf deren praxisnahe Baustellenlängen und die Einflüsse der Massnahmenlänge auf die Baukosten bisher kaum untersucht resp. bei der Erhaltungsplanung mitberücksichtigt. Sie bilden jedoch wichtige Kriterien zur Bildung von Planungseinheiten bei Fahrbahnen.

Im vorliegenden Forschungsprojekt erfolgte die Entwicklung eines Algorithmus für die Aggregation von Bewertungseinheiten zu Planungseinheiten im Teilsystem Fahrbahnen, sogenannte homogene Strecken. Bisherige bekannte Verfahren (vgl. Kapitel 1.5) betrachteten fast ausschliesslich die Zustandsdaten der Bewertungseinheiten. Kein bekanntes Verfahren berücksichtigte Randbedingungen, welche durch unterschiedliche Erhaltungsmassnahmen vorgeben werden können.

Auf den zu bildenden homogenen Strecken werden Erhaltungsmassnahmen unter langfristigen Gesichtspunkten geplant. Deshalb war es für die vorliegende Forschungsarbeit naheliegend, genau den Aspekt von eventuell vorhandenen Randbedingungen in Bezug auf die Ausführung von Erhaltungsmassnahmen mit zu berücksichtigen. Der Fokus liegt somit auf durchzuführenden Erhaltungsmassnahmen und deren Wirtschaftlichkeit.

5.2 Erkenntnisse aus den Untersuchungen und Entwicklungen

5.2.1 Algorithmus zur Bildung von homogenen Strecken

Der im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Algorithmus verwendet Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche, Entwicklungen der Zustandsdaten in Form von Prognosemodellen, typisierte Erhaltungsmassnahmen sowie ein vollständiges Kostenmodell und erlaubt zumindest theoretisch die Herleitung von Planungseinheiten bzw. homogenen Strecken von Erhaltungsabschnitten mit minimalem Kostenfolge.

Es stellte sich dabei die grundsätzliche Frage, ob es unbedingt nötig ist bzw. einen entscheidenden Vorteil bringt, die mathematisch optimale Lösung zu finden oder sie anzunähern. Es kann davon ausgegangen werden, dass es mehrere Lösungen gibt, deren Wert nur geringfügig schlechter als der Wert der optimalen Lösung ist. Gerade unter diesen Lösungen die optimale zu finden, kann über proportional viel Rechenzeit beanspruchen, dem aber nur einem sehr geringer Nutzen gegenüber steht.

Aus diesen Gründen wurde entschieden auf einen Optimierungsalgorithmus zu verzichten. Stattdessen wurde ein heuristisches Verfahren entworfen, das solange eine zulässige Lösung vorliegt, eine solche auch findet und in begrenztem Umfang auch optimiert. Genauere Aussagen über die Qualität der gefundenen Lösung lassen sich

leider nicht treffen. Die durchgeführten Fallbeispiele zeigen jedoch, dass der Algorithmen zu sinnvollen Ergebnissen führt.

Die Berechnung mit dem Algorithmus liefert für jede betrachtete Bewertungseinheit eine Massnahme, die auf dieser durchgeführt werden soll. Die Massnahmen sind dabei so gewählt, dass sie alle Nebenbedingungen erfüllen. Eine Planungseinheit bzw. homogene Strecke ergibt sich dann aus aufeinander folgenden Bewertungseinheiten, auf denen die gleiche Massnahme vorgeschlagen wird.

Die Auswahl der Massnahmen ergibt sich über die Suche nach möglichst geringen Kosten. Die Ermittlung der Kosten erfolgt nach dem Gesamtkostenmodell. Die Netzgesamtkosten sind die für die Auswahl der Massnahmen relevante Kosten. Sie setzen sich zusammen aus den Massnahmenkosten und Nutzerkosten des aktuellen Jahres sowie den Folgekosten und zwar über alle betrachteten Bewertungseinheiten.

5.2.2 Anwendung des Algorithmus

Ergebnisse

Es zeigt sich, dass mit dem entwickelten Algorithmus eine Aggregation in Planungseinheiten gut möglich ist. Die Ergebnisse zeigen unter Verwendung der Definitionen der Randbedingungen in Abhängigkeit der Erhaltungsmassnahmen eine entsprechende Streckenbildungen bzw. Bildung von Planungseinheiten. Dabei werden erwartungsgemäss alle im Vorfeld definierten Randbedingungen eingehalten. Zusätzlich wird ausgegeben, wann für jede Bewertungseinheit je nach optimalen Anwendungsbereichen wieder eine Erhaltungsmassnahme innerhalb der folgenden 40 Jahre notwendig wird.

