



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Optimierung der Baustellen- planung an Autobahnen

**Planification des zones optimales de chantiers sur les
autoroutes**

Planning of optimum highway work zones

**ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Dipl.-Ing. (Univ.) F. Schiffmann
Prof. H. P. Lindenmann, dipl. Ing. ETH**

**Infrastructure Management Consultants (IMC GmbH)
R. Hajdin, Dr. sc. techn. ETH
Dipl.-Inform. (Univ.) M. Botzen**

**ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement (IBI)
Prof. Dr.-Ing. G. Girmscheid**

**Forschungsauftrag ASTRA 2006/007 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen (ASTRA)**

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

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

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

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

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

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

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

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



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Optimierung der Baustellen- planung an Autobahnen

**Planification des zones optimales de chantiers sur les
autoroutes**

Planning of optimum highway work zones

**ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Dipl.-Ing. (Univ.) F. Schiffmann
Prof. H. P. Lindenmann, dipl. Ing. ETH**

**Infrastructure Management Consultants (IMC GmbH)
R. Hajdin, Dr. sc. techn. ETH
Dipl.-Inform. (Univ.) M. Botzen**

**ETH Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule
Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement (IBI)
Prof. Dr.-Ing. G. Girmscheid**

**Forschungsauftrag ASTRA 2006/007 auf Antrag des Bundesamtes für
Strassen (ASTRA)**

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Prof. Hans Peter Lindenmann

Mitglieder

Frank Schiffmann

Dr. Rade Hajdin

Matthias Botzen

Prof. Dr. Gerhard Girmscheid

Begleitkommission

Präsident

Hansruedi Müller

Mitglieder

Dieter Bosshardt

Heinz Leu

Dr. Jost Lüking

Norbert Matti

Luzia Seiler

Urs Welte

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

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

Inhaltsverzeichnis

	Impressum	4
	Zusammenfassung	7
	Résumé	10
	Summary	13
1	Einleitung	15
1.1	Ausgangslage	15
1.2	Forschungsziel	16
1.3	Auftrag	17
1.4	Auftragsabgrenzung	17
1.5	Organisation und Partner	18
1.6	Aufbau des Berichts	18
1.7	Literaturrecherche	19
1.7.1	Objektbezogene Erhaltungsplanung je Teilsystem	19
1.7.2	Bedeutung des Netzbezugs	19
1.7.3	Mengen- und Wertgerüst	20
1.7.4	Optimierungsverfahren	20
2	Vorgehen und Methodik	22
2.1	Vorgehen	22
2.1.1	Erkenntnisgewinn	22
2.1.2	Modellgestaltung	22
2.1.3	Realisierbarkeitstest	23
2.1.4	Ergebniszusammenfassung	23
2.2	Grundlagen der Baustellenplanung	23
2.2.1	Ansatz der Kybernetik als Systemabgrenzung	23
2.2.2	Strassenverkehrsanlage als Sachsystem	25
2.2.3	Konkrete Systemabgrenzung des Baustellenbereichs	30
2.2.4	Definition der relevanten Attribute	33
2.2.5	Funktionen aus dem Verkehrsgeschehen	39
2.2.6	Planungsprozess des Strassenbetreibers	52
2.3	Methodik	59
2.3.1	Grundsatz	59
2.3.2	Monetäre Quantifizierung	61
2.3.3	Modellierung Strassenverkehrsanlage, Verkehrsführung und Bauablauf	67
2.3.4	Optimierung	69
2.4	Einsatz der Graphentheorie und mathematische Programmierung	70
2.4.1	Allgemeine Definition von Graphen	70
2.4.2	Graphenprobleme	70
2.4.3	Mathematische Programmierung	71
2.4.4	Komplexitätstheorie	72
2.4.5	Lineare Programme (LP) und ganzzahlige lineare Programme (ILP)	72
2.4.6	Branch-and-Bound	74
2.5	Datengrundlagen	74
2.5.1	Vorbemerkungen	74
2.5.2	Evaluation der Baustellenobjekte	74
2.5.3	A2/A3 Basel Hagnau-Augst	75
2.5.4	A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck	81
3	Ergebnisse	88
3.1	Herleitung eines Verfahrens für die Planung von optimalen Autobahnbaustellen	88
3.1.1	Zielsetzung	88
3.1.2	Problemstellung	88
3.1.3	Lösungsansatz	88
3.2	Modelldefinitionen für die Baustellenplanung	89
3.2.1	Netzwerkentwicklung	89
3.2.2	Netzwerkmodell	90

3.2.3	Kostenmodell	93
3.2.4	Optimierung mittels binärer linearer Programmierung (BLP)	102
3.2.5	Informatikwerkzeug	108
3.3	Anwendung des Verfahrens in zwei Fallbeispielen	109
3.3.1	Grundsatz	109
3.3.2	A2/A3 Basel Hagnau-Augst	110
3.3.3	A1 St. Gallen St. Fiden/Rheineck	130
3.3.4	Zusätzliche Problemstellungen	138
4	Folgerungen und Empfehlungen	140
4.1	Folgerungen	140
4.1.1	Vorbemerkungen	140
4.1.2	Netzwerkmodellierung	140
4.1.3	Kostenmodell	140
4.1.4	Optimierungsmethode	141
4.1.5	Sensitivitätsanalyse	142
4.2	Empfehlungen	143
4.2.1	Erhebung der Daten bei Baustellenprojekten	143
4.2.2	Weiterer Forschungsbedarf	144
	Abkürzungen	147
	Literaturverzeichnis	149
	Projektabschluss	155
	Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	158

Zusammenfassung

Ausgangslage

Die Erhaltung der Nationalstrassen ist ein Beitrag zur Sicherstellung der Leistungsfähigkeit und Sicherheit dieser Strasseninfrastruktur. Die Nationalstrassen verbinden Regionen, Städte und Agglomerationen miteinander und tragen dadurch erheblich zur Wertschöpfung der Gesellschaft bei. Notwendige Erhaltungsmassnahmen können gerade im Bereich von hochbelasteten Autobahnen zu Verkehrsbehinderungen führen, welche beim Strassennutzer nicht zu vernachlässigende Kosten erzeugen. Der Strassenbetreiber ist deshalb immer mehr bestrebt, diese neben den eigenen Aufwendungen möglichst gering zu halten. Eine systematische Baustellenplanung, bei der die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten minimal gehalten werden, ist dabei neben anderen ein nachhaltiges Werkzeug zur Erfüllung des grundsätzlichen Auftrags einer sicheren und wirtschaftlichen Abwicklung des Verkehrs [1]. Bisher soll dies mit drei strategischen Vorgaben des Bundesamts für Strassen (ASTRA) bei der Planung der Baustellen gewährleistet werden:

- Grössere Baustellenlängen zur Ausnutzung von Synergieeffekten
- Längere zeitliche Zwischenräume ohne Baustelle auf demselben Autobahnabschnitt
- Gesamthafte Reduktion der Baustellendauer

Durch diese Anforderungen wird angestrebt, beim Strassennutzer gesamthaft in Baustellenbereichen weniger Unfälle, geringere Reisezeitverluste und weniger Aufwand beim Fahrzeugbetrieb für den Strassennutzer zu erzeugen. Eine steigende Verkehrsbelastung auf den Nationalstrassen sowie ein hoher Schwerverkehrsanteil [vgl. 2] führen bei einem bereits bestehenden Erhaltungsbedarf zu einer Zunahme von Erhaltungstätigkeiten. Bereits jetzt werden in Ballungsräumen die Nationalstrassen im Bereich der Leistungsfähigkeitsgrenze betrieben. Dies führt zu einer steigenden Komplexität bei der Planung von Autobahnbaustellen, wodurch die manuelle Ermittlung der optimalen Erhaltungstrecke an Grenzen stösst. Es bedarf deshalb in der Praxis eines Verfahrens zur systematischen Baustellenplanung unter Berücksichtigung der Strassenbetreiber- und Strassennutzerkosten sowie der Kosten der Auswirkungen auf Dritte für eine Unterstützung der Entscheidungsfindung.

Forschungsziele

Das Ziel dieser Forschungsarbeit war die Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung von Baustellen auf einem Autobahnabschnitt. Die über einen definierten Betrachtungszeitraum zu minimierenden Gesamtkosten der Massnahmen enthalten dabei einerseits die Strassenbetreiberkosten auf Basis von Lebenszykluskostenbetrachtungen und andererseits die Strassennutzerkosten sowie die Kosten der Auswirkungen auf Dritte. Zusätzlich werden Möglichkeiten und Grenzen des entwickelten Verfahrens sowie Beurteilungen der Zweckmässigkeit zum Einsatz für die Praxis anhand von Beispielen aufgezeigt.

Ergebnisse

Ausgangspunkt für dieses Forschungsprojekt war das von Hajdin [3; 4; 5; 6] entwickelte Verfahren zur Optimierung von Autobahnbaustellen. In der vorliegenden Arbeit wurde dieses Verfahren in seiner Modelldefinition durch zusätzliche Randbedingungen und Parameter erweitert. Dadurch erfolgte eine bessere Anpassung an die in der Praxis real existierenden Problemstellungen und Randbedingungen bei der Planung von Autobahnbaustellen.

Auf der Grundlage der Graphentheorie konnte ein dreigliedriges Verfahren zur Planung von optimalen Baustellen auf Autobahnen entwickelt werden. Bei diesem Verfahren erfolgt in einem ersten Schritt eine Abgrenzung der Anlageverhältnisse für Baustellen auf Autobahnen in einem Netzwerkmodell in Raum, Zeit und Inhalt. Die festgelegte Struktur des Netzwerkmodells ermöglicht die Abbildung verschiedener temporärer Verkehrsregime im Baustellenbereich. Dies wurde durch die Modellierung der vorhandenen Mittel-

streifenüberfahrten und der Verknüpfung der durch den übergeleiteten Verkehr beeinflussten gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn realisiert. Das Netzwerkmodell berücksichtigt ausserdem einen Zeithorizont von vier Perioden.

In einem zweiten Schritt wurde ein Kostenmodell definiert, welches neben den Strassenbetreiberkosten auch die Strassennutzerkosten und die Kosten der Auswirkungen auf Dritte enthält. Dieses wurde so gestaltet, dass es als Kostengewichtung der Kanten im Netzwerkmodell fungiert. Durch die Struktur des Netzwerkmodells und die Definition des Kostenmodells liessen sich einerseits die objektbezogenen und andererseits die baustellenbezogenen Kosten abbilden und damit auch berücksichtigen.

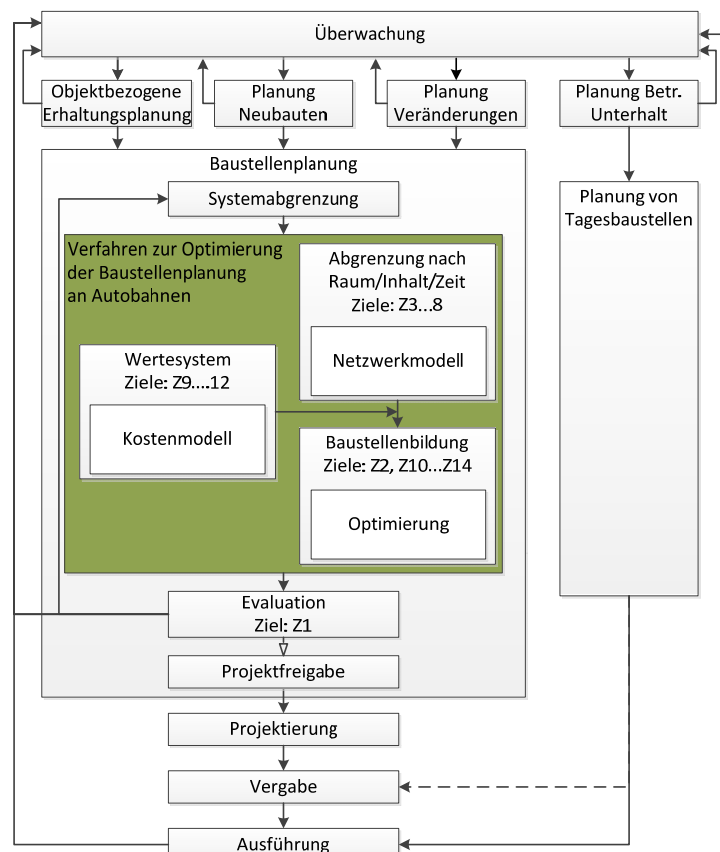


Abb. 1 Methodik zur Planung von optimalen Baustellen an Autobahnen

In einem dritten Schritt wurde ein Optimierungsverfahren gewählt, welches in dem aufgestellten Netzwerkmodell mit der Kostengewichtung des Kostenmodells die optimale Baustelle unter den gegebenen Randbedingungen findet. Mathematisch führte diese Aufgabebestellung zu einem binären linearen Programm, welches unter Anwendung der bekannten Branch-and-Bound-Methode die optimale Baustelle unter den gegebenen Randbedingungen findet.

