Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

DISSERTATION

ENTWICKLUNG EINES NUTZERKOSTENMODULS IM ÖSTERREICHISCHEN PMS

DEVELOPMENT OF A USER COST MODULE IN THE AUSTRIAN PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM

ausgeführt zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

unter Anleitung von

o.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.nat.techn.Dr.h.c. Johann Litzka

Univ.Doz.Dipl.-Ing.Dr.nat.techn. Walter Pichler

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von
Dipl.-**Ing. Barbara Brožek**
Kennzahl / Matr.Nr.: 086610 / 9826381
Engelshofengasse 9
1230 Wien

Wien, im November 2009 Unterschrift:

VORWORT

Ziel dieser Arbeit ist eine verstärkte Einbeziehung der Straßenbenützer in das Erhaltungsmanagement der Straßen, jedoch ist es stets notwendig auch die Anwendbarkeit im österreichischen Pavement Management System, insbesondere auch auf dem hochrangigen Straßennetz, zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang möchte ich mich für die Unterstützung durch die ASFiNAG und das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie sehr herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Dipl.-Ing.Dr. Weninger-Vycudil, dem die Entwicklung des derzeit großflächig in Österreich eingesetzten sytematischen Straßenerhaltungssystems zu verdanken ist. Durch seine Kenntnis der Systemwirkungen war er sowohl bei Fragen zur Systemkonfiguration als auch zur Implementierung ein wertvoller Diskussionspartner und für so manchen hilfreichen Input verantwortlich.

Maßgeblichen Anstoß und Unterstützung zu dieser Arbeit erhielt ich jedoch von Prof.Dipl.-Ing.Dr. Litzka, ihm möchte ich besonders meinen Dank aussprechen. Er motivierte, leitete an, korrgierte und stellte die Inhalte zur Diskussion, sodass diese Dissertation schrittweise entstehen konnte.

Auch Univ.Doz.Dipl-Ing.Dr. Pichler möchte ich danken, der sich als Koreferent zur Verfügung stellte und die Arbeit kritisch beleuchtete.

Die Möglichkeit zu dieser Arbeit verdanke ich nicht zuletzt auch meiner Familie. Vielen Dank an meinen Mann, meine Eltern und meinen Bruder.

KURZFASSUNG

Entwicklung eines Nutzerkostenmoduls im österreichischen PMS

Bei Betrieb und Erhaltung der Straßeninfrastruktur steht neben der material- und bautechnischen Optimierung stets auch die Wirtschaftlichkeit im Zentrum der Überlegungen. Zur optimalen Erhaltungsplanung wurde ein österreichisches Pavement Management System entwickelt. Dieses ermöglicht die Entwicklung von optimierten Erhaltungsstrategien unter Fokussierung auf den Baulastträger. Als Erweiterung zu dem Vorhandenen wird in der gegenständlichen Arbeit ein Modul entwickelt, der die Erhaltungsplanung auf eine umfassende wirtschaftliche Basis stellt und eine Berücksichtigung von Straßennutzerkosten vorsieht.

Die Umsetzung erfolgt in zwei Schritten:

- Eingehende Literaturstudie, um die maßgebenden Einflussparameter identifizieren und deren Wirkung auf den Straßennutzer quantifizieren zu können (hierzu zählt ebenso die Definition von geeigneten Kostensätzen zur Monetarisierung der Wirkungen)
- Implementierung der ausgewählten Zusammenhänge in VIAPMS_AUSTRIA_NUTZ und Durchführung von Vergleichsrechnungen
  Hiermit wird es möglich, das Ergebnis einer Nutzerkosten-orientierten Optimierung anhand eines Beispielnetzes darzustellen. Weiters bietet dieser Modul die Möglichkeit, das gesamte Erhaltungsmanagement des österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetzes hinsichtlich der Wirkung auf den Straßennutzer zu beurteilen und gegebenenfalls nutzerfreundlichere Erhaltungsmaßnahmen in den Maßnahmenvorschlag aufzunehmen.

Aufgrund der durchführten Analysen können für die Berücksichtigung von Nutzerkosten in der Erhaltungsplanung folgende Aussagen getroffen werden:

- Grundsätzlich entstehen die maßgebenden Kosten für den Straßennutzer, einerseits aufgrund des Straßenzustands (diese lassen sich in den zustandsbedingten Nutzerkosten: Zeit-, Betriebs- und Unfallkosten, monetarisieren) und andererseits im Zuge von Baustellen (hier treten ebenfalls Kosten in den Gruppen Zeitkosten, zufolge Stau oder durch die reduzierte Geschwindigkeit im Baustellenbereich, Betriebs- und Unfallkosten auf).
- Mit Hilfe des entwickelten Moduls können auch für eine konventionelle Analyse (Optimierung nur für Baulastträgerkosten) die auftretenden Nutzerkosteneinsparungen durch die Erhaltungsmaßnahmen quantifiziert werden. In dem analysierten Beispielnetz ergeben sich hierbei gesamtwirtschaftliche Gewinne, die das eingesetzte Baulastträger-Budget bei weitem übersteigen.
- Zur Berücksichtigung der Nutzerkosten in der Optimierung wurde eine Methode entwickelt, die sowohl einen maximalen Gewinn für den Straßennutzer (unter den gegebenen budgetären Randbedingungen) als auch einen guten Zustand der Straßensubstanz gewährleistet.

Eine Darstellung der entstehenden Nutzerkosten beziehungsweise eine Optimierung des Erhaltungskonzepts unter Berücksichtigung der Nutzerkosteneinsparungen kann sowohl für einen Einzelabschnitt als auch für ein flächiges Straßennetz durchgeführt werden.

ABSTRACT

Development of a User Cost Module in the Austrian Pavement Management System

In terms of operating and maintaining road infrastructure the main issues are material and structural optimisation and among these in all aspects the effects on economy. To offer optimal maintenance planning an Austrian pavement management system has been developed. Optimised maintenance strategies (taking the road owner's intrest as main criteria) can be developed by using this tool. This research offers an enhancement of the existing PMS and the development of a module, which enables a pavement management on a total economic basis, including user cost aspects.

The implementation was conducted in two steps:

- Literature study: to identify the relevant impacts on the road user and define the main parameters to quantify their influence. Therefore also unit cost values had to be fixed.
- Implementation of the chosen impacts into VIAPMS_AUSTRIA_NUTZ and execute comparative calculations. With this tool it is possible to show the effects of user friendly maintenance work optimisation on a road-network.
  The tool also offers the possibility to evaluate the total network of Austrian motorways and expressways in terms of its user-friendliness. As a result the authorities have the option of taking more user friendly maintenance work into their catalogue.

On the basis of the undertaken analysis considering user costs within the maintenance planning the following conclusions could be drawn.

- The most relevant cost for road users are caused on the one hand by the road surface condition (roughness, skid resistance,...) and can be summarized in terms of time-, vehicle operating- and accident costs. On the other hand user costs are caused by road works through the worksite itself e.g. the time loss through queuing or reduced speed in the construction area. Those costs can also be drawn to time costs (work site or queuing), operating costs and accident costs.
- With the developed module it is possible to quantify user costs, which occur by using a traditional pavement management (optimisation based on agency aspects). This has been done on a representative network and it could be seen, that the gained user cost revenues (allocated by the applied maintenance strategies) multiply overcome the applied agency costs.
- For considering user costs in the optimisation algorithm a method was developed which covers two aspects. Firstly within the optimisation the user cost savings are maximized (under the financial boundary conditions) and secondly a good condition of the road substance is guarantieed.

The demonstration of the arising user costs or the optimisation of the maintenance concept under the issue of user cost savings can be applied for one single section or a whole defiend road network.

INHALTSVERZEICHNIS:

1. Aufgabenstellung und Zielsetzung 7
2. Das Österreichische Pavement Management System 8
2.1. Systematische Erhaltungsplanung auf dem höherrangigen Straßennetz 8
2.2. Berücksichtigung von Nutzerkosten 11
2.2.1. Derzeitige Berücksichtigung von Nutzerkosten 11
2.2.2. Erweiterte Berücksichtigung von Nutzerkosten 11
3. Wirtschaftlichkeit einer Massnahme 14
3.1. Kosten und Nutzen 14
3.1.1. Kosten 14
3.1.1.1. Bewertungsmethoden 15
3.1.1.2. Grenzkosten 16
3.1.1.3. Vergleich der Kosten 16
3.1.2. Nutzen 19
3.2. wirtschaftliche Analysemethoden 20
3.2.1. Bewertungsverfahren für Maßnahmen 20
3.2.2. Strategievergleich 21
4. Überblick über Modelle zur Berücksichtigung von Nutzerkosten 23
4.1. Nutzerkosten im Rahmen von Pavement Management Systemen 24
4.1.1. Das Modell der Weltbank – HDM-4 24
4.1.2. EU-Projekt FORMAT, Fully Optimised Road Maintenance 25
4.2. Nutzerkosten im Zuge von Life-Cycle-Cost-Analysen 26
4.2.1. Österreich – Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Oberbaukonstruktionen im Straßenbau (RVS 03.08.71) 26
4.2.2. Österreich - Wegekostenrechnung für die Straße 27
4.2.3. Schmuck - Straßenerhaltung mit System 28
4.2.4. Deutschland - Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS) 28
4.2.5. Schweiz – Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr 29
4.2.6. USA – Life-Cycle Cost Analysis 29
4.2.7. HEATCO (Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment) 30
5. Kenngrössen des Verkehrs 32
5.1. Verkehrsbelastung 32
5.1.1. k-Wert 32
5.1.2. typisierte Ganglinien 33
5.1.3. funktionaler Zusammenhang 34
5.1.4. Resümee 36
5.2. Kapazität 36
5.2.1. Kapazität auf der freien Strecke 37
5.2.2. Kapazität im Baustellenbereich 39
5.2.3. Resümee 42
5.3. Geschwindigkeiten 44
5.3.1. frei gefahrene Geschwindigkeit 45
5.3.2. Resümee 49
5.4. repräsentative Fahrzeugflotte 50
6. Zustandsbezogene Nutzerkosten 52
6.1. Zustandsentwicklung / Zustandsprognose 52
6.2. Zusätzliche Zeitkosten 53
6.2.1. Einfluss des Straßenzustands auf die Geschwindigkeit 53
6.2.1.1. Längsebenheit und Textur im HDM-4 Modell 53
6.2.1.2. Befahrbarkeitsindex 55
6.2.1.3. Theoretische Wasserfilmtiefe 56
6.2.1.4. Griffigkeit 57
6.2.1.5. Resümee 57
6.2.2. Berechnung des zusätzlichen Zeitbedarfs 58
6.2.3. Zeitkosten 58
6.2.3.1. Kostensätze 59
6.2.3.2. Resümee 61
6.3. Fahrzeugbetriebskosten 61
6.3.1. Betriebsmittelbedarf 62
6.3.1.1. Ansätze aus der Literatur 62
6.3.1.2. Resümee 69
6.3.2. Kostensatz – Betriebsmittel 71
6.4. Sicherheit – Unfallkosten 72

6.4.1. Kenngrößen ... 72
6.4.1.1. Unfalldichte ... 72
6.4.1.2. Unfallrate ... 73
6.4.1.3. relative Unfallhäufigkeit bei Nässe ... 74
6.4.1.4. Unfallhäufungsstellen ... 74
6.4.2. Kostensatz Sicherheit ... 74
6.4.2.1. Unfallkostensatz ... 75
6.4.2.2. Unfallkostenrate ... 76
6.4.2.3. Resümee Unfallkosten ... 77
6.4.3. Einflussgrößen auf die Sicherheit eines Abschnitts ... 78
6.4.3.1. Griffigkeit und Unfallrisiko allgemein ... 78
6.4.3.2. Griffigkeit und Unfallhäufigkeit in Österreich ... 83
6.4.3.3. Längsebenheit und Unfallhäufigkeit ... 86
6.4.3.4. Spurrinnentiefe / fiktive Wassertiefe und Unfallhäufigkeit ... 87
6.4.3.5. Resümee ... 89
7. Baustellenfolgekosten ... 92
7.1. Baustellenauslegung ... 92
7.1.1. Möglichkeiten der Verkehrsführung ... 92
7.1.2. Verkehrsführung im jeweiligen Maßnahmenfall ... 96
7.1.3. Optimierung der Baustellenlänge ... 99
7.1.3.1. Ansätze aus der Literatur ... 100
7.1.3.2. Baustellenlängen in VIAPMS_NUTZ ... 101
7.1.4. Dauer der Baustelle ... 102
7.2. zusätzlicher Zeitbedarf ... 103
7.2.1. reduzierte Geschwindigkeit im Baustellenbereich ... 104
7.2.2. gebundener Verkehr ... 105
7.2.3. gestauter Verkehr ... 107
7.2.3.1. Warteschlangenmodelle ... 108
7.2.3.2. Weitere Modelle der Stauentwicklung ... 111
7.2.3.3. Resümee ... 112
7.3. Sicherheit – Unfallkosten ... 113
7.3.1. Unfallraten im Baustellenbereich ... 113
7.3.2. Baustellenbedingte Unfallraten VIAPMS_NUTZ ... 115
7.4. zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten ... 116
8. sonstige Faktoren / Kosten Dritter ... 118
8.1. Umweltkosten / Klimakosten ... 118
8.2. Lärmkosten ... 119
8.3. Schadstoffkosten ... 120
8.4. Induzierter Verkehr / verlagerter Verkehr ... 120
8.5. Resümee ... 121
9. Umsetzung in VIAPMS_AUSTRIA_NUTZ ... 122
9.1. Allgemeine Abgrenzungen ... 123
9.1.1. Beispielnetz ... 123
9.1.2. Zustandsbedingte Nutzerkosten ... 125
9.1.3. Baustellenbedingte Nutzerkosten (Baustellenfolgekosten) ... 127
9.2. Möglichkeiten der Berücksichtigung von Nutzerkosten in der Optimierungsroutine ... 129
9.2.1. Methode 1: Vergleichende Auflistung der Barwerte ... 129
9.2.2. Methode 2: Verhältnis der eingesparten Nutzerkosten zu Baulastträgerkosten ... 130
9.2.3. Methode 3: Verhältnis des konventionellen Nutzens und der Gesamtkosten ... 131
9.3. Veränderung des Erhaltungsvorschlags durch die Berücksichtigung von Nutzerkosten ... 132
9.3.1. Netzebene ... 132
9.3.1.1. Vergleichende Auflistung der Barwerte als Ergänzung zum konventionellen Nutzen / Kosten Verhältnis ... 132
9.3.1.2. Optimierung eingesparte Nutzerkosten / Baulastträgerkosten ... 135
9.3.1.3. Optimierung eingesparte Nutzerkosten / Baulastträgerkosten mit Begrenzung des Substanzwerts ... 138
9.3.1.4. Resümee Netzebene ... 144
9.3.2. Abschnittsebene ... 145
9.3.2.1. Beispiel 1 (Abschnitt 48 - Asphalt) ... 146
9.3.2.2. Beispiel 2 (Abschnitt 10 - Asphalt) ... 149
9.3.2.3. Beispiel 3 (Abschnitt 276 - Beton) ... 153
9.3.2.4. Resümee Abschnittsebene ... 155
9.4. Resümee – Umsetzung und Implementierung ... 156
10. Zusammenfassung ... 157
Executive Summary ... 166

1. AUFGABENSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Der Erhaltungsaufwand von Österreichs Straßen hat eine nicht zu vernachlässigende Größe angenommen und wird in den nächsten Jahren noch weiter ansteigen. Zur optimalen Maßnahmenplanung wurde ein österreichisches Pavement Management System (VIAPMS_AUSTRIA) entwickelt [1], welches das Ziel verfolgt, mit einem begrenzten finanziellem Aufwand durch eine objektive und nachvollziehbare Entscheidungsfindung zu einer optimierten Erhaltungsstrategie zu kommen. Hierdurch können langfristig Kosten (insbesonders für den Straßenerhalter) eingespart und ein verkehrssicherer Straßenzustand gewährleistet werden.

Grundlage für das Optimierungsverfahren sind der momentane Straßenzustand und dessen zukünftige Entwicklung unter Berücksichtigung der möglichen Erhaltungsmaßnahmen und der gegebenen Budgetverfügbarkeit.

Die Straßenerhaltung darf sich aber nur auf erster Ebene allein auf betriebswirtschaftliche Kriterien (Straßenbaulastträgerkosten) stützen, für einen umfassenden Ansatz sind ebenso volkswirtschaftliche Aspekte (volkswirtschaftliche Kosten bzw. Nutzen) zu berücksichtigen. Im Sinne dieser gesamtwirtschaftlichen Betrachtung müssen für die Straßenerhaltungsplanung weitere Komponenten, die insbesondere den Straßennutzer betreffen, mit einbezogen werden. Hierunter fallen die Auswirkungen des Straßenzustandes auf den Nutzer, aber auch die Auswirkung der Durchführung der Erhaltungsmaßnahme auf den Reisezeitbedarf, die beeinträchtigte Verfügbarkeit, das Unfallgeschehen, den Ressourcenverbrauch sowie die Umwelt. Mit der Auswirkung eines schlechten Straßenzustandes auf die Nutzerkosten beziehungsweise der Beeinträchtigung der Nutzer durch Erhaltungsbaustellen werden die Straßenverwaltungen in den nächsten Jahren verstärkt konfrontiert werden.

Auch international tritt die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen immer mehr in den Vordergrund. So lassen sich zu dieser Thematik verschiedene Ansätze finden, wobei diese sich im Schwerpunkt der Betrachtung stets unterscheiden und nicht generell auf das österreichische Straßennetz übernommen werden können (z.B. Deutschland, Schweiz, HDM, etc.).

Mit der vorliegenden Arbeit soll eine Erweiterung des bisher in Österreich angewandten Pavement Management Systems (VIAPMS_AUSTRIA) geschaffen werden. Diese ermöglicht in Folge eine Erhaltungsplanung, der eine umfassend wirtschaftliche Optimierung zugrunde liegt. Das bedeutet, es können die Kosten und der Nutzen sowohl auf der Seite der Baulastträger als auch auf jener der Straßennutzer berücksichtigt werden. Wobei auf der Seite der Nutzer nicht nur die Wirkung des Straßenzustands, sondern auch die Beeinträchtigungen durch eine Baumaßnahme relevant sind. Die Auswirkungen von Erhaltungsmaßnahmen auf den Nutzer betreffen insbesondere die Bereiche des zusätzlichen Reisezeitaufwands, der erhöhten Unfallwahrscheinlichkeit sowie den Betriebsmittelbedarf.

Die beiden Bereiche Nutzer und Erhalter müssen in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen, da einerseits die Straße für den Nutzer einen optimalen Zustand anbieten soll, andererseits auch auf der Seite des Erhalters die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund steht. Hierfür müssen entsprechende Grenzen definiert werden.

Ziel ist es, schon vorhandene Ansätze aus der internationalen Literatur an die österreichische Situation, im besonderen an die in Österreich vorhandenen Daten, anzupassen oder gegebenenfalls zu erweitern, bzw. auch um weitere Elemente zu ergänzen, sodass alle relevanten Aspekte abgedeckt werden können. Dieser Nutzerkostenmodul soll sodann in das österreichische PMS integriert werden.

2. DAS ÖSTERREICHISCHE PAVEMENT MANAGEMENT SYSTEM

Im Zuge eines gesamtwirtschaftlichen Ansatzes wird angestrebt alle Kosten zu berücksichtigen, die der Bevölkerung in irgendeiner Weise durch einen schlechten Straßenzustand oder durch die Einrichtung und den Betrieb von Baustellen erwachsen [2], um ein effizientes Handeln zu ermöglichen[1]. Das beinhaltet nicht nur die Wirkung auf den Straßennutzer per se, sondern kann auf die umgebende Umwelt ausgeweitet werden; unter diesem Aspekt sind genauso Lärm- und Schadstoffemissionen zu betrachten.

Die Nutzung der Straße wird durch eine Vielzahl an Straßeneigenschaften beeinflusst, die maßgebenden Komponenten sollten auch in der systematischen Straßenerhaltung berücksichtigt werden. Auf diesem Gebiet wurde in den letzten Jahren im europäischen Raum weitreichende Forschung betrieben. So ist es für die gegenständliche Arbeit naheliegend, auf die vorhandenen Studien zurückzugreifen, diese zu adaptieren und eventuell zu erweitern. Ausgehend von diesen Zusammenhängen kann ein Modell entwickelt werden, das alle relevanten Nutzerkomponenten berücksichtigt und des Weiteren eine Verknüpfung von Netzebene und Projektebene erreicht. Das heißt konkret, die getroffenen Entscheidungen beziehen sich auf die Optimierung der Baustellenabfolge und ihre grobe Auslegung. Diese bilden die Grundlage für die Erstellung des Bauprogramms durch den zuständigen Erhaltungsingenieur. Über das gesamte Netz kann hiermit die Zustandsverteilung und Entwicklung über den betrachteten Zeitraum unter Berücksichtigung der ausgewählten Maßnahmen dargestellt werden.

In der gegenständlichen Arbeit werden als Optimierungskriterium einerseits die Kosten herangezogen, die sich durch einen schlechten Straßenzustand in Form von zusätzlichem Reisezeitbedarf, zusätzlichem Betriebsmittelbedarf und einer erhöhten Unfallwahrscheinlichkeit (zustandsbezogenen Nutzerkosten) ergeben. Andererseits kommt es durch die Einrichtung und den Betrieb von Baustellen direkt zu einer Beeinträchtigung des Nutzers. Sie verursachen eine eingeschränkte Verfügbarkeit der Straße, einen erhöhten Zeit- sowie Betriebsmittelbedarf, eine erhöhte Unfallwahrscheinlichkeit und gleichzeitig auch negative Wirkung auf die Umwelt. Das Kosten / Nutzen Verhältnis dient als Grundlage für die Erstellung der Erhaltungsstrategie. In weiterer Folge kann auch die Wirkung des Straßenzustands und der Einrichtung von Baustellen auf die Umwelt, im ökologischen Sinn und auf die anliegenden Bewohnern und Bebauungen, mit einbezogen werden.

2.1. Systematische Erhaltungsplanung auf dem höherrangigen Straßennetz

Das in Österreich derzeit auf dem hochrangigen Straßennetz (Autobahnen- und Schnellstraßennetz) in Verwendung befindliche systematische Erhaltungssystem (VIAPMS_AUSTRIA) basiert vorrangig auf betriebswirtschaftlichen Überlegungen. Es ermöglicht unter Berücksichtigung der Geometrie und des Straßenaufbaus, des Straßenzustands und der vorhandenen Verkehrsbelastung, sowie der Prognose der Entwicklung der beiden letztgenannten Einflussgrößen über den Betrachtungszeitraum die nachvollziehbare Entwicklung von optimierten Erhaltungsstrategien.

1 Effizientes Handeln bedeutet, die verfügbaren Ressourcen wirksam zu gebrauchen, indem man unter gegebenen Umständen und Mitteln den höchsten Ertrag erzielt oder mit dem geringsten Mitteleinsatz einen vorgegebenen Ertrag erhält.

2 VIAPMS™ ist ein Produkt der kanadischen Firma DEIGHTON, das zur Unterstützung des Erhaltungsmanagement

Die Umsetzung erfolgt auf Basis einer Lebenszyklusanalyse und wird mit Hilfe der Software VIAPMS[2] realisiert. Sie stützt sich auf die Geometrie- und Oberbaudaten, die Verkehrsbelastungen und die regelmäßig durchgeführten Zustandserfassungen (Spurrinnen, Griffigkeit, Längsebenheit, Oberflächenschäden und Risse). Für diese Daten sind Prognosefunktionen entwickelt worden, wodurch der Verlauf des Straßenzustands über die Analyseperiode prognostiziert werden kann. Auf der Seite der Randbedingungen sind die maßgebenden Einflussgrößen der jeweilige Maßnahmenkatalog, der in enger Abstimmung mit den vor Ort tätigen Ingenieuren erstellt wurde, und die Budgetvorgaben, wodurch die maximal vorhandenen finanziellen Mittel festgelegt werden können. Einen Überblick über die Elemente der österreichischen Erhaltungsplanung bietet Abbildung 1. Eine ausführliche Darstellung der systematischen Erhaltungsplanung in Österreich ist Weninger-Vycudil [1] zu entnehmen.

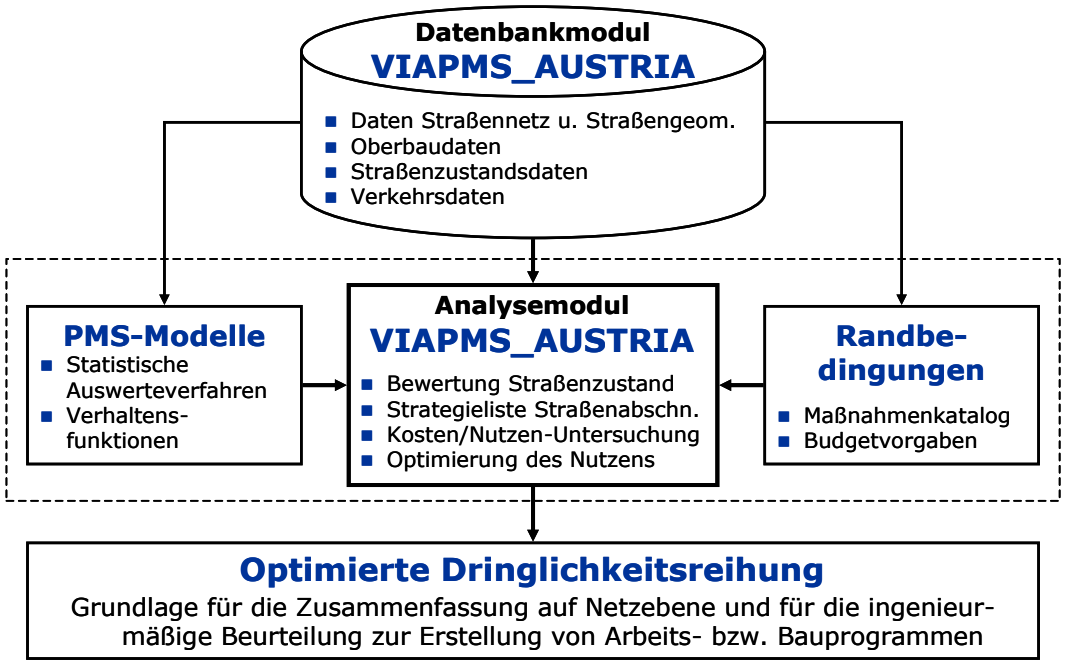


Abbildung 1: Elemente des österreichischen PMS nach [1]

Es erfolgt eine regelmäßige Aktualisierung nicht nur der Zustands- und Verkehrsdaten, sondern auch der Geometrie und Oberbaudaten als Folge von durchgeführten Erhaltungs- und Neubaumaßnahmen. Neu aufgenommene Zustandsdaten bewirken ebenfalls eine Kalibrierung der Zustandsprognosefunktionen, sodass diese an den tatsächlichen Zustand angepasst werden, um eine möglichst wirklichkeitsgetreue Abbildung des Zustands und der Zustandsveränderung zu ermöglichen. Besonders interessant hierbei sind die Informationen, die auf Ebene der einzelnen Fahrstreifen gewonnen werden. Hierzu zählen beispielsweise die Fahrstreifenbreite, aber auch Daten über den Oberbau (besonders falls Maßnahmen nur auf einem oder zwei Fahrstreifen durchgeführt wurden) sowie auch fahrstreifenspezifische Zustandsdaten. Verkehrsdaten werden über den gesamten Querschnitt gewonnen, jedoch besteht die Möglichkeit mit Hilfe von funktionalen Zusammenhängen eine Verteilung auf die einzelnen Fahrstreifen zu entwickeln. Diese zusätzlichen Informationen ermöglichen im Weiteren auch eine fahrstreifenspezifische Auswertung im Rahmen des PMS, wodurch eine problemorientierte Maßnahmenzuordnung durchgeführt werden kann.

Als Beurteilungsgröße für die Entwicklung eines Maßnahmenplans dient das Nutzen-Kosten-Verhältnis, das für alle technisch sinnvollen Maßnahmen in jedem homogenen Abschnitt

2 VIAPMS™ ist ein Produkt der kanadischen Firma DEIGHTON, das zur Unterstützung des Erhaltungsmanagement längsorientierter Bauwerke entwickelt wurde. Es ist ein offenes System, dass die Anwendung von individuellen Zustandsdaten, -prognosefunktionen, Maßnahmenkatalogen usw. ermöglicht.

gebildet wird. Der Nutzen kann mit Hilfe der Methode „Fläche zwischen den Kurven“ ermittelt werden. Grundlage bilden die Verhaltenskurven für den Gesamtwert eines Abschnitts (Beurteilungsgröße des Straßenzustands). Hierbei wird die Fläche zwischen der Verhaltenskurve der Null-Strategie (ohne Durchführung einer Maßnahme) und der betrachteten Maßnahmenstrategie, über die gesamte Betrachtungsperiode gebildet (siehe Abbildung 2 - FzK). Dieser Nutzen erfährt des Weiteren noch eine Gewichtung durch die Verkehrsbelastung auf dem jeweiligen Abschnitt.

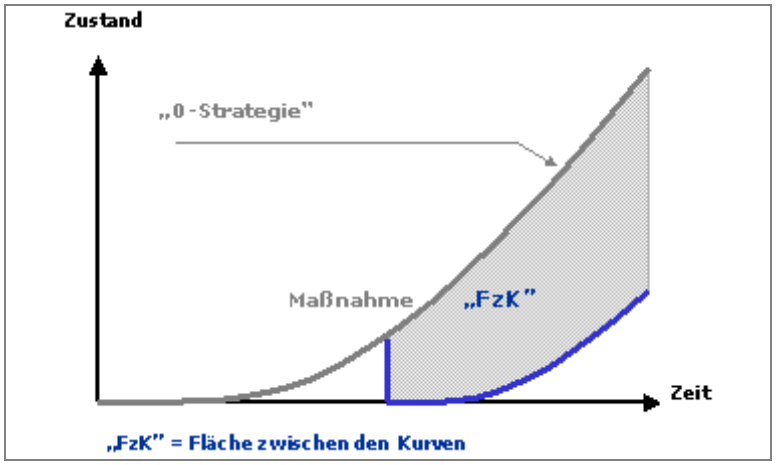


Abbildung 2: **Nutzenberechnung als „Fläche zwischen den Kurven“ [**1]

Der Gesamtwert selbst setzt sich aus den Teilgrößen Gebrauchs- und Substanzwert zusammen, welche den vorhandenen Straßenzustand (prognostiziert vom Jahr der Aufnahme auf das Jahr der Maßnahme) sowie das Alter der Konstruktion zusammenfassen. Im Rahmen der Ermittlung von Substanz-, Gebrauchs- und Gesamtwert kommt es durch die Zuordnung der Zustandswerte zu einer der 5 Zustandsklassen (1-sehr gut, 5-sehr schlecht) zu einer genormten Bewertung des homogenen Abschnitts. Hierdurch kann in anschaulicher Art und Weise der Zustand einer Straße oder die Zustandsverteilung (bezogen auf die Klassen eins bis fünf) des gesamten Straßennetzes dargestellt werden (siehe Abbildung 3).

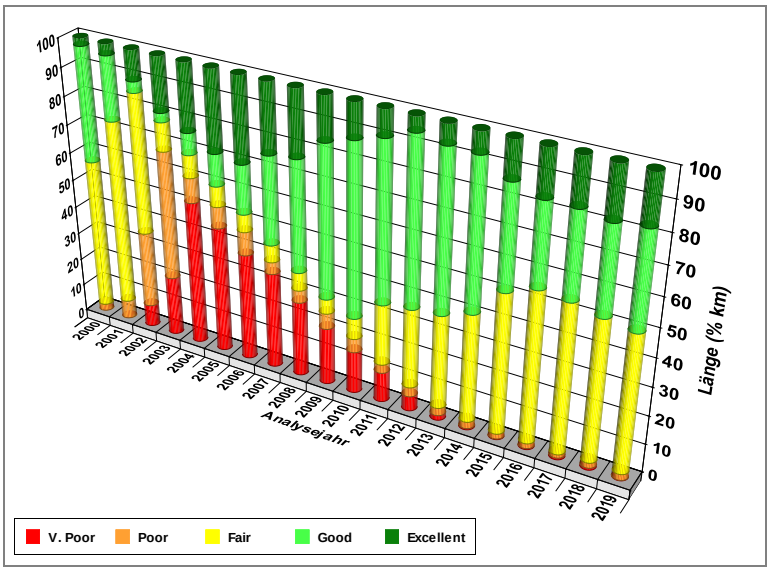


Abbildung 3:Zustandsverteilung eines Straßennetzes [1]

Die in der konventionellen Anwendung berücksichtigten Kosten beinhalten die Baulastträgerkosten der betrachteten Erhaltungsstrategien über den gesamten Betrachtungszeitraum. In weiterer Folge wird für jede Maßnahme in jedem homogenen Abschnitt das Nutzen-Kosten-Verhältnis gebildet. Unter Berücksichtigung der budgetären

Möglichkeiten kann die Maßnahme mit dem maximalen Nutzen ausgewählt werden. Das Ergebnis der Analyse stellt einen Vorschlag in Form von einer optimierten Maßnahmenabfolge für jeden betrachteten Abschnitt dar.

Die Analyse kann unter verschiedenen Gesichtspunkten durchgeführt werden. Einerseits ist es möglich, für unterschiedliche Budgetvorgaben die Zustandsverteilung für den gesamten Analysezeitraum darzustellen (Fragestellungen sind beispielsweise: Wie verändert sich mein Anteil in der Zustandsklasse 5 (sehr schlecht) bei unterschiedlichen budgetären Randbedingungen?). Andererseits kann auch für eine bestimmte Zustandsbedingung (z.B. maximal 20% der Netzlängen in der Zustandsklasse 4 (schlecht) und 5 (sehr schlecht)) der benötigte jährliche Finanzbedarf berechnet werden.

2.2. Berücksichtigung von Nutzerkosten

2.2.1. Derzeitige Berücksichtigung von Nutzerkosten

Die Straße dient nicht sich selbst, sondern sie wird für den Straßenbenutzer gebaut und bestmöglich erhalten. Auch im konventionellen Erhaltungsmanagementsystem wird die Komponente Nutzer berücksichtigt, im Besonderen bei der Zuordnung der Zustandsgrößen zu Zustandswerten. Hierbei ist die Frage zu beantworten: wodurch ist ein guter / schlechter Zustand festgelegt? Für Substanzeigenschaften kann diese Frage aufgrund von materialtechnischen Eigenschaften beantwortet werden, hingegen müssen bei den Gebrauchseigenschaften die Straßennutzer in Betracht gezogen werden.

Die Auswirkung eines schlechten Straßenzustands wird im Optimierungsprozess über die jeweilige Verkehrsstärke berücksichtigt, die als Gewichtungsfaktor in die Maßnahmenbewertung einfließt. Ist die Schwankungsbreite der Verkehrsstärke zu ausgeprägt, können, um ein ständiges Zurückreihen von gering belasteten Straßen zu vermeiden, Verkehrsstärken-Gruppen eingeführt werden.

Ein Bezug der Wirkung der Maßnahme auf den Nutzer ist jedoch nicht vorhanden. Kosten werden derzeit nur in Form von Baulastträgerkosten (Kosten für die Durchführung einer Maßnahme) in Rechnung gestellt.

2.2.2. Erweiterte Berücksichtigung von Nutzerkosten

Im Sinne einer gesamtwirtschaftlichen Erhaltungsplanung ist es erforderlich, auch die Nutzen und Kosten des Straßenbenützers in die Analyse mit aufzunehmen. Dem geht eine Analyse der vorhandenen Ansätze und Vorschläge zur Implementierung von Nutzerkosten voraus.

Ziel ist es ein Verfahren zu entwickeln, mit dem es möglich ist, Erhaltungsstrategien (in einem ersten Schritt für das Autobahnen- und Schnellstraßennetz) zu generieren, die alle nutzerrelevanten Aspekte berücksichtigen. Das Ergebnis begründet sich dann auf einer Optimierung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses und bietet einen Vorschlag zur Maßnahmenabfolge, die auch Art und Dauer von Baustellendurchführungen enthalten. Erweitert kann dieses Verfahren dann auch um die Aspekte der Umweltkosten werden.

Die Berücksichtigung von Straßennutzerkosten im gegenständlichen Projekt soll abhängig von der betrachteten Maßnahme durch Berechnung der zustandsbezogenen Nutzerkosteneinsparungen (jene Einsparungen die durch den verbesserten Zustand für den Nutzer generiert werden können) und der Baustellenfolgekosten (Kosten, die durch die Durchführung der Maßnahme dem Nutzer erwachsen) erfolgen.

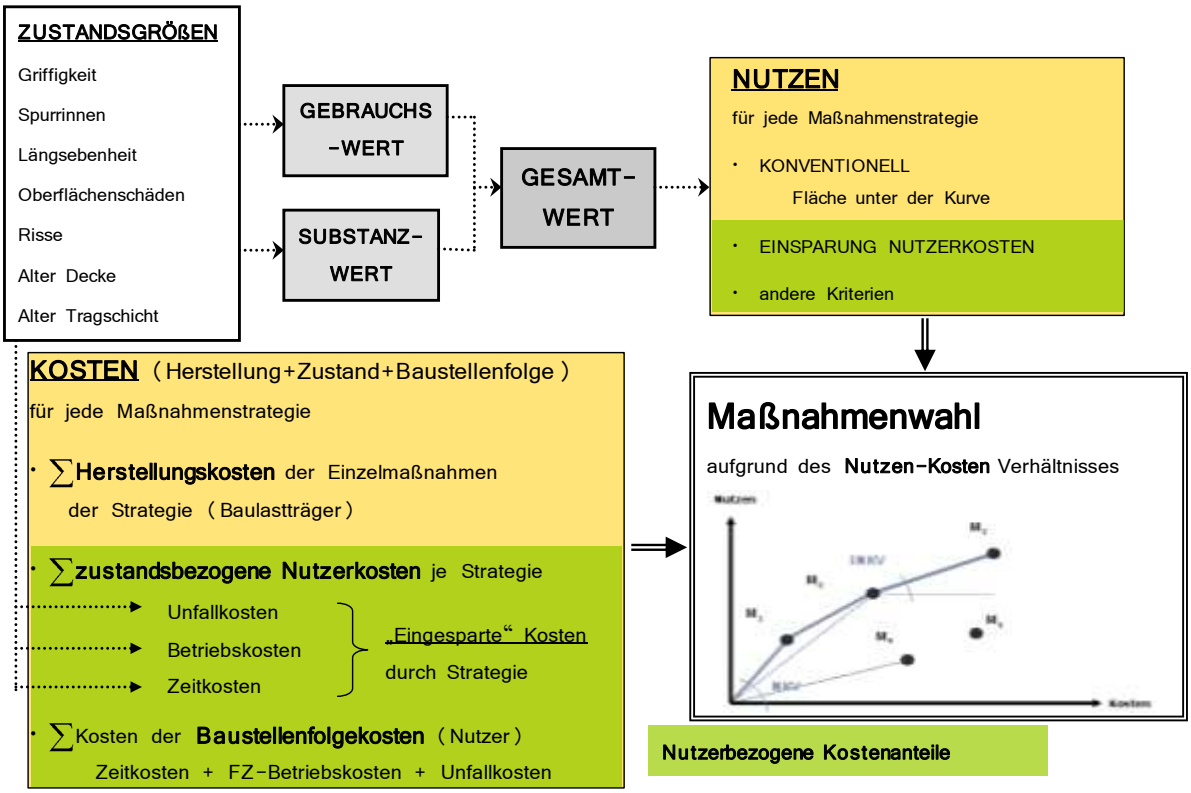


Abbildung 4: Konzeptansicht Erweiterung von VIAPMS um nutzerbezogene Kostenanteile

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Erweiterung des derzeitigen PMS in Österreich um nutzerbezogene Anteile. Dargestellt ist die herkömmliche Maßnahmenwahl aufgrund eines optimierten Nutzen-Kosten-Verhältnisses (gelb hinterlegt) und die mögliche Erweiterung zur Berücksichtigung von Nutzerkriterien (grün hinterlegt). Hierbei besteht die Möglichkeit, die Straßennutzer entweder auf der Seite der Nutzengennerierung oder auf der Seite der Kosten zu integrieren. Für die zweite Variante kann die Berechnung des Nutzens als Fläche zwischen den Kurven (Verhaltensfunktion der Null-Strategie und der ausgewählten Maßnahmenstrategie – siehe Kapitel 2.1) wie bisher übernommen werden, jedoch werden auf der Seite der Kosten die durch die Maßnahme entstehenden Nutzerkosten angeführt. Diese setzen sich aus den Anteilen der zustandsbezogenen Kosteneinsparungen (direkte Wirkung der Zustandsgrößen auf die Nutzerkosten unterteilt in Unfallkosten, Betriebskosten und Zeitkosten) und der Kosten zufolge Baustelleneinrichtung und –betrieb zusammen.

Zustandsbezogen Nutzerkosten entstehen durch die Veränderung der Zustandsgrößen, insbesondere der Griffigkeit, der Längsebenheit und der Spurrinnen (siehe Kapitel 6). In den Optimierungsprozess fließen diese als „eingesparte Kosten" ein. So sind sie stets in Vergleich zur Null-Strategie zu sehen (die Summenbildung erfolgt analog zur Berechnung des Nutzens mit Hilfe der Fläche zwischen den Kurven). In Abbildung 5 ist dies graphisch dargestellt, durch das Setzen einer Maßnahme kommt es zu einer Verbesserung des Straßenzustands und dies hat geringere zustandsbedingte Nutzerkosten zur Folge.

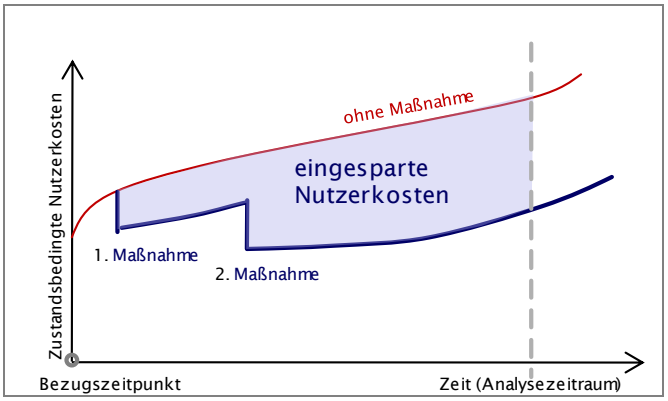


Abbildung 5: Verlauf der zustandsbedingten Straßennutzerkosten

Die Baustellenfolgekosten werden durch die jeweilige Baustellenauslegung definiert und setzten sich aus Zeitkosten, Fahrzeugbetriebskosten und Unfallkosten zusammen (siehe Kapitel 7). Zur besseren Vergleichbarkeit der Kosten werden diese diskontiert und auf den Bezugszeitpunkt (entspricht zumeist dem Analysebeginn) bezogen. Die Maßnahmenwahl (hierbei wird stets eine Maßnahmenstrategie gewählt, sie enthält über den gesamten Analysezeitraum eine Abfolge von Maßnahmen für einen Abschnitt) erfolgt dann über das Nutzen-Kosten-Verhältnis, wobei als begrenzender Faktor stets die vorhandenen finanziellen Mittel stehen. Wie im Effektivitätsdiagramm (siehe Abbildung 6) dargestellt, befinden sich jene Maßnahmenstrategien mit dem besten Nutzen-Kosten-Verhältnis entlang der Umhüllenden (M1, M2, M3), aus diesen kann in Abhängigkeit der verfügbaren Mittel die anzuwendende Maßnahmenstrategie ausgewählt werden.

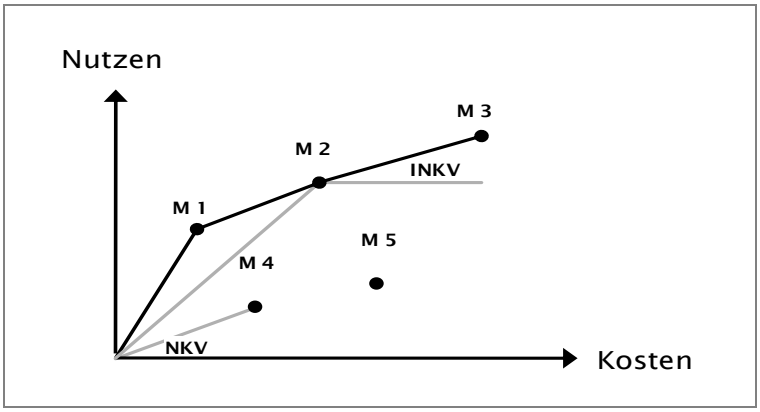


Abbildung 6: Effektivitätsdiagramm [1]

Bei der Berücksichtigung von Straßennutzerkosten ist zu beachten, dass es sich hierbei um volkswirtschaftliche Kosten handelt und sich durch eine Reduktion ein volkswirtschaftlicher Gewinn erwirtschaften lässt. Jedoch sind sie auf der Seite des Budgets nicht real verfügbar und können somit nur im Zuge eines Kosten-Minimal-Kriteriums hier direkt angesetzt werden. Die ist unter gewissen Umständen für ein Einzelprojekt sinnvoll, für netzweite Betrachtungen ist jedoch der Ansatz der Nutzerkosteneinsparungen zielführender.

Nahezu alle für die Berechnung der nutzerbezogenen Kostenanteile benötigten Geometrie- und Zustandsdaten werden in der vorhandenen Datenbank vorgehalten. Zusätzlich benötigte Daten müssen nach dem Aufwand für ihre Gewinnung und dem zusätzlichen Nutzen im Hinblick auf die Qualität des Ergebnisses beurteilt werden. Gegebenenfalls sind diese Größen für die fehlenden Abschnitte zu generieren und für deren gleichwertige Berücksichtigung im PMS mit Zustandsentwicklungen zu belegen.

3. WIRTSCHAFTLICHKEIT EINER MASSNAHME

Gesamtwirtschaftlich gesehen ist eine Investition gerechtfertigt, wenn daraus allgemeine Wohlstands- und Wachstumseffekte für die betreffende Volkswirtschaft entstehen [3].

Diese gesamtwirtschaftliche oder auch volkswirtschaftliche Sichtweise umfasst auch Sozial- und Wohlfahrtseffekte, die Betrachtung wird nicht mehr nur auf der betrieblichen Ebene durchgeführt sondern auf die überbetriebliche Ebene gehoben. Das Kernproblem bleibt jedoch die monetäre Bewertung der Wirkungen (nach [9]).

Das Ziel einer Wirtschaftlichkeitsrechnung besteht darin, unter Offenlegung der Methodik sowie der getroffenen Annahmen die Grundlage für vernünftige und nachvollziehbare Entscheidungen bereitzustellen. Es wird in der gegenständlichen Anwendung vermutlich nicht möglich, sein alle volkswirtschaftlichen Effekte zu erfassen, jedoch wird angestrebt, eine umfassend wirtschaftliche Basis für die Erhaltungsplanung zu schaffen. Es ist hierbei stets die Möglichkeit gegeben, diese Grundstruktur um weitere Zusammenhänge zu erweitern.

3.1. Kosten und Nutzen

Über die angeführten Nutzen und Kosten sollen die entstandenen Wirkungen aller Maßnahmenvarianten, wie sie auch in der Realität auftreten, abgebildet werden. Aus der Gesamtheit der auftretenden Kosten und Nutzen kann im Zuge der Modellbildung in Hinblick auf ein aussagekräftiges Ergebnis eine Auswahl getroffen.

Einige Größen, die sich besonders auf die entstehenden Kosten und Nutzen durchschlagen sind die Verkehrsbelastung (Gesamtmenge und Güterverkehrsanteil), die Kostensätze für die Monetarisierung, die Kosten der jeweiligen Erhaltungsmaßnahmen sowie die Nutzungsdauer der Straßenbefestigung oder einzelner Elemente.

Zur nachvollziehbaren Entscheidungsfindung ist es erforderlich, die Systemgrenzen (inhaltlich, räumlich und zeitlich) und die Randbedingungen sowie Nebenbedingungen möglichst detailliert festzulegen. Nur so ist es möglich, ein einfaches Entscheidungskriterium anzuwenden, die Glaubwürdigkeit des Ergebnisses zu gewährleisten und das Einfließen von persönlichen Einschätzungen zu vermeiden.

Ebenso ist es unumgänglich, die betrachteten Systemzustände zu definieren. Im systematischen Erhaltungsmanagement lassen sich zumeist eine Null-Strategie (hierbei werden nur laufende kleinräumige Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt, jedoch keine großflächigen Instandsetzungs- oder Erneuerungsmaßnahmen) und eventuell mehrere Maßnahmenstrategien finden, die unterschiedliche Maßnahmenarten und Eingriffszeitpunkte vorsehen. Ausgehend von dieser Null-Strategie können die Kosten und Nutzen anderer Maßnahmenvarianten verglichen werden.

3.1.1. Kosten

Kosten entstehen an unterschiedlichen Stellen, zu unterschiedlichen Zeitpunkten und müssen von verschiedenen Gruppen (wie beispielsweise dem Straßenerhalter oder dem Straßennutzer) getragen werden. Kosten treten über den gesamten Lebenszyklus eines Straßenbauwerks auf. Dies beginnt der Planung und Erstherstellung einer Straße (Investitionskosten), geht über in die Straßenerhaltung (laufende Kosten) und die Straßennutzung (Straßennutzerkosten) und eventuell entstehen auch zusätzliche Kosten durch Erweiterungen oder Verstärkungen (Investitionskosten). Darüber hinaus sind aber auch externe Kosten quantifizierbar, die von der gesamten Volkswirtschaft zu tragen sind.

Volkswirtschaftliche Kosten sollen die wahren Kosten eines Projektes für die Wirtschaft des jeweiligen Landes darstellen, aus diesem Grund und da es durch Steuern zu keinem Ressourcenverzehr kommt, werden die Kosten immer ohne allfällige Steueranteile dargestellt.

3.1.1.1. Bewertungsmethoden

Kosten entstehen einerseits durch tatsächlich auftretende Zahlungen, wie die Baukosten für die Herstellung eines Straßenabschnitts, andererseits durch die Bewertung von Wirkungen mit einem Kostensatz. Dieses Kapitel soll die Möglichkeiten der Generierung von derartigen Monetarisierungssätzen (teilweise auch Einheitskosten genannt) aufzeigen.

Je nach Wirkung der betrachteten Größe können unterschiedliche Methoden zur Erstellung von Einheitskosten zur Anwendung kommen. Eine Übersicht der gängigen Konzepte bietet Abbildung 7, die einzelnen Verfahren sowie deren Anwendungsgebiete werden nachfolgend kurz vorgestellt (nach [4]).

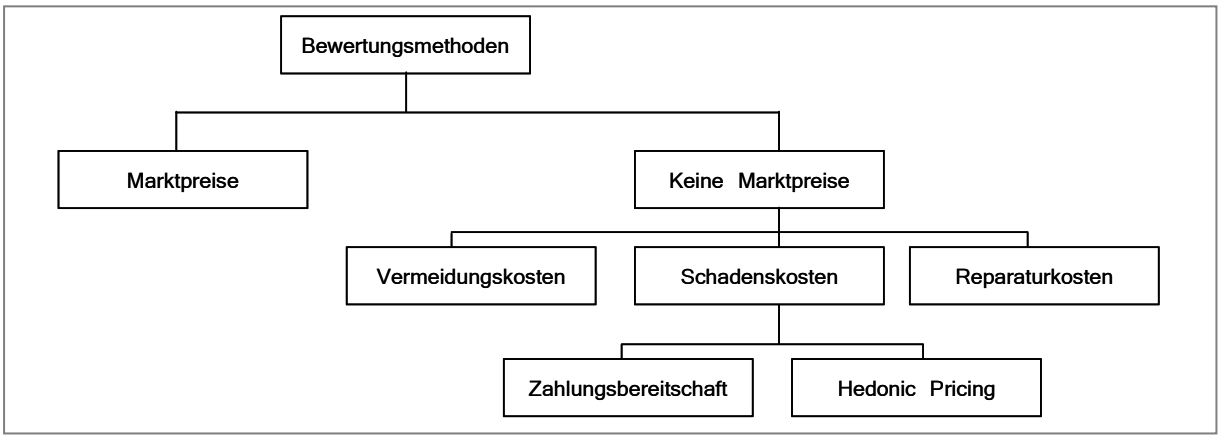


Abbildung 7: Übersicht verschiedener Bewertungskonzepte (4)

Grundsätzlich stellt sich die Bewertung, solange Markpreise für das Element vorhanden sind, relativ einfach dar. Marktpreis bezeichnet in diesem Zusammenhang jenen Preis, um den das Produkt am freien Markt gekauft werden kann. Beispielsweise können für das Produkt Treibstoff (sowohl in Form von Diesel als auch Benzin) tagesaktuell Markpreise genannt werden. Da es sich um längerfristige Betrachtungen von mittleren Kosten handelt, sind gerade im Bezug auf Treibstoffkosten mittlere Preise (über eine längere Zeitperiode, um kurzfristige Schwankungen auszuschalten) zu verwenden.

Können für die betrachtete Größe keine Marktpreise ermittelt werden, bieten sich drei unterschiedliche Methoden zur Ermittlung von äquivalenten Kostensätzen an.

Der Vermeidungskosten-Ansatz berechnet den jeweiligen Kostensatz aus der Summe der zur Vermeidung von Schäden notwendigen Mittel.

Bei Verwendung eines Schadenskosten-Ansatzes wird der entstandene Schaden entweder über das Verfahren der Zahlungsbereichtschaft oder das Hedonic Pricing ermittelt.

Zahlungsbereitschaft: hierbei wird direkt über Fragebögen die Zahlungsbereitschaft der jeweils betroffenen Bevölkerung (willingness to pay) zur Vermeidung eines Schadens (Reduktion des Unfallrisikos) ermittelt.

Hedonic Pricing: beruht auf einer Analyse der Marktpreise von Gütern, die sich durch ihre Randbedingungen unterscheiden. Beispielsweise kann der Wert von Ruhe durch einen Vergleich der Mietpreise in ruhigen und in durch Lärm beeinträchtigten Gebieten ermittelt werden.

Im Reparaturkosten- oder auch Ersatzkosten-Ansatz wird über die Kosten, die zur Wiedergutmachung von entstandenem Schaden notwendig sind, oder um das beschädigte Gut zu ersetzten, ein Kostensatz gefunden.

3.1.1.2. Grenzkosten

Hiermit sind jene Kosten gemeint, die durch eine zusätzliche Einheit eines Produkts entstehen. Im Bezug auf die Straßennutzung sind das beispielsweise jene Kosten, die durch die zusätzliche Nutzung der Infrastruktur durch ein weiteres Fahrzeug entstehen.

In der österreichischen Wegekostenrechnung werden sie als erste mathematische Ableitung der Kostenleistungsfunktion nach den eingebundenen Leistungsmerkmalen definiert [5].

Generell kann zwischen kurzfristigen (ohne Berücksichtigung von Kapazitätsänderungen) und langfristigen Grenzkosten unterschieden werden. Letztere beinhalten auch die Kosten, die durch zukünftige Infrastruktur- und Kapazitätserweiterungen entstehen.

Grenzkosten können auch für die Bereiche Unfallgeschehen und Stau ermittelt werden. Unter Unfallgrenzkosten wird hierbei die Kostenwirkung jenes Phänomens verstanden, dass durch ein zusätzliches Fahrzeug auch die Unfallwahrscheinlichkeit für andere Fahrzeuge steigt. Auch die Staugrenzkosten können als jene Kosten verstanden werden, die durch die Geschwindigkeitsreduktion zufolge eines zusätzlichen Fahrzeugs für die Allgemeinheit entstehen.

3.1.1.3. Vergleich der Kosten

Durch die dynamische Investitionsrechnung kann ein Vergleich der Kosten (dies gilt in gleicher Weise auch für Nutzen), die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallen, zu einem definierten Vergleichszeitpunkt erfolgen. Die getätigten Zahlungsströme werden hierfür in Aufwendungen und Einnahmen aufgeteilt. Auf der Seite der Aufwendungen können die Ausgaben für die Straßenerhaltung verbucht werden, die Einnahmen werden durch den monetär bewerteten Nutzen ersetzt. Mögliche Verfahren sind die Kapitalwertmethode (Net Present Value, NPV), die Interne-Zinsfuß-Methode (Internal Rate of Return, IRR) und die Annuitätenmethode. Bei einer konventionellen Investitionsrechnung werden die Bauleistungen über die entsprechenden Nutzungszeiträume abgeschrieben und verzinst, daraus lassen sich dann die jährlichen Investitionskosten ermitteln. Weiterführende Betrachtungen finden sich bei Snizek et al. [6] und Laffont et al. [7].

In Pavement Management Systemen erfolgt ein Kostenvergleich zumeist unter Anwendung der Kapitalwertmethode. Der Kapitalwert ist die Summe aller Kosten einer Maßnahme, bezogen auf einen Vergleichszeitpunkt (auf- bzw. abgezinst). Dieser Zeitpunkt wird meist mit dem Beginn des Analysezeitraumes (t_0) gleichgesetzt, daher ist der so bestimmte Kapitalwert auch oft unter der Bezeichnung Gegenwartswert zu finden. Bezogen auf eine Maßnahme kann er wie folgt ermittelt werden:

$$K_{0,t,m} = K_{t,m} \times \left(1 + \frac{p}{100}\right)^{-n} \quad \text{mit } n=t-t_0 \qquad \text{Gleichung 1}$$

$K_{0,t,m}$ … Gegenwartswert zum Zeitpunkt t_0 der Maßnahme m aus dem Jahr t
$K_{t,m}$ … Kosten der Maßnahme m im Jahr t
p … Zinsfuß [%]
t … Zeitpunkt der Maßnahme m [Jahr]
t_0 … Beginn der Analyse [Jahr]

Zum Vergleich von Maßnahmenstrategien muss für alle Maßnahmen, die im betrachteten Lebenszyklus auftreten, der Gegenwartswert berechnet werden. Diese Werte können zu einem

Gesamtgegenwartswert $K_{0,MS}$ für die entsprechende Maßnahmenstrategie aufsummiert werden.

$$K_{0,MS} = \sum_{n} K_{0,t,m} \quad \text{mit } n=t-t_0 \qquad \text{Gleichung 2}$$

Die hier für Kosten gebildete Gleichung kann genauso für die Ab- oder Aufzinsung von monetär ausgedrücktem Nutzen Anwendung finden.

Vereinzelt kommt auch die Methode des internen Zinsfußes zum Einsatz (z.B. bei Stütze [8]). Hierbei wird jener Zinssatz gesucht, bei dem der Kapitalwert der Maßnahmenstrategie, das heißt die Summe der Gegenwartswerte aller Einzelmaßnahmen unter Berücksichtigung von Investionen (Kosten), Gewinnen (Nutzen) und ev. des Restwerts, gleich Null ist. Eine Investition ist dann wirtschaftlich, wenn der interne Zinsfuß größer ist als der Kalkulationszinsfuß (Marktzins).

Bei der Annuitätenmethode wird der Kapitalwert einer Investition auf die Nutzungsdauer verteilt, das heißt es ergibt sich kein Gesamtwert, sondern ein Wert pro Periode. Für Aufgaben, die ein konstantes jährliches Budget vorgeben, ist die Annuitätenmethode ein sinnvolles Bewertungsverfahren.

Die Annuität a ist das Produkt aus Kapitalwert $K_{0,t,m}$ und Annuitätenfaktor $ANF_{n,p}$:

$$a = K_{0,t,m} * ANF_{n,p} \qquad \text{Gleichung 3}$$

wobei sich der Annuitätenfaktor über die Nutzungsdauer n berechnen lässt:

$$ANF_{p,n} = \frac{p \cdot (1+p)^n}{(1+p)^n - 1} \qquad \text{Gleichung 4}$$

Zinsfuß, Inflationsrate und Diskontrate

Die Festlegung dieser Werte ist abhängig von der Ausrichtung der Investition und kann eventuell auch durch politische Zielsetzungen abgeleitet werden. Soll die Investition als volkswirtschaftlich, das heißt nicht auf Basis von privatwirtschaftlichen Kenngrößen beurteilt werden, kann die erwartete oder angestrebte mittlere Wachstumsrate des realen Bruttosozialproduktes (inflationsbereinigt) als Kennwert angesetzt werden. Diese Indexzahlen sollen die generelle Entwicklung der Wirtschaft zusammenfassen und können im Detail wie folgt festgelegt werden.

Zinsen stehen für die Zeitkosten des Geldes ein, sind also ein Vorauspreis für eine Anschaffung, deren Gegenwert noch nicht erwirtschaftet wurde [9]. Ist nun eine Investition in der Zukunft zu tätigen, kann davon ausgegangen werden, dass das vorhandene Kapital bis zum Bedarfszeitpunkt mit dem angenommenen Zinssatz veranlagt werden kann. Für den Zinssatz (p) eignet sich die Sekundärmarktrendite für Bundesanleihen lt. österr. Nationalbank als Grundlage [1]. In der österreichischen Wegekostenrechnung [5] wird der verwendete Zinsfuß aus der langjährigen durchschnittlichen Rendite (7,5% in den letzten 20 Jahren, 5% in den letzten 5 Jahren) errechnet. In der RVS 03.08.71 [18] definiert er sich als die Sollzinsen langfristiger Kapitalanlagen. Denkbar ist auch ein Zinsfuß der jeweils über eine best. Periode konstant bleibt, dann aber seinen Wert ändert.

Die Inflationsrate (i) berücksichtigt die Preissteigerung von Gütern über die Zeit, sie kann aufgrund der Veränderung der Baupreisindizes Straßenbau (ÖSTAT) festgelegt, oder aber aus der durchschnittlichen jährlichen Preissteigerungsrate für Verkehrswegeinvestitionen (4% in den letzten 20 Jahren, 1,5% in den letzten 5 Jahren) ermittelt werden.

Die Diskontrate (d) ergibt sich aus der Differenz von Zinsfuß und Inflationsrate, kann aber großen Schwankungen unterliegen. In österreichischen Projekten wird der Diskontratz mit 3 % bis 4 % angesetzt, verglichen mit den Werten in Großbritannien von 3,5 % und Frankreich mit einem Diskontsatz von 8 % ist dies eine durchaus übliche Größenordnung.

Im VIAPMS_AUSTRIA wird die Diskontrate angewendet (derzeit mit einem Satz von 3 %). Dadurch ergibt sich Gleichung 1 zu:

$$K_{0,t,m} = K_{t_0,m} \times \left(1 + \frac{d}{100}\right)^{-n} \quad \text{mit } n=t-t_0 \text{ und } d=p-i \qquad \text{Gleichung 5}$$

In der Wegekostenrechnung [5] wird die Entscheidung, ob die Berechnung mit Hilfe der Diskontrate (um die Inflation bereinigt) oder des nominalen Zinssatzes gerechnet wird, vom Anlagevermögen abhängig gemacht. Wenn dieses zu Anschaffungskosten berechnet wurde, wird die Berechnung mit dem nominalen Zinssatz, bei Wiederbeschaffungspreisen mit dem realen Zinssatz durchgeführt.

Die Änderung von Zinssatz, Inflationsrate und Diskontrate hat großen Einfluss auf das Ergebnis. Beispielsweise führte ein hoher Diskontsatz zu einer geringeren Wertigkeit von zukünftigen Kosten. In diesem Sinne sind Sensitivitätsanalysen mit diesen Variablen sowie auch der Betrachtungsperiode (als wesentliche Eingangsgröße für zeitabhängige Variablen) von Vorteil.

Straßenbaulastträgerkosten

Im hochrangigen österreichischen Straßennetz fallen die Baulastträgerkosten bei der ASFiNAG (Autobahnen und Schnellstraßen Finanzierungsaktiengesellschaft) an und sind von dieser bzw. in weiterer Folge vom Staat und der Allgemeinheit zu tragen. Im Falle dass private Konzessionäre Teilabschnitte für die Errichtung und Erhaltung des Straßennetzes übernehmen, haben diese auch die entsprechenden Baulastträgerkosten zu tragen, dazu zählen die Herstellungskosten, die Instandsetzungs- und Erneuerungskosten. Die Einheitskosten für diese Positionen können aus der innerbetrieblichen Projektabrechnung ermittelt werden. Kosten für die betriebliche Erhaltung, sowie die kleinräumliche bauliche Instandhaltung, sind auch von dem jeweiligen Baulastträger zu übernehmen, werden jedoch bei der systematischen Straßenerhaltung nicht berücksichtigt.

Straßennutzerkosten

Hierunter fallen jene Kosten, die dem Straßennutzer durch die Benutzung der Straße erwachsen. Sie werden durch den Fahrbahnzustand, die Verkehrsbelastung oder die Einrichtung von Baustellen beeinflusst. Sie lassen sich auf die Bereiche zusätzliche Zeitkosten, Betriebskosten, sowie Unfallkosten aufteilen. Für die meisten Kostengruppen ist es notwendig, die Wirkungen getrennt nach Fahrzeuggruppen zu ermitteln.

Je nach Modell werden auch unterschiedliche Einflussfaktoren und Kostengruppen berücksichtigt. Eine detaillierte Übersicht zu den Modellansätzen findet sich in den Kapiteln 6 - Zustandsbezogene Nutzerkosten und 7 - Baustellenfolgekosten.

Externe Kosten

Besonderer Betrachtung bedürfen auch jene Kosten, die nicht aus Betriebsmitteln gedeckt werden und nicht in das betriebliche Rechnungswesen eingehen. Sie umfassen alle direkten und indirekten Verluste, die Dritte oder die allgemeine Öffentlichkeit als Ergebnis einer privatwirtschaftlichen Tätigkeit erleiden [3].

Newbery [10] erwähnt vier Kostenbereiche, die durch den Straßennutzer entstehen, welche jedoch die Öffentlichkeit zu tragen hat. Dies sind im Einzelnen: Umweltkosten, Staukosten, Kosten durch die Straßenschädigung und Unfallkosten. Hierbei wird deutlich, wie wichtig die Abgrenzung zwischen Straßenerhalter, Nutzer und Dritten (der Öffentlichkeit) ist, denn die von Newbery getroffene Abgrenzung stimmt nicht mit der in dieser Arbeit gewählten überein.

Bei der Verknüpfung von Nutzerkosten und Straßenerhalterkosten ist zu beachten, dass Nutzerkosten sehr schnell große Werte annehmen und Baukosten dagegen verschwindend klein wirken [11]. Dennoch sind für den Straßenerhalter gerade die Bau- und Erhaltungskosten ausschlaggebend, dies muss auch so in die Bewertung der Kosten einfließen. Straßennutzerkosten sind in diesem Sinne keine Kosten, die von einer Seite in Form von Geldwerten aufgebracht werden müssen, sondern sie ermöglichen eine sinnvolle, ergänzende Bewertung von Maßnahmenvarianten und Erhaltungsstrategien.

3.1.2. Nutzen

Nutzen kann in vielfältiger Form auftreten und hängt sehr von der Betrachtungsweise ab. Als volkswirtschaftlicher Nutzen wurde schon Anfang der 70er Jahre der Teil des mittelbaren Nutzens definiert, der entsteht, wenn Wirtschaftsobjekte und Einzelindividuen in Wahrnehmung des unmittelbaren Nutzens verbesserter Straßen wirtschaftliche Aktivitäten entwickeln, die positive Auswirkungen auf die gesamtwirtschaftliche Entwicklung haben. In diesem Zusammenhang wurde wie folgt unterschieden[3]:

direkter / unmittelbarer Nutzen:

- Verbesserung des Straßennetzes; bessere Erschließung
- Verringerung der Kfz-Betriebskosten
- Verringerung der Zeitkosten
- Senkung der Unfall- und Unfallfolgekosten
- Verbesserung des Fahrkomforts
- Verringerung der gesundheitlichen Schäden

der mittelbare Nutzen ergibt sich aus:

- Betriebsneugründungen
- Zunahme der Beschäftigten
- Erhöhung der Einzelhandelsumsätze
- Steigerung des Ausflugs- und Reiseverkehrs
- Zunahme der Bevölkerungsdichte und des Steueraufkommens (konnte nicht nachgewiesen werden)
- Steigerung der Grundstückswerte

Die volkswirtschaftliche Komponente ist durch die Wirkung auf geringere Preise oder höhere Gewinne und somit einer höheren Rentabilität der Örtlichkeiten gegeben. Diese bieten mehr Anreiz zur Ansiedlung, wodurch es in weiterer Folge zu einer Belebung der Wirtschaft kommt.

Externer Nutzen ergibt sich nur für Bereiche, die nicht durch den Markt abgedeckt und daher nicht konkret im Preis abgebildet werden. Beispiele hierfür sind der gesellschaftliche Nutzen von guten Verkehrswegen bei Notfalltransporten zur Rettung von Menschenleben und die Straße als „Informationsrohstoff für Journalisten“ (Themenbereiche Stau, Unfälle, neue

Autos,...), weiters wird auch die Freude beim Beobachten vorbeifahrender Fahrzeuge angeführt [nach 5]. Der Großteil der Nutzen wird durch den Markt erfasst und internalisiert, wie die Gewinne durch Wertsteigerung von Grundstücken oder die entstehenden Einkommens- und Beschäftigungseffekte.

Ermittelt werden im Erhaltungsmanagement stets zusätzliche Nutzen (Nettonutzen), das heißt jener Nutzen, der sich aufgrund einer Maßnahmenstrategie und der erwirkten Zustandsänderung ergibt. Dies ist auch die derzeitige Strategie im österreichischen PMS (die genaue Berechnung ist Kapitel 2.1 zu entnehmen).

Wird der Nutzen monetarisiert, kann er als Ersparnis, die durch die Maßnahme erreicht wird, verstanden werden. In diesem Sinne können auch eingesparte zustandsbedingte Nutzerkosten als Nutzen bezeichnet werden.

Für den Vergleich und die Auswahl einer optimalen Variante wird für jede Erhaltungsstrategie ein Gesamtnutzen ermittelt. Dieser fasst alle Einzelnutzen zusammen und kann so in das Optimierungskriterium (Nutzen-Kosten Verhältnis) aufgenommen werden.

Grundsätzlich verlangt die Gesetzeslage von allen Maßnahmen die Erfüllung von „Wirtschaftlichkeit, Zweckmäßigkeit und Sparsamkeit". Es ist also der der wirtschaftliche Nutzen des Straßenbenützers beziehungsweise der Gesamtwirtschaft zu optimieren [12].

3.2. wirtschaftliche Analysemethoden

Einige der möglichen Verfahren zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Maßnahmen werden kurz vorgestellt. Hierbei kommen überbetriebliche Beurteilungsmethoden zum Einsatz, die es ermöglichen zu einem evaluativen Urteil über das betrachtete Projekt zu kommen.

3.2.1. Bewertungsverfahren für Maßnahmen

Je nach Fragestellung ist eine Beurteilung in unterschiedlicher Tiefe und unter Berücksichtigung von verschiedenen Wirkungsbereichen anzuwenden. Die überbetriebliche Beurteilung, als Gegenstück zur betriebswirtschaftlichen Beurteilung, kann sich im Rahmen ihrer volkswirtschaftlichen Betrachtungsmöglichkeiten einerseits nur mit der ökonomischen Effizienz des Projekts befassen, andererseits ist im Sinne einer gesamtwirtschaftlichen Sicht auch eine Ausdehnung des Blicks auf die Nachhaltigkeit des Projekts wünschenswert.

Die jeweilige Aussagekraft des Bewertungsverfahrens muss immer in Zusammenhang mit den berücksichtigten Kostenkomponenten gesehen werden. Nur wenn alle Wirkungen erfasst werden, kann auch eine entsprechende Analyse durchgeführt werden.

Multikriterielle Wirkungsanalyse

Hierbei werden für im Vorfeld definierte Beurteilungsaspekte die unterschiedlichen Varianten verbal beurteilt, es erfolgt eine Beschreibung der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Möglichkeiten bzw. ein Vergleich der Zielerträge / Zielerreichungsgrade. Das Ergebnis dieser Betrachtung bildet eine gutachterliche Empfehlung.

Kosten-Nutzen-Untersuchungen

Kosten-Wirksamkeitsanalyse (KWA):

Grundlage bildet die Erstellung eines Zielkataloges, auf dessen Basis Wirksamkeiten definiert werden können (inwieweit die Ziele durch die betrachteten Maßnahmen erfüllt werden). Als Kriterium findet hierbei das Verhältnis der Teilwirksamkeitswerte über alle Indikatoren und der Gesamtkosten Anwendung. Somit lässt sich eine Wirkung je eingesetzter Geldeinheit ermitteln.

Von Vorteil ist, dass nicht alle Wirkungen monetarisierbar sein müssen und die Anpassung des Zielkataloges sehr flexibel ist. Andererseits finden sich genau hier auch die Schwierigkeiten in der Gewichtung, Dimension und Rangordnung der einzelnen Ziele.

Nutzwertanalyse (NWA):

Dieses Verfahren ermöglicht eine Bewertung in Hinblick auf mehrere multidimensionale Zielsetzungen. Zu diesen werden Wertskalen erstellt und zur besseren Vergleichbarkeit normiert. Mit Hilfe dieser (Zuteilung von Zielerfüllungsgrad; 0-100% je Kriterium) erfolgt eine Beurteilung der Projekte. Über Gewichtungen können diese Teilwerte zu einem Gesamtwert zusammengeführt werden. Hierfür sollten naturwissenschaftliche Zusammenhänge als Grundlage dienen, gibt es diese nicht, müssen sie unter den Beteiligten diskutiert und im Sinne der allgemeinen Wertigkeit entschieden werden.

Bei der Wirksamkeitsanalyse, Kosten-Wirksamkeitsanalyse und der Nutzwertanalyse erfolgt im Gegensatz zur Nutzen-Kosten-Analyse die Bewertung nicht ausschließlich monetär.

Nutzen-Kosten-Analyse (NKA):

Grundidee ist die Gegenüberstellung von bewerteten Vorteilen und der Kosten eines Projekts. In einem ersten Schritt müssen die relevanten Kosten und Nutzenkriterien bestimmt werden. Als weitere Variablen fließen der gewählte Diskontsatz und das Entscheidungskriterium (Verhältnis der Summe der Nutzen zur Summe der Kosten) in die Berechnung mit ein. Auf Grundlage des Entscheidungskriteriums kann eine Reihung vorgenommen werden. Im englischsprachigen Raum ist dieses Verfahren auch unter der Abkürzung BCR (benefit cost ratio) bekannt.

Methodische Hinweise:

Es ist darauf zu achten, dass alle verwendeten Kriterien voneinander unabhängig sind, um eine Mehrfachbewertung eines Aspektes zu vermeiden. Weiters muss gewährleistet sein, dass durch einen überproportionalen Nutzen A ein geringerer Nutzen B ausgeglichen werden kann, ansonsten müssen Grenzwerte festgelegt werden, ab wann diese Annahmen nicht mehr akzeptiert werden können.

Im Anschluss an eine Bewertung können durch Sensitivitätsanalysen jeweils einzelne Nutzenkomponenten ausgeblendet werden (besonderes Augenmerk sollte auf eine Berechnung mit / ohne Zeitkosten gelegt werden) und das Ergebnis durch eine Variation des Mengengerüsts und der Gewichtungskriterien bestätigt oder entkräftet werden.

Je nach Definition des Analysegebiets können und sollen auch Veränderungen an der Gesamtwohlfahrt (fallen unter sonstige Wirkungen) erfasst werden. Diese können in Form von Geldwerten durch die projektbedingten Umverteilungen von Erwerbseinkommen oder die Veränderung von Steuereinnahmen entstehen (diese Aspekte werden jedoch bei der NKA ausgeblendet). Ebenso können reale Effekte wie ein zusätzlicher Nutzen durch eine Veränderung der technischen Produktionsmöglichkeiten oder der verfügbaren Ressourcen berücksichtigt werden [13].

Grundsätzlich ist bei der Berücksichtigung von externen Kosten zu beachten, welchen Kostengruppen diese zugeordnet werden. Bei der KWA fließen diese zumeist als negative Wirksamkeit in die Bewertung ein, bei der NKA können sie je nach Vorzeichen entweder als Kostenart oder als Nutzenart erfasst werden [13].

3.2.2. Strategievergleich

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Ansätze für eine Optimierung: entweder es wird ein vorgegebener Zustand mit einem Minimum an finanziellem Aufwand angestrebt, oder die verfügbaren Mittel sind vorgegeben und mit diesem soll nun der optimale Nutzen erzielt werden. Wobei zweiteres in der Praxis häufiger der Fall ist.

Eine Auswahl an Methoden zum Vergleich von unterschiedlichen Strategien ist nachfolgend angeführt.

Dringlichkeitsreihung

Die Dringlichkeitsreihung erfolgt auf Grundlage der Gegenüberstellung der jeweiligen Gesamtkosten einer Maßnahme und ihrer Wirkung zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Jene Maßnahme mit dem größten Nutzen wird vorrangig durchgeführt.

Investitionsrechnung

Betrachtet wird ein bestimmter eindeutig definierter Zeitraum. Für diesen kann eine Kostenaufstellung und Prognose durchgeführt werden (Auf- bzw. Abzinsung auf den Vergleichszeitpunkt). Dieser Ansatz dient vor allem für den Vergleich und die Reihung von unterschiedlichen möglichen Maßnahmen. Es werden die Kosten für den Straßenerhalter und den Straßennutzer ermittelt und summiert. Der Nutzen wird hierbei zumeist nicht berücksichtigt.

Anwendungen sind beispielsweise bei Pichler [16] oder in der RVS 03.08.71 [18] beschrieben. Letztere berücksichtigt auf der Seite des Straßenerhalters die Bau-, Erhaltungs-. Instandhaltungs- und Instandsetzungskosten, auf der Seite der Straßennutzer die Zeitkosten, Betriebskosten und Unfallfolgekosten.

Lebenzyklusanalyse – Life Cycle Costs Analysis

Die Lebenszyklusanalyse hat das Ziel, die Zustandsentwicklung der Straße, auch unter Bedachtnahme deren Lebensdauer zu betrachten.

Vor allem in der amerikanischen Literatur ist der Begriff Life Cycle Costs sehr gebräuchlich. Dieser bezeichnet alle Kosten, die im Laufe eines Lebenszyklus entstehen, beginnend mit den Herstellungskosten, Instandsetzungskosten,... . Im Detail ist jedoch immer genau zu beachten, welche Kosten integriert sind. Abweichungen ergeben sich besonders bei der Berücksichtigung von Betriebs- und Erhaltungskosten, sowie gegen Ende der Lebensdauer durch die Hinzunahme von Wiederherstellungskosten bzw. die Integration eines Restwertes in die Betrachtung [25].

Entscheidend ist die Festlegung der Lebensdauer, wofür auch unterschiedliche Ansätze zur Anwendung gelangen. Im Zuge der Erstellung der österreichischen Wegekostenrechnung [5] wurden in den österreichischen Straßenverwaltungen Umfragen durchgeführt und die Lebensdauer gemittelt. Einen guten Überblick geben daraus entwickelte Abgangsfunktionen, die die Verteilung der Nutzungsdauer darstellen (siehe Abbildung 8).

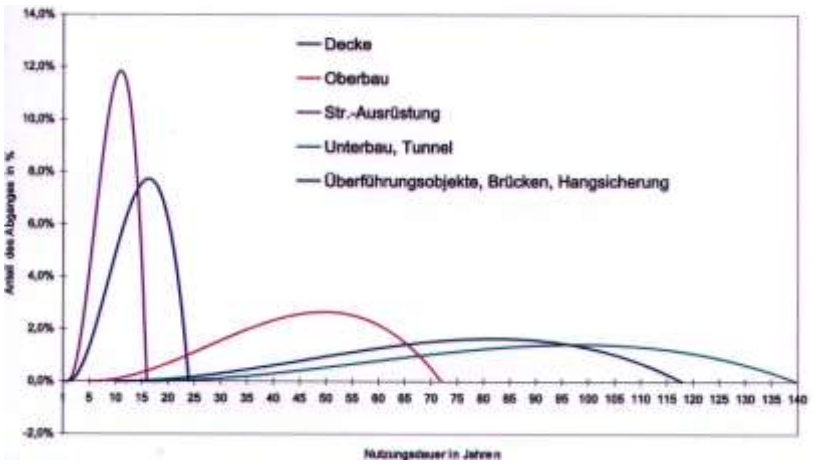


Abbildung 8: Abgangsfunktionen für A- und S-Straßen sowie ehemalige Bundesstraßen B [5]

4. ÜBERBLICK ÜBER MODELLE ZUR BERÜCKSICHTIGUNG VON NUTZERKOSTEN

Das Ziel einer modernen Straßenerhaltung ist die Gewährleistung der Verkehrssicherheit, der Leistungsfähigkeit sowie der Substanzerhalt und eine langfristige Minimierung der Kosten im Sinne einer gesamtwirtschaftlichen beziehungsweise einer volkswirtschaftlichen Optimierung.