Eine Erweiterung des Algorithmus ermöglicht die Bildung von Planungseinheiten für drei aufeinanderfolgende Jahre. Dabei wird jedes dieser Jahre einzeln auf die Möglichkeit der Aggregation überprüft. Zusätzlich wird nach jedem Jahr die Notwendigkeit von Erhaltungsmassnahmen für jede separate Bewertungseinheit innerhalb der folgenden 40 Jahre angezeigt. Dies muss jedoch nicht mit den Ergebnissen der Aggregation übereinstimmen, da durch die separate Betrachtung der Bewertungseinheiten für die Folgemassnahmen innerhalb der folgenden 40 Jahre keine Mindestlängen eingehalten werden.

Veränderung der vorhandenen Kennwerte und Randbedingungen

Es hat sich gezeigt, dass die homogene Streckenbildung sehr stark von einzelnen Kennwerten und Randbedingungen der Erhaltungsmassnahmen abhängt, wie z.B. obere Anwendungsgrenzen, optimaler Anwendungsbereich und Rücksetzwerte der Erhaltungsmassnahmen. Die Kostenkenngrössen der variablen Kosten spielen ebenfalls eine entscheidende Rolle, wohingegen die Installationskosten nicht von so grosser Bedeutung sind.

Der Realisierbarkeitstest basiert auf einem fiktiven Zustandsindex I_x . Im Rahmen der Zustandserfassung können jedoch auch mehrere Zustandsmerkmale zur Verfügung stehen. Schweizweit existieren unterschiedliche Varianten für die Bewertung des Zustands und die Zuordnung von Erhaltungsmassnahmen. In wie weit unterschiedliche Zustandsmerkmale mit einander kombiniert werden können, um Erhaltungsmassnahmen zu planen, wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht untersucht.

Für die Anwendung des Algorithmus ist es letztlich egal, welche Variante für die Bewertung und die Zuordnung von Erhaltungsmassnahmen gewählt wird. Wichtig ist nur, dass für die definierten Zustandsmerkmale bzw. Zustandsindizes mindestens jeweils ein Prognosemodell vorhanden ist und die Zuordnung und Auswirkung von Erhaltungsmassnahmen für jedes Zustandsmerkmal bzw. jeden Zustandsindex definiert sind.

Zusätzlich lassen sich auch noch unterschiedliche Verläufe der Zustandsentwicklung je Zustandsmerkmal bzw. Zustandsindex verwenden, wenn auch hier die Auswirkungen der festgelegten Typen von Erhaltungsmaßnahmen definiert sind.

5.2.3 Beispielberechnungen

Nach der Entwicklung des Algorithmus erfolgte ein Realisierbarkeitstest an zwei Fallbeispielen. Dafür wurden im Vorfeld einerseits Zustandsdaten in Form eines fiktiven Indexes I_x künstlich generiert und andererseits beispielhaft Typen von Erhaltungsmaßnahmen mit relevanten Randbedingungen und Auswirkungen auf diesen Index I_x definiert. Anhand dieser Daten konnte der Algorithmus die Aggregation durchführen, wobei eine Zusammenfassung zu Planungseinheiten bei Minimierung der Gesamtkosten erfolgreich war.

5.2.4 Ausdehnung des Homogenisierungsprozesses

Die vorliegende Forschungsarbeit verfolgte nicht die gängige Vorgehensweise der alleinigen Abstützung auf den Zustand der Fahrbahnoberfläche für die Bildung von Planungseinheiten von Fahrbahnen. Das Ziel war einen neuen Ansatz zu verfolgen, der die Erhaltungsmaßnahme und ihre Wirtschaftlichkeit in den Mittelpunkt stellt. Damit wird auf den Zusammenhang von Zustand und Erhaltungsmaßnahme mit deren Einfluss auf die Zustandsentwicklung fokussiert. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung über 40 Jahre ermöglicht zusätzlich die Abstützung auf sogenannte Lebenszykluskosten.