Folgerungen und Empfehlungen

In einem Praxistest konnte die Anwendung dieses dreigliedrigen Verfahrens an zwei real existierenden Baustellenabschnitten erfolgreich getestet werden. Dabei zeigte sich die Modelldefinition mit Netzwerk- und Kostenmodell unter Berücksichtigung von Strassenbetreiber und –nutzer sowie Dritte als sehr einfach auf die gewählten Fallbeispiele anwendbar. Durch die entwickelten Erweiterungen konnten neben den Massnahmen auch verschiedene Verkehrsregime mit vorhandenen Mittelstreifenüberfahrten abgebildet werden. Damit ist es sehr flexibel und theoretisch auch auf weitere bzw. untergeordnete Netzteile erweiterbar. In wie weit sich dieses Modell auf das gesamte Strassennetz erweitern liesse, bleibt mit Blick auf die Lösung des Optimierungsproblems mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus in vertretbarer Rechenzeit noch offen.

Das Kostenmodell berücksichtigt im Ansatz alle relevanten Kosten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass in der Praxis noch Untersuchungen zu notwendigen Kostenkennwerten angestellt werden müssen (z.B. Verkehrsführungskosten), um mit diesem Modell realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Zusätzlich sind in der vorliegenden Arbeit die Nutzerkosten in Bezug zur Reisezeit statisch ermittelt worden. Dabei wurden Umfahrungen des Baustellenbereichs durch einen Teil der Strassennutzer nicht berücksichtigt. Diese finden in der Realität jedoch statt und verursachen weitere Strassennutzerkosten hinsichtlich zusätzlicher Reisezeit und Unfälle. Eine Kostenermittlung im Rahmen einer makroskopischen Verkehrsumlagerung ist anzustreben. Weiter sollten für die monetäre Abbildung im Modell zusätzliche Grundlagen des Unfallgeschehens und des Verkehrsverhaltens im Baustellenbereich und auf Umfahrungsrouten erforscht werden. Schliesslich fehlen grundlegende Ansätze zur monetären Quantifizierung der Auswirkung von Erhaltungsmaßnahmen auf Dritte.

Die gewählte Optimierungsmethode zeigte sich für die Lösung des binären linearen Programms als sehr praktikabel bei den Fallbeispielen. Der Einsatz der Branch-and-Bound-Methode für die Lösung des Optimierungsproblems war zielführend und ohne Probleme auf einem aktuell handelsüblichen PC zu bewältigen. Unter Berücksichtigung einer steigenden Komplexität kann dies nicht für weitaus grössere Netzwerkmodelle angenommen werden. Inwieweit sich diese Ansätze bei einem weitaus grösseren Netzbereich bewähren, bleibt weiter ein Forschungsthema. Wenn notwendig, muss eine Anpassung des Algorithmus für die Lösung in grossen Netzwerken erfolgen.

Résumé

Situation de départ

L'entretien des routes nationales permet de garantir la capacité et la sécurité de cette infrastructure routière. Les routes nationales raccordent régions, villes et agglomérations et contribuent ainsi considérablement à la création de valeur pour la société. Les mesures d'entretien nécessaires peuvent entraîner des entraves à la circulation justement dans le domaine d'autoroutes très chargées, engendrant des coûts non négligeables du côté des usagers de la route. L'exploitant de la route s'efforce donc toujours davantage de les maintenir le plus bas possible, parallèlement à ses propres charges. Une planification systématique des chantiers, pour laquelle le coût économique total est maintenu au minimum, est à cet effet l'un des instruments durables permettant de réaliser la mission de «garantir un trafic sûr et économique» [1]. Jusqu'à présent cela doit être assuré par trois objectifs stratégiques de l'Office Fédéral des Routes (OFROU) pour la planification des chantiers:

- des longueurs de chantiers plus grandes afin de mettre des effets de synergies à profit
- des intervalles de temps sans chantier plus longs sur le même tronçon d'autoroute
- une réduction globale de la durée des chantiers.

Ces exigences visent d'une manière globale à réduire les accidents, les pertes de temps de parcours et les frais d'exploitation des véhicules pour les usagers de la route dans les zones de chantiers. La hausse de la densité du trafic sur les routes nationales et une forte proportion de poids lourds [cf. 2] entraîne, pour un besoin d'entretien déjà existant, une augmentation des activités d'entretien. Actuellement, les routes nationales sont déjà exploitées à la limite de leurs capacités dans les agglomérations, ce qui rend la planification des chantiers sur les autoroutes plus complexe. Il en résulte que la détermination manuelle du tronçon d'entretien idéal se heurte à des limites. Dans la pratique, il faut donc établir une procédure pour la planification systématique des chantiers en tenant compte les coûts des exploitants et ceux des usagers de la route et les coûts des répercussions sur des tiers afin d'appuyer la prise de décision.

Objectifs de la recherche

L'objectif de ce travail de recherche était de développer une procédure pour optimiser les chantiers sur un tronçon d'autoroute. Pour ce faire, l'ensemble des coûts des mesures à réduire pour une période définie comportent, d'une part, les coûts des exploitants de la route sur la base de considérations relatives aux coûts du cycle de vie et, d'autre part, les coûts des usagers de la route ainsi que ceux des répercussions sur des tiers. En outre, les possibilités et les limites de la procédure développée ainsi que des évaluations de la pertinence de sa mise en œuvre pour la pratique sont démontrées à l'aide d'exemples.

Résultats

Le point de départ de ce projet de recherche était la procédure pour optimiser les chantiers d'autoroute élaborée par Hajdin [3; 4; 5; 6]. Dans le présent travail, cette procédure a été élargie dans sa définition de modèle en introduisant davantage de contraintes et de paramètres. Il en résulte une meilleure adaptation aux problèmes et conditions-cadres relatives à la planification des chantiers d'autoroutes existant réellement dans la pratique.

Sur la base de la théorie des graphes, une procédure en trois phases pour la planification des zones optimales de chantiers sur les autoroutes a pu être développée. Dans le cadre de cette procédure et dans une première étape, les conditions d'infrastructure pour les chantiers sur autoroutes dans un modèle de réseau quant à l'espace, au temps et au contenu sont délimitées. La structure définie du modèle de réseau a permis de représenter plusieurs régimes de circulation temporaires dans la zone de chantiers. La modélisation des passages du terre-plein central existant et le raccord de la chaussée de l'autre

sens de circulation influencée par le trafic transféré a permis cette réalisation. Par ailleurs, le modèle du réseau a pris en compte une échéance de quatre périodes.

Dans une deuxième phase, un modèle de coûts a été défini, présentant, parallèlement aux coûts des exploitants de la route, les coûts des usagers de la route ainsi que les coûts des répercussions sur des tiers. Ce modèle a été établi de manière à ce qu'il interviene en tant que pondération en fonction des coûts des bords dans le modèle du réseau. La structure du modèle de réseau et la définition du modèle de coûts ont permis de représenter d'une part les coûts relatifs à l'objet et, d'autre part, ceux liés aux chantiers et ainsi d'en tenir également compte.

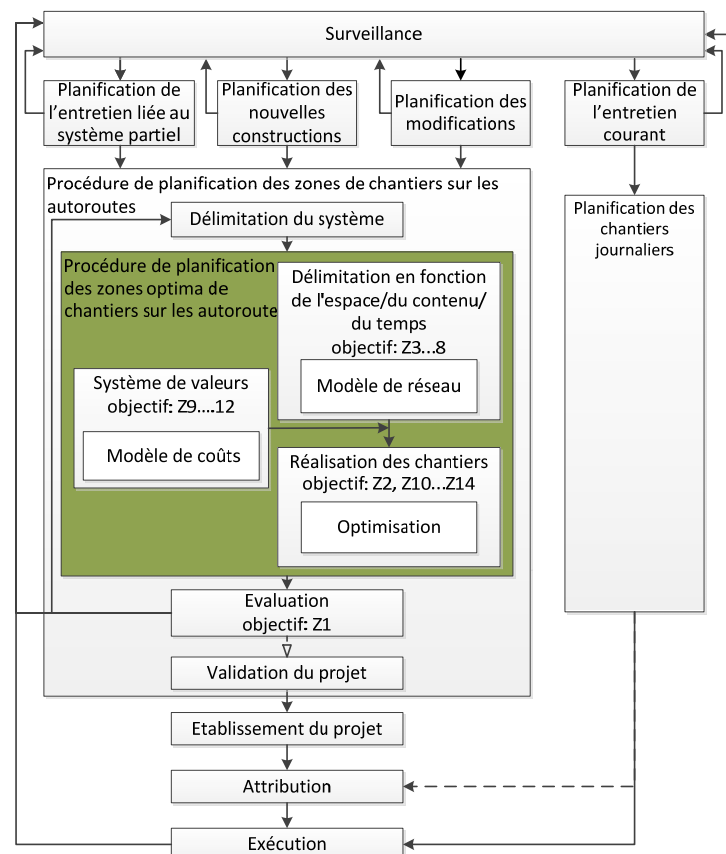


Fig. 2 Méthodologie pour la planification des zones optimales de chantiers sur les autoroutes

Dans une troisième phase, l'on a choisi une procédure d'optimisation qui, dans le modèle de réseau établi avec la pondération en fonction des coûts du modèle de coûts trouve la zone optimale de chantiers dans les conditions-cadres données. Dans ce contexte, la programmation mathématique d'un programme binaire et linéaire a été effectuée en utilisant la méthode connue branch and bound.

Conclusions et recommandations

Lors d'un test pratique, l'utilisation de cette procédure en trois phases a pu être testée avec succès sur deux tronçons de chantiers qui existent réellement. La définition du modèle avec le modèle de réseau et de celui des coûts, prenant en compte les exploitants et les usagers de la route ainsi que les tiers, s'est avérée très facile à appliquer sur les exemples de cas choisis. Grâce aux extensions développées et parallèlement aux mesures, des régimes de circulation avec les passages du terre-plein central existants ont également pu être représentés. Cela rend le modèle très flexible et permet son application à une plus grande partie du réseau routier ou les réseaux routiers subordonnés. L'on ne sait cependant pas encore dans quelle mesure ce modèle pourrait être appliqué sur tout le réseau routier en vue de résoudre le problème d'optimisation avec l'aide d'un

algorithme approprié dans un temps de calcul acceptable.

Dans l'approche, le modèle de coûts tient compte de tous les coûts pertinents. Il apparaît toutefois que des analyses des valeurs référentielles pour les coûts nécessaires doivent encore être menées (p. ex. coûts de guidage du trafic) dans la pratique, afin d'obtenir des résultats proches de la réalité avec ce modèle. En outre, dans le présent travail, les coûts des usagers ont été déterminés statiquement quant au temps de parcours et les contournements de la zone des chantiers par une partie des usagers de la route n'ont pas été pris en compte. Or, ils existent en réalité et engendrent davantage de coûts pour les usagers de la route en raison des temps de parcours et des accidents supplémentaires. Il est donc souhaitable de déterminer les coûts dans le cadre d'un transfert macroscopique du trafic de la route. Par ailleurs, des informations de base complémentaires relatives à l'accidentalité et au comportement en matière de trafic dans la zone des chantiers et sur les itinéraires de contournement doivent être obtenues pour la représentation des coûts dans le modèle. Enfin, des approches fondamentales pour quantifier l'impact financier des répercussions de mesures d'entretien sur des tiers font défaut.

La méthode d'optimisation choisie s'est avérée très applicable afin de résoudre le programme linéaire binaire pour des exemples de test. L'utilisation de la méthode branch and bound pour résoudre le problème d'optimisation a été concluante et peut être effectuée sur un PC actuel couramment commercialisé. La complexité augmentant, il ne faut pas s'attendre à des résultats identiques pour des modèles de réseau beaucoup plus grands. La question de savoir dans quelle mesure ces approches font leurs preuves pour un domaine de réseau plus vaste demeure un sujet de recherche. Le cas échéant, il faut adapter l'algorithme pour résoudre le problème d'optimisation dans les grands réseaux routiers.

Summary

Introduction

The main purpose of highway maintenance is to ensure safe and convenient movement of people and goods on highway networks. The functioning, well maintained highway network spans urban areas and is instrumental in creation of added value in Switzerland. However, maintenance actions can cause traffic congestions with considerable negative impact on road users and thus inducing societal costs. Recognizing this issue a highway agency strives to minimize both agency and society costs by methodic planning of highway work zones. To this aim Swiss Federal Roads Office (FEDRO) introduced following requirements for highway maintenance

- major work zones encompassing several interventions targeting economies-of-scale savings
- increasing time period between maintenance actions at the same highway section
- overall reduction of work zone duration

With these requirements the highway agency seeks to minimize number of accidents, reduce travel time losses and operational costs to road user. The increasing traffic and the large fraction of heavy goods vehicles on the Swiss highway network leads to increasing maintenance needs. In dense urban areas the traffic is already reaching the capacity of highway system. Planning of highway work zones under these circumstances is an increasingly complex task that cannot be solved efficiently well by intuition and common sense. The decision makers need therefor a supporting tool for planning optimum highway work zones, which minimizes overall costs of road owner, road user and the environmental impact.