Die in der Literatur vorhandenen Modelle zur Berücksichtigung der Straßennutzerkosten unterscheiden sich in ihrem Aufbau und auch in der Ebene, in der die Betrachtung durchgeführt wird. Generell kann zwischen Netzebene - zur Betrachtung von größeren Abschnitten - und Projektebene - mit höherem Detaillierungsgrad - unterschieden werden. Im Highway Design Manual der Weltbank (HDM [14]) wird diese Trennung sehr deutlich, hier kann bei der Bearbeitung zwischen einer Strategy Analysis (Generelles Konzept), einer Programme Analysis und einer Project Analysis gewählt werden. Die Unterschiede liegen in der erforderlichen Genauigkeit der Eingabedaten und daher auch im Detaillierungsgrad der Ergebnisse. Auch generell sind Unterschiede in den berücksichtigten Kostenkriterien und Kostengruppen, wie beispielsweise Baukosten, Betriebskosten, Erhaltungskosten und Straßennutzerkosten, festzustellen.

Im Folgenden werden ausschließlich Aspekte der baulichen Straßenerhaltung betrachtet, darunter fallen Kosten und Nutzen im Zuge von Instandsetzung und Erneuerung. Kosten, die durch erstmalige Errichtung einer Straße entstehen, sind in im Zusammenhang mit der Optimierung der Straßenerhaltung nicht maßgebend und werden daher nicht berücksichtigt. Ebenso fallen Kosten für die betriebliche Erhaltung und kleinfächige Instandsetzung nicht in den Bereich der systematischen Erhaltungsplanung, da es sich hier um laufende Maßnahmen oder um Sofortmaßnahmen handelt, die zur Herstellung der Verkehrssicherheit auf jeden Fall durchzuführen sind, die jedoch auf lange Sicht nicht geplant werden können.

Zur richtigen Erfassung der Wirkung und Auswirkungen einer Maßnahme der baulichen Instandsetzung bzw. Erneuerung ist es notwendig, den zeitlichen Betrachtungsbereich weit genug zu erstrecken. So können die folgenden Analyseverfahren durchaus als Lebenszyklus-Analyseverfahren bezeichnet werden, wobei jedoch die Erstherstellung in der Erhaltungsplanung keinen Einfluss hat. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die zu betrachtende Straße schon vorhanden ist und kein Einfluss auf Bauart und Materialien möglich ist. Betrachtungsbereiche von 40 bis 50 Jahren sind durchaus üblich, der Maßnahmenzeitraum erstreckt sich jedoch nur über einen Teilbereich, die letzten Jahre dienen ausschließlich der Beobachtung der Zustandsentwicklung.

Das Gesamtsystem Straße soll sich in einem Zustand befinden, der die Anforderungen der Nutzer erfüllen kann. Schließlich wird sie nicht zu Selbstzweck gebaut, sondern hat den Anforderungen an Sicherheit, Funktionalität und Leistungsfähigkeit, sowie Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit genüge zu leisten.

Die räumliche Abgrenzung der Betrachtung erfolgt in einem ersten Schritt unter Ausklammerung der Wirkung auf die Umwelt (Lärmwirkung und Emissionswirkung) eher eng, die Überlegungen beziehen sich nur auf den Straßenkörper selbst (pavement management). Doch auch dies ist nicht ganz so eindeutig wie es auf den ersten Blick scheint. Es muss die Frage beantwortet werden, ob Park- oder Standstreifen auch zu berücksichtigen sind, oder wie der Zustand der Entwässerung Eingang in die Bewertung findet. Übereinstimmend werden in den meisten herkömmlichen Bewertungsmethoden Bauwerke, wie Stützmauern und Lärmschutzbauten, sowie Ausrüstungsteile (Leitschienen und Beschilderungen) nicht einbezogen. Zumeist haben sich für diese Belange eigene Erhaltungssysteme (z.B. Bridge Management, BAUT,...) durchgesetzt, da sich die Anforderungen deutlich unterscheiden. Die aus dem Pavement Management vorgeschlagenen Erhaltungspläne für den Straßenoberbau

müssen aber unbedingt im Rahmen eines umfassenden Erhaltungsmanagements (EMS) koordiniert werden.

Zeitlich ist die Betrachtung im PMS langfristig angesetzt, da ja auch die zeitliche Wirkung der Maßnahme als Kriterium aufscheint, sie erfolgt über mindestens 20 Jahre. Die Tendenz geht hin zu längeren Betrachtungszeiträumen, auch um den Effekt des gewählten Inflations- und Diskontierungssatzes möglichst gering zu halten. Wie schon oben erwähnt, liegen gängige Beobachtungszeiträume um die 40 bis 50 Jahre.

Zur Berücksichtigung der Komponente Umwelt bei umfassenden Betrachtungen muss der Beobachtungsraum ausgeweitet werden, wobei hier schrittweise vorgegangen werden sollte. Je nach getroffener Abgrenzung kann beispielsweise der Einfluss von Lärmschutzbauten und deren Ausführung bzw. Erhaltung berücksichtigt werden.

4.1. Nutzerkosten im Rahmen von Pavement Management Systemen

Bei Pavement Management Systemen handelt es sich um Modelle, die umfassend das vorhandene Straßennetz analysieren, Erhaltungsmaßnahmen vorschlagen und zumeist auch die Wirkung dieser Maßnahmen im System berücksichtigen. Ziel ist es, den Aufwand zur Erreichung eines definierten Straßenzustands zu minimieren, oder mit einem definierten Aufwand den bestmöglichen Straßenzustand zu erreichen. Eine weitere Zielsetzung der systematischen Erhaltungsplanung ist es, eine nachvollziehbare Entscheidungsfindung zu gewährleisten.

Im Rahmen der systematischen Straßenerhaltung können Netze verschiedenster Größe betrachtet werden, für die jeweils ein definiertes Budget vorhanden ist, sei dies zum Beispiel das gesamte Autobahnen- und Schnellstraßennetz oder nur ein Teilbereich eines Bundeslandes.

Im Folgenden wird ein Überblick über jene Systeme gegeben, die Nutzerkosten in die Analyse aufgenommen haben und für die Anwendung in Österreich in Betracht kommen. Dies sind das System der Weltbank „Highway Development and Management System" (HDM III und HDM-4) und auf europäischer Ebene das „Fully Optimised Road Maintenance" Projekt (FORMAT), welches Elemente zur Berücksichtigung von Nutzerkosten im Zuge eines PMS enthält.

4.1.1. Das Modell der Weltbank – HDM-4

In erster Linie ist das Highway Development and Management System [14] auf Initiative der Weltbank für den Straßenbau und die Erhaltung in Entwicklungsgebieten erstellt worden. Für die Weiterentwicklung und die Adaptierung an die Randbedingungen der industrialisierten Welt fanden sich weitere große Sponsoren: die Asian Development Bank (ADB) und das Department for International Development (DFID) in Großbritannien. Auch der Welt-Straßenverband PIARC war maßgeblich an der Entwicklung des HDM-Programms beteiligt.

Ergebnis ist ein Computerprogramm, dem ein gesamtwirtschaftliches Konzept zugrunde liegt, welches die Kosten durch Bau und Erhaltung, aber auch Kosten, die dem Nutzer entstehen, berücksichtigt. Hier können im Besonderen die Bereiche des Ressourcenverbrauchs, der Reisezeitkosten, der Unfallkosten, der Umweltkosten und Nutzerkosten aufgrund von Baustellen berücksichtigt werden. Die Bewertung von Maßnahmen und Projekten erfolgt über die Ermittlung des jeweiligen Energieverbrauchs oder der volkswirtschaftlichen Lebenszykluskosten. Durch die lange Entwicklungszeit und die immer wiederkehrende Aktualisierung und Überarbeitung der Zusammenhänge ist hier ein starkes Pavement Management System herangereift [15], [16], das insbesonders auch für Entscheidungen über Investitionen bei der Netzplanung eingesetzt wird.

Als wesentliche Einflussgröße des Straßenzustands im Allgemeinen und Besonders im Bezug auf Nutzerkosten wird im HDM die Längsebenheit herangezogen. Die Gesamtbetrachtung wird über homogene Stundengruppen durchgeführt, die in Bezug auf Verkehrsaufkommen und Zusammensetzung, sowie Wetterverhältnisse ähnliche Bedingungen aufweisen. Das Fahrzeugkollektiv wird durch ausgewählte Repräsentativfahrzeuge wiedergegeben, für die die Berechnung durchgeführt werden kann, wobei auch nicht motorisierte Fahrzeuge berücksichtigt werden können.

Für die volle Ausnutzung des Programms muss jedoch eine Vielzahl an vorgegebenen Eingangsparametern zur Verfügung stehen, sodass für die Anwendung in Österreich sinnvoller Weise nur auf die grundlegenden funktionalen Zusammenhänge zurückgegriffen werden kann. Die detaillierte Darstellung dieser Zusammenhänge ist den Kapiteln 6 und 7 zu entnehmen.

4.1.2. EU-Projekt FORMAT, Fully Optimised Road Maintenance

Diese vorwiegend europäische Studie [17] wurde im Zuge der Key Action „Sustainable Mobility and Intermodality" im 5. Forschungsrahmenprogramm der EU unter Zusammenarbeit von 19 europäischen und einer US-amerikanischen Organisation in den Jahren 2002 bis 2005 erarbeitet.

Übergeordnetes Ziel war die Steigerung der Effizienz und der Sicherheit der europäischen Straßennetze. Besonders berücksichtigt wurden hierbei:

- Der Einfluss von Baustellen auf den Nutzer in Bezug auf Sicherheit, Komfort und Zeitverluste.
- Die Wirkung auf die Umwelt durch Lärmbelastung, Schadstoffausstoß und Ressourcenverbrauch.
- Die Optimierung der Sicherheit auf Baustellen für Verkehrsteilnehmer und das Erhaltungspersonal.

Die technischen Grundlagen wurden in 4 Arbeitspaketen erstellt:

- Technologie (WP3): Entwicklung und Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen, die mittels zeitraffender Belastungstests (ALT) in Großversuchen und Pilotprojekten validiert wurden.
- Kosten – Nutzen Analyse (WP4): Algorithmus und Tabellenkalkulationsblatt, das eine Berücksichtigung der Zustandsentwicklung, der zusätzlichen Nutzerkosten, der Sicherheit im Baustellenbereich sowie auch der Umweltaspekte (Lärmbelastung,…) ermöglicht.
- Sicherheit (WP5): durch die Analyse von Unfalldaten sowie Simulationsfahrten im Baustellenbereich können Maßnahmen in Bezug auf die Sicherheit für Nutzer und Erhaltungspersonal optimiert werden.
- Monitoring (WP6): Methoden der Erfassung von Zustandsdaten von Oberfläche und Struktur des Straßennetzes unter Verkehr.

Für die Entwicklung des Nutzerkostenmoduls sind vorwiegend die Ergebnisse des Arbeitspaketes vier von Interesse. Zur Optimierung der Straßenerhaltung wird das Konzept des Net Present Values (NPV) angewandt, wie es schon im HDM 4 dargestellt ist. Es gilt, jede zulässige Strategie mit einer Basisstrategie zu vergleichen, die jährlichen Kosten werden diskontiert, summiert und die Strategien somit über die Lebenszykluskosten vergleichbar gemacht.

Das Konzept enthält besonders auf dem Gebiet der Zuflussgenerierung und Stauberechnung Modelle, die für die weiteren Betrachtungen berücksichtigt werden müssen. Hierbei wird die Verkehrsverteilung (der Zufluss) als Funktion in Abhängigkeit von der Tageszeit dargestellt und

somit können stündliche Belastungen oder Werte kürzerer Intervalle geliefert werden. Im Prinzip wird die Verteilung der Verkehrsnachfrage über den Tag durch drei Glockenkurven beschrieben, die mittels Regressionsrechnungen ermittelt werden. Bei Vergleichen des Prognosealgorithmus mit tatsächlich auftretenden Stausituationen konnte festgestellt werden, dass mit Hilfe der Simulation durchaus gute Ergebnisse erzielt werden können. Jedoch zeigte sich auch, dass besonders 4+0 Baustellenführungen sensibel gegenüber Verkehrsspitzen reagieren. Ebenso können sich Steigungsstrecken mit einer Neigung von über 4%, ein hoher Anteil an Schwerfahrzeugen und eine Steigerung der gesamten Verkehrsmenge problematisch auf den tatsächlichen Verkehrsablauf auswirken.

Dieses Modell könnte auch in der gegenständlichen Forschungsarbeit für die Zuflussgenerierung und eventuell für die Ermittlung der Staulängen zur Anwendung zu kommen. Hierbei ist jedoch auf eine gute Kalibrierung des Modells zu achten. Details hierzu sind den Kapiteln 5.1 und 7.2 zu entnehmen.

4.2. Nutzerkosten im Zuge von Life-Cycle-Cost-Analysen

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen und im Besonderen Life-Cycle-Cost-Analysen (LCCA) verfolgen das Ziel, sämtliche Wirkungen eines Planungsvorhabens darzustellen. Hier ist es von Interesse, langfristige Wirkungen (bestmöglich über den gesamten Lebenszyklus des Vorhabens) mit aufzunehmen. Die Ergebnisse dienen meist als Grundlage für eine Variantenentscheidung.

Die angeführten Verfahren beinhalten jeweils Ansätze zur Berücksichtigung der Wirkung des Vorhabens auf den Straßennutzer. Teilweise werden auch externe Kosten, wie Lärm- und Schadstoffkosten, berücksichtigt.

In Österreich, Deutschland und der Schweiz haben Nutzerkosten im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen auch Einzug in das jeweilige Richtlinienwerk gefunden.

4.2.1. Österreich – Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Oberbaukonstruktionen im Straßenbau (RVS 03.08.71)

Diese Richtlinie [18], in aktuellster Fassung aus dem Jahre 2001, bezieht sich in ihrem Anwendungsgebiet auf Neu-, Umbau und Instandsetzungsprojekte. Sie bietet die Grundlage zu einer Berücksichtigung von Straßenbaulastträgerkosten und Nutzerkosten. Im Sinne einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung werden die Ausgaben verschiedener Maßnahmen, bezogen auf einen Vergleichszeitpunkt, gegenüber gestellt und gereiht. Dabei werden die Ausgaben für den Bau, die Instandsetzung und Instandhaltung, sowie Zeit-, Fahrzeugsbetriebs- und Unfallkosten betrachtet.

Der Untersuchungszeitraum sollte sich zumindest über die theoretische Lebensdauer der gebundenen Oberbaukonstruktion erstrecken, am Ende ergibt sich für die vorhandene Straße ein zu bestimmender Restwert.

Die Monetarisierung der Nutzereffekte erfolgt über den Zeitkostensatz [€/h], dieser wird jedoch nur für Lkw angesetzt und entspricht dem Stundensatz für Planenfahrzeuge. Bewertet wird der Differenzbetrag zwischen den Zeitkosten des unbehinderten Straßenabschnittes und den baustellenbedingten Zeitkosten, unter Berücksichtigung von etwaigen Verzögerungen durch Ampelanlagen und ähnlichem. Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten finden nur bei einer baustellenbedingten Verlängerung des Weges (Umleitungsstrecke) Eingang in die Berechnung und die Unfallkosten können über die Unfallkostenrate des baustellenbedingten Straßentyps und des unbehinderten Straßentyps bei Kenntnis des jeweiligen JDTVs ermittelt werden.

Zur Sicherung der Zuverlässigkeit ist das gewählte Analyseverfahren einer Sensitivitätsanalyse mittels Wilcoxon Rangsummentest zu unterziehen.

Beispiele der Anwendung sind der Vergleich eines Vollausbaus mit einem stufenweisen Ausbau oder der Vergleich von unterschiedlichen Straßenaufbauten.

Ansätze für die Lebensdauer von unterschiedlichen Aufbauten und den Zeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen beeinflussen die Berechnung maßgeblich. Werte bzw. Empfehlungen dafür sind in der vorliegenden Richtlinie jedoch nicht enthalten.

In der derzeitigen Form kann das grundlegende Konzept, die Berücksichtigung von Nutzerkosten in Form von zusätzlichen Zeitkosten, zusätzlichen Fahrzeugbetriebskosten und zusätzlichen Unfallkosten in das gegenständliche Projekt übernommen werden. Die Berechnung der Kosten selbst muss allerdings erweitert werden.

4.2.2. Österreich - Wegekostenrechnung für die Straße

Einer der ersten Ansätze zur Berücksichtigung von Nutzerkosten in Österreich ist in der Österreichischen Wegekostenrechnung [5] zu finden, hierbei handelt es sich um eine Vollkostenrechnung. Die Berechnung erfolgt nach dem in Abbildung 9 dargestellten Ablaufschema. Bei der Verknüpfung mit dem Erhaltungsmanagement ist zu beachten, dass hierbei Anlagekosten nur teilweise berücksichtigt werden, da Erstinvestitionen nicht in die Betrachtung einfließen. In der Wegekostenrechnung werden Einheitskosten für die verschiedenen Bauelemente (Unterbau, Oberbau, Decke, Hangsicherung, Lärmschutzelement,...) und die durchschnittliche Lebensdauer ermittelt. Im Gegensatz dazu können die laufenden Kosten aber genauer bestimmt werden, da jede einzelne Maßnahme mit Umfang und Kosten bekannt ist. Eine detailliertere Darstellung der Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnung ist Kapitel 3.2 zu entnehmen.

Die Nutzerkosten treten in Form von Unfall- und Unfallfolgekosten auf, die auch eine hohe Relevanz im Erhaltungsmanagement aufweisen. Ebenso können bei einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung Umweltkosten in die Betrachtung aufgenommen werden.

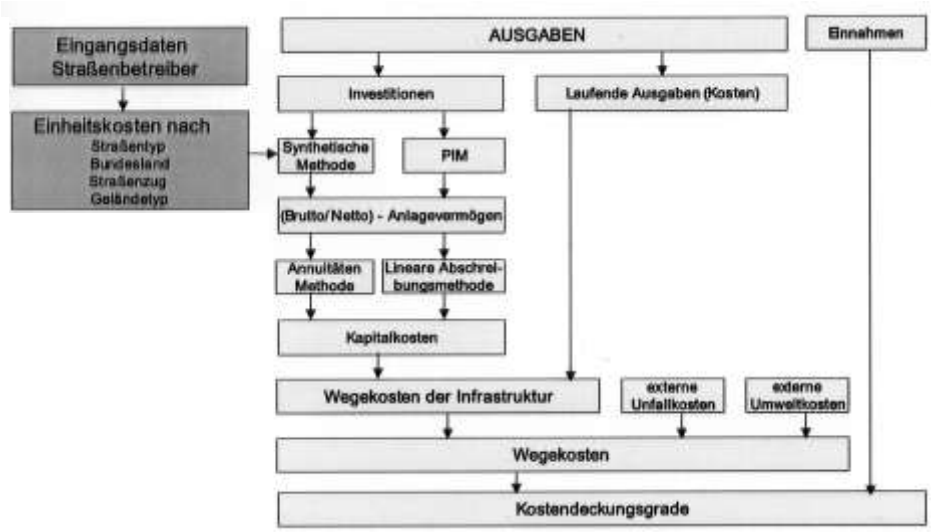


Abbildung 9: Ablaufschema der Vollkostenrechnung [5]

4.2.3. Schmuck - Straßenerhaltung mit System

Ein grundlegendes Gerüst zur Berücksichtigung von Nutzerkosten findet sich schon bei Schmuck [19], wobei auch hier die Wirkung auf den Straßennutzer einerseits aus dem Straßenzustand und andererseits aus Verkehrsbehinderungen aufgrund von Erhaltungsmaßnahmen betrachtet wird. Zur Beurteilung wird, wie bei Fragen der Erhaltungsplanung üblich, jeweils die Differenz zwischen Vergleichsvariante und der gegebenen Erhaltungsstrategie gebildet.

Der Zusammenhang zwischen Fahrbahnoberfläche und Nutzerwirkung wird vorwiegend über den Befahrbarkeitsindex (PSI) hergestellt. Großen Einfluss hat der Zeitaufwand, der durch die maßgebenden Geschwindigkeiten, die Verkehrsstärke, sowie Straßenparameter (Längsneigung und Kurvigkeit) bestimmt wird.

Durch Verschwenkungen und Einengungen in Baustellenbereichen ergeben sich erzwungene Geschwindigkeitsreduktionen und verminderte Leistungsfähigkeiten, daraus folgen eine erhöhte Unfallgefahr und erhöhter Betriebsmittelbedarf sowie Zeitverluste. Der Baustellenbereich selbst kann in die Abschnitte Annäherungsbereich, Überleitungsbereich, Baustreckenbereich und den zurückführenden Überleitungsbereich gegliedert werden. Die Zeitverluste setzen sich zusammen aus Wartezeiten zufolge Überlastungen und aufgrund von reduzierten Geschwindigkeiten im Baustellenbereich. Die Betriebskosten und der Treibstoffverbrauch erfahren durch zusätzliche Anfahr- und Haltevorgänge eine Steigerung.

Für die gegenständliche Forschungsarbeit sind vor allem die Betrachtung des Baustellenbereichs und hier speziell die Leistungsfähigkeits- und Geschwindigkeitsentwicklungen von Bedeutung, die für eine Berechnung der zusätzlichen Zeitkosten angewandt werden können. Diese finden sich in den Kapiteln 5.3 und 7.3 wieder.

4.2.4. Deutschland - Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS)

Die EWS [20] dienen der Bewertung von Baumaßnahmen und Maßnahmenvarianten und bilden eine Grundlage für die Entscheidung ob diese durchgeführt werden soll oder welche Variante die beste darstellt. Ermittelt wird jeweils der Nutzen, der sich aus der Veränderung der Betriebskosten, Fahrzeiten, des Unfallgeschehens, der Lärm-, Schadstoff- und Klimabelastung, sowie innerstädtisch aus der Veränderungen der Trennwirkung gegenüber Fußgänger-Überquerungen und Flächenverfügbarkeit für Fußgänger und Radfahrer ergibt.

Als Entscheidungskriterium dient das Nutzen-Kosten Verhältnis, welches sich aus der Summe der einzelnen Teilverhältnisse zusammensetzt.

Die Ansätze für die Berechnung der Fahrzeiten und der Unfallkosten beziehen sich grundsätzlich auf den ausgebauten Zustand und bieten in der Form keine Berücksichtigung der Situation Baustelle. Einfluss nehmen hierbei die Verkehrsstärke (Nachfrage), die Verteilung auf die unterschiedlichen Fahrzeuggruppen, der Straßentyp (Angebot an Fläche) und die Straßeneigenschaften Längsneigung und Kurvigkeit.

In den EWS finden sich Kostensätze zur Berechnung der Betriebs-, Kraftstoff-, Zeit- und Unfallkosten sowie zur Bewertung der Lärm-, Schadstoff- und Klimabelastung, der Trennwirkung von Straßen und der Flächenverfügbarkeit.

Für die Anwendung in der gegenständlichen Forschungsarbeit sind insbesondere die Geschwindigkeitsfunktionen und die Ansätze zur Berechnung des Betriebsmittelbedarfs in Abhängigkeit der Geschwindigkeit geeignet. Diese müssen jedoch mit den spezifischen Gegebenheiten abgestimmt werden. Die konkrete Anwendung der Ansätze kann den Kapiteln 5.3, 6.2 und 6.3 entnommen werden.

4.2.5. Schweiz – Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr

In der Schweiz wurden als Grundlage für die Durchführung einer Lebenszyklusanalyse die Normen SN 640907 und SN 641820 [21] ausgearbeitet. Ergänzend hierzu ist in SN 640730b und 640736a ein normierter Maßnahmenkatalog enthalten.

Ziel dieser Norm ist die Entwicklung eines Algorithmus zur Festlegung aller möglichen Erhaltungsstrategien und Alternativen. Aufbauend auf diesen kann in einem zweiten Schritt die Entscheidung für eine spezifische Strategie aufgrund des ökonomischen Minimalprinzips, welches auch für die Entwicklungen in Österreich interessant erscheint [22], getroffen werden. Grundlage der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bildet eine langfristige Untersuchung (dynamisches Net-Present-Value- oder Kosten-Barwert-Verfahren). Für den Vergleich von Erhaltungsvarianten werden nur jene zusätzlichen Kosten berücksichtigt, die durch einen schlechten Straßenzustand erwachsen. Dies begründet sich auch daher, dass es sich um reine Kosten und keine Investitionen handelt und diese daher auch nicht abgeschrieben werden. Berücksichtigung finden der Straßenbetreiber (Maßnahmenkosten, erhöhte Erhaltungskosten), der Straßennutzer (Reisezeitverlängerung, erhöhte Fahrzeugbetriebskosten, erhöhte Unfallkosten) und Dritte (erhöhte Unfallkosten, erhöhte Umweltkosten). Hierbei werden auch die virtuellen Erneuerungskosten am Ende einer Betrachtungsperiode berücksichtigt, um einen Vergleich der Maßnahmen zu ermöglichen.
Dargestellt werden vor allem der theoretische Zusammenhang und die Bildung der Kostenwerte, wie beispielsweise die Ermittlung von Zusatzkosten durch den Aufschub von Maßnahmen. Der Zusammenhang von Zustandsgröße und Kostensatz wird jedoch nicht dargestellt.

In der Schweiz wird auch intensiv an einer Aktualisierung des Erhaltungsmanagements, vor allem auf der übergeordneten Netzebene gearbeitet (für die Projektebene kann durch die oben angegebenen Normen ganz gut abgedeckt werden). Die Arbeit gliedert sich in mehrere Teilbereiche, deren Ergebnisse in einem Synthesebericht [23] zusammengefasst sind. Besonderes Augenmerk gilt der Erarbeitung von Schadensverläufen, Lebensdauer und der Wirkung der eingesetzten Maßnahmen. Teilprojekt 4 und 5 der angeführten Arbeit befassen sich mit der Definition eines Gesamtnutzens und der Bildung eines Nutzen-Kosten-Verhältnisses, sowie den Zusatzkosten, die infolge der zeitlichen Verschiebung von Erhaltungsmaßnahmen entstehen können. Im Teilprojekt 4 werden Nutzen und Kosten für alle betroffenen Gruppen gebildet. Dies sind der Straßenbetreiber, die Verkehrsteilnehmer und die Gesellschaft. Es bietet sich die Möglichkeit, die verwendeten Ansätze mit jenen in der gegenständlichen Arbeit zu vergleichen und nicht berücksichtigte Aspekte zu übernehmen (dies ist eventuell in den Bereichen Lärmkosten, Luftverschmutzungskosten und Klimakosten sinnvoll).

4.2.6. USA – Life-Cycle Cost Analysis

Die Staaten der USA sind verpflichtet, für größere Projekte im höherrangigen Straßennetz eine Lebenszyklusanalyse (LCCA) [24] durchzuführen. Es wird zu keiner speziellen Software geraten, jedoch bieten die Studien einen Überblick über das vorhandene Angebot [25], [26].

In diesem Kontext kommt eine LCCA dann zum Einsatz, wenn die Entscheidung für eine Maßnahme und die nachfolgende Funktion der Strecke schon gefallen sind. Sie hat somit die Aufgabe, Variantenentscheidungen zu treffen. Dies kann so auch auf die österreichische Erhaltungsplanung übertragen werden. Die Umsetzung hat im internationalen Vergleich sehr früh begonnen, sie hat jedoch auch viele Elemente, die durch Expertenwissen abgeschätzt

werden müssen (Lebensdauer einer Konstruktion und darauf folgende Maßnahmen). Als Entscheidungskriterium gelten die Kosten, diese werden diskontiert und über den Betrachtungszeitraum summiert (Net Present Value), zu jedem Maßnahmezeitpunkt ergeben sich zusätzliche Kosten für Baulastträger und Straßennutzer.

Haupteinflussgröße der Nutzerkomponente sind die Behinderungen durch Baustellen, deren Berechnung stark von der Genauigkeit der prognostizierten Verkehrsdaten und den Charakteristika der Baustelle abhängt. Die angenommenen Kapazitäten beruhen auf dem Highway Capacity Manual. Sobald es zu einer Überlastung und Staubildung kommt, sind die entstehenden Zeitkosten die bestimmende Größe der Nutzerkosten. Zu diesen zählen weiters die Fahrzeugbetriebskosten und die Unfallkosten. Für die Ermittlung der Fahrzeugbetriebskosten wird angeraten, mindestens drei Fahrzeuggruppen zu betrachten (Pkw, Lkw und Sattelzug).

Von Interesse ist auch die Risikoanalyse, die eine Berücksichtigung der Unsicherheit der Eingabewerte ermöglicht. Empfohlen wird die Anwendung eines probabilistischen Ansatzes (z.B. mittels Monte Carlo Simulation), um die Schwankungsbreite des Ergebnisses abschätzen zu können. Ist dies nicht möglich, soll zumindest der Versuch einer Sensitivitätsanalyse unternommen werden.

Für die weitere Arbeit können die Erfahrungen eines lauffähigen Pavement Management Systems mit Berücksichtigung von Nutzereffekten aufgegriffen werden. Auf Ebene der funktionalen Zusammenhänge ist der Ansatz für die Berechnung der Fahrzeugbetriebskosten auf Basis des International Roughness Index und die Entwicklung der Zeitkostensätze zu beachten (siehe Kapitel 6.3). Die Ansätze der Sensitivitätsanalyse können als eine Grundlage in die abschließenden Vergleichsrechnungen dieser Arbeit eingehen.

4.2.7. HEATCO (Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment)

Ziel dieses Forschungsprojektes des 6. EU-Rahmenprogramms [27] war es, die in Europa vorhandenen nationalen Ansätze zur Evaluierung und Kontrolle von Straßenbauprojekten und Transportkosten zu sammeln und soweit wie möglich zu vereinheitlichen. Hierbei wurde besonders auf die Wertansätze zur Berücksichtigung von Zeitverlusten und Staubildungen sowie auf die Reduktion von Unfallrisiken eingegangen. Ebenso waren die Kosten für Gesundheit und Umwelt durch Abgase und Lärm, sowie Infrastrukturkosten und ökonomische Effekte von Interesse.

Generell konnten große Unterschiede in den Richtlinien der einzelnen Länder festgestellt werden, sowohl im methodischen Ansatz, als auch im Detaillierungsgrad und in den berücksichtigten Indikatoren. Aus diesem Grund ist die daraus entstandene EU-Richtlinie (Guide to cost-benefit analysis of investment projects) auch sehr offen und schreibt keine anzuwendende Methode oder gar Indikatoren vor. In allen betrachteten Ländern werden Kosten-Nutzen-Analysen zur Bewertung von Projekten eingesetzt, jedoch mit tiefgreifenden Unterschieden. Die Berücksichtigung von Nutzen für den Straßenbenützer und Fahrzeugbetriebskosten ist aber allen gemein. Zeitgewinne werden zumeist nach Arbeitsverkehr und Freizeitverkehr getrennt.

Für den Aspekt der Sicherheit werden die Teilbereiche des Materialschadens, personenbezogene Verluste und der gesellschaftliche Schaden ausgewiesen, jedoch zumeist ohne monetäre Bewertung.

Zur Umrechnung der Lärmbelastung in Geldwerte wurden in Deutschland, Ungarn, Norwegen, Spanien, Schweden und Großbritannien insgesamt 5500 Interviews durchgeführt um unter

anderem die Höhe des „Willingness to pay“ für Straßen- und Bahnlärm für unterschiedliche Lärmszenarien zu entwickeln [27] (siehe auch Kapitel 8.2).

Bei den vergleichenden Auswertungen der nationalen Ansätze, wie auch bei dem generalisierten Ansatz wird besonders der Einfluss der Zeitkosten deutlich: rund 80 bis 90% der gesamten Nutzenbeiträge werden durch Zeiteinsparung und die Reduktion von Fahrzeugbetriebskosten gestellt. Umwelteinflüsse und die Reduktion von Unfällen spielen nur eine untergeordnete Rolle.

Die Ansätze für die Zeitkosten können Deliverable 4 und 5 entnommen werden. Ein Ansatz ergab sich aus den Willingness-to-pay Befragungen, andere Ansätze können aus nationalen Richtlinien übernommen werden. Es werden sowohl für die Zeitkosten, als auch für Lärmkosten Vorschläge für den Kostensatz und ein Vergleich zu den jeweils nationalen Vorgaben angeführt.

Für die Berücksichtigung von Unsicherheiten werden die Anwendung von Sensitivitätsanalysen und Szenariotechniken empfohlen. Wenn die benötigten Daten zur Verfügung stehen, eignet sich der probabilistische Ansatz mittels Monte Carlo Simulation besonders.

5. KENNGRÖSSEN DES VERKEHRS

5.1. Verkehrsbelastung

Im derzeitigen Österreichischen Pavement Management System wird die Verkehrsbelastung abschnittsweise durch die Ergebnisse aus den Querschnittszählungen abgedeckt. Hieraus können die Verkehrsstärke (JDTV) und der Schwerverkehrsanteil (Bus, Lkw, Lkw + Anhänger) entnommen werden. Diese Daten sind für die Zustandsprognose und die Gewichtung der einzelnen Maßnahmen ausreichend. Für die Berechnung von Stauzeiten muss die Verkehrsbelastung jedoch auf kleinere Zeit-Einheiten herunter gebrochen werden, zumeist auf Stundenwerte teilweise bis zu Minutenwerten.

Die Entscheidung für eine Darstellungsmethodik der Verkehrsbelastung kann jedoch erst in Abstimmung mit der jeweiligen Berechnung der Überlastung getroffen werden.

5.1.1. k-Wert

In der deutschen EWS-97 [20] wird die verkehrliche Gesamtbelastung (gegeben als durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV)) mit Hilfe von Anteilswerten (k-Wert) in stündliche Verkehrsmengen aufgespalten. Hierbei wird weiters je nach Aufgabenstellung eine Unterteilung in Fahrzeuggruppen (Pkw, Lkw,...) und Tagesgruppen (Normal-, Urlaubswerktage und Sonn-/Feiertage) vorgenommen. Die jeweils anzuwendenden k-Werte richten sich auch nach der Kategorie der betrachteten Straße.

In den jeweiligen Tagesgruppen werden Stunden mit annähernd gleichem Verkehrs-ablauf zusammengefasst, für diese kann dann eine zugeordnete stündliche Verkehrsstärke ermittelt werden. Der jeweilige k-Wert kann aus der Dauerlinie gewonnen werden, es werden hierzu die Werte für die 30. Stunde (Verkehrsstärke wird den 30 verkehrsreichsten Stunden zugeteilt), die 70. Stunde (Verkehrsstärke wird den 40 darauffolgenden Stunden zugeteilt), die 200. und 700. Stunde angewandt. Auch wird ein k-Wert für die Grundbelastung der verbleibenden Stunden angesetzt.

Die stündliche Verkehrsstärke kann mit Hilfe des Faktors k [%] bestimmt werden. Dieser ist abhängig vom Zeitabschnitt, dem Straßentyp und der Fahrzeuggruppe, er ist tabellarisiert und bestimmt eine Verkehrsstundengruppe. Die entsprechenden Werte für den Gesamtverkehr auf Autobahnen mit 2 Richtungsfahrstreifen und einem DTV_{ges} über 40.000 sind in Abbildung 10 dargestellt.

$Q_{stünd}$=k/100*DTV/(Anzahl der Richtungen) Gleichung 6

Es ergibt sich eine Verteilung der Verkehrstärken über die Zeit (Werktag/Urlaubstag,...) für jede Fahrzeuggruppe (Summe der Stunden ergibt 365*24).

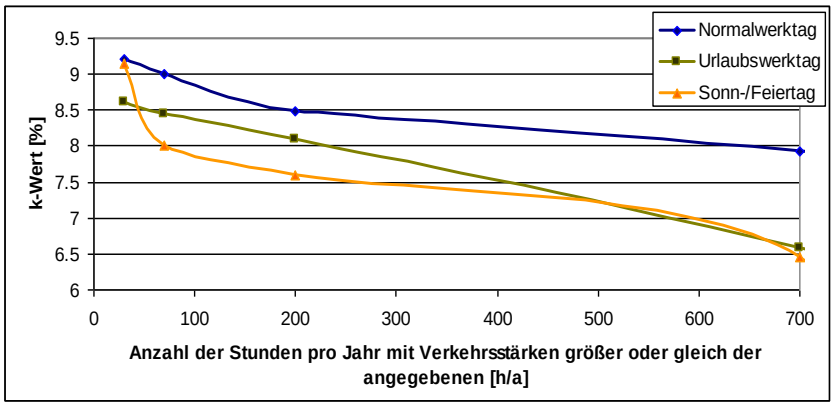


Abbildung 10: k-Werte für den Gesamtverkehr in Abhängigkeit von der Tagesgruppe nach [20]

Für die Berechnung der Verkehrsstundengruppen ist es ausreichend, die betrachtete Straßenkategorie anzugeben und den DTV in diesem Abschnitt zu kennen. Diese Informationen können auch für das österreichische Autobahnen- und Schnellstraßennetz vorgehalten werden. So kann der durchschnittliche Verkehr auf eine Tagesverteilung (in der jeweiligen Tagesgruppe) herunter gebrochen werden. Der Verlauf der Verkehrsstärken über einen Tag (stündliche Verkehrsstärken), der in manchen Anwendungen als Grundlage für die Stauberechnung dient, kann jedoch nicht generiert werden.

5.1.2. typisierte Ganglinien

Die Verteilung der Verkehrsstärke eines bestimmten Streckenabschnitts kann auch über die Zuordnung zu einer typisierten Ganglinie erfolgen. Für Deutschland wurden von Pinkovsky [28] Jahres-, Wochen- und Tagesganglinien entwickelt. Zur Anwendung kommen kollektive Ganglinientypen (Gruppen von Straßenabschnitten für bestimmte Zeitbereiche) oder individuelle Ganglinientypen (für einen bestimmten Abschnitt aus historischen Zähldaten entwickelt). In den Jahren 2000 – 2002 konnten bei Zählungen hohe Zuordnungsraten des tatsächlichen Verkehrsaufkommens zu den Ganglinientypen nachgewiesen werden.

Die Zuordnung eines Streckenabschnitts zu den Typen erfolgt über verkehrliche Kennwerte, wie die maximale Verkehrsstärke am Vormittag und den Ferienverkehrsfaktor. Für die Bestimmung der Verkehrsnachfrage im Erhaltungsmanagement können aufgrund von historischen Daten Werte für die Tages- bzw. Wochennachfrage bestimmt werden. Mit Hilfe von Ganglinien können diese über die Woche oder den Tag disaggregiert werden. Zur Bestimmung der zugehörigen Tagesganglinie kommt das hierfür entwickelte Zuordnungsverfahren für Tagesganglinien zum Einsatz. Für den allgemeinen Fall (generelle Überprüfung) ist die Tagesgruppe Dienstag bis Donnerstag von besonderem Interesse. Die Tagesganglinien beziehen sich auf den Normalzeitbereich, dieser umfasst die von Schulferien, Feiertage und extremen Witterungsverhältnissen unbeeinflussten Tage.

Für jede Zählstelle werden vier Kennwerte benötigt (diese sind als prozentuelle Anteile am gesamten Tagesverkehrsaufkommen auszuweisen): maximale Stunde Vormittag (5-10 h), mittlere Verkehrsstärke Vormittag (7-9 h), maximale Stunde Nachmittag (15-20 h) und mittlere Verkehrsstärke Nachmittag (16-18 h). Über diese Kennwerte kann mittels Distanzminimierung (Summe der quadratischen Abstände) zu den jeweiligen Teilschwerpunkten der typisierten Ganglinien sowie der vorhandenen Verkehrsverteilung der passende Typ (A bis G) ausgewählt werden. In Abbildung 11 sind die Tagesganglinie der Tagesgruppe Dienstag bis Donnerstag dargestellt, besonderes Augenmerk liegt auf der Ganglinie des Typs C (tagsüber relativ ausgeglichene Verkehrsverteilung), da dieser vorrangig auf Autobahnen und Schnellstraßen anzutreffen ist.

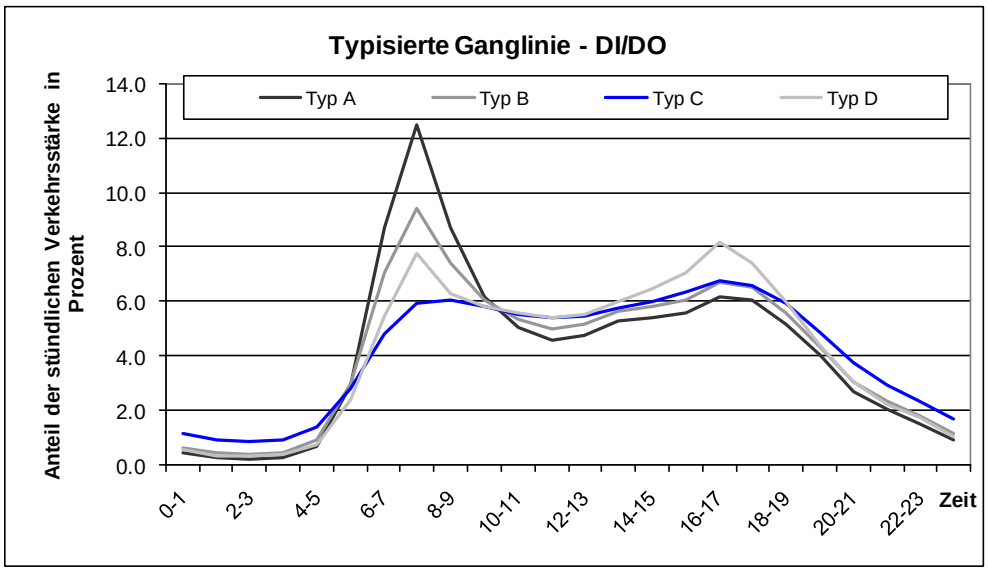


Abbildung 11: typisierte Ganglinie der Tagesganglinie Dienstag bis Donnerstag [28]

Anwendung finden die Tagespegeltypen auch im Bundesverkehrswegeplan (BVWP) [29]. Diese werden für die Aufteilung des DTV auf die stündlichen Verkehrsstärken verwendet.

Aus den automatischen Zählungen der Asfinag können jedoch nur der DTV für Dienstag bis Donnerstag und mittlere Stundenwerte für die Nacht herausgelesen werden. Weiters stehen die maximalen Stundenwerte zur Verfügung. Aus diesen Informationen kann eine erste Zuordnung zu den Ganglinientypen getroffen werden (z.B. Verifizierung der Auswahl einer für das Autobahnen- und Schnellstraßennetz typischen Ganglinie). Die Datenaufnahme an den Zählstellen erfolgt jedoch in einer höheren Genauigkeit und aus diesen Rohdaten könnten die benötigten Informationen gewonnen werden.

5.1.3. funktionaler Zusammenhang

Das Verkehrsvorhersagemodel, das im Zuge des FORMAT-Projekts (Cost of user delay at road maintenance sites – deliverable Report D3/D4 [30], Kurzfassung [17]) entwickelt wurde, ermöglicht eine Beschreibung der Tagesganglinie mittels eines formulativen Zusammenhangs. Die gesuchte Kurve wird aus 3 Normalverteilungskurven über einen Zeitbereich von 24 h (Zeitabschnitte zu je 1h) entwickelt, das Ergebnis ist in Abbildung 12 dargestellt. Dieser Ansatz ergab sich aus der Betrachtung der Verkehrskurven und kann die tatsächliche Verkehrsverteilung sehr gut abbilden. Zur Abstimmung auf die tatsächliche Situation wird eine Korrekturkonstante eingeführt:

$$T(t) = a_0 + \sum_{i=1}^{i=3} \frac{a_i}{\sqrt{2\pi}\, s_i} \cdot \exp\left(-(t - m_i)^2 / 2s_i^2\right) + k \cdot SE \cdot N(p) \qquad \text{Gleichung 7}$$

a_0…Anzahl der Fahrzeuge außerhalb der Spitzenzeiten
a_i…Summe der Fahrzeuge unter der Kurve$_i$
s_i…Standardabweichung d. Kurve$_i$
m…korrespondiert mit dem Mittelwert d. Kurve
t…Zeitabschnitt (Stunden des Tages)
Term in der Klammer berücksichtigt den Fehlerteil:
k… Konstante (1 bei 6-Minuten Daten, 1,4 bei stündlichen Werten)
SE… mittlerer Standardfehler aus der Regression
p… Wahrscheinlichkeit mit der Wert T im Zeitraum t erreicht wird
N(p)… kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktion der Standardnormalverteilung

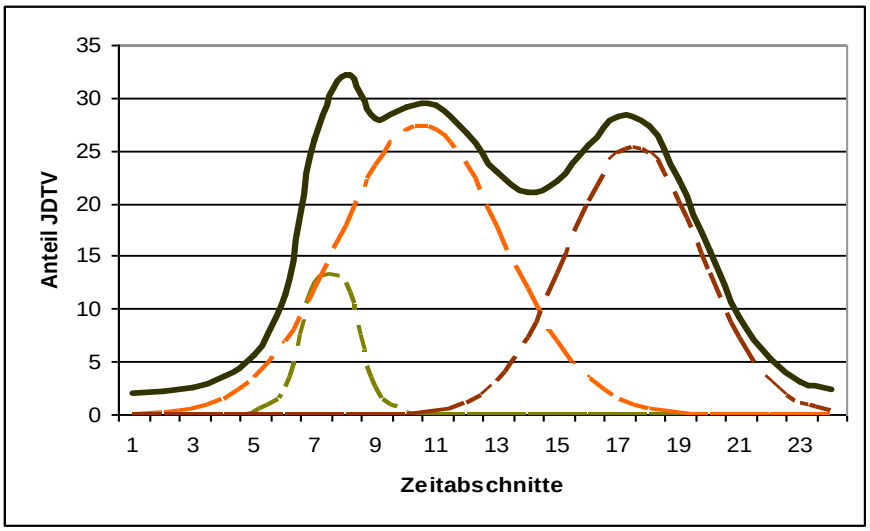


Abbildung 12: Verkehrsverteilung zusammengesetzt aus drei Glockenkurven nach [30]

Aus den oben genannten Zusammenhängen ergeben sich 10 Unbekannte (a0, a1, m1, s1, a2, m2, s2, a3, m3, s3), die mittels nichtlinearer Regression aus Daten der zu betrachtenden oder einer Straße mit ähnlichen Verhältnissen gewonnen werden können. Diese kann zum Beispiel mit der Statistiksoftware SPSS durchgeführt werden. Zählt man den Fehlerterm hinzu ergeben sich 11 Variable. Es besteht auch die Möglichkeit, die Parameter über mehrere Schätzvorgänge und mehrfache lineare Regression (Excel) zu generieren. Hierbei werden die Variablen m und s geschätzt und a berechnet, die Schätzgenauigkeit kann über R^2 bestimmt werden.

Die Kalibrierung des Modells erfolgt auf Basis von 6-Minuten-Werten und erfordert somit gewaltige Datenmengen. Die Auswertung von Stunden-Werten (über ein gesamtes Jahr) erzielt aber auch gute Ergebnisse, jedoch mit der Einschränkung, saisonabhängige Schwankungen nicht berücksichtigen zu können.

Im Zuge des FORMAT-Projekts wurden für einige Beispielstrecken in Frankreich die entsprechenden Parameter entwickelt. Es besteht auch die Möglichkeit, die jeweilige Strecke einem dieser Streckentypen zuzuordnen. Hierbei wurden Daten für die Situationen „interurban" (from/to main city), „seasonal" (to/from holiday spot), „rural" und „urban bypass" ausgewertet. Für die Entwicklung des Verkehrszuflusses in Österreich können entweder die Ergebnisse dieser Studie übernommen werden oder, aufgrund von einer Auswahl repräsentativer Zählstellen, für welche stündliche Verkehrsdaten über den Zeitraum von etwa einem Jahr vorhanden sind, eigene Regressionsrechnungen durchgeführt werden. Die in Österreich veröffentlichten Daten der Verkehrszählung sind jedoch für die Entwicklung von Zuflussmodellen zu ungenau. Auch hier muss auf die aufgenommenen Rohdaten zurückgegriffen werden, aus welchen die benötigte Detailgetreue gewonnen werden kann.

Der tatsächliche Verkehrsablauf ergibt sich durch die anzutreffende Verkehrsstärke, die Verkehrszusammensetzung und die dadurch möglichen Geschwindigkeiten. Grundlage ist das vorhandene Angebot an Verkehrsfläche, das durch den Querschnitt / den jeweiligen Querschnittstyp festgelegt ist.

Die Verteilung des Verkehrsaufkommens kann aber nicht als gleichmäßig auf alle Fahrstreifen angenommen werden. Aussagen über die Verteilung (Zusammenhang von Verkehrsnachfrage und Verkehrsablauf) können auch nur bei stabilen Verhältnissen getroffen werden (vgl. hierzu Klementschitz [31] und Busch [32]). Der Unsicherheitsfaktor der Verkehrsverteilung auf die Fahrtrichtungen kann durch die richtungsgetrennte Verkehrszählung im hochrangigen österreichischen Straßennetz vermieden werden.

5.1.4. Resümee

Die drei dargestellten Methoden (k-Wert, typisierte Ganglinie und funktionaler Zusammenhang) zur Aufteilung der Verkehrsbelastung auf stündliche Nachfragewerte (oder auch kleinere Zeiteinheiten) sind grundsätzlich alle zum Einsatz im Erhaltungsmanagement geeignet. Die Auswahl kann in erster Linie nach den vorhandenen Grundlagedaten getroffen werden.

Im gegenständlichen Projekt wird in einem ersten Schritt die typisierte Ganglinie gewählt, da hier die tatsächliche Verkehrsverteilung in Form der Straßenkategorie gut berücksichtigt werden kann, die erforderlichen zusätzlich Daten jedoch sehr gering sind. Die verwendeten Werte der Ganglinie Typ C sind in Tabelle 1 angeführt.

Typ C ausgeglichene Verteilung			
Zeit	Prozent des JDTV	Zeit	Prozent des JDTV
0-1	1,134	12-13	5,470
1-2	0,905	13-14	5,734
2-3	0,839	14-15	5,999
3-4	0,933	15-16	6,370
4-5	1,385	16-17	6,739
5-6	2,817	17-18	6,576
6-7	4,816	18-19	5,953
7-8	5,924	19-20	4,851
8-9	6,021	20-21	3,764
9-10	5,808	21-22	2,945
10-11	5,544	22-23	2,347
11-12	5,426	23-24	1,699

Tabelle 1: Typisierte Ganglinie C; Dienstag bis Donnerstag aus [28]

5.2. Kapazität

Die Kapazität eines Fahrbahnquerschnitts definiert die größte Verkehrsstärke, die ein Verkehrsstrom bei gegebenen Weg- und Verkehrsbedingungen an dem für ihn bestimmten Querschnitt erreichen kann (FGSV [33]).

Sie ist bestimmt durch die Eigenschaften des Straßenentwurfs wie Linienführung, Kurvigkeit, Querschnittsdimensionen und Umgebungsgestaltung (Anschlussstellen, Tunnelstrecken), aber auch durch die Oberflächeneigenschaften und im Besonderen durch die Zusammensetzung des Verkehrs (Güterverkehrsanteil, sowie die Motor- und Bremsleistung der einzelnen Fahrzeuggruppen) und etwaige Geschwindigkeitsbeschränkungen. Diese Definition findet sich unter anderem im HDM-4 [16].

Grundsätzlich ist stets auch die Zeiteinheit zu betrachten, über die die Kapazität bestimmt wird. Kurzfristig kann es zu einem deutlich höheren Verkehrsdurchsatz kommen. So können aus Messungen von 15-Minuten-Werten wesentlich höhere Kapazitäten bestimmt werden, als aus Stundenwerten.

Für das Erhaltungsmanagement sind vor allem jene Faktoren von Bedeutung, die durch Anwendung einer Maßnahme beeinflusst werden können. Die Kapazität hat in diesem Zusammenhang im Bereich von Baustellen großen Einfluss, da durch die Baustellenauslegung und -abfolge der Verkehrsablauf und die hier entstehenden Nutzerkosten Berücksichtigung finden. Die Kapazität auf der freien Strecke muss der Verkehrsbelastung in diesem Bereich gegenüber gestellt werden, um hier eine etwaige Reduktion der Geschwindigkeit bzw. eine Überlastung berücksichtigen zu können.

5.2.1. Kapazität auf der freien Strecke

Generell wird die Kapazität auf Autobahnen in der Literatur je nach Quelle mit 1800 – 2400 Kfz/h je Fahrstreifen angesetzt. Die Haupteinflussgröße sind hierbei die jeweilige Straßenkategorie, die verfügbare Fahrstreifenanzahl und der Schwerverkehrsanteil, sowie die Längsneigung der Strecke. Unterschiede ergeben sich auch durch die Definition der Leistungsgrenze, das heißt welcher Zustand als nicht mehr ausreichend gilt. Diese Grenze kann dann gesetzt werden, wenn ein freier Verkehr nicht mehr möglich ist und sich gebundener Verkehr ausbildet. Sie kann aber auch mit einer bestimmten Grenzgeschwindigkeit festgelegt werden oder bezeichnet jene Verkehrsstärke bei der es zum Stau bzw. zum Stillstand kommt. Kapazitätsangaben können sich auch nach dem Bezugsintervall unterscheiden, je kürzer das betrachtete Intervall angesetzt wird, desto höher die gemessenen Kapazitäten.

Der RVS 03.01.11 [18] zur Überprüfung der Anlageverhältnisse von Straßen (ÜAS) können für die Berechnungsverkehrsstärke einer Autobahn mit 2 Richtungsfahrstreifen folgende Werte entnommen werden (siehe Tabelle 2). Die Angaben erfolgen in Kfz/h und können für 3 Richtungsfahrstreifen um die Hälfte erhöht werden. Ebenso können Tabellen für andere Längsneigungsbereiche entwickelt werden. Mit den angegebenen Verkehrsstärken kann die maßgebende Geschwindigkeit der jeweiligen Straßenkategorie gewährleistet werden (für Autobahnen und Schnellstraßen 80-100 km/h).

Längsneigung 0-2%	Lkw-Anteil				
Fahrstreifenbreite	0%	2% Steigung < 400m	2% lange Steigung	10% kurze Steigung	20% kurze Steigung
3.75 m	4000	3922 - 3774	3922 - 3390	3636 - 3333	3333 - 2857
3.5 m (2 m bef. Seitstr.)	4000	3922 - 3774	3922 - 3390	3636 - 3333	3333 - 2857
3.5 m (0.5m bef. S-str.)	3400	3333 - 3208	3333 - 2881	3091 - 2833	2833 - 2429
3.25 m (2 m bef. S-str.)	3800	3725 - 3585	3725 - 3220	3455 - 3167	3167 - 2714
3.25 m (0.25m bef. Seitstr.)	3200	3137 - 3019	3137 - 2712	2909 - 2667	2667 - 2286
3.5 m (ohne Mittelstr.)	3200	3137 - 3019	3137 - 2712	2909 - 2667	2667 - 2286

Tabelle 2: Berechnungsverkehrsstärke für 2 Richtungsfahrstreifen [Kfz/h] aus [18]

Für deutsche Autobahnen finden sich Kapazitätswerte im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen [34]. Die in Tabelle 3 angeführten maximal abführbaren Verkehrsstärken [Kfz/h] beziehen sich auf Autobahnen mit einer Längsneigung unter 2% und sind jenen der RVS ähnlich. Diese Werte gelten für Streckenabschnitte ohne Geschwindigkeitsbeschränkungen. Ist eine Beschränkung auf 120 km/h vorhanden, können die Kapazitäten für Ballungsräume angesetzt werden.

Lage im Netz	Zweistreifige Richtungsfahrbahn			Dreistreifige Richtungsfahrbahn		
	Lkw-Anteil [%]			Lkw-Anteil [%]		
	0	10	20	0	10	20
innerhalb von Ballungsräumen	4000	3800	3600	5700	5400	5100
außerhalb von Ballungsräumen	3600	3500	3400	5400	5100	4800
Tunnel	4100	3900	3700	5800	5500	5200

Tabelle 3: Kapazitäten von Autobahnen [Kfz/h] aus [34]

Aus dem amerikanischen Forschungsbereich sind für reinen Pkw-Verkehr die maximalen Durchsatzraten dem Highway Capacity Manual (HCM) zu entnehmen [35] und in Tabelle 4 angeführt. Die Werte beziehen sich auf 15 Minuten Intervalle bei gleichmäßigem Verkehrsfluss.

Fahrstreifen je Richtung	Pkw/h	Fahrstreifen je Richtung	Pkw/h
2	4400	3	6900

Tabelle 4: Kapazitäten für den reinen Pkw-Verkehr nach HCM [35]

Bei der Überarbeitung des HCM [36] wurden zufolge neuerer Untersuchungen auch die Kapazitätswerte weiter erhöht. Es wird hierbei von einer Fahrstreifenkapazität von 2400 Pkw/h ausgegangen (dies ergibt mit Tabelle 4 vergleichbare Werte von 4800 Pkw/h für zwei Fahrsteifen und 7200 Pkw/h für 3 Fahrstreifen). Angepasst an die lokalen Verhältnisse (zum Beispiel: ebene Strecke, 5 % Schwerverkehr, 0,31 Knotenpunkte je km,...) können hieraus Kapazitäten von 4120 Fz/h für 2 Fahrstreifen und 6180 Fz/h für 3 Fahrstreifen ermittelt werden.

Der Einfluss des Schwerverkehrs ist besonders im Bezug auf die Kapazität maßgebend, da dieser größere Abmessungen besitzt und auch durch sein Fahrverhalten auf den Verkehrsfluss wirkt. Daher können die oben dargestellten Werte nicht ohne Anpassung auf das österreichische Straßennetz übertragen werden.

Die im HDM [16] verwendeten Werte der Kapazitätsgrenzen werden in Abhängigkeit der Straßenkategorie (Kenngröße ist hierbei die Breite der Fahrfläche) angegeben. Verwendet werden die Verkehrsdaten in Form von Pkw-Raum-Einheiten/h (siehe Tabelle 5). Ab der nominellen Leistungsfähigkeit kommt es zu einer Geschwindigkeitsbeeinträchtigung, bei Erreichen der Grenzkapazität ist die Geschwindigkeit bis auf den Wert v_{min} abgesunken.

Straßentyp	Breite [m]	Grenzkapazität [Pkw-Raum-Eh/h]	nominelle Leistungsfähigkeit [Pkw-Raum-Eh/h]	v_{min} [km/h]
1-streifige FB	4-4,5	1800	1260	20
2 streifig FB	5,5-9	2800	2520	25
breite 2-streifige FB	9-12	3200	2880	30
4-streifige FB	>12	8000	7600	40

Tabelle 5: Grenzkapazitäten nach HDM-4 [16]

Die im HDM verwendeten Einheiten im Zusammenhang mit der Kapazität eines Abschnitts sind die Passenger Car Equivalencies (Pkw-Einheiten), sie geben die Anzahl an Fahrzeugen an, die den selben Platzbedarf und die selbe Auswirkung wie die „ersetzten" Fahrzeuge erzielen. Die so entstandene Abhängigkeit von den Anlageverhältnissen wird über die Längsneigung berücksichtigt. Weiters ist auch die Einheit Passenger Car Space Equivalencies (Pkw-Raum-Einheiten) gebräuchlich. Sie berücksichtigt allein den Platzbedarf der „ersetzten" Fahrzeuge ungeachtet deren Wirkung auf den Verkehrsablauf. Die im HDM verwendeten Äquivalenzwerte sind in Tabelle 6 dargestellt.

Fahrzeugkategorie	2 bis 4 streifig	schmale 2 streifig	einstreifig
Pkw	1	1	1
Bus	1,8	2	2,2
leichter Lkw	1,3	1,4	1,5
schwerer Lkw	1,8	2	2,4
Sattelschlepper	2,2	2,6	3

Tabelle 6: Äquivalenzwerte für Pkw-Raum-Einheiten nach HDM-4 [16]

Bei Ponzlet [37] können hohe Leistungsfähigkeitswerte gefunden werden. Die ermittelten maximalen Verkehrsstärken erreichen auf Streckenabschnitten mit drei Richtungsfahrstreifen etwa 4700 bis 5100 Fz/h und auf Abschnitten mit zwei Richtungsfahrstreifen im Ballungsgebiet 3600 Fz/h. Die durchschnittliche Geschwindigkeit bei Erreichen der Leistungsfähigkeit ist mit 70 km/h festgesetzt.

5.2.2. Kapazität im Baustellenbereich

Maßgebend für die Berechnung von Stauzeiten und Zeitverlusten in Langsamfahrstrecken und in weiterer Folge von Zeitkosten sind die Kapazitäten im Baustellenbereich, für welche gesonderte Festlegungen getroffen werden müssen. Auch hier kann auf mehrere Studien zurückgegriffen werden.

In der deutschen Richtlinie zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen (RBAP) [38] wird von einer Leistungsfähigkeit von 1830 Pkw-Einheiten pro Stunde und Fahrstreifen im Bereich einer Baumaßnahme ausgegangen. Bei Fahrstreifenbreiten kleiner 2,75 m für Pkw bzw. 3,25 m für Lkw wird ein reduzierter Wert von 1720 Pkw-Einheiten angesetzt. Weiters werden Abminderungsfaktoren zur Berücksichtigung von Überleitungen, der Reduktion der Fahrstreifenanzahl sowie von Urlaubsverkehr angesetzt. Tabelle 9 bietet einen Überblick der anzusetzenden Abminderungsfaktoren, die Grundlage hierfür ist in Beckmann und Zackor [39] zu finden. Diese Faktoren wurden von Ober-Sundermeier [40] durch weitere wichtige Einflussparameter ergänzt. Der benötigte Pkw-Äquivalenzwert E ist für Neigungsbereiche von -4% bis +2% mit 1,5 festgelegt. Für größere Neigungen kann E unter Berücksichtigung der Abschnittslänge des Steigungsstückes den entsprechenden Diagrammen entnommen werden.

Streckenabschnitt: überregionale Verbindungsfunktion	0,9-0,95
hoch belastete Stadtautobahn	1,05-1,10
Urlaubsverkehr	0,90
Widrige Umfeldbedingungen	0,85-0,95
Arbeitsaktivität in der Baustelle	0,95
Schwerverkehrsanteil + Längsneigung (E=Äquivalenzwert)	1/(1-SVA+SVA*E)
Reduktion der Anzahl der Fahrstreifen vor der Baustelle Fahrstreifenreduktion rechts (langsame Fahrzeuge müssen wechseln)	0,95 (0,90)
reduzierte Breite (2.75-Pkw/3.25-Lkw)	0,95
Überleitung auf die Gegenfahrbahn	0,90-0,95

Tabelle 7: Abminderungsfaktoren für die Bestimmung der Kapazität im Baustellenbereich [40]

Ähnliche Abminderungsfaktoren finden sich auch bei Kellermann [41], hierbei wird von einer Grundkapazität von 2000 Kfz/h ausgegangen. Bei sehr schmalen Fahrstreifen (<2,75 m /<3,25 m) werden 80 %/85 % dieses Wertes angesetzt (dieser entspricht dann dem Wert der RBAP für geringe Breiten). Vor einer Baustelle ist um 5 % abzumindern, bei einer Überleitung in den Bereich der Gegenfahrbahn um 10 %.

Eine Zusammenschau deutscher und internationaler Ansätze kann Ober-Sundermeier [40] entnommen werden und ist in Tabelle 8 dargestellt.

Quelle	Grenzwerte in Kfz/h		Bemerkungen
	einstreifig	zweistreifig	
MAZE (2000) (Tagesbaustellen)	1400-1600 (in Pkw-E/h)		bei Abbau von 2 auf 1 Fahrstreifen
KELLERMANN (1997)	1368-1900	2736-3800	Einfluss Fahrstreifenbreite, Überleitung auf Gegenfahrbahn
RESSEL (1996)	915-1460	2075-3210	differenziert nach Verkehrsführung, GV-Anteil, Längsneigung
RBAP (1996)	1400-1830 (in Pkw-E/h)	2800-3660 (in Pkw-E/h)	differenziert nach Verkehrsführung und dem Anteil Ortsunkundiger
Laffont/Schmidt (1995)	1300		GV-Anteil 30-40%
	1400		GV-Anteil 30-40% + hoher Anteil ortskundig
RSA (1995)	1500	3000	durchschn. Lkw-Anteil, geringe Längsneigung
BRILON (1994)		3350	Lkw-Anteil 5-10%
OECD (1990) (Tagesbaustellen)	1540-1650		Verkehrsführung 2+0, SV 15% (GB)
	1540		Verkehrsführung 2+1, SV 15% (GB)
		3280	Verkehrsführung 3+2, SV 15% (GB)
		2980	VF 5+0, SV 15% (GB) + VF 3+2 (USA)
	1340		Verkehrsführung3+2 (USA)
	1100		Verkehrsführung 2+1 (D+CH)
		2400	Verkehrsführung 3+2 (D+CH)
		2650	Verkehrsführung 5+0 (D+CH)
Schmuck (1985) in Pkw-E/h	1400 (b<3,5m)	2750 (b<3,5m)	dreistreifig: 4100; vierstreifig: 5500 [Pkw-E/h]
	1600 (b>3,5m)	3200 (b>3,5m)	dreistreifig: 4800; vierstreifig:6400 [Pkw-E/h]

Tabelle 8: Zusammenschau von Richtwerten für die Kapazität von Baustellenengpässen nach [40]

Anhand von Beobachtungen eines Baustellenbereiches der BAB Stadtring Berlin [42] kann der Unterschied der Leistungsfähigkeit von Fahrstreifen in Abhängigkeit der Verkehrsführung bestätigt werden. Ohne Baustellentätigkeit konnten auf der 3-streifigen Autobahn maximale Verkehrsstärken von 5800 Kfz/h beobachtet werden (bei einem Lkw-Anteil von 7%). Die Verkehrsdichten lagen bei 30 Kfz/km. Im Baustellenbereich konnten bei 2 offenen Fahrstreifen (mit Überholmöglichkeit) Verkehrsstärken bis zu 4000 Kfz/h gemessen werden. In die andere Richtung waren die 2 vorhandenen Fahrstreifen baulich getrennt und die Leistungsfähigkeit reduzierte sich dadurch auf 3000 – 3200 Kfz/h. Dies ist aber auch durch die eingeschränkten Zufahrtsmöglichkeiten des einen Fahrstreifens zu erklären (Durchfluss 1400-1500 Kfz/h), der andere Fahrstreifen wies Leistungsfähigkeiten von rund 1600-1750 Kfz/h auf. Im Staubereich konnte eine Erhöhung der maximalen Dichte von 240 Kfz/km ermittelt werden. Diese Werte sind als 2-Minuten Maxima zu verstehen und reduzieren sich, sobald die Beobachtung über eine gesamte Stunde durchgeführt wird.

Aus Beobachtungen von Hess [43] wird die Kapazität als die aus dem Stau heraus realisierbare Verkehrsstärke definiert und mit den in Tabelle 9 angegebenen Werten belegt. Die jeweiligen Kapazitäten gelten als normalverteilt und sind daher durch Mittelwert und Standardabweichung ausreichend definiert. Der Mittelwert wird weiters noch auf einen Stundenwert hochgerechnet.

Verkehrsführung	Anzahl der Feldversuche	Mittelwert [Kfz/5min]	Mittelwert [KFZ/h]	Standardabweichung [(Kfz/5min)²]
Linkseinzug mobil (einer von zwei FS gesperrt)	2	146 (150)	1752 (1800)	228 (250)
Linkseinzug mit Verschwenkung (einer von zwei FS gesperrt)	7 (urban)	117 (120)	1404 (1440)	261 (250)
	3 (rural)	107	1284	117
Rechtseinzug (einer von zwei FS gesperrt)	3	115 (120)	1308 (1440)	297 (300)
Rechtseinzug (zwei von drei FS gesperrt)	3	120 (120)	1440 (1440)	166 (150)

Tabelle 9: Parameter für Kapazitäten in Engpässen [43]

In mehreren Studien konnten für die Kapazität in Ballungsräumen höhere Werte gemessen werden. Dies ergibt sich durch das engere Auffahren der Fahrzeuge, infolge dessen können höhere Dichten erreicht werden.

Verflechtungs- und Verengungsbereiche:

Aus einer Untersuchung über Tunnelstrecken [44] unter Berücksichtigung der Verflechtung von 2 (oder 3) Fahrstreifen auf einen kann eine Kapazität je Richtung (1 Fahrstreifen) von 1700 Fahrzeugen in einröhrigen Tunneln mit einer Länge über 2 km quantifiziert werden.

Bei der Fahrstreifenreduktion von drei auf zwei Fahrstreifen ohne Baustelle kann nach Friedrich und Engelmann [45] im Mittel festgestellt werden, dass die Kapazität rund 15% unter einer durchgängigen zweistreifigen Richtungsfahrbahn liegt, jedoch kommt es auch schon bei geringen Verkehrsstärken zu Verzögerungen und ab einer Verkehrsstärke von 30.000 Fahrzeugen pro Tag und Richtung ist eine Erhöhung der Unfallhäufigkeit festzustellen. Eine Übertragbarkeit auf Baustellensituationen ist nicht unbedingt gewährleistet, da sich bei dieser andere Randbedingungen ergeben (z.B. Absicherungen,...).

Ebenso finden sich im Highway Capacity Manual (HCM-2000) [36] Angaben für Verflechtungsbereiche außerhalb von Ballungsräumen. So können bei der Reduktion von zwei auf einen Fahrstreifen und einer Überleitung auf die andere Richtungsfahrbahn 1550 Kfz/h (ohne Überleitung 1750 Kfz/h), bei der Verengung von drei auf zwei Fahrstreifen 3720 Kfz/h angesetzt werden. Tabelle 10 zeigt weitere Ergebnisse, die durch das HCM auf Autobahnen im Ballungsraum ermittelt werden konnten.

Ressel [46] ermittelt die Leistungsfähigkeit im Baustellenbereich durch die Messung von tatsächlichen Bruttozeitlücken, die auch die jeweilige Verkehrsführung berücksichtigen. Bei Messungen wurden die Bruttozeitlücken für verschiedene Fahrzeugkombinationen (Pkw-Pkw, Pkw-GV,...) auf den unterschiedlichen Fahrstreifen ermittelt. Die Verkehrsstärke kann aus dem reziproken Wert der mittleren Bruttozeitlücke unter Annahme einer Binominalverteilung bestimmt werden. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 10 zusammengefasst. Für Baustellen ohne Fahrstreifenreduktion oder Überleitung der Fahrstreifen konnte Staubildung festgestellt werden und die Leistungsfähigkeit war nur unwesentlich geringer, als ohne Baustelle.

Quelle	Verkehrsführung	Kapazität [Kfz/h]			
		SVA=0	SVA=10	SVA=20	SVA=30
RESSEL (1994)	2 auf 1	1460	1320	1245	1175
	2 auf 1 Überleitung+1	2920	2780	2635	2495
	2 auf 2 Überleitung	2830	2670	2520	2380
	3 auf 2	3190	3035	2875	2725
	3 auf 2 Überleitung	2880	2725	2565	2410
HCM (1994)	3 auf 1	1170			
	2 auf 1	1340			
	2 auf 1 mit Betonleitwand	1550			
	5 auf 2	2740			
	4 auf 2	2960			
	3 auf 2	2980			
	3 auf 2 mit Betonleitwand	3720			
	4 auf 3	4560			

Tabelle 10: Richtwerte für die Kapazität in Verengungsbereichen

5.2.3. Resümee

Für die Kapazität auf der freien Strecke können für die gegenständliche Arbeit die Zusammenhänge der RVS 03.01.11 [18] übernommen werden. Diese wurden durch die internationalen Werten bestätigt und berücksichtigen die maßgebenden Einflussgrößen der Längsneigung, der Fahrstreifenbreite und des Lkw-Anteils. Die Grundkapazität kann jedoch in Anlehnung an die Kapazitätswerte des HCM und die derzeit verwendeten Kapazitätswerte im Rahmen von Telematikanwendungen der Asfinag von 2200 Kfz/h auf diesen Wert angehoben werden. Die sich daraus ergebenden Grundkapazitäten sind in Tabelle 11 dargestellt.

Ebenso können auf Grundlage dieser RVS und einer Grundkapazität von 2200 Kfz/h für andere Längsneigungen die entsprechenden Kapazitäten ermittelt und in die Anwendung übernommen werden.

[Fz/h] für 2 RichtungsFS	Lkw-Anteil				
Längsneigung 0-2%	0%	2%		10%	20%
Fahrstreifenbreite		kurze Steigung < 400m	lange Steigung	kurze Steigung	kurze Steigung
3,75	4400	4314 - 4151	4314 - 3729	4000 - 3667	3667 - 3143
3.5 (2 m bef. Seitstr.)	4400	4314 - 4151	4314 - 3729	4000 - 3667	3667 - 3143
3.5 (0.5m bef. Seitstr.)	3740	3667 - 3528	3667 - 3169	3400 - 3117	3117 - 2671
3.25 (2 m bef. Seitstr.)	4180	4098 - 3943	4098 - 3542	3800 - 3483	3483 - 2986
3.25 (0.25m bef. Seitstr.)	3520	3451 - 3321	3451 - 2983	3200 - 2933	2933 - 2514
3.5 (ohne Mitteltrennung)	3520	3451 - 3321	3451 - 2983	3200 - 2933	2933 - 2514

[Fz/h] für 3 RichtungsFS	Lkw-Anteil				
Längsneigung 0-2%	0%	2%	2%	10%	20%
Fahrstreifenbreite		kurze Steigung < 400m	lange Steigung	kurze Steigung	kurze Steigung
3,75	6600	6471 - 6226	6471 - 5593	6000 - 5500	5500 - 4714
3.5 (2 m bef. Seitstr.)	6600	6471 - 6226	6471 - 5593	6000 - 5500	5500 - 4714
3.5 (0.5m bef. Seitstr.)	5610	5500 - 5292	5500 - 4754	5100 - 4675	4675 - 4007
3.25 (2 m bef. Seitstr.)	6270	6147 - 5915	6147 - 5314	5700 - 5225	5225 - 4479
3.25 (0.25m bef. Seitstr.)	5280	5176 - 4981	5176 - 4475	4800 - 4400	4400 - 3771
3.5 (ohne Mitteltrennung)	5280	5176 - 4981	5176 - 4475	4800 - 4400	4400 - 3771

Tabelle 11: Grundkapazitäten für Strecken mit 2 bzw. 3 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn

Abhängig von den Varianten der Verkehrsführung im Baustellenbereich (siehe Kapitel 7.1.1) werden Kapazitätswerte für die jeweilige Baustellensituation zur Verwendung im Erhaltungsmanagement benötigt. Für die Anwendung auf das österreichische Autobahnen- und Schnellstraßenetz erscheinen die in Tabelle 7 angeführten Abminderungsfaktoren am effizientesten. Für die Berechung der tatsächlich vorhandenen Kapazitätswerte (dargestellt in Tabelle 12) wird jeder Verkehrsführung der entsprechende Abminderungsfaktor zugeteilt. Die Grundkapazität ist Tabelle 11 entnommen, weitere Voraussetzungen für die dargestellten Werte sind eine geringe Längsneigung, ein Lkw-Anteil von 10 % und eine Fahrstreifenbreite von 3.5 m. Aus diesen Randbedingungen ergibt sich eine mittlere Grundkapazität für

2 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn von 3833 Fz/h und für 3 Fahrsteifen je Richtungsfahrbahn von 5750 Fz/h.

Die unter diesen Voraussetzungen abgeschätzten Kapazitäten im Baustellenbereich sind für die zulässigen Baustellentypen in Tabelle 12 dargestellt. Bei allen Verkehrsführungen (VF) wird jeweils die Kapazität in Richtung der Baustelle und für die gegenüberliegende Fahrtrichtung (gegen Richtung BS) angegeben.

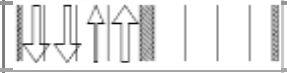
Baustellenauslegung	Abminderungsfaktor		Symbolbild	red. Kapazität	
	in Richtung Baustelle	gegen Richtung BS		in Richtung Baustelle	gegen Richtung BS
2 Fahrstreifen je Richtung					
VF 2+2red	0.950	1		3642	3833
VF 2+1	0.451	1		1730	3833
VF 3+1	0.928	1		3555	3833
VF 3+0	0.428	1		1639	3833
VR 2+0	0.428	0.475		1639	1821
VF 4+0	0.900	0.950		3450	3642
3 Fahrstreifen je Richtung					
VF 3+3red.	0.950	1		5463	5750
VF 3+2	0.602	1		3460	5750
VF 3+1	0.317	1		1823	5750
VF 3*+1	0.602	0.633		3462	3640
VR 4+1	0.587	1		3375	5750
VF 4+2	0.918	1		5280	5750
VF 5+1	0.952	0.983		5472	5654
VF 4+0	0.542	0.602		3114	3460
VF 5+0	0.542	0.602		3114	5463
VF 6+0	0.855	0.633		4916	5463

Tabelle 12: Vorschlag für die Kapazitätswerte im österreichischen PMS bei unterschiedlicher Baustellenauslegung unter Berücksichtigung eventueller Überleitungen (BS=Baustelle)

5.3. Geschwindigkeiten

Ziel der Untersuchung ist die Einbeziehung des Straßennutzers. Dieser kann in Form eines Einzelfahrzeugs oder in der Masse als Verkehr angesprochen werden.

Die ersten Untersuchungen zur Beschreibung des Verkehrsflusses fanden schon Mitte der 30er Jahre statt. Man versuchte die Situation mittels fotographischer Methoden einzufangen und zu quantifizieren.

Auch heute bieten sich vom Grundsatz her diese zwei unterschiedlichen Möglichkeiten der Beschreibung des Verkehrs an. Die Betrachtungen können je nach Aufgabenstellung entweder mikroskopisch oder makroskopisch durchgeführt werden.

Die mikroskopische Betrachtung beschreibt das Verhalten eines einzelnen Fahrzeugs, welches direkt beeinflusst wird durch das davor fahrende und selbst Wirkung auf das nachfolgende Fahrzeug erzielt. Unter Berücksichtigung der physikalischen Grundlagen kann das Verhalten der Fahrzeuge beschrieben werden. Die Zusammenführung der Daten erfolgt zumeist mit Hilfe von Fahrzeugfolgemodellen. Daraus generieren sich Kenngrößen für einzelne Fahrzeuge. Dies ermöglicht einen recht hohen Detaillierungsgrad und wird besonders zur Lösung von Telematikproblemen eingesetzt.

Makroskopische Modelle beschreiben den Verkehrsfluss als Gesamtheit. Dieser kann in Analogie zum Fließen einer Flüssigkeit oder eines Gases betrachtet werden. Hierbei werden die benötigten Größen über einen Zeitraum (zeitbezogen) oder Streckenabschnitt (wegbezogen) zum Beispiel durch Querschnittszählungen gewonnen. Bei der Auswertung können mittlere Verkehrszustände einer Fahrzeuggruppe angegeben werden.

Geschwindigkeit aus mikroskopischen Verkehrsdaten

Aus der erfassten lokalen Geschwindigkeiten (v_{lok}) von N beobachteten Fahrzeugen kann folgendermaßen die Momentangeschwindigkeit (V_{mom}) bestimmt werden:

$$V_{mom} = \frac{N}{\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{V_{lok,i}}}$$ Gleichung 8

Bei Schmuck [19] findet sich der Hinweis, dass gerade in Bezug auf die Geschwindigkeiten die Unsicherheiten groß sind und hier die Anwendung von stochastischen Modellen dem Rechnung tragen könnte. Der Einfachheit der Modelle ist dies jedoch nicht förderlich.

Geschwindigkeit aus makroskopischen Verkehrsdaten

Mit Hilfe des Fundamentaldiagramms können makroskopische Verkehrsdaten dargestellt werden (siehe Abbildung 13). Dieses zeigt den Zusammenhang zwischen der Verkehrsstärke q (Anzahl der Fahrzeuge je Zeiteinheit in einem Querschnitt [Kfz / h]), der mittleren Geschwindigkeit V_m [km / h] und der Verkehrsdichte k (Fahrzeuge je Wegeinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt [Kfz / km]).