Die Bildung von Planungseinheiten wird jedoch auch durch weitere Randbedingungen beeinflusst. Diese können administrativer, funktionaler oder struktureller Art sein. Je nachdem welche Randbedingungen zusätzlich Berücksichtigung finden sollen, ist es möglich, diese ohne grossen Aufwand in den Algorithmus zu integrieren.

6 Folgerungen und Empfehlungen

Grundsätzlich sei im Vorfeld darauf hingewiesen, dass eine langfristige Erhaltungsplanung im Teilsystem Fahrbahnen noch keine vollständige und damit für die Praxis ausreichende Kostenstruktur enthält. Alle Kostenkenngrößen sind für dieses Verfahren objektbezogen, das heisst die Kosten beziehen sich immer auf eine Bewertungseinheit (variable Kosten) bzw. eine Planungseinheit (Fixkosten). Somit können netzbezogene Aspekte, wie die Auswirkungen von Baustellen und eventuell vorgesehene Verkehrsführungen auf benachbarte Strassenabschnitte bzw. das umliegende Strassennetz, in diesem Verfahren nicht berücksichtigt werden. Dafür muss ein weiterer Planungsschritt auf der Ebene Gesamtsystem durchgeführt werden [vgl. 35].

Das entwickelte Verfahren stellt eine Grundlage für die langfristige Erhaltungsplanung von Fahrbahnen dar, für das sich folgende Folgerungen ziehen und Empfehlungen geben lassen:

1. Der im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Algorithmus ist geeignet zur Herleitung von Planungseinheiten bzw. homogenen Strecken von Erhaltungsabschnitten mit minimaler Kostenfolge.
2. Eine Erweiterung des Algorithmus ermöglicht die Bildung von Planungseinheiten für drei aufeinanderfolgende Jahre. Grundsätzlich lässt sich die Streckenbildung theoretisch auf weitere Folgejahre ausweiten. Ebenfalls lässt sich dieser Algorithmus auch auf weit grössere Streckennetze anwenden, unter der Voraussetzung die Datengrundlagen sind vorhanden.
3. Es hat sich gezeigt, dass die homogene Streckenbildung sehr stark von einzelnen Kennwerten und Randbedingungen der Erhaltungsmaßnahmen abhängt. Diese Daten wurden für einen fiktiven Index I_x jeweils für frei gewählte Typen von Erhaltungsmaßnahmen aus [30] abgeleitet. In wieweit diese Annahmen für die Praxis abgestützt sind, konnte nicht untersucht werden und sollte in einem weiteren Fokus für zusätzliche Analysen stehen. Gleiches gilt für das Prognosemodell eines Zustandsindex. Dieses hat ebenfalls sehr grossen Einfluss. Die Analyse von Daten zur Entwicklung von Prognosemodellen sollte in Anlehnung an [33] ebenfalls weiter verfolgt werden.
4. In der Regel führen Strassenbetreiber weitestgehend schon netzweite Zustandserfassungen durch. Grundsätzlich sollte sich dabei im Vorfeld die Frage gestellt werden, welche Zustandsmerkmale zu erheben sind und wie diese einen direkten Bezug zu Erhaltungsmaßnahmen haben. Das heisst welche Zustandsmerkmale sind für den Strassenbetreiber relevant für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen. Dadurch lassen sich im Vorfeld Datenerhebungen auf ein notwendiges Ausmass begrenzen. Gleichzeitig ist es notwendig für diese relevanten Zustandsmerkmale eine Zustandsentwicklung zu prognostizieren. Das bedeutet, dass die möglichst in regelmässigen Abständen erhobene Datenbasis einer Datenanalyse unterzogen wird. Eventuelle zusätzliche Daten, welche bei der Ausführung von Erhaltungsmaßnahmen (z.B. Abnahmemessungen) anfallen, hinzuzuziehen. Ein so entwickeltes Prognosemodell stellt dann ein besser abgestütztes Modell für das betrachtete Strassennetz dar und kann nicht nur zur Bildung von Planungseinheiten sondern für den gesamten Prozess der Erhaltungsplanung von Fahrbahnen verwendet werden.
5. Auswertungen bzw. Analysen von durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen können erst durchgeführt werden, wenn entsprechendes Datenmaterial zur Verfügung steht. Für besser abgestützte Annahmen von Kennwerten für Erhaltungsmaßnahmen sollte eine kontinuierliche Erhebung von Kosten- und Ausführungsdaten, wie sie schon bei Kunstbauten stattfindet, durchgeführt werden. Die Kennwerte und Randbedingungen in Bezug auf die Erhaltungsmaßnahmen, welche in diesem Forschungsauftrag für die Anwendung definiert wurden, sind aus [30] abgeleitet. Findet eine kontinuierliche Erhebung von Daten der durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen statt, ist eine