Objective

The objective of this research is the development of a method to determine optimal highway work zones for a road segment. The optimal work zone is understood to minimize overall costs within a time period, i. e. agency costs based on live-cycle cost analysis and the costs due to detrimental impact of maintenance activities on road users and environment. Furthermore the potential and limits of the proposed method are identified by applying it to two real world examples on the Swiss highway network.

Results

This research project enhances Hajdin's method for planning of optimum highway work zones [3; 4; 5; 6] by introducing further constrains and parameter and adapting it to cope with complex real world problems in highway maintenance management. The result is a three step method for planning optimum highway work zones based on graph theory.

First step defines the network model as a directed graph based on the topology of the highway network and the time and scope of maintenance actions. The structure of this graph enables the consideration of different traffic regimes for work zone evaluation. For this purpose the existing median openings of the divided highway are considered and the influence of lanes crossover to the opposite traffic direction is modeled. Additionally the planning horizon was extended to two years divided in four time periods.

The second step includes the development of the cost model comprising agency costs, user costs and costs due to environmental impact. These costs are assigned to edges and nodes of the graph representing highway network. By the virtue of network model and cost model both object oriented and work zone oriented costs can be adequately considered.

In the third step the optimum work zones are determined, which corresponds to the minimum cost path in the directed graph under given constraints. For this purpose a binary

linear program is solved using the traditional branch-and-bound-method.

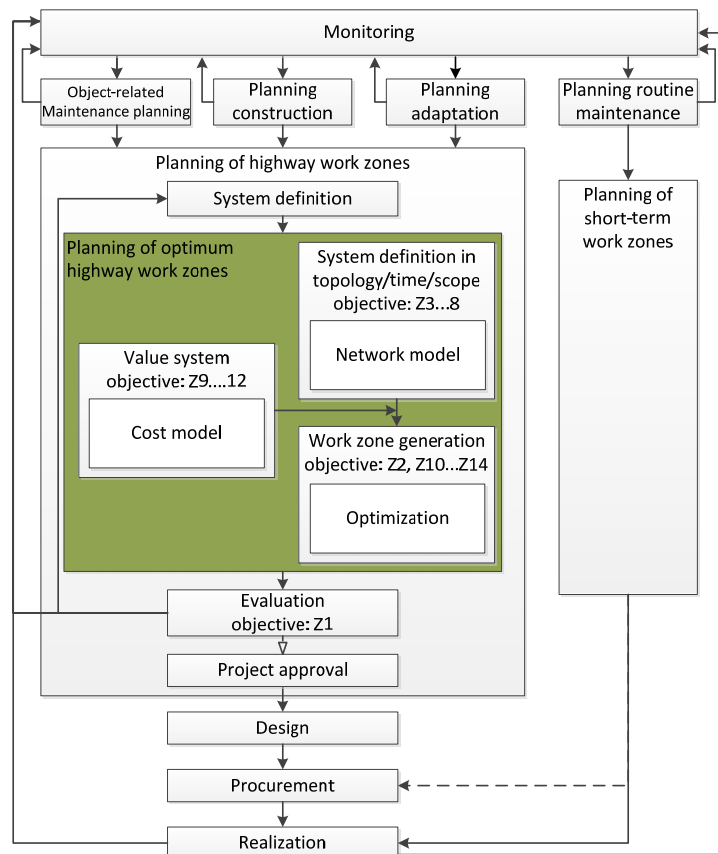


Fig. 3 Method for planning optimum highway work zones

Conclusion and recommendation

This three step method for planning optimum highway work zones could be successfully tested on two real world work zones. The model containing network definition as a directed graph and cost model considering agency, road user and environment was easily adaptable to the test work zones. The proposed model enables in addition to different intervention types the consideration of traffic regime in the work zone including crossovers through existing median openings. This makes the model very flexible and enables its application to larger parts of the highway network or secondary road networks. The application of this model to the entire highway networks depends on the computational time required to perform optimization.

The cost model includes all relevant costs i. e. the ones related the agency, road user and environment. The practical application of the proposed method is somewhat hampered by the uncertain unit costs (e. g. setup costs for traffic regime). Further research on this part is necessary. In present research travel times are evaluated statistically ignoring available bypasses. In practice this will certainly occur and therefor the macroscopic traffic assignment should be used instead. Further research should be focused on traffic behavior and accident occurrence within the work zone and on the bypass routes for user cost calculation. Finally the firm basis for the monetary quantification of environmental impact due to maintenance actions is still missing.

The chosen optimization technique was sufficient to solve the binary linear program for test examples. The computational effort using branch and bound algorithm to solve the optimization problem on the ordinary PC is low. This cannot be expected for significantly larger networks. Further research should investigate this issue and, if necessary develop a refined algorithm fit to treat large highway networks.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Autobahnen sind Strassenverkehrsanlagen für den Personen- und Güterverkehr und verbinden Regionen, Städte und Agglomerationen miteinander. Sie tragen durch ihre Verbindungsfunktion massgebend zum volkswirtschaftlichen Nutzen bei. Dieser Nutzen muss durch eine gezielte Erhaltung nachhaltig gewährleistet werden.

Für eine leistungsfähige und sichere Nutzung der Autobahnen ist ein entsprechendes Zustandsniveau der Anlage zu gewährleisten. Wird dieses Niveau unterschritten, können Beeinträchtigungen bis hin zur Verhinderung der Nutzung entstehen. Zur Aufrechterhaltung von Betrieb und Sicherheit auf Autobahnen werden Erhaltungsarbeiten durchgeführt. Diese führen in der Regel ebenfalls zu temporären Beeinträchtigungen des Verkehrs. Dadurch entsteht ein Zielkonflikt, welcher durch eine stetig steigende Verkehrsbelastung auf den Autobahnen verschärft wird.

Vorerst erfolgt hier eine erste Begriffsdefinition gemäss Abbildung 1.4. Brückenbauwerke und Fahrbahnstrecken sind Objekte, an welchen zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit und der Betriebsbereitschaft zeitlich begrenzt Erhaltungsmaßnahmen geplant und ausgeführt werden. Ein Erhaltungsprojekt wird durch das Zusammenfassen mehrerer Erhaltungsmaßnahmen an unterschiedlichen Objekten zur gleichzeitigen Durchführung auf einer oder beiden Richtungsfahrbahnen gebildet. Eine Erhaltungsstrecke stellt die räumliche Ausdehnung eines Erhaltungsprojekts dar. Die Baustelle umfasst die während der Erhaltungsmaßnahmen durch temporär veränderte Verkehrsführungen in Anspruch genommene Fahrbahn. Diese kann je nach Umfang nur eine Richtungsfahrbahn betreffen, wenn auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn keine Erhaltungsmaßnahmen realisiert und keine temporären Änderungen der Verkehrsführung vorgenommen werden.

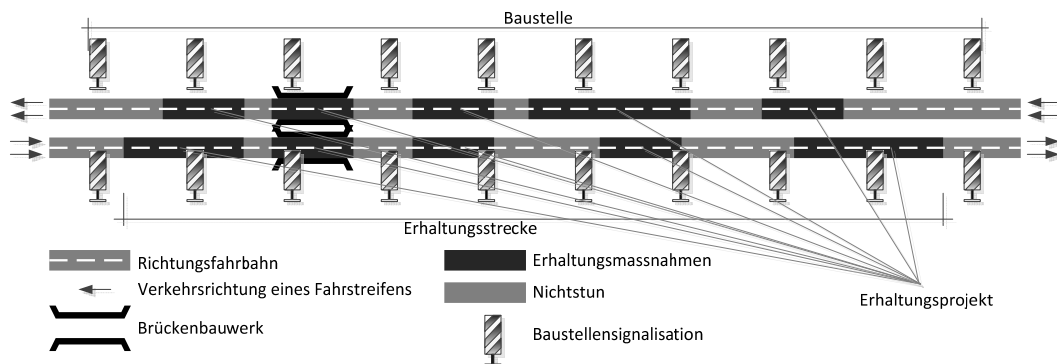


Abb. 1.4 Grundlagen der Begriffssystematik

Bei der Planung von Erhaltungsarbeiten auf Autobahnen ist der Strassenbetreiber bestrebt, innerhalb einer Baustelle (vgl. Kapitel 2.2.3) die notwendigen Erhaltungsmaßnahmen an Fahrbahnen, Kunstbauten und Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen zu einem gemeinsamen Zeitpunkt und mit minimaler Dauer gleichzeitig auszuführen. Die Bauarbeiten müssen fast ausschliesslich unter Verkehr durchgeführt werden, weil in der Regel keine leistungsfähigen Umfahrungsmöglichkeiten vorhanden sind und bei grösseren Verkehrsbelastungen ein Fahrstreifenabbau [7] zu schwerwiegenden volkswirtschaftlichen Nachteilen führen kann. Bei einer starken Verringerung der Leistungsfähigkeit eines Autobahnabschnitts mit grosser Verkehrsbelastung können sich die Verkehrsbehinderungen auf andere Abschnitte der Autobahn und weiterführend auf die untergeordneten Strassennetze übertragen. Ein solches Szenario mit permanenter Überlastung durch eine Baustelle führt zu grossen Defiziten der Verkehrssicherheit und kann ebenfalls wirtschaftlich negative Folgen für eine Region haben. Deshalb ist eine systematische Baustellenplanung notwendig. Dabei wird das Ziel verfolgt, die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten zu minimieren. Mit drei strategischen Vorgaben bei der Planung der Baustellen wird dies angestrebt:

- Grössere Baustellenlängen zur Ausnutzung von Synergieeffekten
- Längere zeitliche Zwischenräume ohne Baustelle auf demselben Autobahnabschnitt
- Gesamthafte Reduktion der Baustellendauer

Mit diesen Anforderungen wird der Strassennutzer bei der Planung mit berücksichtigt. Das Ziel ist dabei, gesamthafte in Baustellenbereichen weniger Unfälle, geringere Reisezeitverluste und weniger Aufwand beim Fahrzeugbetrieb für den Strassennutzer zu erzeugen.

Die Baustellenplanung an Autobahnen unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen führt in der Regel zu mehreren Ausführungsvarianten. In diesen werden jeweils unterschiedliche Erhaltungsmassnahmen an mehreren aufeinander folgenden Objekten verschiedener Teilsysteme zusammengefasst (vgl. Abb. 1.4). Die Wahl der durchzuführenden Varianten erfolgte bisher nach der Bewertung und dem Vergleich der verschiedenen Varianten anhand von Ingenieurserfahrung. Die Bildung der Varianten von Baustellen für die Entscheidungsfindung wurde bisher vorwiegend auf einen zweckmässigen Ablauf der Bauarbeiten und einer zumeist nur qualitativen Beurteilung der Verkehrsbehinderungen und deren Auswirkungen ausgerichtet.

Mit zunehmenden Verkehrsbelastungen und dem damit ebenfalls wachsenden Schwerverkehr wird in Zukunft der bereits bestehende Erhaltungsbedarf zur Gewährleistung einer sicheren Nutzung der Autobahnen noch weiter ansteigen. Gleichzeitig werden Autobahnen schon heute in verschiedenen schweizerischen Ballungsräumen im Bereich der Leistungsfähigkeitsgrenze betrieben. Eine Berücksichtigung der Auswirkungen auf die gesamte Region, das heisst benachbarte Autobahnabschnitte und untergeordnete Netze, ist nicht mehr zu vernachlässigen. Teilweise sind dadurch zusätzlich Ausbauprojekte ebenfalls mit in die Planung einzubeziehen. Bei grösserer Komplexität der Anlage- und Verkehrssituation steigen die Anforderungen an die Baustellenplanung stark an. Die manuelle Ermittlung der optimalen Erhaltungsstrecke und dazugehöriger Baustelle aufgrund von Ingenieurserfahrung stösst deshalb insbesondere bei komplexen Situationen in Ballungsgebieten mit grossen Verkehrsbelastungen an Grenzen. Änderungen der Verkehrsführung oder eine Verlängerung der Baustelle mit relativ kleinen Kostenschwankungen für den Strassenbetreiber können dann grosse wirtschaftliche oder sicherheitsrelevante Auswirkungen auf den Strassennutzer und damit auf die volkswirtschaftlichen Gesamtkosten haben. Zur Gewährleistung einer wirtschaftlich optimalen Ermittlung von Baustellen bedarf es in der Praxis einem zusätzlichen Verfahren bzw. Planungswerkzeug zur Unterstützung der Entscheidungsfindung.

1.2 Forschungsziel

Grundsätzlich wurden im Vorfeld die folgenden Projektziele definiert:

- Untersuchung und Evaluation von Verfahren und Methoden zur koordinierten Baustellenplanung von Erhaltungstätigkeiten an Fahrbahnen, Kunstbauten und Technischen Ausrüstungen zur Optimierung aller Interventionen über einen längeren Betrachtungszeitraum (wirtschaftlichste Lösung ohne/mit Budgetvorgabe durch Lösung von binären Systemen).
- Aufzeigen der Möglichkeiten und Grenzen sowie Beurteilung der Zweckmässigkeit des Einsatzes geeigneter Verfahren für die Praxis anhand von Beispielen.