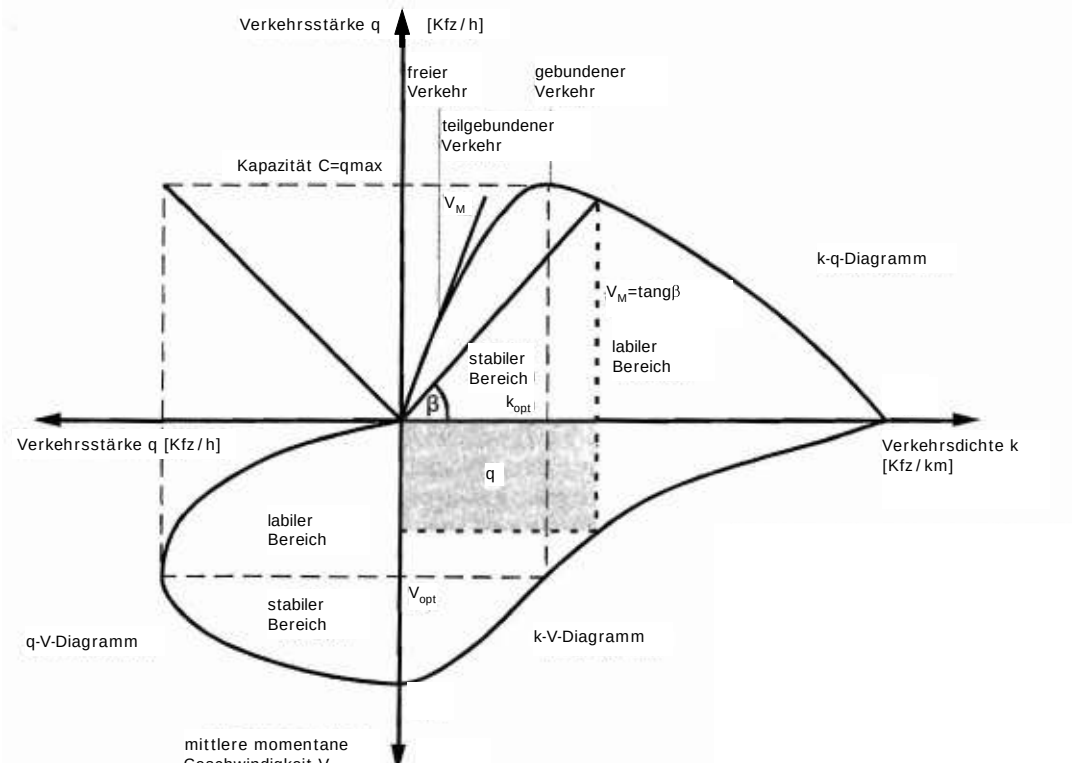


Abbildung 13: Fundamentaldiagramm [45]

Die Dichte selbst kann schwer gemessen werden und bestimmt sich zumeist aus den anderen beiden Eingangsgrößen.

$$V_m = q / k$$ Gleichung 9

Makroskopische Modelle beschreiben den Verkehr als Gesamtes, häufig werden physikalische Gesetze zur Beschreibung der Abläufe benützt. Diese Modelle sind in ihrer Anwendung robuster als mikroskopische, das heißt leichte Veränderungen bei den Eingangsdaten führen auch nur zu leichten Veränderungen des Ergebnisses, was hinsichtlich der möglichen Ungenauigkeiten bei den Eingangsdaten für die Anwendung im Erhaltungsmanagement von Vorteil ist.

Unabhängig von der Anzahl der vorhandenen Fahrzeuge wird die Geschwindigkeit einerseits durch die Straßenkategorie (höchstzulässige Geschwindigkeit), andererseits durch die Geometrie (Kurvenradien,...) der Strecke festgelegt. Aus diesen Randbedingungen lässt sich die Projektierungsgeschwindigkeit des Streckenabschnitts ermitteln.

5.3.1. frei gefahrene Geschwindigkeit

In Österreich gilt auf allen Straßen eine Beschränkung der Geschwindigkeit durch die zulässige Höchstgeschwindigkeit V_{zul}. Diese beträgt auf Autobahnen 130 km/h (80 km/h für Lkws), auf Freilandstraßen 100 km/h (80 km/h für Lkws) und im Stadtgebiet 50 km/h. Sie kann bei guten Witterungsbedingungen und Straßenzustand, entsprechender Dimensionierung (Radien, Neigungen,...), sowie geringen Verkehrsstärken von allen Fahrzeugen gefahren werden. Eine der maßgebenden Einflussgrößen auf die tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit, die vorhandene Verkehrsstärke, kann aus Zählungen für den jeweiligen Verkehrsabschnitt ermittelt werden. Zumeist wird diese als DTV (Durchschnittliche Tägliche Verkehrsstärke) oder als JDTV (Jährlich Durchschnittliche Tägliche Verkehrsstärke) sowie als JDTLV (Jährlich Durchschnittliche Tägliche LastVerkehrsstärke) ausgewiesen.

Die Überprüfung der Querschnittsdimensionierung und somit auch der aufgrund der vorgefundenen Verhältnisse fahrbaren Geschwindigkeit erfolgt in Österreich unter Anwendung der RVS 03.01.11, Überprüfung der Anlageverhältnisse von Straßen (ÜAS) [18]. Hierbei wird die vorhandene Betriebsgeschwindigkeit der maßgebenden Betriebsgeschwindigkeit gegenüber gestellt. Die Querschnittsdimensionierung an sich ist jedoch nicht Teil der systematischen Straßenerhaltung, sondern diese setzt auf der vorhandenen Situation auf.

Im Erhaltungsmanagement ist die Verkehrsstärke, in Anlehnung an die tatsächliche Entwicklung, mit einer konstanten Steigerungsrate belegt. So kann es bei einer Betrachtung, die in der Zukunft liegt, aufgrund der großen Verkehrsstärke zu einer Reduktion der frei gefahrenen Geschwindigkeit kommen. Diese bildet dann den Vergleichswert zur Bildung von Kosten und Nutzen.

In Deutschland wurden zur Abschätzung der Fahrgeschwindigkeit im Netz ohne Baustelle von Kellermann [41] Geschwindigkeitsmessungen der BAST an Fahrzeuggruppen ausgewertet. Das Ergebnis sind Geschwindigkeit–Verkehrsstärken-Beziehungen für zweistreifige und dreistreifige Richtungsfahrbahnen ohne Tempolimit. Bei der Anwendung dieser Zusammenhänge in Österreich muss berücksichtigt werden, dass sich durch die vorgeschriebenen Geschwindigkeitsbeschränkungen eine geringere mittlere Geschwindigkeit ergibt. Die Beziehungen zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsstärke sind in Tabelle 13 und Tabelle 14 dargestellt.

Lkw-Klasse	Q_1 Q_2 Q_3 Q_{max}	0 ... Q_1 (konstant)	Q_1 ... Q_2 bzw. Q_1 ... Q_{max}	Q_2 ... Q_3	Q_3 ... Q_{max}
< 15 %	870 2000 3000 3200	$V_m = 138,0$	$V_m = 154,0 - 0,0184 * Q$	$V_m = 160,4 - 0,0216 * Q$	$V_m = 404,6 - 0,103 * Q$
15 – 25 %	700 2000 2800 3000	$V_m = 138,0$	$V_m = 150,2 - 0,0174 * Q$	$V_m = 161,6 - 0,0231 * Q$	$V_m = 403,5 - 0,1095 * Q$
> 25 %	580 2700	$V_m = 138,0$	$V_m = 155,7 - 0,0303 * Q$		

Tabelle 13: Geschwindigkeits- Verkehrsstärke Beziehungen für zweistreifige Richtungsfahrbahnen [41]

Lkw-Klasse	Q_1 Q_2 Q_3 Q_{max}	0 ... Q_1 (konstant)	Q_1 ... Q_2	Q_2 ... Q_3 bzw. Q_2 ... Q_{max}	Q_3 ... Q_{max}
< 15 %	1400 3600 5000	$V_m = 143,0$	$V_m = 153,5 - 0,0076 * Q$	$V_m = 256,9 - 0,0364 * Q$	
> 15 %	1000 2200 3500 4500	$V_m = 143,0$	$V_m = 149,1 - 0,0061 * Q$	$V_m = 157,7 - 0,01 * Q$	$V_m = 289,7 - 0,0477 * Q$

Tabelle 14: Geschwindigkeits- Verkehrsstärke Beziehung für dreistreifige Richtungsfahrbahnen [41]

Durch Einsetzten der jeweiligen Verkehrsstärke [Fz / h] kann einerseits die gefahrene freie Geschwindigkeit [km / h] ermittelt werden, andererseits ergibt sich so auch die jeweils vorhandene Dichte [Fz / km].

Die Beziehung zwischen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit, unter Berücksichtigung des Lkw-Anteils und der Anzahl an Fahrstreifen (FS), ist in Abbildung 14 graphisch dargestellt. Als Vergleichswert ist die auf österreichischen Autobahnen geltende Geschwindigkeitsgrenze eingetragen.

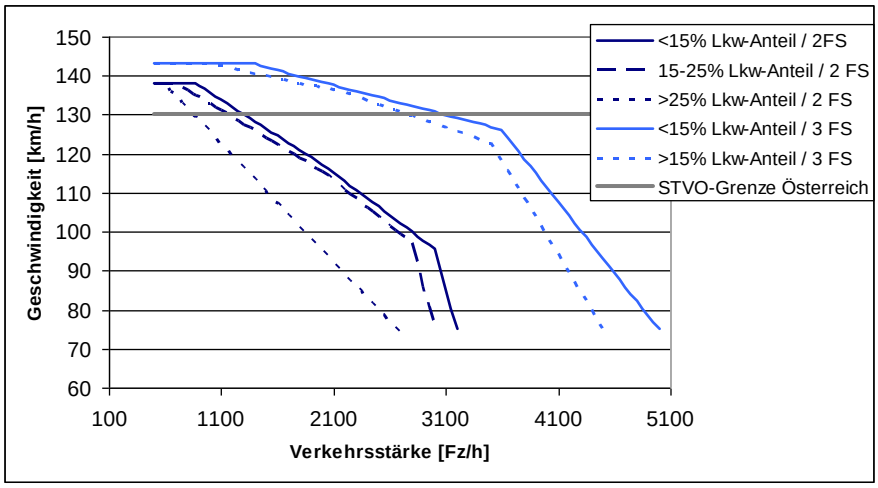


Abbildung 14: Geschwindigkeits-Verkehrsstärken Beziehung nach Stütze [8]

Auch in der EWS-97 [20] ist die Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke Q (in dem jeweiligen Zeitbereich und der jeweiligen Fahrzeugart), dem Straßentyp, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der Längsneigung sowie der Kurvigkeit angeführt. Über eine für jeden Straßentyp spezifische Beziehung kann nun unter Berücksichtigung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und der vorhandenen mittleren Längsneigung des betrachteten Abschnitts die auftretende Geschwindigkeit (V) berechnet werden (Einsetzen in den richtigen Straßentyp und Verkehrsbelastungsbereich, getrennt nach Fahrtrichtung). Ausgewählt ist diese Beziehung für drei Straßentypen in Abbildung 15 dargestellt.

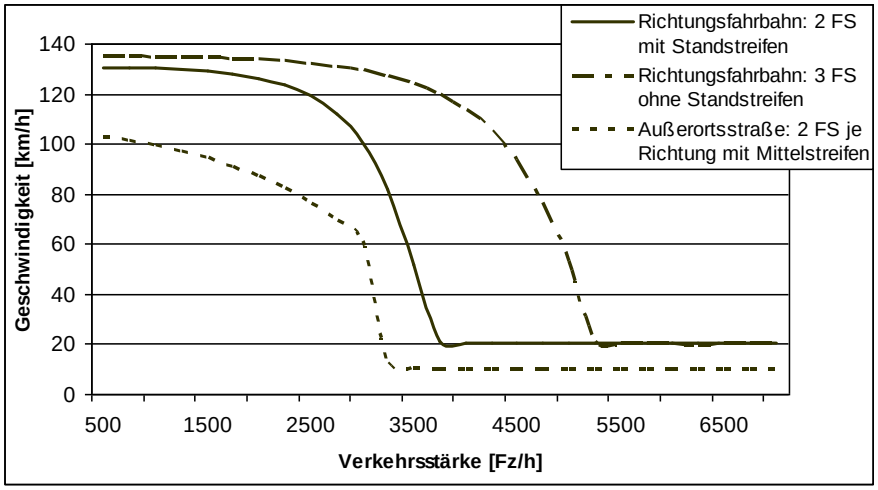


Abbildung 15: Beziehung zwischen Verkehrsstärke und Geschwindigkeit nach EWS-97 [20]

Aufgrund von Verkehrs- und Geschwindigkeitsbeobachtungen konnte für österreichische Autobahnen ebenfalls ein Geschwindigkeitsverlauf erstellt werden (Klementschitz [31]). Hierbei wurde nicht nach Fahrzeuggruppen unterschieden, sondern es erfolgte eine Modellierung getrennt nach Fahrstreifen. Weitere Berücksichtigung finden die Kurvigkeit der Strecke, die Längsneigung und der seitliche Abstand zu den Bauwerken.

Die Verteilung der Verkehrsbelastung auf der 2-streifigen Richtungsfahrbahn berücksichtigt, dass sich der Schwerverkehr vorwiegend auf dem rechten Fahrstreifen bewegt und die höheren Geschwindigkeiten auf dem linken Fahrstreiefen erreicht werden. Sie kann durch Regressionsrechnungen wie folgt beschrieben werden (Q in Pkw-E für die gesamte Richtung, ein Lkw entspricht 2 Pkw-Einheiten):

$$q_{re}[\%] = -0{,}59 \cdot 10^{-9} \cdot Q^3 + 0{,}825 + 10^{-5} \cdot Q^2 - 0{,}038 \cdot Q + 95 \qquad R^2=0{,}94$$

$$q_{li}[\%] = 100 - q_{re}$$

Gleichung 10

Für 3-streife Richtungsfahrbahnen ergibt sich der gleiche Zusammenhang zu:

$$q_{re}[\%] = 2{,}04 \cdot 10^{-6} \cdot Q^2 - 0{,}0169 \cdot Q + 58{,}2 \qquad R^2=0{,}77$$

$$q_{li}[\%] = -0{,}147 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 - 0{,}016 \cdot Q - 0{,}031 \qquad R^2=0{,}90$$

$$q_{mi}[\%] = 100 - q_{re} - q_{li}$$

Gleichung 11

Für die 4-streifige Richtungsfahrbahn steht ein vergleichbarer Zusammenhang zur Verfügung, siehe [31].

Fahrstreifenbezogen kann in der Folge ein Zusammenhang für die mittlere Geschwindigkeit auf 2 und 3-streifigen Richtungsfahrbahnen dargestellt werden:

$$v_m = \left[\frac{a_1}{e^{a_2 \cdot a_3^{\left(\frac{f_b \cdot Q}{a_4}\right)}}} + (8 - 8 \cdot e^{0{,}235 \cdot s}) \right] \cdot e^{-b \cdot KU} \cdot (b_2 - e^{-b_1 \cdot d_s})$$

Gleichung 12

Q [Pkw-E]	stündliche Verkehrsstärke auf der Richtungsfahrbahn
v_m [km/h]	mittlere Geschwindigkeit am Fahrstreifen
f_b	Abminderungsfaktor bei B<3,5: fb=1+0,325*(3,5-Fahrstreifenbreite)
s [%]	Längsneigung im Abschnitt (Gefälle negativ einzusetzen)
KU [Gon/km]	Kurvigkeit im Abschnitt
d_s [cm]	seitlicher Abstand der Fahrbahn zu festen Bauwerken

Die Parameter a und b können der Tabelle 15 entnommen werden.

Fahrstreifen		a1 [km/h]	a2	a3	a4 [Pkw-E/h]	b1 [km/Gon]	b2	b3 [1/cm]
2 FS	rechts	104,71	0,00267	77578	8752	0,00155	1,00	0,0568
	links	124,38	0,00563	40210	9124	0,00155	1,00	0,0568
3 FS	rechts	102,50	0,00334	43674	13801	0,00155	1,94	0,0345
	mitte	125,91	0,0153	52361	18234	0,00155	1,00	∞
	links	138,70	0,0144	45567	17345	0,00155	1,94	0,0345

Tabelle 15: Parameter zur Ermittlung der mittleren Geschwindigkeit [31]

Beispielhaft ist der Geschwindigkeitsverlauf mit veränderter Verkehrsstärke für eine zweistreifige, ebene Richtungsfahrbahn ohne Kurvigkeit in Abbildung 16 dargestellt.

Die geringere Geschwindigkeit auf dem rechten Fahrstreifen (FS) ergibt sich vorwiegend durch den höheren Lkw – Anteil auf diesem Fahrstreifen, sowie der geltenden Vorschrift des Rechtsfahr-Gebotes. Die Wirkung der geringeren zulässigen Geschwindigkeit für Lkw und des langsameren Pkw-Verkehrs auf dem rechten Fahrstreifen sind sowohl im Modell als auch für den Straßennutzer auf der Autobahn oder Schnellstraße deutlich zu erkennen.

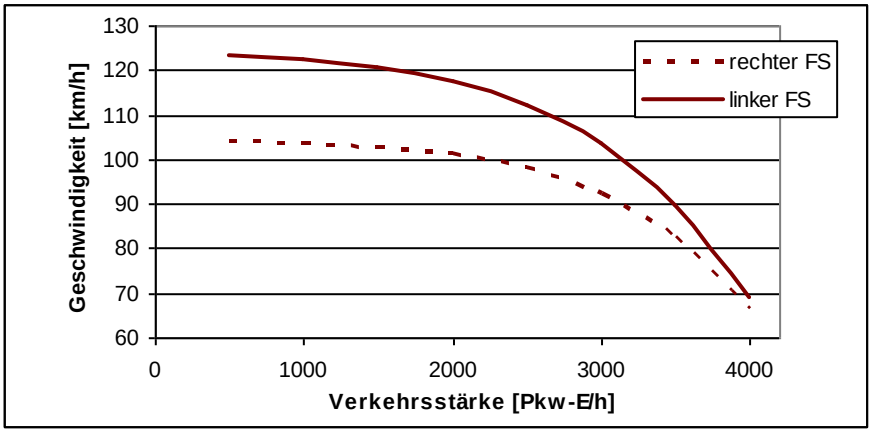


Abbildung 16: mittlere Geschwindigkeit auf einer 2-streifigen Richtungsfahrbahn, s=0%, KU=0 [31]

5.3.2. Resümee

Zum Vergleich der drei oben beschriebenen Methoden werden diese gemeinsam in Abbildung 17 dargestellt. Die Verkehrsstärken wurden zur besseren Vergleichbarkeit auf Pkw-Einheiten umgerechnet. Im Falle von Stütze wurde mit dem maximalen GV-Anteil von 15% gerechnet. Die Darstellung zeigt eine recht gute Übereinstimmung, wobei die Werte von Klementschitz relativ gering erscheinen. Niedrigere Werte auf dem rechten Fahrstreifen waren durchaus zu erwarten, jedoch der Wert auf dem linken Fahrstreifen erscheint ebenfalls niedrig.

Wie schon weiter oben erwähnt, können die Einflussparameter der Straßengeometrie (Längsneigung, Kurvigkeit, etc.) durch Erhaltungsmaßnahmen nicht maßgeblich verändert werden. Dennoch ist die frei gefahrene Geschwindigkeit eine zu berücksichtigende Größe, da sie als Referenzwert für die Berechnung von Kosten und Nutzen einer Maßnahme dient.

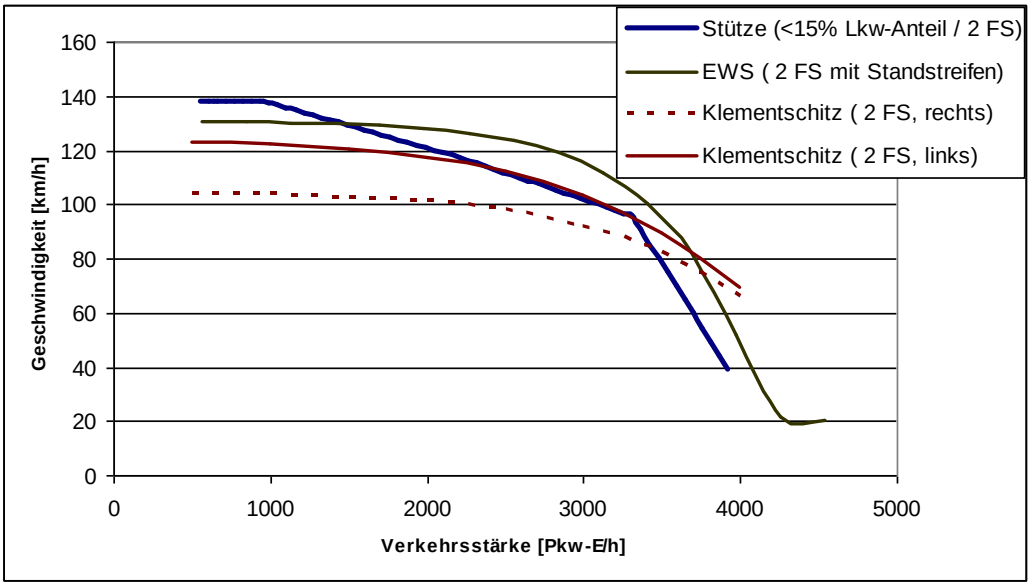


Abbildung 17: Vergleich der Geschwindigkeitsfunktionen

Es kann angenommen werden, dass aufgrund der geringeren Höchstgeschwindigkeit auf den österreichischen Autobahnen die für Deutschland entwickelten Zusammenhänge für die österreichische Anwendung zu hohe Werte ergeben. Weiters bietet der Ansatz von Klementschitz den Vorteil, dass die Geschwindigkeitsberechnung fahrstreifenspezifisch durchgeführt werden kann. Die Berechnung ermöglicht eine Unterscheidung in Bereiche mit 2

Fahrstreifen oder 3 Fahrstreifen. Die Auswertung von Daten österreichischer Autobahnen gewährleistet auch, dass das Model auf die österreichischen Verhältnisse abgestimmt ist.

Aufgrund dieser Vorteile wurde der Ansatz von Klementschitz [31] für die Weiterarbeit ausgewählt. Es muss jedoch auch darauf hingewiesen werden, dass die große Anzahl an Kalibrierungsparametern die Sicherheit des Ergebnisses beeinflusst.

5.4. repräsentative Fahrzeugflotte

Für die Fragen des Erhaltungsmanagements muss für manche Ansätze (Ermittlung des Treibstoffbedarfs im HDM) die Auswertung auf ein spezifisches Fahrzeug bezogen werden. Zur Abbildung der Verhältnisse in Österreich kann grundsätzlich zwischen zwei Ansätzen unterschieden werden.

Bildung einer repräsentativen Fahrzeugflotte: hierfür werden 2 oder mehrere Fahrzeuge ausgewählt, die mit ihren Eigenschaften und Kennwerten beispielhaft für die in Österreich verwendeten Fahrzeuge stehen.
Aus den Verkehrszählungen kann entnommen werden, dass der Sattelschlepper mit 40 t max. zul. Gewicht, einer Lenkachse, einer Antriebsachse und einer Dreifachachse als Lastachse das häufigste Güterfahrzeug auf den hochrangigen Straßen in Österreich darstellt. Auf der Seite der Pkw wird ein Mittelklassefahrzeug mit Benzinantrieb ausgewählt, da dieses im Vergleich zu dem Dieselfahrzeug einen höheren Verbrauch aufweist. Der Anteil der Benzinfahrzeuge ist erst in den letzten Jahren unter den Anteil der Dieselfahrzeuge gefallen.

Definition eines äquivalenten Fahrzeugs: in Abhängigkeit der Verteilung der zugelassenen Fahrzeuge kann anteilig aus den Eigenschaften der jeweiligen Fahrzeugart ein äquivalentes Fahrzeug generiert werden.

Die Verteilung der in Österreich zugelassen Fahrzeuge für das Jahr 2008 kann aus den Aufzeichnungen der Statistik Austria ([47], siehe Tabelle 16 und Abbildung 18) entnommen werden. Der Anteil der benzinbetriebenen Personenkraftwagen liegt seit 2005 unter dem Anteil der dieselbetriebenen.

Für eine grobe Abschätzung des Treibstoffbedarfs für Pkw können die Ansätze von Choi [48] angeführt werden. Dieser setzt für benzinbetriebene Fahrzeuge einen durchschnittlichen Verbrauch von 7,9 l/100 km und für dieselbetriebene Fahrzeuge einen durchschnittlichen Verbrauch von 7,0 l/100 km an. Zur Generierung eines Gesamtverbrauchs muss das jeweilige Fahrzeugkollektiv bekannt sein.

Fahrzeugart	Anteil	Anzahl Fz	Betriebsmittel	Anteil	Anzahl Fz.	Verbrauch
Personenkraftwagen	73,0 %	4.284.919	Benzin	45,7 %	1.957.751	7,9 l/100km
			Diesel	54,3 %	2.323.016	7,0 l/100km
Motorräder	11,8 %	691.243				
Lastkraftwagen	6,3 %	372.358				7,0 l/100km
Zugmaschine	7,5 %	441.747				7,0 l/100km
sonstige Kfz	1,4 %	83.014				
GESAMT	100 %	5.873.281				

Tabelle 16: Verteilung der Fahrzeugbestandes in Österreich 2008 [47]

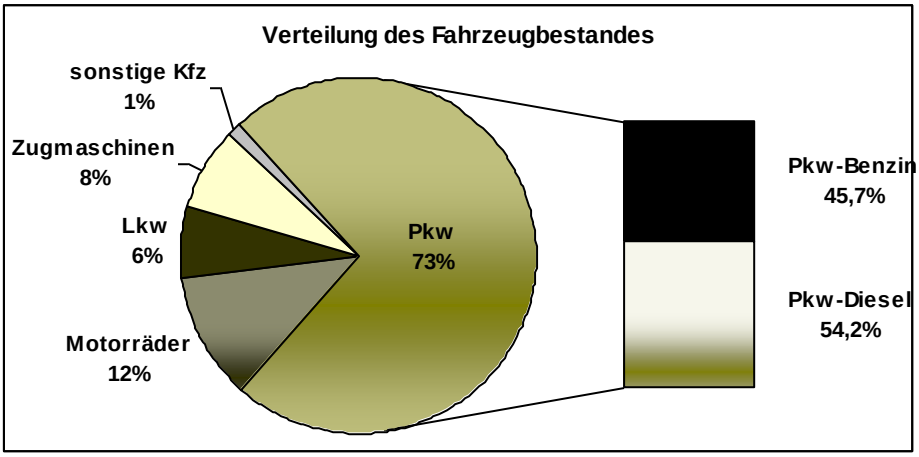


Abbildung 18: Darstellung der Verteilung des Fahrzeugbestandes nach [47]

Die Auswahl der ersten oder zweiten Methode muss je nach Anwendung entschieden werden. So verlangt die Anwendung von Elementen des HDM eine repräsentative Fahrzeugflotte (hierbei ist eine Auftrennung in bis zu 16 Fahrzeugarten möglich), für die Erhaltungsplanung auf Netzebene ist eine so genaue Betrachtung jedoch nicht notwendig. Zur Anwendung kommt die repräsentative Fahrzeugflotte im Bereich des Betriebsmittelbedarfs, da hier durch die unterschiedlichen Fahrzeuge auch unterschiedliche Anforderungen auftreten.

Die Angabe der Verkehrstärke erfolgt je nach Zielsetzung der Studie durch die Anzahl der Fahrzeuge je Stunde oder Pkw-Einheiten je Stunde. Die Umrechnung von Einzelfahrzeugen in Pkw-Einheiten ist der RVS 03.05.11–Planungsgrundsätze [18] zu entnehmen und in Tabelle 17 dargestellt. Falls die Verkehrszusammensetzung nicht bekannt ist, kann mit einem Näherungswert von 1,1 Pkw-Einheiten je Fahrzeug gerechnet werden.

Fahrzeug	Pkw-Einheiten
1 Fahrrad	0,5
1 einspuriges Kfz	1,0
1 Pkw	1,0
1 Lkw, Bus oder Traktor	1,5
1 Lkw mit Anhänger, Sattelschlepper, Gelenkbus oder Traktor mit Anhänger	2,0

Tabelle 17: Umrechnung in Pkw-Einheiten [18]

Für die Bestimmung von Kapazitäten und Überlastungen erfolgt die Umrechung des Schwerverkehrs in Pkw-Einheiten in Abhängigkeit der Längsneigung und der Länge dieses Steigung- und Gefälleabschnitts. Die genaue Berechnung ist Kapitel 5.2.1 zu entnehmen.

6. ZUSTANDSBEZOGENE NUTZERKOSTEN

Die zustandsbezogenen Straßennutzerkosten fassen alle Kosten zusammen, die sich durch den tatsächlichen Straßenzustand und die vorhandene Verkehrsbelastung für die Nutzer ergeben. Die maßgebenden Kosten sind jene, die durch eine Verschlechterung des Straßenzustands (ohne Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen) zu tragen kommen. Sie ergeben sich in den Bereichen der Fahrzeugbetriebskosten, der Unfallkosten und der zusätzlichen Zeitkosten.

Vergleichbar werden die unterschiedlichen Wirkungen durch deren Bewertung mit einem Kostensatz, der von der jeweiligen volkswirtschaftlichen Auswirkung abhängig ist. Dies ermöglicht in weiterer Folge die Bildung von Gesamtkosten als Summe der einzelnen Kostenelemente, die als Kriterium in einen Maßnahmen-Optimierungsprozess einfließen können.

6.1. Zustandsentwicklung / Zustandsprognose

Die im Weiteren dargestellten Zustandsgrößen werden im Sinne des Erhaltungsmanagements nicht als konstante Werte angesehen, sondern sie sind einer kontinuierlichen zeitabhängigen Veränderung unterlegen. Diese Zusammenhänge können aus dem bestehenden PMS übernommen werden und sind hier nur kurz angeführt. Der Analysezeitraum wird durch die Aufgabenstellung definiert, für Lebenszyklusbetrachtungen wird von mindestens 20 Jahren ausgegangen, er kann aber je nach Fragestellung individuell angepasst werden.

Die Beschreibung des Straßenzustands erfolgt mit Hilfe von Zustandsmerkmalen, die verschiedene Eigenschaften der Straßenoberfläche abbilden. Bei regelmäßigen Zustandserfassungen wird die Größe dieser Zustandsmerkmale mittels visueller oder messtechnischer Zustandserfassung aufgenommen. Es werden hierbei die Merkmale Griffigkeit, Spurrinnen, Längsebenheit, Oberflächenschäden und Risse betrachtet. Die derzeit aufgenommenen Zustandsgrößen sind:

- der Reibungsbeiwert μ
- das tatsächliche Querprofil und die daraus ermittelte Spurrinnentiefe t_s und theoretische Wasserfilmtiefe t_w
- das Längsprofil in der rechten Radspur und der daraus ermittelte International Roughness Index (IRI)
- das Schadensausmaß und die Schadensschwere der Oberflächenschäden und Risse.

Je nach Bedeutung der Strecke werden diese Informationen nur auf einem Fahrstreifen aufgenommen und dieser Wert ist maßgebend für die gesamte Fahrbahnbreite oder es erfolgt eine fahrstreifenspezifische Untersuchung. Die zeitliche Veränderung des Straßenzustands wird mittels deterministischer Straßenzustandsprognosemodelle simuliert. Diese beschreiben die Veränderung des Straßenzustandes über einen funktionellen Zusammenhang (Verhaltensfunktionen) zwischen der Zustandsgröße (abhängige Variable) und den verschiedenen Einflussgrößen (erklärende Variablen), wovon mindestens eine Größe eine Zeitabhängigkeit aufweisen muss [1]. Die Prognosemodelle wurden mittels Regressionsrechnung entwickelt und werden jeweils durch aktuelle Daten kalibriert. Ein Beispiel einer Verhaltensfunktion ist in Abbildung 19 dargestellt, hierbei erfolgt eine Unterscheidung der Funktionen nach der Lastklasse für die der Streckenabschnitt dimensioniert wurde. Wenn erforderlich (zum Beispiel bei Oberflächenschäden und Längsebenheit), wurden unterschiedliche Zusammenhänge für Asphalt- und Betonbefestigungen entwickelt.

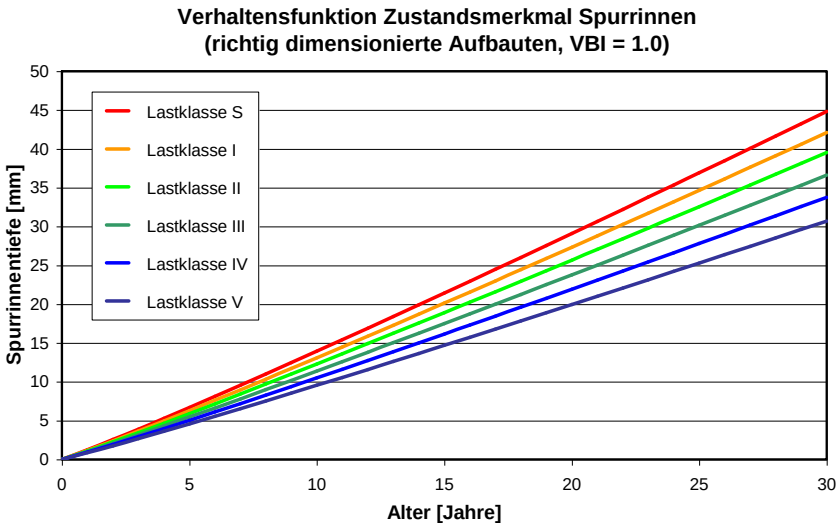


Abbildung 19: Verhaltensfunktion für Spurrinnen [1]

Diese Prognosemodelle sind für alle Zustandsgrößen implementiert, sie können aber durch aktuelle Zustandsdaten verbessert und erweitert werden.

6.2. Zusätzliche Zeitkosten

6.2.1. Einfluss des Straßenzustands auf die Geschwindigkeit

Der Zustand der Straße, beziehungsweise der Fahrbahnoberfläche, kann direkt auf die Geschwindigkeit der darüber fahrenden Fahrzeuge wirken. Die gewählte Indikatorgröße ist je nach Modell unterschiedlich. Im HDM-4 [16] wird als Bezugsgröße die Längsebenheit / Rauheit gewählt, bei Boesefeldt der Zustand der Fahrbahnoberfläche (eben / uneben / Schlaglöcher; [2]) und Schmuck [19] greift auf den Zusammenhang zwischen Befahrbarkeitsbeiwert p und Geschwindigkeit zurück. Auf diese Basis können Methoden zur Berücksichtigung der zeitlichen Veränderung eines Zustandwertes aufgesetzt und damit die zeitliche Veränderung der Nutzerkosten berechnet werden.

6.2.1.1. Längsebenheit und Textur im HDM-4 Modell

Die Berechnung der Geschwindigkeit im HDM-4 beruht vorrangig auf fahrzeugbezogenen und streckenbezogenen Kriterien. Die Geschwindigkeitsberechnung für die freie Strecke erfolgt mit dem free-speed-model, das auf der Weihbull Verteilung basiert und die Einflussgrößen des Fahrzeugs und der Straße berücksichtigt. Die Einflussgrößen werden durch die folgenden Parameter quantifiziert:

- Beschleunigungsparameter V_{DRIVE}
- Bremsparameter V_{BRAKE}
- Wunschgeschwindigkeit V_{DESIR}
- Kurvigkeit V_{CURVE}
- Längsebenheit V_{ROUGH}

Das probabilistische Modell der Geschwindigkeitsverteilung für die freie Geschwindigkeit VS kann wie folgt angesetzt werden und wird für jede Fahrzeuggruppe (FG) getrennt ermittelt [16].

$$VS_{FG} = \frac{e^{\left(\frac{\sigma^2}{2}\right)}}{\left[\left(\frac{1}{V_{DRIVE}}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{V_{BRAKE}}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{V_{CURVE}}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{V_{ROUGH}}\right)^{\frac{1}{\beta}} + \left(\frac{1}{V_{DESIR}}\right)^{\frac{1}{\beta}}\right]^{\beta}}$$ Gleichung 13

σ, β ... Weihbull-Parameter zur Beschreibung der Verteilung

Für die Anwendung kann aber vereinfacht das Minimum der Geschwindigkeiten von V_{DRIVE}, V_{ROUGH} und V_{DESIR} als tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit angesetzt werden.

$$VS_{FG} = \min(V_{DRIVE}, V_{ROUGH}, V_{DESIR})$$ Gleichung 14

Die Einzelwerte lassen sich wie folgt bestimmen (die jeweils berechneten Geschwindigkeitsgrößen besitzen die Einheit m / s):

$$V_{DRIVE}^3 \cdot Z_0 + V_{DRIVE} \cdot CR2 = 1000 \cdot Pd$$ Gleichung 15

Z_0 ..... Parameter zur Berücksichtigung der Fahrzeugeigenschaften
(Annahme für Pkw: Z_0=0,6923+0,0027*Texturtiefe+0,0133*IRI)
(Annahme für Lkw: Z_0=6,1068+0,0102*Texturtiefe+0,0102*IRI+0,3413*Defl. Benkelmann)

CR2 ..... Parameter berücksichtigt unter anderem Längsebenheit und Textur
(Annahme für Pkw: CR2=0,5+0,02*Texturtiefe+0,1*IRI)
(Annahme für Lkw: CR2=0,57+0,04*Texturtiefe+0,04*IRI+1,34*Defl. Benkelmann)

Pd ..... Motorleistung je Fahrzeugkategorie (Annahme Pkw 33 kW, Lkw 227 kW)

$$V_{ROUGH} = \frac{ARVMAX}{V_{ROUGH_a0} \cdot IRI}$$ Gleichung 16

ARVMAX ... Maximalwert der mittleren kummulierten Geschwindigkeit [mm/s]
(Annahme: Pkw 203 mm/s; Lkw 160 mm/s)

V_{ROUGH_a0} .... Regressionsparameter für Asphalt 1,15

IRI ..... Längsebenheit [mm/m]

$$V_{DESIR} = MIN\left[V_{DESIR0}; \frac{P_{LIMIT} \cdot ENFAC}{3{,}6}\right]$$ Gleichung 17

$$V_{DESIR0} = V_{DES} \cdot X_{FRI} \cdot X_{NMT} \cdot V_{DESMUL}$$ Gleichung 18

P_{LIMIT} ..... vorgeschriebenes Geschwindigkeitslimit [km/h]

ENFAC ..... Zwangsfaktor (Annahme: 1)

V_{DES} ..... Wunschgeschwindigkeit abhängig von Fahrstreifenbreite [m/s]

X_{FRI} ..... Faktor optische Einengung (Annahme: 1)

X_{NMT} ..... Faktor nicht motorisierter Verkehr (Annahme: 1)

V_{DESMUL} ..... für 2-streifige Strecken: 1, 3-streifige Bereiche: 1,3

Die gefahrene Geschwindigkeit wird - außer durch den Straßenzustand - auch durch fahrzeuggebundene Einflussfaktoren bestimmt, wie die Motor- und Bremsleistung der

Fahrzeugflotte und durch Einflussfaktoren, die sich auf die Linienführung der Straße beziehen (Kurvigkeit und Längsneigung / Steigung). Diese Faktoren werden durch den Straßenzustand jedoch nicht verändert und sind daher in Zusammenhang mit dem Erhaltungsmanagement nicht relevant.

In Abbildung 20 ist die Veränderung der Geschwindigkeit (dargestellt in km / h] unter Anwendung der oben dargestellten Zusammenhänge für einen Pkw in Abhängigkeit der Längsebenheit (berücksichtigt durch den IRI), unter Vernachlässigung der Textur dargestellt. Für den Einsatz in Österreich ist zu berücksichtigen, dass IRI-Werte über 4,5 bei der Bewertung im Rahmen des Pavement Managements (auf Grundlage der RVS 13.01.15 [18]) von Autobahnen und Schnellstraßen in die Zustandsklasse 5 (sehr schlecht) fallen. Werte schlechter als 6 sind nur in Einzelfällen anzutreffen. Somit stellt sich auch der zustandsbedingte Einfluss auf die Pkw-Geschwindigkeit als sehr gering dar. Für Lkws kann aufgrund der Längsebenheit auf dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz kein Einfluss auf die Geschwindigkeit festgestellt werden, die zulässige Geschwindigkeit von 80 km / h liegt stets unter der zustandsbedingten (vgl. Abbildung 21).

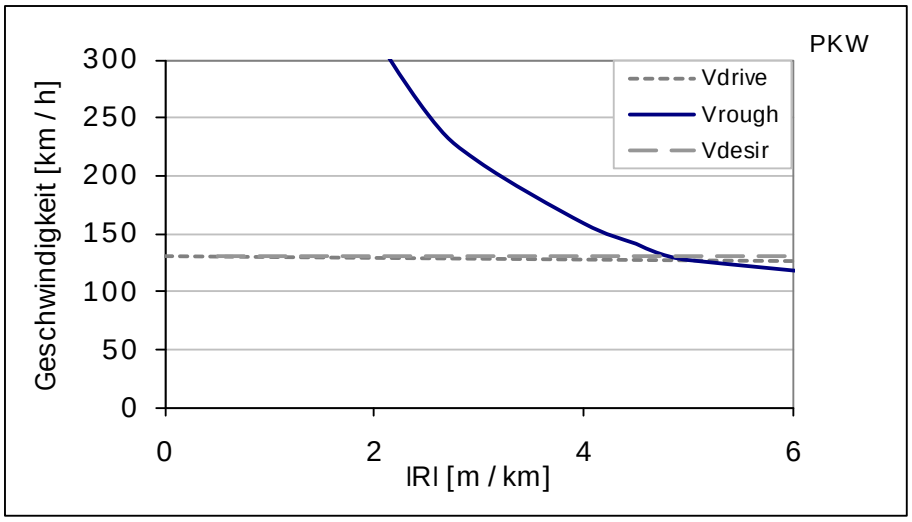


Abbildung 20: Ergebnis aus HDM-4 (unter Vernachlässigung der Texturtiefe) für Pkw nach [16]

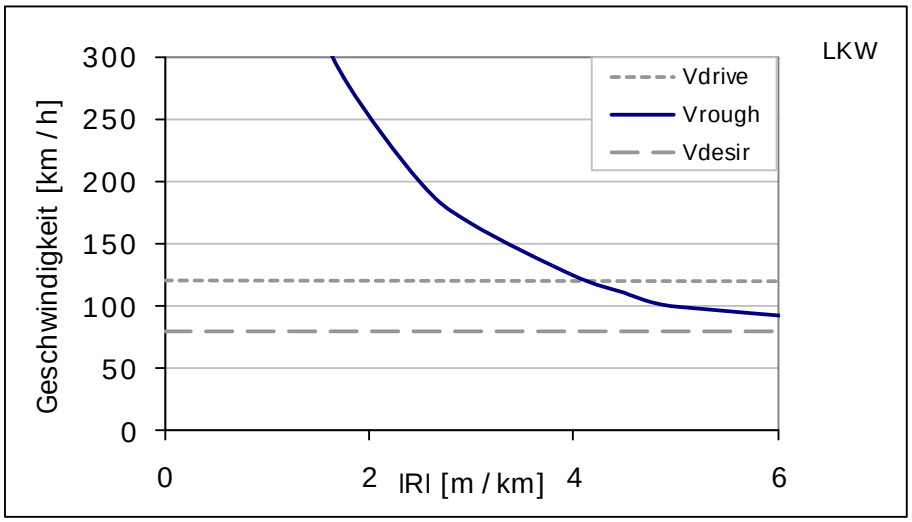


Abbildung 21: Ergebnis aus HDM-4 (unter Vernachlässigung der Texturtiefe) für Lkw nach [16]

6.2.1.2. Befahrbarkeitsindex

Der Befahrbarkeitsindex PSI (Present Serviceability Index) wurde mit Hilfe von Befahrbarkeitsuntersuchungen im Zuge des AASHO-Tests entwickelt. Hierfür wurden

verschiedene Streckenabschnitte von Testpersonen befahren und beurteilt. Anschließend konnten diese Ergebnisse mit den Zustandsgrößen der Straßen in Zusammenhang gebracht werden. Die Beziehung zwischen diesem Komfortwert und der jeweils gefahrenen Geschwindigkeit ist dem Diagramm in Abbildung 22 zu entnehmen.

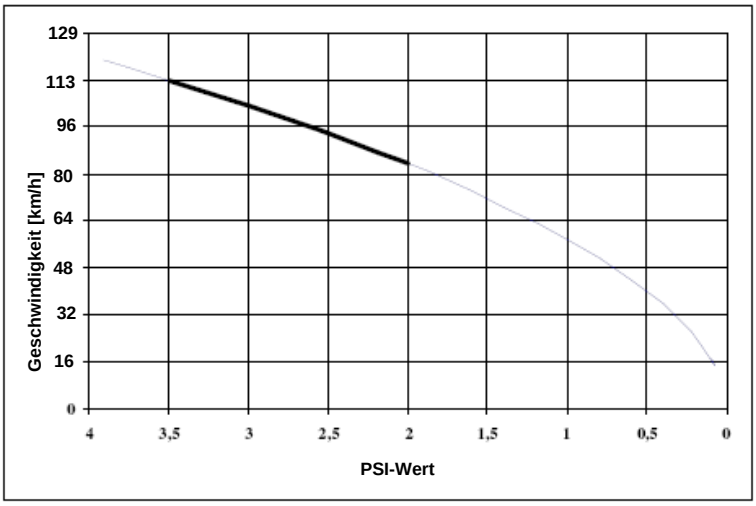


Abbildung 22: Present Serviceability Index PSI und Geschwindigkeit [100]

Aus diesem Zusammenhang wurde des weiteren die mittlere Geschwindigkeit VM für Pkw und Lkw auf Basis des in Deutschland verwendeten AUN ($\Phi_h(\Omega_0)$) Wertes hergeleitet. Der AUN ist eine Kenngröße zur Beschreibung der Längsebenheit, die aus dem Spektrum der vorhandenen Wellenlängen in Längsrichtung abgeleitet werden kann (aufgenommen wird hierfür das tatsächlich vorhandene Längsprofil des Abschnitts in der rechten Radspur).

Der folgende funktionale Zusammenhang ist gültig für Autobahnen mit einer Breite von 7,5 m je Richtung [100]. Die Herleitung der Gleichung erfolgte mit Hilfe einer Korrelationsanalyse.

$$VM_{Pkw} = -0{,}33 \cdot [(\Phi_h(\Omega_0) + 9{,}601) / 6{,}71 - 1{,}43]^{2{,}13} + 97 \quad [km/h]$$

$$VM_{Lkw} = -0{,}58 \cdot [(\Phi_h(\Omega_0) + 9{,}601) / 6{,}71 - 1{,}43]^{1{,}85} + 80 \quad [km/h]$$

Gleichung 19

Eine eindeutige Zuordnung der IRI Werte zum AUN ist zur Zeit nicht möglich, daher kann für österreichische Daten entweder aus dem tatsächlich aufgenommenen Profil der AUN ermittelt oder eine grobe Abschätzung über eine Verknüpfung der Ebenheitsklassen erreicht werden.

6.2.1.3. Theoretische Wasserfilmtiefe

Ebenso wie die Ebenheit in Längsrichtung haben Spurrinnen (Unebenheiten in Querrichtung) eine Auswirkung auf die gefahrene Geschwindigkeit. Dies kann durch den Zusammenhang der theoretischen Wasserfilmtiefe (t_w), als Resultat der gemessenen Spurrinnentiefe und Fahrbahnquerneigung, und der gefahrenen Geschwindigkeit dargestellt werden. Grundlage hierfür sind die Ergebnisse einer Simulationsuntersuchung, die von Gnadler [49] Ende der 90er Jahre in Deutschland durchgeführt wurden.

Die Kenngröße der theoretischen Wasserfilmtiefe berücksichtigt den Sachverhalt, dass sich bei Niederschlag ein Wasserfilm in der Spurrinne bildet und dadurch die Aquaplaninggefahr erhöht wird. Die Gefahr ist optisch erkennbar und bewirkt eine Anpassung der Geschwindigkeit durch den Fahrer. Dies kann wie folgt beschrieben werden:

$$V_{red} = 0{,}933^{tw - 75{,}2} \quad [km/h] \qquad \text{für tw} > (75{,}2 - (\ln V_{zul} / \ln 0{,}0933)) \quad [mm]$$

Gleichung 20

Die so berechnete reduzierte Geschwindigkeit ist jedoch nur für Pkw anzuwenden, da für Lkw die fiktive Wasserfilmtiefe keinen Einfluss auf die Geschwindigkeit aufweist.

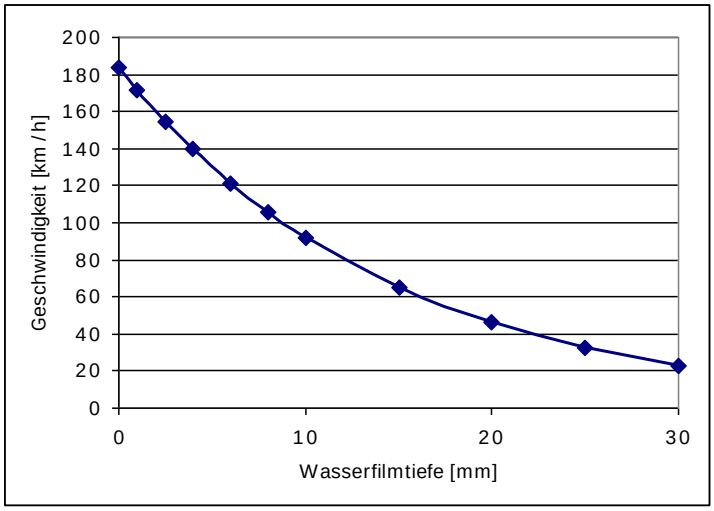


Abbildung 23: Geschwindigkeitsreduzierung in Abhängigkeit der theoretischen Wassertiefe nach [49]

Die theoretische Wasserfilmtiefe wird auch bei der Zustandserfassung auf dem österreichischen A + S Netz erfasst, sie ist jedoch bis jetzt keine Eingangsgröße für die Erhaltungsplanung.

Die Wasserfilmtiefen auf dem hochrangigen Netz fallen nach der Bewertung der RVS 13.01.15 [18] ab einer Höhe von 6 mm in die Klasse fünf (sehr schlecht). Dies entspricht nach dem in Abbildung 23 dargestellten Zusammenhang einer reduzierten Geschwindigkeit von 115 km / h.

6.2.1.4. Griffigkeit

Die Griffigkeit eines Straßenabschnitts ist für den Straßennutzer optisch nicht erkennbar und zu geringe Werte machen sich erst in Extremsituationen, wie durch längere Bremswege oder schlechte Kraftübertragung im Kurvenbereich, bemerkbar. So ist es dem Fahrzeuglenker nicht möglich, seine Geschwindigkeit an das Griffigkeitsniveau anzupassen und eine dementsprechende Geschwindigkeitsbegrenzung muss vom Straßenerhalter durch Signalisierung (Tafeln,...) erwirkt werden. Diese Aussage kann durch die Arbeit von Wallman und Astrom [50] bestätigt werden.

6.2.1.5. Resümee

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Reduktion der Geschwindigkeit und somit die Zeitverluste durch einen schlechten Straßenzustand gering ausfallen. Ausgehend von den in Österreich aufgenommenen Zustandsmerkmalen können die zusätzlichen Zeitkosten am besten über die Zustandsgröße Längsebenheit oder die theoretische Wasserfilmtiefe erfolgen. Die reduzierte Geschwindigkeit durch den Einfluss der Wasserfilmtiefe muss mit jener aus der Längsebenheit verglichen werden. Die geringere der beiden Geschwindigkeiten kann als maßgebende betrachtet werden.

Unter Kenntnis einer Vielzahl von Parametern und Einflussfakten kann die Wirkung des Straßenzustands auf die Geschwindigkeit mit dem Modell des HDM sehr umfassend berücksichtigt werden. Jedoch sollte hier der Aufwand in Vergleich mit dem erzielbaren Ergebnis (sehr geringe Zeitverluste) gesehen werden.

Die so ermittelten Geschwindigkeiten können für die Beurteilung eines sehr schlechten Straßenabschnitts oder eines Abschnitte in einem untergeordneten Netz von Bedeutung sein. In Tabelle 18 sind nochmals die Grenzgeschwindigkeiten an den Übergängen der Beurteilungsklassen des Autobahnen- und Schnellstraßennetzes gemäß RVS 13.01.15 [18] dargestellt. Hierbei steht die Klasse 1 für einen sehr guten und die Klasse 5 für einen sehr schlechten Zustand. Dabei zeigt sich, dass auf der Grundlage der österreichischen Zustandsklassifizierung für die Geschwindigkeit entweder die theoretische Wasserfilmtiefe oder die Längsebenheit maßgebend ist. Fällt die Längsebenheit auf einen geringeren Wert, sinkt auch v_{rough} sehr schnell ab.

Grenze zw. Klasse	IRI [m / km]	v_{drive}(IRI)Pkw [km / h]	v_{rough}(IRI)Pkw [km / h]	v_{drive}(IRI)Lkw [km / h]	v_{rough}(IRI)Lkw [km / h]	Wasserfilmt [mm]	v(tw) Pkw [km / h]
1-2	1	640	130	500	120	1	172
3-4	3	211	128	143	120	4	139
5	4,5	141	127	111	120	6	121

Tabelle 18: zustandsbedingte Geschwindigkeiten auf Autobahnen und Schnellstraßen

Die Möglichkeit der Verwendung beider Ansätze besteht jedoch erst, wenn auch beide Eingangsgrößen in der Datenbank vorgehalten werden. Solange dies nicht der Fall ist, wird die zustandsbedingte Geschwindigkeit aufgrund der Längsebenheit (v_{drive} und v_{rough}) bestimmt.

6.2.2. Berechnung des zusätzlichen Zeitbedarfs

Der zusätzliche Zeitbedarf ergibt sich aus der Differenz der zustandsbedingten Geschwindigkeit auf einer Strecke mit beziehungsweise ohne Erhaltungsmaßnahme (Null-Variante). Der zusätzliche Zeitbedarf, der ohne Maßnahme aufgewandt werden muss, ergibt sich in dem betrachteten Abschnitt l_0 zu Δt für jedes Fahrzeug.

$$\Delta t = l_0 / \Delta V \qquad \text{Gleichung 21}$$

l_0 ... Länge der betrachteten Strecke [km]

ΔV ... Differenz der Geschwindigkeiten [km/h]

Für einen Vergleich von Maßnahmen muss dieser zusätzliche Zeitbedarf über alle betroffenen Fahrzeuge und den betroffenen Zeitraum aufsummiert werden.

6.2.3. Zeitkosten

Die zusätzlichen Zeitkosten aufgrund eines schlechten Straßenzustands ergeben sich aus dem zusätzlichen Zeitbedarf je Fahrzeug multipliziert mit der Anzahl der betroffenen Fahrzeuge und dem jeweiligen Zeitkostensatz. Hier kann sowohl für den zusätzlichen Zeitbedarf als auch für den Zeitkostensatz eine Unterscheidung in Pkw und Lkw (bzw. Personenverkehr und Güterverkehr) getroffen werden.

Ebenso kann für einen Streckenabschnitt der absolute Zeitbedarf bewertet werden. In diesem Falle ist statt des zusätzlichen Zeitbedarfs der tatsächliche Zeitaufwand für das Durchfahren der Strecke einzusetzen. Dies gilt sinngemäß für den deutschen Ansatz, hierbei wird die Geschwindigkeitsdifferenz durch die tatsächlich vorhandene Geschwindigkeit ersetzt.

Auch in der RVS 03.08.71 [18] hat dieser Ansatz Einzug gefunden, es finden jedoch nur die Lastfahrzeuge Berücksichtigung. Die Kosten (ZK) ergeben sich zu:

$$ZK = \Delta t * JDTLV * ZKS$$ Gleichung 22

Δt … zusätzlicher Zeitbedarf [h]

JDTLV … Jährlich durchschnittlicher täglicher Lastverkehr [Lkw/24h]

ZKS … Zeitkostensatz [€/h]

ZK … Zeitkosten [€/24h]

In Deutschland wird eine Unterteilung in Fahrzeuggruppen FZ und Verkehrsstundengruppen t getroffen, die gesamten Zeitkosten ergeben sich als Summation wie folgt:

$$ZK = \sum_{t}\sum_{FZ}\left(\frac{Q}{V_1} - \frac{Q}{V_2}\right)_{t,FZ} \cdot T_t \cdot LG \cdot WT_{FZ}$$ Gleichung 23

Q … Verkehrsstärke [Kfz/h]

V_1, V_2 … Geschwindigkeit bei Zustand 1 bzw. Zustand 2 [km/h]

T … Dauer mit gleichem Q [h]

LG … Länge des betrachteten Abschnitts [km]

WT_{FZ} … Zeitkostensatz je Fahrzeuggruppe [€/h]

Die Werte der einzelnen Fahrzeuggruppen werden mit dem jeweiligen Kostensatz multipliziert und aufsummiert. Dieser Ansatz lässt sich auch schon bei Schmuck [19] finden und stellt eine etwas differenziertere Berechnung als in Österreich dar.

6.2.3.1. Kostensätze

Als Zeitkostensatz wird der ökonomische Wert der alternativen Verwendung einer Stunde Fahrzeit angesetzt. Damit kann der „Schaden", der dadurch entsteht, dass die Zeit, die zusätzlich zur Überwindung eines Weges benötigt wird, nicht produktiv genutzt werden kann, monetär bewertet werden. Bei der Ermittlung der Zeitkostenansätze können subjektive Momente nie ganz ausgeschlossen werden, da Zeit an sich keinen originären Wert besitzt und somit auch keinen Preis hat [51].

Hieraus ergibt sich auch das Problem der Quantifizierung, da je nach Fahrtzweck die Höhe des entstehenden „Schadens" stark variiert. Teilweise wird in der Literatur dazu übergegangen, Personenkraftwagen nicht zu berücksichtigen, da diesen unterstellt wird, nur privat unterwegs zu sein und die Messung eines geschäftlichen Anteils bei Pkw-Fahrten nicht ganz einfach ist.

Die Gewinnung von Zeitkostensätzen kann auf makroökonomischen oder mikroökonomischen Überlegungen basieren. Erstere zerlegen gewissermaßen gesamtwirtschaftliche Daten wie beispielsweise das BIP und brechen es hinunter auf Zeitkostensätze, hingegen entwickeln sich mikroökonomische Ansätze von unten herauf, über die Zahlungsbereitschaft („willingness to pay") der Bevölkerung, die mit Hilfe von Befragungen festgelegt werden kann. Hierbei kann beispielspielsweise der Zeitkostensatz für den Privatverkehr gleichgesetzt werden mit dem Betrag, den ein Reisender für eine verkürzte Reisezeit bezahlen würde. Bei Befragungen in den USA wurde dieser Betrag für Freizeitverkehr mit 50% eines durchschnittlichen Stundenlohnes [€/h] angegeben [26].

In der österreichischen Richtlinie RVS 02.01.22 [18] aus dem Jahre 2002 wird der Zeitkostensatz als ökonomischer Wert der alternativen Verwendung einer Stunde Fahrzeit definiert, die genauen Sätze sind in Tabelle 19 ersichtlich. Diese Sätze sind derzeit in Diskussion und im Zuge der Überarbeitung der RVS wird dem Faktor Zeit ein höherer Wert

zuerkannt und auf den Preisstand 2009 bezogen. Die Vorarbeiten zur Entwicklung der Zeitkostensätze können Nagl [60] und Cerwenka [58] entnommen werden.

Fahrtzweck		Zeitkostensatz [€]	
		aktuelle Sätze	Überarbeitung - Entwurf
Personenverkehr	geschäftlich	8,50 €/Pers.h	30,00 €/Pers.h
	privat	1,53 €/Pers.h	11,00 €/Pers.h (Berufspendelverkehr)
			8,00 €/Pers.h (Ausbildungs-, Freizeitverkehr)
Güterverkehr	Lkw	21,08 €/Kfz.h	3,79 €/Nutzlasttonnen.h
	Lkw-Zug	30,52 €/Kfz.h	3,79 €/Nutzlasttonnen.h

Tabelle 19: Zeitkostensätze aus den österreichischen Richtlinien (RVS 02.01.22 [18])

Für die Ermittlung der gesamten Zeitkosten muss auch eine Festlegung bezüglich des Besetzungsgrades für den Personenverkehr getroffen werden. Diese Werte beziehen sich, im Gegensatz zum Güterverkehr, auf Personenstunden. Der durchschnittliche Zeitverlust kann mit der Gesamtzahl der betroffenen Personen multipliziert werden und man erhält den gesamten Zeitverlust. In Österreich liegt der Besetzungsgrad werktags im Mittel bei 1,3 Personen je Pkw, im Wochenendverkehr erhöht sich dieser auf 1,7 Personen je Pkw [52]. Der Unfallkostenrechnung [71] kann ein Besetzungsgrad für das Jahr 2006 für Pkw von 1,39 und für Busse von 20 entnommen werden.

Auch in Deutschland finden sich schon in der RAS-W (Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen) Kostensätze für Zeitverluste, Kraftstoffverbrauch und Schadstoffausstoß. Aktualisierte Werte finden sich in den EWS [20], diese sind in Tabelle 20 dargestellt. Sie beinhalten für alle gewerblichen Fahrzeuge Lohn- und Vorhaltekosten und für die Pkw und Busse die Zeitkosten der Passagiere.

Fahrzeuggruppe		Zeitkostensatz
P (Pkw)	normal und urlaubswerktags	5,60 €/Kfz.h
P (Pkw)	sonntags	2,80 €/Kfz.h
L (Lkw)	normal und urlaubswerktags	21,37 €/Kfz.h
Z (Lastzug)	normal und urlaubswerktags	30,52 €/Kfz.h
B (Bus)	normal, urlaubwerktags u. sonntags	63,59 €/Kfz.h

Tabelle 20: Zeitkostensätze aus der deutschen EWS 97 [20]

In dem französischen "Boiteux Report" [53] finden sich Ansätze, die auch auf die Fahrtweite Bezug nehmen. Der Wert einer Stunde im Bereich eines innerstädtischen Weges (bis 50km) wird pro Person mit 8,4 € angesetzt, für eine Weglänge von 400 km mit 13,7 €; dazwischen kann interpoliert werden. Diese Kosten sind durch Multiplikation mit dem Besetzungsgrad auf Werte je Fahrzeugstunde zu bringen und dem jeweiligen Jahr anzupassen (Basisdaten für 1998). Für den Güterverkehr wird je nach Wert der Ware unterschieden, zusätzliche Mehrkosten für den Fahrer sind mit 31 €/h anzusetzen.

Beispiele für Kostensätze des US. Department of Transportation [54] sowie die maßgebenden Sätze des Boiteux reports finden sich in Tabelle 21.

Quelle	Fahrzeuggruppe	Kostensatz
US Dep. Transportation [54]	passenger cars	7,00-9,10 €/Kfz.h
	Trucks (single unit)	11,90-14,00 €/Kfz.h
	Trucks (combination)	14,70-16,80 €/Kfz.h
Boiteux Report [53]	innerstädtisch	8,4 €/Person
	Freilandstrecke	13,7 €/Person
	Güterverkehr –geringer Warenwert	0,45 €/t h
	Güterverkehr –durchschn. Warenwert	0,15 €/t h
	Güterverkehr –hoher Warenwert	0,01 €/t h

Tabelle 21: Internationale Zeitkostensätze

Im weiteren kann auch der Unterschied diskutiert werden, der dem Einzelnen durch die Dauer des Zeitverlustes entsteht. So hat ein Verlust von wenigen Sekunden für eine große Personengruppe wahrscheinlich eine geringere Wirkung als merkliche Verlustzeiten, wenn auch für weniger Betroffene. Im Güterverkehr sind beide Möglichkeiten auf jeden Fall als gleichwertig anzusehen.

6.2.3.2. Resümee

Die aktuellen österreichischen Zeitkostensätze liegen mit den internationalen Zeitkostensätzen auf dem gleichen Niveau, jedoch der Ansatz für privaten Personenverkehr erscheint sehr gering. Für eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung ist es erforderlich, alle Bereiche (privater und wirtschaftlicher Verkehr zu berücksichtigen). In diesem Sinne sollten die Zeitkostensätze der Überarbeitung der RVS 02.01.22 zur Anwendung kommen, wobei die Höhe des Kostensatzes im geschäftlichen Personenverkehr mit dem Werte einer Stunde bei anderweitiger Verwendung angesetzt wurde und im Vergleich zu den vorhandenen Werten eine starke Steigerung erfährt. Allerdings ist auch zu berücksichtigen, dass der Anteil des reinen Geschäftsverkehrs am gesamten Pkw-Verkehr gering ausfällt (Verkehrsdaten der Statistik Austria). Für den Güterverkehr müssen zu den Tonnenstunden auch die mittlere Auslastung der Fahrzeuge und die Personalkosten berücksichtigt werden, so kann auf einen Kostenwert je Stunde umgerechnet werden. Die gewählten Werte sind in Tabelle 22 nochmals dargestellt.

Fahrtzweck		**angewandter Zeitkostensatz [€]**
Personenverkehr	geschäftlich	30,00 €/Pers.h
	privat	8,00 €/Pers.h
Güterverkehr	Lkw	82,00 €/h bei mittlerer Beladung (incl. Personal)
	Lkw-Zug	

Tabelle 22: gewählte Zeitkostensätze im gegenständlichen Projekt

6.3. Fahrzeugbetriebskosten

Die Fahrzeugbetriebskosten sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, ausgehend von dem Fahrzeugkollektiv, für welches die Kosten berechnet werden, über die Straßengeometrie (Längsneigung, Straßenbreite,...), bis hin zur Oberflächenbeschaffenheit (bes. in Hinblick auf Längsebenheit und Griffigkeit) und dem Verhalten des Fahrers. Ein schlechter Straßenzustand, aber auch eine Überlastung des Streckenabschnitts sowie die daraus resultierende Fahrstil- und Geschwindigkeitsänderung führen zu einem erhöhten Betriebsmittelbedarf und Fahrzeugverschleiß. Andererseits muss auch berücksichtigt werden, dass der reine Kraftstoffbedarf bei einer konstanten geringeren Geschwindigkeit (wie dies bei der Durchfahrt durch längere Baustellenbereiche der Fall ist) auch niedriger ist. Unter dem Überbegriff der

Verschleiß- und Betriebsmittelkosten fallen Kraftstoffkosten, Schmiermittelkosten, Bereifungskosten sowie Reparatur- und Wartungskosten.

Besondere Relevanz erhält dieser Aspekt bei der Berücksichtigung von Umleitungsstrecken, die gleichbedeutend mit einer Verlängerung der Fahrstrecke sind, diese werden auch in der RVS 03.08.71 [18] als relevantes Kriterium ausgewiesen. In diesem Fall kommt es zu zusätzlichen Fahrzeugbetriebskosten aufgrund der zusätzlich gefahrenen Strecke, die nicht vernachlässigt werden dürfen.

6.3.1. Betriebsmittelbedarf

Generell kann gesagt werden, dass der Treibstoffbedarf von der Bauart des Fahrzeugs, Fahrzeugzustand, aber auch dem Fahrstil (Geschwindigkeit, Beschleunigungsvorgänge,...), Beladung, den klimatischen Bedingungen und der Straßengeometrie (Neigungsverlauf und Kurvigkeit) sowie von Straßenoberfläche und -zustand abhängig ist. Für die Erhaltungsplanung von Interesse sind jene Wirkungen, die zur gefahrenen Geschwindigkeit oder zum Fahrbahnzustand in Beziehung gesetzt werden können.

6.3.1.1. Ansätze aus der Literatur

Auf Grundlage einer Sensitivitätsanalyse des HDM-4 Moduls konnte festgestellt werden, dass der Haupteinfluss auf die gesamten Fahrzeugbetriebskosten - hier auch Vehicle Operating Costs (VOC) genannt - von der gefahrenen Geschwindigkeit, dem Neigungsverlauf und der Längsebenheit (IRI) ausgeht. Auch der Zusatzverbrauch durch Stop-and-Go Verkehr in Staubereichen kann maßgebend sein. Die weiteren berücksichtigten Parameter haben einen sehr geringen Einfluss [55]. Grenzparameter dieser Analyse waren das Geschwindigkeitslimit, die Fahrstreifenbreite, die Längsebenheit in Form des International Roughness Index (IRI), die Griffigkeit, der zusätzliche Treibstoffbedarf bei Stau, die Texturtiefe, der Kurvenradius, die Neigungsverhältnisse und die Beschleunigung. Im Europäischen Straßennetz ist selbst der Einfluss der Längsebenheit vernachlässigbar klein.

Die in Europa verwendeten Modelle können in statistische und mechanistische Modelle eingeteilt werden. Statistische Ansätze, wie sie in Großbritannien, Finnland, Norwegen, Dänemark, Ungarn und Deutschland verwendet werden, entwickeln die Zusammenhänge aus empirischen Studien und berücksichtigen die gefahrene Geschwindigkeit und den Neigungsverlauf des Abschnitts. Vereinzelt geht auch die vorhandene Längsebenheit in die Berechnung ein. Die mechanistischen Modelle HDM-4 und VETO (eingesetzt in Schweden) wurden auf Grundlage theoretischer Zusammenhänge entwickelt. Hierbei werden jeweils der Treibstoffbedarf, Reifenkosten, Schmiermittel- (normalerweise vernachlässigbar klein <3%) und Reparaturbedarf der Fahrzeuge betrachtet [55]. Leider fehlen die genaueren Angaben über die benötigten Parameter zur Konfiguration des VETO-Modells.

Der in den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (EWS) [20] enthaltene Ansatz zur Berücksichtigung von Fahrzeugbetriebskosten gliedert sich in zwei Teilbereiche. Einerseits ermittelt man einen Betriebskostengrundwert, welcher geschwindigkeitsunabhängig ist und bei welchem als Haupteinflussgröße die Fahrleistung (gefahrene Kilometer) dient. Dieser kann somit zur Beurteilung der Kostenrelevanz von Umleitungsstrecken eingesetzt werden. Anderseits werden die Kraftstoffkosten auf Grundlage des Kraftstoffverbrauchs (abh. von Geschwindigkeit, Längsneigung und zukünftigen technischen Reduktionspotentialen) ermittelt. Diese können somit auch durch den Straßenzustand und die Errichtung von Baustellen beeinflusst werden. Die Grundlagen hierfür sind in Cerwenka et al. [56] zu finden.

Der reine Kraftstoffbedarf im warmen Betriebszustand $EF_{FG}(V)$ ergibt sich für Geschwindigkeiten über 20 km/h zu:

$$EF_{FZ} = (c_0 + c_1 \cdot V^2 + \frac{c_2}{V})$$ Gleichung 24

EF … Kraftstoffbedarf [g/Kfz.km]
V … Geschwindigkeit [km/h]

Die Werte der Parameter für den Kraftstoffbedarf (bei Fahrten auf Autobahnen) wurden durch Messungen ermittelt und sind in Tabelle 23 [56] angeführt (Bezugsjahr 1990):

Fahrzeuggruppe	C_0 (Rollwiderstand)	C_1 (Luftwiderstand)	C_2 (Anfahrvorgänge)
Otto Pkw	17,776	0,0023606	1.461,87
Diesel Pkw	18,9647	0,0020625	1.139,17
Leichter Lkw	37,7695	0,0054534	1.582,97
sonstiger Lkw	31.7385	0,0151013	4.048,32
Lastzug	139,5313	0,0111448	3.984,71
Reisebus	95,2499	0,0083955	4.927,30

Tabelle 23: Beiwerte für die Ermittlung des Kraftstoffbedarfs [56]

Nach den oben dargestellten Zusammenhängen wird der Kraftstoffbedarf bezogen auf die Geschwindigkeit für verschiedene Fahrzeuggruppen in Abbildung 24 dargestellt. Die Darstellung erfolgt zur besseren Vergleichbarkeit in der Einheit l/100km, bei einer mittleren Dichte des Benzins von 0,755 kg/l und des Diesels von 0,83 kg/l.

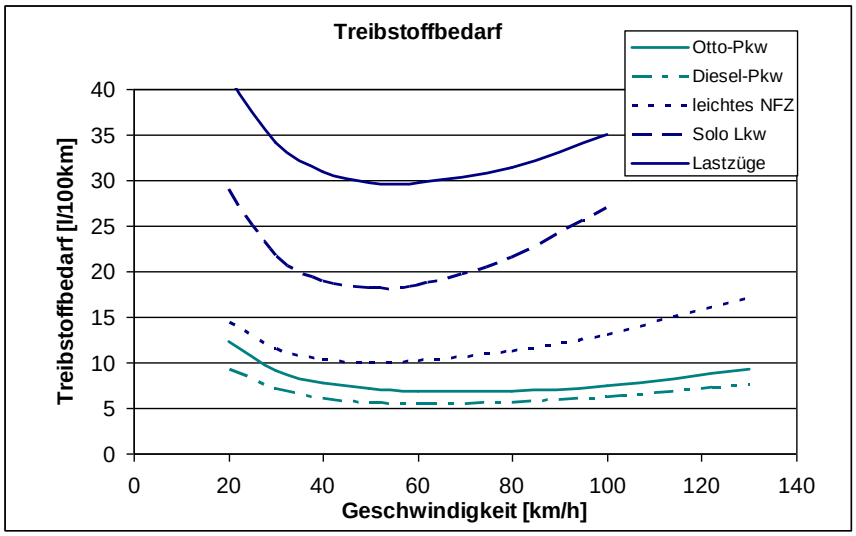


Abbildung 24: Kraftstoffbedarf nach EWS [20] für verschiedene Fahrzeuggruppen

Für den Stop-and-Go Verkehr im Bereich von Staustrecken sind die mit Gleichung 24 berechneten Verbrauchswerte mit den Minimalwerten aus Tabelle 24 zu vergleichen.

Fahrzeuggruppe	Innerorts [g/Kfz.km]	Außerorts [g/Kfz.km]
Otto Pkw	174,357	99,788
Diesel Pkw	102,850	62,730
Leichter Lkw		91,376
sonstiger Lkw		670,775
Lastzug – Autobahn		767,863
Reisebus		854,859
Linienbus		746,497

Tabelle 24: Minimalwerte für Kraftstoffbedarf im Stop and Go Verkhr lt. EWS [20]

Auch die Einflussgröße der Längsneigung s [%] kann bei der Ermittlung des Treibstoffbedarfs berücksichtigt werden, hierfür konnte ein Korrekturfaktor G (s,V) aus Vergleichsfahrten auf Strecken mit und ohne Längsneigung entwickelt werden. Gleichung 25 stellt den Zusammenhang für Pkw dar, für Stop-and-Go Verkehr kann innerorts eine Geschwindigkeit von 5,3 km / h, außerorts 9,5 km / h angesetzt werden. Für Nutzfahrzeuge kann der Einfluss der Geschwindigkeit nicht bestätigt werden, dadurch reduziert sich der Zusammenhang auf Gleichung 26. Die entsprechenden Parameter sind in Tabelle 25 enthalten.

$$G(s,V) = \exp\left[\left(c_0 - \frac{V - V_0}{c_1}\right) \cdot c_2 \cdot s + c_3 \cdot s^2 \cdot 10^{-6}\right]$$ Gleichung 25

$$G(s,V) = \exp\left[s \cdot c_1 \cdot 1 + c_2 \cdot s - c_3 \cdot s^2\right]$$ Gleichung 26

Des weiteren werden noch technologische Entwicklungen, die einen geringeren Treibstoffverbrauch nach sich ziehen, durch einen Entwicklungsfaktor k (zu entnehmen Tabelle 25) berücksichtigt.

Fahrzeugart	c_0	c_1	c_2	c_3	V_0	k-2005	k-2010
Pkw-Ottp	2262	6,52	69,89	2,485	110	0,87	0,83
Pkw-Diesel	2262	6,52	69,89	2,485	110	0,86	0,85
leichtes NFZ	-	0,1055	0,072	0,00571		0,93	0,91
Solo Lkw	-	0,1328	0,065	0,00954		0,95	0,94
Lastzüge	-	0,2047	0,0456	0,00997			
Reisebusse	-	0,1409	0,1027	0,01177			
Linienbusse	-	0,1211	0,0012	0,00567			

Tabelle 25: Parameter zur Bestimmung des Einflusses der Längsneigung und der Bezugsjahr-minderung [56]

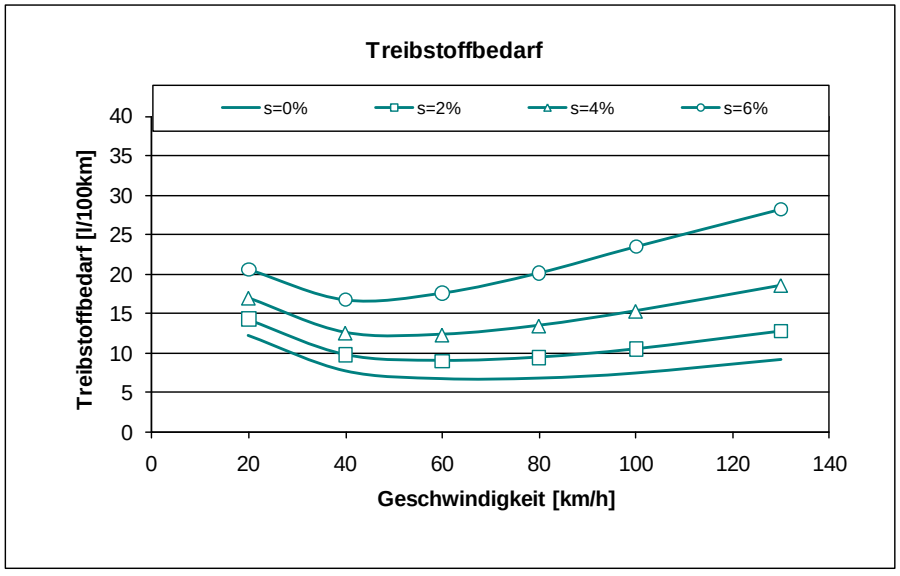


Abbildung 25: Kraftstoffbedarf nach EWS [20] für Pkw bei unterschiedlichen Längsneigungen

Der gesamte Betriebsmittelbedarf ergibt sich für jede Fahrzeuggruppe als Produkt des Kraftstoffbedarfs EF_{FZ}, des Korrekturfaktors G und des Abminderungsfaktors k.

Für die Ermittlung des Kraftstoffbedarfs nach dem Modell der EWS sind die darin enthaltenen Fahrzeugparameter zu übernehmen, des weiteren gehen maßgebend die Geschwindigkeit und der Neigungsverlauf des Abschnitts in die Berechnung mit ein.

Für Österreich können aktuelle Werte für die Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs in Österreich, sowohl auf ebener Strecke als auch in Steigungs- und Gefällebereichen dem Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [57] entnommen werden. Es beinhaltet eine CD mit den Verbrauchswerten der unterschiedlichen Fahrzeugkategorien aus dem Jahre 2004.

Der Kraftstoffbedarf in Abhängigkeit von der Längsneigung und der Geschwindigkeit ist für drei unterschiedliche Fahrzeugtypen in Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellt. Die Darstellungen sind dem Handbuch der Verkehrssystemplanung [58] entnommen und wurden auf Grundlage des Handbuchs Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs [57] erstellt.