ausreichende Datenbasis für eine Untersuchung vorhanden. Diese Daten sollten dann analysiert und in Bezug auf folgende Parameter untersucht werden:

- Kostenanalyse: fixe und variable Ausführungskosten an Planungseinheiten
- Ausführung: Leistungsermittlung in Bezug auf die Fläche
- Wirkungsanalyse: Rücksetzwerte je Erhaltungsmaßnahme, Einsatzgrenzen zur Definition von oberen Anwendungsgrenzen sowie optimalen Anwendungsbereichen

6. Eine Erweiterung des Verfahrens (Algorithmus) ist möglich und in zweierlei Hinsicht empfehlenswert:

- Verfeinerung durch die Berücksichtigung von realen Daten, mehreren Zustandsmerkmalen und der zusätzliche Berücksichtigung von weiteren für die Bildung von Planungseinheiten bestimmenden Faktoren, z.B. vorgegebene Perimetergrenzen, zur weiteren Annäherung an die realen Praxisbedingungen und –bedürfnisse
- Ausdehnung der Systemgrenzen auf die Anwendung von grösseren Strassennetzteilen und ganzen Strassennetzen

7. Das entwickelte und beispielgetestete Verfahren zur Bildung von Planungseinheiten bzw. homogenen Strecken auf Erhaltungsabschnitten von Strassenverkehrsanlagen erlaubt in der vorliegenden Fassung keine allgemeine Verwendung in der Praxis, da eine allgemein anerkannte Kombination von Indizes zur Festlegung von Erhaltungsmaßnahmen noch nicht vorliegt. Aus diesem Grund ist eine Normierung verfrüht. Der Algorithmus ist an sich jedoch praxistauglich und kann an jede noch festzulegende Kombination von Zustandsmerkmalen angepasst werden.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
\in	Element von
$=$	gleich
\neq	ungleich
:	für die gilt, mit der Eigenschaft
\setminus	ohne
\forall	für alle, für jedes
\exists	es existiert ein
\cup	Vereinigungsmenge
\cap	Schnittmenge
$\{1\}$	Menge bestehend aus 1
$\{ \}$	leere Menge
(x, y)	offenes Intervall von x bis y, alle Werte für die gilt, dass sie $>x$ und $<y$ sind
$[x, y]$	Abgeschlossenes Intervall von x bis y, alle Werte für die gilt, dass sie $\geq x$ und $\leq y$ sind
\sum	Summe
$ $	Betrag von, Anzahl von Elementen (Mächtigkeit) einer Menge
€	Euro
Abb.	Abbildung
ca.	Circa
CHF	Schweizer Franken
DTV	durchschnittlicher täglicher Verkehr
EDV	elektronische Datenverarbeitung
EM	Erhaltungsmanagement
et. al.	und andere (Autoren)
ETH Zürich	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FB	Fahrbahnen
FS	Fahrstreifen
Fz	Fahrzeuge
h	Stunde
HLS	Hochleistungsstrassen
BLP	Binäres lineares Programm (engl.: binary linear program)
ILP	Ganzzahliges lineares Programm (engl.: integer linear program)
IMC GmbH	Infrastructure Management Consultants Gesellschaft mit begrenzter Haftung
IVT	Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
LP	Lineares Programm (engl. linear program)
m	Meter

N (z.B. N3)	Nationalstrasse
Nr.	Nummer
RAM	Random-Access Memory, Arbeitsspeicher des Computers
SN	Schweizer Norm
V	Version
vgl.	Vergleiche