Die Gesamtkosten der Massnahmen sollten sowohl die Strassenbetreiberkosten auf Basis von Lebenszyklusbetrachtungen der einzelnen Objekte von Fahrbahnen, Kunstbauten sowie Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen sowie Strassennutzerkosten als auch die Kosten der Auswirkung auf Dritte enthalten.

Mit der Genehmigung des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde die Auflage verbunden, Erfahrungen aus bereits abgeschlossenen Nationalstrassenbaustellen zu berücksichtigen. Deshalb wurde festgelegt, mindestens zwei ausgeführte Grossbaustellen an Nationalstrassen in die Untersuchungen mit einzubeziehen.

Konkret sollte dabei die tatsächlich eingerichtete Baustelle zur Durchführung von Erhaltungsmassnahmen an unterschiedlichen Objekten der Strassenverkehrsanlage mit einer aufgrund des hier vorgeschlagenen Verfahrens ermittelten, optimalen Baustelle verglichen werden. Dabei sollten die Vorteile der optimalen Variante hervorgehoben und bewertet werden.

Aufgrund dieser Ziele und der erläuterten Ausgangslage sowie der Auflagen der Forschungskommission FOKO wurden für die vorliegende Forschungsarbeit folgende Zielsetzungen konkretisiert:

- Darstellung des Prozesses der Baustellenplanung zur integralen Erhaltung an Fahrbahnen, Kunstbauten und Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen der Autobahnen
- Entwicklung eines monetären Verfahrens zur Optimierung von Baustellen auf einem Autobahnabschnitt über einen definierten Betrachtungszeitraum
- Aufzeigen der Möglichkeiten und Grenzen des entwickelten Verfahrens sowie Beurteilung der Zweckmässigkeit des Einsatzes für die Praxis anhand von Beispielen.

1.3 Auftrag

Mit Schreiben vom 1. Juni 2007 erteilte der Direktor des Bundesamtes für Strassen ASTRA dem Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT, ETH Zürich) als federführende Forschungsstelle zusammen mit der Infrastructure Management Consultants (IMC GmbH) und dem Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement (IBI, ETH Zürich) den Auftrag zur Durchführung des Forschungsvorhabens gemäss Forschungsgesuch (Formular 2.1 und 2.2) und den von der Forschungskommission FOKO geforderten Auflagen (vgl. Kapitel 1.2).

1.4 Auftragsabgrenzung

Während zur Bestimmung der objektbezogenen, wirtschaftlich optimalen Erhaltungsmassnahmen für Fahrbahnen, Kunstbauten und Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen (Teilsysteme) zweckmässige Verfahren für die Praxis grössten Teils zur Verfügung stehen [6; 8; 9], besteht in Bezug auf ein praxistaugliches, teilsystemübergreifendes Verfahren zur Bestimmung von optimalen Erhaltungspaketen und dazugehörigen Baustellen nach wie vor Forschungsbedarf. In diesem Planungsschritt werden auf Gesamtsystemebene die unter Lebenszyklusbetrachtung notwendigen Erhaltungsmassnahmen an den Objekten der Fahrbahnstrecken, an Kunstbauten und an Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen eines wirtschaftlichen optimalen Erhaltungspakets ermittelt. Dies geschieht mit einem volkswirtschaftlichen Ansatz des ökonomischen Minimalprinzips, das heisst die Minimierung der Gesamtkosten mit Strassenbetreiber- und Strassennutzerkosten sowie Kosten der Auswirkungen auf Dritte.

Der vorliegende Forschungsauftrag befasst sich mit dem Ablauf der Baustellenplanung in einem geeigneten, begrenzten Realisierungszeitfenster. Die objektbezogenen Erhaltungsmassnahmen werden dabei in einen netzbezogenen Zusammenhang gebracht. Sowohl die bei der Realisierung der Baustellen entstehenden Kosten des Betreibers (Einrichtung, Baumassnahmen, Verkehrsführungsmassnahmen etc.) als auch die Auswirkungen auf den Strassennutzer (Reisezeit, Unfallgeschehen) und Dritte sind monetär zu quantifizieren. Damit lassen sich in jedem Fall auch die durch die Optimierung erzielten Verbesserungen bzw. Veränderungen monetär beziffern und für Vergleiche heranziehen.

Die vorliegende Forschungsarbeit musste sich infolge des hohen Aufwandes auf zwei konkrete ausgeführte Autobahnbaustellen und die Bestimmung der wirtschaftlich optimalen Baustelle mit den entsprechenden Vergleichen beschränken. Dies war aufgrund des immensen Aufwandes für die Datenerhebung, insbesondere der verschiedenen Kosten nach Normenpositionskatalog (NPK), unumgänglich.

Weiter konnten aufgrund des Nichtvorhandenseins keine Daten der Zustandsentwicklung und Daten zu Folgekosten von Massnahmen aus einer langfristigen Erhaltungsplanung bezogen werden. Im Bereich der Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen standen eben-

falls keine Daten zur Verfügung. Es konnten auch keine Kostendaten zur Verkehrsführung erhoben werden. Immerhin gelang es, wie verlangt, eine einfache und eine komplexe Baustelle in die Untersuchungen mit einzubeziehen.

Im Modell wurden alle notwendigen Objekte integriert, so dass zu einem späteren Zeitpunkt auch die Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen durch Kostenkennwerte berücksichtigt werden können. Bei der Verkehrsführung musste auf vorhandene Literatur zurückgegriffen werden.

1.5 Organisation und Partner

Das Forschungsprojekt baut auf einer Publikation von Hajdin [4] auf und wurde interdisziplinär vom Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), der Firma Infrastructure Management Consultants (IMC) GmbH und dem Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement (IBI) durchgeführt.

Die Gesamtleitung des Projektteams und die wissenschaftliche Betreuung durch das IVT oblag Herrn Prof. Hans Peter Lindenmann. Die wissenschaftliche Konzeption, Modellierung und Betreuung erfolgte durch Dr. Rade Hajdin der Firma IMC. Für die Projektdurchführung waren auf Seiten des IVT Herr Frank Schiffmann und auf der Seite der Firma IMC Herr Matthias Botzen zuständig. Der vorliegende Forschungsbericht wurde durch Frank Schiffmann verfasst. Zusätzlich begleitet wurde dieses Forschungsprojekt durch Prof. Dr. Gerhard Girmscheid des IBI.

1.6 Aufbau des Berichts

Dieses Kapitel 1 dient der Auftragsabgrenzung und Zieldarstellung sowie Darstellung der Organisation dieses Forschungsprojekts. Es zeigt aktuelle Grundlagen und die Notwendigkeit einer Forschung im Bereich der Baustellenplanung auf.

Im Kapitel 2 erfolgt einleitend eine Darstellung des Vorgehens im Forschungsauftrag. Anschließend werden notwendige systemtheoretische und verkehrstechnische Grundlagen in Bezug auf die Strassenverkehranlage aufgezeigt und der Handlungsprozess der Baustellenplanung an Autobahnen konkretisiert. Darauf folgend wird eine dreistufige Methodik der Planung von optimalen Baustellen an Autobahnen entwickelt. Dazu werden anschliessend die Grundlagen dargestellt aus

- der monetärer Quantifizierung eines Wertesystems für ein Kostenmodell,
- der Abgrenzung von Autobahnen nach Raum, Inhalt und Zeit in einem Netzwerkmodell sowie
- dem mathematischen Hintergrund des Optimierungsverfahrens als Basis für die Baustellenbildung.

Die Ergebnisdarstellung in Kapitel 3 zeigt im Detail das dreistufige Verfahren zur Bildung von optimalen Baustellen an Autobahnen. Dabei wird konkret die Entwicklung des Netzwerkmodells für Autobahnen aufgezeigt und anschliessend das darauf abgestimmte Kostenmodell auf der Grundlage der Kosten-Nutzen-Analyse im Strassenverkehr gebildet. Für die Optimierung erfolgt unter der Berücksichtigung von Netzwerk- und Kostenmodell die Entwicklung eines binären linearen Programms. Abschliessend wird das dreistufige Verfahren zur Bildung von optimalen Baustellen an Autobahnen einem Praxistest an zwei Fallbeispielen unterzogen.

In Kapitel 4 werden Folgerungen aus dem Praxistest gezogen und abschliessend Empfehlungen hinsichtlich der Erarbeitung noch fehlender Grundlagen für die Anwendung des Verfahrens aufgezeigt.

1.7 Literaturrecherche

1.7.1 Objektbezogene Erhaltungsplanung je Teilsystem

Grundlage für die Baustellenplanung sind die in Abhängigkeit des Objektzustands ermittelten Vorschläge für technisch mögliche Erhaltungsmassnahmen aus der objektbezogenen Erhaltungsplanung der einzelnen Teilsysteme [10]. Die Teilsysteme umfassen jeweils Objekte der Strassenverkehrsanlage mit ähnlichen für Bau, Betrieb und Erhaltung relevanten Eigenschaften. Dies sind bei Autobahnen vorrangig Fahrbahnstrecken, Kunstbauten und Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen. Je nach Komplexität der Strassenverkehrsanlage, wie z.B. in Siedlungsgebieten, kann diese Einteilung durch weitere Objekttypen in bestehenden oder zusätzlichen Teilsystemen ergänzt sein. Zur Unterstützung der objektbezogenen Erhaltungsplanung auf der Grundlage des Zustands und seiner Entwicklung existieren Managementsysteme [z.B. 9; 11; 12] mit verschiedenen Verfallsmodellen. Dies sind z.B. zeitliche Verlaufskurven für Fahrbahnstrecken [13], diskrete stochastische Prozesse für Bauteile von Kunstbauten [14] oder Ausfallwahrscheinlichkeiten einer Funktionseinheit bei Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen [12]. Diese Managementsysteme ermöglichen eine Ermittlung verschiedener Szenarien von Erhaltungsmassnahmen an den einzelnen Objekten. Diese Szenarien werden durch die Optimierung mit wechselnden Randbedingungen bzw. Zielfunktionen gebildet. Diese Szenarien von Erhaltungsmassnahmen an den Objekten sind durch Art, Ort und Zeitpunkt sowie innerhalb des Betrachtungszeitraums folgende Massnahmen eindeutig beschrieben.

Die Optimierung im Bereich der Teilsysteme beruht dabei auf einer objektbezogenen Sicht. Die einzelnen Objekte, wie z.B. eine Fahrbahnstrecke [vgl. 15], ein Brückenbauwerk [vgl. 9] oder eine Anlage [12], werden dabei separat betrachtet ohne die benachbarten Objekte mit einzubeziehen. Es werden die verschiedenen definierten Erhaltungsmassnahmen in Art und Zeitpunkt an einem Objekt in Abhängigkeit von festgelegten Zustandsgrenzen oder akzeptierten Risiken unterschiedlich miteinander kombiniert. Ziel ist es, eine möglichst optimale Folge von Massnahmen über den Betrachtungszeitraum unter der Berücksichtigung definierter Randbedingungen für jedes Objekt zu finden. Dabei werden verschiedene Szenarien, z.B. optimales, zweitbestes oder minimales Szenario, gebildet, welche zu unterschiedlichen Folgen von Erhaltungsmassnahmen führen. Diese Szenarien, d.h. Erhaltungsmassnahme mit Folgemassnahmen eines jeden Objekts im betrachteten Strassennetz bzw. Strassennetzteils, werden bei der Ermittlung der optimalen Baustelle berücksichtigt und in einen netzbezogenen Zusammenhang gebracht.

1.7.2 Bedeutung des Netzbezugs

Die Systemtheorie [16] zeigt theoretisch auf, warum eine reine Objektbetrachtung (vgl. Kapitel 1.7.1) zu einer unvollständigen Systemdefinition, bezogen auf die vorliegende Forschungsarbeit die Strassenverkehrsanlage, führt. Dadurch können nur objektbezogene Auswirkungen berücksichtigt werden. Die Beziehungen zwischen den Objekten und die dadurch entstehenden Auswirkungen eines Objekts, z.B. eine Brücke, auf die andere Objekte, z.B. einen gesamten Autobahnabschnitt, werden dadurch völlig vernachlässigt.

Die Bedeutung dieser Beziehungen wird deutlich bei der Simulation von Extremfällen z.B. einer Naturkatastrophe. Hier kann unter Umständen ein Objekt, d.h. Fahrbahnstrecke, Brücke oder Tunnel, seine ursprüngliche Funktion als Verkehrsträger nicht mehr erfüllen. Bei einer Objektbetrachtung werden hier nur die Auswirkungen innerhalb des Objekts auf z.B. Strassenbetreiber (u.a. Baumassnahme) und eventuell Strassennutzer (u.a. Geschwindigkeitsbegrenzung innerhalb der Fahrbahnstrecke) berücksichtigt. Forschungsarbeiten zur Anfälligkeit der Strasseninfrastruktur [z.B. 17; 18; 19; 20] zeigen jedoch auf, dass die Auswirkungen bei einer Unterbrechung infolge des Versagens eines Strasseninfrastrukturobjekts auf den Strassennutzer bei einer Berücksichtigung des gesamten Strassennetzes oder Teilen davon je nach Lage im Netz enorm sein können.