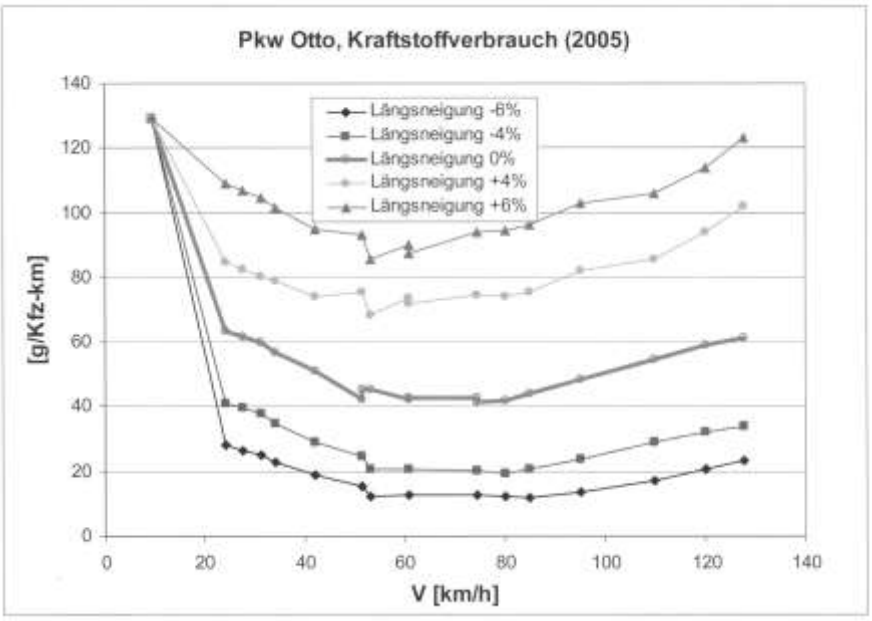


Abbildung 26: Kraftstoffbedarf Pkw (Benzin) in Abhängigkeit von der Fahrbahnlängsneigung und der Fahrgeschwindigkeit [58]

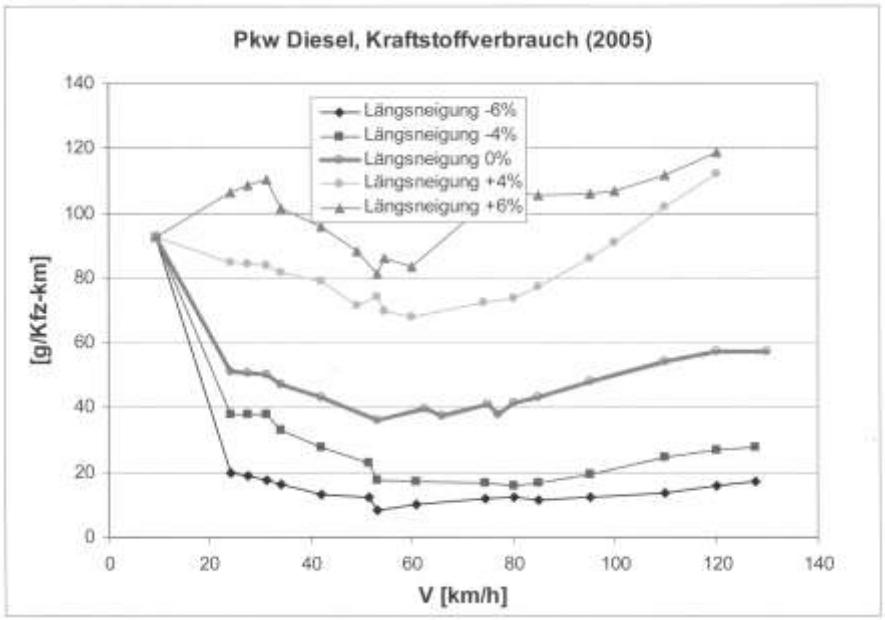


Abbildung 27: Kraftstoffbedarf Pkw (Diesel) in Abhängigkeit von der Fahrbahnlängsneigung und der Fahrgeschwindigkeit [58]

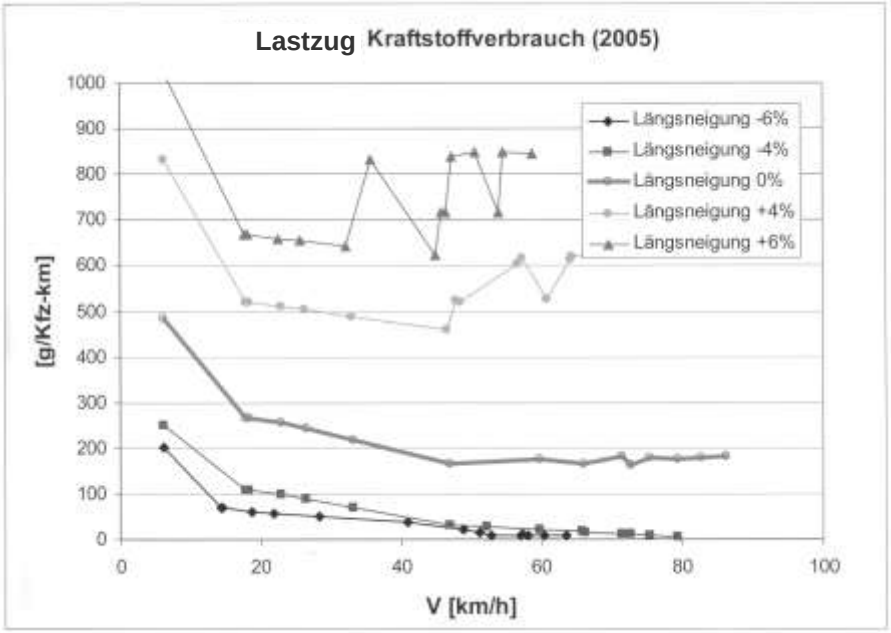


Abbildung 28: Kraftstoffbedarf Lastzug in Abhängigkeit von der Fahrbahnlängsneigung und der Fahrgeschwindigkeit [58]

Auch bei dem im HDM-4 [16] verwendeten Modell zur Ermittlung der Fahrzeugbetriebsmittel ist die gefahrene Geschwindigkeit eine der Haupteinflussgrößen. Es können aber weiters Beschleunigungs- und Bremseffekte zufolge gestauten Verkehrs, Steigungs- und Gefällestrecken, sowie die Längsebenheit des Abschnitts berücksichtigt werden.

Der Treibstoffverbrauch kann in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit, im Staubereich auch vom Beschleunigungspegel (beeinflusst durch Auslastungsgrad und Längsebenheit) und vom Fahrzeugtyp bestimmt werden. Die grundlegenden Zusammenhänge für den jeweiligen Fahrzeugtyp können aus einem Zusatzmodul des HDM (ACCSFUEL) entnommen werden. Maßgebend sind hierbei die Kategorien Pkw und Lkw, für welche die Zusammenhänge in Abbildung 30 und Abbildung 31 und dargestellt sind.

Konkret setzt sich der Treibstoffverbrauch (IFC in ml/s) je Fahrzeugart im HDM-4 wie folgt zusammen:

$$IFC = \max(MinFuel, \xi \cdot Ptot \cdot (1 + dFUEL)) \qquad \text{Gleichung 27}$$

MinFuel…minimaler Teibstoffbedarf [ml/s] (Leerlauf – abhängig von Hubraum, tabelliert)
ξ …Wirkungsgrad des Motor [ml/kW.s]
dFUEL …zusätzl. Treibstoffbedarf durch Beschleunigungsmanöver bei großer Verkehrsdichte
Ptot … erforderliche Motorkraft [kW]

$$\xi = \xi_b \cdot (1 + eph \cdot (Ptot - Peng) / \Pr at) \qquad \text{Gleichung 28}$$

ξ_b … nomineller Motor-Wirkungsgrad [ml/kW.s] - tabelliert
ehp … Abfall der Effizienz bei hoher Leistung - tabelliert
Prat … maximale Motorleistung [kW] – tabelliert
Peng … Motorkraft zur Überwindung innerer Widerstände (kürzt sich in Gleichung 29 heraus)

$$Ptot = \frac{Ptr}{EDT} + Paccs + Peng$$ Gleichung 29

Ptr … erforderliche Zugkraft [kW], (Luft-, Roll-, Steigungs-, Lenk- und Trägheitswiderstand)
EDT … Getriebewirkung [-] (tabelliert)

$$Ptr = \left[\frac{(Fa + Fr + Fg + Fc + Fi) \cdot v}{1000} \right]$$ Gleichung 30

v … Geschwindigkeit [m/s]
Luftwiderstand:Fa=0,6*CDmult*CD*AF*v²
Rollwiderstand:Fr=CR2*(b11*Num_Weehls+Cr1*(b12*Masse+b13*v²))
Fahrbahnoberfläche: CR2=a0+a1*sandfleck [mm]+a2*IRI [m/km]
Reifeneinfluss: Cr1=1 (Radialreifen); Cr1=1,3 (Diagonalreifen)
Steigungswiderstand: Fg=Masse*g*Steigung
Lenkwiderstand: Fc nicht berücksichtigt
Trägheitswiderstand: Fi nicht berücksichtigt

Paccs … Zubehörleistung (zusätzlicher Einrichtungen wie Kühlung, Lichtmaschine,…) [kW]
α … minimaler Treibstoffbedarf [ml/s] (tabelliert)

$$Paccs = 0{,}2 \cdot 1 \cdot \Pr at \cdot \left[\frac{-\xi_b \cdot \Pr at + \sqrt{\xi_b^2 \cdot \Pr at^2 + 0{,}8 \cdot \xi_{b.} \cdot ehp \cdot \Pr at} \cdot \alpha}{0{,}4 \cdot \xi_b \cdot ehp \cdot \Pr at} \right]$$ Gleichung 31

Das Ergebnis der oben dargestellten Zusammenhänge unter der Annahme einer ebenen Strecke mit einer Längsebenheit von IRI=1,6 ist in Abhängigkeit der Geschwindigkeit in Abbildung 29 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Daten mit den weiteren Modellen wurde das Ergebnis von ml/s unter Berücksichtigung der Dichte und der jeweiligen Geschwindigkeit in l/100 km umgerechnet.

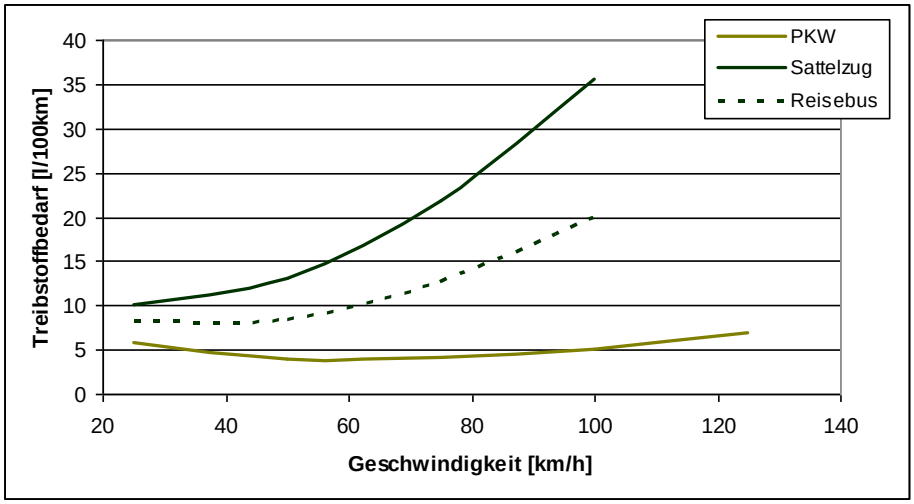


Abbildung 29: Treibstoffbedarf nach dem Modell des HDM-4 [16] für ebene Strecke mit IRI=1,6

Geringeren Einfluss im Bezug auf die Erhaltungsplanung im Autobahnen- und Schnellstraßennetz haben der nicht motorisierte Verkehr und die Linienführung, welche aber aufgrund der Relevanz im niederrangigen Netz auch im HDM angeführt sind.

Zur Berücksichtigung von zusätzlichem Treibstoffbedarf bei einer höheren Dichte des Verkehrs können die Zusammenhänge aus Abbildung 30 und Abbildung 31 zur Anwendung gelangen. Diese geben Auskunft über den zusätzlichen Anteil (dFUEL) in Abhängigkeit von der mittleren Beschleunigung und der gefahrenen Geschwindigkeit. Dieser Anteil ist nach Gleichung 27 zum vorhandenen Treibstoffbedarf hinzuzuzählen.

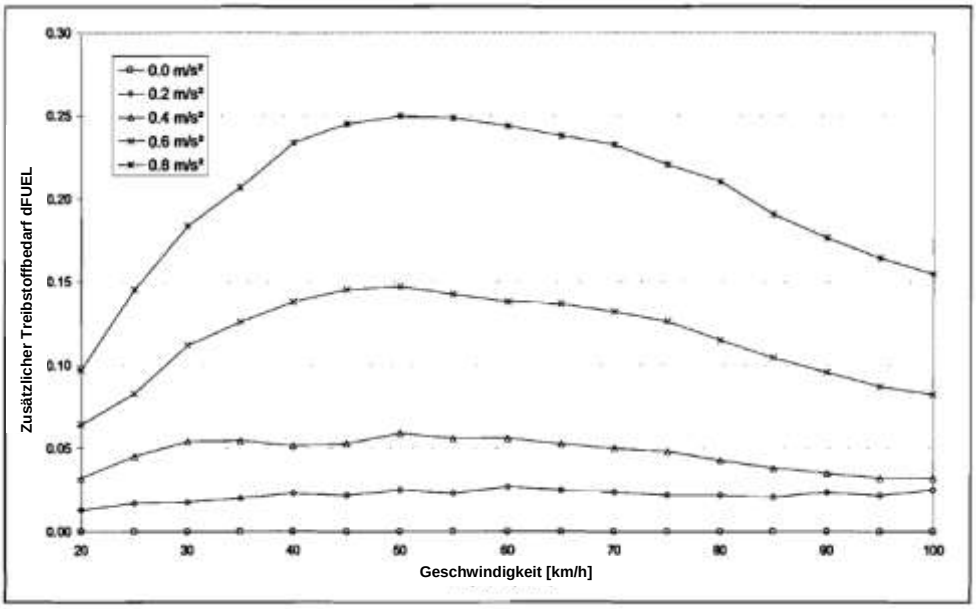


Abbildung 30: Auswirkung der Beschleunigung auf den zusätzlichen Treibstoffbedarf / Pkw [14]

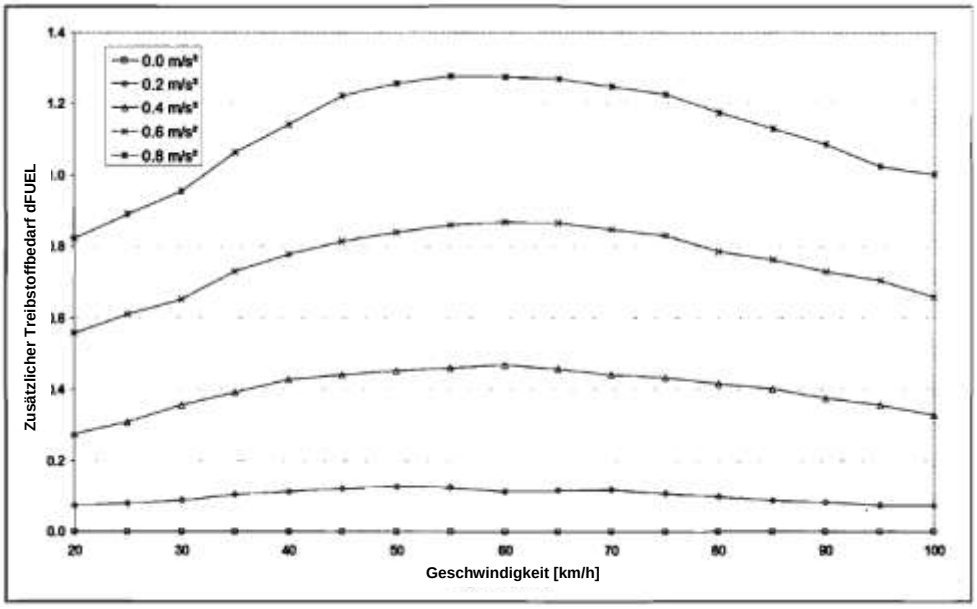


Abbildung 31: Auswirkung der Beschleunigung auf den zusätzlichen Treibstoffbedarf / Sattelzug [14]

Einen großen Einfluss auf den gesamten Betriebsmittelbedarf, besonders für Lastfahrzeuge, kann der Reifenverschleiß darstellen, der auch auf den Fahrbahnzustand zurückzuführen ist. Hier spielt vor allem die Textur der Fahrbahnoberfläche eine Rolle; die Längsebenheit hat Einfluss auf die Belastung des Reifens. Diese Effekte werden aber im HDM Modell nicht getrennt berücksichtigt.

In Stütze [8] wurde mit Hilfe von Kraftstoffverbrauchssimulationen für verschiedene Fahrzeuggruppen ein Zusammenhang zwischen Rollwiderstandsbeiwert und im weiteren dem Allgemeinen Unebenheitsmaß (AUN) und dem Kraftstoffverbrauch (KV) unter Berücksichtigung

der Geschwindigkeit hergestellt. Notwendige Kenngrößen sind der AUN und die Geschwindigkeit V.

Die Zusammenhänge im Einzelnen:

Gruppe Otto Pkw: KV=0,0536 V+0,0094 AUN+0,38 [l / 100 km]

Gruppe Diesel Pkw: KV=0,0540 V+0,01 AUN-0,78 [l / 100 km]

Gruppe leichter Lkw (80km / h): KV=0,107 AUN+18,128 [l / 100 km]

Gruppe Lkw-Zug (80km / h): KV=0,412 AUN+40,871 [l / 100 km]

Gruppe Bus (80km / h): KV=0,153 AUN+25,880 [l / 100 km]

Zur Darstellung des Mehrverbrauchs ist in der nachfolgenden Abbildung 32 der zusätzliche Bedarf bei einer Änderung der Ebenheit von AUN=1 auf den angegebenen Wert (die Geschwindigkeit für Pkw wurde auf 130 km / h festgelegt) ausgewiesen.

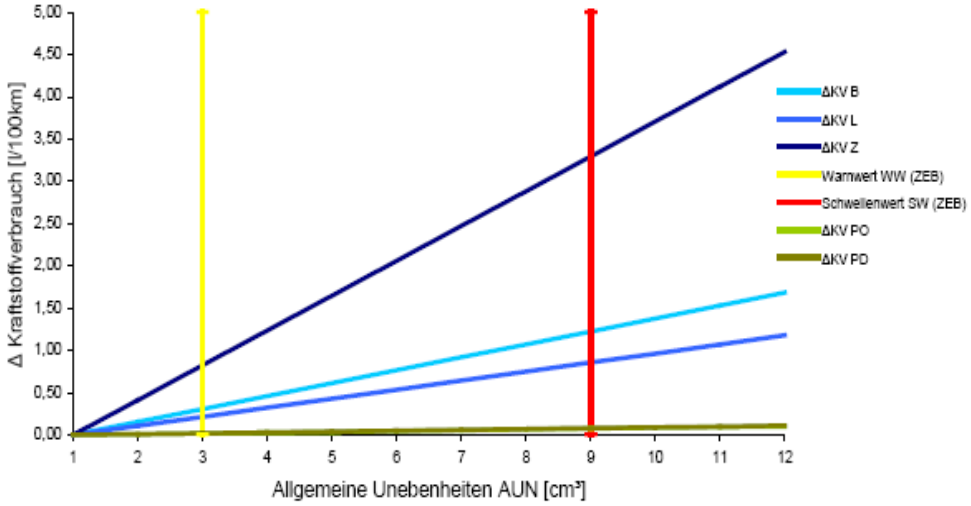


Abbildung 32: Mehrverbrauch an Kraftstoff in Abhängigkeit des AUN im Vergleich zu AUN=1 [8]

Für das österreichische Autobahnen- und Schnellstraßennetz steht die Längsebenheit in Form des international Roughness Index (IRI) zur Verfügung. Derzeit ist die direkte Korrelation zwischen IRI und AUN jedoch nicht möglich, was auch eine Anwendung der oben dargestellten Zusammenhänge momentan unterbindet.

6.3.1.2. Resümee

Eine gemeinsame Darstellung der drei oben beschriebenen Modelle (EWS, HDM, Handbuch Emissionsfaktoren) in Abbildung 33 bei einer Längsneigung von 0% zeigt besonders im Bereich der Pkw eine gute Übereinstimmung, bei dem Treibstoffverbrauch der Sattelzüge ergeben sich größere Unterschiede. Besonders zu erwähnen ist der geringe Verbrauch bei niedrigen Geschwindigkeiten im HDM_Lastzug Modell. Bei einer Geschwindigkeit von 80 km / h ergeben die Modelle des HDM und des Handbuchs der Emissionsfaktoren ähnliche Werte. Das heißt, im normalen Betriebsbereich des Lkw liegen die Verbrauchswerte der beiden Modelle nahe beisammen, die Ergebnisse der EWS-Berechnung liegen konstant über jenen des Handbuchs.

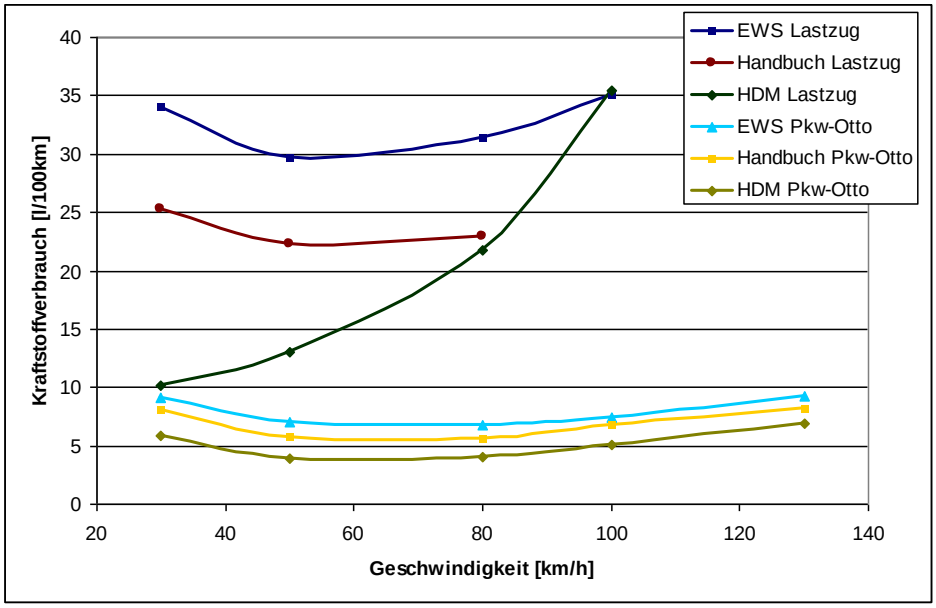


Abbildung 33: Vergleich der Modelle zum Kraftstoffverbrauch

Der Kraftstoffverbrauch des Pkw (Otto-Motor) sinkt im Geschwindigkeitsbereich von Schnellstraßen und Autobahnen mit abnehmender Geschwindigkeit, bei niedrigeren Geschwindigkeiten steigt jedoch der Kraftstoffverbrauch wieder an. Dies lässt sich in der höhertourigen Fahrweise im geringen Geschwindigkeitsbereich und in der grundsätzlichen Optimierung des Motors auf höhere Geschwindigkeiten begründen. Das Minimum liegt bei etwa 70 km / h (vgl. auch Abbildung 33).

Der Verlauf des Kraftstoffbedarfs eines Pkw-Diesel ist jenem des Pkw mit Otto-Motor vom Verlauf her sehr ähnlich, liegt absolut jedoch tiefer. Aus diesem Grund und zur Wahrung der Übersichtlichkeit ist der Pkw- Diesel in Abbildung 33 nicht extra ausgewiesen.

Wie schon erwähnt, kann die Längsneigung bei allen drei Modellen berücksichtigt werden, sie führt zu einem erhöhten Treibstoffbedarf. Im HDM besteht zusätzlich die Möglichkeit, Effekte aufgrund von Beschleunigungsvorgängen zu berücksichtigen und die Auswirkung von erhöhten Längsunebenheiten (grundlegend ist von einem IRI-Wert von 1,6 ausgegangen worden) einzubeziehen.

Treibstoffbedarf [l/100km]						
	Geschwindigkeit [km/h]	IRI 1	IRI 2	IRI 3	IRI 4,5	Veränderung
PKW	25	5,79	5,86	5,93	6,03	3,99%
	50	3,8	3,88	3,95	4,05	6,08%
	75	3,97	4,04	4,12	4,23	6,07%
	100	5,05	5,13	5,21	5,32	5,12%
	125	6,89	6,98	7,06	7,19	4,14%
Sattelzug	25	14,7	14,9	15,1	15,3	4,15%
	50	15,3	15,5	15,7	15,9	4,05%
	75	23,2	23,4	23,6	23,9	2,79%
	100	36,6	36,8	37	37,3	1,89%

Tabelle 26: Kraftstoffverbrauch im HDM-4 Model bei unterschiedlicher Längsebenheit

Der Einfluss der Längsebenheit ist in Tabelle 26 dargestellt. Wird die Längsebenheit nicht berücksichtigt so kann es je nach Geschwindigkeit zu einem Fehler bei der Berechnung des

Treibstoffbedarfs von 2-6% kommen. Der Einfluss der Geschwindigkeit führt zu Variationen von bis zu 45% bei Pkws und 60% bei Lkws. Eine Veränderung der Längsneigung (bei einer Variation von 0-10%) hat nur auf den Kraftstoffbedarf des Lkws Auswirkungen. Es können je nach Geschwindigkeit Veränderungen von 4 – 33% festgestellt werden.

Die aktuellsten Werte stellen die Ergebnisse des Handbuchs Emissionsfaktoren dar, die auch die beiden maßgebenden Einflussfaktoren Geschwindigkeit und Längsneigung berücksichtigen. Dieses Modell kann unter Akzeptanz des möglichen Fehlers aufgrund der nicht berücksichtigten Längsebenheit für die weiteren Berechnungen in der gegenständlichen Arbeit verwendet werden.

6.3.2. Kostensatz – Betriebsmittel

Die in Österreich tatsächlich beobachtbaren mittleren Benzin-Nettokosten (exklusive Mineralölsteuer und Umsatzsteuer, Anteil bis zu 63%) wurden vom ÖAMTC [59] gesammelt und sind in Tabelle 27 dargestellt.

Bezugsjahr	Nettokosten Benzin [€]	rel. Veränderung	Nettokosten Diesel [€]	rel. Veränderung
2000	0.402		0.440	
2001	0.376	-6,5 %	0.396	-10%
2002	0.365	-2,9 %	0.392	-1%
2003	0.361	-1,1 %	0.397	+1,3%
2004	0.406	+12,5 %	0.453	+14,1%
2005	0.513	+26,4 %	0.576	+27,2%
2006	0.526	+2,5 %	0.611	+6,1%
2007	0.552	+5,9 %	0.621	+1,6%
2008	0.636	+15,2 %	0.742	+16,5%

Tabelle 27:Kraftstoffkostensätze laut ÖAMTC (2008)

In Österreich kann weiters auch die RVS 02.01.22 (Entscheidungshilfen – Kosten-Nutzen-Untersuchungen im Verkehrswesen) [18] herangezogen werden. Die Angabe bezieht sich auf das Jahr 2000 und weist für Benzin etwas höhere Kosten aus. Vergleichswerte für Preisstand 2006 sind Nagl [60] entnommen.

Kraftstoffkostensätze [€/l]	RVS 02.01.22 Preisstand 2000	Preisstand 2006
Benzin (im Mittel)	0,48	0,49
Diesel	0,41	0,54

Tabelle 28: Kraftstoffkostensätze [18]

Der von der Geschwindigkeit unabhängige Kostenanteil ist in der RVS ebensfalls monetarisiert, hat aber nur bei der Berücksichtigung von Umleitungsstrecken Einfluss auf die Auswahl einer Erhaltungsvariante. Bei Varianten mit gleicher Streckenführung sind auch die Betriebsgrundwerte gleich groß und werden daher nicht explizit dargestellt.

Betriebskostengrundwerte	**[€/100Kfz.km]**
Pkw	8,85
Lieferwagen	11,40
Solo-Lkw	16,02
Lkw-Zug	23,55
Bus	44,36

Tabelle 29: Betriebskostengrundwerte [18]

Die Entwicklung des Treibstoffpreises ist durch die derzeit extremen Steigerungsraten nicht abzuschätzen. Aus den historischen Daten kann mit einer Steigerungsrate von 12,5% (Durchschnitt der letzten 5 Jahre) gerechnet werden. Ausgangspreis für das Jahr 2008 sind Nettokosten von 0,636 € für Benzin und 0,742 € für Diesel. Die hier verwendeten Werte stimmen nicht mit den jeweiligen Tageswerten überein, für längerfristige Ansätze ist die Annahme von fixen Preisen und einer fixen Steigerungsrate aber durchaus gerechtfertigt.

6.4. Sicherheit – Unfallkosten

Ein Schwerpunkt bei Betrachtungen, die den Straßennutzer betreffen, ist die Beurteilung der Sicherheit eines Straßenabschnitts. Eine verminderte Sicherheit bzw. ein erhöhtes Unfallrisiko kann einerseits durch den Straßenzustand (zu geringe Griffigkeit, große Spurrinnentiefen) oder andererseits durch die Einrichtung von Baustellen (Verschwenkungen, Veränderung der Geschwindigkeit, Ablenkungen,...) bewirkt werden. Quantifizieren und monetarisieren lassen sich diese Wirkungen über die Veränderung der Anzahl der Unfälle bzw. die Unfallhäufigkeit und in weiterer Folge die Ermittlung der hierdurch entstehenden zusätzlichen Unfallkosten.

Als Grundlage die Darstellung des derzeitigen Unfallgeschehens auf dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz können die in amtlichen Statistiken erfassten Unfälle herangezogen werden. In Abhängigkeit von der Unfallschwere und der Straßenkategorie ist es möglich, diese mit mittleren Unfallfolgekosten zu belegen. Die Situation in Österreich lässt sich mit Hilfe der Datensammlung der Statistik Austria (Straßenverkehrsunfälle 2005 [61]) darstellen (siehe detaillierte Auswertung in den nachfolgenden Kapiteln).

6.4.1. Kenngrößen

Im Folgenden werden Kenngrößen angeführt, die bei der Bewertung der Sicherheit eines Abschnitts zur Anwendung kommen. Ausgehend von den absoluten Unfallzahlen (Anzahl der Getöteten, der Verletzen, der Unfälle mit Personenschaden und der Unfälle mit Sachschaden) werden im weiteren die Kennzahlen als relative Größen in Relation zu der tatsächlich auftretenden Verkehrsbelastung ausgedrückt.

Bei den nachfolgend dargestellten Kennziffern ist immer der Schweregrad der berücksichtigten Unfälle anzugeben. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen der reinen Berücksichtigung von Unfällen mit Personenschäden und der Gesamtheit an Unfällen mit Personenschäden und schweren Sachschäden. In Österreich ist es momentan jedoch nur möglich, Aussagen über Unfälle mit Personenschäden (zumeist unterschieden in Getötete, Schwerverletzte und Leichtverletzte) zu treffen, da Unfälle mit reinem Sachschaden nicht mehr der polizeilichen Meldepflicht unterliegen und nicht über Unfallberichte erfasst werden. Hierbei besteht höchstens die Möglichkeit diese Unfälle über die in Anspruch genommenen Versicherungsleistungen zu erfassen.

6.4.1.1. Unfalldichte

Die Unfalldichte (U_D) stellt den Bezug der Anzahl der Unfälle eines Jahres (zumeist Unfälle mit Personenschaden, UPS) zur Länge des Streckenabschnitts her.

Demnach trägt sie die Einheit [Unfälle / Jahr.km] beziehungsweise auch [UPS / Jahr.km]. Auf dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz konnte aus einer Auswertung der Unfalldaten der Jahre 2005 bis 2007 durch die Asfinag [62] eine Unfalldichte im Mittel von U_D=0,1284 UPS / km ermittelt werden.

6.4.1.2. Unfallrate

Die Unfallrate (U_R) gewichtet die auftretenden Unfälle über die zugehörige Verkehrsbelastung und ermöglicht somit einen Vergleich unterschiedlich stark belasteter Streckenabschnitte in Form einer fahrleistungsbezogenen Unfallhäufigkeit. Berücksichtigt werden hierbei auch jeweils die Unfälle eines Jahres, somit ergibt sich die Einheit der Unfallrate (für ein konkretes Jahr oder als Mittelwert aus mehreren Beobachtungsjahren) zu Unfälle / Mio Fz-km.

$$U_R = \frac{10^6}{365} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} U_i}{\sum_{i=1}^{n} JDTV_i \cdot L_i}$$

Gleichung 32

U … Anzahl der Unfälle pro Jahr

i … betrachteter Abschnitt (n=Gesamtzahl)

JDTV …Jährlich durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke [Fz/24h]

L … Teilabschnittslänge [km]

Anstelle des Produkts aus 365 Tagen, täglicher Verkehrsstärke und Abschnittslänge kann adäquat auch die jährliche Verkehrsleistung verwendet werden.

Nussbaumer [63] ermittelte, basierend auf Auswertungen der Unfalldaten der Jahre 1999 bis 2003, österreichische Unfallraten (siehe Tabelle 30).

Die Unfalldaten für das Jahr 2006 werden von der Statistik Austria [64] veröffentlicht. Es werden die vorhandene Unfalldaten nach verschiedensten Gesichtspunkten angeführt, in der unten dargestellten Tabelle 30 sind jedoch nur jene Unfälle mit Personenschaden abgebildet. Die Fahrleistung 2006 kann der Publikation Verkehr in Zahlen [65] entnommen werden. Diese Werte können auch durch die Auswertung der Asfinag [62] für die Jahre 2005 bis 2007 bestätigt werden.

Bei Hulmak [66] sind ebenfalls Unfallraten für das Jahr 2006 angegeben, diese liegen etwas über jenen der Statistik Austria.

Quelle	betrachtete Zeitraum	Unfälle	Fahrleistung [Mio Kfz-km]	Unfallrate [Unfälle/Mio Kfz-km]
Nussbaumer [63]	Autobahnen 1999-2003	12.484	91.360	0,137
	Schnellstraßen 1999-2003	1.130	7.500	0,151
Statistik AUSTRIA [64]	Autobahnen 2006	2.231	22.810	0,098
	Schnellstraßen 2006	234	1.983	0,118
Hulmak [66]	Autobahnen 2006			0,115
	Schnellstraßen 2006			0,139
Asfinag [62]	A+S 2005-2007			0,112

Tabelle 30: Unfallraten (Personenschäden) in Österreich

Die Unfallrate auf österreichischen Autobahnen und Schnellstraßen hat in den letzten Jahren stetig abgenommen und wird diesen Trend hoffentlich auch fortsetzten. In weiterer Folge kann auf Grundlage der dargestellten Auswertungen von einer mittleren Unfallrate (fahrleistungsgewichtet) im österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz von 0,1 Unfälle / Mio Kfz km ausgegangen werden.

Die Unfallrate eines Streckenabschnitts bezieht sich zumeist auf die Gesamtzahl der auftretenden Unfälle. Für spezielle Betrachtungen kann es auch erforderlich sein, die Unfallrate

nur auf die Nässeunfälle (Unfälle auf nasser Fahrbahn) zu beziehen. Diese muss dann eindeutig als solche ($U_{R,nass}$, U_R(Nässeunfälle)) ausgewiesen sein.

6.4.1.3. relative Unfallhäufigkeit bei Nässe

Für den Zusammenhang zwischen Straßenzustand (zumeist in Form der Griffigkeit, Längsebenheit oder Spurrinnentiefe) und Verkehrssicherheit eines Abschnitts ist oftmals die relative Unfallhäufigkeit bei Nässe (A_N) eine aussagekräftige Größe. Sie bezeichnet das Verhältnis zwischen der Anzahl der Unfälle auf nasser Fahrbahn und der Gesamtzahl der Unfälle.

$$A_N = \frac{U_N}{(U_N + U_T)} \cdot 100$$ Gleichung 33

A_N ... relative Unfallhäufigkeit bei Nässe [%]

U_N ... Anzahl der Unfälle bei Nässe

U_T ... Anzahl der Unfälle auf trockener Fahrbahn

Es handelt sich hierbei um eine relative Größe, die keine Aussage über die absolute Zahl der Unfälle zulässt. Es kann jedoch für die Gesamtzahl der Unfälle auch die oben dargestellte Unfalldichte oder Unfallrate eingesetzt werden und somit die absolute Zahl der Unfälle bei Nässe berechnet werden.

Bei der Auswertung der österreichischen Unfalldaten der Jahre 1991 bis 1996 durch Tiefenbacher [85] konnte eine relative Unfallhäufigkeit bei Nässe von 20 – 30 % ermittelt werden.

6.4.1.4. Unfallhäufungsstellen

Der Einfluss von verschiedensten Faktoren auf das Unfallgeschehen kann besonders an Unfallhäufungsstellen herausgearbeitet werden. Ein Bereich (mit einer Länge bis zu 250 m) ist nach der RVS 02.02.21 [18] als Unfallhäufungsstelle zu bezeichnen, wenn eines der folgenden Kriterien zutrifft:

- im betrachteten Abschnitt mindestens 5 gleichartige Unfälle (einschl. Unfälle mit Sachschaden) in einem Jahr
- im betrachteten Abschnitt mindestens 3 gleichartige Unfälle mit Personenschaden in 3 Jahren (bei einem Relativkoeffizienten $R_k \geq 0,8$)

$$R_k = \frac{U}{0,5 + 7 \cdot 10^5 \cdot JDTV}$$ Gleichung 34

U ... Anzahl der Unfälle mit Personenschaden

6.4.2. Kostensatz Sicherheit

Zur Monetarisierung der Wirkung des Straßenzustands auf die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer ist es erforderlich, einem Unfall mittlere Unfallkosten zuzuordnen. In einem ersten Schritt ist eine genaue Abgrenzung der berücksichtigten Kostenkomponenten notwendig.

Der Begriff der Unfallkosten fasst zumeist die direkten Unfallkosten (Sachschäden) und den wesentlich größeren Teil der Unfallfolgekosten zusammen. Diese wiederum setzten sich aus Reproduktionskosten (medizinische Behandlung und berufliche Rehabilitation, Kosten für Invaliden- und Hinterbliebenenrente, Kosten für Verkehrspolizei und Versicherung),

Ressourcenausfall (Produktionsausfälle durch Tod oder dauerhafte / vorübergehende Arbeitsunfähigkeit) und humanitäre Kosten (Schmerzensgeld) zusammen [51]. Hierbei gestaltet sich die Quantifizierung der Kosten für menschliches Leid besonders schwierig, da diese Kosten zumeist nicht zur Auszahlung gelangen, sondern eben einen Kompensationswert für das entstandene Leid darstellen. Folge dessen wird dieser Kostenaspekt in der Mehrheit der Untersuchungen nicht angeführt.

In der Unfallkostenrechnung Straße 2007 [71] wird der Wert des menschlichen Leids mit Hilfe eines Willingness to Pay Ansatzes berücksichtigt. Es zeigt sich, dass diese Kosten einen beträchtlichen Anteil einnehmen können, je nach Schwere des Unfalls beträgt dieser 47 – 87% der Gesamtkosten.

6.4.2.1. Unfallkostensatz

Bei dem Vergleich von Unfallkostensätzen ist sehr genau vorzugehen, da diese einerseits mit unterschiedlichen Einheiten auftreten, andererseits unterscheiden sie sich in den betrachten Kostengruppen. In den angeführten Tabellen finden sich Unfallkostensätze, die für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zum Einsatz kommen, jedoch in weiterer Folge einer Aktualisierung bedürfen. Tabelle 31 gibt einen Überblick über die Kostensätze [€/Unfall] in Österreich und Deutschland. Tabelle 32 bezieht sich auf die Zuordnung der Kosten auf die geschädigten Personen [€/Person]. Die Ansätze haben vergleichbare Größen, Unterschiede in den angeführten Werten ergeben sich vor allem durch die unterschiedlichen Bezugsjahre.

Unfallkostensatz **[€/Unfall]**	D: EWS [67]		Ö: RVS 02.01.22 [18]		D: volkswirt. Bewertung[69]	
Preisstand	1992		2000		2000	
	Autobahn	außerorts	Autobahn	außerorts	Autobahn	außerorts
Unfall mit Totem					300.000	270.000
Unfall mit leicht VL					31.000	18.000
Personenschaden	86.500	81.000	90.000	80.000	105.000	110.000
mit Sachschaden	10.000	6.000			18.500	13.000

Tabelle 31: vergleichende Darstellung von Unfallkostensätzen **[€/Unfall]**

Unfallkosten **[€/Person]**	Ö: Unfallkosten-rechnung [70]	D: volkswirt. Bewertung [69]	CH: SN640907 [21]	D: Bund Hessen [68]
Preisstand	1993	2000	2001	2004
Unfall mit Toten	805.233	1.250.000	1.301.040	1.500.000
Unfall mit schwer VL	43.605	85.000	14.540	200.000
Unfall mit leicht VL	3.695	3.750	5.079	15.000

Tabelle 32: vergleichende Darstellung von Unfallkosten **[€/Person]**

In Deutschland beliefen sich die volkswirtschaftliche Gesamtkosten durch Unfälle im Jahr 2000 auf 35 Mrd.€ [69], durch Schatten- und Hausarbeit wurden zusätzlich noch Kompensationsleistungen im Wert von 22 Mrd.€ erbracht, insgesamt ergibt sich somit eine Summe von mehr als 57 Mrd.€. Der Kostensatz, der dieser Beurteilung zu Grunde liegt ist in Tabelle 31 angeführt.

Für die Situation in Österreich kann die Arbeit von Metelka, Cerwenka und Riebesmeier [70] herangezogen werden, diese bietet Vorschläge für die Entwicklung von Unfallkostensätzen. Sie bildet auch die Grundlage zur Berechnung der gesamten Unfallkosten bei der Wegekostenrechnung [5]. Hierbei werden folgende Teilgebiete berücksichtigt: Leistungs- bzw. Produktionsverluste, Medizinische Kosten, Administrative Kosten sowie Pretium Vivendi (Nutzenverluste durch Schmerz oder Leid). Die Summe der Unfallkosten in Österreich für das

Jahr 2000 beläuft sich auf rund 4,1 Mrd.€ (externe Unfallkosten: ~38% der Gesamtkosten = 1,5 Mrd.€), zur besseren Vergleichbarkeit jedoch ohne Berücksichtigung des Pretium Vivendi.

In Tabelle 33 sind die, unter Zuhilfenahme der Unfalldaten des Jahres 2000, ermittelten Unfallkostensätze für das gesamte österreichische Straßennetz dargestellt. Weiters sind die spezifischen Unfallkostensätze im Bereich Autobahn und Schnellstraße für den Beobachtungszeitraum 1999-2003 aus den Unfallraten und den Unfallkostenraten bei Nussbaumer [63] rückgerechnet worden. Ebenso sind die Ergebnisse der Unfallkostenrechnung Straße für das Jahr 2006 angeführt.

	Unfallkostensatz gesamtes Netz (Ö) [71] Basis 2006		Unfallkostensatz gesamtes Netz (Ö) [70] Basis 2000		Unfallkostensatz [63] Basis 1999-2003
	[€/Unfall]	[€/Person]	[€/Unfall]	[€/Person]	[€/Unfall]
Unfall mit Toten		1.399.440		2.210.500	
mit menschlichem Leid		2.676.374			
Unfall mit schwer VL		60.811		107.800	
mit menschlichem Leid		316.722			
Unfall mit leicht VL		3.036		5.400	
mit menschlichem Leid		22.722			
Personenschaden			97.300		
Autobahn	84.454				73.300
Autobahn mit menschlichem Leid	263.137				
Schnellstraße	134.324				109.200
Schnellstraße mit menschlichem Leid	374.123				

Tabelle 33: Unfallkostensätze für das österreichische Straßennetz

Unter Berücksichtigung einer fahrleistungsabhängigen Gewichtung kann auf Grundlage der Daten aus Tabelle 33 in der gegenständlichen Arbeit von einem mittleren Unfallkostensatz für Unfälle mit Personenschaden auf Autobahnen und Schnellstraßen von 88.400 **€/Unfall** ohne Berücksichtigung des menschlichen Leids und 272.000 **€/Unfall** mit Berücksichtigung des menschlichen Leids ausgegangen werden.

Der Wert, der zur Quantifizierung des menschlichen Leids angesetzt wird, berücksichtigt folgende Auswirkungen des Unfalls: körperliche und seelische Schmerzen, Schock, Leid, Angst, Verlust an Lebensfreude und Verminderung der Lebensqualität [71]. Für diese Wirkungen und Empfindungen besteht an und für sich kein Markt, daher wird zur Monetarisierung dieser Effekte der Zahlungsbereitschaftsansatz angewandt. Die konkreten Werte zur Berechnung des menschlichen Leids wurden der HEATCO Studie entnommen [27].

6.4.2.2. Unfallkostenrate

Für die monetäre Bewertung von Projekten lässt sich die Unfallkostenrate (U_{KR}) definieren. Sie ist der oben angeführten Berechnungsform der Unfallrate ähnlich, jedoch bietet sie Antwort auf die Frage nach den Kosten für Sach- und Personenschäden je Fahrzeug Kilometer.

Formulativ kann sie wie folgt angeschrieben werden. Die Einheit ergibt sich in der Folge zu €/1000 Fz-km. Maßgebend ist also nicht die Anzahl der Unfälle sondern das gesamte Schadenssausmaß (inklusive Unfallfolgekosten).

$$U_{KR} = \frac{10^6}{365} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n} K_i}{\sum_{i=1}^{n} JDTV_i \cdot L_i}$$

Gleichung 35

K … Summe der Kosten für Sach- und Personenschäden pro Jahr

i … betrachteter Abschnitt (n=Gesamtzahl)

JDTV …Jährlich durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke [Fz/24h]

L … Teilabschnittslänge [km]

Die Berechnung kann vereinfacht auch als Produkt aus der Unfallrate (6.4.1.2) und dem jeweiligen Unfallkostensatz (6.4.2.1) dargestellt werden.

Aus den Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel und zusätzlichen Informationen für Deutschland und die Schweiz kann eine vergleichende Tabelle der Unfallkostenrate dieser drei Länder erstellt werden (siehe Tabelle 36). Für die Schweiz sind die anzuwendenden Größen der Norm SN 640 907 [21] entnommen, hierbei kann zwischen den Verkehrsarten und der Ortslage unterschieden werden. Die Grundlagen für die Unfallkostenrate in Deutschland finden sich im Bundesverkehrswegeplan 2003 [29].

Unfallkosten**rate [€/1000 Kfz km]**	Autobahn	Schnellstraßen	A + S	Außerorts (CH)
Österreich	8,85	15,85	8,85	
Österreich mit menschlichem Leid	16,09	44,15	18,33	
Schweiz – gesamt	8,736			86,736
Schweiz – Personenverkehr	8,736			86,112
Schweiz – Güterverkehr	7,488			92,352
Deutschland	8,18	8,96		

Tabelle 34: Vergleich der Unfallkostenrate Österreich, Schweiz, Deutschland

6.4.2.3. Resümee Unfallkosten

Für die Quantifizierung der Unfallkosten liegen eine Reihe von Untersuchungen vor. Diese wurden einander gegenübergestellt und daraus folgend für die derzeit in Österreich auftretenden Unfälle Kennzahlen bestimmt.

Hieraus ergeben sich für das österreichische Autobahnen- und Schnellstraßennetz folgende Kennwerte:

- Unfallrate UR = 0,1 Unfälle / Mio Kfz km
- mittlerer Unfallkostensatz UKS = 88.400 **€/Unfall** (ohne Berücksichtigung des menschlichen Leids)
- mittlerer Unfallkostensatz UKS = 220.000 ***€/Unfall*** (mit Berücksichtigung des menschlichen Leids)
- Unfallkostenrate UKR = 8,85 **€/1000** Kfz km ohne Berücksichtigung des menschlichen Leids)
- Unfallkostenrate UKR = 18,33 ***€/1000*** Kfz km (mit Berücksichtigung des menschlichen Leids).

Diese Ansätze werden im weiteren Verlauf der gegenständlichen Arbeit zur Berechnung der Unfallkosten angewandt.

6.4.3. Einflussgrößen auf die Sicherheit eines Abschnitts

Die Hintergründe für das Zustandekommen eines Unfalls sind meistens sehr komplex. Sowohl die Straße an sich, als auch etwaige Baustellen sind nur mitwirkende Ursachen unter vielen. Sobald aber ein signifikanter Einfluss auf die Unfallursache erkannt wird, kann mit Hilfe von Korrelationsrechnungen versucht werden diesen Zusammenhang herauszuarbeiten. Einige solcher Zusammenhänge werden im Folgenden angeführt, wobei es sich rein um den Einfluss des Straßenzustands handelt, Einflüsse der Umgebung oder durch den Fahrzeuglenker selbst werden hierbei ausgeklammert. Gewisse Probleme ergeben auch sich durch die Seltenheit des Ereignisses Unfall und dessen Verteilung (Annahme: Poissonverteilung). Es fällt dadurch schwer, gut abgesicherte weitreichende Zusammenhänge zu entwickeln. Weitere Unsicherheiten können durch die Lokalisierung des Unfallorts und den zeitlichen Unterschied zwischen Unfallzeitpunkt und Zeitpunkt der dokumentierten Zustandserfassung entstehen (der Abstand der flächendeckenden Griffigkeitserfassung im österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz beträgt beispielsweise 5 Jahre).

Die Einflüsse von Baustellen und deren Auslegung werden hier nicht näher erläutert und sind in Kapitel 7.3 ausführlich dargestellt.

Für Neu- und Umplanungen von Strecken empfiehlt es sich, die Wirkung der Trassierungsparameter auf die Sicherheit eines Abschnitts zu berücksichtigen (Zusammenhang Fahrbahnbreite und Geschwindigkeit). Für die Maßnahmen lassen sich Hinweise und Checklisten in der RVS 02.02.33 [18] Verkehrssicherheitsaudit, und dem Handbuch „Sicherheitsaudit von Straßen in Österreich“ [72] finden.

6.4.3.1. Griffigkeit und Unfallrisiko allgemein

Die Griffigkeit auf dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz wird im Zuge der periodisch durchgeführten Zustandserfassung durch den RoadSTAR aufgenommen. Dieser ist mit einem modifizierten Stuttgarter Reibungstester (STURM) ausgestattet. Er misst mit einer Standardgeschwindigkeit von 60 km/h und 18 % Schlupf auf vorgenässter Fahrbahnoberfläche und wertet die Griffigkeit in 50 m Abschnitten in Form des dimensionslosen Reibungsbeiwerts $\mu_{SRM,18\%}$ aus.

Die Griffigkeit ist eine Messgröße für den Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn und in weiterer Folge auch für die Kraftübertragung, die Lenkbarkeit und den Bremsweg maßgebend. Insofern ist es naheliegend, eine erhöhte Unfallhäufigkeit (besonders bei nasser Fahrbahn, da hier die niedrigsten Reibungsbeiwerte auftreten) auch mit einer geringen Griffigkeit in Verbindung zu bringen.

Schon früh wurde in Österreich diesem Ansatz nachgegangen. Pichler [73] stellt den Zusammenhang zwischen Anzahl der Aquaplaningunfälle AQ und Verkehrsbelastung 1981 folgendermaßen dar:

$$AQ = \frac{0{,}003358 * DTV - 0{,}39 \cdot 0{,}2 \cdot 0{,}096 \cdot H}{0{,}15}$$ Gleichung 36

H ist hierbei die Wahrscheinlichkeit für eine Häufung von Nässeunfällen und abhängig vom Gleitbeiwert, er kann aus Abbildung 34 entnommen werden. Die Anzahl der Aquaplaningunfälle setzt sich aus dem Produkt der Unfalldichte („zu erwartende Unfälle je 1km“) und der Häufigkeit der Nässeunfälle zusammen. Der Zusammenhang wurde ursprünglich für einen Gültigkeitsbereich von bis zu 12.000 Kfz/24h definiert.

Der Einfluss des Gleitbeiwerts auf die Anzahl der Aquaplaningunfälle tritt erst ab einem Wert kleiner 0,4 auf. Darüber liegt das Ergebnis konstant bei 9,6 % der Unfalldichte. Die Bezeichnung Gleitbeiwert μg bezieht sich auf die Messung der Griffigkeit mit blockiertem Rad.

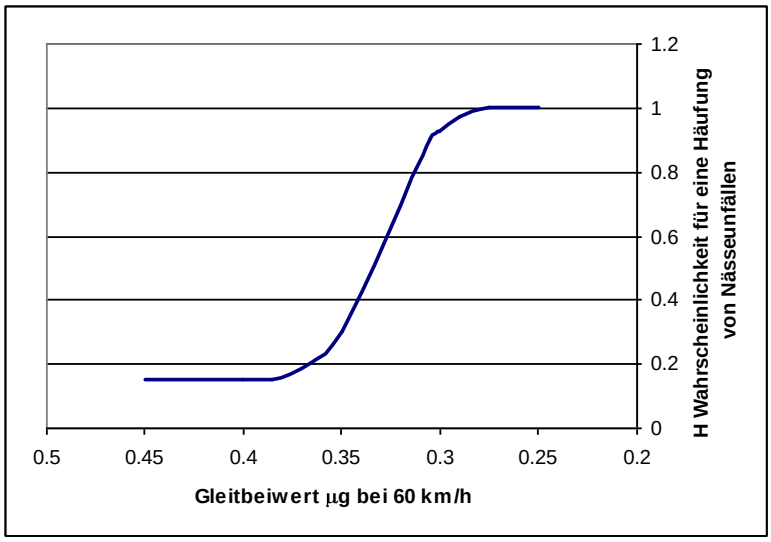


Abbildung 34: Zusammenhang Gleitbeiwert μg und Unfallhäufungswahrscheinlichkeit H nach [73]

Problematisch erscheint einerseits, dass sich der Gleitbeiwert auf Griffigkeitsmessungen durch den Stuttgarter Reibungsmesser mit blockiertem Rad bezieht und eine Umrechnung auf $SRM_{Schlupf}$ mit relativ großen Unsicherheiten belegt ist. Vergleicht man beispielsweise das Ergebnis mit den Klassengrenzen der MB-Griff [74], so tritt eine erhöhte Unfallwahrscheinlichkeit erst ab dem Schwellenwert (Griffigkeitsklasse 4,5) auf. Andererseits wird die definierte Verkehrsbelastung auf dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz durchaus überschritten.

Insofern kann mit diesem Modell der Einfluss für die heute auftretenden Griffigkeitswerte auf die Unfallwahrscheinlichkeit nur mehr bedingt abgebildet werden.

Der Einfluss der Griffigkeit auf die Unfallrate macht sich jedoch auch bei höheren Griffigkeitswerten bemerkbar, dies kann beispielsweise der Arbeit von Stütze [8] entnommen werden. Grundlagen für diese Arbeit stellen die Zusammenhänge von Schulze / Dames [75] und Kamplade / Schmitz [76] dar, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Eine Herausforderung bei dem Vergleich von Griffigkeitswerten stellt die Umrechnung der Messgrößen von verschiedenen Aufnahmegeräten auf eine gemeinsame Darstellungsgröße dar. Hierzu kann auf den im Zuge von Vergleichsmessungen von Hiersche (siehe [8]) entwickelten Zusammenhang zurückgegriffen werden.

$$\mu_{SCRIM\ 80}=1{,}076*\mu_{SRM\ 80,Block}+0{,}006 \qquad R=0{,}873 \qquad \text{Gleichung 37}$$

Für den Stuttgarter Reibungsmesser (SRM) kann nach der Arbeitsanleitung für Griffigkeitsmessungen mit dem SRM [77] eine Geschwindigkeitskorrektur definiert und die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aufgenommenen Messwerte in μ_{SRM60} umgerechnet werden.

$$\mu_{SRM\ soll}=\mu_{SRM\ ist}+0{,}09*(V_{ist}-V_{soll})/20 \qquad \text{mit } V_{soll} = 60 \text{ km/h;} \qquad \text{Gleichung 38}$$

Im gegenständlichen Projekt wird V_{ist} mit 80 km / h angesetzt.

Aufgrund großflächig durchgeführter Messungen und Unfallauswertungen konnten Schulze und Dames einen Zusammenhang zwischen Reibungsbeiwert (Stuttgarter Reibungsmesser mit blockiertem Rad bei einer Geschwindigkeit von 80 km / h) und der relativen Unfallhäufigkeit bei Nässe finden. Es wurden nur jene Strecken in die Auswertung aufgenommen, auf welchen im Beobachtungszeitraum mehr als 10 Unfälle mit Personen- bzw. schweren Sachschäden

stattgefunden haben. Die untersuchten Strecken wiesen eine Griffigkeit zwischen 0,2 und 0,55 auf.

A_N=-45,72 ln($\mu_{SRM\ 80}$)-3,12 [%] Gleichung 39

mit A_N = relative Unfallhäufigkeit bei Nässe

Eine ähnliche Fragestellung wurde durch Kamplade und Schmitz beantwortet. Sie führten ebenso Messungen an unfallträchtigen Streckenabschnitten (mehr als 10 Unfälle) mit einem blockierten Rad (SRM) bei einer Geschwindigkeit von 80 km / h durch. Die gemessenen Griffigkeitswerte lagen zwischen 0,2 und 0,6. Vergleichsmessungen mit einem SCRIM-Gerät ergaben bei gleicher Unfallhäufigkeit etwas höhere Reibungsbeiwerte.

$A_N = 16{,}943\ \mu_{SRM\ 80}^{-0{,}7975}$ [%] Gleichung 40

mit A_N = relative Unfallhäufigkeit bei Nässe

Die beiden angeführten Zusammenhänge zwischen relativer Unfallhäufigkeit und Reibungsbeiwert sind zum besseren Vergleich in Abbildung 35 aufgetragen. Die Griffigkeit ist hierbei durch den Reibungsbeiwert SRM bei 80 km / h angegeben.

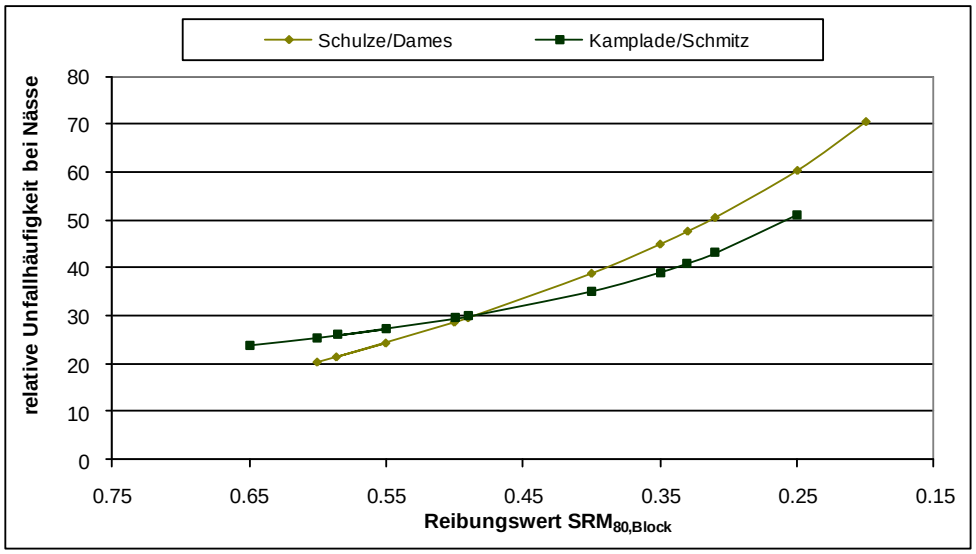


Abbildung 35: Zusammenhang Reibungswert und relativer Unfallhäufigkeit bei Nässe ($SRM_{80,Block}$)

Auch eine aktuellere Arbeit des Zentrums für Logistik und Verkehrsplanung (ZLV) [78] stellt zur monetären Bewertung der Verkehrssicherheit die im Zuge der deutschen Zustandserfassung und –bewertung aufgenommenen SCRIM-Werte (Seitenreibungsbeiwert bei einer Normierungsgeschwindigkeit von 80 km / h) in funktionalen Zusammenhang zur Unfallrate:

$$UR = 2{,}42 * 0{,}09^{SCRIM}$$ [U/(10^6 Kfz km] Gleichung 41

Zum Vergleich des Verlaufs der Unfallrate kann der Zusammenhang auch auf $\mu_{SRM,80}$ umgerechnet kann werden:

$$UR = 2{,}42 * 0{,}009^{1.076 \cdot \mu_{SRM,80-Block} + 0.006}$$ [U/(10^6 Kfz km] Gleichung 42

Dieser Zusammenhang wurde aus den Zustandswerten der Griffigkeit und der Unfallrate entwickelt, wodurch eine größere Unsicherheit eingebracht wurde. Die sich ergebenden Unfallraten liegen deutlich über den in Österreich auftretenden, Der Verlauf ist in Abbildung 36 dargestellt.

Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Zusammenhänge statistisch schwach und nur im mittleren Bereich (nur unterhalb des Warnwertes) abgesichert sind. Auch in anderen Studien wie z.B. Maerschalk [100] werden Zusammenhänge wie in Abbildung 36 (Messwerte und

Ausgleichsfunktion) dargestellt und können als Grundlage für den Zusammenhang von Griffigkeit und Unfallkosten dienen, jedoch immer mit Verweis auf die vorhandene Unsicherheit.

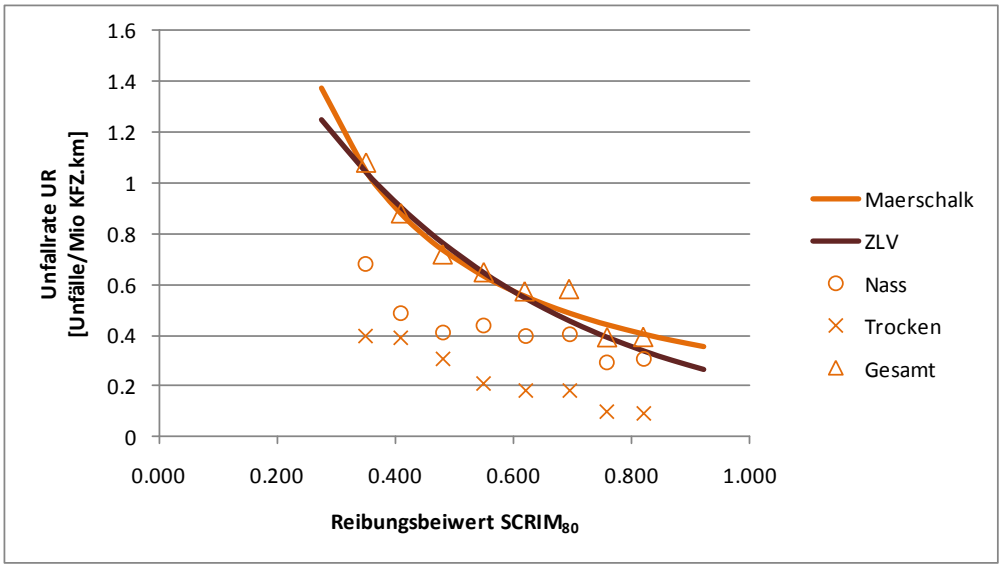


Abbildung 36: Unfallrate in Abhängigkeit der Griffigkeit; Grundlagedaten [100], [79]

Auch französischen Studien [80] können Zusammenhänge zwischen Griffigkeit und Unfallhäufigkeit entnommen werden. Das dabei eingesetzte Messsystem unterscheidet sich jedoch von dem in Österreich in Verwendung stehenden. Delanne und Travert führten Vergleiche von unterschiedlichen Messergebnissen zum Zusammenhang zwischen „erhöhtem Unfallrisiko bei Nässe“ und SFC (gemessen mit dem SCRIM bei 60 km / h) durch. Es konnte ein erhöhtes Risiko bei geringeren Griffigkeiten bestätigt werden, jedoch ergab sich in diesen Bereichen auch eine große Spreizung des zusätzlichen Risikos.
Viner [81] hat 2005 eine Analyse von Unfalldaten verschiedenster Straßenkategorien durchgeführt. Sie kam zu dem Schluss, dass unabhängig von der Straßenkategorie ein Zusammenhang von Unfallrisiko (Mean Accident Risk) und Griffigkeit festgestellt werden kann. Er ist jedoch auf niederrangigeren Strecken deutlicher als auf Autobahnen. Das Ergebnis für eine ebene, einstreifige Richtungsfahrbahn ist in Abbildung 37 dargestellt. .

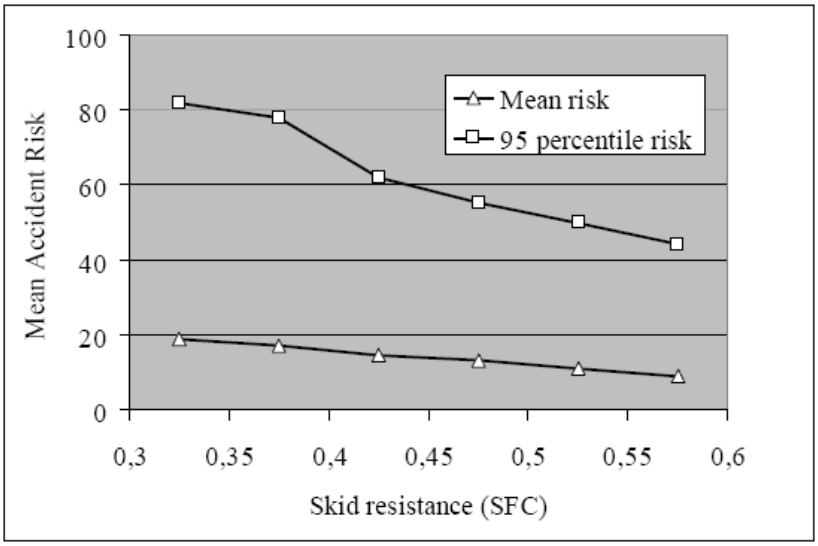


Abbildung 37: Zusammenhang Unfallrisiko und Griffigkeit aus [81]

Als Einflussfaktoren sind neben der Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche auch der Fahrbahnzustand (nass / tocken) bzw. etwaige Verunreinigungen zu berücksichtigen. Jedoch

kommen aufgrund der guten Straßenentwässerung auf dem Autobahnen- und Schnellstraßennetz in Großbritannien Wasserfilmdicken von mehr als 1 mm selten vor.

Um die vorher angesprochenen Probleme zu vermeiden, gehen Johannsen et al. [82] den Weg der Bewertung des notwendigen Kraftschluss-Niveaus und stellen im Anschluss daran die Korrelation zum Unfallgeschehen her. Es konnte schon Anfang der 70er Jahre durch Wehner et al. [75] nachgewiesen werden, dass der Anteil der Unfälle auf nasser Fahrbahn mit schlechter werdender Griffigkeit zunimmt. Ein konkreter Zusammenhang soll durch den erforderlichen Kraftschluss hergestellt werden. Dieser wird über ein vereinfachtes fahrdynamisches Modell berechnet und ist von der Geometrie der betrachteten Strecke (Kurvenradius, Quer- und Längsneigung) sowie der Geschwindigkeit abhängig. Durch den Vergleich mit dem vorhandenen aktivierbaren Reibungsbeiwert kann die Griffigkeitsreserve ermittelt werden und in Relation zur Unfallhäufigkeit gesetzt werden. Das Ergebnis (siehe Abbildung 38) stellt einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Griffigkeitsreserve und dem Anteil der Unfallkosten auf nasser / feuchter Fahrbahn her (R^2=0,87). Dies bestätigt auch die zuvor dargestellten Zusammenhänge, die Funktion selbst kann für die Anwendung in Österreich jedoch nicht verwendet werden, da die Griffigkeitsreserve auf dem Netz nicht bestimmt wird.

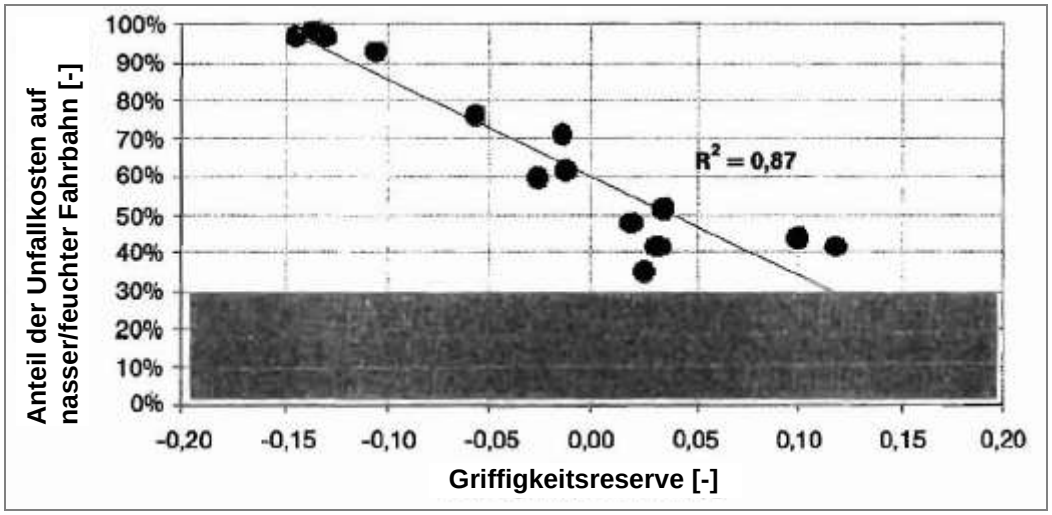


Abbildung 38: Zusammenhang Griffigkeitsreserve und Unfallkosten [82]

Auch in der Arbeit von Mauer [83] wird gezeigt, dass eine geringe Griffigkeit nur dann sicherheitsrelevant wird, wenn zwischen Griffigkeitsbedarf und Griffigkeitsangebot ein Defizit besteht.

Wenngleich bei dem direkten Zusammenhang von Reibungsbeiwert und Unfallhäufigkeit Unsicherheiten eingebracht werden, so besteht ohne Zweifel ein Zusammenhang dieser Größen. Steinauer [84] zeigt in seinen Ergebnisse deutlich den Zusammenhang der Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Nass-Unfällen und dem jeweils vorhandenen Griffigkeitsniveau (dargestellt in Abbildung 39).

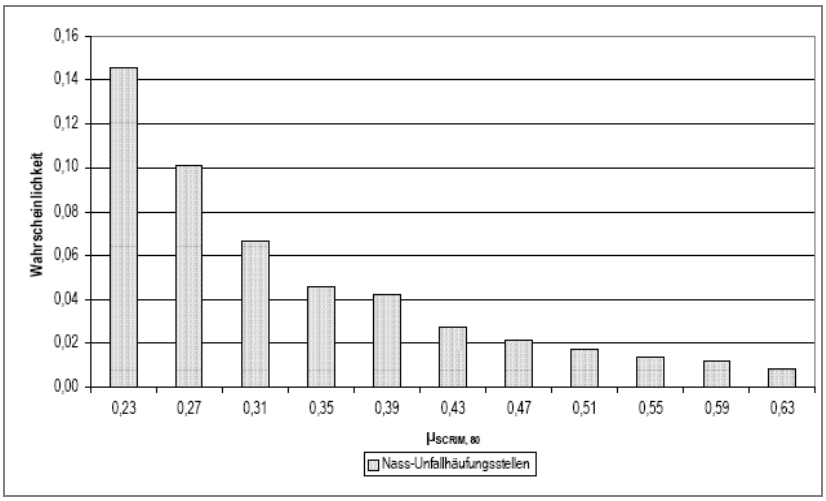


Abbildung 39: Wahrscheinlichkeit für das Vorhandensein von Nass-Unfällen in Abhängigkeit von der Griffigkeit des rechten Fahrstreifens [84]

6.4.3.2. Griffigkeit und Unfallhäufigkeit in Österreich

Die Grundlage für die weitere Betrachtung bilden die Griffigkeitsmessungen auf dem österreichischen hochrangigen Straßennetz, dies beinhaltet alle Autobahnen und Schnellstraßen (A+S) sowie B-Straßen (damals Bundesstraßen B-Netz). Diese Daten wurden von Tiefenbacher [85] ausgewertet und die durchschnittlichen Unfallraten in den jeweiligen Griffigkeitsklassen einander gegenüber gestellt. Die Zusammenhänge wurden getrennt nach Netzkategorie entwickelt. Auch hier kann generell ein Zusammenhang von Griffigkeit und Unfallhäufigkeit festgestellt werden, jedoch ist ein enger funktionaler Zusammenhang daraus nicht ableitbar.

Die Teilauswertung für die Unfallraten bei Nässeunfällen ist in Abbildung 40 dargestellt. Hierbei wird in Unfallhäufungsstellen (wie in Abschnitt 6.4.1.4 definiert) und in homogene Griffigkeitsabschnitte mit einer Länge von mindestens 200 m (mit mindestens einem Unfall im homogenen Griffigkeitsbereich) unterschieden.

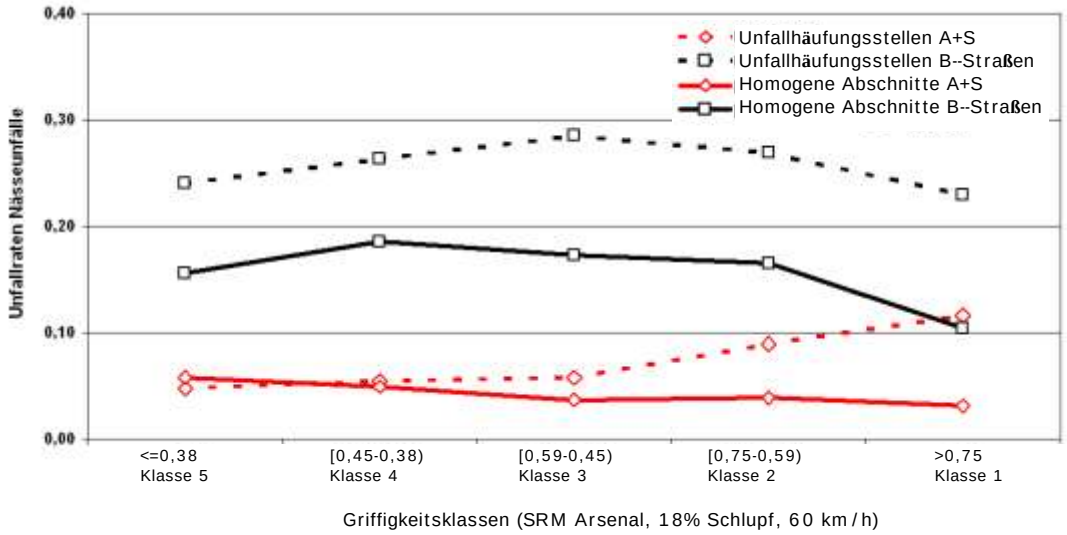


Abbildung 40: Unfallraten Nässeunfälle mit Personenschaden [85]

Die Darstellung der Unfälle mit Personenschaden in Abbildung 40 zeigt eine erhöhte Unfallrate vor allem in der Griffigkeitsklasse 4 (schlecht) und eine geringere Unfallrate in der Klasse 5 (sehr schlecht) auf den homogenen Abschnitte der B-Straßen. Dies weist darauf hin, dass neben der Griffigkeit auch noch weitere wesentliche Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen

vorhanden sind. Eventuell sind diese besonders schlechten Abschnitte den Fahrzeuglenkern bekannt und es wird in diesen Bereichen mit besonderer Vorsicht gefahren. Der Vergleich des Anteils an Nässeunfällen mit den Griffigkeitsklassen zeigt auf dem B-Straßennetz durchaus einen Zusammenhang. Auf dem A+S Netz steigt die Unfallrate der Nässeunfälle bei schlechterem Griffigkeitszustand nur leicht an.

Da aus der Untersuchung von Tiefenbacher kein funktionaler Zusammenhang zwischen Unfallrate und Griffigkeit gewonnen werden konnte, soll in der Folge überprüft werden, ob die Ergebnisse von Schulze / Dames bzw. Kamplade / Schmitz auf das österreichische Netz angewandt werden können. Erschwerend kommt hinzu, dass die Griffigkeit in Deutschland mit dem Griffigkeitswert SRM mit blockiertem Rad und einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km / h ($SRM_{80,Block}$) aufgenommen wird, hingegen beziehen sich die österreichischen Angaben auf Messungen mit dem RoadSTAR. Dieser nimmt die Griffigkeit bei einer Geschwindigkeit von 60 km / h unter einem Schlupf von 18% auf. Eine direkte Umrechnung ist nicht möglich, daher wird die Verknüpfung über die jeweiligen Zustandsklassen vorgenommen. Die österreichischen Werte können auf Grundlage der RVS 13.01.15 [18] den Klassen 1 bis 5 zugeteilt werden, ebenso ermöglicht dies das MB Griff [74] für die deutschen Werte.

In Abbildung 41 sind die Griffigkeitswerte der Zustandsklassen 1 (sehr gut) bis 5 (sehr schlecht) entsprechend den deutschen Ergebnissen (Schulze und Kamplade) sowie die relativen Unfallhäufigkeiten in diesen Griffigkeitsklassen dargestellt. Der Zusammenhang nach Schulze / Dames weist leicht höhere Unfallhäufigkeiten auf.

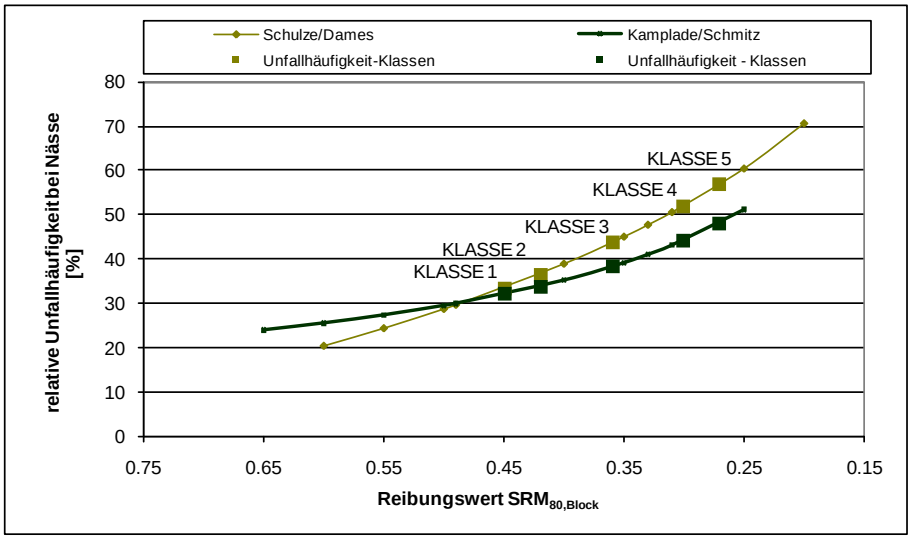


Abbildung 41: relative Unfallhäufigkeit bei Nässe + Griffigkeitsklassen

Von Interesse sind in diesem Projekt besonders die zusätzlichen Unfälle zufolge Griffigkeitsverlust. Hierfür werden zunächst die Unfallraten in Abhängigkeit der Griffigkeit benötigt, die dann zur Generierung eines Relativwerts auf die Unfallraten in der Griffigkeitsklasse 1 bezogen werden.

Wie von Stütze [8] vorgeschlagen, kann unter der Annahme einer konstanten Unfallrate bei trockenen Bedingungen und einem Ausgangswert der Unfallrate für das österreichische Autobahnen- und Schnellstraßennetz die Funktion von Schulze / Dames und Kamplade / Schmitz auf die Zustände in Österreich normiert werden. Die Ausgangswerte können aus Tiefenbacher [85] übernommen werden (Unfallrate in der Klasse 1: UR=0,128 Unfälle / Mio.KfzKm). Die Griffigkeitswerte beziehen sich stets auf die Zustandsklassen.

Das Ergebnis dieser zwei Schritte ist in Abbildung 42 dargestellt. Ausgangsbasis bildet für alle drei Verläufe die oben festgelegte Unfallrate in der Klasse 1. Ausgehend von dieser können die absoluten Unfallzuwächse (zusätzlichen Unfälle zufolge schlechterer Griffigkeit) für die beiden

Modelle (Schulze und Kamplade) und die österreichischen Daten für die Zustandsklassen 2 bis 5 angeführt werden. In der Abbildung ist Klasse 1 ganz links und Klasse 5 ganz rechts dargestellt, die deutschen Klassengrenzen sind unterhalb, die österreichischen oberhalb der Graphik angeführt.