Literaturverzeichnis

-
- [1] FGSV (2001/2003) ZEB - Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen (ZEB) - Reihe M: Messtechnische Zustandserfassung, Reihe V: Visuelle Zustandserfassung, Reihe A: Auswertung - Erhaltungsplanung Reihe R: Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen, Reihe S: Substanzwert, FGSV-Nr. 490 AP9, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, am
-
- [2] SN 640 925b (2003) Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF), Zustandserhebung und Indexbewertung, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [3] RVS 13.01.15 (2006) Beurteilungskriterien für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR, Wien
-
- [4] SN 640 911 (2006) Strasseninformationssystem: Linearer Bezug, Grundnorm, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [5] Rübensam, J. und F. Schulze (1996) Entwicklung einer Methodik zur zweckmässigen Zusammenfassung massnahmenbedürftiger Abschnitte der BAB-Betriebsstrecken auf der Grundlage von Zustands- und Bestandsdaten, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 736, Bau- und Wohnungswesen Bundesministerium für Verkehr, Bonn
-
- [6] Linder, T. (2006) Die Zustandserfassung und -bewertung als Grundlage für die optimierte Erhaltung in Bayern, Vortrag, AIPCR-Jahreskonferenz „Strassen Strassen-Erhaltungsmanagement“, Zürich, November 2006
-
- [7] SN 640 908 (1999) Erhaltungsmanagement (EM), Bewertung von Strassenabschnitten im Netz – Funktionelle Bewertung, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [8] SN 640 909 (1990) Strassendatenbanken: Grundlagen, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [9] GS MISTRA (2009), MISTRA Public, Bundesamt für Strassen ASTRA, <https://portal.mistra.ch/>, 11.11.2009
-
- [10] AASHTO (1986) AASHTO guide for design of pavement structures, American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, III-17-III-20 and Appendix J
-
- [11] FGSV (2009) Arbeitspapier - Grundlagen zur Ermittlung homogener Abschnitte zur Bewertung der strukturellen Substanz von Strassenbefestigungen, FGSV-Nr. 431, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, am
-
- [12] Thomas, F. (2004) Generating homogeneous road sections based on surface measurements: available methods, Vortrag, 2nd European Pavement and Asset Management Conference EPAM2, Berlin (D), 21-23 March 2004
-
- [13] Ping, W., Z. Yang, L. Gan und B. Dietrich (1999) Development of Procedure for Automated Segmentation of Pavement Rut Data, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1655 (-1) 65-73
-
- [14] Divinsky, M., S. Nesechi und M. Livneh (1997) Development of a Road Roughness Profile Delineation Procedure, Journal of Testing and Evaluation (JTE), 25 (4) pp. 445-450
-
- [15] Divinsky, M. und M. Livneh (2001) Homogeneous Unit Delineation for Interpreting Dynamic Cone Penetrometer Measurements, Journal of Testing and Evaluation (JTE), 29 (5) 503-508
-
- [16] Kennedy, J., A. Shalaby und R. Van Cauwenberghe (2000) Dynamic segmentation of pavement condition data, Vortrag, Annual conference of the Canadian Society for Civil Engineering CSCE, London, ON (C), 07.-10.06.2000
-
- [17] Misra, R. und A. Das (2003) Identification of Homogeneous Sections from Road Data, International Journal of Pavement Engineering, 4 (4) 229 - 233
-