Daraus ist zu schliessen, dass eine Objektbetrachtung nicht zum Ziel führt. Die Baustellenplanung auf Gesamtsystemebene sollte deshalb im Grundsatz netzbezogen durchgeführt werden.

1.7.3 Mengen- und Wertgerüst

Grundsätzlich müssen für eine Optimierung die durch verschiedene Massnahmen oder Verfallserscheinungen ausgelösten Veränderungen quantifiziert werden. Dies geschieht mit einem Mengengerüst von physikalischen Grössen, z.B. DTV oder Anzahl Unfälle. Dieses Mengengerüst wird dann einerseits nicht-monetär oder monetär bewertet (Wertgerüst) [vgl. 21].

Im Bereich der objektbezogenen Optimierung, und somit bei den einzelnen Teilsystemen der Strassenverkehrsanlage, existieren meist monetäre Wertgerüste, wie in der Kosten-Nutzen-Analyse angewendet [vgl. 21]. Bei der Nutzenanalyse wird neben dem monetären Wert zusätzlich die Eintretenswahrscheinlichkeit berücksichtigt [22]. Zum Teil werden zusätzlich nicht-monetäre Werte ergänzt analog der Kosten-Wirksamkeits-Analyse [z.B. 23]. Es existieren jedoch auch nicht-monetäre Wertgerüste, wie bei der Verwendung der Nutzwertanalyse [24] oder der multiattributiven Nutzenbewertung [z.B. 25].

Bei der Baustellenplanung erfolgt unter der netzweiten Betrachtung eine Zusammenführung aller berücksichtigten Teilsysteme der Strassenverkehrsanlage. Dabei werden Objekte mit unterschiedlichen Eigenschaften, wie Fahrbahnstrecken, Kunstbauten oder Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, miteinander gekoppelt. Nicht immer lassen sich die unterschiedlichen Objekte in ihrem Verbund als Strassennetz einfach und einheitlich bewerten. Im Hinblick auf die ganzheitliche, netzbezogene Sichtweise der Strasseninfrastruktur fällt auf, dass nicht-monetäre Verfahren sehr weit verbreitet sind [z.B. 26; 27; 28; 29; 30; 31; 32]. Der Nachteil dieser Verfahren besteht darin, dass zu Beginn eine Priorisierung durch eine Definition von Gewichtungsfaktoren erfolgen muss. Diese Definition erfolgt meist aufgrund einer subjektiven Bewertung, was zur Verfälschung der tatsächlich vorhandenen gegenseitigen Beziehungen führt. Dies erschwert zusätzlich eine objektive Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Objekttypen.

Mit den vorhandenen Grundlagen des Mengen- und Wertegerüst der Kosten-Nutzen-Analyse [z.B. 21; 33; 34; 35] existiert jedoch ein akzeptiertes monetäres Wertegerüst. Durch diese rein monetäre Bewertung wird eine objektive Vergleichbarkeit zwischen den Objekttypen gewährleistet und die nachvollziehbare Einbindung der Beziehungen zwischen den einzelnen Objekten in die Systemdefinition möglich. Dieses monetäre Wertgerüst ist im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit angewendet worden.

1.7.4 Optimierungsverfahren

Den Entscheidungsprozess in Bezug auf ein zu projektierendes und auszuführendes Erhaltungsprojekt können Optimierungsverfahren durch die Bereitstellung von unterschiedlichen Lösungsvarianten in Abhängigkeit der Zielfunktion, Randbedingungen und gewähltem Betrachtungszeitraum wirkungsvoll unterstützen. Für das Optimierungsverfahren muss grundsätzlich einerseits ein Modell, welches die netzbezogene Sichtweise (vgl. 1.7.2) sowie das Mengen- und Wertgerüst (vgl. Kapitel 1.7.3) abbildet, definiert werden. Andererseits muss eine Zielfunktion gebildet und ein geeignetes Lösungsverfahren für eine Minimierung oder Maximierung der Zielfunktion unter Verwendung des gewählten Modells angewendet werden.

Die Lösungsverfahren gliedern sich grundsätzlich in zwei Gruppen. Lösungsverfahren, welche ein globales Optimum finden, das heisst es existiert sicher kein anderes Ergebnis der Zielfunktion, welches im gesamten Lösungsraum kleiner (Minimierung der Zielfunktion) bzw. grösser (Maximierung der Zielfunktion) ist. Oder es sind Lösungsverfahren, welche nicht unbedingt das Optimum aber ein Ergebnis nahe am globalen Optimum finden, sogenannte Heuristiken. Die in den Managementsystemen oft verwendeten Algorithmen zur Lösung des Optimierungsproblems sind heuristische Verfahren, wie die inkrementelle Nutzen-Kosten-Methode [36]. Bei den heuristischen Verfahren kann nicht genau bestimmt werden, ob die Lösung das Optimum ist. Sehr oft liegen diese zumindest in der Nähe und differieren unwesentlich. Bei ungünstigen Randbedingungen (z.B. Budgetgrenzen) werden mit diesen Verfahren zum Teil auch sehr ungenaue Ergebnisse erzielt. Beispielsweise können bei der inkrementellen Kosten-Nutzen-Methode unbefriedigende Lösungen erwartet werden, wenn die Massnahmenkosten eines einzelnen Objekts mehr als 30% der Budgetgrenze betragen. Im Bereich der Teilsysteme ist dies jedoch selten der

Fall [9]. Morcoux [37] optimiert die Erhaltungsmaßnahmen für ein Infrastrukturnetzwerk mit Hilfe eines genetischen Algorithmus. Hierbei betrachtet er ausschliesslich Brückenbauwerke. Damit bezieht sich dieser Ansatz auf ein Teilsystem und dies ohne die Beziehungen zwischen den Objekten mit einzubeziehen.

Im Bereich der Baustellenplanung an Autobahnen existieren weitere verschiedene Ansätze. Tang [38] benutzt einen genetischen Algorithmus, um den täglichen Baustellenablauf unter minimalen Gesamtkosten zu planen. Hier werden Baustellenkosten, Stillstandkosten und Strassennutzerkosten einbezogen, allerdings nur in Bezug auf eine einzelne Baustelle. Lee [39] nutzt den Ansatz der Schwarmintelligenz mit dem Ameisenalgorithmus zusammen mit einer Mikro-Verkehrssimulation für eine optimale Planung des Bauablaufs zur Minimierung der zusätzlichen Reisezeitkosten. Jang [40] verwendet den Algorithmus des simulierten Ausglühens in einem neuronalen Netzwerk für die Optimierung von Tagesbaustellen. Diese Literaturquellen beziehen sich nur auf eine einzelne Baustelle. Die Problemstellung erfasst dabei das Zusammenspiel zwischen Bauablauf und Verkehrsbelastung und damit eher die Problematik bei der Planung von Tagesbaustellen. Dies ist nicht Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit.

Diese Forschungsarbeit behandelt die Optimierung von Langzeitbaustellen auf einem längeren Autobahnabschnitt bzw. in einem betrachteten Autobahnnetz. Dabei ist nicht vorrangiges Ziel den Bauablauf zu optimieren, sondern eine optimale Anordnung mit möglicher Verkehrsführung im Zusammenhang mit Erhaltungsmaßnahmen an den Objekten der Teilsysteme aus der langfristigen objektbezogenen Erhaltungsplanung unter Einbezug der Beziehungen zwischen den einzelnen Objekten im Autobahnnetz zu erreichen.

Hajdin [3; 4; 5; 6] stellt das Autobahnnetz als Graph mit Knoten und Kanten dar und beschreibt die Problemstellung der Baustellenplanung als binäres lineares Programm. Dabei nutzt Hajdin [3; 4; 5; 6] die Branch and Bound Methode für die Minimierung der Gesamtkosten. Die Branch and Bound Methode ist in der Lage das globale Optimum zu finden. Dieser Ansatz wurde in dieser Forschungsarbeit weitergeführt und erweitert. Bisher sind verschiedene Randbedingungen bei real existierenden Baustellen nicht berücksichtigt, die für einen praxismässigen Einsatz noch implementiert werden müssen. Dazu gehören unter anderem Verkehrsüberleitungen und unterschiedliche Baustellen in mehreren Zeitperioden. Abschliessend erfolgt der Einsatz an real ausgeführten Baustellenstrecken (vgl. Kapitel 2).

2 Vorgehen und Methodik

2.1 Vorgehen

Grundsätzlich ist das Vorgehen in diesem Forschungsauftrag in die Forschungsphasen Erkenntnisgewinn, Modellgestaltung, Realisierbarkeitstest und Ergebniszusammenfassung gegliedert und wird in der folgenden Abbildung 2.5 dargestellt.

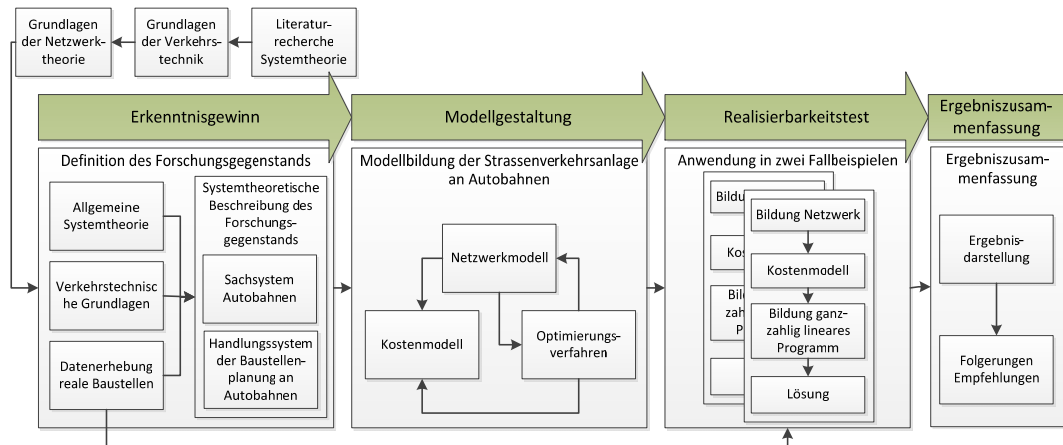


Abb. 2.5 Generelles Vorgehen im Forschungsprojekt

Das in Abbildung 2.5 dargestellte Vorgehen kann wie folgt beschrieben werden. Vor den eigentlichen Forschungsphasen steht eine Grundlagenrecherche zur Systemtheorie, der Verkehrstechnik und der Netzwerktheorie. Diese bilden die Basis für den Einstieg in die erste Forschungsphase Erkenntnisgewinn.

2.1.1 Erkenntnisgewinn

Nach einer allgemeinen Einführung in die Systemtheorie erfolgt eine systemtheoretische Betrachtung und Einordnung der Autobahnen unter Abstützung auf verkehrstechnischen Grundlagen. Zusätzlich fließen Erkenntnisse aus einer Datenerhebung bei zwei real durchgeführten Autobahnbaustellenprojekten im Rahmen des Realisierbarkeitstests mit ein. Die Abstützung auf die Systemtheorie erfolgt, weil diese eine ganzheitliche Beschreibung von technischen Systemen ermöglicht. Technische Systeme umfassen dabei nicht nur künstlich erschaffene Sachen (Sachsysteme), sondern auch die damit in Beziehung stehendes menschliches Handeln (Handlungssysteme) [41]. Dadurch werden Zusammenhänge besser sichtbar und erklärbar. Der Forschungsgegenstand wird somit systemtheoretisch als Sachsystem Autobahnen und das damit in Beziehung stehende Handlungssystem beschrieben. Dieses Handlungssystem stellt den Prozess der Ausführung der Baustellenplanung durch den Strassenbetreiber dar. Dies liefert den Rahmen für das Verfahren zur Ermittlung von optimalen Baustellen, welches die vorliegende Forschungsarbeit erarbeitet hat.

2.1.2 Modellgestaltung

Grundsätzlich beinhaltet das Modell ein Kostenmodell, ein Netzwerkmodell und das angewendete Optimierungsverfahren. Das Kostenmodell stellt das Wertesystem dar, welches zur Gewichtung der einzelnen Netzwerkkanten verwendet wird. Gleichzeitig stellt es Eingangsgrößen für die Zielfunktion des Optimierungsverfahrens zur Verfügung. Damit müssen bei der Bildung des Kostenmodells die Vorgaben aus Netzwerkmodell und Optimierungsverfahren Berücksichtigung finden. Die Formulierung des Netzwerkmodells muss auf das Optimierungsverfahren mit Zielfunktion, Randbedingungen und Betrachtungszeitraum abgestimmt sein. Dies erfolgt in einem iterativen Prozess.

Für die Baustellenplanung an Autobahnen wird ein monetäres Wertesystem mit Kostenkennwerten auf der Ebene des Gesamtsystems erarbeitet. Dieses beruht auf dem Men-

gen- und Wertgerüst der Kosten-Nutzen-Analyse [vgl. 21]. Sowohl die Massnahmen (Strassenbetreiber) als auch die bei deren Realisierung hervorgerufenen Auswirkungen auf den Verkehr (Strassennutzer) sowie Dritte werden dabei monetär quantifiziert.