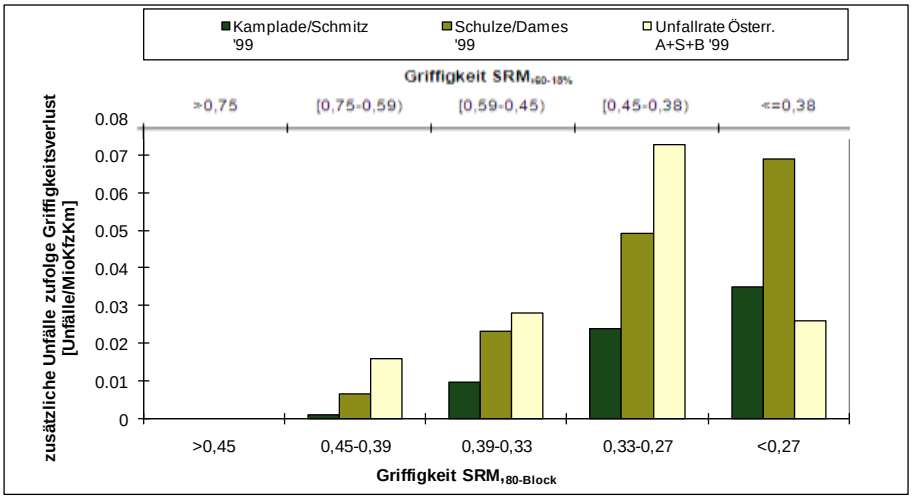


Abbildung 42: zus. Unfälle zufolge Griffigkeitsverlust: Vergleich Studien [8] + UR Österreich [85, 86]

Aufgrund dieser Auswertung wird im Weiteren der Ansatz von Schulze / Dames verwendet. Dieser bildet die Abhängigkeit des Unfallgeschehens entsprechend den österreichischen Daten eher ab. Es ergeben sich leichte Abweichungen in den Klassen 1 bis 4 (Unterschätzung der Unfallrate) und eine Überschätzung in der Klasse 5 (wobei auch bei der Auswertung der Originaldaten nicht eindeutig geklärt werden konnte, wodurch es zu dem Absinken der Unfallrate in der Klasse 5 kommt). Die Ergebnisse wurden auch mit jenen der Studien von Maerschalk [100] und des ZLV [79] verglichen, jedoch ist bei diesen ein wesentlich höheres Unfallniveau und ein steilerer Anstieg mit sinkender Griffigkeit festzustellen.

Die Unfallrate auf dem österreichischen Autobahnen und Schnellstraßennetz ist seit der Studie 1999 laufenden Veränderungen unterworfen. Nach Kapitel 6.4.1.2 kann aktuell von einer mittleren Unfallrate im österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz von 0,1 Unfällen / Mio.Kfz km ausgegangen werden.

Diese Ausgangswerte übertragen auf den Zusammenhang von Unfallrate und Griffigkeit von Schulze / Dames können wie folgt angeschrieben werden:

$$UR_{(SRM\,80)} = \frac{6{,}346}{103{,}12 + 45{,}72 \cdot \ln(\mu_{SRM,80})}$$ Gleichung 43

Nachdem sich diese Grundlage auf die in Deutschland gemessene Größe (SRM_{80}-Wert) bezieht, erfolgt auch hier die Einteilung in die Zustandsklassen gemäß MB Griff [74]. Die Zustandsklassen werden jedoch als die den in Österreich gültigen äquivalent angesehen, dem entsprechend sind in Abbildung 43 auch zwei Achsbeschriftungen angeführt.

Die zusätzlichen Unfälle beziehen sich auf den Grundwert der Zustandsklasse 1 von dem aus für die Klassen 2 bis 5 die Zahl der zusätzlichen Unfälle bestimmt werden kann.

Die zugehörigen Unfallkosten können über den Unfallkostensatz, der - wie in Kapitel 6.4.2.1 näher erläutert - mit 88.400 €/Unfall angesetzt werden kann, direkt verknüpft werden. So ist es möglich, in Abhängigkeit der Griffigkeitsklasse zusätzliche Unfallkosten direkt zu berechnen oder aus Abbildung 43 abzulesen.

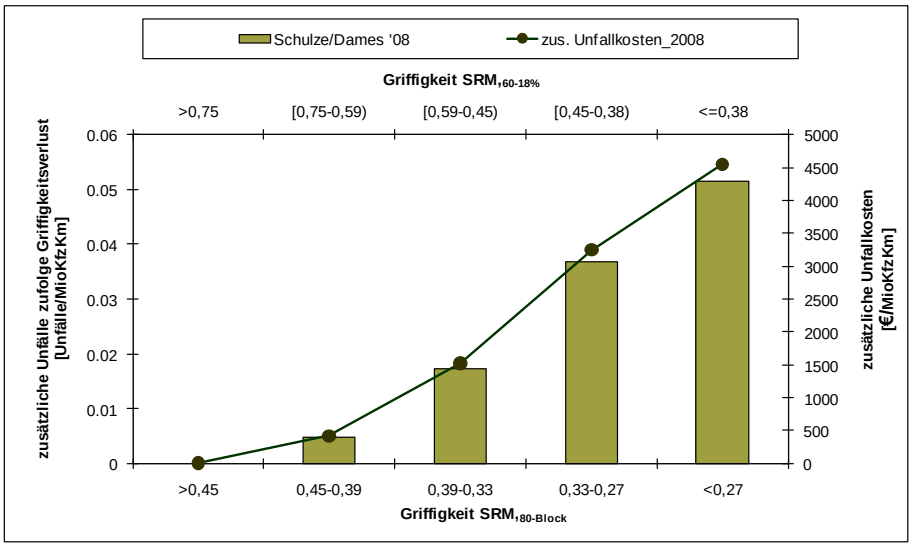


Abbildung 43: aktualisierte zusätzliche Unfälle und Unfallkosten zufolge Griffigkeitsverlust

Dieser Zusammenhang wird in der Folge den gegenständlichen Berechnungen zugrunde gelegt, es ist aber auf die große Unsicherheit hinzuweisen. Auf dem Gebiet der Verknüpfung von Straßenzustand und Verkehrssicherheit wurden alle vorhandenen Forschungsarbeiten zusammengetragen, dennoch konnte kein einwandfreier Zusammenhang gefunden werden. Hier wird es notwendig sein, weitere Forschungsarbeit zu leisten, um die Einflussgrößen auf die Verkehrssicherheit optimal abbilden zu können.

6.4.3.3. Längsebenheit und Unfallhäufigkeit

Trotz intensivem Literaturstudium konnten zur Fragestellung des Zusammenhangs zwischen Längsebenheit und Sicherheit nur die folgenden beiden Studien gefunden werden. Wie schon eingangs erwähnt ist es eine Vielzahl von Parametern, die auf die Verkehrssicherheit eines Abschnitts wirken. Der Einfluss der Längsebenheit scheint jedoch bei mitteleuropäischen Straßen nicht signifikant genug, um ihn als gesondertes Kriterium anzusetzen.

In Untersuchungen der Norwegischen und Schwedischen Straßenverwaltungen zur Verbesserung der Straßenerhaltung [87] wurde der Zusammenhang zwischen Straßenzustand und Einfluss auf den Straßennutzer bzw. die Straßenverwaltung herausgearbeitet. Neben der Erarbeitung von Wirkungsschemata des Winterdienstes war ein maßgebliches Ergebnis dieser Studie der Zusammenhang von Längsebenheit (in Form des IRI) und der relativen Unfallhäufigkeit (siehe Abbildung 44). Diese Auswertungen konnten auf Basis der Straßendaten des norwegischen Netzes durchgeführt werden. Überraschenderweise konnte eine Reduktion der Unfälle bei höherer Längsunebenheit festgestellt werden. Vermutlich beruht dieser Effekt auf der geringeren Fahrgeschwindigkeit im Vergleich zu Strecken mit einer geringeren Längsunebenheit.

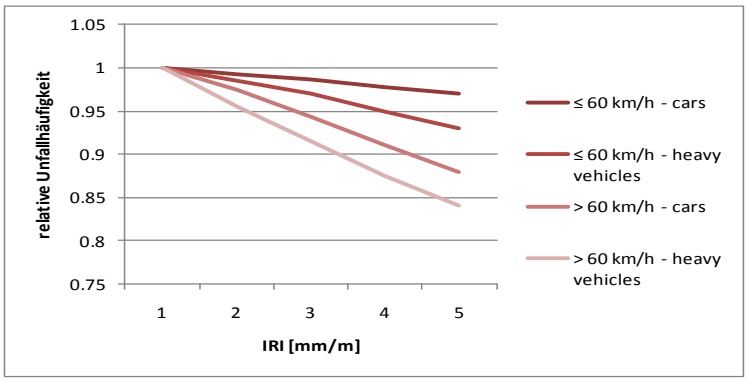


Abbildung 44: Relative Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit der Längsebenheit [87]

Die Daten des schwedischen Straßennetzes [88] wurden mit Hilfe von linearen Regressionen auf den Zusammenhang zwischen Unfallgeschehen und Längsebenheit hin ausgewertet (siehe Abbildung 45). Dieser gilt für Straßenabschnitte mit einem JDTV von mehr als 12.000 Fz / 24h und wurde für Unfälle mit Personenschäden und Unfälle mit Sachschäden erarbeitet. Weiters konnte im Zuge dieser Arbeit festgestellt werden, dass nicht nur das Niveau des IRI sondern auch dessen Variation ausschlaggebend ist.

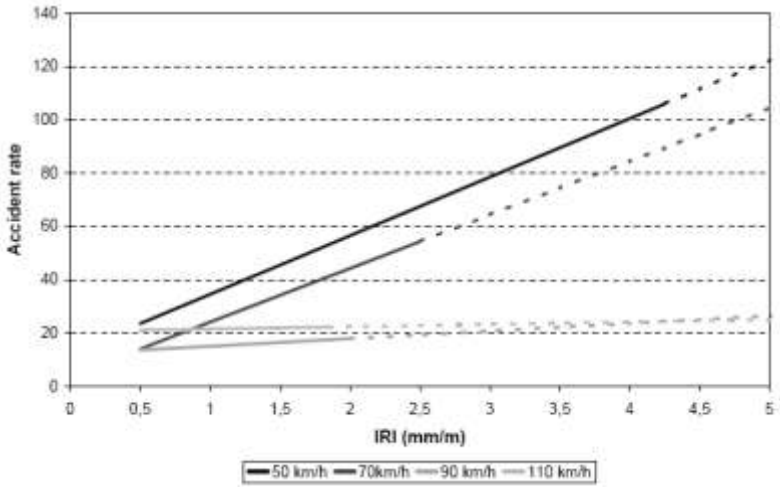


Abbildung 45: Unfallrate in Abhängigkeit der Längsebenheit [88]

Einerseits die Tatsache, dass die Anzahl der Arbeiten zu diesem Themenbereich sehr gering ist und andererseits, dass die beiden dargestellten Studien gegensätzliche Ergebnisse liefern, hat zur Folge, dass der Einfluss der Längsebenheit in der gegenständlichen Arbeit nicht weiter betrachtet wird. Sollte sich ein entsprechender Bedarf auch für das hochrangige europäische Straßennetz zeigen, wäre zu dieser Fragestellung weitere Forschungsarbeit notwendig.

6.4.3.4. Spurrinnentiefe / fiktive Wassertiefe und Unfallhäufigkeit

Für die österreichischen Bundesstraßen wurden schon früh die Auswirkungen von Griffigkeitsproblemen und Spurrinnen in Form einer erhöhten Unfallhäufigkeit berücksichtigt. Mitte der 80er Jahre wurden Kostensätze zur Berücksichtigung von erhöhter Unfallgefahr bei Spurrinnen oder Griffigkeitsmängeln veröffentlicht [89]. Auf dieser Grundlage ist es möglich, Unfallfolgekosten zufolge des Straßenzustands zu ermitteln:

$$K_{USp\ oder\ UG} = \frac{k_{USp\ oder\ UG} \cdot DTV \cdot 365}{1000 \cdot B}$$ Gleichung 44

K_{USp} ... erhöhte Unfallfolgekosten je m²

$k_{USp\ oder\ UG}$ = Unfallfolgekostensatz [€/km.1000Kfz], zufolge Spurrinnen (USp) oder Griffigkeit (UG)

B = Fahrbahnbreite

Beispielhaft wird in Tabelle 35 der Kostensatz in Abhängigkeit der Spurrinnentiefe angeführt. Die Parameter DTV und B sind jedoch zur Entwicklung einer Maßnahmenstrategie im PMS nicht maßgebend. Der Kostensatz selbst bezieht sich auf Unfallgrundkosten, die nicht mehr den aktuellen Werten entsprechen (8.750 €/Unfall). Aus diesen Gründen kommt der dargestellte Ansatz in der gegenständlichen Arbeit auch nicht weiter in Betrachtung.

Spurrinnentiefe [mm]	Kostensatz k_{USp} **[€/km 1000 Kfz]**
15	0,26
20	0,39
30	0,64

Tabelle 35: Unfallkostensätze bei vorhandener. Spurrinnen [89]

In Bereichen mit guter bis mittlerer Griffigkeit konnte Kamplade [90] für den Einfluss der Spurrinnentiefe auf die Unfallrate feststellen, dass diese eine sinkende Tendenz bei steigender fiktiver Wassertiefe aufweist. Bei schlechter Griffigkeit tritt dieser Effekt erst bei großen Wasserfilmtiefen auf (siehe Abbildung 46). Dies ist vermutlich auf die das Aquaplaningrisiko überkompensierende Fahrweise zurückzuführen, durch die erhöhte Aufmerksamkeit und die reduzierte Geschwindigkeit sinkt auch die Anzahl der Unfälle. Der abgebildete Zusammenhang bietet die Möglichkeit, das Zusammenwirken von Griffigkeit und Unebenheit in Querrichtung (abgebildet durch die fiktive Wasserfilmtiefe) zu beurteilen. Eine gute Griffigkeit muss somit noch kein Garant für eine niedrige Unfallrate sein. Der Einfluss der Griffigkeit auf die Unfallrate bei nasser Fahrbahn ist dagegen bei allen Spurrinnenzuständen sehr stark ausgeprägt [91] (vgl. Kapitel 6.4.3.1).

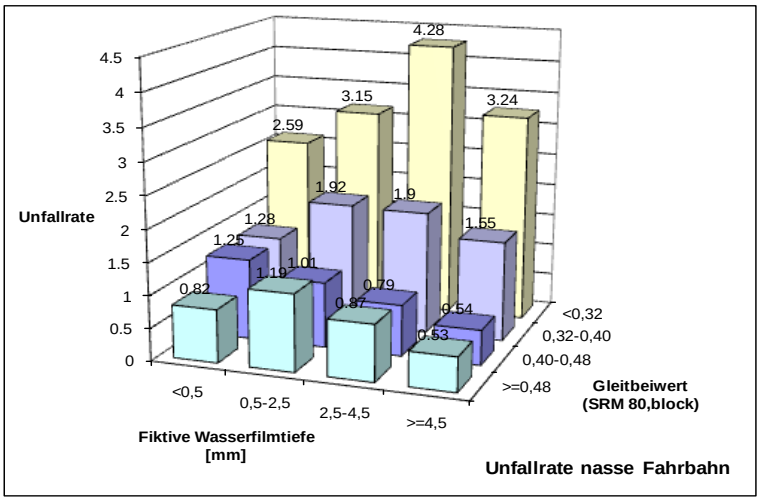


Abbildung 46: Unfallrate bei nasser Fahrbahn [90]

Aus der oben erwähnten Nordischen Studie [87] konnte auch ein Zusammenhang von Spurrinnentiefe und Veränderung der Unfallhäufigkeit entwickelt werden. Dieser macht sich ab einer Spurrinnentiefe von 5 mm bemerkbar und ist in Abbildung 47 dargestellt. Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Zustandsgrößen (z.B. Griffigkeit und Spurrinnen) wurden bei dieser Studie nicht untersucht. Dies erschwert jedoch einen zielführenden Einsatz der Zusammenhänge.

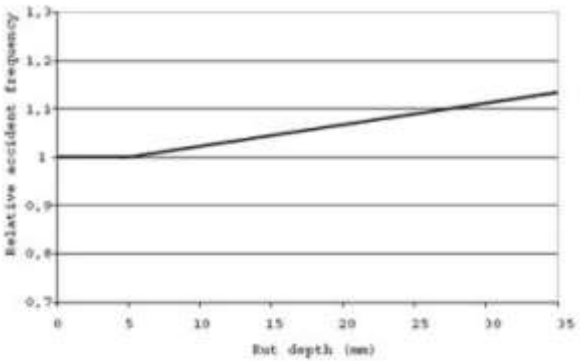


Abbildung 47: Relative Unfallhäufigkeit in Abhängigkeit der Spurrinnentiefe [87]

Auch im österreichischen Straßennetz wurde versucht, unterschiedliche Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen zu isolieren und formulativ darzustellen. Hierfür wurden von Nowakowski [92] in den frühen 90er Jahren multivariate Regressionsauswertungen der Zustands- und Unfalldaten des österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetzes durchgeführt. Ermittelt wurde der Einfluss von ca. 30 unterschiedlichen Faktoren auf die Unfallrate, wobei sich die Griffigkeit und in Kombination mit der Kurvigkeit auch die Spurrinnentiefe als signifikante Einflussgrößen herausstellten. Die Unfallrate steht jedoch nur in Form der Summe der Teilgrößen bezogen auf die einzelnen Einflussfaktoren zur Verfügung und kann nicht direkt für das gegenständliche Projekt verwendet werden. Im persönlichen Gespräch mit Herrn Nowakowski konnten die Ergebnisse nochmals erläutert und die Trends der Studie analysiert werden. Jedoch können nur diese generellen Aussagen und keine formulativen Darstellungen übernommen werden.

6.4.3.5. Resümee

Das Unfallaufkommen eines Abschnitts ist von vielen unterschiedlichen Parametern abhängig, unter anderen hat der Straßenzustand maßgeblichen Einfluss. Aus den dargestellten Untersuchungen lässt sich ableiten, dass vorrangig die Griffigkeit der Straßenoberfläche die Unfallhäufigkeit beeinflusst, jedoch auch die Wirkung der Querebenheit (Spurrinnentiefe oder fiktive Wasserfilmtiefe) kann quantifiziert werden.

Für die Anwendung im gegenständlichen Projekt wurde in Kapitel 6.4.3.2 auf Grundlage der in der Literatur vorgefundenen Ansätze sowie der österreichischen Daten ein Zusammenhang der Griffigkeitsklassen mit der auftretenden Unfallrate entwickelt. Im Weiteren kann dieser Zusammenhang mit den Ergebnissen von Kamplade (Unfallrate - Fiktive Wasserfilmtiefe - Griffigkeit) erweitert werden. Wegen der in Österreich fehlenden Auswertung der fiktiven Wasserfilmtiefe muss vorerst die Zustandsklasse Spurrinnen als Äquivalent zur Zustandsklasse fiktive Wasserfilmtiefe verwendet werden.

Konkret wird der Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Unfallrate aus Kapitel 6.4.3.2 für eine gute Querebenheit (SR-Klasse 1) angesetzt. Ausgehend von diesen Werten können mit Hilfe der Veränderung der Unfallrate zufolge Querebenheitsproblemen nach Kamplade [90] für das österreichische Autobahnen- und Schnellstraßennetz zusätzliche Unfallraten entwickelt werden. Um den Zusammenhang auch tatsächlich anwenden zu können, sind noch 2 Ergänzungen notwendig. Erstens sind in der Originalliteratur keine Werte für die Zustandsklasse 4 angeführt, diese müssen interpoliert werden. Zweitens erfolgt eine Glättung der Kurven für die Spurinnenklasse 2 und 3, da ein Absinken der Unfallrate in der Griffigkeitsklasse 2 nicht plausibel ist. Dieser Wert wird daher angepasst und als SR-Klasse-mod in Abbildung 48 dargestellt.

In Griffigkeitsklasse 2 weisen auch Spurrinnenklassen 3 bis 5 sehr geringe Unfallraten auf, dies kann vermutlich auf die Überkompensation des schlechten Spurrinnenzustands durch den Fahrzeuglenker zurückgeführt werden. Zur vollständigen Klärung dieses Verhaltens besteht aber noch weiterer Forschungsbedarf.

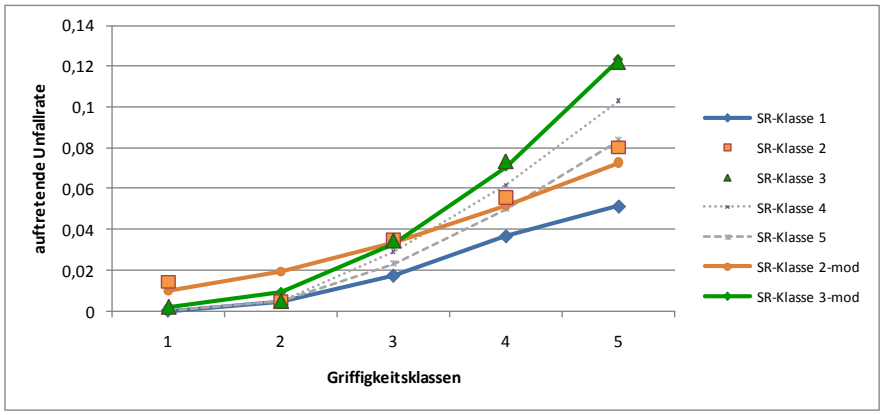


Abbildung 48: Glättung des Verlaufs der griffigkeits- und spurrinnenbedingten zusätzlichen Unfallrate

Das Ergebnis, dargestellt in Abbildung 49, wird in der Folge in der gegenständlichen Arbeit verwendet. Es bietet somit die Möglichkeit, auf Grundlage des in Österreich vorherrschenden Unfallniveaus die zusätzlichen Unfälle aufgrund der jeweiligen Griffigkeits- und Spurrinnenklasse zu ermitteln. Für die monetäre Bewertung dieser Wirkung kann diese zusätzliche Unfallrate mit dem mittleren Unfallkostensatz (siehe 6.4.2.1) multipliziert werden und es ergeben sich die zugeordneten zusätzlichen Unfallkosten (siehe Tabelle 36). Diese auftretenden Unfallkosten können mit den anderen zustandsbedingten Nutzerkosten wie Zeit- und Betriebskosten verglichen bzw. für eine Gesamtkostenaufstellung auch aufsummiert werden.

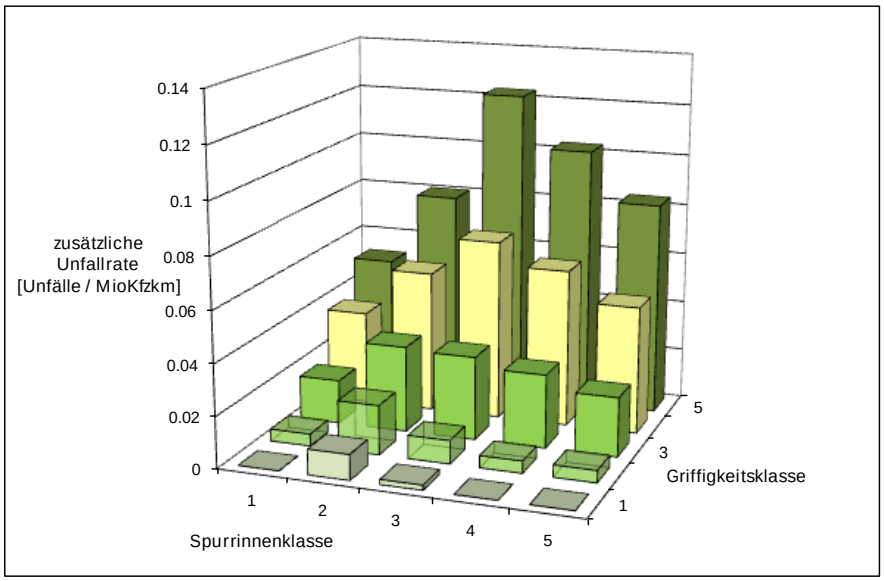


Abbildung 49: zusätzliche Unfallrate zufolge Griffigkeitsverlust und Spurrinnen

zusätzliche Unfallkosten [€/Mio.Kfz km]					
Griffigkeits-klasse	Spurrinnenklasse				
	1	2	3	4	5
1	0	875	171	0	0
2	419	1.706	804	419	419
3	1.523	2.979	2.891	2.548	2.049
4	3.247	4.921	6.250	5.458	4.422
5	4.547	7.091	10.882	9.094	7.387

Tabelle 36: zusätzliche Unfallkosten zufolge Griffigkeitsverlust und Spurrinnenbildung

7. BAUSTELLENFOLGEKOSTEN

Zur Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen müssen über einen gewissen Zeitraum Baustellen eingerichtet werden. Diese haben durch die Reduktion von Fahrstreifen, deren Verschwenkungen oder Einengungen Auswirkungen auf den Verkehrsfluss und somit auf die Geschwindigkeit und Sicherheit der Verkehrsteilnehmer. Die dadurch entstehenden Wirkungen auf den Straßennutzer sollen im Folgenden aufgezeigt und so weit wie möglich auch quantifiziert werden. Hierbei handelt es sich vorrangig um die Generierung eines erhöhten Zeitbedarfs sowie einer erhöhten Unfallhäufigkeit und eine Veränderung des Betriebsmittelbedarfs.

Berücksichtigt werden in der Erhaltungsplanung nur Baustellen längerer Dauer, das sind jene, die auch während der Nacht sowie in der sonst arbeitsfreien Zeit oder über das Wochenende aufrecht bleiben (RVS 05.05.43 [18]). Baustellen kürzerer Dauer (fliegende bzw. Tagesbaustellen) kommen vorwiegend für kleinflächige Instandhaltungsmaßnahmen zum Einsatz und fallen nicht in den Bereich der strategisch planbaren Maßnahmen.

7.1. Baustellenauslegung

Der Baustellenbereich bedarf für die Darstellung seiner Wirkung einer genauen Beschreibung. Grundsätzlich kann jede Baustelle in die Abschnitte Annäherungs-, Überleitungs-, Baustrecken- und zurückführender Überleitungsbereich gegliedert werden.

Durch die Festlegung der maßgebenden Parameter der Baustelle kann deren Wirkung auf den Verkehrsfluss (unter Kenntnis der vorhandenen Verkehrsstärke) weitestgehend fixiert werden. Diese sind:

- die Anzahl und Breite der verbleibenden Fahrstreifen im Baustellenbereich
- die Ausführung mit oder ohne Verschwenkung
- die Baustellenlänge.

Die Wirkung der Arbeitsstelle bezieht sich in erster Linie auf den Verkehrsfluss (Geschwindigkeit, Stop+Go Verkehr) im Baustellenbereich, ist aber auch für Fragen der Sicherheit von großer Bedeutung. Durch diese Festlegungen ist in weiterer Folge auch die maximale Kapazität der Engstelle bestimmt.

Der Vergleich unterschiedlicher Durchführungsvarianten von Maßnahmen sollte die folgenden Kriterien berücksichtigen:

- die Auslegung der Baustelle (Anzahl der ursprünglichen Fahrstreifen, Anzahl der offenen Fahrstreifen, Verschwenkungen, Verengungen) und die sich daraus ergebende Kapazität
- mögliche Umleitungs- und Ausweichstrecken
- der Verlauf der Verkehrsbelastung (im Sinne einer Verteilung des Verkehrs über das Jahr, aber auch über die Woche bzw. innerhalb 24 Stunden)
- die Entstehung von Stau und Zeitverlusten durch die Wirkung von Verengungen und Geschwindigkeitsreduktionen.

7.1.1. Möglichkeiten der Verkehrsführung

Zurückgreifend auf vorhandene Definitionen in der Literatur können Verkehrsführungen beispielsweise nach Ressel [46] und Ober-Sundermeier [40] in 4 übergeordnete Gruppen eingeteilt werden:

1. ohne Überleitung auf die andere Richtungsfahrbahn, ohne Fahrstreifenverlust, jedoch mit Einengung der zur Verfügung stehenden Fahrstreifenbreite
2. ohne Überleitung auf die andere Richtungsfahrbahn, jedoch mit Fahrstreifenreduktion und Einengung
3. mit Überleitung auf die andere Richtungsfahrbahn, ohne Fahrstreifenverlust
4. mit Überleitung auf die andere Richtungsfahrbahn, mit Fahrstreifenverlust und Einengung

Die Verteilung der Verkehrsführungen im Jahr 2000 kann beispielhaft für Baustellen an den deutschen Bundesautobahnen in Abbildung 50 dargestellt werden. Die Verkehrsführung (VF) 2+2 bzw. 3+3 kann der ersten Gruppe zugeordnet werden, die Verkehrsführungen 2+1 (1+1) bzw. 3+2 (2+2) der zweiten Gruppe, 4+0 und 3+1 bzw. 4+2, 5+1 und 6+0 der dritten Gruppe und die restlichen Verkehrsführungen der vierten Gruppe.

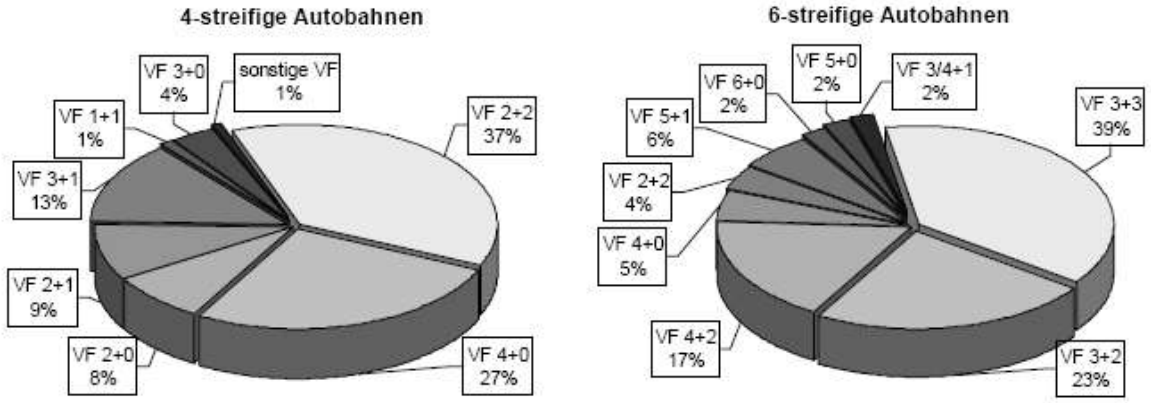


Abbildung 50: Verkehrsführung an Bundesautobahn-Baustellen nach [40]

Die Verkehrsführungen der von der Asfinag im österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz durchgeführten Maßnahmen werden im Zuge der Baustelleninformationen [93] veröffentlicht. Sie werden bei der Durchführung von Maßnahmen bestmöglich an die vorhandene Situation angepasst, wodurch eine große Variation an Verkehrsführungen festgestellt werden kann. Das derzeitige Streckennetz besteht zum überwiegenden Teil (~75%) aus zweistreifigen Richtungsfahrbahnen, dreistreifige Richtungsfahrbahnen nehmen mit einem Anteil von 20% auch eine relevante Größe ein, die Streckenbereiche mit 4 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn umfassen rund 1%. Einstreifige Strecken können in Rampen- und Anschlussbereichen auftreten, hierfür sind aber gesonderte Überlegungen zur Verkehrsführung anzustellen. Betrachtet man die derzeit in Anwendung befindlichen Verkehrsführungen, kann festgestellt werden, dass bei der Sperre der gesamten Richtungsfahrbahn vorwiegend die Verkehrsführung 4+0 zur Anwendung kommt. Bei geringem Verkehrsaufkommen wird hierfür auch nur ein Ersatz-Fahrstreifen auf der freien Richtungsfahrbahn zur Verfügung gestellt. Häufig werden die Maßnahmen nur auf einem Fahrstreifen durchgeführt und auf den angrenzenden Fahrstreifen kann der Verkehr aufrecht erhalten werden.

Für die Auswahl der anzuwendenden Verkehrsführungen, die in weiterer Folge auch den Maßnahmen zugeordnet werden können, wurden für diese Arbeit alle technisch möglichen Varianten miteinander verglichen. Zugeordnet zu jeder Verkehrsführung sind in Tabelle 37 auch der notwendige Breitenbedarf, die maximal zulässige Geschwindigkeit und die mit dieser Verkehrsführung maximal mögliche Kapazität (siehe Kapitel 5.2.2) angeführt. Die zugrundeliegenden Breiten laut RVS 5.05.42 - Verkehrsführungen bei Baustellen für Autobahnen mit getrennten Richtungsfahrbahnen [18] - müssen bei Baustellen größerer Länge (über 6 km) mit 2,75 m für reine Pkw-Fahrstreifen und mit 3,25 m für gemischte Fahrstreifen angesetzt werden, bei kürzeren Baustellenbereichen kann die Breite auf 2,50 m bzw. 3,00 m

reduziert werden. Die maximal zulässigen Geschwindigkeiten werden ebenfalls der oben angeführten RVS entnommen und können bei einer ausreichenden Breite mit 100 km/h festgelegt werden, bei geringeren Breiten reduziert sich auch die Geschwindigkeit auf bis zu 60 km/h. Die Abminderungsfaktoren der Kapazitätswerte wurden entsprechend den jeweiligen Verhältnissen aus Kapitel 5.2.2 übernommen, die zugehörigen Kapazitäten ergeben sich beispielhaft für Abschnitte mit einer Längsneigung kleiner 2% und einem Lkw-Anteil von 10%. Diese Werte charakterisieren durchschnittliche Verhältnisse, wie sie über weite Strecken auf dem österreichischen Autobahnen und Schnellstraßennetz vorherrschen. Daher können sie für die gegenständliche Arbeit auf Netzebene für die Festlegung von maßnahmenbezogenen Verkehrsführungen angenommen werden. Für den Einzelabschnitt, der im Zuge der Erstellung eines Erhaltungskonzeptes auf Projektebene betrachtet wird, sind jedoch abweichende Werte in Längsneigung oder Lkw-Anteil und deren Auswirkung stets zu berücksichtigen.

Die grau unterlegten Felder in Tabelle 37 bezeichnen jene Varianten, die den Standardfall für die jeweilige Verkehrsführung darstellen. Zur Vereinfachung wird bei weiteren Betrachtungen jeweils nur dieser eine Fall herangezogen. Sollten beengte Verhältnisse auftreten, müssen die Fahrsteifen an die vorhandenen Breiten angepasst werden. Breitere Fahrstreifen ermöglichen einen höheren Durchsatz und können, soweit dies bei den Gegebenheiten möglich ist, stets ohne negative Auswirkung auf den maßgebenden Anteil der baustelleninduzierten Nutzerkosten, die Zeitkosten, umgesetzt werden.

Die Arbeit von Ober-Sundermeier [40] enthält auch Überlegungen zum Einfluss von Unfällen und Nothalten auf die Kapazität einer Strecke. In der vorliegenden Arbeit werden diese vorerst nicht berücksichtigt, jedoch besteht die Möglichkeit, in weiterer Folge (je nach Bedeutung der einzelnen Einflussfaktoren) einzelne Module zu überarbeiten und zu erweitern.

.

Verkehrsführung		Breitenbedarf					max. zul. Geschwindigkeit		Abminderungsfaktor Kapazität		Symbolbild	red. Kapazität	
		rechte FB Richtung Baustelle	linke FB entgegen Baustelle	Leitwand	Gesamtbreite[1] rechts	links	in Richtung Baustelle	gegen Richtung Baustelle	in Richtung Baustelle	gegen Richtung Baustelle		in Richtung Baustelle	gegen Richtung Baustelle
2 Fahrstreifen je Richtung													
VF 2+2red	1	3,00 / 3,75	-	-	6,75		100	130	1	1		3833	3833
	2	2,75 / 3,25	-	-	6,00		80		0,950			3642	3833
	3	2,50 / 3,00	-	-	5,50		60		0,950			3642	3833
VF 2+1	1	3,75	-	-	3,75		100	130	0,475	1		1821	3833
	2	3,25	-	-	3,25		80		0,451			1730	3833
	3	3,00	-	-	3,00		60		0,451			1730	3833
VF 3+1	1	3,75	3,75 / 3,50 / 2,75	0,6	3,75	10,60	80	100	0,928	1		3555	3833
	2	3,25	3,50 / 3,00 / 2,75	0,6	3,25	9,85	80		0,928			3555	3833
	3	3,00	3,50 / 3,00 / 2,50	0,6	3,00	9,60	60		0,928			3555	3833
VF 3+0		-	3,50 / 3,00 / 3,50	0,6		10,60	80	100	0,428	1		1639	3833
VR 2+0		-	3,50 / 3,50	0,6		7,60	80	80	0,428	0,475		1639	1821
VF 4+0	1	-	3,25 / 2,75 / 2,75 / 3,25	0,6		12,60	80	80	0,900	0,950		3450	3642
	2	-	3,00 / 2,25 / 2,25 / 3,00	0,6		11,10	80	80	0,855	0,950		3278	3642
3 Fahrstreifen je Richtung													
VF 3+3red.		2,75 / 3,25 / 3,25	-		9,25		80	130	0,950	1		5463	5750
VF 3+2	1	2,75 / 3,25	-		6,00		80	130	0,602	1		3460	5750
	2	3,50 / 3,50	-		7,00		80	130	0,633			3642	5750
VF 3+1		3,50	-		3,50		80	130	0,317	1		1823	5750
VF 3*+1		3,50	3,75 / 3,00 / 3,00	0,6	3,50	10,35	80	100	0,602	0,633		3462	3640
VR 4+1		3,50	3,75 / 3,00 / 3,00 / 2,75	0,6	3,50	13,10	80	100	0,587	1		3375	5750
VF 4+2	1	3,50 / 3,50	3,75 / 3,00 / 3,00 / 2,75	0,6	7,00	13,10	80	100	0,952	1		5472	5750
	2	2,75 / 3,25	3,25 / 3,00 / 2,75 / 2,75	0,6	6,00	12,35	80	80	0,918			5280	5750
VF 5+1	1	3,50	3,50 / 3,25 / 2,75 / 2,75 / 2,75	0,6	3,50	15,60	80	80	0,952	0,983		5472	5654
	2	3,25	3,50 / 3,00 / 2,50 / 2,50 / 2,50	0,6	3,25	14,60	80	80	0,887			5098	5654
VF 4+0	1	-	3,50 / 3,00 / 3,00 / 3,50	0,6		13,60	100	100	0,570	0,633		3278	3642
	2		3,25 / 2,75 / 2,75 / 3,25	0,6		12,60	80	80	0,542	0,602		3114	3460
VF 5+0		-	3,25 / 2,75 / 2,75 / 2,75 / 3,25	0,6		15,35	80	80	0,542	0,950		3114	5463
VF 6+0		-	3,25 / 2,75 / 2,75 / 2,75 / 2,75 / 3,25	0,6		18,10	80	80	0,855	0,950		4916	5463

[1] im Baustellenbereich

Tabelle 37: Verkehrsführungen an Baustellen für Autobahnen und Schnellstraßen mit Breiten und Kapazitätsangaben

7.1.2. Verkehrsführung im jeweiligen Maßnahmenfall

Im österreichischen Pavement Management System wird für das betrachtete Netz zunächst ein Maßnahmenkatalog erstellt. Diese Liste aller technisch sinnvollen Maßnahmen (unter anderem mit Hinweisen für zustandsbezogene Anwendungsgrenzen und Anwendungsbreiten) stellt die Basis für nachfolgende Vergleichs- und Optimierungsverfahren dar.

Die Zustandserfassung und Abschätzung der Zustandsentwicklung erfolgt auf dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz für jeden Fahrstreifen getrennt. Ausgehend von diesem vorhandenen Datenmaterial ist es notwendig, auch die Maßnahmen nur auf jenen Fahrstreifen anzusetzen, für die der entsprechende Nutzen generiert werden kann. Dementsprechend werden die Fahrstreifen, auf welchen die Maßnahme durchgeführt wird, mit einer Ziffer neben der Maßnahme gekennzeichnet. E_BE1 bedeutet zum Beispiel eine Erhaltungsmaßnahme in Beton auf dem ersten Fahrstreifen (in Fahrtrichtung ganz rechts), E_BE1+2+3 steht für dieselbe Maßnahme auf einem Abschnitt mit drei Fahrstreifen über die gesamte Richtungsfahrbahn (alle drei Fahrstreifen).

Zur einfacheren Handhabung wird im Weiteren jeder Maßnahme eine optimale Verkehrsführung zugeordnet. Die Auswahl der optimalen Verkehrsführung für jede Erhaltungsvariante berücksichtigt folgende Kriterien:

- Beeinträchtigung des Gegenverkehrs
- Vermeidung von Inselbaustellen (z.B. bei drei Fahrstreifen keine Maßnahme ausschließlich am 2. Fahrstreifen)
- Restkapazität / Durchfahrtsgeschwindigkeit (abhängig von der Anzahl der gesperrten Fahrstreifen und eventueller Überleitungen)
- Beeinträchtigung des Verkehrszufluss -> eventuelle Überlastungen / Stau möglichst gering halten
- Baustellendauer (abhängig von Produktivität der Maßnahme bei vorherrschender Verkehrsführung, Zeitbedarf für Baustelleneinrichtung und –abbau sowie ev. Umlegungen)

Eine Zusammenschau aller möglichen Verkehrsführungen mit dem jeweiligen Breitenbedarf ist in Tabelle 37 dargestellt. Daraus wurde – wie erwähnt - für jede Verkehrsführung ein Standardfall definiert (grau hinterlegt). Aufgrund der zu jeder Standard - Verkehrsführung gewählten Fahrstreifenauslegung, insbesondere der damit festgelegten Fahrstreifenbreiten, ergibt sich die maximal zulässige Geschwindigkeit im Baustellenbereich für alle Varianten zu 80 km / h. Ebenso ist für jede Verkehrsführung die jeweilige Restkapazität angegeben, mit deren Hilfe eine erste Abschätzung der eventuellen Überlastung vorgenommen werden kann.

In einem weiteren Schritt erfolgte zur vereinfachten Betrachtung der Verkehrssituation die Definition von 2 Verkehrsbelastungskategorien. Bezug nehmend auf die derzeitige Verkehrsbelastung auf dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz wurden zur Abschätzung der Wirkung der Standard-Verkehrsführungen zwei Szenarien betrachten. Für gering belastete Strecken kann von einem JDTV von 10.000 Kfz / 24h für Abschnitte mit 2 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn und 20.500 Kfz / 24h mit 3 Fahrstreifen ausgegangen werden. Hierunter fallen etwa 30 % des Netzes, in diesen Fällen ist eine komplette Sperre eines Fahrstreifens ohne Auftreten von Stau möglich. Für stark belastete Strecken erhöhen sich diese Werte für 2 Fahrstreifen auf 24.000 Kfz / 24h und für 3 Fahrstreifen auf 45.000 Kfz / 24h. Über den k-Faktor für die 30.Stunde (nach RVS 03.01.11 kann dieser für mittleren Urlaubsverkehr mit 0,17 angesetzt werden) wurde ein stündlicher Bemessungszufluss ermittelt. Diese Annahmen wurden zur Zuordnung der Verkehrsführung zu den Maßnahmen benötigt. Bei der Anwendung im Rahmen des Pavement Management

Systems wird für die Berechnung der tatsächlich auftretenden Nutzerkosten eine Standard-Verkehrsführung (je nach gewählter Maßnahme) und die jeweils vorhandenen Verkehrsbelastungen herangezogen. Auf dieser Grundlage können eventuell auftretende Überlastungen und Stauzeiten ermittelt werden.

Bei einigen Varianten muss der Baustellenbereich von einem Fahrstreifen auf den anderen umgelegt werden, dies schlägt sich durch die Berücksichtigung eines zusätzlichen Zeitbedarfs zur Umlegung nieder. Die Produktivität der Maßnahme selbst [m²/Tag] wird hierbei jedoch nicht beeinträchtigt. Die Dauer der Baustelle setzt sich aus dem Zeitbedarf für die Einrichtung, den Abbau, eventuellen Umlegungen und dem Zeitbedarf für die tatsächliche Durchführung der Maßnahme, abhängig von der Maßnahmenart, der Länge, über die die Maßnahme durchzuführen ist, und der Anzahl der gesperrten Fahrstreifen (daraus ergibt sich die Maßnahmenfläche), zusammen.

Nach der Betrachtung der oben angeführten Kriterien sowie der Überprüfung der technischen Umsetzbarkeit kann jeder Instandsetzungsmaßnahme je nach Belastung (hohe oder geringe Verkehrsnachfrage) eine Verkehrsführung zugeteilt werden. Die jeweiligen Verkehrsführungen für Straßen mit 2 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn sind in Tabelle 38, jene mit 3 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn sind in Tabelle 39 angeführt.

Die angeführten Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen entsprechen jenen, die in der derzeitigen Anwendung des PMS am höherrangigen österreichischen Straßennetz vorgesehen werden. Bei Abschnitten mit 2 Fahrsteifen ergibt sich für Maßnahmen über beide Fahrstreifen bei hoher Verkehrsbelastung aufgrund der höchsten Restkapazität eine Verkehrsführung von 3+1 (vgl. Tabelle 37). Diese hat jedoch gegenüber der VF 4+0 den Nachteil, dass eine Umlegung erfolgen muss und die Maßnahme nicht über die gesamte Fahrbahnbreite in einem Zug sondern in zwei Teilschritten fertig gestellt wird. Besonders bei Erneuerungsmaßnahmen in Beton (E_BE1+2) und Asphalt (E_AS 1+2) ist es notwendig, diese über den gesamten Querschnitt auf einmal durchzuführen. Hierdurch ist ein besserer Arbeitsablauf und ein Ergebnis mit höherer technischer Qualität garantiert. Demzufolge können diese Maßnahmen nur auf allen vorhandenen Fahrstreifen gleichzeitig durchgeführt werden und es wurde die Verkehrsführung 4+0 zugewiesen. Die geänderten Verkehrsführungen sind in Tabelle 38 mit Fußnoten versehen.

Der Berücksichtigung der Nutzerkosten im Baustellenbereich auf Netzebene werden somit in dieser Arbeit folgende vereinfachte Annahmen zugrunde gelegt, um die mögliche Vielfalt einzuschränken:

1. vorhandene Breiten laut Standardregelquerschnitt (je Fahrtrichtung: für 2 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn: 3,50+2*3,75+1,50=12,50 m; für 3 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn: 3,50+2*3,75+3,50+1,50=16,00))
2. Randbedingungen für die Entwicklung von Standard-Verkehrsführungen: Längsneigung $s \leq 2\%$ und ein angenommener Lkw-Anteil von 10%
3. Zuordnung zu einer Standard-Verkehrsführung
4. 2 Verkehrsbelastungsszenarien (geringe und hohe Verkehrsbelastung, siehe Kapitel 7.1.2)

Es ist jedoch festzuhalten, dass im entwickelten Programmmodul (siehe Kapitel 9) grundsätzlich auch jede andere Situation berücksichtigt werden kann.

Zusammenfassung für 2 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn			
Erhaltungsmaßnahmen		Verkehrsführung	
		geringe VB	hohe VB
E_BE	**Erneuerung Oberbau in Betonbauweise**		
E_BE1+2	Erneuerung Oberbau in Betonbauweise FStr. (RL)1+2	VF 3+0	**VF 4+0**[1]
E_AS	**Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise**		
E_AS1+2	Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise FStr. (RL)1+2	VF 3+0	**VF 4+0**[1]
I_Decke	**Instandsetzung Decke**		
I_DE1	Instandsetzung Decke FStr. (RL)1	VF 2+1	VF 3+1
I_DE2	Instandsetzung Decke FStr. (RL)2	VF 2+1	VF 2+2red
I_DE1+2	Instandsetzung Decke FStr. (RL)1+2	VF 3+0	VF 3+1
I_Decke_DR	**Instandsetzung Decke Drainasphalt**		
I_DE_DR1+2	Instandsetzung Decke FStr. (RL)1+2	VF 3+0	VF 4+0[1]
I_Trag	**Instandsetung Tragschicht gebunden**		
I_VT1	Verstärkung im Tiefeinbau bzw. teilweisen Tiefeinbau FStr. (RL)1	VF 2+1	VF 3+1
I_VT2	Verstärkung im Tiefeinbau bzw. teilweisen Tiefeinbau FStr. (RL)2	VF 2+1	VF 2+2red
I_VT1+2	Verstärkung im Tiefeinbau bzw. teilweisen Tiefeinbau FStr. (RL)1+2	VF 3+0	VF 4+0[1]
I_Oberflaeche	**Instandsetzung Oberfläche**		
I_OF1	Instandsetzung Oberfläche FStr. (RL)1	VF 2+1	VF 3+1
I_OF2	Instandsetzung Oberfläche FStr. (RL)2	VF 2+1	VF 2+2red
I_OF1+2	Instandsetzung Oberfläche FStr. (RL)1+2	VF 3+0	VF 3+1
H	**Instandhaltung (meist örtlich begrenzt)**		
H_Fräsen	Instandhaltung Fahrbahnoberfläche_Fräsen		
H_BP	Auswechslung Betonplatten (Instandhaltung)		
H_FL	Flickstellen (Instandhaltung)		
H_1	Instandhaltung FStr. (RL)1	VF 2+1	VF 3+1
H_2	Instandhaltung FStr. (RL)2	VF 2+1	VF 2+2red
H_1+2	Instandhaltung FStr. (RL)1+2	VF 3+0	VF 3+1

[1]) technologisch bedingt

Tabelle 38: zugeordnete Standard-Verkehrsführungen für Erhaltungsmaßnahmen an der 2-streifigen Richtungsfahrbahn

Zusammenfassung für 3 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn			
Erhaltungsmaßnahmen		Verkehrsführung	
		geringe VB	hohe VB
E_BE	**Erneuerung Oberbau in Betonbauweise**		
E_BE1+2+3	Erneuerung Oberbau in Betonbauweise FStr. (RL)1+2+3	VF 4+0	VF 6+0
E_AS	**Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise**		
E_AS1+2+3	Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise FStr. (RL)1+2+3	VF 4+0	VF 6+0
I_Decke	**Instandsetzung Decke**		
I_DE1	Instandsetzung Decke FStr. (RL)1	VF 3+2	VF 4+2
I_DE2	Instandsetzung Decke FStr. (RL)2	Kombination mit 1./3. FS	
I_DE3	Instandsetzung Decke FStr. (RL)3	VF 3+2	VF 3+3red.
I_DE1+2	Instandsetzung Decke FStr. (RL)1+2	VF 4+1	VF 5+1
I_DE2+3	Instandsetzung Decke FStr. (RL)2+3	VF 4+1	VF 5+1
I_DE1+2+3	Instandsetzung Decke FStr. (RL)1+2+3	VF 4+0	VF 6+0
I_Decke_DR	**Instandsetzung Decke Drainasphalt**		
I_DE_DR1+2+3	Instandsetzung Decke Drainasphalt FStr. (RL)1+2+3	VF 4+0	VF 6+0
I_Trag	**Instandsetung Tragschicht gebunden**		
I_VT1	Verstärkung im (teilweisen) Tiefeinbau FStr. (RL)1	VF 3+2	VF 4+2
I_VT2	Verstärkung im (teilweisen) Tiefeinbau FStr. (RL)2	Kombination mit 1./3. FS	
I_VT3	Verstärkung im (teilweisen) Tiefeinbau FStr. (RL)3	VF 3+2	VF 3+3red.
I_VT1+2	Verstärkung im (teilweisen) Tiefeinbau FStr. (RL)1+2	VF 4+1	VF 5+1
I_VT2+3	Verstärkung im (teilweisen) Tiefeinbau FStr. (RL)2+3	VF 4+1	VF 5+1
I_VT1+2+3	Verstärkung im (teilweisen) Tiefeinbau FStr. (RL)1+2+3	VF 4+0	VF 6+0
I_Oberflaeche	**Instandsetzung Oberfläche**		
I_OF1	Instandsetzung Oberfläche FStr. (RL)1	VF 3+2	VF 4+2
I_OF2	Instandsetzung Oberfläche FStr. (RL)2	Kombination mit 1./3. FS	
I_OF3	Instandsetzung Oberfläche FStr. (RL)3	VF 3+2	VF 3+3red.
I_OF1+2	Instandsetzung Oberfläche FStr. (RL)1+2	VF 4+1	VF 5+1
I_OF2+3	Instandsetzung Oberfläche FStr. (RL)2+3	VF 4+1	VF 5+1
I_OF1+2+3	Instandsetzung Oberfläche FStr. (RL)1+2+3	VF 4+0	VF 6+0
H	**Instandhaltung (meist örtlich begrenzt)**		
H_Fräsen	Instandhaltung Fahrbahnoberfläche_Fräsen		
H_BP	Auswechslung Betonplatten (Instandhaltung)		
H_FL	Flickstellen (Instandhaltung)		
H_1	Instandhaltung FStr. (RL)1	VF 3+2	VF 4+2
H_2	Instandhaltung FStr. (RL)2	Kombination mit 1./3. FS	
H_3	Instandhaltung FStr. (RL)3	VF 3+2	VF 3+3red.
H_1+2	Instandhaltung FStr. (RL)1+2	VF 4+1	VF 5+1
H_2+3	Instandhaltung FStr. (RL)2+3	VF 4+1	VF 5+1
H_1+2+3	Instandhaltung FStr. (RL)1+2+3	VF 4+0	VF 6+0

Tabelle 39: zugeordnete Standard-Verkehrsführungen für Erhaltungsmaßnahmen an der 3-streifigen Richtungsfahrbahn

7.1.3. Optimierung der Baustellenlänge

Die Analyse im PMS legt die erforderlichen Maßnahmen für die jeweiligen, oft sehr kurzen homogenen Abschnitte fest. Diese Teilabschnittslängen ergeben sich aufgrund des aktuellen Zustands eines Straßennetzes (Abschnitte über Bereiche gleicher Zustandsgrößen und gleichem Aufbau) und den zu beachtenden Randbedingungen (Abschnittsgrenzen durch Änderung der Verkehrsstärke oder Übergänge zu Bauwerken). Die mittlere Länge dieser homogenen Abschnitte im Autobahnen- und Schnellstraßennetz beträgt knapp über einem Kilometer. Die Baustellenlänge ergibt sich aus der Summe der Längen von

aneinandergrenzenden Abschnitten mit gleichen Erhaltungsmaßnahmen. Zur Vermeidung von unwirtschaftlich kurzen oder langen Baustellen, muss eine Zusammenfassung der Maßnahmen hin zu einer optimalen Baustellenlänge erfolgen. In jedem Fall ist auch der zuständige Ingenieur gefordert, die Maßnahmenvorschläge auf mögliches Zusammenfassen oder Entkoppeln von Maßnahmen bzw. Abschnitten zu überprüfen.

Die Länge des Erhaltungsabschnitts respektive die Baustellenlänge hat großen Einfluss auf die auftretenden Nutzerkosten, vor allem auch für den Vergleich von unterschiedlichen Ausführungsvarianten. Es ist zu berücksichtigen, dass die baustellenbedingten Nutzerkosten sowohl von der Verkehrsbelastung als auch von der Länge der Baustelle beeinflusst werden.

7.1.3.1. Ansätze aus der Literatur

Von der wissenschaftlichen Seite haben sich in den USA Chien [94] sowie Chen und Schonfeld [95] mit der Fragestellung der optimalen Baustellenlänge auf vierstreifigen Straßen unter Bezugnahme auf die Gesamtkosten - dies beinhaltet Baulastträgerkosten, Nutzerkosten und Unfallkosten - beschäftigt.

Aus der Kapazität (mit und ohne Baustelle), den gefahrenen Geschwindigkeiten, dem Zufluss und fixierten Kostensätzen kann durch Nullsetzen der ersten Ableitung der Funktion, die den Zusammenhang aller Kosten darstellt, die optimale Baustellenlänge ermittelt werden.

Einige Randbedingungen müssen allerdings berücksichtigt werden:

- Der Abschätzung kann nur ein konstanter Zufluss zu Grunde gelegt werden. Dies ermöglicht eine Ermittlung der optimalen Baustellenlänge bei einem Mindestzufluss oder bei einem maximalen Zufluss.
- Übersteigt der Zufluss die Kapazität im Baustellenbereich kommt es zur Staubildung, dessen Länge bis zum Ende der Baustelle stetig zunimmt. Aufgrund dieser Bedingung eignet sich die Anwendung vorrangig für Baustellen kürzerer Dauer.
- Der Ansatz für die Unfallkosten geht von konstanten Kosten je Unfall sowie von einer konstanten Unfallrate (Unfälle je gefahrener Stunde) aus. Somit ergibt sich durch eine längere Aufenthaltszeit im Stau auch eine höhere Unfallrate. Dies würde aber auch auf eine höhere Unfallrate bei einer geringeren Fahrgeschwindigkeit schließen lassen, was nicht dem tatsächlichen Verlauf entspricht. Weiters fehlt auch ein Verweis auf die Unfallschwere.

Der Zeitverlust t [h / Tag] durch die Baustelle in Abhängigkeit des Verhältnisses von Kapazität k und Zufluss Q ergibt sich zu.

$$Q \le k \quad t = \left(\frac{L}{V_B} - \frac{L}{V} \right) Q \qquad \text{Gleichung 45}$$

$$Q > k \quad t = \left(\frac{L}{V_B} - \frac{L}{V} \right) k \qquad \text{Gleichung 46}$$

L ... Baustellenlänge [km]
V_B... Geschwindigkeit im Baustellenbereich [km/h]
V... Geschwindigkeit im Zulaufbereich [km/h]

Die dargestellten Zusammenhänge ermöglichen zumindest ein erstes Abschätzen der optimalen Baustellenlänge (eventuell unter Ausschluss der Unfallkosten).

Des weiteren müssen Überlegungen angestellt werden, wie ein sich ändernder Zufluss mit dem dargestellten Modell berücksichtigt werden kann, da beispielsweise eine Staubildung nicht über den ganzen Tag aufrecht bleibt, sondern nur zur Spitzenstunde auftritt und in der Folge wieder

abgebaut werden kann. Die Baustellenlänge kann sich aber über den Tagesverlauf nicht verändern.

Das amerikanische Beispiel ermittelt bei der Sperre eines Richtungsstreifens ohne Staubildung bei einer Belastung von 1000 FZ/h eine optimale Baustellenlänge von 1,4 km und mit Staubildung bei einer Belastung von 2000 FZ/h eine optimale Baustellenlänge von 0,34 km (siehe auch Abbildung 51). Die optimalen Baustellenlängen erscheinen hierbei sehr kurz und es ergeben sich mit den durchschnittlichen Verhältnissen auf einer österreichischen Autobahn noch geringere Baustellenlängen.

Weiters ist eine starke Abhängigkeit der Baustellenlänge von den Baustelleneinrichtungskosten zu beobachten. Zur Vermeidung der ständig anwachsenden Stauzeiten wurde der Ansatz um die Möglichkeit der Einrichtung von Umleitungsstrecken erweitert. Aufbauend auf den oben dargestellten Zusammenhängen und den Erweiterungen von Schonfeld [95] kann eine optimale Baustellenlänge ohne Überlastung von 2,5 bis 5,00 km ermittelt werden.

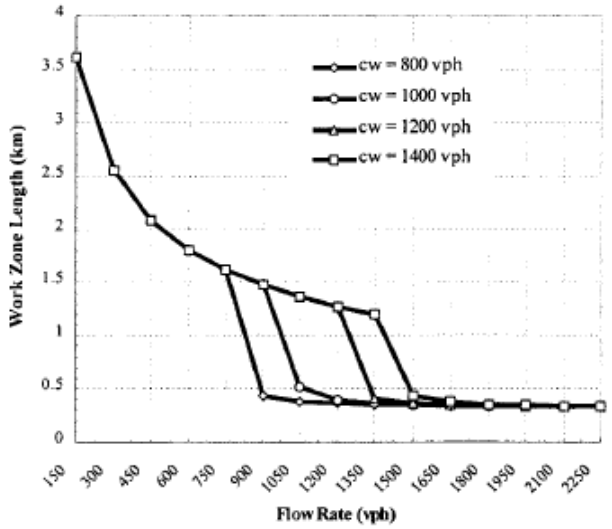


Abbildung 51: optimale Baustellenlängen [94]

Der Einfluss der Witterung auf die Kapazität einer Strecke wurde von Ponzlet [96] nachgewiesen. Er stellt eine Reduktion der maximal zulässigen Verkehrsstärke durch Dunkelheit um 10%, bei Regen um 15% und bei Zusammentreffen von Regen und Dunkelheit um 30% fest. Diesen Werten liegen Geschwindigkeitsmessungen auf der freien Strecke zugrunde, sie können jedoch nur bedingt auf Baustellensituationen umgelegt. Dies begründet sich darin, dass in Arbeitsbereichen der Absicherung bei Dunkelheit besonders große Aufmerksamkeit zukommt, welche mit der freien Strecke nicht vergleichbar ist und daher eine Übertragung der Kapazitätsreduktion nicht gerechtfertigt wäre.

Über den Bezug von Sicherheit und Baustellenlänge geben die Studien von Kayser und Hess [97] Auskunft. Hierbei wird empfohlen, dass bei höheren mittleren Pkw Geschwindigkeiten die Baustelle in kleinere Teilstücke mit einer optimalen Länge von 2 km aufzusplitten ist.

7.1.3.2. Baustellenlängen in VIAPMS_NUTZ

Die Grundlage für die Zuordnung der Maßnahmen im Zuge des PMS bilden die homogenen Abschnitte (da in diesen Bereichen über die gesamte Länge derselbe Zustand anzutreffen ist).

Die tatsächlich ausgeführten Baustellenlängen (Erhaltungsbaulos) werden letztendlich durch eventuelles Zusammenlegen von homogenen Abschnitten durch den Erhaltungsingenieur bestimmt. Hierfür kann auch der zuvor dargestellte theoretische Hintergrund eine Hilfestellung

leisten. Die Länge von Erneuerungsbaulosen ist auch abhängig von den technischen Erfordernissen, meist erstreckt sich ein solches über eine Länge von 6 – 10 km.

Diese Länge dient als Basislänge, muss aber um die benötigten Verzögerungsstrecken erweitert werden. Diese lassen sich aus der RVS 05.05.42 – Verkehrsführung bei Baustellen [18] gewinnen. Zum reinen Baustellenabschnitt müssen die Längen ab einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h (entspricht der Baustellendurchfahrts-geschwindigkeit) bis zur Aufhebung dieser Geschwindigkeitsbeschränkung hinzugezählt werden.

7.1.4. Dauer der Baustelle

Die Dauer der Baustelle ist abhängig von der Abschnittslänge (die durch den Straßenzustand und eine ablauftechnisch bedingte Mindestlänge bestimmt wird) und von der Art der Maßnahme. Grundsätzlich setzt sich die Gesamtdauer aus einem längenabhängigen Grundwert für Einrichtung und Abbau der Baustelle und die eventuell erforderliche Umlegung des Verkehrs von einem Fahrstreifen auf den anderen während der Bauzeit und einem maßnahmenbezogenen Leistungswert zusammen.

Aus Erfahrungen der zuständigen Erhaltungsingenieure, den im österreichischen PMS enthaltenen Leistungswerten und dem internationalen Vergleich aus dem OECD Bericht zur Evaluierung von „Long-Life Pavements“ [98] kann für Maßnahmen im Autobahnen- und Schnellstraßennetz von den in Tabelle 40 angeführten Werten ausgegangen werden.

Art der Maßnahme		Tagesleistung [m²/d]
E_AS	Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise	800
E_BE	Erneuerung Oberbau in Betonbauweise	600
I_DeckeTrag	Instandsetzung Decke	
I_DE	Instandsetzung Decke	3.000
I_VT	Instandsetzung Tragschicht - Verstärkung im Tiefeinbau bzw. teilweisen Tiefeinbau	2.000
I_Oberflaeche	Instandsetzung Oberfläche	4.000
H_Oberflaeche	Instandhaltung Fahrbahnoberfläche Fräsen	6.000
H_Substanz	Instandhaltung Oberbau	
H_BP	Beton - Auswechslung Betonplatten	160
H_FL	Asphalt - Flickstellen	1.750

Tabelle 40: Durchschnittliche Tagesleistungen für Erhaltungsmaßnahmen

Diese Werte können unter Bezug auf die jeweiligen Fahrstreifen, auf welchen die Maßnahme durchgeführt wird, in Erhaltungskilometer je Tag umgelegt und daraus kann zusammen mit den Fixwerten die Dauer des Baustellenbetriebes abgeleitet werden.

Für kurze Abschnitte werden zur Gewährleistung der tatsächlichen Durchführbarkeit von Einrichtung, Maßnahme und Abbau Mindestzeiten festgelegt. Diese belaufen sich bei Abschnittslängen bis zu 500 m auf mindestens 2 Tage und bei Abschnitten mit größeren Längen auf mindestens 4 Tage. Für einen Abschnitt mit 2 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn (Asphaltbauweise) und bei Sperre einer Richtungsfahrbahn sind die sich ergebenden Bausstellendauern für die unterschiedlichen Maßnahmen in Abbildung 52 dargestellt.

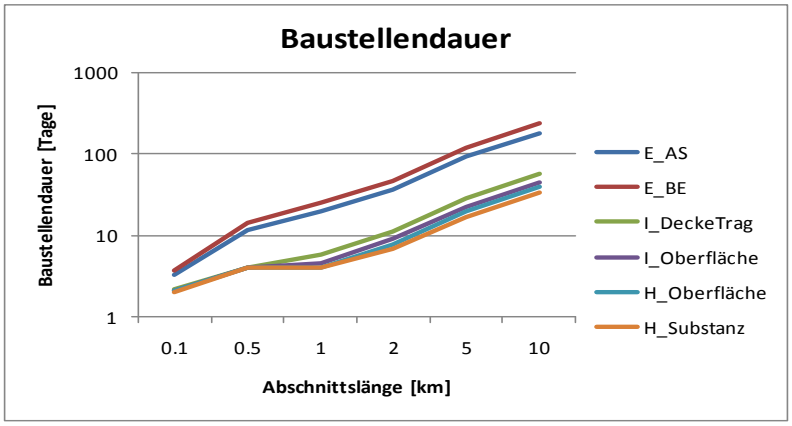


Abbildung 52: Baustellendauer für unterschiedliche Maßnahmen bei Sperre einer Richtungsfahrbahn

7.2. zusätzlicher Zeitbedarf

Die Gesamtheit der Zeitverluste aufgrund von Erhaltungsmaßnahmen kann aus der Summe der Wartezeiten bei Überlastung (durch die Maßnahme kommt es zu einer Verringerung der Kapazität der Strecke) und der zusätzlichen Fahrzeit (durch Befahren des Baustellenbereichs mit einer reduzierten Geschwindigkeit) ermittelt werden.

Die der Arbeit von Ober-Sundermeier [40] entnommene Abbildung 8 zeigt die Bereiche, in welchen aufgrund von Baumaßnahmen nur mit einer reduzierten Geschwindigkeit gefahren werden kann, deutlich auf. Im Annäherungsbereich (a - Verzögerung) muss die Geschwindigkeit auf die Staugeschwindigkeit abgesenkt werden, weiters folgt die Stauzeit bzw. die Zeit für das Bewegen durch den Staubereich (b – Stop-and-go; c – Einfädelungsvorgänge; d - Engstellenannäherung), dann kann auf die Baustellengeschwindigkeit beschleunigt werden mit welcher diese durchfahren wird (Baustrecke) und in weiterer Folge kann wiederum auf die Anfangsgeschwindigkeit beschleunigt werden (freie Strecke). Jede Geschwindigkeit, die unterhalb der Anfangsgeschwindigkeit liegt, verursacht einen Zeitverlust für den Straßennutzer.

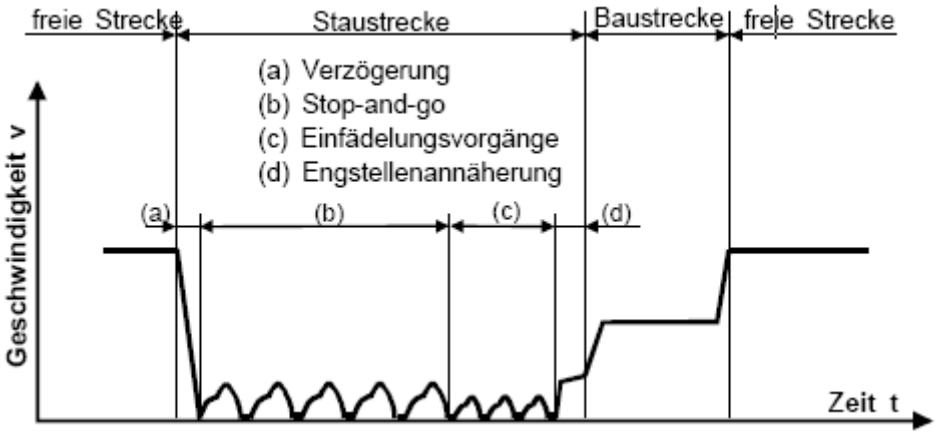


Abbildung 53: Beispiel des Effekts der Baustellenzone auf die Fahrgeschwindigkeit [40]

Es ist ausreichend, aus den auftretenden Zeitverlusten, die durch die oben angeführte Geschwindigkeitsbeschränkung, die Auswirkung von Verschwenkungen, eventuellen Stauungen bei Verengungen bis hin zu Verzögerungen aufgrund von zusätzlichen Lichtsignalanlagen entstehen, die maßgebenden auszuwählen und diese für die Berechnung der baustellenbezogenen Nutzerkosten heranzuziehen.

7.2.1. reduzierte Geschwindigkeit im Baustellenbereich

Aufgrund der Einrichtung einer Baustelle (Verengung, Überleitung oder Sperre von einer oder mehrerer Fahrstreifen) kommt es meist zu Beeinträchtigungen der Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Einfahren in den Baustellenbereich und dadurch, dass das Befahren der Strecke nur mit reduzierten Geschwindigkeit möglich ist. Hieraus resultieren für den Straßennutzer zusätzliche Kosten. Sie können nach [25] in folgende Komponenten unterschieden werden:

- Zeitverlust durch Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge
- Zeitverlust durch Befahren des Baustellenbereichs mit reduzierter Geschwindigkeit

Ermittelt und monetär bewertet wird die Differenz zwischen der tatsächlich vorhandenen (durch Baustelle beeinträchtigt) und der unbehinderten Fahrzeit. Hierbei wird jedoch nur der Zeitverlust durch das Befahren des Baustellenabschnitts mit einer reduzierten Geschwindigkeit berücksichtigt. Sollte es zu einer Überlastung kommen, diese ist durch das Unterschreiten einer Mindestgeschwindigkeit definiert, werden die auftretenden Stauzeiten ermittelt (siehe Kapitel 7.2.3). Die Zeitverluste durch Abbremsvorgänge sind somit durch den Überlastungsfall abgedeckt.

Als Geschwindigkeit im Baustellenbereich kann der jeweils kleinere Wert von maximal zulässiger Geschwindigkeit mit Baustelle und zustandsbedingter Geschwindigkeit ohne Baustelle (siehe Kapitel 5.3.1) angesetzt werden. Eine zusätzliche Geschwindigkeitsabnahme resultiert vorrangig aus Überlastungen, die Wirkung des Straßenzustands wurde gegebenenfalls schon bei den Geschwindigkeiten im unbeeinträchtigten Fall berücksichtigt und wird durch die Einrichtung einer Baustelle nicht negativ beeinflusst.

Für die Definition der maximal zulässigen Geschwindigkeit im Baustellenbereich können der RVS 05.05.43 [18] zulässige Höchstgeschwindigkeiten für den Baustellenbereich (Arbeitsstellen längerer Dauer) in Abhängigkeit der Fahrbahnbreite entnommen werden. In Deutschland sind die Höchstgeschwindigkeiten der RSA [99] zu entnehmen. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 41 angeführt.

	Fahrstreifen-Breite	Höchstgeschwindigkeit lt. RSA	Höchstgeschwindigkeit lt. RVS
besonderer Gefahrenbereich		40 km/h	
Pkw	<3,00 m		60 km/h
Pkw+Lkw	<3,25 m	60 km/h	60 km/h
	2 Fahrstreifen ab 6 m gesamt		80 km/h
	3,25 – 3,50 m		80 km/h
	Arbeitsbereich unmittelbar neben Verkehr	80 km/h	
	Längsneigung >4%	80 km/h	
	li FS 3m; re FS 3,5m, bauliche Trennung zur Arbeitsstelle	100 km/h	

Tabelle 41: zulässige Höchstgeschwindigkeiten im Baustellenbereich [99] und [18]

Der direkte Einfluss des Baustellenbereichs auf die Geschwindigkeiten wird bei Lohse [100] durch die Straßentypen im Baustellenfall berücksichtigt. Die entsprechende Geschwindigkeit kann aufgrund der Zusammenhänge der EWS [20] für den jeweiligen Baustellenfall berechnet werden. Tabelliert sind unterschiedliche Querschnittsbreiten für die zweistreifige Straße sowie Bereiche mit / ohne Stand- und Mittelstreifen. Die zu berücksichtigende Verkehrsstärke kann durch eventuell vorhandene Alternativrouten herabgesetzt werden, wodurch eine höhere Geschwindigkeit ermöglicht wird.

Im österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz wird nach aller Möglichkeit darauf geachtet, dass die Baustellen mit einer Geschwindigkeit von 80 km / h befahren werden können. In den Verschwenkungsbereichen kann es aber auch kurzfristig zu einer Beschränkung auf 60 km / h kommen, jedoch kann mit ausreichender Genauigkeit in der Anwendung VIAPMS_NUTZ von einer Durchfahrtsgeschwindigkeit im Baustellenbereich von 80 km / h ausgegangen werden. Die genauen Bestimmungen sind der RVS 05.05.42 [18] zu entnehmen.

Die Verlustzeit $t_{w,B}$ aufgrund des Durchfahrens der Baustelle mit reduzierter Geschwindigkeit (unter Berücksichtigung der oben angeführten Randbedingungen) kann wie folgt ermittelt werden.

$$t_{w,B}(t_i) = L_{BS} \cdot \left(\frac{1}{v_B} - \frac{1}{v(t_i)} \right)$$ Gleichung 47

L_{BS} ... Baustellenlänge [km]

v_B ... Geschwindigkeit im Baustellenbereich

$v(t_i)$... Geschwindigkeit ohne Beeinträchtigung

7.2.2. gebundener Verkehr

Für eine genauere Betrachtung des gebundenen Verkehrs bzw. des Stop and Go Verkehrs kann auf die folgenden Methoden zurückgegriffen werden:

Die Grundlagen des Fundamentaldiagramms wurden schon in Kapitel 5.3 erläutert. Besondere Anwendung findet es bei Arbeitsbereichen und in Überlastungssituationen mit Stop + Go Verkehr [101].

Der Einfluss von Baustellenbereichen auf die Ausbildung des Fundamentaldiagramms wurde bei Untersuchungen von Ressel [46] und von Laffot / Schmidt [7] behandelt. Letztere konnten durch Modellrechnungen eine maximale Verkehrsdichte bei 30 km / h von 80 – 85 Fz / km (= 40 – 42 Fz / min) auf einer 2-streifigen Autobahn und 110 – 120 Fz / km auf einer 3-streifigen Autobahn ermitteln.

Ressel erhält ein Fundamentaldiagramm, das eine maximale Dichte von 26,4 Kfz / min ausweist und auf eine Staustärke von 23,8 Kfz / min im Stop and Go Verkehr absinkt. Der tatsächliche Stauverlauf kann wie folgt beschrieben werden. Kurz vor Staubeginn schwankt die Anzahl der eintreffenden Fahrzeuge stark, durch die Beschränkung des Durchflusses im Baustellenbereich kommt es zu einer Geschwindigkeitsreduktion mit der Bildung von Stop and Go Verkehr bzw. stauendem Stop and Go Verkehr mit einem sehr niedrigen Geschwindigkeitsniveau.

In Abbildung 54 zeigt sich deutlich der größere maximale Durchfluss ohne Stau im Vergleich zu den niedrigeren Werten unter Staubildung.

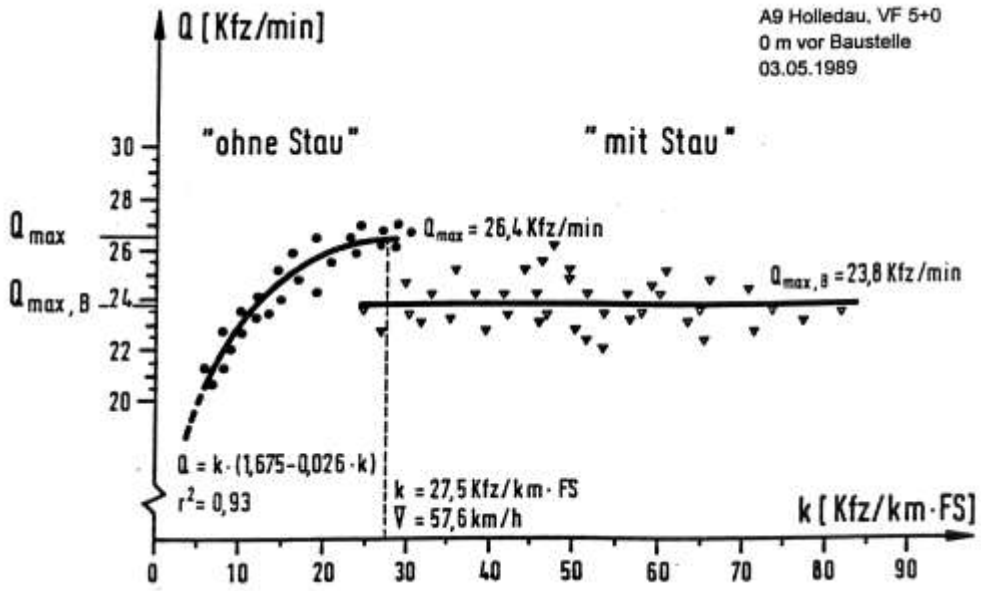


Abbildung 54: Fundamentaldiagramm: Übergang ungestaut in Staubereich [46]

Auch bei Wu [102] trifft man auf die Aufteilung des Fundamentaldiagramms in einen Bereich des fließenden Verkehrs und den Bereich des zähfließenden Verkehrs (Stop and Go). So ist es möglich, zwei homogene Zustände zu beschreiben (siehe Abbildung 55), wobei auch im freien Verkehr eine Abnahme der Geschwindigkeit aufgrund von Behinderungen bei Überholmanövern berücksichtigt wird. Der Kolonnenverkehr kann bei einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn einer Autobahn ab einer Dichte von 25 Fz/km angesetzt werden. Eine weitere Detaillierung in Frei, Kolonne, Go und Stop ist möglich. Die beschreibenden Kenngrößen sind die Wunschgeschwindigkeit v_0 für den fließenden Verkehr, die Kolonnengeschwindigkeit v_{KO} und die Nettozeitlücke τ_{KO} zwischen zwei Fahrzeugen für die Kolonne, die Nettozeitlücke τ_{GO} für den Zustand „Go“ und maximale Verkehrsdichte bei stehendem Verkehr. Weiteres müssen die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der einzelnen Zustände vorhanden sein.

Für Autobahnen können folgende Werte angesetzt werden: v_0=130 km/h; v_{K0}=80 km/h; τ_{KO}=1,5 s; τ_{GO}=2 s und k_{max}=133 Fz/km. Die Beziehung für den frei fließenden Verkehr ergibt sich aus dem Mittel von Frei- und Kolonnenverkehr, jene für den zähfließenden Verkehr aus dem Mittel von Stop und Go.

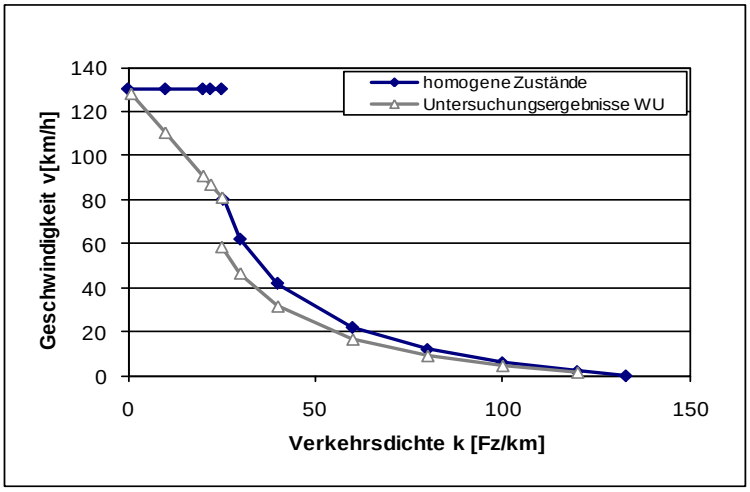


Abbildung 55: Verkehrszustände in der k-v-Ebene [102]

Die Ergebnisse aus der Betrachtung der Verkehrsdichte – Geschwindigkeits- Beziehung können zur Verfeinerung der Zeitverlustberechung im Baustellenbereich eingesetzt werden. Das

Problem ergibt sich jedoch bei der Ermittlung der Verkehrsdichte, da diese nur geschätzt werden kann und für eine detaillierte Berechnung nicht zur Verfügung steht. Aus diesem Grund wird in der gegenständlichen Arbeit der Bereich des gebundenen Verkehrs im ersten Ansatz vernachlässigt und der Zeitverlust direkt aus den gestauten Abschnitten ermittelt.