-
- [18] Thomas, F. (2005) Automated Road Segmentation Using a Bayesian Algorithm, Journal of Transportation Engineering, 131 (8) 591-598
-
- [19] Nagel, M., G. Maerschalk und B. Schneider (2008) Variabilitätsuntersuchung der Rohdaten zur Stabilisierung der Ableitung abschnittsbezogener Zustandsgrößen für die Bewertung der Fahrbahnbefestigungen der Bundesfernstraßen, Projekt-Nr. 29.0178/2007/BMVBS, Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Oelsnitz/München
-
- [20] Lindner, S., J. Rübensam, F. Schulze und D. Staroste (2002) Algorithmen zur Ermittlung repräsentativer Befestigungsaufbauten für die Erhaltungsplanung, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 836, Bau- und Wohnungswesen Bundesministerium für Verkehr, Bonn
-
- [21] Kunze, A., J. Rübensam, F. Schulze und D. Staroste (2007) Erarbeitung eines Verfahrens zur Bildung von Erhaltungsabschnitten für das Erhaltungsmanagement (PMS) auf Basis von Zustands- und Aufbaudaten, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 972, Bau- und Wohnungswesen Bundesministerium für Verkehr, Bonn
-
- [22] El Gendy, A. und A. Shalaby (2005) DETECTING LOCALIZED ROUGHNESS USING DYNAMIC SEGMENTATION, Vortrag, 1st Annual Inter-University Symposium on Infrastructure Management (A.I.S.I.M.), Waterloo ON (C), August 6, 2005
-
- [23] El Gendy, A. und A. Shalaby (2008) USING QUALITY CONTROL CHARTS TO SEGMENT ROAD SURFACE CONDITION DATA, Vortrag, 7th International Conference on Managing Pavement Assets ICMPSA, Calgary (C),
-
- [24] Cafiso, S. und A. Di Graziano (2012) Definition of Homogenous Sections in Road Pavement Measurements, Procedia - Social and Behavioral Sciences, 53 (0) 1069-1079
-
- [25] Koorey, G. (2009) Road Data Aggregation and Sectioning Considerations for Crash Analysis, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2103 (-1) 61-68
-
- [26] Shtub, A. und T. Raz (1996) Optimal segmentation of projects -- Schedule and cost considerations, European Journal of Operational Research, 95 (2) 278-283
-
- [27] Shtub, A. (1997) Project segmentation--a tool for project management, International Journal of Project Management, 15 (1) 15-19
-
- [28] Nicolosi, V., M. D'Apuzzo, B. Festa und L. Mancini (2008) ANALYSIS OF URBAN PAVEMENT SURFACE PROFILES ORIENTED TO ENVIRONMENTAL PERFORMANCE INDICATORS, Vortrag, 3rd European Conference on Pavement and Asset Management EPAM3, Coimbra (P), 7.-9. Juli 2008
-
- [29] Lindenmann, H. P., F. Schiffmann, T. Weber, J. J. Mäder, D. Baer und M. Fontana (2003) Zustandserfassung und -bewertung Nationalstrassen (Fahrbahnen) ZEB-NS (1999-2002) Schlussbericht, Bundesamt für Strassen ASTRA, Zürich
-
- [30] Gnehm, V. (2008) Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen, Standardisierte Erhaltungsmaßnahmen, Schriftenreihe, 1235, Schlussbericht VSS 2004/711, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [31] Lindenmann, H. P., F. Baumgartner und F. Schiffmann (2008) Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement Fahrbahnen; Synthesebericht, Schriftenreihe, 1259, Schlussbericht VSS 2004/710, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [32] SN 640 820 (2006) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Grundnorm, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [33] Scazziga, I. (2008) Schadensprozesse und Zustandsverläufe, Schriftenreihe, Schlussbericht VSS 2004/712, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [34] AASHTO (2001) AASHTO Pavement Management Guide, 9781560511557, American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO Joint Task Force on Pavements, Washington D.C.
-
- [35] Schiffmann, F., R. Hajdin, M. Botzen, H. P. Lindenmann und G. Girmscheid (2013) FA ASTRA2006/007 Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen, Zürich
-

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 31.10.2014

Grunddaten

Projekt-Nr.: VSS2009/705
Projekttitel: Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das EM Fahrbahnen
Enddatum: 31.10.2014

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die langfristige Erhaltungsplanung im Bereich des Teilsystems Fahrbahnen beruht auf der Grundlage der netzweiten Zustandserhebung und -bewertung im zu unterhaltenden Strassennetz. Bei diesem teilsystembezogenen langfristigen Planungsprozess dienen unterschiedliche Zustandseigenschaften der Fahrbahnoberfläche als Kenngrösse für eine Planung von Erhaltungsmaßnahmen. Diese Zustandsinformationen liegen jeweils für Bewertungseinheiten vor, deren Grösse für eine Zustandserhebung und -bewertung zweckmässig erscheint. Für eine langfristige Planung von Erhaltungsmaßnahmen sind die Längen der vorhandenen Bewertungseinheiten der Fahrbahnoberfläche in der Regel zu klein und damit nicht praktikabel. Deshalb werden aus den Bewertungseinheiten Planungseinheiten gebildet, sogenannte homogene Strecken.