Unter Abstützung auf bestehendes Wissen erfolgt die Abbildung des Gesamtsystems Strassenverkehrsanlage unter Berücksichtigung der Verkehrsführung und dem Einfluss des Bauprozesses mit dem für die Baustellenplanung notwendigen Genauigkeitsgrad. Die Situation der Verkehrsanlage wird grundsätzlich als schematisiertes Netzwerk modelliert und die einzelnen Objekte mit Anfangs- und Endknoten miteinander verbunden.

Bei der Modellierung der Verkehrssituation an Baustellen erfolgt die Berücksichtigung der Fahrstreifen mit vollen oder reduzierten Breiten, der Reduktion der Anzahl von Fahrstreifen sowie der Länge der Verkehrsbeschränkung. Verschiedene lang andauernde Verkehrsregime werden ebenfalls mit berücksichtigt.

Zur Wahl der wirtschaftlich optimalen Baustelle bedarf es der Evaluation aller möglichen Varianten von Massnahmen anhand der geringsten Gesamtkosten. Dafür muss zuerst eine geeignete Zielfunktion aufgestellt werden. Dies geschieht auf der Grundlage der Gesamtkostenbetrachtung für eine optimale Baustellenbildung und optimale Kombination von Verkehrsregimen an Autobahnen.

Bei komplexen Anlage- und Verkehrssituationen wird die Anzahl von Varianten derart gross, dass sie von Hand nicht evaluierbar ist. Zur Lösung wird in diesem Fall das Netzwerkmodell verwendet und die Optimierungsaufgabe als Min-Cost-Flow-Problem im Netzwerkmodell formuliert. Dieses wird zusätzlich modifiziert, da die binäre Einschränkung von Variablen explizit erzwungen werden muss. Folglich kann der klassische „Dijkstra“ [Dijkstra 1959] Algorithmus nicht verwendet werden und es müssen Verfahren zur Lösung von binären Programmen wie z.B. „Branch-and-Bound“ [Land und Doig 1960] oder „Branch-and-Cut“ [Padberg und Rinaldi 1991] eingesetzt werden. Dabei erfolgt keine Einschränkung der möglichen Lösungsvarianten. Dies ist der Vorteil im Vergleich zu -klassischen heuristischen Verfahren auf Kosten des Rechenaufwandes.

2.1.3 Realisierbarkeitstest

Nach der Formulierung des Forschungsansatzes erfolgt ein Realisierbarkeitstest an zwei Fallbeispielen. Dabei werden das Modell und die Inputdaten auf die Randbedingungen der jeweiligen real durchgeführten Baustellenstrecke angepasst. Danach erfolgen Sensitivitätsrechnungen im Rahmen eines Plausibilitätstests unter Anwendung der einzelnen Verfahrensschritte. Es erfolgt für jedes der beiden Fallbeispiele zuerst die Bildung des Netzwerkmodells anhand der bestehenden Anlagebedingungen. Danach wird das Kostenmodell aus den Erkenntnissen der Datenerhebung und der Literatur erarbeitet. Beide Modelle bilden die Grundlage für die Formulierung des binären linearen Programmes. Mit dem Optimierungsverfahren kann dann die Lösung ermittelt werden.

2.1.4 Ergebniszusammenfassung

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

2.2 Grundlagen der Baustellenplanung

2.2.1 Ansatz der Kybernetik als Systemabgrenzung

Die Baustellenplanung an Autobahnen ist ein Planungsprozess, welcher nicht nur einzelne Teilsysteme wie Fahrbahnen, Kunstbauten und Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen berücksichtigt, sondern diese als Gesamtsystem der Strassenverkehrsanlage betrachtet. In einem ersten Schritt wird es notwendig, eine Systemabgrenzung für den Planungsprozess und das zu betrachtende Gesamtsystem vorzunehmen. Abgestützt auf die Systemtheorie [16; 42] wird es grundsätzlich möglich, dieses künstlich vom Menschen geschaffene System Strassenverkehrsanlage mit seinen für die Baustellenplanung rele-

vanten Bestandteilen und deren Zusammenhänge ausreichend zu beschreiben. Wie unter anderem die Arbeiten von Stempfle [43], Rafi [vgl. 6, S.24] und Fastrich [vgl. 15, S.32] zeigen, hat sich die Abstützung auf die Systemtheorie im Bereich der Strassenverkehrsanlage bewährt.

Ein System kann demnach als eine Menge von Elementen bzw. Objekten beschrieben werden. Diese Elemente können je nach benötigter Systemdefinition verwendet oder weiter in Teilsystemen strukturiert werden. Die Gesamtheit der miteinander in Beziehung stehenden Elemente ist geordnet und den Einwirkungen ihrer Umgebung ausgesetzt (vgl. Abbildung 2.6).

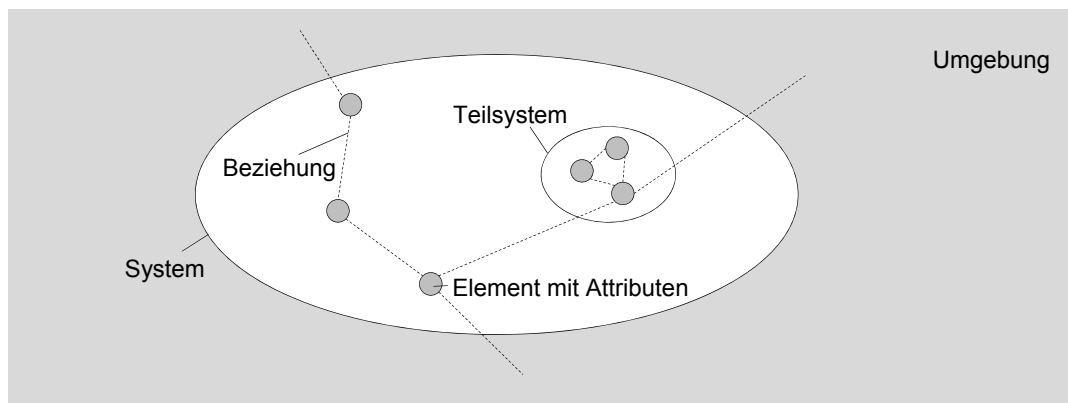


Abb. 2.6 Definition eines Systems in der Systemtheorie [vgl. 44]

Die allgemeine Systemtheorie ist nach Ropohl [45] eine Theorie der Modellkonstruktion, welche unter anderem auf Bertalanffy [16] zurückgeht. Bertalanffy [16] beschreibt, dass durch die Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen ihr Verhalten oder ihre Eigenschaften mitbestimmt werden. Das bedeutet, löst man ein einzelnes Element oder eine Teilmenge von Elementen für eine Betrachtung heraus; man trennt somit vorhandene Beziehungen zu den verbliebenen Elementen oder Teilsystemen; haben diese ein anderes Verhalten oder andere Eigenschaften.

Ein Beispiel hierfür ist eine Verbindungsstrasse zwischen zwei Orten, welche aus mehreren Fahrbahnstrecken und einigen Brücken besteht. Die Verbindungsfunktion dieser Verbindungsstrasse wird nur aufrecht erhalten, solange alle Objekte und ihre Beziehungen funktionstüchtig vorhanden sind. Beim Versagen einer Brücke, kann diese nicht mehr ihre Verbindungsfunktion zwischen der vorgängigen und nachfolgenden Fahrbahnstrecken erfüllen. Gleichzeitig ist die Verbindungsfunktion der gesamten Verbindungsstrasse nicht mehr gegeben. Diese ist nur vorhanden, wenn alle im Abschnitt vorhandenen Fahrbahnstrecken und Brücken ihre Verbindungsfunktion zu ihren benachbarten Objekten erfüllen können. Ropohl [41, S.77] spezifiziert dies, indem er das Ganze oder die Ganzheit allgemein als eine Menge aus der „Summe der Teile“ und der „Summe“ der Beziehungen zwischen den Teilen definiert. Gemäss dem holistischen Gesetz, einem elementaren Systemgesetz, sind es nicht nur die Mengen der Systemteile sondern ebenfalls die Relationen, die den besonderen Charakter des Systems bestimmen [41, S.316]. Ropohl [41, S.316] spezifiziert dies in einem weiteren Systemgesetz, wonach die Funktionen eines Systems durch seine Struktur bestimmt werden (Gesetz der Funktionsbestimmtheit). Dies führt zu einer weiteren Systemdetaillierung, den echten und unechten Systemen. Bei echten Systemen sind im Gegensatz zu unechten Systemen die Attributmengen α , die Teilsystemmengen σ und die Umgebung γ keine Nullmengen.

Für ein Abbild der Wirklichkeit in Form eines Modells ist es deshalb umso wichtiger, relevante Systeme und auch damit verbundene Prozesse umfassend und in Beziehung zu ihrer Umgebung zu beschreiben. Grundsätzlich liefert die mit der Systemtheorie eng verknüpfte Kybernetik für eine Abgrenzung eines Modellsystems verschiedene Konzepte: funktionales, struktureles und hierarchisches Systemkonzept [41; 42; 43].

2.2.2 Strassenverkehrsanlage als Sachsystem

Im Folgenden werden alle drei Systemkonzepte genutzt, um die Strassenverkehrsanlage an Autobahnen in ihrer Gesamtheit als Sachsystem für die Baustellenplanung ausreichend zu beschreiben. Stempfle [43] verdeutlicht dies im Bereich des Brückenbaus. Grundsätzlich kann die Strassenverkehrsanlage an Autobahnen, wie auch schon in Rafi [6] dargestellt, als offenes, dynamisches System definiert werden. Es findet also eine Interaktion mit seiner Umgebung statt, gleichzeitig ist mindestens ein Attribut abhängig von der Zeit und unterliegt somit einer Veränderung. Ebenfalls stellt es ein echtes System mit vorhandenen Attributen, Teilsystemen und Relationen dar, wie folgend ausgeführt wird.

Die Strassenverkehrsanlage kann gemäss der allgemeinen Systemdefinition und in Ergänzung an die Systemdefinitionen der Fahrbahnen nach Girmscheid [15] und der Brücken nach Stempfle [43] ebenfalls als ein System definiert werden, konkret als ein Gesamtsystem (Supersystem) S_{GS} bestehend aus einem Quadrupel, d.h. die Gesamtheit von vier zusammengehörenden Mengen α_{GS} , φ_{GS} , σ_{GS} und π_{GS} .

$$S_{GS} = (\alpha_{GS}, \varphi_{GS}, \sigma_{GS}, \pi_{GS}) \quad (1)$$

$$\text{mit } \alpha_{GS} = \{A_i\}, \varphi_{GS} = \{F_j\}, \sigma_{GS} = \{S'_{k}\}, \pi_{GS} = \{P_m\}$$

$$\text{und } i \in I, j \in J, k \in K, m \in M \quad (I, J, K, M \in \mathbb{N})$$

Hierbei bedeuten α_{GS} eine Menge von Attributen A_i , φ_{GS} eine Menge von Funktionen F_j , σ_{GS} eine Menge von Teilsystemen S'_{TSk} und π_{GS} eine Menge von Relationen P_m .

Funktionales Systemkonzept

Die Systemdarstellung im funktionalen Systemkonzept erfolgt durch eine Art Blackbox. Innere Strukturen und Beziehungen des Systems werden vernachlässigt und nur Attribute wie die Eingangsgrössen (Input), die Systemzustände und die Ausgangsgrössen (Output) und deren funktioneller Zusammenhang (Funktionen) genauer betrachtet. Das funktionale Konzept in Abbildung 2.7 zeigt das System S_{GS} mit Input und Output von bzw. an die Umgebung γ_{GS} . Das System S_{GS} und die Umgebung γ_{GS} bilden zusammen eine Basismenge β_{GS} (vgl. Abb. 2.7).



Abb. 2.7 Funktionales Systemkonzept der Strassenverkehrsanlage an Autobahnen

Der Input kann durch das Umfeld (z.B. klimatische Einwirkungen), den Betreiber (z.B. Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen) oder den Strassennutzer (z.B. Verkehrsbelastung) erfolgen. Die Zustände des Systems (z.B. Auslastungsgrad X und Sicherheitsniveau SiN) werden durch den Input verändert. Diese Zustandsänderungen erzeugen ebenfalls wieder Output für den Betreiber (z.B. Kosten), den Nutzer (z.B. erhöhte Reisezeit) und Dritte (z.B. Lärmbelastung).

Das System wird somit durch die Menge an Attributen A_i und der Menge an Funktionen F_j beschrieben. Die Inputs und Outputs machen deutlich, inwieweit das System mit seiner Umgebung interagiert. Für eine anfängliche Definition der Attribute ist es hilfreich darzulegen, wie die Umgebung für die Strassenverkehrsanlage an Autobahnen mit allen

relevanten Aspekten abgegrenzt werden sollte.