Grundsätzlich wäre eine Anwendung auf Grundlage des Verkehrszuflusses denkbar, hierfür muss jedoch zuerst die Geschwindigkeit – Dichte Beziehung in einen Geschwindigkeit - Zufluss Zusammenhang überführt werden.

7.2.3. gestauter Verkehr

Befindet sich der Verkehr in gestauten Verhältnissen, ist die freie Geschwindigkeitswahl nicht mehr möglich. Die Bildung von Stau zufolge der Überlastung eines Abschnitts entsteht in Abhängigkeit der Verkehrsmenge und der vorhandenen Kapazität, die sich aus den Anlageverhältnissen (Straßentyp), der verfügbaren Fahrsteifenanzahl, aus deren Breiten und eventuell aus der Ausbildung von Baustellenbereichen ergibt.

Für den Begriff Stau an und für sich lassen sich mehrere Definitionen finden:

- STAU: Die Pkw-Geschwindigkeit ist auf die Stau- oder Mindestgeschwindigkeit abgesunken. In diesem Sinne kann die Leistungsfähigkeit mit der richtungsbezogenen stündlichen Verkehrsstärke, bei der die Pkw-Geschwindigkeit auf die Stau- oder Mindestgeschwindigkeit absinkt, definiert werden. Diese Mindestgeschwindigkeit ist abhängig von der Straßenkategorie und wird im höherrangigen Straßennetz mit 30 km / h angesetzt.
- STAU: In einem Verkehrsstrom kommen mehrere Fahrzeuge hintereinander verkehrsbedingt zu Halt.
- STAU: Im weiteren Sinn zählt auch die Bildung von Stop and Go Verkehr zu dem Bergriff Stau. Dadurch sinkt die Geschwindigkeit unter V_{opt}.

Stauberechnungen beziehen sich zumeist auf einen Tag, unabhängig vom vorangegangenen und vom nachfolgenden und gehen davon aus, dass die 1. Stunde ohne Staubelastung beginnt. Grundsätzlich sind die Kapazitäten auf österreichischen Autobahnen den vorhandenen Verkehrsmengen angepasst. Im Zuge der Errichtung und des Betriebs von Arbeitsstellen kann es jedoch durch Verengung, Überleitungen oder der gänzlichen Sperre von Fahrstreifen zu einer Reduktion der Kapazität kommen und in weiterer Folge zu Überlastungen und Bildung von Stau. Die im folgenden dargestellten Modelle zielen darauf ab, den Stauprozess abzubilden, um die so entstehenden Zeitverluste und Kosten quantifizieren zu können.

Stau entsteht, wenn die Nachfrage (Verkehrszufluss) die Kapazität (Verkehrsabfluss) übersteigt. Diese Überprüfung (Nachfrage – Kapazität) kann für jede Stunde des Tages bzw. für kleinere Einheiten durchgeführt werden. Bei einem positiven Ergebnis kommt es zum Stau. Dieser ist so lange vorhanden, bis er durch überzählige Kapazität abgebaut werden kann.

Der Verlauf des Staus kann mit Hilfe von Warteschlangenmodellen oder des Fundamentaldiagramms beschrieben werden.

Ressel [46] konnte auf Grundlage der Daten des Landesverbandes Westfalen-Lippe feststellen, dass Staulängen bis zu einer maximalen Länge von 15 km auftreten, darüber hinausgehende Verkehrsmengen bilden den Teil an ortskundigen Fahrern, denen es möglich ist, Ausweichrouten zu benützen. Es lässt sich auch eine Reduktion des Verkehrszuflusses aufgrund von auftretendem Stau feststellen. Durch die Information der - insbesonders ortskundigen - Verkehrsteilnehmer kann ab einer Staulänge von 5 km eine Reduktion im Zufluss nach Abbildung 56 festgestellt werden.

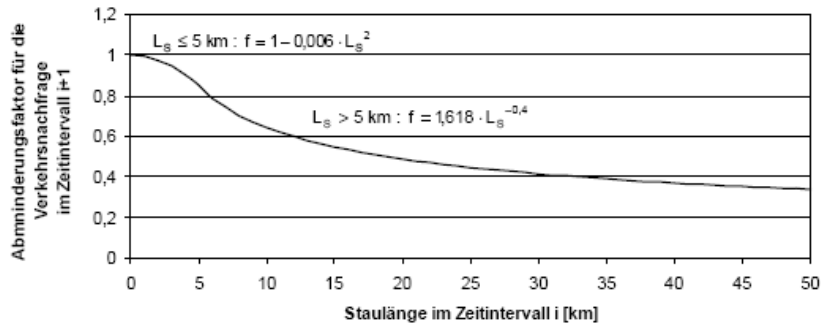


Abbildung 56: Abminderungsfaktoren für Verlagerungseffekte [46]

7.2.3.1. Warteschlangenmodelle

Ziel dieser Modelle ist es, den Erwartungswert (und die Varianz) der Anzahl der verzögerten Fahrzeuge zu ermitteln. Mit diesen können in der Folge Staulängen und Zeitverluste berechnet werden. Grundlegende Eingangswerte sind der Zufluss q [Kfz / h] und die Kapazität C (Kfz / h]. Hieraus ergibt sich die Bedienzeit t_B als Kehrwert der Kapazität. Weiters können die mittlere Rückstaulänge und die mittlere Wartezeit berechnet werden.

Stochastisches Warteschlangenmodell: [40]

Der Vorgang wird in Ankunftsprozess (Anzahl und statistische Verteilung der ankommenden Fahrzeuge), Warteschlange und Abflusssystem („Bedienzeit" und Anzahl der Fahrsteifen) gliedert. Das Ergebnis stellt die Anzahl der Fahrzeuge im Stau dar, jedoch muss zur Ermittlung der Staulänge auch die Dichte bekannt sein. Alle Größen sind mit den jeweiligen Wahrscheinlichkeitsverteilungen unterlegt. Dieses Verfahren findet Anwendung zur Modellierung des Staugeschehens bei Ressel [46], wobei hier die Zeitlückenverteilung als Eingangsgröße verwendet wird (mikroskopisch). Mit Hilfe des Einfahrts- und Ausfahrtszeitpunktes aus dem Staubereich kann die Anzahl der Fahrzeuge im Stau bestimmt werden. Das Verfahren kann jedoch erst nach mehreren Durchläufen ein stabiles Ergebnis gewährleisten und kommt daher im Erhaltungsmanagement nicht zum Einsatz.

Makroskopisch - deterministisches Warteschlangenmodell: [7, 39]

Die Verkehrszustände werden bei deterministischen Modellen für bestimmte Zeiträume als konstant angenommen. Die Anzahl der Fahrzeuge in der Warteschlange am Ende einer Stunde $M_{S,E}$ ergibt sich durch die Anzahl schon wartender Fahrzeuge plus den ankommenden Fahrzeugen abzüglich der abfließenden Fahrzeuge. Die Beschreibung des Zustands erfolgt in Stundenintervallen über die Variable der Verkehrsstärke q [Kfz / h]. Die Wartezeit lässt sich aus dem Verhältnis der entstandenen Warteschlange zur Verkehrsstärke im Abfluss ermitteln. Die effektive Staulänge kann nur mit Hilfe der Verkehrsdichte im Stau [Fz / km] (hierfür sind Erfahrungswerte notwendig) bestimmt werden.

$$M_{S,E}(T_S) = M_{S,E}(T_{S-1}) + q(T_S) - C_B \qquad \text{Gleichung 48}$$

$M_{S,E}$ … Warteschlange am Ende einer Stunde [Kfz]

C_B … Kapazität der Baustelle [Kfz/h]

T_S … Staustunde

Die mittlere Warteschlange $\overline{M}_S$ einer Stunde ergibt sich bei Stau während der gesamten Zeit zu:

$$\overline{M}_S(T_S) = M_{S,E}(T_{S-1}) + 0{,}5 \cdot (q(T_S) - C_B) \qquad \text{Gleichung 49}$$

$M_{S,E}$ … Warteschlange am Ende einer Stunde [Kfz]

Die mittlere Warteschlange der Stunde, in der sich der Stau auflöst ($T_{S,E}$), kann wie folgt beschrieben werden:

$$\overline{M}_S(T_{S,E}) = M_{S,E}(T_{S,E-1}) \cdot \frac{t_{S,E}}{2} = M_{S,E}(T_{S,E-1}) \cdot \frac{M_{S,E}(T_{S,E-1})}{\left|q(T_{S,E}) - C_B\right| \cdot 2}$$ Gleichung 50

$t_{S,E}$ … Zeitpunkt des Stauendes

Mit Hilfe der mittleren Warteschlange können sowohl die Gesamtwartezeit aller Fahrzeuge im Stau T_W [Kfz.h] als auch die mittlere Rückstaulänge $\overline{L}_S$ [km] jeder Staustunde ermittelt werden:

$$T_W = \sum_{\sum t_S} \overline{M}_S$$ Gleichung 51

$\sum t_S$ … Staudauer

$$\overline{L_S}(T_S) = \frac{\overline{M}_S(T_S)}{k}$$ Gleichung 52

k… Dichte in der Warteschlange

Zu Beginn der Betrachtung ist keine Überlastung vorhanden. Dem im folgenden entstehenden Stau fehlt mit den oben dargestellten Zusammenhängen noch die räumliche Ausdehnung und somit die Wartezeit in der Schlange. Hierfür lässt sich bei Beckmann [39] ein Korrekturwert finden:

$$\overline{L_{S,korr}}(T_S) = \frac{\overline{M}_S(T_S)}{(k_{Stau} - k(T_S))}$$ Gleichung 53

Ähnlich kann auch die Wartezeit je Fahrzeug korrigiert werden:

$$\overline{T_{W,korr}} = \frac{\overline{M}_S(T_S) \cdot \left(1 + \frac{\overline{L_{S,korr}}(T_S)}{v(T_S)}\right)}{C}$$ Gleichung 54

Dieser Ansatz wurde auch bei der Ermittlung der Stauzeiten im Zuge des FORMAT-Projekts [30] angewandt. Die Kapazitäten im Baustellenbereich wurden zwischen 1100 und 1350 Pkw-E/h gewählt, wobei diese Größe einen starken Einfluss auf das endgültige Ergebnis und somit auf die Zeitverluste hat. Gleichgerichtet steigen auch die entstehenden Kosten mit einer Überschreitung der Grenzkapazität stark an.

Bei einem Vergleich der berechneten und gemessenen Verkehrszustände, Stauentwicklungen und Zeitverluste konnte in der Schweiz eine zeitweise Erhöhung der Kapazität auf bis zu 1700 Pkw-E/h Fahrstreifen gemessen werden. Generell wurde eine Überschätzung des Zeitverlusts, bei Vergleich der tatsächlichen Vorkommnisse mit der Berechnung festgestellt [30, 103].

Fundamentaldiagramm [39]

Dieses Modell kann auch unter die makroskopisch deterministischen eingereiht werden. Es bedient sich der grundlegenden Parameter der Verkehrsstärke (Zufluss), der Verkehrsdichte und der mittleren Geschwindigkeit. Es wird jedoch die räumliche Ausdehnung des Staus über die Kapazität der freien Strecke und des Baustellenbereichs ermittelt.

Tritt innerhalb der betrachteten Strecke ein Stau auf, wird der stationäre Verkehrsfluss gestört. Dies kann mit der Theorie der Dichtestoßwellen von Lighthill und Whitham [104], angewandt auf das Verkehrskollektiv, abgebildet werden. Ausgangsbasis bildet die Kontinuitätsgleichung, umgelegt auf den Zusammenhang von Geschwindigkeit und Verkehrsdichte ergibt sich die Wellengeschwindigkeit c zu:

$c = v + k * dv / dk$ Gleichung 55

Die Stoßwellengeschwindigkeit u kann durch $u = \Delta q / \Delta k$ ermittelt werden (die Sekante an die q-k Kurve im Fundamentaldiagramm mit der Steigung u). Ein negatives u bedeutet Zunahme der Staulänge, ein positives u entspricht einer Staureduktion (bis hin zur Auflösung).

Aus diesen Zusammenhängen bildeten Beckmann und Zackor [39] ein Modell zur Stauentwicklung an einem Engpass: die Stausituation wird als Punkt im Fundamentaldiagramm abgebildet (definiertes v_{Stau} und k_{Stau}).

Das Verhalten vor Staubildung kann mittel q-k Diagramm beschrieben werden:

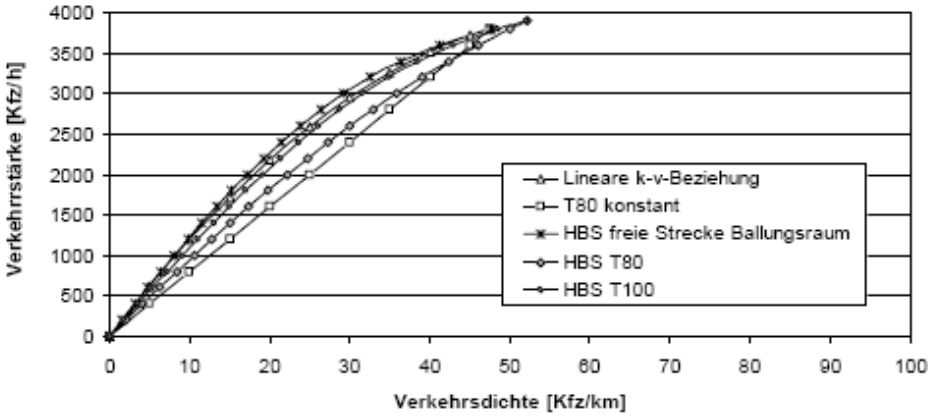


Abbildung 57: Fundamtenaldiagramm zur Stauentwicklung Zackor [39]

Auch bei diesem Ansatz wird davon ausgegangen, dass es sich um einen stabilen Verkehrsfluss handelt und der Stau erst eintritt, wenn der Zufluss größer ist als die Kapazität des Baustellenbereichs. Im Stau selbst herrschen instabile Verhältnisse, jedoch wird dies durch die geringere Geschwindigkeit v_{STAU} berücksichtigt. Für den Staubereich kann aus der Stosswellengeschwindigkeit die Staulänge L_S im Zeitpunkt t_i (Ende einer Staustunde) entwickelt werden

$$L_S = -\frac{\Delta q(t_i)}{\Delta k(t_i)} \cdot (t_i - t_{i-1}) + L_S(t_{i-1}) = -\frac{q(t_i) - C_B}{k(t_i) - k_{Stau}} \cdot (t_i - t_{i-1}) + L_S(t_{i-1})$$ Gleichung 56

- $q(t_i)$ … Verkehrsstärke im Zufluss in der betrachteten Stunde t_i [Kfz/h]
- C_B … Kapazität des Engpasses [Kfz/h]
- $k(t_i)$ … Dichte im ungestörten Zufluss in der betrachteten Stunde, berechnet über die Verkehrsstärke und die vorhanden Geschwindigkeit im Zufluss k=q/v
- k_{Stau} … Verkehrsdichte im gestauten Abschnitt [Kfz/km] Hier gilt ebenfalls k=q/v, q entspricht der Kapazität im Engpass, v der Geschwindigkeit im Stau (meist mit 20 km/h festgelegt)

Die Staulänge L_S am Ende des Zeitabschnitt t_i setzt sich aus der neu entstehenden und der zu Beginn des Zeitabschnitts schon vorhandenen Staulänge zusammen. Das Zeitintervall t_i-t_{i-1} beträgt bei stündlichen Zuflussdaten eine Stunde, somit 1.

Wenn im vorangehenden Zeitabschnitt kein Stau aufgetreten ist, kann der zweite Term der Gleichung vernachlässigt werden. Aus der so ermittelten Staulänge lässt sich mit Hilfe der Geschwindigkeit im Stau (v_{Stau}) und der Geschwindigkeit im unbeeinträchtigten Abschnitt $v(t_i)$ die Verlustzeit aufgrund von Staubildung t_w ermitteln.

$$t_w(t_i) = L_S(t_i) \cdot \left(\frac{1}{v_{Stau}} - \frac{1}{v(t_i)} \right)$$ Gleichung 57

Makroskopisch-stochastisches Warteschlangenmodell [43]

Im Zuge der Auswertung von Verkehrsbeeinflussungsanlagen konnte festgestellt werden, dass besonders im Bereich der Leistungsfähigkeit (nahe der Kapazitätsgrenze) statische Modelle zur Abbildung des Verkehrsflusses größere Ungenauigkeiten bedingen. So stellt es eine starke (jedoch in manchen Anwendungen notwendige) Vereinfachung dar, Kapazitätswerte mit einem eindeutigen Wert zu belegen. Durch den stochastischen Ansatz ist es möglich, den Einfluss von Verschwenkvorgängen, Fahrstreifenreduktionen und auch die Ablenkung der Fahrer besser zu berücksichtigen. Die Eingangsgrößen sind die mit Streuungen behafteten Größen, dies betrifft sowohl die Verkehrsnachfrage auf der freien Strecke als auch die Kapazität im Baustellenbereich. Die Verkehrsnachfrage muss hierfür in der Genauigkeit von zumindest Stundenwerten, eventuell mit Hilfe von Tagesverteilungen vorliegen.

Zur Ermittlung des genauen Staubeginns werden Verkehrsstärken in Fünf-Minuten-Intervallen herangezogen. Die Aufteilung der Stundenwerte in die kleineren Einheiten kann gleichmäßig erfolgen, hierbei kommt es möglicher Weise zu Sprüngen. Besser ist eine Interpolation zwischen den Stundenwerten oder die Fortführung einer Trendlinie.

Für die Verkehrsnachfrage wird von einer Normalverteilung ausgegangen, die durch die Kenngrößen des Mittelwerts μ_Q (in Form einer Tagesganglinie) und der Standardabweichung σ_Q (für die Ganglinie werden 5%, für die Fünf-Minuten-Werte 10% angesetzt) eindeutig beschrieben ist.

Die Kapazität kann ebenfalls als normalverteilt bestätigt werden und ist mit den Kenngrößen der mittleren Kapazität μ_C und der Streuung σ_C definiert. Für die weitere Berechnung sind auch die Fünf-Minuten-Kapazitäten Ausschlag gebend.

Zu einer Staubildung kommt es – wie in den oben dargestellten Modellen ebenfalls - zu jenem Zeitpunkt, wo die Verkehrsnachfrage die Kapazität übersteigt. Da es sich bei den Eingangsgrößen um Zufallsvariablen handelt, kann die Verteilung der Differenz Z dieser Größen nur mit Hilfe des Faltungsprodukts ermittelt werden. Das Ergebnis - die Überlastungswahrscheinlichkeit P - kann wie folgt ermittelt werden:

$$P(Z_n > 0) = 1 - P(Z_n \le 0) = 1 - \int_{-\infty}^{0} \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_Q^2 + \sigma_C^2)}} e^{\frac{(t-(\mu_Q+(-\mu_C)))^2}{2(\sigma_Q^2+\sigma_C^2)}} dt$$ Gleichung 58

Für die Anwendung im gegenständlichen Projekt ist dieses Modell in einem ersten Durchlauf jedoch nicht geeignet, da die erforderlichen Eingangsdaten in dieser Genauigkeit derzeit nicht vorgehalten werden. Denkbar ist durchaus eine Erweiterung der deterministischen Methoden auf eine stochastische Grundlage.

7.2.3.2. Weitere Modelle der Stauentwicklung

Ein sehr anschauliches Staumodell wurde in den 80er Jahren von Boesefeldt, Emde und Schellhöh entwickelt [2]. Hierbei wird der Stauparameter d eingeführt.

$$d = \frac{DTV_{ges}}{\max Q} * 0{,}5 \text{ je Fahrstreifen}$$ Gleichung 59

Das Konzept fußt auf der Dauerlinie, die als Polygonzug dargestellt wird. Hierbei kann die maximal vorhandene Verkehrsstärke eingetragen werden. Aufgrund des Flächenausgleichs zwischen der Dauerlinie oberhalb und unterhalb von Q_{max} kann die Wartezeit W bestimmt werden. Formulativ kann dies wie folgt zusammengefasst werden:

$$W = \frac{1{,}5 * \left[k_{ges}(0) + k_{GV}(0) * GVA/100 - 2/d \right]}{k_{ges}(0) - k_{ges}(0{,}75)}$$ Gleichung 60

k(x) ... DTV-Anteil für den Zeitanteil x

GVA ... Güterverkehrsanteil [%]

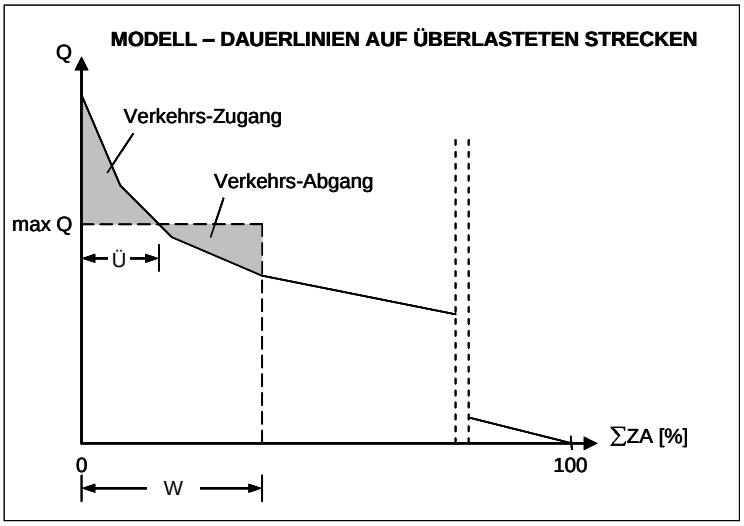


Abbildung 58: Stauwahrscheinlichkeit durch Flächenausgleich [2]

Über die Ausgleichsfläche kann auch die Staumenge errechnet und mit Hilfe der mittleren Länge der Fahrzeuge die Rückstaulänge bestimmt werden.

7.2.3.3. Resümee

Die zwei dargestellten Methoden des makroskopisch - deterministischen Warteschlangenmodells und des Fundamentaldiagramms erzielen mitunter sehr ähnliche Ergebnisse, jedoch ist das Fundamentaldiagramm darauf ausgelegt, die Situation zu einem bestimmten Zeitpunkt zu beschreiben (z.B. Ende einer Staustunde). Das makroskopisch - deterministische Warteschlangenmodell ermöglicht es, auch mittlere Staulängen und Wartezeiten für die gesamte Staustunde anzugeben, welche im gegenständlichen Projekt direkt verwendet werden können, um daraus die entstehenden Zeitverluste zu berechnen.

In weiterer Folge könnte auch die Verteilung der zu Grunde liegenden Daten mit Hilfe des dargestellten stochastischen Warteschlangemodells abgebildet werden. In einem ersten Modell wird mit dem makroskopisch – deterministischen Modell [39] gerechnet, welches aber grundsätzlich für die Berücksichtigung von Wahrscheinlichkeitsanteilen auf ein makroskopisch – stochastisches Warteschlangenmodell erweitert werden könnte.

Die Dichte im frei fließenden Zustand kann über die freie Geschwindigkeit und den Zufluss ermittelt werden. Die Dichte im Stau ergibt sich aus der Staugeschwindigkeit, definiert mit

30 km / h und der Kapazität des Baustellenbereichs. Die Gesamtverlustzeit wird aus der Summe der Verlustzeiten aller Fahrzeuge eines Tages gebildet.

Die mittlere Staudauer (Tw) eines Fahrzeugs in einer Stunde ergibt sich dann wie folgt:

$$T_w = \left(\frac{1}{v_{Stau}} - \frac{1}{v} \right) * \left(0{,}5 * Zufluss_h * \left(\frac{Zufluss_h - Kapzität}{\frac{Kapazität}{30} - \frac{Zufluss_h}{v}} \right) \right)$$ Gleichung 61

Der Zufluss einer Stunde erweitert sich um die im Stau wartenden Fahrzeuge der vorangehenden Stunde. Die gesamte Stauzeit eines Abschnitts ergibt sich als Summe der 24 h eines betrachteten Tages (Produkt der mittleren Staudauer eines Fahrzeugs und des Zuflusses der Stunde) multipliziert mit der Baustellendauer.

7.3. Sicherheit – Unfallkosten

Baustellenbereiche sind meist mit einer Veränderung des Querschnitts verbunden, es kommt zu Einengungen, Verschwenkungen und Absperrungen. In diesen Bereichen ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Verkehrteilnehmer und dies wirkt sich auch in einer erhöhten Unfallrate aus.

Die Angaben, wie groß die Erhöhung der Unfallhäufigkeit jedoch tatsächlich ausfällt, sind sehr unterschiedlich. Nach internationalen Untersuchungsergebnissen von Scazziga [105] kann von einer Erhöhung der Unfallhäufigkeit um etwa 50 % im Baustellenbereich ausgegangen werden. Laffont [7] konnte im direkten Vergleich von Abschnitten mit und ohne Baustelle (längerfristige Baustellen – Verkehrsführung 2+0) eine mittlere Steigerung der Unfallrate im Baustellenbereich um den Faktor 3 feststellen. Die Unfallkostenrate erfuhr im Mittel eine Steigerung um den Faktor 2,4. Unfallhäufungen werden besonders in Überleitungsbereichen bestätigt. Generell sind Unfälle an Tagesbaustellen häufiger, da diese schlechter abgesichert sind. Deren Einsatzgebiet ist aber vorrangig in der betrieblichen Straßenerhaltung zu finden, daher werden diese im Zuge des Erhaltungsmanagements nicht näher betrachtet.

Für Österreich konnten keine Daten diesbezüglich gefunden werden, generell kann man von einer Reduktion der Unfallgefahr in Baustellenbereichen in den letzten Jahren im Autobahnen- und Schnellstraßennetz ausgehen.

7.3.1. Unfallraten im Baustellenbereich

Generell kann davon ausgegangen werden, dass die Verkehrsführung nicht nur direkt im Baustellenbereich Einfluss auf das Unfallgeschehen hat, sondern die Wirkung auch im Vorlauf- und Nachlaufbereich bemerkbar ist. Bei Schmuck [19] finden sich Hinweise auf einen Einfluss der Baustelle auf das Unfallgeschehen bereits 2 km vor und 1 km nach der Arbeitsstelle. Um diesen Einfluss berücksichtigen zu können, wird in der gegenständlichen Anwendung nicht nur der jeweilige Abschnitt, sondern die gesamte Baustellenlänge mit Verzögerungs- und Beschleunigungsbereichen in die Ermittlung der Unfallkosten aufgenommen.

Besondere Beachtung gilt Studien zur Ermittlung der Unfallrate im Baustellenbereich, hier kann auf einige deutsche Arbeiten verwiesen werden, wie beispielsweise von Hanko, Ressel und Frencl [106), welcher Unfallraten für verschiedene Baustellentypen entnommen werden können. Weiters ist eine Unterscheidung in die Bereiche Vorlauf, Baustelle und Nachlauf getroffen worden (siehe Tabelle 42). Hierbei sind die am häufigsten eingesetzten Baustellentypen dargestellt. Zum Zeitpunkt der Untersuchung wurde die 4-streifige Führung im

Gegenverkehrsbereich nur in Ausnahmefällen angewandt und ist daher auch in der Tabelle nicht angeführt.

Baustellentyp	Vorlauf	Baustelle	Nachlauf	Gesamt
122 (Sperre 1.FS)	0,26	0,27	0,22	0,25
123 (Sperre 2. FS)	0,21	0,16	0,15	0,19
124 (Sperre 1.+2. FS)	0,46	-	-	-
221 (Gegenverkehr 2-spurig)	0,37	0,31	0,13	0,3
222 (Gegenverkehr; Sperre 1.FS)	0,29	0,38	-	0,28
223 (Gegenverkehr; Sperre 2.FS)	0,29	0,21	-	-

Tabelle 42: Unfallrate für Unfälle mit Personenschäden [U / MioKfzKm] [106]

Auch bei Schmuck [19] lassen sich für den Baustellenbereich Unfallratenfaktoren sowie Unfallkostenratenfaktoren (UKRF) finden, die als Multiplikator der generellen Unfallrate in der besonderen Situation der Baustelle zu tragen kommen (siehe Tabelle 43). Die Geschwindigkeit im Baustellenbereich ist mit 60 km / h angesetzt.

	Verkehrs -führung	Unfallratenfaktor				UKRF
		schwere Personenschäden	leichte Personenschäden	schwere Sachschäden	Gesamt	
2 FS je Richtungs-fahrbahn (RF)	2+1	3,9	4,7	2,5	2,9	3,9
	2+2	0,7	1,4	1,7	1,5	1,2
	3+1	0,8	1,2	1,7	1,5	1,2
	4+0	1,1	1,9	2,2	2,0	1,7
3 FS je RF	3+2	1,6	1,3	1,5	1,5	1,8

Tabelle 43: Unfallratenfaktoren und Unfallkostenratenfaktoren (UKRF) [19]

Eines der Ziele des FORMAT Projekts war es, die unterschiedlichen Unfallraten, besonders im Vergleich von Freilandstrecke und Baustellenbereich, zu entwickeln und mit den Daten der beteiligten Länder abzusichern. Leider wurden die benötigten Daten (besonders über das Unfallgeschehen an Baustellen) nur in sehr geringem Umfang in den angefragten Ländern erfasst und für das Projekt zur Verfügung gestellt. Einzig in Deutschland gab es zwei Arbeiten, die an konkreten Baustellenbereichen in Hessen die Unfallrate vor und während einer Baustelle verglichen haben. Die Ergebnisse stellen einerseits die Steigerung der Unfallkostenrate S_{UK} dar (bezogen auf Unfälle mit Personenschäden Baustelle zu Freiland). Diese Steigerung kann für längere Arbeitsstellen mit $S_{UK} = 1,2$ angesetzt werden [107]. Andererseits stellen sie auch die Veränderung der Anzahl der Unfälle S_{UA} (bezogen auf Unfälle mit Personenschäden Baustelle zu Freiland) dar. Für S_{UA} wurden Werte von 1,5 [108] bis 1,9 [107] ermittelt.

Eine Unterscheidung der Kosten und Unfallzahlen nach Baustellenlänge oder Verkehrsführung war aufgrund der Ausgangsdaten nicht möglich.

In den deutschen Planungshilfen EWS-97 [20] und in Weiterführung auch im Bundesverkehrswegeplan 2003 [29] werden die Unfallraten und Unfallkostensätze bestimmten Streckentypen zugeordnet. Die unterschiedlichen Baustellenführungen (VF) können den entsprechenden Streckentypen zugeordnet werden. So ist es möglich die Unfallraten für die unterschiedlichen Verkehrsführungen zu bestimmen, ein Vorschlag ist in Tabelle 44 dargestellt. Weiters werden diese Grundlagen an die Unfallsituation im österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz mit einer mittleren Unfallrate von 0,1 Unfälle / Mio Kfz km im unbeeinflussten Straßenabschnitt durch lineare Verschiebung angepasst.

	in Richtung der Baustelle			gegen Richtung der Baustelle		
	Unfallraten - Außerortsstraßen		UR - Österreich	Unfallraten - Außerortsstraßen		UR - Österreich
	Personenschäden Unfälle / 10^6Kfz km	Sachschäden Unfälle / 10^6Kfz km	Personenschäden Unfälle / 10^6Kfz km	Personenschäden Unfälle / 10^6Kfz km	Sachschäden Unfälle / 10^6Kfz km	Personenschäden Unfälle / 10^6Kfz km
2 Fahrstreifen je Richtung	0,094	0,619	0,100	0,094	0,619	0,100
VF 2+2red	0,141	0,923	0,150	0,094	0,619	0,100
VF 2+1	0,192	0,859	0,204	0,094	0,619	0,100
VF 3+1	0,195	0,873	0,207	0,195	0,873	0,207
VF 3+0	0,195	0,873	0,207	0,195	0,873	0,207
VR 2+0	0,192	0,859	0,204	0,192	0,859	0,204
VF 4+0	0,195	0,873	0,207	0,195	0,873	0,207
3 Fahrstreifen je Richtung	0,094	0,619	0,100	0,094	0,619	0,100
VF 3+3red.	0,141	0,923	0,150	0,094	0,619	0,100
VF 3+2	0,141	0,923	0,150	0,094	0,619	0,100
VF 3+1	0,141	0,923	0,150	0,094	0,619	0,100
VF 3*+1	0,192	0,859	0,204	0,192	0,859	0,204
VR 4+1	0,195	0,873	0,207	0,195	0,873	0,207
VF 4+2	0,195	0,873	0,207	0,195	0,873	0,207
VF 5+1	0,195	0,873	0,207	0,195	0,873	0,207
VF 4+0	0,195	0,873	0,207	0,195	0,873	0,207
VF 5+0	0,195	0,873	0,207	0,195	0,873	0,207
VF 6+0	0,195	0,873	0,207	0,195	0,873	0,207

Tabelle 44: Zuordnung der Unfallraten nach dem Bundesverkehrswegplan 2003 [29], mit Anpassung an die österreichischen Verhältnisse (Bezugswerte)

7.3.2. Baustellenbedingte Unfallraten VIAPMS_NUTZ

Für die Ermittlung der zusätzlichen Unfallkosten zufolge Baustellen ist die über die mittlere Unfallrate hinausgehende Unfallhäufigkeit von Interesse. In Tabelle sind daher die auf Grundlage von Tabelle 44 ermittelten, in der Anwendung übernommenen zusätzlichen Unfallraten (zugeordnet zu den jeweiligen Verkehrsführungen) dargestellt. Diese ergeben dann gemeinsam mit der Verkehrsbelastung und der Baustellenlänge die auftretenden Nutzerkosten zufolge Baustelleneinrichtung.

2 Fahrstreifen je Richtung		in BS	gegen BS
		Unfallrate Personenschäden Unfälle / 10^6 Kfz km	
VF 2+2red		0.050	0.000
VF 2+1		0.104	0.000
VF 3+1		0.107	0.104
VF 3+0		0.107	0.104
VR 2+0		0.104	0.104
VF 4+0		0.107	0.107

3 Fahrstreifen je Richtung		in BS	gegen BS
		Unfallrate Unfälle / 10^6 Kfz km	
VF 3+3red.		0.050	0.000
VF 3+2		0.050	0.000
VF 3+1		0.050	0.000
VF 3*+1		0.104	0.104
VR 4+1		0.107	0.107
VF 4+2		0.107	0.107
VF 5+1		0.107	0.107
VF 4+0		0.107	0.107
VF 5+0		0.107	0.107
VF 6+0		0.107	0.107

Tabelle 45: zusätzliche Unfallraten zufolge Baustelleneinrichtung für VIAPMS-NUTZ

Die zusätzlichen Unfallkosten (UK) selbst ergeben sich über den gesamten Zeitraum der Baustelle wie folgt:

$$UK = zusUR_{Baustelle} * \frac{l_{Baustelle} * JDTV * UKS * D}{10^6}$$ Gleichung 62

UR … Unfallrate

UKS … Unfallkostensatz

D … Dauer der Baustelle

7.4. zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten

Die Fahrzeugbetriebskosten erfahren im Bereich der Baustelle zwei gegengerichtete Impulse. Einerseits kommt es durch zusätzliche Anfahr- und Haltevorgänge, besonders im Falle einer Überlastung, zu einer Steigerung des Treibstoffverbrauchs [19], andererseits wird der Baustellenabschnitt mit einer geringeren Geschwindigkeit befahren, wodurch sich dieser wiederum reduziert.

Die Berechnung des Betriebsmittelbedarfs aufgrund der gefahrenen Geschwindigkeit lässt sich analog zur Berechnung auf der freien Strecke durchführen. Die hierfür benötigten Zusammenhänge sind in Kapitel 6.3.1 dargestellt.

Unabhängig von Straßenzustand kann nach Hulmak et al. [66] im Mittel von einer Steigerung des Treibstoffbedarfs durch Stau im Personenverkehr von 65 % bei Benzin und 40% bei Diesel ausgegangen werden. Der durchschnittliche Treibstoffverbrauch kann Tabelle 46 entnommen werden. Für den Güterverkehr ergeben sich Erhöhungen von rund 25%.

Treibstoffverbrauch [l/100km]	Benzin	Diesel	Güterverkehr
ohne Stau	5,4	4,7	30
mit Stau	9,0	6,7	37

Tabelle 46: Treibstoffverbrauch mit und ohne Stau [66]

In der Anwendung wird vorerst nur der Betriebsmittelbedarf zufolge Geschwindigkeit berücksichtigt, Es zeigt sich, dass die so entstehenden Kosten im Vergleich zu den anderen Kostengruppen sehr klein sind. Besonders im Falle eines Staus belaufen sich die Betriebskosten im Promillebereich der Gesamtkosten.

8. SONSTIGE FAKTOREN / KOSTEN DRITTER

In diesem Abschnitt sollen alle Kosten- und Einflussfaktoren zusammengefasst werden, die durch die Setzung einer Maßnahme direkt oder indirekt weitere Personengruppen (auch Straßennutzer können sich ev. als Betroffene wiederfinden) betreffen.

Dies sind beispielsweise Kosten, die Anrainer durch den schlechten Straßenzustand oder die Bautätigkeit entstehen, wie Lärmkosten oder auch als Folge eine höhere Abgasbelastung. Andererseits können durchgeführte Erhaltungsmaßnahmen ebenso zu einem zusätzlichen Nutzen für Dritte führen, zum Beispiel durch eine Reduzierung von Lärm oder Schadstoffbelastungen. Ebenso fallen hierunter Kosten, die der Umwelt bzw. der Allgemeinheit erwachsen, durch Veränderungen von Natur und Landschaft, sowie Beeinträchtigungen von Wasser- und Bodenqualität.

Durch die Einrichtung von Baustellen kann es zu einer Beeinträchtigung des Verkehrsflusses kommen, dies resultiert unter anderem in einer Erhöhung der Beschleunigungs- und Bremsvorgänge. In Bezug auf die Kosten Dritter kann hierdurch eine höhere Umweltbelastung (Schadstoffausstoß) ermittelt werden (genaue Betrachtungen können Beckmann et al. [39] entnommen werden). Die ebenso auftretenden höheren Fahrerbelastungen durch die nötige Konzentration im Kolonnenverkehr sollten grundsätzlich schon im Bereich der Nutzerkosten erfasst worden sein.

Eine Kostenart, die sich mehr zu den Baustellenkosten zählen lässt, kann unter dem Begriff der Verkehrsmanagementkosten zusammengefasst werden. Nur wenn eine funktionierende Verkehrsleitung und eine Überwachung der vorgeschriebenen Geschwindigkeiten möglich ist, kann eine niedrige Unfallwahrscheinlichkeit garantiert werden.

Die Liste der angeführten Kostenarten kann keinesfalls als vollständig angesehen werden, sie zeigt jedoch auf, in welchen Bereich mit Wirkungen von Straßenbaumaßnahmen zu rechnen ist. Bei Neubauprojekten sind noch weitere Aspekte, wie beispielsweise die Effekte auf Natur- und Landschaftsbild, zu berücksichtigen.

Als weiteres Problem stellt sich die Unsicherheit dieser Kostengruppe dar, die auch wesentlich die Aussagekraft etwaiger Kalkulationen beeinflusst. Die Zusammenhänge unterliegen großen Schwankungen, unter der Kenntnis der Standardabweichung der Eingangsgrößen könnte in der Folge jedoch eine Fehlerabschätzung durchgeführt werden.

8.1. Umweltkosten / Klimakosten

Die Wirkung einer Maßnahme auf die Landschaft, wie den Flächenverbrauch, die Trennwirkung oder die Belastungen für Boden und Wasser, ist bei Neubauprojekten ein wesentlicher Aspekt. Für Erhaltungsplanungen sind die zusätzlichen Belastungen jedoch sehr gering und diese Größen können meist vernachlässigt werden.

Größeren Einfluss haben die Umweltkosten in Form von Schadstoffkosten an Gebäuden, Vegetationsschadstoffkosten und Klimakosten, wie sie auch in der österreichischen Wegekostenrechnung [5] berücksichtigt werden.

Klima

Schadstoffe wirken sich generell auch auf das Klima aus, besonderen Einfluss hat die CO_2-Emission auf die Erdatmosphäre (atmosphärische Temperaturerhöhung). Die so verursachten Kosten werden über die CO_2-Emission bestimmt und als Klimakosten zusammengefasst.

Die Wirkung einer Maßnahme auf die Umwelt, insbesonders auf das Klima (ausgedrückt durch die Emission an Kohlendioxid), lässt sich mit Hilfe der RVS 02.01.22 - Entwurf [18] in einen Kostenwert umrechnen. Der Monetarisierungsfaktor ist auf dem Preisstand von 2009 mit 50 €/t CO_2 festgelegt. Die Menge an emittiertem CO_2 [t] kann durch die Multiplikation des verbrauchten Kraftstoffes [t] mit dem Faktor 3,15 berechnet werden.

International rückt das Thema Umwelt und Klimakosten immer mehr in Vordergrund, dies unterstreicht auch die Tatsache, dass sich einige Studien mit dieser Fragestellung beschäftigen. Beispielhaft sei hier das Projekt „Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation" (ECRPD) [109] genannt, das als EU Projekt durchgeführt wird.

8.2. Lärmkosten

Kosten, die infolge der Lärmeinwirkung erwachsen können, sind einerseits Wertminderung von Sachanlagen, andererseits gesundheitliche Schädigungen, welche die Belästigung zur Folge hat.

Die Monetarisierung des Verkehrslärms in Form der Belästigung und Gesundheitsbelastung kann nach RVS 02.01.22 - Entwurf [18] für zwei Wirkungsbereiche erfasst werden. Hierbei kann zwischen den Zeitbereichen tagsüber (Wirkungen auf Kommunikation, Konzentationsfähigkeit, Kreislaufstörungen, u.ä., 6-22 Uhr) und nachts (Wirkung der Schlafstörung, 22-6 Uhr) unterschieden werden. Grundlage bilden die nach RVS 04.02.11 zu ermittelten Immissionsschallpegel L_d, L_e und L_n. Lärmkosten entstehen ab einer Überschreitung des Richtwertes für die ressourcenverzehrende Wirkung der Lärmeinwirkung, welcher für den Tageszeitraum 50 dB(A) und für den Nachtzeitraum 40 dB(A) beträgt. Die Lärmkosten ergeben aus dem Produkt der Lärm-Einwohner-Gleichwerte LEG (berücksichtigt Störung und Lärmbetroffene) und den entsprechenden Lärmkostensätzen (laut RVS kann einheitlich mit einem Kostensatz von 75 €/LEG.a gerechnet werden).

Dies entspricht sowohl den Vermeidungskosten, als auch der Zahlungsbereitschaft für Lärmbelastung und in etwa dem Wert, der auch in der deutschen EWS anzusetzen ist. Wichtig hierbei ist die Gewichtung über die Zahl der belasteten Einwohner, da hierbei der realen Situation entsprochen wird.

Ein Ansatz für die Ermittlung der Lärmkosten findet sich auch in der Wegekostenrechnung für die Straße [5]. Dieser sollte jedoch nur in aktualisierter Form für eine Anwendung im Erhaltungsmanagement übernommen werden, da die Studie selbst in Teilen auf einen Ansatz einer Vorläuferstudie zurückgreift (Externe Kosten im Güterverkehr in Österreich [110]). Es wird sowohl die Wertminderung von Grundstücken und Gebäuden (mittels willingness to pay Ansatz), als auch die gesundheitliche Beeinträchtigung durch den Lärm (Erhöhung des Herzinfarktrisikos) berücksichtigt.

Im Zuge des europäischen Forschungsprojekts HEATCO wurden „Willingness to pay" Werte für unterschiedliche Lärmszenarien entwickelt (nicht störend, leicht, mittel und stark störend), Die Kostensätze können im Detail Tabelle 47 entnommen werden, sie verstehen sich als € pro Jahr und beeinträchtigter Person (Basisjahr 2005).

Szenario	Kostensatz [€/Jahr,Person]
stark störend	59 €
störend	59 €
leicht störend	38€
nicht störend	0 €

Tabelle 47: Willingness-to-pay Werte aus HEATCO-Projekt [27]

8.3. Schadstoffkosten

Vegetation

Diese Kosten ergeben sich aus der Wirkung der Schadstoffe auf Vegetation und Umwelt, welche Ernteausfälle in der Landwirtschaft und Waldschäden verursachen. Wesentlichen Einfluss haben CO, NO_X, HC, SO_2 und Partikel-Emissionen. In der Österreichischen Wegekostenrechnung [5] werden aufgrund der Zusammenschau verschiedenster Studien Kostensätze für Schadstoffkosten angeführt. Aktuellere Schadstoffkostensätze können der RVS 02.01.22 - Entwurf [18] entnommen werden und sind im Vergleich zu den bisher vorgeschlagenen Werten in Tabelle 50 dargestellt. In den aktuelleren Studien werden die Wirkungen umfassender berücksichtigt und es ergeben sich deutlich höhere Kostensätze.

Mensch

Hierbei erfolgt eine Berücksichtigung der Auswirkung der Luftverschmutzung, im Besonderen durch Staubpartikeln und hieraus die Folgewirkung auf den menschlichen Organismus. Werte können beispielsweise der Österreichischen Wegekostenrechnung [5] entnommen werden. Hierbei werden zusätzliche Krankheits- und Todesfälle zufolge Luftverschmutzung (Bronchitis, Asthma,...) berücksichtigt. Beispielhaft wurden für das Jahr 1996 durch den Straßenverkehr verursachte Kosten von 1,48 – 4,36 Mio. € für die Auswirkungen auf die Gesundheit (Zahlungsbereitschaft für einen vermiedenen Todesfall = 0,9 Mio. €) berechnet.

In der EWS [20] werden Kosten je Schadstoffeinwohnergleichwert mit 47.000 DM (~23.900 €) pro Jahr angegeben.

Schadstoff	außerorts [€/t]	innerorts [€/t]
NOx	765	3.677
CH	1.726	4.455
CO	3,63	9,08
SO_2	327	1.555
Partikel	291	1.380

Schadstoff	außerorts [€/t]	innerorts [€/t]
NOx	10.200	10.200
Kohlenwasserstoffe (ohne Methan)	2.000	2.000
Partikel grob(Abrieb+Ruß)	30.000	100.000
Partikel fein (Ruß)	80.000	300.000
Partikel gemischt	60.000	220.000

Tabelle 48: Kostensätze für Schadstoffe aus RVS 02.01.22 [18] links alt; rechts neu (2009)

Gebäude

Hierbei werden Kosten für zusätzliche Reinigung und Renovierung berücksichtigt (Grundlage bildet die Studie Herry / Infras / Prognos: Einzel- und gesamtwirtschaftliche Wege 1995), diese Kosten fallen vor allem an ortsdurchführenden Hauptstraßen an und können für Autobahnen und Schnellstraßen nicht angewendet werden.

8.4. Induzierter Verkehr / verlagerter Verkehr

Bei der Betrachtung von Erhaltungsmaßnahmen kann nicht von einer Wirkung als neue Verkehrsquelle ausgegangen werden. Dieser Aspekt bezieht sich hauptsächlich auf den Neubau und die Erweiterung von Streckenabschnitten. Daher wird im Weiteren nicht mehr auf den induzierten Verkehr eingegangen.

Im Falle von Umleitungen ist jedoch der Umleitungs- bzw. Ausweichverkehr nicht aus den Augen zu verlieren. Hier stellt sich die Frage der räumlichen Abgrenzung des Untersuchungsgebiets, da Ausweichverkehr, der die Baustelle umfahren will, den Anrainerverkehr im untergeordneten Netz beeinträchtigt und hier zu einem gesteigerten Verkehrsaufkommen und eventuell auch zu Überlastungen führen kann.

8.5. Resümee

Die in Kapitel 8 angeführten Kosten für Dritte können für eine Erweiterung des Nutzerkosten-Moduls im Erhaltungsmanagement dienen. Vor allem Lärm-, Klima- und Schadstoffkosten bieten die Möglichkeit in die Anwendung übernommen zu werden. Hierbei können infolge alle volkswirtschaftlich relevanten Kostenbereiche abgedeckt werden.

In der hier dargestellten Erweitung VIAPMS_NUTZ sind diese Kosten jedoch nicht berücksichtigt, sondern es werden nur jene Kosten berechnet, die direkt beim Straßennutzer auftreten.

9. UMSETZUNG IN VIAPMS_AUSTRIA_NUTZ

Ziel der gegenständlichen Arbeit war es, einen anwendungsfähigen Modul zur Erweiterung des konventionellen österreichischen Pavement Management Systems VIAPMS_AUSTRIA zu entwickeln. Es war möglich, für alle relevanten Einflüsse entsprechende Wirkmechanismen aus der Literatur zu entnehmen (siehe Kapitel 6 und Kapitel 7) und in die Anwendung zu übertragen. Dieser Modul kann durch das Setzen des Filters „aF_Nutzerkosten“ von FALSE auf TRUE zum Berechnungsablauf hinzugeschaltet werden.

In Abbildung 59 ist das Flussdiagramm für die konventionelle Anwendung und die Erweiterung dargestellt. Hierbei ist die Änderung bei der Bildung des Nutzens (und in weiterer Folge dann auch die Beeinflussung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses und aller nachfolgenden Berechnungsschritte) klar herausgearbeitet.

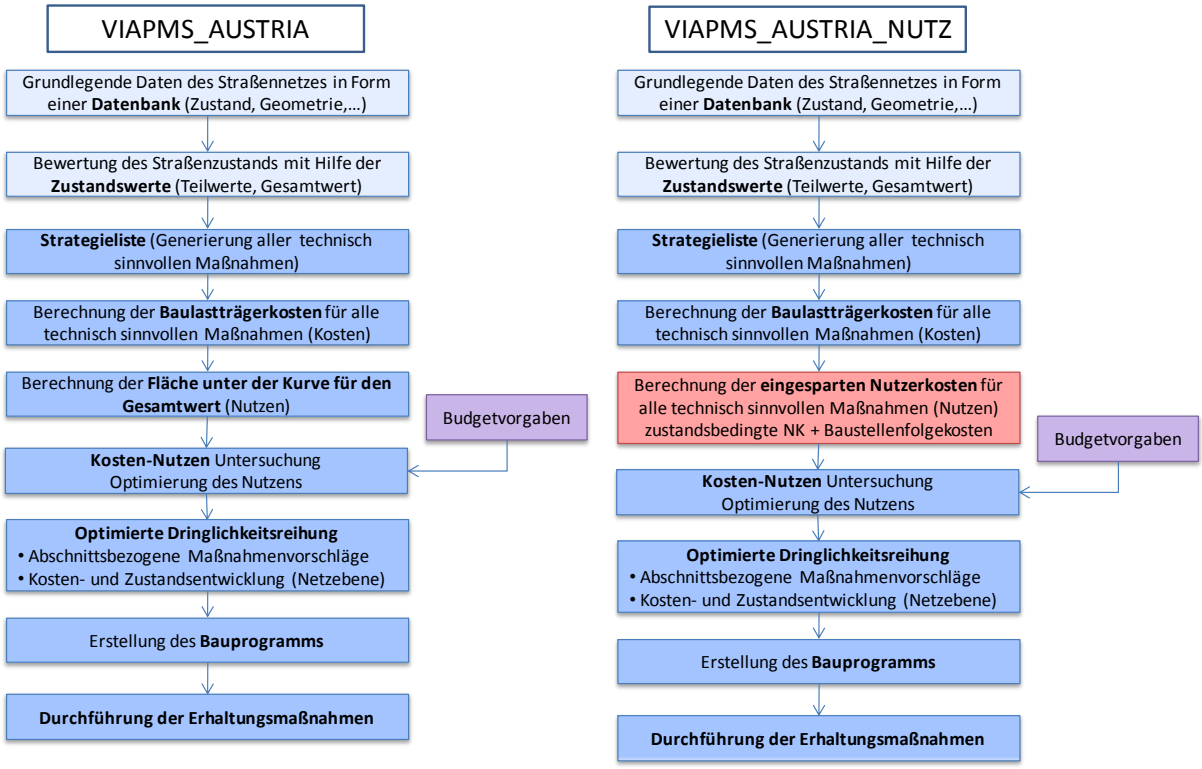


Abbildung 59: Flussdiagramm für das konventionelle PMS und die Erweiterung, in Anlehnung an das Struktogramm des österreichischen PMS in [1]

Grundsätzlich kann im Zuge der Ergebnisdarstellung der ergänzenden Berechnung gezeigt werden, wie sich der Erhaltungsvorschlag für das gesamte Netz oder auch für einen ausgewählten Abschnitt ändert, wenn die Straßennutzerkosten als Optimierungskriterium hinzugezogen werden. Alternativ besteht auch die Möglichkeit, für den konventionellen, nur auf Basis der Baulastträgerkosten ermittelten Erhaltungsvorschlag ergänzend die auftretenden Nutzerkosten zu ermitteln und die generierten Nutzen bzw. die Belastungen so zu monetarisieren.

Wie schon in den vorangehenden Grundlagenkapiteln erfolgt auch bei der Umsetzung der Zusammenhänge eine Trennung in Straßennutzerkosten, die sich aus dem Straßenzustand ergeben und jenen zufolge Beeinträchtigungen aufgrund von Erhaltungsmaßnahmen beziehungsweise Baustellen. Jeder Kostenanteil wird getrennt berechnet und es besteht stets die Möglichkeit, implementierte Zusammenhänge durch weiterentwickelte Ansätze auszutauschen.

Die Auswertung kann grundsätzliche auf einen einzelnen Erhaltungsabschnitt bezogen sein oder den Zustand des gesamten Netzes betrachten, wobei auch diese Daten aus den Einzelergebnissen aller homogener Abschnitte im Netz zusammengesetzt werden. Die Netzbetrachtung erleichtert dabeo den Überblick über den Zustand des Gesamtnetzes und die Entwicklung der Zustandsindikatoren über den Betrachtungszeitraum, insbesondere zum Vergleich von unterschiedlichen Budgetszenarien und Erhaltungsstrategien.

9.1. Allgemeine Abgrenzungen

Die Analyse wird über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren durchgeführt (wie im vorliegenden Beispiel von 2008 bis 2038), für diesen Zeitraum erfolgt die Berechnung der auftretenden Nutzen sowie der jeweiligen Kosten (für Baulastträger und Straßennutzer). Die Maßnahmenperiode (jener Zeitraum, für welchen vom System Maßnahmenvorschläge ausgearbeitet werden) beträgt jedoch in Anlehnung an die derzeit gängige Praxis 20 Jahre (2008 bis 2028). Ein längerer Analysezeitraum ist für die Berücksichtigung von langfristigen Wirkungen erforderlich. Grundsätzlich ist es auch denkbar, diesen Zeitraum noch zu erweitern.

Alle Kosten und Nutzen werden auf den Bezugszeitpunkt (Ausgangspunkt der Analyse – 2008) bezogen und auf diesen Zeitpunkt diskontiert. Durch die Verwendung eines Diskontsatzes (im Beispiel von 3 %) wird jedoch der Einfluss von Kosten und Nutzen, die zu einem späteren Zeitpunkt im Analysezeitraum auftreten, abgeschwächt.

9.1.1. Beispielnetz

Die Anwendung wird an einem ausgewählten, realistischen Straßennetz, welches von seinen Eigenschaften (Zustandsgrößen, Alter, Verkehrsbelastung,...) her dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz entspricht, durchgeführt. Das Netz umfasst 15 Straßen mit je 2 Richtungsfahrbahnen, insgesamt 468 Abschnitte bzw. 1.255,600 km Richtungsfahrbahnkilometer. Das Netz enthält eine Variation an Verkehrsbelastungen, sowie Abschnitte mit 1, 2, 3 oder 4 Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn. Insgesamt ergeben sich für den betrachteten Bereich 3.006,611 Fahrsteifen-Kilometer. Die Längen der homogenen Abschnitte reichen von unter 100 m bis hin zu über 10 km (eine Verteilung der Längen ist Abbildung 60 zu entnehmen).

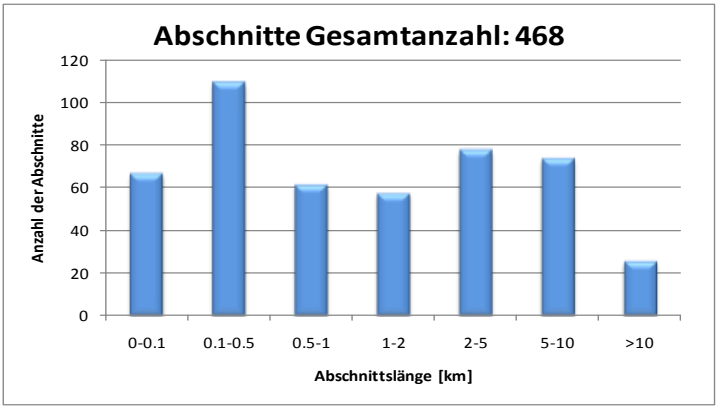


Abbildung 60: Abschnittslängenverteilung im Beispielnetz

Der Straßenzustand kann anhand der Zustandswerte (ZW) Gesamtwert (gebildet über alle vorhandenen Fahrstreifen) sowie Substanzwert und Gebrauchswert für den ersten Fahrstreifen (_F1) dargestellt werden. Abbildung 61 zeigt die Verteilung der Zustandswerte des Beispielnetzes im Ausgangsjahr der Analyse (2008); Klasse 1 / sehr gut / dunkelgrün (ZW: 1-

1,5), Klasse 2 / gut / hellgrün (ZW: 1,5-2,5), Klasse 3 / mittel / gelb (ZW: 2,5-3,5), Klasse 4 / schlecht / orange (ZW: 3,5-4,5) und Klasse 5 / sehr schlecht / rot (ZW: 4,5-5).

Betrachtet man den Gesamtwert so ist zu bemerken, dass ein durchaus bemerkbarer Anteil von knapp 12% in die Klasse „sehr schlecht" fällt, es sind jedoch keine Anteile in der Klasse „sehr gut" zu finden. Der Substanzwert zeigt hier ein etwas differenziertes Bild, hierbei tritt sowohl ein größerer Anteil in der Klasse sehr schlecht auf, jedoch befinden sich über 45 % des Netzes in der Klasse „sehr gut". Im Gesamten ist das Netz in einem durchaus guten Zustand.

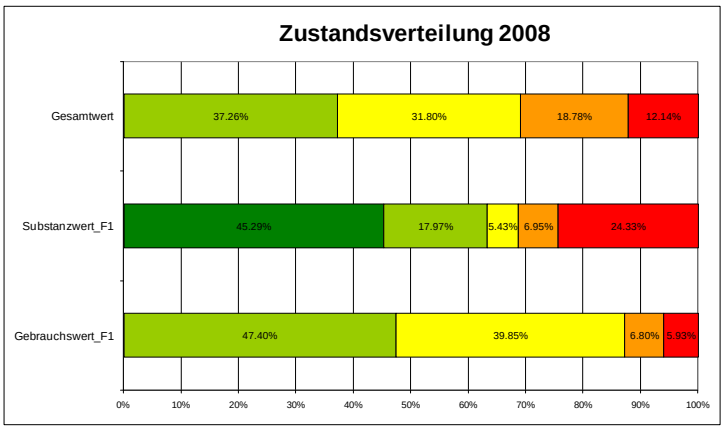


Abbildung 61: Zustandsverteilung im Beispielnetz

Auch die Verkehrsdaten wurden in Analogie zum österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz gewählt, wobei - wie bei allen Einflussgrößen - versucht wurde, möglichst die gesamte Bandbreite des vorhandenen Netzes abzubilden. Die Verteilung der Verkehrs- und Schwerverkehrsbelastung ist, bezogen auf die jeweils belasteten Abschnittslängen, in Abbildung 62 dargestellt.

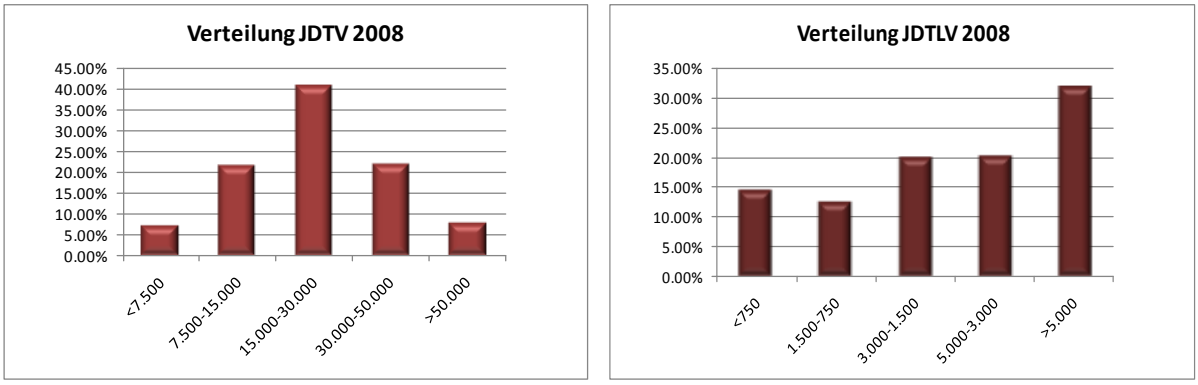


Abbildung 62: Verkehrsbelastung im Beispielnetz

Ausgehend von diesem Grundzustand wird eine konventionelle Analyse (Optimierung nur über die Baulastträgerkosten) gefahren und parallel dazu wird auf Grundlage derselben Daten unter Anwendung des neu entwickelten Nutzerkosten-Moduls ein Erhaltungskonzept mit maximalem Gewinn für den Straßennutzer erzeugt. Die Ergebnisse der beiden Auswertungen sind in Kapitel 9.3 ausführlich dargestellt.

9.1.2. Zustandsbedingte Nutzerkosten

Zustandsbedingte Nutzerkosten fassen die Wirkung der Straßenoberfläche auf den Nutzer monetär zusammen. Sie setzten sich aus den Anteilen Betriebs-, Unfall- und Zeitkosten zusammen. Die Berechnung der absoluten Kosten erfolgt für jedes Analysejahr wie nachfolgend dargestellt:

$$NK_Zustand_{Gesamt} = NK_Zustand_Zeit + NK_Zustand_Betrieb + NK_Zustand_Unfall_F1 + NK_Zustand_Unfall_F2 + NK_Zustand_Unfall_F3$$ Gleichung 63

NK_Zustand_Zeit ...	zustandsbezogene Zeitkosten (Einflussgröße Geschwindigkeit)
NK_Zustand_Betrieb ...	zustandsbezogene Betriebskosten (Einflussgröße Geschwindigkeit)
NK_Zustand_Unfall_F1 ...	zustandsbezogene Unfallkosten auf dem 1. Fahrstreifen (Einflussgrößen Griffigkeitsklasse, Spurrinnenklasse)
NK_Zustand_Unfall_F2 ...	zustandsbezogene Unfallkosten auf dem 2. Fahrstreifen (Einflussgrößen Griffigkeitsklasse, Spurrinnenklasse)
NK_Zustand_Unfall_F3 ...	zustandsbezogene Unfallkosten auf dem 3. Fahrstreifen (Einflussgrößen Griffigkeitsklasse, Spurrinnenklasse)

Für die Berechnung der Geschwindigkeit wird bei den in Kapitel 6.2.1 detailliert dargestellten Zusammenhängen die Längsebenheit als maßgebliche Einflussgröße berücksichtigt. In der derzeitigen Anwendung von VIAPMS_AUSTRIA besteht durch die Bildung des Gebrauchswert_Komfort bisher schon eine gemeinsame Bewertung von Längsebenheit und Oberflächenschäden. Um die Wirkung der Oberflächenschäden auf den Straßennutzer auch im Nutzerkostenmodul berücksichtigen zu können, wurde eine Erweiterung der Zustandsgröße Längsebenheit integriert. Für die Berechnung des erweiterten Wertes ZG_IRImod_F1, F2 bzw. F3 wird von dem jeweiligen ZW_GI_Komfort auf die erhöhte Längsunebenheit (aufgrund einer starken Oberflächenschädigung) zurückgerechnet. Das heißt, bei einem schlechten Oberflächenzustand ergibt sich ein schlechterer IRImod Wert, der die Grundlage für die Geschwindigkeitsberechnung bildet.

Da auch die Nutzerkosten fahrstreifenbezogen ermittelt werden, ist im Zuge der Anwendung auch eine Verteilung der Verkehrsbelastung auf die Fahrstreifen erforderlich. Hierbei kann auch auf die Studie von Klementschitz [31] zurückgegriffen werden, welcher Verteilungen für österreichische Autobahnen mit 2, 3 oder 4 Fahrstreifen je Richtung in Abhängigkeit der jeweils auftretenden täglichen Verkehrsbelastung (JDTV) entwickelt hat. In Abbildung 63 sind die Zusammenhänge für 2 und 3 Fahrstreifen dargestellt.

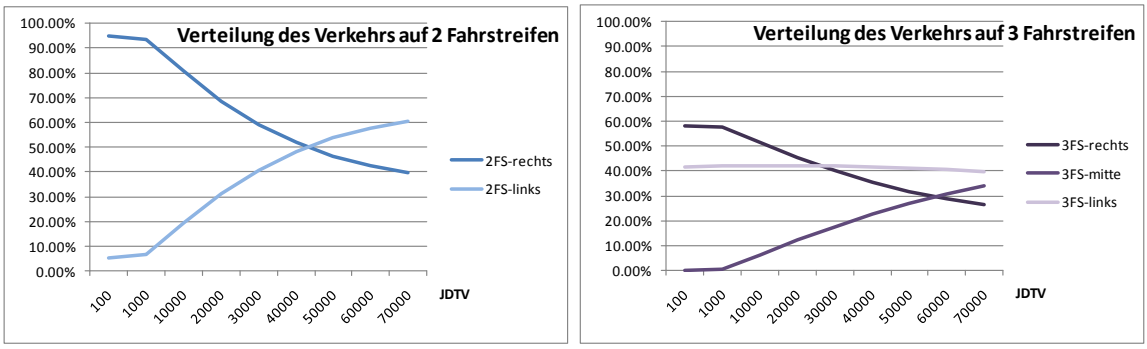


Abbildung 63: Verteilung des Verkehrs auf 2 bzw. 3 Fahrstreifen nach [31]

Die Vergleichsgröße für unterschiedliche Maßnahmen stellt jedoch nicht die Summe der absolut entstehenden Nutzerkosten dar, sondern - wie Abbildung 64 dargestellt - die eingesparten Nutzerkosten. Das ist die Summe jener Einsparungen, die als Folge einer Maßnahme (vor allem durch den resultierenden besseren Oberflächenzustand des Abschnitts) erzielt werden kann. Diese Summe der jährlichen Einsparungen kann ebenso als Fläche zwischen den Kostenkurven

ohne (rote Linie) und mit Maßnahme (blaue Linie) verstanden werden. Zum Vergleich von unterschiedlichen Maßnahmenstrategien wird die Summe der eingesparten Nutzerkosten auf den Bezugszeitpunkt diskontiert.

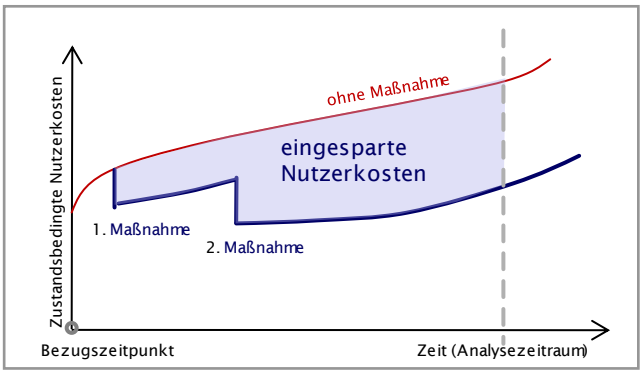


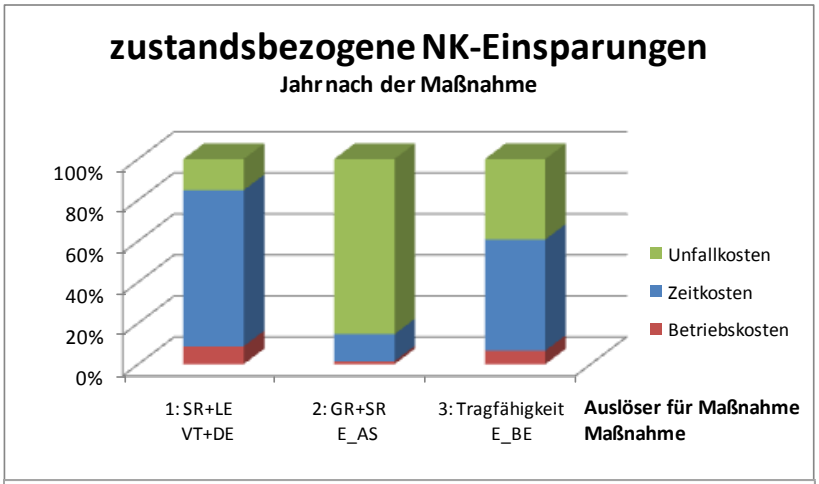
Abbildung 64: Beurteilung von zustandsbezogenen Nutzerkosten

Dieser Nutzen entsteht erst nach Setzen der Maßnahme, bleibt jedoch über den gesamten Analysezeitraum aufrecht. Man muss sich bewusst sein, dass für Maßnahmen, die am Ende der Maßnahmenperiode (z.B. 2026) gesetzt werden, genauso wie für früher gesetzte Maßnahmen, der Nutzen bis zum Ende der Analyseperiode (2038) ermittelt wird. Durch den Ansatz einer Diskontrate wird jedoch der Nutzen einer Maßnahme zu einem späteren Zeitpunkt geringer bewertet.

Vergleich von Abschnitten in unterschiedlichen Zuständen

Maßnahmen können durch unterschiedliche Zustandsindikatoren ausgelöst werden, beispielsweise durch eine schlechte Griffigkeit oder eine schlechte Tragfähigkeit des Abschnitts. Für jeden Abschnitt werden alle Maßnahmen verglichen, die den geforderten guten Zustand wieder herstellen können.

Unterschiedliche Zustandsgrößen bewirken auch dementsprechende zustandsbedingte Nutzerkosten und damit Nutzerkosten-Einsparungen. In Abbildung 65 sind für drei verschiedene Abschnitte der maßnahmenauslösende Zustand und die daraus folgende Verteilung der Kosten auf die Bereiche Unfall-, Zeit- und Betriebskosten dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass bei einer schlechten Ebenheit (ausgedrückt durch die Zustandsgrößen Spurrinnen SR und Längsebenheit LE) der überwiegende Teil der Einsparungen auf die Zeitkosten fällt, ist hingegen die Griffigkeit GR Auslöser der Maßnahme, so lässt sich dies deutlich an dem Anteil der Unfallkosten (mehr als 80%) erkennen. Im dritten Abschnitt muss die Maßnahme aufgrund der schlechten Tragfähigkeit durchgeführt werden. Die für den Nutzer maßgebende Straßenoberfläche ist jedoch noch in einem guten Zustand, dies spiegelt sich auch in den gleich großen Anteilen der Unfall- und Zeitkosten wider. Die Betriebskosten sind in allen drei Fällen von sehr geringer Bedeutung, eine genauere Betrachtung dieser Kostengruppe ist daher nicht vorrangig.



SR	Spurrinnen	VT	Verstärkung im Tiefeinbau
LE	Längesebenheit	DE	Instandsetzung Decke
GR	Griffigkeit	E_AS	Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise
		E_BE	Erneuerung Oberbau in Betonbauweise

Abbildung 65: Verteilung der zustandsbezogenen Nutzerkosten-Einsparungen bei unterschiedlichen Zuständen

9.1.3. Baustellenbedingte Nutzerkosten (Baustellenfolgekosten)

Die Baustellenfolgekosten treten durch die tatsächliche Durchführung der Maßnahme in Folge der hierfür erforderlichen Verkehrseinschränkungen auf. Belastungen entstehen in Form von Betriebskosten (diese können durch die geringere Geschwindigkeit im Baustellenbereich unter jenen auf der freien Strecke liegen), Unfallkosten und Zeitkosten (hierbei kann zwischen Kosten zufolge der geringeren Geschwindigkeit im Baustellenbereich und jenen aufgrund von Überlastungen und Staubildung unterschieden werden). Die Grundlagen sind in Kapitel 7 ausführlich dargestellt.

Die Berechnung erfolgt für jede Maßnahme getrennt, da hier unterschiedliche Randbedingungen in Bezug auf Produktivität (Maßnahmendauer) und Verkehrsführung geltend gemacht werden. Beispielhaft ist die Berechnung für eine Erneuerung in Asphaltbauweise (E_AS) dargestellt.

$$Bst_KST_E_AS = Bst_KST_E_AS_Unfall + Bst_KST_E_AS_Betrieb + Bst_KST_E_AS_Zeit + Bst_KST_E_AS_Stau_1 + Bst_LST_E_AS_Stau_2$$

Gleichung 64

Bst_KST_E_AS_Unfall … Baustellenbezogene Unfallkosten (Einfluss: Verkehrsführung)

Bst_KST_E_AS_Betrieb … Baustellenbezogene Betriebskosten (Einfluss: Geschwindigkeit)

Bst_KST_E_AS_Zeit … Baustellenbezogene Zeitkosten (Einfluss: Geschwindigkeit)

Bst_KST_E_AS_Stau_1 … Baustellenbezogene Staukosten 1.-12. Stunde (Einfluss: VF+JDTV)

Bst_KST_E_AS_Stau_2 … Baustellenbezogene Staukosten 13.-24. Stunde (Einfluss: VF+JDTV)

Abbildung 66 stellt graphisch den Zeitpunkt des Auftretens der Kosten dar. Wie erwähnt erfolgt dies nur in dem Jahr, in welchem die Baustelle durchgeführt wird. In den Jahren ohne Erhaltungsmaßnahem fallen auch keine Baustellenfolgekosten an. Ebenso wie alle anderen Kosten (auch die Baulastträgerkosten) werden diese auf den Beginn der Analyseperiode diskontiert.

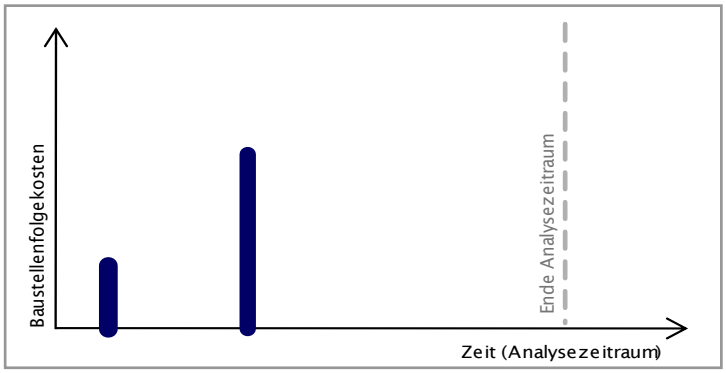


Abbildung 66: Auftreten von baustellenbezogenen Nutzerkosten (Baustellenfolgekosten)

Vergleich von Abschnitten in unterschiedlichen Zuständen

Die absolute Größe der entstehenden Kosten ist in erster Linie von der Bauloslänge und in weiteren auch von der Anzahl der betroffenen Fahrzeuge und der Anzahl der vorhandenen Fahrstreifen abhängig. Je länger der Abschnitt, desto größer ist der Zeitverlust bei der Durchfahrt. Dieser Zeitverlust je Fahrzeug wird mit dem Zeitkostensatz und der Anzahl der betroffenen Fahrzeuge multipliziert und ergibt somit die gesamten Zeitkosten (Baustelle Durchfahrt).

Das Verhältnis der einzelnen Kostengruppen relativ zueinander wird vor allem von der jeweiligen Verkehrsbelastung geprägt. Sobald es zu einer Überlastung und Staubildung kommt, ist der Anteil dieser Kosten (Zeitkosten-Stau) stark überwiegend und die anderen Anteile bewegen sich nur mehr im Promille-Bereich. In Abbildung 67 sind die Baustellenfolgekosten für drei verschiedene Abschnitte mit unterschiedlichen Erhaltungsmaßnahmen und Verkehrsbelastungen VB dargestellt. Die Abschnitte sind dieselben, die auch schon Abbildung 65 zugrunde liegen. Deutlich zeigt sich der überwiegende Anteil der Zeitkosten (Stau) bei einer hohen Verkehrsbelastung (VB_hoch). Die Verteilung der Kostenanteile in den anderen beiden Abschnitten ohne Auftreten von Stau ist ähnlich. Generell sind die Anteile der Unfall- und Betriebskosten im Vergleich zu den Zeitkosten sehr gering.

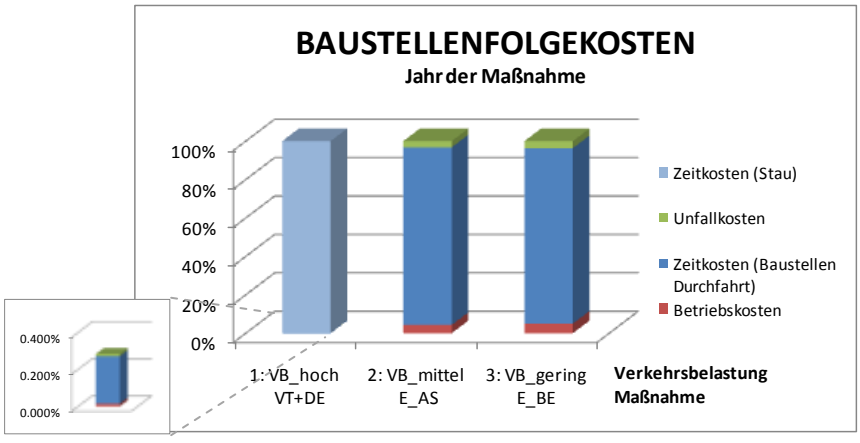


Abbildung 67: Verteilung der baustellenbezogenen Nutzerkosten bei unterschiedlichen Verkehrsbelastungen und Maßnahmen

Weiters ist darauf hinzuweisen, dass durchaus auch organisatorische Maßnahmen zur Staureduktion und Stauvermeidung getroffen werden können, wie beispielsweise eine ausreichende Information der Verkehrsteilnehmer oder eine eindeutige Leitung im Baustellenbereich. Diese Elemente fallen jedoch in den Bereich der Projektebene und können für jedes Projekt individuell bestimmt werden. Daher werden diese Möglichkeiten in der

systematischen Erhaltungsplanung auf Netzebene nicht berücksichtigt, sie sollten aber sehr wohl auf der jeweiligen Baustelle zum Einsatz kommen.

9.2. Möglichkeiten der Berücksichtigung von Nutzerkosten in der Optimierungsroutine

Die Definition der Nutzerkosten ist in den vorangegangenen Kapiteln eindeutig erfolgt. Diese können für jeden homogenen Abschnitt und für jede gewählte Maßnahme berechnet werden. Hierbei handelt es sich um die gesamten Kosten, die dem Straßennutzer entstehen, das heißt zustandsbedingte Nutzerkosten und Baustellenfolgekosten. Im weiteren müssen diese Kosten sowie die Baulastträgerkosten für die Optimierung in einem Kriterium zusammengefasst werden, welches dann als Zielkriterium unter den gegebenen budgetären Randbedingungen möglichst groß oder möglichst klein gehalten werden kann. Dieses Kriterium stellt das Nutzen / Kosten Verhältnis (auch bekannt unter der Bezeichnung Benefit-Cost Ratio) für die jeweilige Maßnahmenstrategie dar. Je größer dieses Verhältnis, desto effizienter die Strategie.

Für die Berücksichtigung der Nutzerkosten und deren Implementierung in der gegenständlichen Anwendung bieten sich drei grundlegende Möglichkeiten:

Methode 1: Vergleichende Auflistung der Barwerte als Ergänzung zum konventionellen Optimierungsergebnis (Nutzen / Kosten Verhältnis der Baulastträgerkosten), Nutzen ausgedrückt als Fläche unter der Kurve (FuK), vgl. Abbildung 68

Methode 2: Verhältnis der eingesparten Nutzerkosten und der Baulastträgerkosten

Methode 3: Verhältnis des konventionellen Nutzens (FuK) und der Gesamtkosten (Baulastträgerkosten + Nutzerkosten)

Zur Vermeidung einer zu raschen Abfolge der einzelnen Maßnahmen ist bei den verschiedenen Erhaltungsstrategien grundsätzlich immer ein zeitlicher Mindestabstand zwischen einer Maßnahme und der Folgemaßnahme vorgesehen. Je tiefgreifender die Maßnahme ist, desto länger darf auf dem gleichen Abschnitt keine Folgemaßnahme gesetzt werden. Der zusätzliche Nutzen, der durch eng gesetzte Maßnahmen erzielt werden kann, wäre auch recht gering.