Die Anwendung bekannter Verfahren zur Bildung von Planungseinheiten für die langfristige Erhaltungsplanung von Fahrbahnen zeigt Schwächen in Bezug auf die Streckenlänge. Die in der Praxis gewählten Längen von auszuführenden bzw. ausgeführten Erhaltungsmaßnahmen am Strassenoberbau weichen zum Teil erheblich von den Ergebnissen aus der Anwendung der bisherigen Verfahren ab.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Erarbeitung eines Verfahrens, das zu einer praxisorientierten, wirtschaftlich optimalen Bildung von Planungseinheiten, sogenannte homogene Strecken, bei Fahrbahnen unter Berücksichtigung von Zustand und daraus folgenden technisch sinnvollen Erhaltungsmaßnahmen führt.

Im vorliegenden Forschungsprojekt erfolgte die Entwicklung eines Algorithmus für die Aggregation von Bewertungseinheiten zu Planungseinheiten im Teilsystem Fahrbahnen. Bisherige bekannte Verfahren betrachten fast ausschliesslich die Zustandsdaten der Bewertungseinheiten. Kein bekanntes Verfahren berücksichtigt Randbedingungen, welche durch unterschiedliche Erhaltungsmaßnahmen vorgegeben werden können. Zur Verbesserung der erkannten Schwäche der bisherigen Verfahren in Bezug auf die Länge der gebildeten Planungseinheiten wurden deshalb die Erhaltungsmaßnahmen und deren Wirtschaftlichkeit in den Mittelpunkt gestellt.

Der im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Algorithmus verwendet Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche, Entwicklung der Zustände mit Hilfe von Prognosemodellen, typisierte Erhaltungsmaßnahmen und ein vollständiges Kostenmodell und erlaubt zumindest theoretisch die Herleitung von optimalen Planungseinheiten für Erhaltungsmaßnahmen. Dafür wurde ein heuristisches Verfahren entworfen, das sofern eine zulässige Lösung vorliegt, eine solche auch findet und in begrenztem Umfang auch optimiert. Genauere Aussagen über die Qualität der gefundenen Lösung in Bezug auf das Optimum lassen sich leider nicht treffen. Im Rahmen eines Realisierbarkeitstests erfolgte die Anwendung des Algorithmus an zwei Fallbeispielen. Dafür wurden im Vorfeld einerseits Zustandsdaten in Form eines fiktiven Indexes IX künstlich generiert und andererseits beispielhaft Typen von Erhaltungsmaßnahmen mit relevanten Randbedingungen und Auswirkungen für diesen Index IX definiert. Anhand dieser Daten konnte der Algorithmus die Aggregation durchführen, wobei eine Zusammenfassung der Bewertungseinheiten zu Planungseinheiten bei Minimierung der Gesamtkosten erfolgreich war und zu sinnvollen Ergebnissen führte.

Das entwickelte und an Beispielen getestete Verfahren zur Bildung von Planungseinheiten bzw. homogenen Strecken für die Erhaltungsplanung von Fahrbahnen erlaubt in der vorliegenden Fassung keine Verwendung in der Praxis, da eine allgemein anerkannte Kombination von Indices zur Festlegung von Erhaltungsmaßnahmen noch nicht vorliegt. Der Algorithmus ist an sich praxistauglich und kann an jede noch festzulegende Kombination von Zustandsmerkmalen angepasst werden. Dabei sollten definierte Randbedingungen von gewählten Typen von Erhaltungsmaßnahmen durch ausreichendes Datenmaterial plausibilisiert werden.



Zielerreichung:

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erarbeitung eines Verfahrens, das eine praxisorientierte, wirtschaftlich optimale Methode zur Bildung von homogenen Erhaltungsabschnitten bei Fahrbahnen darstellt unter Berücksichtigung von technisch möglichen Erhaltungsmaßnahmen. Dabei sind die Bedürfnisse unterschiedlicher Strassennetze des Bundes und der Kantone zu berücksichtigen.

Folgerungen und Empfehlungen:

Das im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Rechenverfahren (Algorithmus) unter Verwendung von Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche, Entwicklungen der Zustände mit Hilfe von Prognosemodellen, typisierte Erhaltungsmaßnahmen und einem vollständigen Kostenmodell ist geeignet zur Herleitung von optimalen Planungseinheiten im Rahmen der objektbezogenen Erhaltungsplanung vom Teilsystem Fahrbahnen. Zusätzlich wurde die Bildung von Planungseinheiten auf für drei aufeinanderfolgende Jahre realisiert. Grundsätzlich lässt sich die Streckenbildung theoretisch auf weitere Folgejahre und auch auf weit grössere Streckennetze anwenden, unter der Voraussetzung, dass die Datengrundlagen vorhanden sind.