Die Umgebung wird durch das Umfeld und die unterschiedlich betroffenen Anspruchsgruppen gebildet. Durch das Umfeld werden alle relevanten physikalischen und chemischen Einwirkungen durch Klima, Landschaft und Untergrund abgedeckt. Bei den Anspruchsgruppen unterscheidet man generell nach Betreiber und Nutzer als direkte sowie Dritte als indirekte Anspruchsgruppen. Die Strassenverkehrsanlage ist grundsätzlich ein vom Menschen geschaffenes System. Genauer betrachtet wird dieses System durch den Strassenbetreiber als Anspruchsgruppe gebaut, betrieben und erhalten. Durch diese Handlungen lässt sich somit nach der Interpretation von Ropohl [vgl. 41, S.93] der Strassenbetreiber bzw. seine Organisationsform ebenfalls als ein System das handelt bzw. ein sogenanntes soziotechnische System darstellen.

Neben dem Umfeld wirken Betreiber und Nutzer aktiv (direkt) auf das System ein und sind direkt vom System bzw. von seinem Output und zum Teil von einzelnen Anspruchsgruppen (Stakeholder) betroffen. Es bestehen somit nach Ropohl [41] Funktionen zwischen Inputs und Zuständen (Überföhrungsfunktionen), Inputs und Outputs (Ergebnisfunktionen) sowie Zuständen und Outputs (Markierungsfunktionen). Deshalb werden Betreiber und Nutzer als direkte Anspruchsgruppen bezeichnet.

Zur indirekten Anspruchsgruppe Dritte werden betroffene Anrainer und die Umwelt, somit Fauna und Flora, gezählt. Sie wirken in der Regel nicht aktiv (direkt) auf das System ein und sind dennoch vom System und den direkten Anspruchsgruppen betroffen. Das heisst, es bestehen keine Überföhrungs- oder Ergebnisfunktionen, aber infolge der bestehenden indirekten Anspruchsgruppen sind Markierungsfunktionen vorhanden.

Zusätzlich ergeben sich Überföhrungsfunktionen durch das Umfeld. Das heisst einerseits klimatische sowie örtliche Einwirkungen aus dem Untergrund oder der Landschaft. Ausserdem sind Randbedingung aus normativen Vorgaben vorhanden, welche im Zusammenhang mit der Strassenverkehrsanlage das Handeln des Strassenbetreibers und -nutzers beeinflussen.

Die daraus resultierenden Attribute gehören nach Ropohl [41] in Anlehnung an die Kybernetik [46] verschiedenen Kategorien an, der Masse, der Energie und der Information. Gleichzeitig werden Koordinaten bzw. Attribute des Raumes und der Zeit benötigt, da die Strassenverkehrsanlage ein System mit einer räumlichen Ausdehnung ist, das sich über die Zeit verändert. Vor einer Definition der relevanten Attribute werden erst noch jeweils struktureles und hierarchisches Systemkonzept im Bereich der Strassenverkehrsanlage erläutert.

Struktureles Systemkonzept

Beim strukturelen Systemkonzept wird deutlich, welche einzelnen Elemente bzw. Objekte die Strassenverkehrsanlage als System bilden und wie diese durch die vorhandenen Relationen miteinander verbunden sind. Bei der Betrachtung eines jeden Objekts der Strassenverkehrsanlage zeigt sich, dass es sich um ein sehr komplexes System handelt. Eine Gruppierung der Objekte mit gleichen Eigenschaften schafft dabei schnell Klarheit. Dabei muss jedoch das rein strukturele Systemkonzept durch ein weiteres Systemkonzept erweitert werden: das hierarchische Systemkonzept. Dies wird im Anschluss ebenfalls noch separat vorgestellt. Zur Begriffserklärung soll dennoch ein kurzer Exkurs stattfinden.

Im Bereich der Strassenverkehrsanlage existiert gemäss Schweizer Norm [47] eine Menge von fünf verschiedenen relevanten Teilsystemen. Dies entspricht dem Stand der Technik. In der Praxis der Schweiz finden aktuell bei Autobahnen nur die Fahrbahnen und Kunstbauten in der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) in Form von Managementsystemen eine Verwendung. Weitere Teilsysteme wie die Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen sind jedoch in Vorbereitung. Für die Autobahnen ist damit $\sigma_{GS} = \{S'_{TSK}\}, k \in 1...3$. Diese Anzahl ist nicht zwingend und theoretisch auch nicht abschliessend. Auf anderen Strassennetzstrukturen, wie zum Beispiel im innerstädtischen Bereich, sind durch die weiteren im Bereich der Strasse vorhandenen Infrastrukturträger

(z.B. Strassenbahnschienen-, Trink- und Abwasser-, Elektro-, Telekommunikationsnetze) erweiterte Modellabgrenzungen notwendig. Das heisst die Modellabgrenzung ist neben der horizontalen auch von der vertikalen Struktur der Strassenverkehrsanlage abhängig. Ohne das hierachische Systemkonzept, welches die verschiedenen Hierarchieebenen definiert, ist deshalb eine Modellabgrenzung sehr schwierig. Auf das hierarchische Systemkonzept für die Strassenverkehrsanlage an Autobahnen wird im nächsten Abschnitt noch eingegangen.

Die verschiedenen Teilsysteme bilden für sich jeweils wieder eine Menge von Objekten oder bei Bedarf einer weiteren Detaillierung eine Menge von Subsystemen. Das heisst die Teilsysteme S'_{TSk} bestehen ebenfalls aus einem Quadrupel von Mengen der Attribute α'_k , Funktionen φ'_k , Subsystemen σ'_k und Relationen π'_k .

$$S'_{TSk} = (\alpha'_k, \varphi'_k, \sigma'_k, \pi'_k) \tag{2}$$

Hierbei bedeutet die Menge $\sigma'_k = \{S''_{kl}\}, k \in 1...3, l \in N$ die Summe der Subsysteme des einzelnen Teilsystems k. Bei Fahrbahnen, d.h. k=1, sind dies die jeweiligen Erhaltungsobjekte (vgl. Abb. 2.8), bei Kunstbauten (k=2) die Brückenbauwerke und bei den Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen (k=3) die elektromechanischen Anlagen. Diese Objekte bzw. Subsysteme sind untereinander durch Relationen verbunden und bilden in ihrer Folge das Autobahnennetz, wie in Abbildung 2.8 als kleiner Ausschnitt dargestellt. Das System S_{GS} und die Umgebung γ_{GS} bilden wiederum zusammen eine Basismenge β_{GS} .

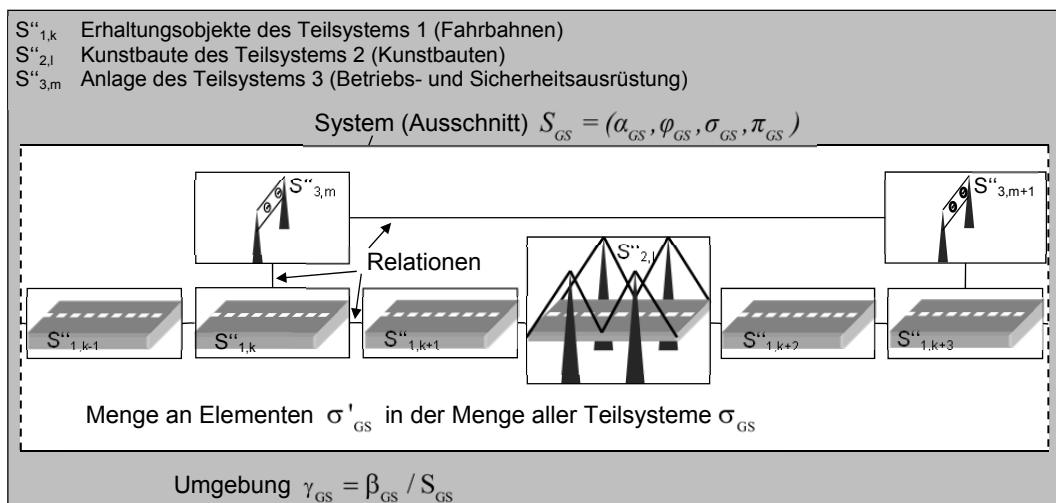


Abb. 2.8 Strukturales Konzept des Gesamtsystems der Strassenverkehrsanlage

Über die in Abbildung 2.8 beispielhaft gezeigten Relationen erfolgt der In- und Output zwischen den Objekten. Beispielhaft steht für einen Input die Verkehrsbelastung als verkehrstechnische Kenngröße die den Strassenutzer abbildet. Die Verkehrsbelastung wird von einem benachbarten Objekt im Gesamtsystem oder aus der Umgebung in das Gesamtsystem Autobahnennetz eingebracht, z.B. von einem anderen Strassennetz, wie das Kantonsstrassennetz, durch den Input über eine Rampe einer Anschlussstelle. Betrachtet man nun die Verkehrsbelastung als energetischen Input, so wird dieser über die Relationen, z.B. Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn, von einem zum nächsten Objekt transportiert. Hier wird auch die Transportfunktion der Relationen bei einer Modellerarbeitung für die Strassenverkehrsanlage an Autobahnen deutlich.

Für eine Gesamtanalyse darf kein Teilsystem separat oder ohne Relationen analysiert werden, da die Objekte einandere beeinflussen und ihr Zustand einerseits vom Input aus den Relationen zur Umgebung (in Abbildung 2.8 nicht dargestellt), andererseits auch vom Input aus den Relationen mit anderen Objekten abhängt. Dabei können je nach Systemdefinition Objekte eines Teilsystems verbunden sein, wie es bei zwei Fahrbahn-

strecken oder zwei elektromechanischen Anlagen (z.B. Verkehrsbeeinflussungssysteme) der Fall ist. Es existieren jedoch auch Relationen zwischen den Objekten unterschiedlicher Teilsysteme wie Fahrbahnstrecken mit Brückenbauwerken oder Tunnelbauwerke mit elektromechanischen Anlagen. Die Bedeutung dieser Relationen tritt gerade bei einem Störereignis, z.B. durch eine Baustelle, einen Unfall oder dem Versagen einer Brücke, hervor. Dies kann zu einer Veränderung oder, wie im Extremfall beim Versagen einer Brücke, zur Entfernung der Transportfunktion nicht nur des betroffenen Objektes sondern einer Menge von Objekten führen. Das bedeutet, eine temporäre Unstetigkeit z.B. die Reduktion der Leistungsfähigkeit bei einer Baustelle, hat nicht nur Einfluss auf die Baustelle selbst, sondern auch auf den Bereich unmittelbar vor oder nach der Baustelle. Im Extremfall können sich die Beeinträchtigungen sogar auf einen ganzen Strassennetzteil auswirken. Bei einem sehr hohen Auslastungsgrad in Spitzenzeiten der Verkehrsbelastung kann sich diese Störung im Bereich vor einer Baustelle über mehrere Kilometer ausdehnen (Stau oder stauähnliche Ereignisse vgl. Kapitel 2.2.5).

Hierarchisches Systemkonzept

Bei der Einführung des strukturalen Konzeptes der Strassenverkehrsanlage wurde schon deutlich, dass für die Modellierung der Struktur eine hierarchische Betrachtung nicht fehlen darf. Es stellt sich nun die Frage, ob das System eine weitere Detaillierung in Untersysteme oder Objekte benötigt oder nicht. Zum Teil zeigt sich eine einfache Hierarchiestruktur mit den Ebenen von übergeordnetem System, Gesamtsystem und Umgebung, Teilsysteme sowie Objekte der Teilsysteme als nicht ausreichend. Es werden für verschiedene Zwecke verschiedene Hierarchiebetrachtungen benötigt. Eine Gliederung der Strassenverkehrsanlage für administrative Zwecke unterscheidet sich in der Betrachtung im Vergleich zur netzweiten Zustandserfassung der Fahrbahnoberfläche. Für die Zustandserfassung bei Kunstbauten im Rahmen von Inspektionen sind zusätzliche Detaillierungen unabdingbar.

Es werden mehrere Hierarchiedimensionen benötigt. Abgeleitet aus dem hierarchischen Konzept von Girmscheid [15] und Stempfle [43] sowie der Ergänzung der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung aus der Schweizer Norm [48] stellt sich die Hierarchie in verschiedenen Betrachtungen unterschiedlich dar (multidimensionale Hierarchie). Je nach benötigten Detaillierungsgrad ergibt sich die Einteilung der Strassenverkehrsanlage, wie die Abbildung 2.9 verdeutlichen soll. Das System S_{GS} und die Umgebung γ_{GS} bilden analog dem funktionalen und strukturalen Konzept zusammen eine Basismenge β_{GS} .

In der horizontalen Betrachtung spielen quer vor allem verkehrstechnische Belange eine Rolle. Dabei wird das Gesamtsystem in verschiedene vorhandene Fahrbahnquerschnitte unterteilt. Von Bedeutung ist dabei das geometrische Normalprofil [49], welches bei Autobahnen weitere Hierarchiestufen durch die Richtungsfahrbahn und den Fahrstreifen zeigt. Die horizontale Betrachtung längs wird unter anderem für eine administrative Einordnung der verschiedenen Abschnitte des Systems verwendet. Eine weitere Hauptanwendung für die horizontale Betrachtung längs zur Strassenachse sind Strecken. Strecken haben die Eigenschaft zwei definierte Orte im Strassennetz miteinander zu verbinden [50]. Für eine freie Beschreibung eines Strassenstücks ohne einen Bezug zu definierten verkehrstechnischen Knoten eignen sich Strecken besonders gut. Für die Datenreferenzierung von zusätzlichen Zustandseigenschaften werden unter anderem Streckennetze mit linearem Raumbezug zum bestehenden Strassennetzmodell gebildet. Diese ermöglichen eine eindeutige Zuordnung innerhalb des Modells der Strassenverkehrsanlage.