9.2.1. Methode 1: Vergleichende Auflistung der Barwerte

Diese Variante (=Variante Standard) bietet die Möglichkeit, eine Optimierung nach der konventionellen Methode vorzunehmen (hierdurch erfolgt auch kein weiterer Eingriff auf das verwendete Budget) und zu den so ausgewählten Maßnahmenstrategien die entstehenden zustandsbedingten Nutzerkosteneinsparungen (Gewinn durch die Durchführung der jeweiligen Maßnahme) und die auftretenden Baustellenfolgekosten in Form von Barwerten (bezogen auf den Vergleichszeitpunkt) anzuführen. Diese Auswertung kann sowohl für einen Einzelabschnitt als auch für das gesamte Netz ausgeworfen werden.

Die Beurteilung der Abschnitte erfolgt über die Bildung des Gesamtwerts, der sich aus dem Gebrauchswert (Beurteilung des Gebrauchsverhaltens) und dem Substanzwert (Gesamtzustand der Struktur) gewinnen lässt. Die Berechnung des Nutzens resultiert aus der Fläche unter der Kurve bezogen auf den Verlauf des Gesamtwerts eines Abschnitts (wie in Abbildung 68 dargestellt) vom Einsetzen der Maßnahme bis zum Ende der Analyseperiode. Dieser Wert wird im Zuge der Reihung der Abschnitte noch mit der auftretenden Verkehrsstärke gewichtet.

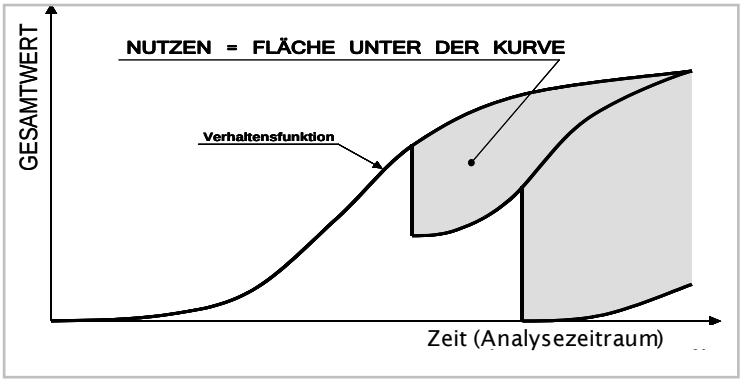


Abbildung 68: Berechnung des Nutzens in der konventionellen PMS Anwendung [1]

Auf der Seite der Kosten wird die Summe der Baulastträgerkosten (reine Herstellungskosten) für die gesamte Maßnahmenstrategie gebildet. Die Maßnahmen werden nach dem Inkrementellen Nutzen-Kosten Verhältnis (beginnend mit der Null-Strategie) gereiht und je nach vorhandenem Budget wird auf Grundlage eines Effektivitätsdiagramms für das gesamte Netz eine optimierte Maßnahmenauswahl (Maßnahmenstrategie) getroffen.

Das entsprechende, hier angewendete Effektivitätsdiagramm ist in Abbildung 69 dargestellt.

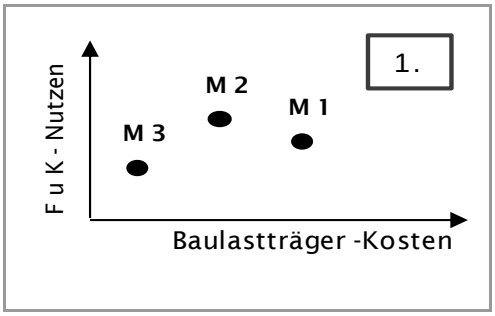


Abbildung 69: Effektivitätsdiagramm Methode 1

9.2.2. Methode 2: Verhältnis der eingesparten Nutzerkosten zu Baulastträgerkosten

Die Straße dient in erster Linie der Verwendung durch den Straßennutzer, daher ist es auch naheliegend, die Straßenerhaltung auf die Bedürfnisse des Nutzers hin zu optimieren.

Die entstehenden Kosten und Gewinne für den Straßennutzer können auch in der Maßnahmenauswahl berücksichtigt werden. Hierfür ist es erforderlich, diese in die Bildung der Kosten oder der Nutzen zu integrieren. Bei der Methode 2 (Δ-Nutzerkosten) werden die Straßenbenutzer auf der Seite des Nutzens berücksichtigt. Dieser bildet die durch die Maßnahme eingesparten Nutzerkosten ab und berechnet sich aus den zustandsbedingten Einsparungen abzüglich der Baustellenfolgekosten. Wie auch in Abbildung 69 dargestellt kann dieser Nutzen sowohl positiv als auch negativ sein. Bei einem positiven Ergebnis überwiegt der Nutzen für den Straßenbenützer, bei einem negativen Ergebnis überwiegen die Beeinträchtigungen durch die Baumaßnahme den generierten Nutzen in der Analyseperiode.

Die Kostenseite bleibt, wie bei der konventionellen Anwendung oder auch bei Variante 1, unverändert und entspricht den Herstellungskosten für den Baulastträger.

Das daraus entwickelte Effektivitätsdiagramm ist in Abbildung 70 abgebildet.

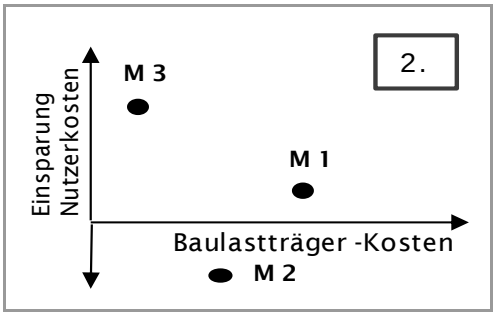


Abbildung 70: Effektivitätsdiagramm Methode 2

9.2.3. Methode 3: Verhältnis des konventionellen Nutzens und der Gesamtkosten

Alle Wirkungen für den Straßennutzer werden monetär bewertet und in Euro ausgegeben. Insofern ist es möglich, diese auch auf der Kostenseite durch die Bildung von Gesamtkosten zu berücksichtigen. Diese Gesamtkosten setzen sich zusammen aus der Summe der Baulastträgerkosten und der Baustellenfolgekosten abzüglich der zustandsbezogenen Nutzerkosteneinsparungen.

Der Nutzen wird wie in der konventionellen Anwendung als Fläche unter der Kurve bezogen auf den Verlauf des Gesamtwerts definiert. Das entsprechende Effektivitätsdiagramm ist in Abbildung 73 schematisch dargestellt.

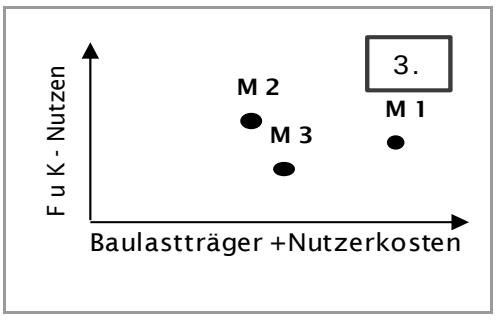


Abbildung 71: Effektivitätsdiagramm Methode 3

Die Auswahl der Maßnahmenstrategie erfolgt auf Grundlage des Nutzen / Kosten Verhältnisses, wobei die Randbedingung der begrenzten budgetären Mittel nur auf die Baulastträgerkosten angewandt werden kann. Für die Nutzerkosten selbst steht ja kein tatsächliches Budget zur Verfügung und dies kann daher nicht als Kriterium angeführt werden. Alternativ kann auf ein festgelegtes Zielkriterium optimiert werden, das heißt der Endzustand des Abschnitts (z.B. Gesamtwert, sollte mindestens in Klasse 3 oder besser liegen) kann festgelegt werden und das hierfür benötigte Nutzerkostenbudget soll im Zuge der Optimierung minimiert werden.

Die Anwendung dieser Optimierung auf Netzebene erweist sich mit den derzeitigen Randbedingungen als nicht durchführbar. Daher wurde diese Variante in dem nachfolgenden Beispiel nicht berücksichtigt. Eine Erweiterung der gegenständlichen Anwendung auf diese Bereiche ist jedoch relativ einfach möglich.

Auf Projektebene (zum Beispiel bei Anwendung in Zuge von PPP-Projekten) ist jedoch der Einsatz unter Vorgabe eines gewünschten Endzustands und der Minimierung der Nutzerkosten sinnvoll, da ja hier oft klare Vorgaben für den zu erreichenden Endzustand bestehen und eine Reduktion der Nutzerbeeinträchtigung auch über Verfügbarkeitsentgelte finanziell berücksichtigt wird.

9.3. Veränderung des Erhaltungsvorschlags durch die Berücksichtigung von Nutzerkosten

Durch die Berücksichtigung von Nutzerkosten im Erhaltungsmanagement kann es zu einer differenzierteren Maßnahmenauswahl und einer Verschiebung von Einsatzzeitpunkten kommen. Ziel ist es, diese geänderte Auswahl darzustellen und die Folgen monetär bewerten zu können. Maßnahmen, die geringere Beeinträchtigungen und hohe Gewinne aufgrund des Zustands für den Straßenbenützer nach sich ziehen, werden in der Nutzerkosten-optimierten Anwendung bevorzugt. Die grundlegenden Anwendungsgrenzen der Maßnahmen werden aus der konventionellen Anwendung übernommen.

9.3.1. Netzebene

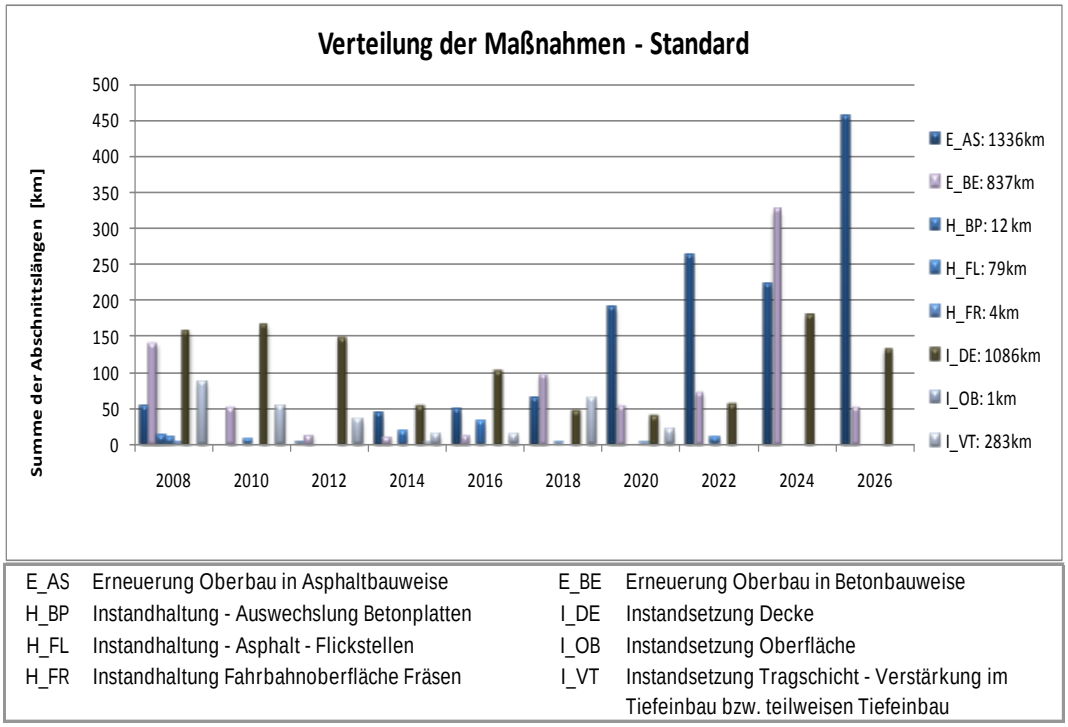
Das Beispielnetz, auf welchem die Anwendung umsetzt wird, ist in Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ausführlich beschrieben. Es entspricht von seinen Eigenschaften (Verkehrsbelastungen, Zustände,...) dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz, ist jedoch kleiner, hat eine geringere Länge an Richtungsfahrstreifen und eine niedrigere Anzahl an Abschnitten.

Für diese Anwendung wurden grundsätzlich keine Budgetvorgaben implementiert, das heißt es steht für die Maßnahmenauswahl ein unbegrenztes Budget zur Verfügung und es wird im Zuge der Optimierung stets die Maßnahme mit dem optimalen Nutzen-Kosten Verhältnis ausgewählt. Bestehen Budgetbegrenzungen (wie dies in der tatsächlichen Umsetzung stets der Fall sein wird), so werden Maßnahmen mit geringeren Kosten, aber dementsprechend auch geringeren Nutzen vorgeschlagen werden. Hieraus folgt auch ein schlechterer Netzzustand.

Die Beurteilung des gesamten Netzes erfolgt konventionell durch die Bildung der jährlichen Verteilung des Gesamtwerts. Ergänzend kann zur Darstellung der Zustandsgrößen, die vorrangig den Straßenbetreiber betreffen, der Substanzwert und jener Größen, die vor allem den Einfluss auf den Straßennutzer abdecken, der Gebrauchswert angeführt werden.

9.3.1.1. Vergleichende Auflistung der Barwerte als Ergänzung zum konventionellen Nutzen / Kosten Verhältnis

Für das gesamte Netz können auf Grundlage des konventionellen PMS-Algorithmus (Standard Variante) Maßnahmenvorschläge für alle homogenen Abschnitte generiert werden. Durch das unbegrenzte Budget ergibt sich jedes Jahr eine große Anzahl an vorgeschlagenen Maßnahmen (siehe Abbildung 72). Die Maßnahmenlängen beziehen sich jeweils auf Fahrstreifen-Kilometer. Die Maßnahme kann über alle vorhandenen Fahrstreifen vorgeschlagen werden. Abhängig vom Straßenzustand ist es aber auch möglich, dass auf den vorhandenen Fahrstreifen unterschiedliche Maßnahmen zur Anwendung gelangen. Vor allem die tiefgreifenden Erneuerungsmaßnahmen in Asphalt und Betonbauweise (E_AS und E_BE) machen mit einer Länge von 2173 km bzw. 59,73 % den überwiegenden Teil der gesamten Maßnahmen aus. Auch die Instandsetzung der Deckschicht (I_DE) mit 1086 km bzw. 29,85 % hat einen maßgeblichen Anteil. Insgesamt werden Maßnahmen auf 3.639 km vorgeschlagen (bei Oberflächen-Maßnahmen muss innerhalb der Analyseperiode zumeist noch eine weitere Maßnahme gesetzt werden).



E_AS	Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise	E_BE	Erneuerung Oberbau in Betonbauweise
H_BP	Instandhaltung - Auswechslung Betonplatten	I_DE	Instandsetzung Decke
H_FL	Instandhaltung - Asphalt - Flickstellen	I_OB	Instandsetzung Oberfläche
H_FR	Instandhaltung Fahrbahnoberfläche Fräsen	I_VT	Instandsetzung Tragschicht - Verstärkung im Tiefeinbau bzw. teilweisen Tiefeinbau

Abbildung 72: Maßnahmenauswahl, konventionelle Optimierung (Standard-Methode)

Bei Durchführung dieser Maßnahmen ergibt sich ein sehr guter bzw. guter Gesamtzustand des Straßennetzes. Dies kann beispielsweise anhand der Verteilung des Gesamtwerts (Abbildung 73) oder spezifischer über den Substanzwert (Abbildung 74) und den Gebrauchswert (Abbildung 75) beurteilt werden. Wobei sich die letzten beiden Abbildungen nur auf den ersten Fahrstreifen beziehen, hingegen bildet der Gesamtwert jeweils den schlechtesten Wert aller vorhandenen Fahrstreifen ab.

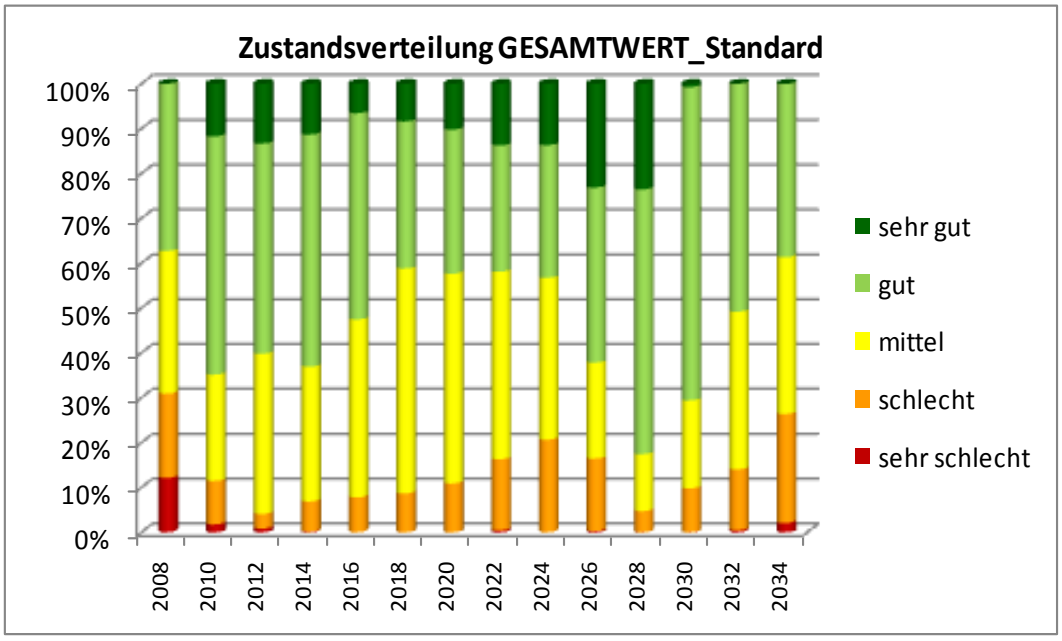


Abbildung 73: Zustandsverteilung Gesamtwert, Methode Standard

Der Verlauf des Substanzwerts ist stark abhängig von der (Alters-) Struktur des vorhandenen Netzes und kann nur mit tiefgreifenden Maßnahmen langfristig gehoben werden. Ab dem Jahr 2028 steigt der Anteil des Substanzwerts in der Klasse sehr schlecht an, dies ist vor allem auch damit zu begründen, dass ab 2028 keine Maßnahmen mehr gesetzt werden. Aus diesem

Grund geht auch der Anteil der Gruppe sehr gut (vor allem in Bezug auf den Gebrauchswert) zurück.

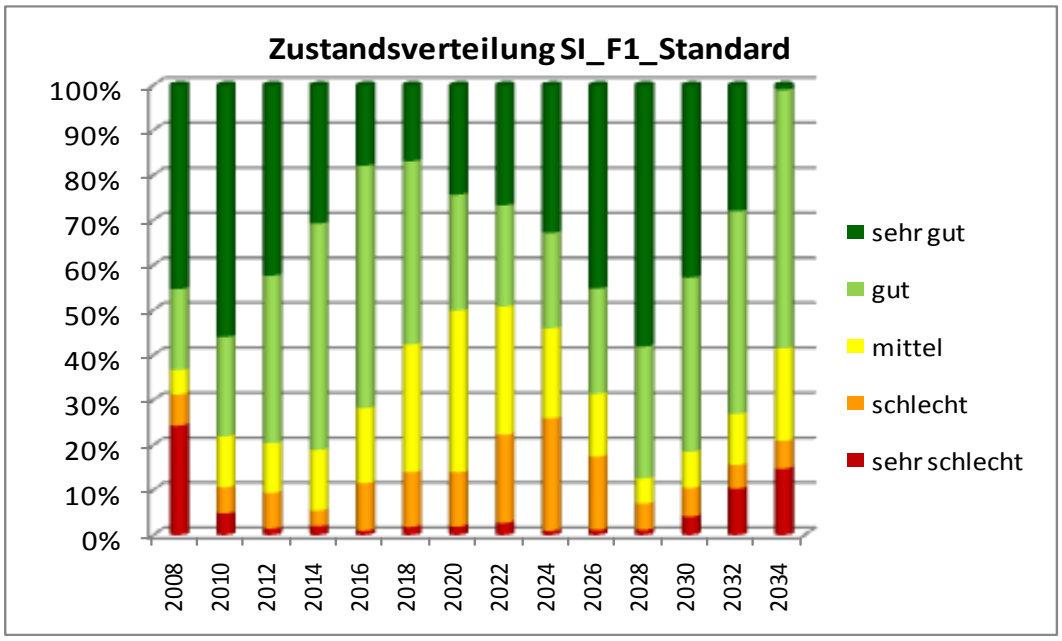


Abbildung 74: Zustandsverteilung Substanzwert (SI), Methode Standard

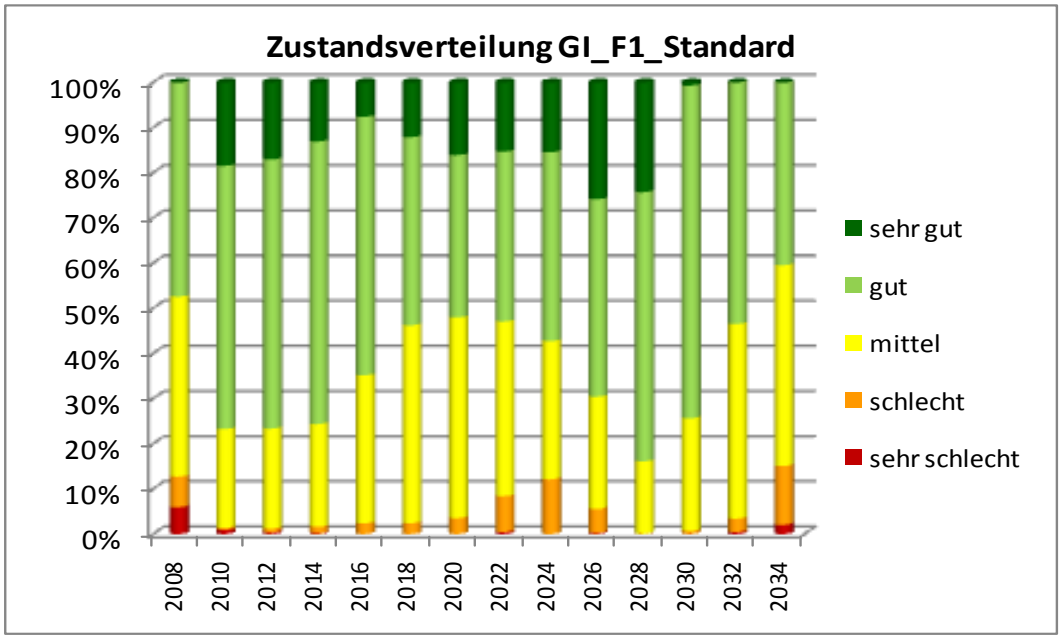


Abbildung 75: Zustandsverteilung Gebrauchswert (GI), Methode Standard

Aufschlussreich ist ebenso die Verteilung der eingesetzten finanziellen Mittel (grundsätzlich ist keine Begrenzung des Budgets vorgeschrieben). In Tabelle 49 sind alle im Analysezeitraum auftretenden Kosten angeführt. Die Baulastträgerkosten treten im Jahr der Maßnahme auf, können diskontiert und summiert werden. Diese Kosten entstehen aus den in Abbildung 72 angeführten Maßnahmen. Ebenso kann zu dieser Maßnahmenauswahl die Summe der zustandsbedingten Nutzerkosteneinsparungen sowie die Baustellenfolgekosten berechnet werden. Auch diese Kosten werden diskontiert und summiert.

Jahr	Baulastträger-kosten	zustandsbedingte Nutzerkosten-Einsparungen	Baustellenfolgekosten	eingesparte Nutzerkosten GESAMT
2008	110.936.140			
2010	39.074.759			
2012	20.644.933			
2014	25.995.383			
2016	32.918.821			
2018	82.285.877			
2020	105.996.087			
2022	139.554.407			
2024	241.648.478			
2026	204.298.534			
diskont. Summe	**€ 681.475.339**	€ 5.192.209.543	€ 3.753.152.267	**€ 1.439.057.276**
nicht diskontiert	€ 1.003.353.418			

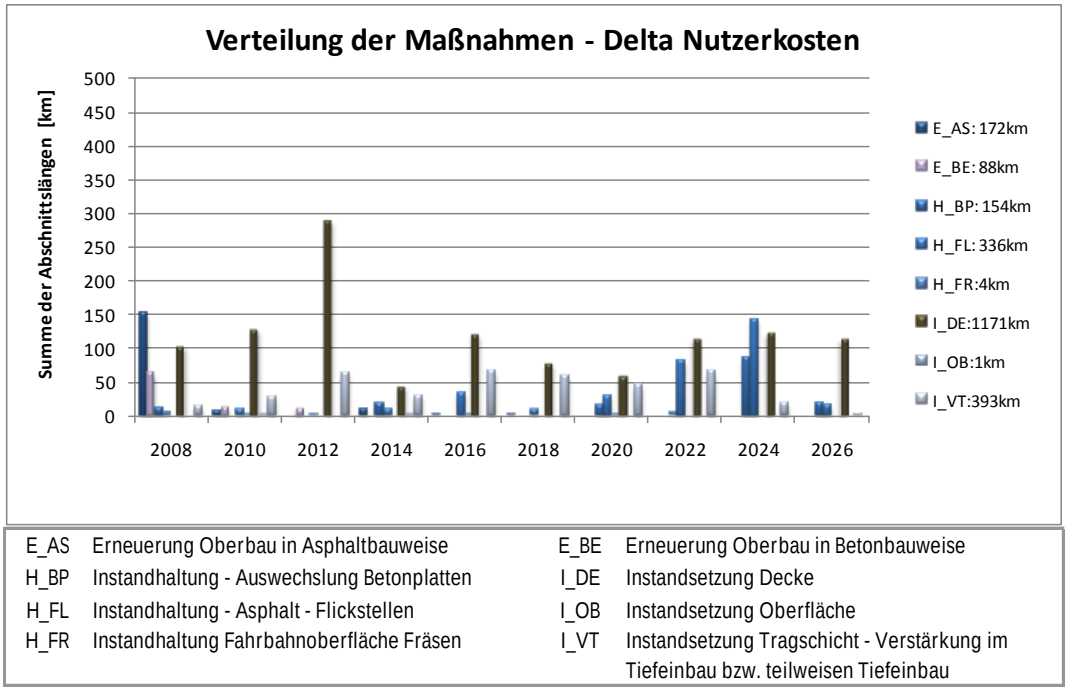
Tabelle 49: Finanzbedarf, Optimierung Standard-Methode

Vergleicht man die einzelnen Kostenanteile, kann festgestellt werden, dass über die gesamte Analyseperiode bei einem Einsatz von 680 Mio.€ betriebswirtschaftlicher Baulastträgerkosten ein volkswirtschaftlicher Gewinn von 1,4 Mrd.€ erzielt werden kann. Dieser setzt sich zusammen aus einem zustandsbedingten Gewinn von 5,2 Mrd.€ abzüglich der Baustellenfolgekosten in einer Größe von 3,8 Mrd.€. Die Summe an eingesparten Nutzerkosten ergibt sich, ohne dass die Maßnahmenauswahl auf den Straßennutzer hin optimiert wurde. Das heißt, selbst bei der Anwendung der konventionellen, auf Baulastträger-Kosten ausgerichteten Optimierung können Gewinne für die Volkswirtschaft erzielt werden. Die Höhe dieser Gewinne kann durch den neu implementierten Modul quantifiziert und ausgewiesen werden.

9.3.1.2. Optimierung eingesparte Nutzerkosten / Baulastträgerkosten

Die Anwendung der Optimierung nach Methode 2 (Kapitel 9.2.2 / Δ–Nutzerkosten) auf das Beispielnetz ermöglicht die Ausgabe eines Erhaltungsvorschlags unter Maximierung der Nutzerkosteneinsparungen. Hierbei liegt das Hauptaugenmerk auf den für die Straßennutzer relevanten Zustandsgrößen wie Spurrinnen, Längsebenheit und Griffigkeit. Der Zustand der Substanz ist, solange sie keine direkte Wirkung auf das Gebrauchsverhalten (bzw. den Fahrkomfort) im jeweiligen Abschnitt hat, für den Nutzer von untergeordnetem Interesse.

Dem entsprechend zeigt der Maßnahmenvorschlag auch eine Häufung an Oberflächen-Maßnahmen. Strukturverbessernde Maßnahmen hingegen kommen nur selten zur Anwendung. Die Gesamtzahl der instandgehaltenen beziehungsweise instandgesetzten oder erneuerten Fahrstreifen-Kilometer ist auf 2.321 km (vergleiche 3.639 km bei der Standard-Methode) gesunken. Die beiden Erneuerungsmaßnahmen in Asphalt und Beton (E_AS+E_BE) belaufen sich nur mehr auf eine Länge von 260 Fahrstreifen-Kilometer bzw. auf 11,2% der gesamten Maßnahmenlänge (2.321 km). Die Längen der Instandsetzung Deckschicht und der Verstärkungsmaßnahmen steigen dafür an und belaufen sich 1.564 km und somit 67,41% des gesamten Maßnahmenvorschlags.



E_AS	Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise	E_BE	Erneuerung Oberbau in Betonbauweise
H_BP	Instandhaltung - Auswechslung Betonplatten	I_DE	Instandsetzung Decke
H_FL	Instandhaltung - Asphalt - Flickstellen	I_OB	Instandsetzung Oberfläche
H_FR	Instandhaltung Fahrbahnoberfläche Fräsen	I_VT	Instandsetzung Tragschicht - Verstärkung im Tiefeinbau bzw. teilweisen Tiefeinbau

Abbildung 76: Maßnahmenauswahl, Methode 2 (Δ–Nutzerkosten)

Entsprechend den geringeren Maßnahmenlängen und der Oberflächen-bezogenen Erhaltungsstrategien, die aufgrund der niedrigeren Baustellenfolgekosten ausgewählt wurden, stellt sich auch ein schlechteres Bild des resultierenden Gesamtzustands dar (siehe Abbildung 77). Der Anteil in der Zustandklasse sehr schlecht kann während der Maßnahmenperiode noch gering gehalten werden, dieser steigt jedoch nach deren Ende drastisch an. Betrachtet man den Anteil der Abschnitte in der Klasse schlecht und sehr schlecht, so steigt der Anteil ab dem Jahr 2018 bis zum Ende auf über 80 % der Netzlänge an. Grundsätzlich kann ein gewisser Anteil in diesen Klassen akzeptiert werden, jedoch nicht in der hier auftretenden Größenordnung.

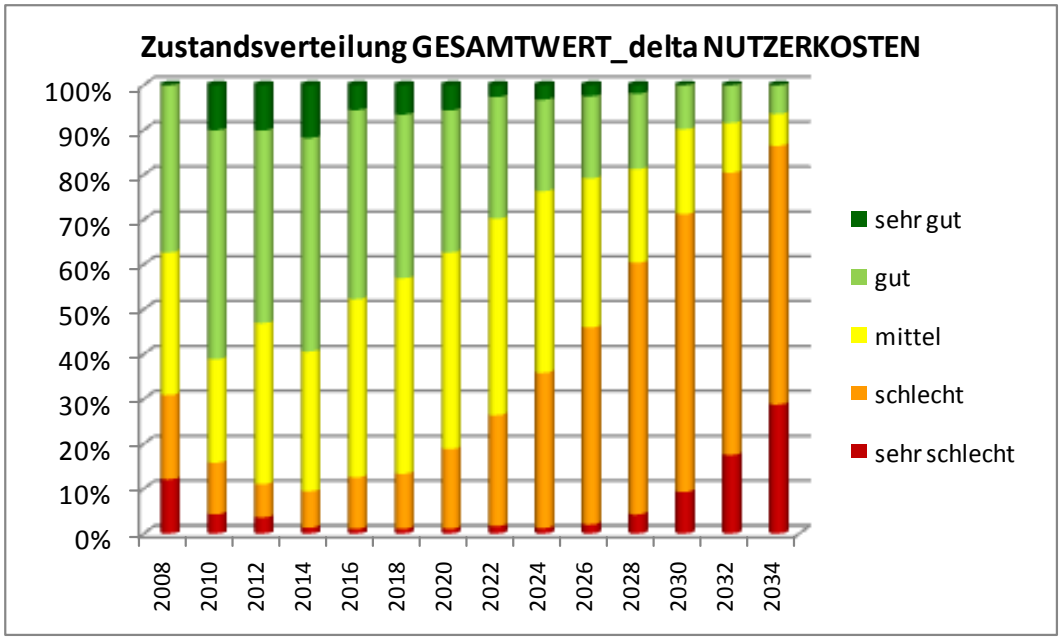


Abbildung 77: Zustandsverteilung Gesamtwert, Methode 2 (Δ–Nutzerkosten)

Besonders deutlich wird die Wirkung dieses Erhaltungsvorschlags bei der Betrachtung des Substanzwerts, wie er in Abbildung 78 für den ersten Fahrstreifen (SI_F1) dargestellt ist. Der Anteil der Klasse sehr gut nimmt rapide ab und die Abschnitte in der Klasse sehr schlecht nehmen überhand und steigen auf über 75 % an. Ein guter Zustand der Straßensubstanz hat für den Straßennutzer nicht Priorität, daher kommt es zu einer drastischen Verschlechterung dieses Werts. Der Gebrauchszustand des Netzes (siehe Abbildung 79) hat einen größeren Einfluss auf den Nutzer und wird somit nach der Maßnahmenperiode auf einem besseren Niveau gehalten. Nach Ende der Maßnahmenperiode tritt allerdings auch beim Gebrauchswert eine deutliche Verschlechterung ein.

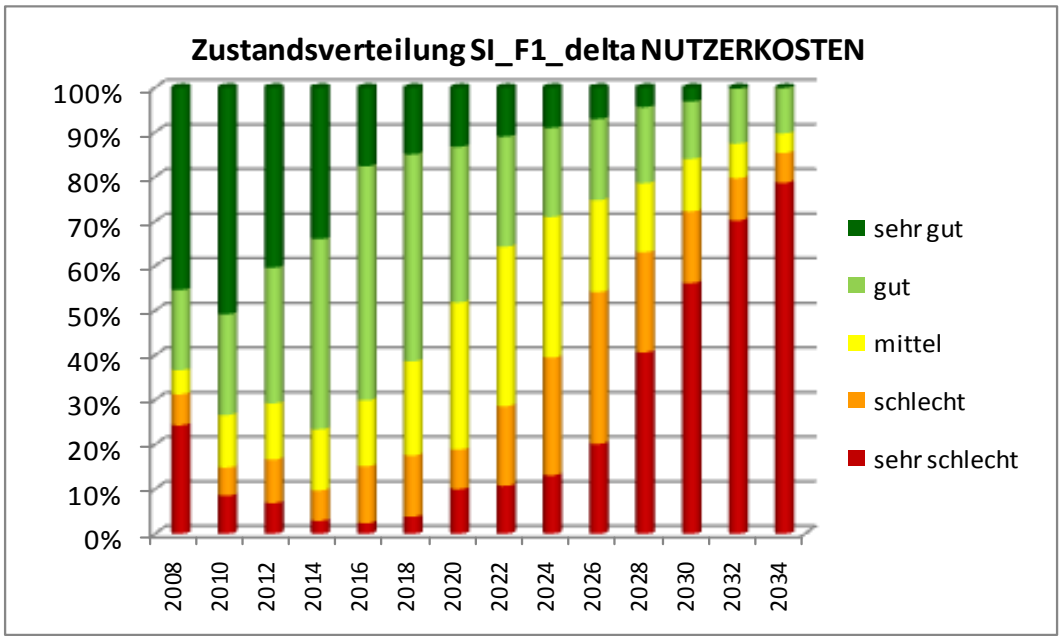


Abbildung 78: Zustandsverteilung Substanzwert (SI), Methode 2 (Δ-Nutzerkosten)

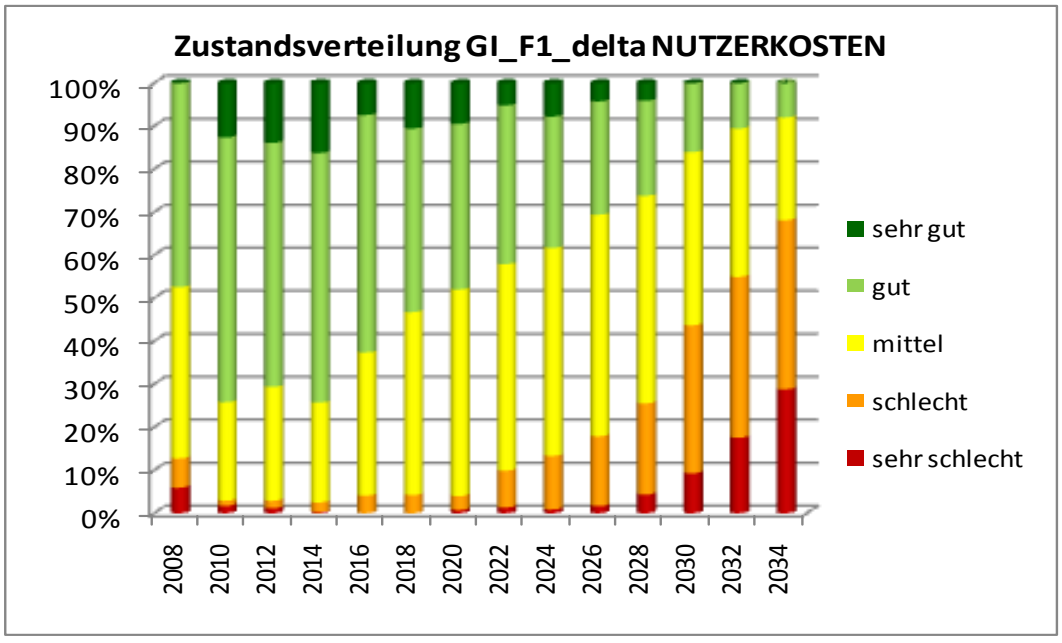


Abbildung 79: Zustandsverteilung Gebrauchswert (GI), Methode 2 (Δ-Nutzerkosten)

Jede Maßnahme bedeutet eine Einschränkung für den Straßennutzer, insofern werden bei dieser Optimierung nur Maßnahmen ausgewählt, bei welchen der Nutzen die Kosten überwiegt. Die Kostendarstellung in Tabelle 50 zeigt, dass die Baulastträgerkosten aufgrund der

geänderten Maßnahmentypen ebenso wie die Maßnahmen-Längen zurückgegangen sind. Bezogen auf die Optimierung Standard kann hier mit einem Drittel des Baulastträgerbudgets ein mehr als dreimal so großer gesamtwirtschaftlicher Nutzen erzielt werden. Wobei stets zu beachten ist, dass es zu einer drastischen Verschlechterung der Substanz im gesamten Netz kommt.

Genauer betrachtet (siehe Tabelle 50) stellt man fest, dass die zustandsbedingten Nutzerkosteneinsparungen sogar etwas zurück gehen, jedoch sinken vor allem die Baustellenfolgekosten auf weniger als ein Zehntel des Standard-Wertes. Hier sieht man deutlich, dass Maßnahmen, die eine Überlastung verursachen, vermieden werden und sich auch die Reduktion der Anwendung von Maßnahmen mit einer längeren Baustellendauer (wie tiefgreifende Erneuerungsmaßnahmen) deutlich zum Ausdruck kommt.

Jahr	Baulastträger-kosten	zustandsbedingte Nutzerkosten-Einsparungen	Baustellenfolgekosten	eingesparte Nutzerkosten GESAMT
2008	100.274.103			
2010	23.083.838			
2012	32.733.427			
2014	13.660.697			
2016	19.742.665			
2018	16.786.319			
2020	14.766.458			
2022	21.137.244			
2024	13.979.869			
2026	8.709.476			
diskont. Summe	**€ 218.892.433**	€ 5.083.986.611	€ 263.005.036	**€ 4.820.981.574**
nicht diskontiert	€ 264.874.096			

Tabelle 50: Finanzbedarf, Methode 2 (Δ-Nutzerkosten)

9.3.1.3. Optimierung eingesparte Nutzerkosten / Baulastträgerkosten mit Begrenzung des Substanzwerts

Ziel der gegenständlichen Arbeit ist es, ein ausgewogenes Verhältnis von Interessen des Straßenbetreibers und der Straßennutzer auch bei der Erhaltungsplanung zu garantieren. Die Anwendung der Standard Optimierung liegt deutlich auf der Seite der Betreiber - Interessen, jedoch kann auf der anderen Seite unter Anwendung der Optimierung nach Methode 2 (Δ-Nutzerkosten) keine langfristig gute Straßensubstanz gewährleistet werden.

Zum Ausgleich beider Seiten wurden die folgenden zwei Optimierungsvarianten entwickelt. Hiermit sollte sicher gestellt werden, dass die Straßensubstanz am Ende der Maßnahmenperiode (2030) sich noch in einem akzeptablen Zustand befindet, ausgedrückt durch die Vorgabe eines Grenzwerts für den Substanzwert SI. In einem ersten Schritt wurde dieser Grenzwert mit dem Schwellenwert[3] und bei einem weiteren Durchlauf mit dem Warnwert[4] festgelegt.

Δ-Nutzerkosten Beschränkung Substanzwert auf Schwellenwert

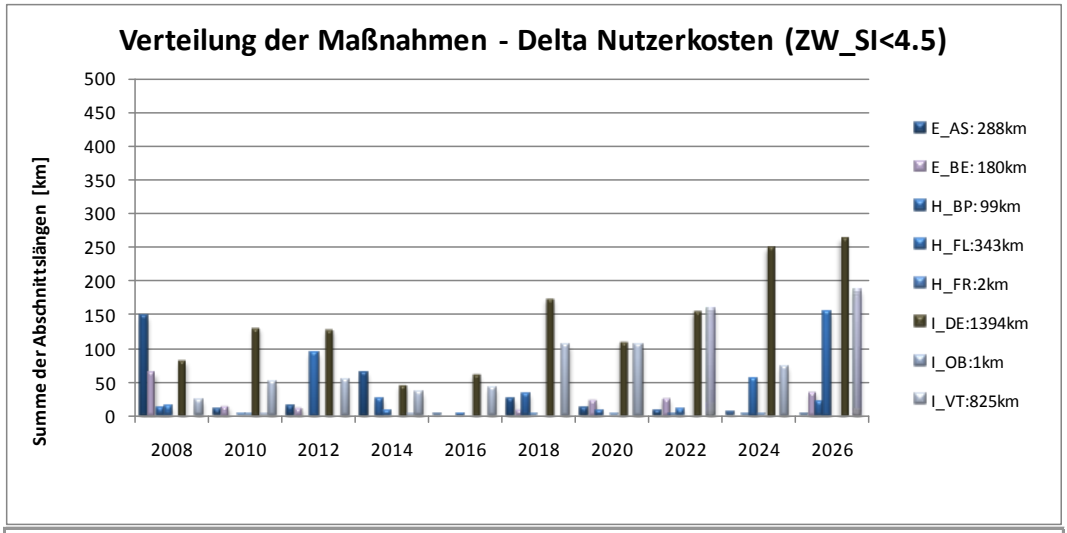
In der Auswahl der möglichen Maßnahmen wurden bei dieser Optimierung nur jene Maßnahmen zugelassen, die im Jahr 2030 einen Substanzwert von kleiner (besser) als 4,5 aufweisen. Hierdurch konnten jenen Maßnahmenstrategien, die zur Vermeidung von

[3] Der Schwellenwert (Grenze Zustandsklasse 4 und 5) charakterisiert den Zustand, dessen Auswirkung die Einleitung von Erhaltungsmaßnahmen oder verkehrsbeschränkenden Maßnahmen erfordert [1].
[4] Der Warnwert (Grenze Zustandsklasse 3 und 4) beschreibt einen Zustand, der Anlass geben sollte zu einer Analyse der Ursachen der Zustandsverschlechterung und der Einplanung von zweckmäßigen Erhaltungsmaßnahmen [1].

Nutzerkosten über die gesamte Analyseperiode stets nur Oberflächlichen-Maßnahmen ansetzen, ausgeschlossen werden. Dies schlägt sich deutlich in der Verteilung der Maßnahmen und im weiteren auch im Zustand und im Finanzbedarf nieder. Diese ausgewählten Maßnahmen können grundsätzlich einen positiven Wert für die Summe der eingesparten Nutzerkosten besitzen. Ebenso ist aber auch die Umsetzung von Maßnahmen mit einem negativen Gesamtwert möglich (dies kann besonders bei längeren und tiefgreifenden Maßnahmen zu Analyseende der Fall sein).

Zum Vergleich wurden die Auswertungen wie bei Variante 1 und 2 durchgeführt, die Ergebnisgraphiken sind in Abbildung 80 bis Abbildung 83 und Tabelle 51 dargestellt.

Die Maßnahmenauswahl zeigt eine Zunahme von Verstärkungs- und Deckschichtmaßnahmen, die mit einer Länge von 2.219 km bzw. 71,85 % den überwiegenden Teil der vorgeschlagenen Maßnahmen ausmachen. Die Gesamtlänge der Maßnahmen beträgt 3.131 Fahrstreifen-Kilometer. Natürlich reagieren auch die Zustandswerte auf diese Veränderung, jedoch ist noch immer zu bemerken, dass der Anteil in der Klasse schlecht und sehr schlecht am Ende der Analyseperiode etwa 70% beträgt. Der Anteil des Substanzwerts am ersten Fahrstreifen in der Klasse sehr schlecht liegt am Ende der Analyseperiode bei etwas mehr als 50%.



E_AS	Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise	E_BE	Erneuerung Oberbau in Betonbauweise
H_BP	Instandhaltung - Auswechslung Betonplatten	I_DE	Instandsetzung Decke
H_FL	Instandhaltung - Asphalt - Flickstellen	I_OB	Instandsetzung Oberfläche
H_FR	Instandhaltung Fahrbahnoberfläche Fräsen	I_VT	Instandsetzung Tragschicht - Verstärkung im Tiefeinbau bzw. teilweisen Tiefeinbau

Abbildung 80: Maßnahmenauswahl, Optimierung Methode 2 (Δ-Nutzerkosten; SI<4,5)

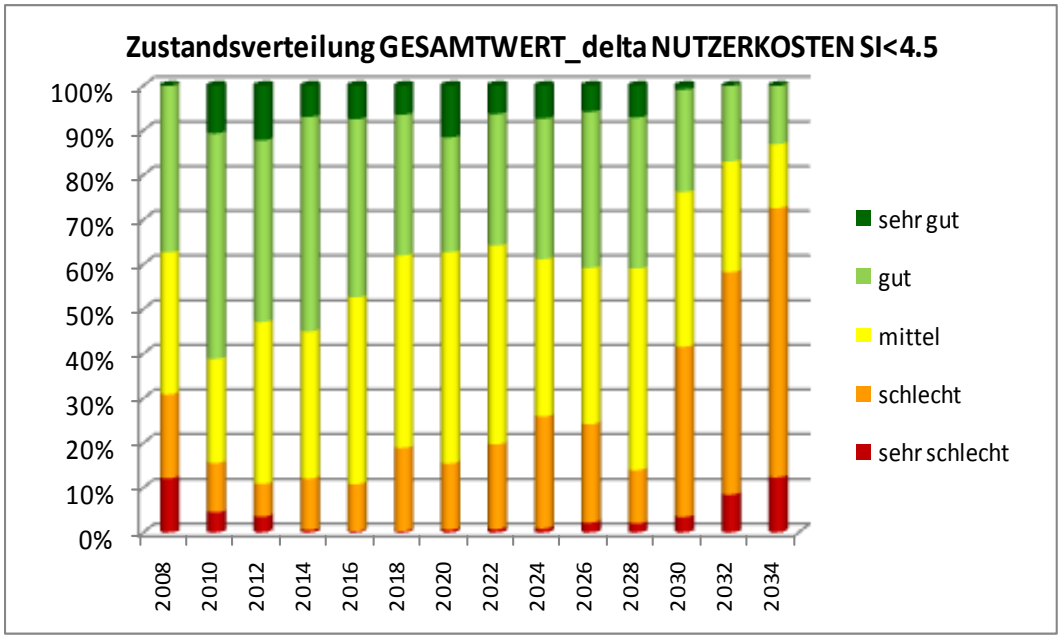


Abbildung 81: Zustandsverteilung Gesamtwert Methode 2 (Δ-Nutzerkosten; SI<4,5)

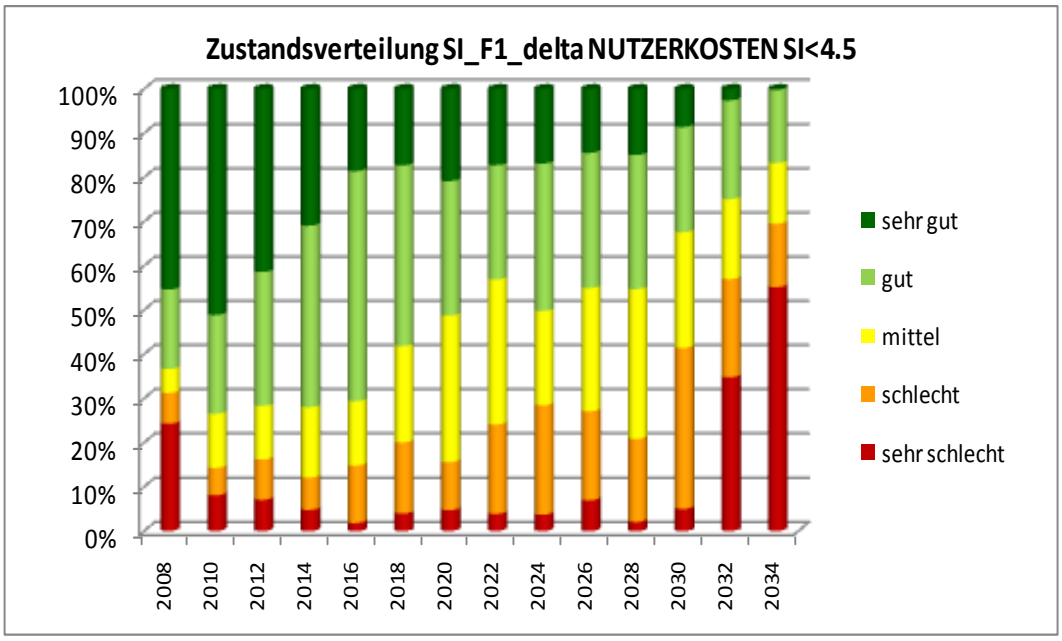


Abbildung 82: Zustandsverteilung Substanzwert, Methode 2 (Δ-Nutzerkosten; SI<4,5)

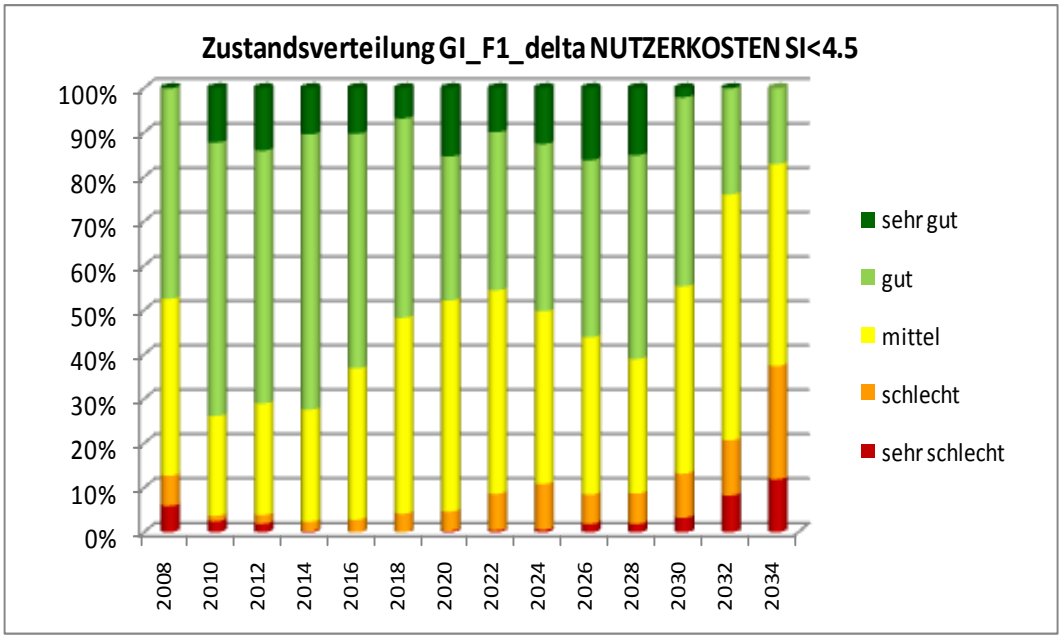


Abbildung 83: Zustandsverteilung Gebrauchswert, Methode 2 (Δ-Nutzerkosten; SI<4,5)

Bei der Kostenaufstellung (siehe Tabelle 51) zeigt sich ganz deutlich, dass durch die größeren Maßnahmenlängen auch höhere Baulastträgerkosten entstehen. In Folge dieser Maßnahmen steigen auch die Baustellenfolgekosten an und die Summe der eingesparten Nutzerkosten sinkt ab. Die Größe der zustandsbedingten Nutzerkosteneinsparungen ist etwa gleich wie bei der reinen Nutzerkosten Optimierung ohne Substanzwert-Beschränkung

.

Jahr	Baulastträger-kosten	zustandsbedingte Nutzerkosten-Einsparungen	Baustellenfolgekosten	eingesparte Nutzerkosten GESAMT
2008	99.313.149			
2010	27.522.542			
2012	29.211.059			
2014	35.846.717			
2016	11.900.066			
2018	45.415.579			
2020	39.954.907			
2022	52.775.469			
2024	30.999.647			
2026	70.070.383			
diskont. Summe	**€ 332.761.242**	€ 5.098.841.612	€ 983.619.187	**€ 4.115.222.426**
nicht diskontiert	€ 443.009.519			

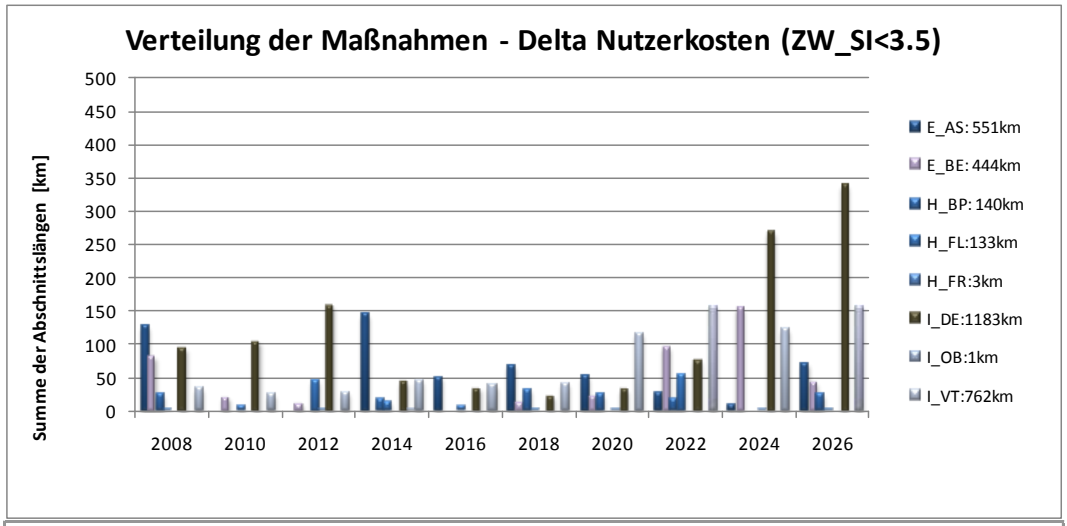
Tabelle 51: Finanzbedarf, Optimierung Methode 2 (Δ-Nutzerkosten; SI<4,5)

Δ-Nutzerkosten Beschränkung Substanzwert auf Warnwert

Das Ergebnis der Begrenzung des Substanzwertes im Jahr 2030 auf den Schwellenwert hat schon bessere Ergebnisse erzielt, die Substanzwertentwicklung bis zum Ende der Analyseperiode ist aber nach wie vor unbefriedigend.

In einen weiteren Schritt soll deshalb das mögliche Potential bei einer Beschränkung auf den Warnwert ermittelt werden. Das heißt, es werden nur jene Maßnahmen zugelassen, die im Jahr 2030 einen Substanzwert von kleiner (besser) als 3,5 aufweisen. Hierdurch konnten wieder jene Maßnahmenstrategien ausgeschlossen werden, die zur Vermeidung von Nutzerkosten über die gesamte Analyseperiode stets nur Oberflächlichen-Maßnahmen ansetzen, in diesem Fall in rigoroserer Weise. Dies schlägt sich deutlich in der Verteilung der Maßnahmen und im weiteren auch im Zustand und im Finanzbedarf nieder.

Die Ergebniswerte sind in Abbildung 84 bis Abbildung 87 und in Tabelle 52 dargestellt. Hier setzt sich der oben angedeutete Trend noch weiter fort, wobei nicht nur die Länge der durchgeführten Maßnahmen zunimmt, sondern auch ein deutliches Signal in Richtung tiefgreifendere Maßnahmen gesetzt werden kann. Die Maßnahmen Erneuerung in Asphalt und Beton betreffen 30,91 % der Maßnahmenkilometer (absolut gesehen hat sich die Länge in dieser Kategorie im Vergleich zur Beschränkung auf den Schwellenwert mehr als verdoppelt) und die Instandsetzung Decke sowie Verstärkung der Schichten nehmen 60,46 % ein (die Maßnahmenlänge entspricht ungefähr jener bei der Beschränkung auf den Schwellenwert). Die Gesamtlänge des Maßnahmenvorschlags beträgt 3.217 Fahrstreifen-Kilometer.



E_AS	Erneuerung Oberbau in Asphaltbauweise	E_BE	Erneuerung Oberbau in Betonbauweise
H_BP	Instandhaltung - Auswechslung Betonplatten	I_DE	Instandsetzung Decke
H_FL	Instandhaltung - Asphalt - Flickstellen	I_OB	Instandsetzung Oberfläche
H_FR	Instandhaltung Fahrbahnoberfläche Fräsen	I_VT	Instandsetzung Tragschicht - Verstärkung im Tiefeinbau bzw. teilweisen Tiefeinbau

Abbildung 84: Maßnahmenauswahl, Optimierung Methode 2 (Δ–Nutzerkosten; SI<3,5)

Der Verlauf des Gesamtwertes über die Analyseperiode zeigt sehr gute Ergebnisse. Natürlich können die Werte der Variante 1 nicht erreicht werden, jedoch ist ein Anteil der Klasse schlecht und sehr schlecht im Jahr 2030 von knapp 10 % durchaus akzeptabel. Im weiteren Verlauf ist der Anstieg wesentlich steiler (hier werden aber auch keine Maßnahmen mehr gesetzt), am Ende der Analyseperiode beläuft sich der Anteil auf etwas mehr als 50 %.

Insbesonders rückt auch die Verteilung des Substanzwertes weiter in den guten Bereich und der stärkere Anstieg ist eben erst nach Ende der Maßnahmenperiode festzustellen. Über den gesamten Zeitraum liegt der Anteil in der Klasse sehr schlecht etwas über dem Vergleichswert aus der Standard-Optimierung.

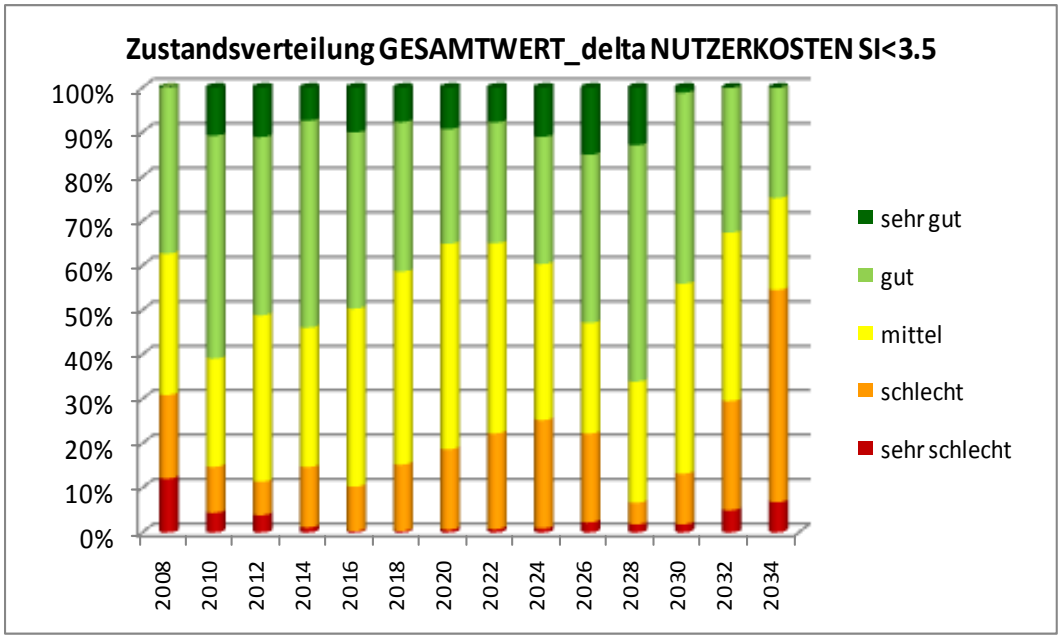


Abbildung 85: Zustandsverteilung Gesamtwert Methode 2 (Δ–Nutzerkosten; SI<3,5)

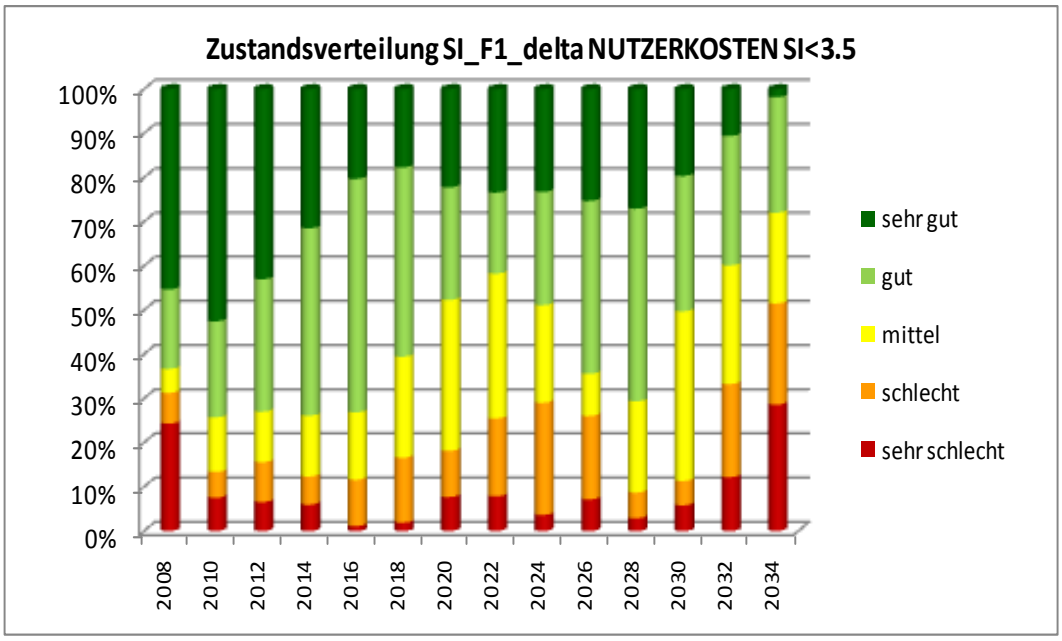


Abbildung 86: Zustandsverteilung Substanzwert, Methode 2 (Δ-Nutzerkosten; SI<3,5)

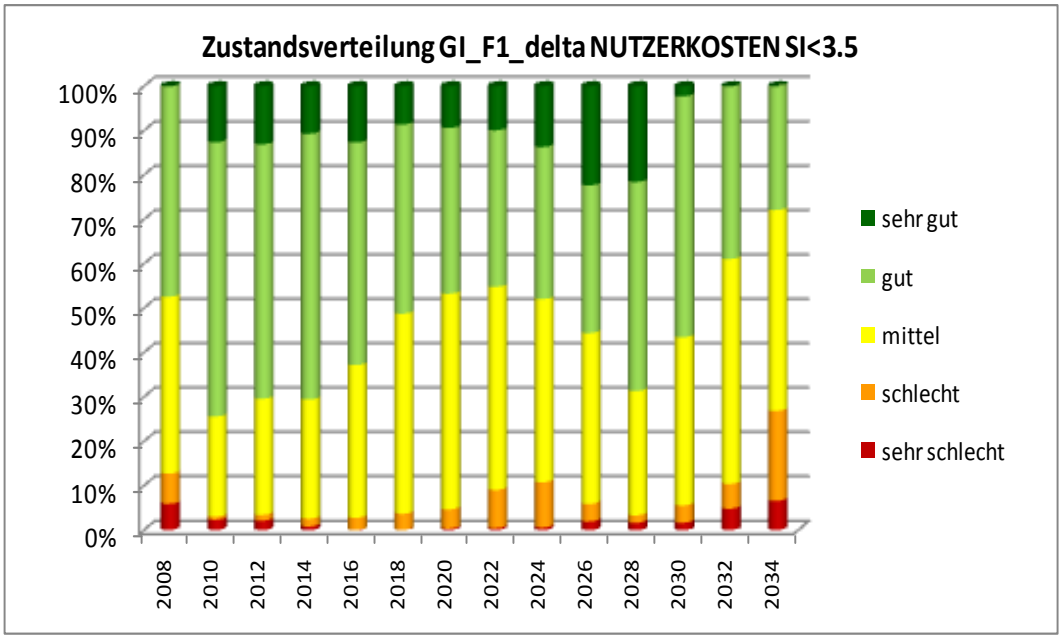


Abbildung 87: Zustandsverteilung Gebrauchswert, Methode 2 (Δ-Nutzerkosten; SI<3,5)

Die Kosten liegen zwischen jenen mit Substanzwertbegrenzung auf den Schwellenwert und jenen nach der Standard-Optimierung. Wie schon bei der Variante - Substanzwertbegrenzung auf den Schwellenwert - festgestellt, entstehen die Unterschiede vorwiegend durch die höheren Baustellenfolgekosten, welche die gesamten eingesparten Nutzerkosten reduzieren.

Jahr	Baulastträger-kosten	zustandsbedingte Nutzerkosten-Einsparungen	Baustellenfolgekosten	eingesparte Nutzerkosten GESAMT
2008	103.373.630			
2010	19.753.872			
2012	19.849.885			
2014	64.142.120			
2016	29.768.031			
2018	43.857.519			
2020	54.151.593			
2022	90.364.097			
2024	108.693.015			
2026	98.286.112			
diskont. Summe	**€ 452.219.840**	€ 5.086.395.484	€ 1.554.580.803	**€ 3.531.814.680**
nicht diskontiert	€ 632.239.874			

Tabelle 52: Finanzbedarf, Optimierung Methode 2 (Δ-Nutzerkosten; SI<3,5)

Grundsätzlich bietet diese Variante bei der Berücksichtigung der Straßenerhalterinteressen durchaus die Möglichkeit, auch die Straßennutzer bei der Maßnahmenauswahl zu berücksichtigen und ihre Interessen in den Optimierungsprozess einfließen zu lassen.

9.3.1.4. Resümee Netzebene

Zum besseren Vergleich sind in Abbildung 88 nochmals alle entscheidenden Größen, wie die Baulastträgerkosten, die Summe der eingesparten Nutzerkosten, die Summe der Fahrsteifenlängen auf welchen Maßnahmen durchgeführt werden und der Anteil in der Gesamtwert-Zustandsklasse schlecht und sehr schlecht (4+5) im Jahr 2030 (hier wurde nur ein charakteristischer Wert übernommen) dargestellt. Die ersten drei Kennwerte werden relativ auf den größten Wert bezogen, der Anteil in der Klasse 4+5 wird in absoluten Prozentwerten angeführt.

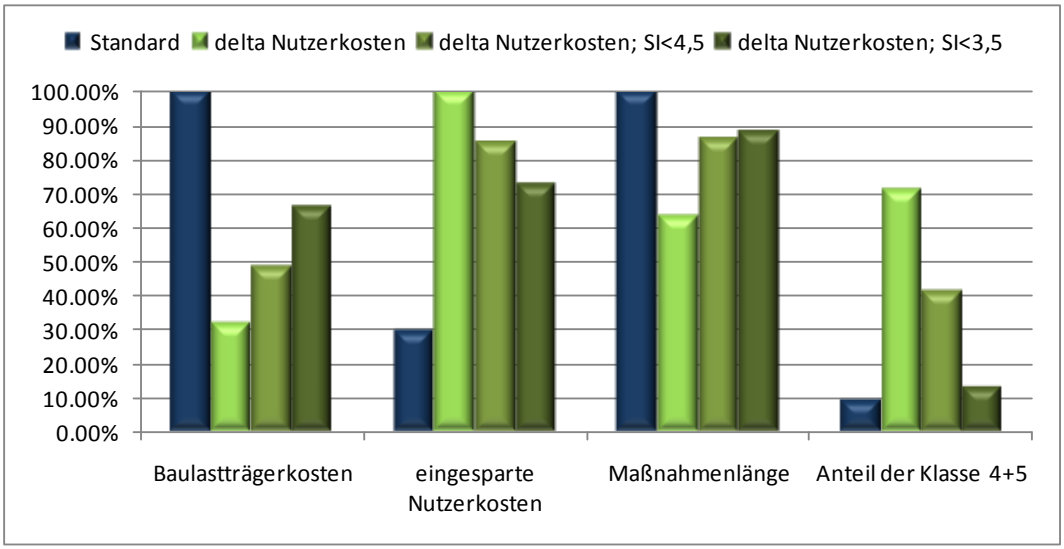


Abbildung 88: Vergleich der Optimierungs-Szenarien

Aus Abbildung 88 und den zuvor dargestellten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Standard-Methode grundsätzlich für den Baulastträger die umfassendsten Maßnahmen vorsieht. Hierdurch kann eine optimale Straßensubstanz gewährleistet werden, die Interessen der Straßennutzer stehen jedoch nicht im Vordergrund (es ergeben sich die geringsten eingesparten Nutzerkosten der vier verglichenen Varianten). Dennoch werden auch bei dieser Variante infolge der Durchführung der vorgeschlagenen Maßnahmenstrategien Nutzerkosten-Einsparungen im Wert von 1,4 Mrd.€ erzielt, das entspricht mehr als dem doppelten Wert des eingesetzten Baulastträger-Kapitals. Ein überwiegender Teil der Abschnitte weist hierdurch einen guten oder sehr guten Substanz- und Gesamtwert auf.

Die Variante Δ–Nutzerkosten stellt die Optimierung auf Grundlage der Nutzerinteressen dar, wobei hier wesentlich weniger Maßnahmen und vor allem nur oberflächliche Instandhaltungen oder Instandsetzungen vorgeschlagen werden. Die Baulastträgerkosten sind dementsprechend niedriger, jedoch wirkt sich dies auch deutlich in einer Verschlechterung der Straßensubstanz aus.

Das Ziel ist jedoch, unter Berücksichtigung der Nutzerinteressen auch eine gute Straßensubstanz zu gewährleisten, das heißt ein Erhaltungsprogramm vorzuschlagen, das ausreichend tiefgreifende Maßnahmen vorhält und einen guten Zustand garantiert. Dies kann mit Hilfe der Variante Δ-Nutzerkosten unter der Beschränkung des Substanzwerts auf den Warnwert garantiert werden. Mit diesen Randbedingungen werden die Straßennutzer in der Erstellung des Erhaltungsvorschlags berücksichtigt, es ergibt sich jedoch eine begrenzende Bedingung für die Substanz, wodurch ein ausreichender Zustand gewährleistet wird.

Für die Anwendung des hier entwickelten Nutzerkosten-Moduls wird deshalb die Methode „Δ-Nutzerkosten mit Beschränkung des Substanzwerts auf Warnwert“ empfohlen.

9.3.2. Abschnittsebene

Für den Erhaltungsingenieur ist nicht nur das Ergebnis des gesamten Netzes interessant, die Umsetzung der Maßnahmenvorschläge erfolgt in dem jeweiligen Baulos, das sich eventuell aus mehreren homogenen Abschnitten zusammensetzt. Deshalb ist es erforderlich auch die Wirkungen der Analyse auf dem Einzelabschnitt zu betrachten.

Die Ergebnisse der Abschnittsebene sind demselben Berechnungsdurchlauf wie die Ergebnisse der Netzebene entnommen. Für jeden einzelnen Abschnitt im gesamten Netz kann die folgende anhand von drei Beispielen dargestellte Auswertung durchgeführt werden. Die Netzergebnisse

können aus der Summe aller einzelnen Abschnittsergebnisse gebildet werden. Die Beispiele stellen unterschiedliche Straßenzustände, Verkehrsbelastungen und Materialien dar und wurden ausgewählt, um die Bandbreite der möglichen Ergebnisse aufzuzeigen. So sind zwei Asphaltabschnitte (einer mit niedriger und einer mit hoher Belastung) sowie ein Abschnitt in Betonbauweise dargestellt. Insgesamt besitzt das Beispielnetz 468 Abschnitte unterschiedlicher Länge.

Die jeweils angegebenen Jahre der Maßnahmendurchführung stehen grundsätzlich für einen Zeitabschnitt von 2 Jahren, in welchen die Maßnahme umzusetzen ist. Dies bietet dem Erhaltungsingenieur die Möglichkeit, die Maßnahmen an die tatsächliche Abwicklung und die Bedürfnisse vor Ort anzupassen. Das heißt, eine im Jahr 2010 angeführte Maßnahme ist im Zeitraum 2010 bis 2012 durchzuführen.

9.3.2.1. Beispiel 1 (Abschnitt 48 - Asphalt)

Der betrachtete Abschnitt hat eine Länge von 5,533 km mit 2 Fahrstreifen in der betrachteten Richtung und wurde in Asphaltbauweise hergestellt. Die Verkehrsbelastung ist eher gering und belief sich im Jahr 2008 (Bezugszeitpunkt der durchgeführten Analyse) auf 8.453 Fz / 24h und Richtung. Bei dieser Verkehrsbelastung sind auch im Baustellenfall keine Überlastungen oder Stauungen zu erwarten.

Der Straßenzustand im Jahr 2008 wird durch die Zustandswerte Substanzwert und Gebrauchswert auf dem ersten Fahrstreifen sowie den Gesamtwert der Richtungsfahrbahn beschrieben, Diese Werte können aus den aufgenommenen Zustandsgrößen Spurrinnentiefe, Längsebenheit, Griffigkeit, Oberflächenschäden und Risse generiert werden. Wie in Abbildung 89 ersichtlich, fällt der Substanzwert in die Klasse 3 (mittel - gelbe Kennung) und Gebrauchswert sowie Gesamtwert knapp in die Klasse 4 (schlecht – orange Kennung).

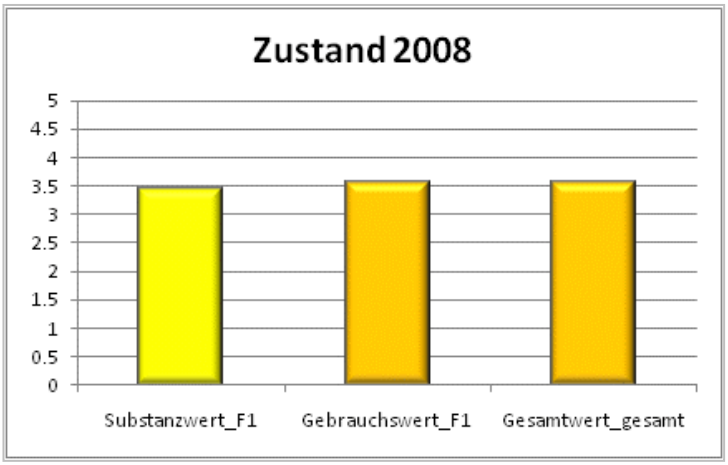


Abbildung 89: Zustandswerte des Beispiel 1 im Jahr 2008

Aufgrund des Straßenzustands werden auf Basis des PMS-Algorithmus alle technisch sinnvollen Maßnahmen angeführt und mit Kosten und Nutzen belegt. Dies bietet die Grundlage für die weitere Maßnahmenauswahl, die unter der Randbedingung des vorhandenen Budgets getroffen werden kann. In der PMS - Anwendung wurden für diesen Abschnitt insgesamt 19 verschiedene Maßnahmenstrategien betrachtet. Die sich vor allem aus den auch in den Beispielstrategien auftretenden Einzelmaßnahmen zusammensetzten, die jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten eingesetzt werden. Aus dieser Gesamtheit aller möglichen Maßnahmenstrategien werden 4 ausgewählt und hier detailliert angeführt:

Maßnahmenstrategie 1 (M1): die erste Strategie stellt stets die Null-Strategie dar, das heißt es wird der Zustandsverlauf des Abschnitts ohne Durchführung von großflächigen Instandhaltungen, Instandsetzungen oder Erneuerungen betrachtet. Es erfolgen nur laufende Instandhaltungsmaßnahmen, sowie die betriebliche Erhaltung, jedoch keine zusätzlichen Investitionen. Für einen Abschnitt in einem sehr guten Zustand, das heißt ohne ein Überschreiten des Schwellenwerts innerhalb der Analyseperiode, stellt die Null-Strategie eine wählbare Variante dar.

Maßnahmenstrategie 3 (M3): hierbei erfolgt eine Deckschichtmaßnahme im Jahr 2010 auf beiden Fahrstreifen, um den Oberflächenzustand den Erfordernissen anzupassen, die strukturelle Maßnahme ist in Form einer Erneuerung in Asphaltbauweise für das Jahr 2024 angesetzt.

Maßnahmenstrategie 7 (M7): die Deckschichtmaßnahme entspricht in Zeit und Umfang jener von M3, jedoch der Unterschied betrifft die strukturelle Maßnahme. Diese ist erst für das Jahr 2026 geplant und zwar in Form einer Verstärkung auf beiden Fahrstreifen. Dies bedeutet eine nicht so tiefgreifende Maßnahme, dafür verkürzen sich die Baudauer und die Beeinträchtigung für den Straßennutzer auch dementsprechend.

Maßnahmenstrategie 11 (M11): die Strategie einspricht dem ersten Teil der zuvor dargestellten, es folgt jedoch keine weitere Maßnahme und die Zustandsverschlechterung nimmt ab diesem Zeitpunkt ungehindert ihren Lauf.

Zu den oben dargestellten Maßnahmen wurden die Baulastträgerkosten, die zustandsbedingten Nutzerkosten-Einsparungen, die Baustellenfolgekosten und die Summe der eingesparten Nutzerkosten (NK-Einsparung abzüglich Baustellenfolgekosten) berechnet und in Tabelle 53 angeführt.

• M1: Null-Strategie	Baulastträgerk.	Δ zustandsbed. NK	Baustellenfolgek.	eingesparte NK
• M3: I_DE1+2 2010 E_AS1+2 2024	3.740.258	11.557.894	1.512.994	10.044.900
• M7: I_DE1+2 2010 I_VT1+2 2026	1.468.768	11.552.439	493.310	11.059.129
• M11: I_DE1+2 2010	523.923	11.475.398	259.693	(11.215.705)

Tabelle 53: Kostenaufstellung von ausgewählten Maßnahmen – Beispiel 1

Es zeigt sich ein deutlicher Unterschied in den Baulastträgerkosten (aufgrund der unterschiedlichen Intensität der nachlaufenden Maßnahme). Ebenso kann bei den Baustellenfolgekosten ein ähnliches Bild festgestellt werden. Die zustandsbedingten Nutzerkosten-Einsparungen bewegen sich bei allen drei Strategien in einer ähnlichen Größenordnung und die Wirkung der nachlaufenden Maßnahme fällt im Vergleich zur Deckschichtmaßnahme für den Straßennutzer eher gering aus. Hierdurch ergibt sich auch, dass M7 ein Optimum an eingesparten Nutzerkosten ermöglicht.

Bei M11 ist der Wert der eingesparten Nutzerkosten nur in Klammer dargestellt, da diese Strategie, wie später noch gezeigt wird, die Anforderung der Erreichung eines Substanzwertes von 3,5 im Jahr 2030 nicht erfüllt. Mit dieser Strategie wird die Substanz der Straße nicht langfristig erhalten und sie kann somit nicht als konkurrenzfähige Variante ausgewählt werden.