Es hat sich gezeigt, dass die homogene Streckenbildung sehr stark von einzelnen Randbedingungen der Erhaltungsmaßnahmen abhängt, wie z. B. technisch sinnvoller Anwendungsbereich und Rücksetzwerte der Erhaltungsmaßnahmen. Inwieweit diese Annahmen für die Praxis abgestützt sind, konnte nicht untersucht werden und sollte in einem nächsten Fokus stehen. Gleiches gilt für das Prognosemodell eines Zustandsindizes. Dabei sind Zustandsmerkmale von Bedeutung, welche einen direkten Bezug zu Erhaltungsmaßnahmen haben bzw. einen Rückschluss auf solch erlauben. Auswertungen bzw. Analysen von durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen können erst durchgeführt werden, wenn entsprechendes Datenmaterial zur Verfügung steht.

Findet eine kontinuierliche Erhebung von Daten der durchgeführten Erhaltungsmaßnahmen statt, ist eine ausreichende Datenbasis für eine Untersuchung vorhanden. Diese Daten sollten einer Analyse in Bezug auf die Kosten, die Ausführungsbedingungen und die Wirkung der Erhaltungsmaßnahmen unterzogen werden.

Das entwickelte und an Beispielen getestete Verfahren zur Bildung resp. Bestimmung von homogenen Strecken erlaubt in der vorliegenden Fassung keine allgemeine Verwendung in der Praxis da eine allgemein anerkannte Kombination von Indizes zur Festlegung von Erhaltungsmaßnahmen noch nicht vorliegt. Dies wäre zu normieren.

Publikationen:

Hajdin, R., M. Botzen, F. Schiffmann und H.P. Lindenmann (2014) Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen, VSS2009/705, Schriftenreihe UVEK, Bern

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Lindenmann, Prof.

Vorname: Hans Peter

Amt, Firma, Institut: Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Das mit der Forschungsarbeit vorgestellte Rechenverfahren zur Herleitung von homogenen Strecken, basierend auf den mathematisch wissenschaftlichen Ausführungen, stellt für praxisorientierte Anwender z. T. grosse Anforderungen an das Verständnis für den komplexen Inhalt des Berichtes.

Der Bericht liefert gleichwohl wichtige und interessante Aussagen zur Bildung von homogenen Abschnitten. Er stellt einen wichtigen Bestandteil innerhalb dieses Themas im Erhaltungsmanagement dar und ist eine wertvolle Ergänzung bisheriger, bekannter Methoden. Das Projektziel konnte erreicht werden, obgleich die konkrete Umsetzung noch in der Praxis an realen Daten verifiziert werden muss.

Umsetzung:

Eine direkte Umsetzung in die Praxis ist jedoch verfrüht. Wichtige für den entwickelten Algorithmus vorausgesetzte Grundlagen, welche in der Praxis abgestützt und plausibilisiert sind, fehlen weitgehend bei den Strassenbetreibern. Dies schliesst eine allgemein anerkannte Kombination von Indexwerten zur Festlegung von technisch sinnvollen Erhaltungsmaßnahmen ein.

weitergehender Forschungsbedarf:

Für eine Umsetzung des Algorithmus sind vertiefte Analysen in Bezug auf die Auswirkung von Erhaltungsmaßnahmen auf den Zustand und die Zustandsentwicklung notwendig. Zusätzlich besteht der Bedarf an einer Entwicklung von Modellen der Zustandsentwicklung von unterschiedlichen Zustandsmerkmalen der Fahrbahnoberfläche.

Einfluss auf Normenwerk:

Aufgrund der fehlenden Grundlagen für die Anwendung des Algorithmus ist eine Normierung zum jetzigen Zeitpunkt verfrüht.

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Bär

Vorname: Hans

Amt, Firma, Institut: Bärconsulting AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 15.06.2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrolle von Fundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbauasphalt mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
		Nachhaltigkeitsbeurteilung	
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Veillissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012