In Abbildung 90 sind zu den Analysen „Standard“ sowie „Δ-Nutzerkosten; SI<3,5“ die entsprechenden Effektivitätsdiagramme dargestellt. Hierbei werden für alle 19 möglichen Maßnahmenstrategien die Kosten und die durch die Maßnahme auftretenden Nutzen aufgetragen. Auf Grundlage dieser Darstellung lässt sich leicht jene Strategie mit dem maximalen inkrementellen Nutzen-Kosten Verhältnis (INKV) identifizieren. Im Zuge der Standard-Analyse wird bei ausreichend vorhandenem Budget die Maßnahmenstrategie M3 ausgewählt.

Sollte das Budget begrenzt sein, wird entlang der roten Umhüllenden (max. INKV) nach links gewandert, bis zur nächsten finanzierbaren Strategie. Im Sinne der Optimierung auf Nutzerkosten stellt sich eindeutig M7 als optimale Strategie heraus, wobei eine größere Anzahl von möglichen Strategien aufgrund der nicht eingehaltenen Anforderung an den Substanzwert einen Nutzen von 0 aufweisen.

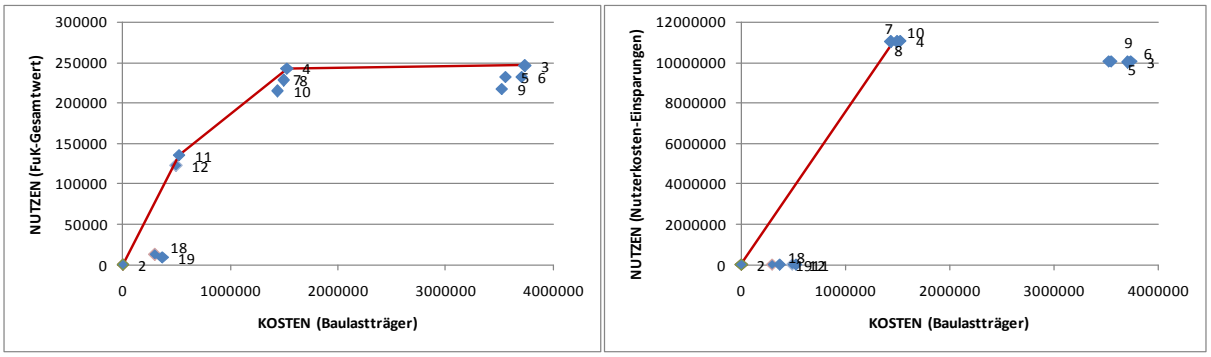


Abbildung 90: **Effektivitätsdiagramme für Analyse „Standard“ und „Δ-Nutzerkosten; SI<3,5“**

Wie wirken nun die vorgeschlagenen Maßnahmenstrategien auf die Beurteilungsgrößen? Hierfür sind in Abbildung 91 bis Abbildung 93 folgende Entwicklungen dargestellt:

- der Verlauf der zustandsbedingten Nutzerkosten (JAV_NK_ZUSTAND; in diesem Fall die absoluten Kosten, aus welchen dann die zustandsbedingten Nutzerkosteneinsparungen im Vergleich zur Null-Strategie ermittelt werden)
- der Verlauf des Substanzwerts auf dem ersten Fahrstreifen (JAV_ZW_SI_F1)
- der Verlauf des Gesamtwerts (JAV_ZW_GW_gesamt)

Hierbei stellt die rote Kurve jeweils der Verlauf ohne Maßnahme (insofern ist diese Kurve bei allen drei Strategien gleich), die blaue Kurve den Verlauf unter Bezugnahme auf die jeweilige Maßnahmenstrategie dar.

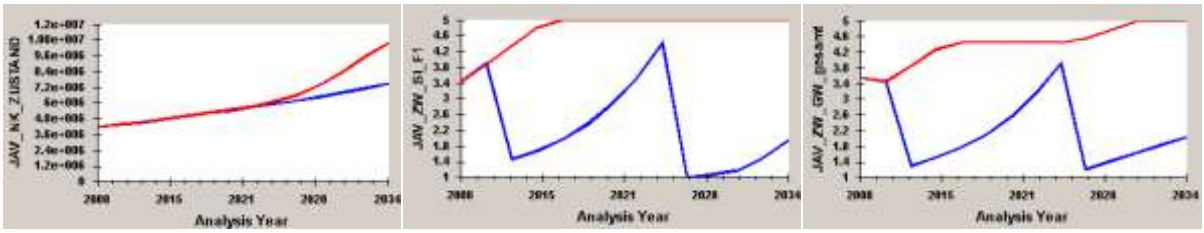


Abbildung 91: Verlauf der Beurteilungsgrößen für M3

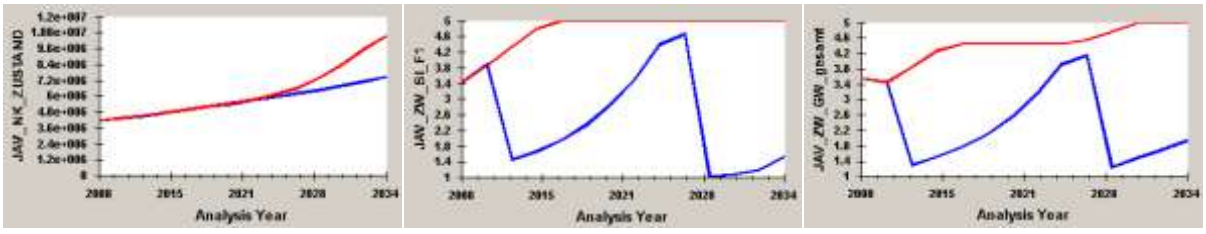


Abbildung 92: Verlauf der Beurteilungsgrößen für M7

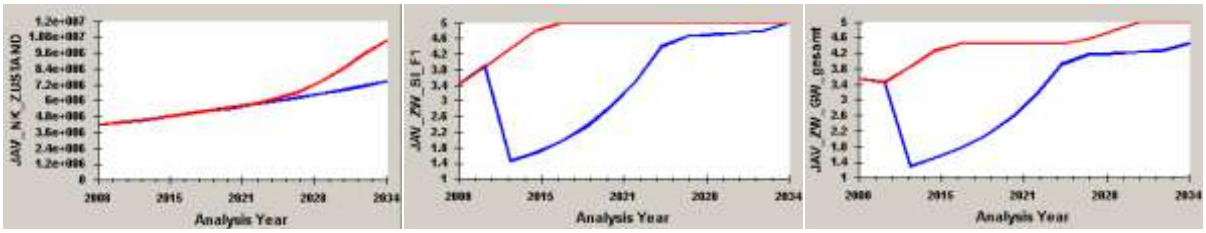


Abbildung 93: Verlauf der Beurteilungsgrößen für M11

Der Unterschied der zustandsbedingten Nutzerkosten lässt sich rein am Verlauf der Kurven kaum feststellen, auch die ausgewiesenen monetären Einsparungen, wie sie in Tabelle 53 angeführt sind, liege nahe beisammen. Grundsätzlich kommt es bei M3 und M7 durch die 2. Maßnahme in der Strategie nochmals zu einer Verflachung der Kurve. Bei Betrachtung des Substanz- und Gesamtwerts sind die Wirkungen der einzelnen Maßnahmen deutlich erkennbar, Eventuell nicht so deutlich sichtbar ist der Unterschied zwischen der Erneuerungsmaßnahme M3 und der Verstärkung bei M7. Diese bewirken sofort nach Durchführung einen gleichwertigen Zustand, jedoch der weitere Verlauf der Kurve ist aufgrund der tiefgreifenderen Maßnahme wesentlich flacher.

Der Substanzwert der Maßnahme 11 erfährt wie bei den anderen Maßnahmen auch durch die Deckschichtmaßnahme eine deutliche Verbesserung (aufgrund des Versiegelungseffekts der Maßnahme ist auch die Straßensubstanz geschützt), ohne Folgemaßnahme kommt es aber im Laufe der Analyseperiode zu einem Überschreiten des Warnwerts. Am Ende des Betrachtungszeitraums kommt der Wert in der Klasse 5 (sehr schlecht) zu liegen. Maßnahmen, die am Ende des betrachteten Zyklus eine stark geschädigte Straße zurücklassen, können nicht akzeptiert werden.

9.3.2.2. Beispiel 2 (Abschnitt 10 - Asphalt)

Der betrachtete Abschnitt hat eine Länge von 3,690 km mit 2 Fahrstreifen in der betrachteten Richtung und wurde in Asphaltbauweise hergestellt. Dieser Abschnitt wurde aufgrund seiner hohen Verkehrsbelastung ausgewählt, demzufolge es auch im Falle von Erhaltungsmaßnahmen zu Überlastungen und Stau kommt. Im Bezugsjahr 2008 belief sich die tägliche Verkehrsbelastung auf 49.700 Fz/24h.

Der Straßenzustand im Jahr 2008 wird wie im vorangegangenen Beispiel durch die Zustandswerte Substanzwert und Gebrauchswert beschrieben. Die Substanz des Abschnitts ist in einem sehr guten Zustand (Klasse1 – grüne Kennung), Gebrauchs- und in Folge dessen auch der Gesamtwert fallen in die Klasse 3 (mittel – gelbe Kennung). Durch die hohe Verkehrsbelastung kommt es zu einer schnelleren Abnützung der Straße und somit auch zu einer raschen Verschlechterung des Gebrauchs- und Gesamtwerts.

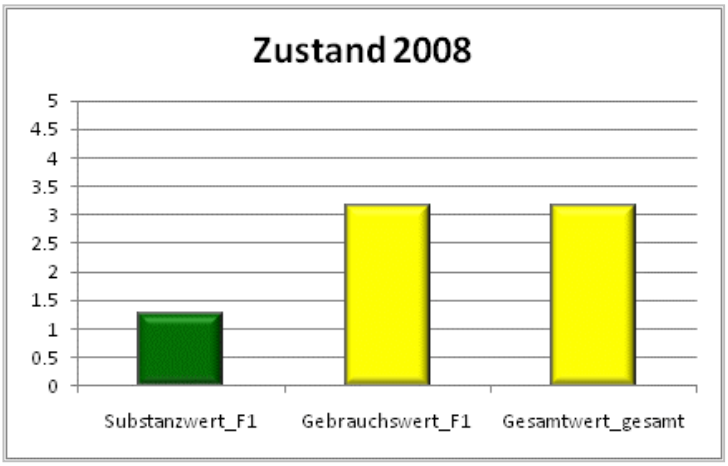


Abbildung 94: Zustandswerte des Beispiel 2 im Jahr 2008

Aufgrund des Straßenzustands werden auf Basis des PMS-Algorithmus alle technisch sinnvollen Maßnahmen angeführt und mit Kosten und Nutzen belegt. Dies bietet die Grundlage für die weitere Maßnahmenauswahl, die unter der Randbedingung des vorhandenen Budgets getroffen werden kann.

In der PMS - Anwendung wurden für diesen Abschnitt insgesamt 8 verschiedene Maßnahmenstrategien betrachtet, wobei die hier nicht angeführten sich durch Variationen im Anwendungsjahr unterscheiden. Aus dieser Gesamtheit aller möglichen Maßnahmenstrategien wurden 5 ausgewählt und sind hier detailliert angeführt. Grundsätzlich ist auf diesem Abschnitt der Zustand auf dem ersten Fahrstreifen schlechter als auf dem zweiten, wodurch es auch zur Anordnung von unterschiedlichen Maßnahmen auf den beiden Fahrstreifen kommt.

Maßnahmenstrategie 1 (M1): die erste Strategie stellt stets die Null-Strategie, das heißt es wird der Abschnitt ohne Durchführung von großflächigen Instandhaltungen, Instandsetzungen oder Erneuerungen betrachtet. Für einen Abschnitt in einem sehr guten Zustand, das heißt ohne ein Überschreiten des Schwellenwerts innerhalb der Analyseperiode, stellt die Null-Strategie eine wählbare Variante dar.

Maßnahmenstrategie 3 (M3): im Zuge dieser Strategie wird im Jahr 2024 auf beiden Fahrstreifen eine Erneuerung der Asphaltkonstruktion durchgeführt. Dem entsprechend hohe Baulastträgerkosten sowie Baustellenfolgekosten sind die Folge.

Maßnahmenstrategie 4 (M4): es werden auf beiden Fahrstreifen Maßnahmen gesetzt, jedoch durch die unterschiedlichen Zustände ist es sinnvoll, hier auch unterschiedlich tiefe Maßnahmen zu setzen. So kommt es im Jahr 2024 auf dem ersten Fahrstreifen zu einer Verstärkung und auf dem zweiten Fahrstreifen zu einer Deckschichtmaßnahme. Die Wirkung wird bei den Zustandswerten für die jeweiligen Fahrstreifen berücksichtigt.

Maßnahmenstrategie 6 (M6): entspricht M4, wobei die Maßnahme erst eine Periode später durchgeführt wird.

Maßnahmenstrategie 7 (M7): hierbei handelt es sich um eine großflächige Instandhaltungsmaßnahme in Form von Flickstellen, die allerdings nur eine kurze Wirkdauer und geringe Effekte auf die Straßensubstanz mit sich bringt.

Zu den oben dargestellten Maßnahmen wurden die Baulastträgerkosten, die zustandsbedingten Nutzerkosten-Einsparungen, die Baustellenfolgekosten und die Summe der eingesparten Nutzerkosten (NK-Einsparung abzüglich Baustellenfolgekosten) berechnet und in Tabelle 54 angeführt.

		Baulastträgerk.	Δ zustandsbed. NK	Baustellenfolgek.	eingesparte NK
• M1:	Null-Strategie				
• M3:	E_AS1+2 2024	2.064.498	5.024.011	59.620.553	-54.596.542
• M4:	I_VT1+DE2 2024	527.545	4.978.160	14.970.853	-9.992.693
• M6:	I_VT1+DE2 2026	497.262	4.499.773	19.622.902	-15.123.129
• M7:	I_FL1+2 2024	142.456	415.687	552.228	(1.352.379)

Tabelle 54: Kostenaufstellung von ausgewählten Maßnahmen – Beispiel 2

Die Maßnahmen sind aufgrund des guten Ausgangszustands erst am Ende des Maßnahmenzeitraums angesetzt, wodurch auch der berechnete Nutzen (da dieser nur bis zum Jahr 2038 berücksichtigt wird) kleiner ausfällt. Es ist jedoch garantiert, dass zumindest 10 Jahre für die Quantifizierung der Wirkung der Maßnahmenstrategie zur Verfügung stehen (letzte Maßnahme kann im Zeitraum 2026-2028 gesetzt werden).

Wie erwartet bilden die Baulastträgerkosten den Aufwand und die Tiefenwirkung der Maßnahme ab, Ebenso sind die Baustellenfolgekosten stark abhängig von der gewählten Maßnahme. Es ist zu bemerken, dass die Kosten von M6 doch deutlich über M4 liegen, dies ist durch die Abhängigkeit der Gesamtkosten von der Verkehrsstärke, welche mit einem Zuwachsfaktor belegt ist, zu erklären. Weiters sind hierbei nicht nur die Kosten aufgrund der reduzierten Durchfahrtsgeschwindigkeit, sondern auch der Zeitverlust aufgrund von Stau berücksichtigt. Diese zweite Größe steigt rasch an, wodurch sich auch der Kostenunterschied erklären lässt.

Grundsätzlich sind bei den Maßnahmen keine positiven Nutzerkosten-Einsparungen zu generieren. Die Verkehrsbelastung verursacht in jedem Fall einen Stau und die entstehenden Staukosten können nicht durch die zustandsbedingten Nutzerkosteneinsparungen ausgeglichen werden. Dennoch ist eine Maßnahme zu setzen, denn wie auch in Beispiel 1 kann mit der nur an der Oberfläche wirksamen Maßnahme 7 der geforderte Substanzwert im Jahr 2030 nicht erreicht werden, wodurch diese auszuscheiden ist.

Dieses Beispiel macht deutlich, dass nicht alle Maßnahmen zwangsweise gesamtwirtschaftlich positiven Nutzen ergeben müssen, es kann durch die vorgegebenen Randbedingungen (Substanzwerterhaltung), auch erforderlich sein, auch trotz der Nutzerbeeinträchtigungen Maßnahmen durchzuführen.

In Abbildung 95 sind alle vorgeschlagenen Möglichkeiten angeführt, die aufgrund eines zu hohen Substanzwerts auszuscheidenden Varianten wurden in der zweiten Graphik mit einem Nutzenwert, der dem kleinsten auftretenden Nutzen entspricht, versehen. Ebenso wurde bei der Definition des Nutzens für die Null-Variante vorgegangen.

Unter Verwendung der Standard-Analyse kommt es zu einer Anwendung von M3, wird hingegen eine Optimierung auf Grundlage der eingesparten Nutzerkosten durchgeführt, sind die zu setzenden Maßnahmen M4 bzw. M6. Das heißt es werden jene Maßnahmen ausgewählt, die für den Nutzer möglichst geringe Belastungen ergeben und bei welchen auch die Straßensubstanz erhalten bleibt.

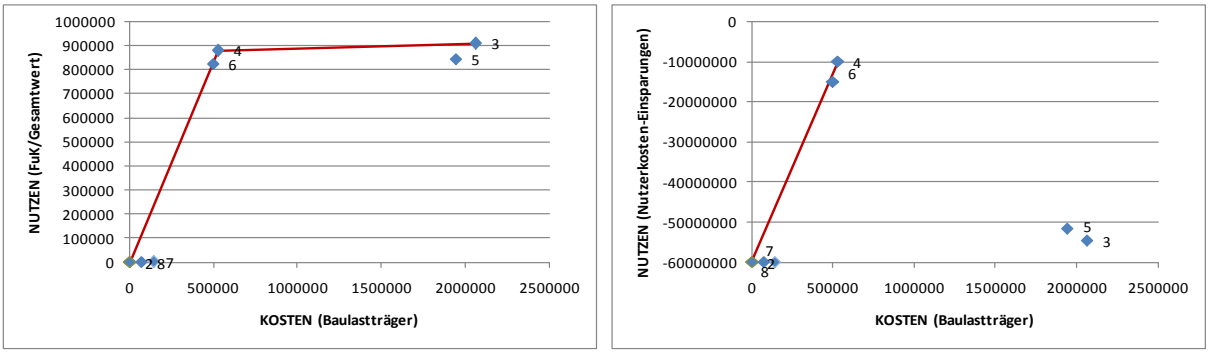


Abbildung 95: Effektivitätsdiagramme für Analyse Standard und Δ-Nutzerkosten; SI<3,5

Ebenso wie bei Beispiel 1 sind auch hier die Wirkungen der Maßnahmen durch die Darstellung der zustandsbedingten Nutzerkosten, des Substanzwerts und des Gebrauchswerts nachvollziehbar gestaltet. Es ist ausreichend, hier M3, M4 und M7 anzuführen (siehe Abbildung 96 bis Abbildung 98), da eine Verschiebung der Maßnahme um eine Periode auch die Wirkung entsprechend verschiebt.

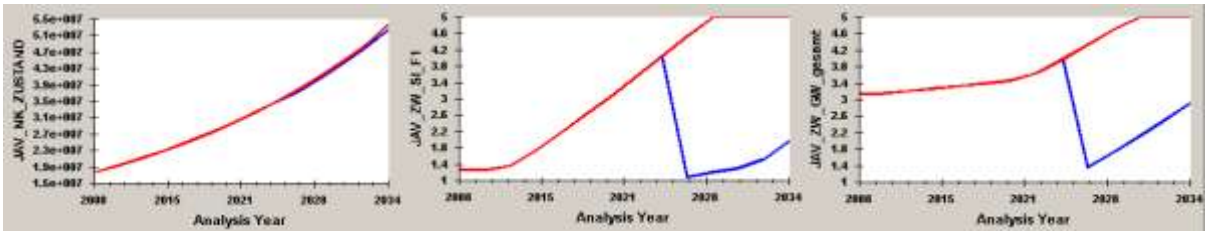


Abbildung 96: Verlauf der Beurteilungsgrößen für M3

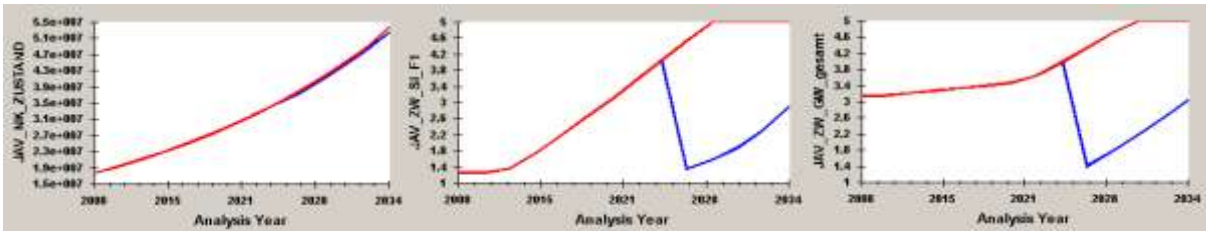


Abbildung 97: Verlauf der Beurteilungsgrößen für M4

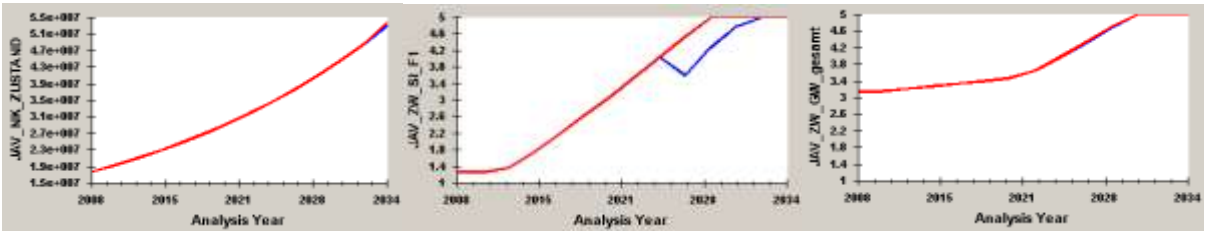


Abbildung 98: Verlauf der Beurteilungsgrößen für M7

Die zustandsbedingten Nutzerkosten-Einsparungen sind im Vergleich zu den absolut entstehenden zustandsbedingten Nutzerkosten sehr gering, jedoch ist deutlich erkennbar, dass bei M7 noch wesentlich geringere Einsparungen zu erzielen sind, als bei den anderen Varianten. Auch kann am Verlauf des Substanzwerts die Wirkung der unterschiedlichen Maßnahmen festgemacht werden. M3 bewirkt eine Verbesserung in die Klasse sehr gut und erst eine langsame Verschlechterung über die restliche Betrachtungsperiode. Hingegen ergibt sich mit M4 eine geringere Verbesserung sowie ein schnelleres Ansteigen des Wertes. M7 erzielt überhaupt nur eine sehr geringe Verbesserung, die innerhalb weniger Jahre ihre Wirkung verliert.

9.3.2.3. Beispiel 3 (Abschnitt 276 - Beton)

In dem dritten Beispiel wird ein Abschnitt in Betonbauweise betrachtet, er hat eine Länge von 3,077 km mit 3 Fahrstreifen in der betrachteten Richtung. Die Verkehrsbelastung lag für das Jahr 2008 bei rund 34.378 Fz / 24h und Richtung.

Der Straßenzustand wird in Abbildung 99 durch Substanz-, Gebrauchs- und Gesamtwert beschrieben. Es zeigt sich ein mittlerer Zustand mit einem Substanzwert in der Zustandsklasse 2 (gut – hellgrüne Kennung) und einem Gebrauchs- und Gesamtwert in der Zustandsklasse 3 (mittel – gelbe Kennung). Ausgehend von diesem Zustand sind die vorgeschlagenen Maßnahmen erst in der zweiten Hälfte der Analyseperiode zu erwarten.

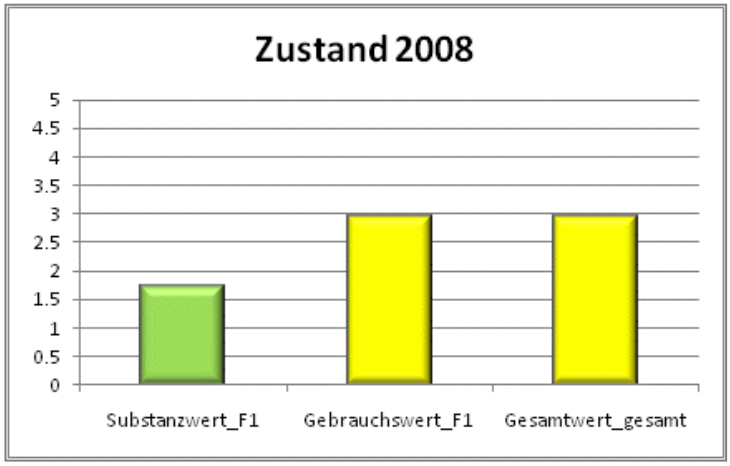


Abbildung 99: Zustandswerte des Beispiel 3 im Jahr 2008

Aufgrund der Zustandswerte und der Zustandsprognose über den Analysezeitraum werden für diesen Abschnitt im Zuge der PMS-Anwendung 17 unterschiedliche Maßnahmenstrategien vorgeschlagen und mit Kosten und Nutzen belegt. Aus diesen wurden 4 charakteristische Strategievarianten ausgewählt:

Maßnahmenstrategie 1 (M1): wie bei allen Abschnitten stellt diese das Verhalten ohne Setzen einer Maßnahme dar. Demzufolge sind auch die Baulastträgerkosten sowie die eingesparten Nutzerkosten sowie der Nutzen als Fläche unter der Kurve (Gesamtwert) gleich Null.

Maßnahmenstrategie 3 (M3): diese stellt im Zuge der Standard-Optimierung die ausgewählte Maßnahme dar, sie sieht eine Erneuerung aller Fahrstreifen in Betonbauweise im Jahr 2020 vor.

Maßnahmenstrategie 4 (M4): im Gegensatz zu M3 wird bei dieser Maßnahme die Erneuerung hinausgeschoben und im Jahr 2020 eine Deckschichtmaßnahme auf dem ersten Fahrsteifen, welcher den schlechtesten Zustand aufweist, angesetzt. Die Erneuerungsmaßnahme lässt sich somit auf das Jahr 2026 hinausschieben. M4 weist jedoch erheblich höhere Baustellenfolgekosten auf, da es durch das Verkehrsaufkommen im Jahr 2026 in Folge der Baumaßnahme zu einer Staubildung kommt und diese sich direkt auf die Baustellenfolgekosten auswirkt.

Maßnahmenstrategie 8 (M8): diese Strategie bietet durch die Durchführung von zwei Deckschichtmaßnahmen im Jahr 2020 und 2026 oberflächlich einen guten Zustand, jedoch die Straßensubstanz kann hierdurch nicht erhalten werden, insofern kann M8 bei einer Optimierung „Δ-Nutzerkosten, SI<3,5“ nicht ausgewählt werden.

Die Kostenwerte der ausgewählten Strategien sind in Tabelle 55 angeführt.

• M1: Null-Strategie		Baulastträgerk.	Δ zustandsbed.NK	Baustellenfolgek.	eingesparte NK
• M3: E_BE1+2+3	2020	2.740.987	12.574.608	5.031.405	7.543.206
• M4: I_DE1	2020	2.413.224	12.489.415	29.060.807	-16.571.392
E_BE1+2+3	2026				
• M8: I_DE1	2020	214.959	11.270.852	2.991.631	(8.279.161)
I_DE1	2026				

Tabelle 55: Kostenaufstellung von ausgewählten Maßnahmen – Beispiel 3

Der Unterschied der Maßnahmenwirkung auf den Straßennutzer zeigt sich deutlich in den eingesparten Nutzerkosten. Es kann durch M3 ein deutlicher Gewinn erzielt werden, bei Anwendung von M4 hebt jedoch die Stauentwicklung alle positiven Effekte auf und es kommt zu einer Belastung der Nutzer (negative Nutzeneinsparung). M8 kann das Substanzkriterium nicht einhalten und der Nutzen wird somit auf das geringste Niveau gesetzt, wie dies auch bei einigen anderen Maßnahmenstrategien der Fall ist.

Die graphische Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Abbildung 100. Die Strategien entlang der Umhüllenden (rote Linie) sind jene, die je nach vorhandenem Budget zur Auswahl stehen. In diesem Fall reduziert sich die Auswahlmöglichkeit im Zuge der „Δ-Nutzerkosten Betrachtung", da einige Varianten durch das Auftreten von Stau einen wesentlich geringeren Nutzen aufweisen.

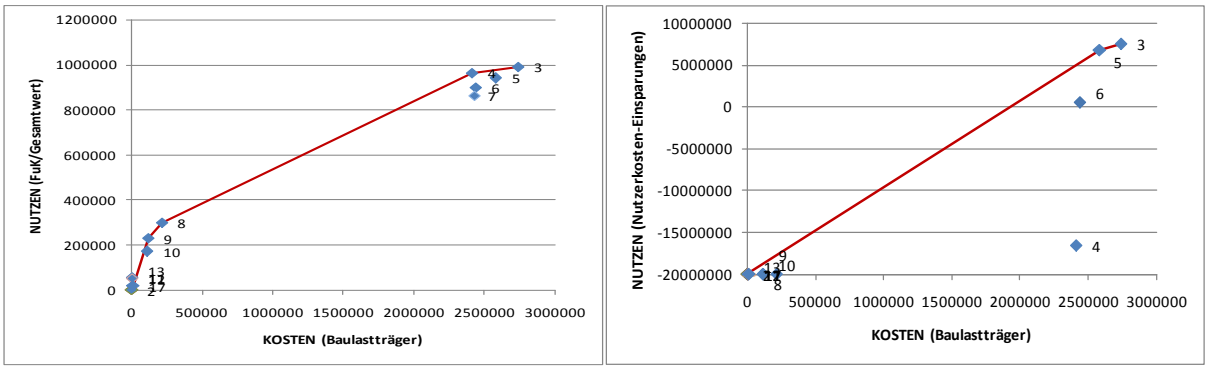


Abbildung 100: Effektivitätsdiagramme für Analyse Standard und Δ-Nutzerkosten; SI<3,5

Bei einem Vergleich der Verläufe der Beurteilungsgrößen zeigt sich, wie auch schon in den Beispielen zuvor, dass die Unterschiede im Verlauf der zustandsbedingten Nutzerkosten optisch nicht gut erkennbar sind, absolut sind sie in Tabelle 55 angeführt. Aus den Darstellungen des Substanz- und des Gesamtwerts lassen sich eindeutig die Anwendungszeitpunkte der jeweiligen Einzelmaßnahmen herauslesen. Der Substanzwert von M8 liegt im Jahr 2030 deutlich über dem geforderten Wert von 3,5.

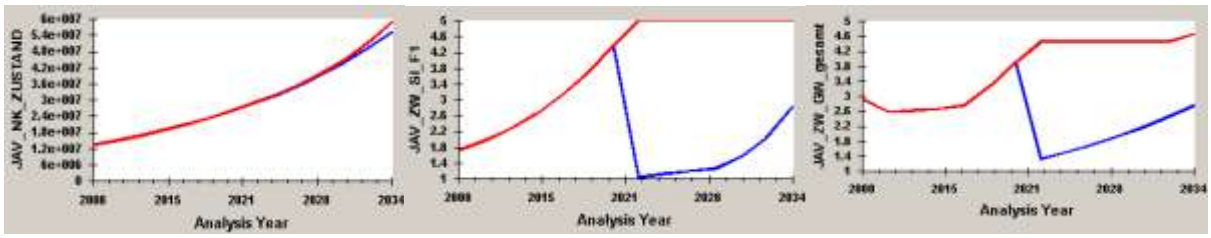


Abbildung 101: Verlauf der Beurteilungsgrößen für M3

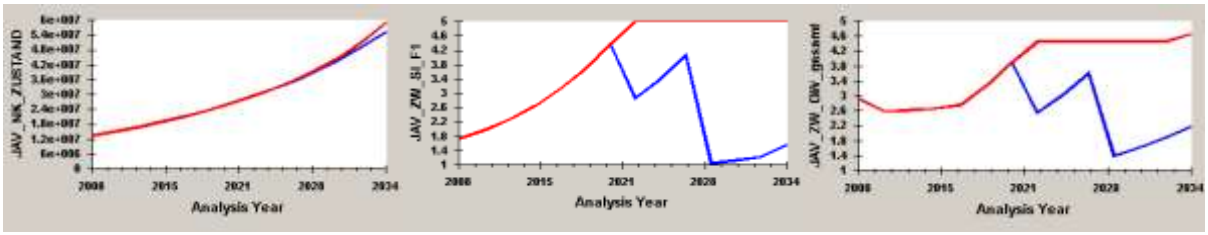


Abbildung 102: Verlauf der Beurteilungsgrößen für M4

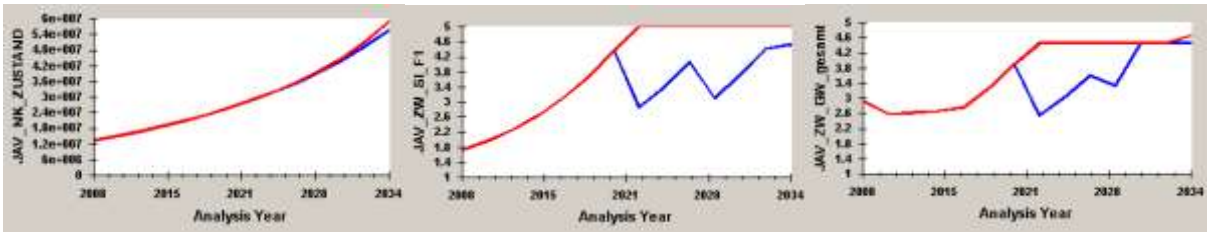


Abbildung 103: Verlauf der Beurteilungsgrößen für M8

Bei diesem Abschnitt ist es für den Straßennutzer von Vorteil die Maßnahme früher anzusetzen um Staubildung zu vermeiden. Die Verschiebung der Erneuerung durch eine vorlaufende Deckschichtmaßnahme ist unter diesen Umständen nicht anzustreben, wäre aber ohne Berücksichtigung der Nutzer (Standardoptimierung) eine gleichwertige Alternative.

9.3.2.4. Resümee Abschnittsebene

Betrachtet man den einzelnen Abschnitt, kann mit Hilfe der oben dargestellten Graphiken leicht nachvollzogen werden, warum es zu der jeweiligen Maßnahmenauswahl kommt und welche Auswirkungen diese auf den Gesamtzustand des Abschnitts hat. Aus diesen Einzelergebnissen setzt sich dann in weiterer Folge das gesamte Netzergebnis zusammen.

Die oben dargestellten Informationen sind des weiteren für jeden Erhaltungsingenieur von Bedeutung, dessen Aufgabe es ist, ein Erhaltungskonzept aus den vorliegenden Informationen zu erstellen. Hierbei kann es zur Zusammenlegung von Abschnitten kommen, oder die gewählten Maßnahmen werden zeitlich verschoben. In diesem Fall ist es von großem Interesse, wie sich diese Varianten auf den Straßennutzer auswirken, um etwaige negative Beeinträchtigungen, wie dies im Beispiel 3 im Zuge der Maßnahmenstrategie M4 der Fall wäre, zu verhindern.

Die hier vorgestellten Auswertungen können ebenso (eventuell unter Vorhaltung von zusätzlichen Informationen zur Steigerung der Genauigkeit) auf Projektebene angewandt werden.

9.4. Resümee – Umsetzung und Implementierung

Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Zusammenhänge wurden in einem Ergänzungsmodul zur Berücksichtigung der Nutzerkosten bei der derzeitigen Erhaltungsmanagement-Anwendung VIAPMS_AUSTRIA umgesetzt. Diese Erweiterung wurde anhand eines Beispielnetzes getestet, welches in seinen Eigenschaften für das österreichische Autobahnen- und Schnellstraßennetz repräsentativ ist.

Nach Durchsicht aller Ergebnisse bieten sich für die Einbeziehung der Nutzerkosten bei der Optimierung zwei Möglichkeiten an:

- Die erste Variante vermeidet einen Eingriff in die bisherige Vorgehensweise zur Erstellung eines Erhaltungsvorschlags, sie bietet jedoch ergänzend die Möglichkeit der „vergleichenden Auflistung der Barwerte". Unter diesen Barwerten können die betriebswirtschaftlichen Kosten in Form der Baulastträgerkosten den gesamtwirtschaftlichen Nutzerkosten oder auch Nutzergewinnen durch die jeweiligen Maßnahmenstrategien gegenüber gestellt werden. Dies kann entweder für einen einzelnen Abschnitt oder auch für das gesamte Netz dargestellt werden. Vorteil ist die Beibehaltung des konventionellen Optimierungsvorgangs, wodurch in die grundsätzlichen Ziele der Erhaltungsplanung nicht eingegriffen wird. In der Folge kann für unterschiedliche Erhaltungsszenarien die jeweilige Wirkung auf die Straßennutzer monetär ausgewiesen werden. Auf den einzelnen Abschnitt bezogen können hierbei auch die Wirkungen für eine zeitliche Verschiebung der Maßnahmen quantifiziert werden.
- Die zweite Variante ermöglicht eine Optimierung in Hinblick auf einen möglichst großen Gewinn für den Straßennutzer. Dies wirkt sich direkt auf den Maßnahmenvorschlag aus. Zur Anwendung dieser Möglichkeit ist es jedoch notwendig, eine Randbedingung für die Straßensubstanz festzulegen. Ein gutes Verhältnis zwischen Baulastträger- und Straßennutzerinteressen kann nur dann gewährleistet werden, wenn in dieser Randbedingung der Substanzwert mit einem Maximum von 3,5 begrenzt ist. Somit können alle Maßnahmenstrategien auf ihr Δ-Nutzerkosten-Baulastträgerkosten-Verhältnis optimiert werden und das Ergebnis sichert einen großen Gewinn für den Straßennutzer sowie auch eine gute Straßensubstanz.

Deshalb wird diese zweite Methode für die praktische Anwendung empfohlen.

Die Implementierung dieser Methodik in das vorhandene Programm VIAPMS_AUSTRIA erfolgte durch die Entwicklung eines Zusatzmoduls VIAPMS_AUSTRIA_NUTZ, der ergänzend zum derzeitigen System Auswertungen durchführen kann. Voraussetzung für die praktische Anwendung ist eine vorhandene Lizenz der Software VIAPMS.

10. ZUSAMMENFASSUNG

Bei Betrieb und Erhaltung der Straßeninfrastruktur steht neben der material- und bautechnischen Optimierung stets auch die Wirtschaftlichkeit im Zentrum der Überlegungen. Zur optimalen Erhaltungsplanung wurde ein österreichisches Pavement Management System (VIAPMS_AUSTRIA) entwickelt, welches das Ziel verfolgt mit einem begrenzten finanziellen Aufwand durch eine objektive und nachvollziehbare Entscheidungsfindung zu einer optimierten Erhaltungsstrategie zu kommen. Hierdurch können langfristig Kosten eingespart und ein verkehrssicherer Zustand gewährleistet werden.

Das derzeitige System berücksichtigt jedoch den Straßennutzer nur sehr indirekt (über die Bildung der Teil- und Gesamtwerte sowie als Gewichtungsfaktor die Anzahl der betroffenen Fahrzeuge / JDTV). Die zusätzlichen Kosten und der entstehende Zeitaufwand, die dem Nutzer durch den jeweiligen Straßenzustand und durch die Erhaltungsmaßnahmen selbst erwachsen, sind jedoch nicht in der Anwendung integriert. Ziel der gegenständlichen Arbeit war es, die Erhaltungsplanung auf eine umfassend wirtschaftliche Basis zu stellen und die Anwendung um Komponenten, die insbesondere den Straßennutzer betreffen, zu erweitern.

Die tatsächliche Umsetzung erfolgte in zwei Schritten:

- Eingehende Literaturstudie, um die maßgebenden Einflussparameter identifizieren und deren Wirkung auf den Straßennutzer quantifizieren zu können (hierzu zählt ebenso die Definition von geeigneten Kostensätzen zur Monetarisierung der Wirkungen)
- Implementierung der ausgewählten Zusammenhänge in VIAPMS_AUSTRIA_NUTZ und Durchführung von Vergleichsrechnungen
  Hiermit wird es möglich, das Ergebnis einer Nutzerkosten-orientierten Optimierung anhand eines Beispielnetzes darzustellen. Weiters bietet dieser Modul die Möglichkeit, das gesamte Erhaltungsmanagement des österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetzes hinsichtlich der Wirkung auf den Straßennutzer zu beurteilen und gegebenenfalls nutzerfreundlichere Erhaltungsmaßnahmen in den Maßnahmenvorschlag aufzunehmen.

In der internationalen Forschungslandschaft wurden schon einige Projekte durchgeführt, die sich mit der Fragestellung der Nutzerbeeinträchtigungen durch den Straßenzustand beschäftigt haben. Aus diesem großen Pool an vorhandenen Forschungsergebnissen wurden die für Österreich passenden Zusammenhänge zusammengetragen (hierbei wurde stets auch die Anwendbarkeit und die notwendigen bzw. verfügbaren Datengrundlagen berücksichtigt) und als Grundlage für die neu entwickelte Anwendung verwendet.

In Kapitel 4 wird ein Überblick der Forschungsprojekte der letzten Jahre auf dem Gebiet des Erhaltungsmanagements, insbesonders unter Berücksichtigung der Straßennutzer, gegeben. Es zeigt sich schon die auch international große Relevanz des Themas. Es stehen eine Reihe von unterschiedlichen Studien zur Verfügung, auf deren Ergebnisse im weiteren Verlauf der Arbeit zurückgegriffen werden kann.

Die konkreten Zusammenhänge für die Verknüpfung von Straßenzustand (mit bzw. ohne Maßnahme) und Wirkung auf den Straßennutzer sind in Kapitel 6 angeführt. Mit Hilfe dieser können die zustandsbezogenen Nutzerkosten berechnet werden. Sie setzen sich aus den Teilgrößen der Zeitkosten, der Fahrzeugbetriebskosten sowie der Unfallkosten zusammen. Die maßgebenden Zustands- und Kenngrößen sind in Tabelle 56 zusammengefasst.

Kostengruppe	maßgebende Kenngröße	einfließende Zustandsgröße
Zeitkosten	Geschwindigkeit	Längsebenheit
		fikitve Wasserfilmtiefe
Betriebskosten	Längsneigung	
	Geschwindigkeit	Längsebenheit
		fikitve Wasserfilmtiefe
Unfallkosten	zusätzliche Unfallrate	Griffigkeit
		Spurrinnentiefe

Tabelle 56: Zusammenstellung der Einflüsse auf die zustandsbezogenen Nutzerkosten

Je nach Zustand des betrachteten Erhaltungsabschnitts stehen einzelne Kostengruppen im Vordergrund. Beispielsweise überwiegen bei einer schlechten Griffigkeit die Unfallkosten und bei einer schlechten Längsebenheit die Zeitkosten. Befindet sich der Abschnitt - bezogen auf die Oberflächeneigenschaften - in einem guten Zustand und sind etwaige Maßnahmen aufgrund des Zustands der Straßensubstanz erforderlich, so halten sich Zeit- und Unfallkosten ungefähr die Waage. Der Anteil der Betriebskosten ist in allen Fällen sehr gering.

Auf die Nutzerkosten hat nicht nur der Straßenzustand einen Einfluss, sondern vor allem auch die Beeinträchtigung durch die Erhaltungsmaßnahme selbst. Diese Auswirkungen auf den Straßennutzer sind in den Baustellenfolgekosten zusammengefasst. Die hiefür verwendeten Ansätze sind Kapitel 7 zu entnehmen. Sie setzten sich aus den Einzelgrößen Betriebskosten, Unfallkosten, Zeitkosten (Durchfahrt) und Zeitkosten (Stau) zusammen. Eine Übersicht der wichtigsten Einflussparameter ist in Tabelle 57 dargestellt.

Kostengruppe	maßgebende Kenngröße	Einflussparameter
Betriebskosten	Geschwindigkeit	Durchfahrtsgeschwindigkeit Baustelle
Unfallkosten	zusätzliche Unfallrate	vorhandene Verkehrsführung
Zeitkosten (Durchfahrt)	Geschwindigkeit	Durchfahrtsgeschwindigkeit Baustelle
Zeitkosten (Stau)	Kapazität	vorhandene Verkehrsführung
	Verkehrsbelastung	Verkehrszuwachs

Tabelle 57: Zusammenstellung der Einflüsse auf die Baustellenfolgekosten

In einem zweiten Schritt (ab Kapitel 9) werden die zuvor zusammengetragenen Grundlagen in das vorhandene Erhaltungsmanagement-System VIAPMS_AUSTRIA implementiert und anhand eines Beispielnetzes angewandt.

Das Beispielnetz hat eine Länge von mehr als 1.250 Richtungsfahrbahn-Kilometer und entspricht in seinem Zustand seinen Eigenschaften dem österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßennetz. So ist gewährleistet, dass eine Anwendung auf das gesamte Netz der Asfinag problemlos möglich ist. Für dieses Netz wurde eine Analyse nach dem konventionellen PMS durchgeführt. Als Erweiterung können zu den so entwickelten Strategievorschlägen auch die entstehenden Nutzerkosten (zustandsbezogene Kosteneinsparungen und Baustellenfolgekosten) berechnet werden. Diese Ergebnisse können in der Folge mit den Ergebnissen der erweiterten Optimierung verglichen und beurteilt werden.

Diese Erweiterung der Optimierung umfaßt drei Alternativen:

- Optimierung nach dem Verhältnis der eingesparten Nutzerkosten und der Baulastträgerkosten ohne zusätzliche Randbedingungen (Δ-Nutzerkosten)
- Optimierung nach dem Verhältnis der eingesparten Nutzerkosten und der Baulastträgerkosten bei gleichzeitiger Festsetzung des Substanzwerts am Ende der Analyseperiode auf den Schwellenwert (Δ-Nutzerkosten; SI<4,5)
- Optimierung nach dem Verhältnis der eingesparten Nutzerkosten und der Baulastträgerkosten bei gleichzeitiger Festsetzung des Substanzwerts am Ende der Analyseperiode auf den Warnwert (Δ-Nutzerkosten; SI<3,5)

Die Analyse wurde in allen Vergleichsfällen ohne eine Beschränkung des vorhandenen Budgets durchgeführt. Dies ermöglicht stets die Auswahl der besten Alternative und bewirkt im Vergleich der Verfahren eine größere Spreizung der Ergebnisse.

Je nach gewünschtem Aggregierungsgrad können die Ergebnisse des gesamten Netzes oder eines einzelnen Abschnitts betrachtet werden. Grundsätzlich setzt sich der Netzzustand aus den einzelnen Abschnittsergebnissen zusammen, für manche Fragestellungen ist es jedoch notwendig auch das Einzelergebnis zu Rate zu ziehen.

Für das gesamte Beispielnetz können nach erfolgreich durchgeführter Analyse folgende Aussagen getroffen werden:

- Auch für eine konventionelle Analyse (Optimierung nur für Baulastträger-Kosten) ist es mit Hilfe des entwickelten Moduls möglich, die auftretenden Nutzerkosten bzw. Gewinne zu quantifizieren. Im gegenständlichen Beispielnetz ergibt sich für diese Variante ein benötigtes Baulastträgerbudget zur Durchführung aller vorgeschlagener Maßnahmen von rund 680 Mio.€. Durch diese finanziellen Aufwendungen können Nutzer-Gewinne in der Höhe von 1,4 Mrd.€ generiert werden. Weiters kann über die gesamte Analyseperiode ein guter Straßenzustand (bezogen auf Gesamt-, Substanz- und Gebrauchswert) gewährleistet werden.
- Eine reine Optimierung über die eingesparten Nutzerkosten (maximaler Nutzergewinn) bewirkt eine starke Reduktion der Maßnahmenanzahl sowie deren Tiefe. Über den Analysezeitraum kann der Gewinn für den Straßennutzer stark vergrößert werden, jedoch tritt der Substanzerhalt des Netzes in den Hintergrund und der Gesamtzustand verschlechtert sich zusehends. Besonders nach Ende der Maßnahmenperiode zeigt sich diese Entwicklung deutlich anhand des Substanzwerts. Er steigt rapide auf über 70% in der Klasse 5 (sehr schlecht) am Ende der Analyseperiode an.
  Als alleiniges Kriterium ist daher die Größe der eingesparten Nutzerkosten nicht zu empfehlen.
- Als Alternative wurde eine Variante entwickelt, die einerseits die Nutzerkosteneinsparungen optimiert und andererseits einen guten Zustand der Straße gewährleistet. Hierbei zeigt die Optimierung „Δ-Nutzerkosten; SI<3,5“ die besten Ergebnisse. Die Bedingung an den Substanzwert (der Warnwert muss am Ende der Analyseperiode eingehalten werden) stellt sicher, dass Strategien, die nur Oberflächen-Maßnahmen enthalten und die Substanz vernachlässigen, nicht in die Strategieliste aufgenommen werden können.
  Unter Anwendung dieser Methode ist es mit einem Baulastträgerbudget von 450 Mio.€ möglich, einen Gewinn für die Straßennutzer im Wert von 3.5 Mrd.€ zu erzielen. Der Gesamtzustand erreicht nicht dasselbe Niveau, wie bei der konventionellen Variante, jedoch ist er ausreichend und hat den weiteren Vorteil der Nutzer-freundlichen Erhaltungsplanung.

Die Wirkungen der unterschiedlichen Varianten wurden auch auf Ebene der Einzelabschnitte analysiert und können die oben angeführte Empfehlung bestätigen.
Für einen Einzelabschnitt können alle vorgeschlagenen Strategien mit den darin enthaltenen Maßnahmen und die jeweilige Unterlegung mit Baulastträgerkosten und eingesparten Nutzerkosten betrachtet werden. So ist es möglich, die Wirkung (besonders auch auf den Straßennutzer) einer eventuellen zeitlichen Verschiebung (durch Zusammenlegung mit dem Nachbarabschnitt) schon im Vorfeld abzuschätzen.

Auf Ebene des Einzelabschnitts kann auch die Wirkung von Überlastungen und Stau quantifiziert und sichtbar gemacht werden. Übersteigt die Verkehrsbelastung die Kapazität im Baustellenbereich, so wirkt der entstehende Stau direkt auf die Zeitkosten und läßt diese rasch zu sehr großen Werten ansteigen.

Ist nur für einen einzelnen Abschnitt bzw. ein Baulos ein Erhaltungskonzept zu erstellen (z.B. im Zuge eines PPP-Projekts), so bietet sich eine weitere Möglichkeit der Berücksichtigung mehrerer Kostengruppen an. Hierbei kann als Optimierungskriterium das Verhältnis des konventionellen Nutzens und der Gesamtkosten (Baulastträgerkosten + Nutzerkosten) gebildet werden. Es ist jedoch erforderlich, als Randbedingung den Zustand des Abschnitts am Ende der Analyseperiode festzulegen.

Nach Analyse aller Ergebnisse kann für ein PMS, das den Straßennutzer in den Vordergrund stellt, eine Anwendung der Variante „Δ-Nutzerkosten; SI<3,5“ (Details finden sich in Kapitel 9.3.1.3) empfohlen werden.

Die Implementierung dieser Methodik in das vorhandene Programm VIAPMS_AUSTRIA erfolgte durch die Entwicklung eines Zusatzmoduls VIAPMS_AUTRIA_NUTZ, der ergänzend zum derzeitigen System Auswertungen durchführen kann. Voraussetzung für die praktische Anwendung ist eine vorhandene Lizenz der Software VIAPMS.

[1] Weninger-Vycudil A.: Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches Pavement Weninger-Vycudil A., Simanek P., Rohringer T., Haberl J.: Handbuch Pavement Management in Österreich. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 548, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2009
[2] Boesefeldt J., Emde W. und Schellhöh V.: Entwicklung von Modellansätzen zur Ermittlung von Zeit- und Betriebskosten im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsfragen zur Straßenbefestigung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 343, BMfV., Bonn-Bad Godesberg, 1981
[3] RATIO: Volkswirtschaftlicher Nutzen von Straßenbaumaßnahmen. Bundesministerium für Bauten, Wien, 1971
[4] Ecoplan/Metron: Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr. Kommentar zur VSS-Grundnorm SN 641 820, Bern, 2005
[5] Herry M. und Sedlacek N.: Österreichische Wegekostenrechnung für die Straße 2000. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 528, BMVIT, Wien, 2003
[6] Snizek S., Koch H. und Prem J.: Handbuch Entscheidungshilfen, Nutzen-Kosten-Untersuchungen in der Bundesstraßenplanung. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 514, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2001
[7] Laffont S. und Schmidt G.: Empfehlungen zur Minderung von Stau- und Unfallrisiko bei einstreifigen Verkehrsführungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 701, BMfV, Bonn, 1995
[8] Stütze T.: Volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswerte für die Erhaltung von Bundesautobahnen. Dissertation an der TU Berlin, Berlin, 2004
[9] Ossberger M.: Verkehrswirtschaft, Unterlagen zur Vorlesung 232.530. Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen, Wien, 2002
[10] OECD: Transport Infrastructure Charges and Capacity Choice. Round Table on Transport Economics No. 135, 2007
[11] Rübensam J., Hellmann L., Staroste D. und Stoltz J.: Untersuchung zur Wirtschaftlichkeit und bautechnischen Bewährung von Fahrbahnbefestigungen aus Asphalt und Beton auf bestehenden Bundesautobahnen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 914, BMfV., Bonn, 2005
[12] Pichler W.: Betriebswirtschaftliche Komponente beim Management der Straßenerhaltung. Habilitationsschrift aus dem Fachgebiet der Straßenerhaltung, Spittal/Drau, 1994 - TU Wien
[13] Schönbäck W. und Walzer W.: Studienblätter zur Vorlesung Ökonomische Bewertungsmethoden, Fachbereich Finanzwissenschaft und Infrastrukturpolitik, Department für Raumentwicklung, Infrastruktur- und Umweltplanung, Wien, 2008
[14] Bennett C.R. and Greenwood I.D.: HDM-4 Highway Development and Management. Volume 7: Modelling Road User and Environmental Effects in HDM-4. The World Road Association (PIARC), The Highway Development and Management Series, 2001
[15] Strimmer J.: Das Pavement-Management-System HDM-4. Überblick über das System und erste Beurteilung der Prognosemodelle für die Riss- und Spurrinnenbildung. Diplomarbeit an der TU Wien, Wien, 2000
[16] Pichler A.: Die Berechnung der Straßennutzerkosten im Pavement Management Programm HDM-4. Diplomarbeit an der TU Wien, Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, Wien, 2006
[17] FEHRL: Guidelines for Delivering Fully Optimised Road Maintenance, FORMAT: Deliverable Reports, Delft, 2006
[18] RVS – Richtlinie und Vorschriften für den Straßenbau, Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, Wien
RVS 02.01.22 Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen: Nutzen-Kosten-Untersuchungen im Verkehrswesen, 2002
RVS 02.01.22 Entscheidungshilfen: Nutzen-Kosten-Untersuchungen im Verkehrswesen. Entwurf 2009
RVS 02.02.21 Verkehrssicherheit, Verkehrssicherheitsuntersuchung, 2004
RVS 02.02.33 Verkehrssicherheit, Verkehrssicherheitsaudit, 2006
RVS 03.01.11 Überprüfung der Anlageverhältnisse von Straßen (ÜAS), 1995
RVS 03.05.11 Knoten, Planung, Dimensionierung, Gestaltung, Planungsgrundsätze, 2005
RVS 03.03.31 Freilandstraßen, Querschnittselemente Freilandstraßen; Verkehrs- und Lichtraum, 2005
RVS 03.08.71: Entscheidungshilfen - Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Oberbaukonstruktionen im Straßenbau, 2001
RVS 05.05.42 Verkehrsführung bei Baustellen, Autobahnen mit getrennten Richtungsfahrbahnen, 2001
RVS 05.05.43 Verkehrsführung bei Baustellen, Straßen mit zwei oder mehr Fahrstreifen je Fahrrichtung. 2003
RVS 09.02.31 Tunnel, Tunnelausrüstung, Belüftung, Grundlagen. Entwurf 2007
RVS 13.01.15 Bauliche Straßenerhaltung-Pavement Management-Beurteilungskriterium für messtechnische Zustandserfassung mit dem System RoadSTAR, 2006
[19] Schmuck A.: Straßenerhaltung mit System. Kirschbaum Verlag, Bonn, 1987
[20] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Empfehlungen für Wirtschaftlichkeits-untersuchungen an Straßen (EWS). FGSV Verlag, Köln, 1997

[21] SN – Schweizer Normen, VSS - Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, Zürich
SN 640 907: Erhaltungsmanagement (EM): Grundlagen zur Kostenberechnung im Erhaltungsmanagement. 2003
SN 641 820: Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, 2006
SN 640 730b: Massnahmenkonzept, Erhaltung von Fahrbahnen, 1998
SN 640 736a: Instandsetzung und Verstärkung von Betonbelägen, Erhaltung von Fahrbahnen, 2000
[22] Girmscheid G.: Entscheidungsmodell – Lebenszyklusorientierte Strategiebildung und Unterhaltsvarianten für Straßennetze. Der Bauingenieur, Ausgabe 7-8, Düsseldorf, 2007
[23] Lindemann H.P., Schiffmann F. und Baumgartner F.: Maßnahmenplanung im Erhaltungsmanagement Fahrbahnen ; Synthesebericht. Forschungsauftrag VSS 2005/710 auf Antrag des Verbandes Schweizerischer Straßen- und Verkehrsfachleute, Zürich, 2008
[24] U.S. Department of Transportation: Life-Cycle Cost Analysis Primer. Office of Asset Management, Washington, 2002
[25] US. Department of Transportation: Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design. Pavement Division, Interim Technical Bulletin, FHWA-SA-98-079, Washington, 1998
[26] U.S. Department of Transportation: Economic Analysis Primer. Federal Highway Administration, Office of Asset Management, 2003
[27] HEATCO: Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment. Deliverable 7: Final Technical Report, 2006
[28] Pinkofsky L.: Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr und Stadtbauwesen der TU Braunschweig, Heft 54, Shaker Verlag, Aachen, 2006
[29] Birn C., Bolik H. und Rieken P.: Bundesverkehrswegeplan 2003 - Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin, 2005
[30] FORMAT-Fully Optimised Road Maintenance, Deliverable Report D3/D4, Basic Model for Financial Evaluation of Pavement Deterioration and Additional Cost at Road Works. FORMAT, Delft, NL, 2003
[31] Klementschitz, R.: Potenziale zur Effizienzsteigerung von Autobahnen : eine volkswirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analyse verkehrsorganisatorischer Maßnahmen ohne Ausbau der bestehenden Infrastruktur. Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Heft 135, BMVIT, Wien, 2004
[32] Busch F.: Spurbelastungen und Häufigkeit von Spurwechseln auf einer dreispurigen Bundesautobahn. Straßenverkehrstechnik Heft 6, Kirschbaum Verlag, 1984
[33] FGSV: Begriffsbestimmungen. Technisches Regelwerk, Straßenentwurf, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln, 2000
[34] FGSV: Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln, 2001 (Fassung 2005)
[35] Transportation Research Board: Highway Capacity Manual. Special Report 209, Third Edition, National Research Council, Washington, D.C., 1994
[36] Transportation Research Board: Highway Capacity Manual. National Research Council, TRB Business Office, Washington DC, 2000
[37] Ponzlet M.: Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflussmodellen. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen Ruhr-Universität Bochum Heft 16, Bochum, 1996
[38] Richtlinie zur Baubetriebsplanung auf Bundesautobahnen, RBAP. Bundesministerium für Verkehr / Bundesanstalt für Straßenwesen, Ausgabe 1996
[39] Beckmann A. und Zackor H.: Untersuchung und Eichung von Verfahren zur aktuellen Abschätzung von Staudauer und Staulängen infolge von Tages- und Dauerbaustellen auf Autobahnen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 808, BMfV, Bonn, 2001
[40] Ober-Sundermeier A.: Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognose an Engpässen auf Autobahnen unter besonderer Berücksichtigung von Arbeitsstellen. Schriftenreihe Verkehr der Universität Kassel, Heft 15, Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung – Fachgebiet Verkehrstechnik, Kassel, 2003
[41] Kellermann G.: Stau an Baustellen – ein vereinfachtes Berechnungsprogramm. Straße und Autobahn, Heft 7, 1997
[42] Hoffmann G., Eichhorn J., Franz G.-M., Schwencke K.-R. und Zmeck D.: Auswirkungen von Reparatur-Baumaßnahmen auf der Bundesautobahn Stadtring Berlin auf den Verkehrsablauf und das Unfallgeschehen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 329, BMfV, Bonn-Bad Godesberg, 1981
[43] Hess R.: Optimierte Planung von Arbeitsstellen an Autobahnen auf der Grundlage verkehrlicher Überlastungswahrscheinlichkeiten. Veröffentlichungen des Institutes für Straßen- und Eisenbahnwesen der Universität für Karlsruhe, Heft 55, Karlsruhe, 2006
[44] Berger W.: Kapazität einröhriger Autobahntunnel – Blockabfertigung an der A 10 Tauernautobahn. FSV aktuell Heft 1, Wien, 2003
[45] Friedrich B. und Engelmann F.: Verkehrsablauf an Fahrstreifenreduktionen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 869, BM.f.V., Bonn-Bad Godesberg, 2003
[46] Ressel W.: Untersuchungen zum Verkehrsablauf im Bereich der Leistungsfähigkeit an Baustellen auf Autobahnen. Informationen Verkehrsplanung und Straßenwesen, Heft 37, Universität der Bundeswehr München, München, 1994

[47] Statistik Austria: KFZ-Bestand 2008. www.statitik.at, Wien, 2008
[48] Choi R.: Umweltbewusstsein und der Wandel zur nachhaltigen Entwicklung unter Berücksichtigung der Mobilitätsproblematik, Dissertation FU Berlin, 2006
[49] Gnadler R.: Simulation des Fahrzeugverhaltens auf unebener nasser Fahrbahn, Forschung Straßenbau und Straßenerhaltung, Herft 728, Bonn, 1996
[50] Wallman C. and Astrom H.: Friction measurement methods and the correlation between road friction and traffic safety. VTI 911A, Swedish National Road and Transport Research Institute, 2001
[51] Schmuck A., Breiter B. und Oefner G.: Optimierung von Instandsetzungsstrategien und Einführung technologischer und wirtschaftlicher Trendmodelle in Wirtschaftlichkeitsrechnungen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 438, BMfV, Bonn-Bad Godesberg, 1985
[52] Sammer G.: Skriptum Verkehrsplanung und Verkehrspolitik, Institut für Verkehrswesen, Boku, Wien, 2008
[53] Boiteux M.: Transport: pour un meilleur choix des investissements. Commisariat General du Plan, Paris, 2000
[54] Gogg M., Herbold K., Smith M. and Walls J.: Life-Cycle-Cost-Analysis in Pavement Design. Demonstration Project No.115, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2006
[55] PAV-ECO: Economic Evaluation of Pavement Maintainance, Work Package 5, "EU VOC models". Pavement and Structure Management System, Project for EC - DG VII - RTD Programme, EPFL, LAVOC Lausanne, 1999
[56] Cerwenka P., Dischinger N., Klamer M. und Walter C.: Anwendungsorientierte Ermittlung von Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen des Kraftfahrzeugverkehrs in Deutschland für die Neufassung der RAS-W (EWS). Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen, Stand und Entwicklung der EWS, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln, 2002
[57] Keller M. und Hausberger S.: „Handbuch der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs in Österreich", Version 2.1 erstellt im Auftrag von Umweltbundesamt, Ministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft sowie dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2004
[58] Cerwenka P., Hauger G., Hörl B. und Klammer B.: Handbuch der Verkehrssystemplanung. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien, 2007
[59] ÖAMTC: Pumpenpreise und Steueranteile, www.oeamtc.at, 30.05.2008
[60] Nagl P: Ermittlung des Wertes von Reisezeiteinsparungen und der Fahrzeugbetriebskostengrundwerte zur Bewertung von Maßnahmen im Verkehr – Dokumentation zur RVS 02.01.22, Österreichische Zeitschrift für Verkehrswissenschaft – ÖVZ, Heft 2, Wien, 2008
[61] Statistik Austria: Straßenverkehrsunfälle 2005. Wien, 2006
[62] Asfinag: Verkehrstechnische Grundsätze zur Planung von Verkehrstelematikanlagen. Allgemeine Richtlinie, VG-VBA, Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft, Wien, 2007
[63] Nussbaumer C.: Wie sicher sind Straßentunnels in Österreich? ZVR - Zeitschrift für Verkehrsrecht, 02-2006, Manz Verlag, Wien, 2006
[64] Unfälle mit Personenschaden. www.statistik.at, letzter Zugriff: 21.07.2008
[65] Herry M., Sedlacek N. und Steinacher I.: Verkehr in Zahlen – Österreich – Ausgabe 2007. BMVIT, Wien, 2007
[66] Hulmak M., Pichler M. und Snizek S.: Stau im Bundesstraßennetz – Risiko, Bewertung, Verminderung. BMVIT, Schriftenreihe Straßenforschung Heft 569, Wien, 2007
[67] Köppl W. und Meewes V.: Beurteilung der Verkehrssicherheit in den " Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen". Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen, Stand und Entwicklung der EWS, Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln, 2002
[68] Hoppe H.: Externe Kosten des Verkehrs, Studie des Bund Hessen, 2004
[69] Höhnscheid K., Köppel W., Krupp R. und Meewes V.: Kostensätze für die volkswirtschaftliche Bewertung von Straßenverkehrsunfällen-2000. Straßenverkehrstechnik, Heft 1, Bonn, 2002
[70] Metelka M., Cerwenka P. und Riebesmeier B.: Österreichische Unfallkosten- und Verkehrssicherheits-rechung Straße. Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 79, Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr, 1997,
[71] Ferenc D., Feßl T., Herry M., Kummer S., Riebesmeier B., Sedlacek N., Stefan C., Sudy I. und Winkelbauer M.: Unfallkostenrechnung Straße 2007 unter Berücksichtigung des menschlichen Leids (Willingness to Pay). Forschungsarbeiten aus dem Verkehrswesen, Heft 177, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2008
[72] Kräutler C.: Handbuch: Sicherheitsaudit von Straßen in Österreich. Kuratorium für Verkehrssicherheit, Wien, 2004
[73] Pichler W.: Entscheidungsmodell für die Wahl der Oberbaukonstruktion im Straßenbau. Dissertation, TU-Graz, 1981
[74] FGSV: Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe – MB Griff. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe „Fahrzeug und Fahrbahn", Köln, 2003
[75] Schulze K.H., Dames J., Lange H. und Wehner B.: Untersuchungen über die Verkehrssicherheit bei Nässe. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 189, Bonn, 1975

[76] Kamplade J. und Schmitz H.: Erfassen und Bewerten der Fahrbahngriffigkeit mit dem Messverfahren SRM und SCRIM. Forschungsbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bereich Straßenverkehrstechnik, Bergisch Gladbach, 1984
[77] FGSV: Arbeitsanleitung für Griffigkeitsmessungen mit dem SRM. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe „Fahrzeug und Fahrbahn", Köln, 2004
[78] Bartz R., Haardt P., Höhnscheid K., Knepper S., Pinkofsky L., Schepers A. und Straube M.: Modellierung des Unfallgeschehens in gesamtwirtschaftlichen Bewertungsverfahren. Projektnummer: 02 412 / U1, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2003
[79] Huschek S.: Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe. Deutscher Straßen- und Verkehrskongress in Karlsruhe 1994, Tagungsband, Kirschbaum-Verlga, Bonn, 1996
[80] Goyat Y. and Delanne Y.: Improving road safety through an analysis of potential tire/road forces at locations prone to skidding accidents. Publikation LCPC, Nantes, 2006
[81] Viner H.E., Sinhal R. and Parry A.R.: Linking Road Traffic With Skid Resistance. Recent UK Development, GB, 2005
[82] Johannsen K., Ebersbach D., Wellner F. und Lippold C.: Dringlichkeitsreihung von Erhaltungsmaßnahmen bei geringer Griffigkeit. Straße und Autobahn, Heft 10, Bonn, 2004
[83] Maurer P.: Aspekte der Griffigkeit und ihr Einfluss auf die Pkw-Bremsverzögerungen. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 564, BMVIT, Wien, 2007
[84] Steinauer B., Mayer G. und van der Sluis S.: Abnahmewerte für die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen. Signifikante Griffigkeitswerte aus Verkehrssicherheitssicht, Aachen, 2000
[85] Tiefenbacher H.: Beurteilung von Griffigkeitsmessungen – Ergebnisse neuerer Auswertungen und Vergleiche. Vortrag im Rahmen des Straßenbautechnischen Seminar, TU Wien, 2000
[86] Pejrimovsky D.: Österreichische Bundesstraßen Griffigkeitskampagne 1991-1996. Weiterführende Untersuchungen der Thematik „Unfallschwerpunkte", BMwA, 1999
[87] Sund E. K.: Optimal Road Maintenance and Operations – Results of New Research and Analysis in Norway. Nordic Heft 3, Schweden, 2007
[88] Ihs A.: The Influence of Road Surface Condition on Traffic Safety. Swedish National Road and Transport Research Institute, Sweden, 2004
[89] Breyer G., Fuchs M. und Pichler W.: Pavement Management Systeme für die Österreichische Bundesstraßenverwaltung. Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 356, BMfWA, Wien, 1988
[90] Kamplade J.: Auswirkung von Verschleiß und Verformung der Fahrbahnoberfläche auf die Verkehrssicherheit. Road and Traffic 2000, International Road and Traffic Conference, Berlin, 1988
[91] Domhan M. und Bartlsperger R.: Verantwortung der Baulästträger für die Griffigkeit bei Nässe und andere Oberflächeneigenschaften der Straße. Straße und Autobahn, Heft 11, Bonn, 1998
[92] Nowakowski H.: The influence of road surface parameters on accident rates – a statistical analysis. 6th International Cooperation on Theories and Concepts in Traffic Safety, 1993, Salzburg
[93] Asfinag: Baustelleninformation 2008/09. http://www.asfinag.at/index.php?idtopic=105, letzter Zugriff: 10.12.2008
[94] Chien S. und Schonfeld P.: Optimal Work Zone Lengths for Four-Lane Highways. Journal of Transportation Engineering, issue 127, march/april 2001
[95] Chen C. and Schonfeld P.: Work Zone Lengths for a Four-Lane Road with an Alternate Route. Journal of Transportation Engineering, 2005
[96] Ponzlet M.: Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Verkehrsstärken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 718, BMfV, Bonn, 1996
[97] Kayser H.-J., Hess M.: Planung von Baustellen auf Autobahnen. Forschungsbericht FE 03 224 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Aachen, 1991
[98] OECD: Economic Evaluation of Long-Life Pavements. Phase 1, Organization for Cooperation and Development , Paris, 2005
[99] FGSV: RSA-95, Richtlinie für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Köln, 1995
[100] Lohse E., Schmolke U., Maerschalk G., Krause G., Hinsch K. und Schniering A.: Entwicklung eines BVWP/EWS-kompatiblen Bewertungsbausteins für Erhaltungsinvestitionen in die Straßeninfrastruktur und dessen bedarfsgerechte Begleitung im Feldversuch nach Integration des Bewertungsbausteins in die Software "VIAPMS" der VIAGROUP, Winterthur. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin, 2004
[101] Kühne R., Aoki R., Kellermann G., Manstetten D., Schnittger S. und Wu N.: Hinweise zum Fundamentaldiagramm - Grundlagen und Anwendungen. Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2005
[102] Wu N.: Verkehr auf Schnellstraßen im Fundamentaldiagramm – Ein neues Modell und seine Anwendungen. Straßenverkehrstechnik, Heft 8, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2000
[103] Brillet F.: The „FORMAT" European project: Quantification of congestion caused by road maintenance works. BLPC n°261-262 april/may/june 2006, Paris, 2006
[104] Lighthill, M.J. and Whitham, J.B.: On kinematic waves. Royal Publishing Society, London, 1955
[105] Scazziga I.: Maßnahmen zur effizienteren Straßenerhaltung in der Schweiz. Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU Wien, Heft 10, Wien, 1999

[106] Hanko W., Ressel W. und Frencl P.: Feste Baustellen von längerer Dauer auf Autobahnen. Tagungsband der Vortragsveranstaltung am 4. Juli 1995 an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Institut für Straßenbau und Verkehrsplanung Heft 30, Innsbruck, 1995
[107] Durth W., Stöckert R. und Klotz S.: Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Arbeitsstellen kürzerer Dauer ("Tagesbaustellen") auf Bundesautobahnen. Schlussbericht Forschungsauftrag 03.285/1995/FR, TU Darmstadt Darmstadt, 1999
[108] Grebe N. und Hanke H.: Verkehrssicherheit an kurzfristigen und beweglichen Arbeitsstellen auf Autobahnen. Straßenverkehrstechnik, Heft 12, Kirschbaum Verlag, Bonn, 1991
[109] ECRPD, Energy Conservation in Road Pavement Design, Maintenance and Utilisation: http://www.roadtechnology.se/ecrpd.eu/index.asp?MainID=50, 07.2009
[110] Herry M. und Käfer A.: Externe Kosten im Güterverkehr in Österreich. Globalrechnung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2001

EXECUTIVE SUMMARY

Development of User Cost Module in the Austrian Pavement Management System

In terms of operating and maintaining road infrastructure the main issues are material and structural optimisation and among these in all aspects the effects on economy. To offer optimal maintenance planning an Austrian pavement management system (VIAPMS_AUSTRIA) has been developed, Optimised maintenance strategies (taking the agency and its budget as main criteria) can be developed by using this tool. Finding the right solution is made objective and transparent. This ensures long-term savings for road maintenance and guarantiees a safe road-condition.

The current system considers road user aspects only indirectly (through the calculation of condition values and on the basis of the number of affected vehicles / JDTV as weighting factor). The additional costs and the time loss for road users which result from the road condition and the applied maintenance measures are not integrated in the PMS. This project focussed on the enhancement of the existing PMS in developing a module, which enables a pavement management on a total economic basis, including user cost aspects.

The implementation was in two steps:

- Literature study: to identify the relevant impacts on the road user and define the main parameters to quantify their influence. Therefore also unit cost values to quantify the impacts on the road users had to be fixed.
- Implementation of the chosen impacts into VIAPMS_AUSTRIA_NUTZ and execute comparative calculations. With this tool it is possible to show the effects of user friendly maintenance work optimisation on a representative road-network.
  The tool also offers the possibility to evaluate the total network of Austrian motorways and expressways in terms of its user-friendliness. As a result the authorities have the option of taking more user friendly maintenance work into their catalogue.

Internationally the question of road condition impact on users is of high importance and there are several projects dealing with this topic. From this pool of existing research the for the Austrian road network appropriate applications have been compiled (including the applicability and the required data basis) and used as basis for the developed application.(It has to be mentioned that no additional research has been done in these fields. Nevertheless the need for improved information was pointed out.)

Chapter 4 provides an overview of the recent research activities concerning pavement management and road user aspects. The amount of papers reflects the importance of the topic. Aspects of quite a few of them could be merged, developed and fitted to the Austrian Road Network.

The specific outcome of linking road condition (with or without maintenance) and effects on road users are given in chapter 6. Using those algorithms road user (condition related) can be calculated. They can be divided into three groups: time costs, vehicle operating costs and accident costs. The relevant condition parameters and index values are summarized in table 1.

Cost	Decisive factor	Relevant condition parameter
Time costs	speed	Longitudinal evenness
		Water film depth
Vehicle operating costs	inclination	
	speed	Longitudinal evenness
		Water film depth
Accident costs	additional accident rate	Skid resistance
		Rut depth

Table 1: Compilation of impacts on condition affected road user costs

Depending on the condition of each section different cost groups have higher impact. For example a bad skid resistance leads to high accident costs and a bad longitudinal evenness leads to higher time costs. In case the maintenance work has to be done because of the condition of the road substance (the surface condition is rather good) then the time and accident costs are rather balanced. The share of operating costs is very low in all cases.

Not only the road surface condition has an influence on user costs, but also the maintenance work itself. This impact is summarized in the construction related user costs. The used approaches can be found in chapter 7. They compose out of operating costs, accident costs, time costs (construction site transit) and time costs (queuing). An overview of the main influences is shown in table 2.

Cost	Decisive factor	Relevant parameter
Vehicle operating costs	Speed	Construction site transit speed
Accident costs	Additional accident rate	Used traffic routing
Time costs (construction site transit)	speed	Construction site transit speed
Time costs (queuing)	Capacity	Used traffic routing
	Traffic load	Traffic increase

Table 2: Compilation of impacts on construction related road user costs

In a second step (chapter 9 and following) the collected correlations are implemented in the existing Pavement Management System VIAPMS_AUSTRIA and applied on a representative network.

This representative network consists of 1.250 lane-km and equates in its properties and condition to the Austrian motorways and expressways. This ensures that the application can be easily transferred to the whole network of Asfinag. This network has been analyzed by the conventional PMS. With the developed module the resulting user costs (condition affected user costs and construction related user costs) can be calculated for each generated strategy. These results may be compared to the results of the extended optimization.

The extension of the optimization (including user costs) offers three alternatives:

- Optimization of the ratio of user-costs savings and agency costs without additional boundary condition (Δ user costs)
- Optimization of the ratio of user-costs savings and agency costs, determining the substance-value at the end of the analysis period on the threshold value (Δ user costs; SI<4,5)
- Optimization of the ratio of user-costs savings and agency costs, determining the substance-value at the end of the analysis period on the warning value (Δ user costs; SI<3,5)

In all cases the analysis was performed with no restrictions on the budget. This enables the selection of the best alternative and causes in a larger spread of the results.

Depending on the desired level of aggregation the results can be shown for a single section or summarized for the whole network. In principle the result of the network composes of the individual sections (for some questions it is necessary to consider the individual outcome).

On the basis of the analysis of the sample network the following statements can be drawn:

- With the developed module the occurring user costs benefits for a conventional analysis (optimization only for agency costs) can be calculated. In the examined sample network a budget of € 680 million is required for executing all proposed maintenance sites. Through this financial input users can generate profits in the amount of € 1,4 billion. Furthermore a good road condition (based on the total-value, the substance-value and the comfort-value) can be assured over the entire analysis period.
- The optimization on the user-costs savings (maximum user benefits) causes a strong reduction of the number of maintenance activities and their depth. Over the analysis period the user-cost benefits can be greatly increased with this method. On the other hand a good condition of the road substance is not the main aim of this optimization, consequently the total condition deteriorates. Especially after the end of the treatment period this trend could be examined on basis of the substance value. In the sample network its amount rises to over 70% in class 5 (very poor) at the end of the analysis period.
  Therefore the optimization of user-cost benefits should not be used as single criterion.
- Alternatively a method has been developed which optimizes user-cost benefits and ensures a good condition of the road network as well. The optimization "Δ-user costs; SI<3,5" shows the best results. In this case the condition of the substance value must not be below the warning level at the end of the analysis period, which ensures that the suggested strategies do not only consist of surface treatments, but comprise also treatments which rebuilt the road substance.
  In the sample network user cost revenues of € 3,5 billion could be gained with an agency cost input of about € 450 million. The overall condition does not achieve the same level as in the conventional scenario, but it is sufficient has the advantage of user-friendly maintenance planning.

The effects of the different methods have been also analyzed at the level of the individual sections and could confirm the recommendations above.
For this level of aggregation it is possible to develop maintenance strategies and treatment list and calculate the arising agency costs and the user costs. With this tool the effects (especially on the road users) of possible time lag (e.g. through merging sections) could be estimated in advance.

At the level of the individual sections the effect of congestion and traffic jams can be quantified and visualized. In case the amount of traffic load exceeds the capacity at the construction area traffic jam arises, this results in higher time costs which quickly rise up to very large costs.

In case the maintenance concept is created for a single section (e.g. in the course of PPP projects) there are further possibilities for considering road user costs. The optimization criteria could be formed as ratio of the conventional benefit and the total costs (agency cost + road user costs). Furthermore boundary conditions have to be defined: the condition value at the end of the analysis period has to be fixed.

According to the results of the analysis undertaken in this study for a road-user friendly pavement maintenance system the use of the method „Δ-user costs; SI<3,5“ (described in chapter 9.3.1.3) was recommended. Through this it is possible to place the road user in the first row and guarantee a good condition of the total road network on the other hand as well.