Bei einer vertikalen Betrachtung rückt die Substanz und damit der bautechnische Aspekt der Strassenverkehrsanlage in den Vordergrund. Dabei wird die Strassenverkehrsanlage in verschiedene Subsysteme in Bezug auf die unterschiedlichen relevanten Attribute bei der Verwendung der Modelldefinition gegliedert. Beispielsweise erfolgt für die Dimensionierung für die Fahrbahnen eine Einteilung in Ober- und Unterbau. Diese werden danach weiter in die einzelnen Schicht gegliedert. Als kleinste nicht mehr unterteilte Einheit werden mit Mineralstoffgemisch und Bindemittel die Materialien der Schichten betrachtet.

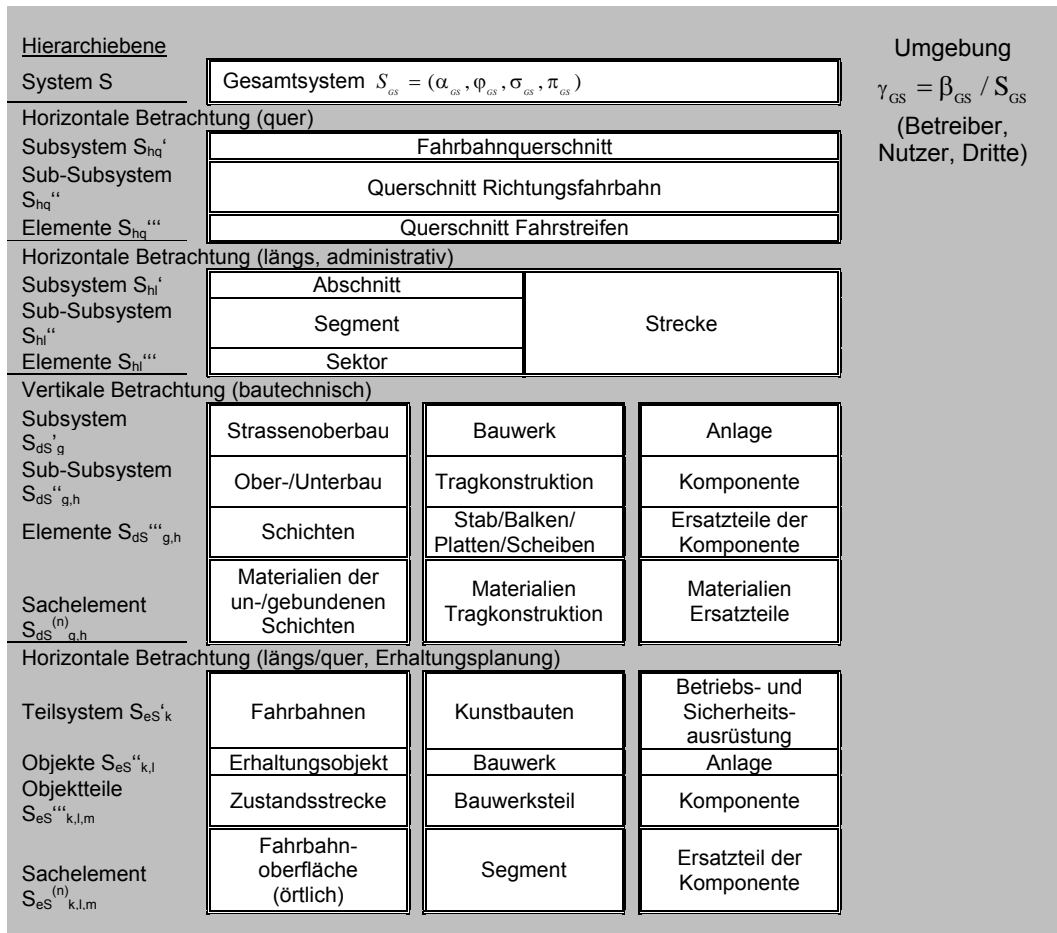


Abb. 2.9 Hierarchisches Systemkonzept der Strassenverkehrsanlage an Autobahnen (multidimensional)

Bei den Kunstbauten erfolgt die Gliederung in die jeweilige Tragkonstruktion, z.B. Hohlkastenträger, welche wiederum in die einzelnen vorhandenen statischen Modelle, wie Träger, Platten oder Scheiben, unterteilt werden und je nach Art der Kunstbaute, z.B. Bewehrungsstahl und Beton als Sachelemente [vgl. 43]. Ähnlich werden die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen in Abhängigkeit ihrer Funktion für eine Dimensionierung in Komponenten und weiter in einer niedrigeren Hierarchiestufe in Ersatzteile der Komponenten gegliedert. Die Sachelemente stellen wiederum die unterschiedlichen Materialien der Ersatzteile dar.

Für die gesamte Erhaltungsplanung mit Zustandserfassung, objektbezogener Erhaltungsplanung und netzbezogener Baustellenplanung erfolgt eine Einteilung unter der Verwendung von Aspekten aus horizontaler und vertikaler Betrachtung. In der ersten Hierarchiestufe wird zunächst analog der vertikalen Betrachtung in unterschiedliche Teilsysteme Fahrbahnen, Kunstbauten und Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen gegliedert. Diese Teilsysteme werden aus jeweils Objekten mit annähernd für die Erhaltung relevanten Eigenschaften gebildet. Diese Objekte stellen Trasseestrecken und Brücken dar, welchen jeweils noch Objekte der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung zugeordnet sein können. Diese Objekte werden untergliedert in Objektteile und weiter in jeweilige Sachelemente.

Für die Erhaltungsplanung steht vor allem das Zustandsverhalten der einzelnen Objektteile wie Zustandsstrecken, Bauwerksteile und Anlagekomponenten über die Zeit im Fokus. Eine Detaillierung wird jeweils bis zum Sachelement (vgl. Abb. 2.9) durchgeführt. Sachelemente sind die elementaren Teile der Systemabgrenzung, welche nicht mehr weiter unterteilt werden.

Es sind damit nur Attribute und Funktionen nicht aber weitere Teilsysteme mit deren Relationen vorhanden. Diese Sachelemente sind die rangniedrigsten und damit unechte

Systeme. Wenn bei Bedarf die Detaillierung des definierten Sachsystems für die Abbildung der Realität nicht mehr ausreichen sollte, ist es jeder Zeit möglich die unechten Systeme in echte umzuwandeln. Dabei werden diese Sachelemente in Elemente umgewandelt und eine weitere Hierachiestufe, durch die Definition der Struktur mit Teilsystemen und deren Relationen untereinander, eingeführt [43]. Am Beispiel des Sachelementes Fahrbahnoberfläche (Erhaltungsplanung) würde dabei analog der vertikalen Betrachtung durch die Unterteilung des örtlich vorhandenen Schichtenaufbaus mit gebundenem und ungebundenem Oberbau eine weitere Hierarchiestufe eingeführt. Dies kann dann ebenfalls weiter in die einzelnen Oberbauschichten Deck-, Binder- sowie Tragschicht und weiter eventuell nochmals in Mineralstoffgemisch und Bitumen usw. gegliedert werden. Die Oberbauschicht stellt dann ein weiteres rangniedrigeres Objektteil dar, welches in die Sachelemente Mineralstoffgemisch und Bitumen unterteilt wird. Eine detaillierte Betrachtung unter Einführung weiterer Hierarchiestufen wird gerade bei der Zustandserfassung in den einzelnen Teilsystemen in unterschiedlicher Art und Weise durchgeführt [vgl. 12; 51; 52].

Nach einer Einführung der drei Systemkonzepte für das Sachsystem Strassenverkehrsanlage unter spezieller Betrachtung der Autobahnen muss zusätzlich der Baustellenbereich abgegrenzt werden. Danach erfolgt die Einführung der relevanten Attribute für das Sachsystem.

2.2.3 Konkrete Systemabgrenzung des Baustellenbereichs

Führt man nun im Bereich des Sachsystems Strassenverkehrsanlage eine Abgrenzung für einen Baustellenbereich (vgl. Kapitel 1.1) durch, wird deutlich, dass hierbei alle Systemkonzepte einfließen. Wie bei der Betrachtung der gesamten Strassenverkehrsanlage sind Input und Output vorhanden (funktionales Konzept vgl. Abb. 2.7). Eine wichtige Eingangsgrösse (Input) stellt hier die Verkehrsbelastung dar. Durch die grosse verkehrstechnische Bedeutung des Autobahnnetzes erfolgt die Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen unter Verkehr. Eine Vollsperrung ist somit fast ausgeschlossen und findet eventuell nur in besonderen Situationen des Bauablaufs für eine kurze Zeit statt. Zusätzliche Eingangs- und Ausgangsgrössen (In-/Output) entstehen durch die Baumassnahmen selbst. Es werden Änderungen am Strassenoberbau mit der Hilfe von verschiedenen Baumaschinen durchgeführt. Durch deren Einsatz werden Formänderungen durch Energieübertragung ausgeführt, es erfolgt die Entnahme von geschädigtem und der Einbau von neuem Material, wie bei einem Ersatz einer bestehenden Asphalttschicht. Dabei erfolgt der Abtransport des alten und die Anlieferung des neuen Materials.

Das strukturelle Konzept (vgl. Abb. 2.8), bei dem auf die Relationen zwischen den Elementen fokussiert wird, erhält grosse Bedeutung. Im Baustellenbereich ist die Leistungsfähigkeit gegenüber der freien Strecke grundsätzlich reduziert. Dadurch kommt es bei hohen Auslastungsgraden auf der freien Strecke vor der Baustelle oftmals zu Stauscheinungen. Im Modell wird die Verkehrsbelastung als ein Attribut der Energie betrachtet. Diese wird von einem Objekt als Input über eine Kopplung aufgenommen, das heisst die Fahrzeuge fahren z.B. von einer Trasseestrecke auf eine Brücke. Sie werden über das Element transportiert bzw. fahren über das Brückenbauwerk. Am Ende der Brücke werden die Fahrzeuge als Output an das nächste Objekt z.B. eine folgende Trasseestrecke über eine Kopplung weitergegeben. Bei diesen Kopplungen zwischen Brückenbauwerk und Trasseestrecken sind in Bezug auf den Verkehr z.B. die Anzahl der Fahrstreifen von Bedeutung. Gerade im schweizerischen Nationalstrassennetz gewinnt mit steigender Verkehrsbelastung die Beseitigung von Engstellen an Bedeutung. Durch die dabei durchgeführten Massnahmen erfolgt, z.B. eine Erweiterung um einen weiteren Fahrstreifen. Im Modell wird damit auch die Kopplung zwischen zwei Objekten verändert. Diese Anpassungsmassnahmen verursachen dabei im Anschluss an die Baustellenausführung bleibende Veränderungen der Anlagesituation.

Grundsätzlich stellt eine Baustelle mit dem dabei umgesetzten Verkehrsregime eine temporäre Veränderung über die Dauer der Massnahmenausführung dar. Im Bereich zwischen freier Strecke und dem Baustellenanfang ist die Kopplung für die Dauer der Baustelle gestört, da der Output der freien Strecke nicht vollständig von der Baustelle aufgenommen werden kann. Bei hohen Verkehrsbelastungen können diese temporären

Engstellen zu Stauereignissen führen. Ein weiteres Beispiel zur Verdeutlichung der Bedeutung von Relationen bzw. Kopplungen zwischen zwei Objekten ist die Änderung der Massnahmeart im Verlauf der Baustelle. Folgt ein Brückenbauwerk auf eine Fahrbahnstrecke, so ist es möglich, dass das Verkehrsregime aufgrund der geringen Platzverhältnisse auf dem Brückenbauwerk geändert werden muss. Je nach Auswirkung der Verkehrsführungsänderung stellt die Kopplung zwischen Fahrbahnstrecke und Brückenbauwerk ebenfalls eine Unstetigkeit der Leistungsfähigkeit dar und führt deshalb bei hoher Verkehrsbelastung zu Stau.

Für eine Abgrenzung der Baustelle im Modell sind übergreifend horizontale und vertikale Betrachtungen des hierarchischen Systemkonzepts (vgl. Abb. 2.9) von Bedeutung. Dabei spielen die folgenden Informationen eine wichtige Rolle:

- welche Ausdehnung hat die Baustelle
- wieviele Fahrstreifen werden im Baustellenbereich dem Strassennutzer zur Verfügung gestellt und mit welchen Breiten
- hat die Baustelle Auswirkungen auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn
- wo kann der Verkehr über den Mittelstreifen übergeleitet werden
- welche Erhaltungsmassnahmen werden durchgeführt und welche Teilsysteme wie Fahrbahnen, Kunstbauten oder Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen sind davon betroffen

In der Schweiz existieren verschiedene definierte Betriebsformen von Verkehrsführungen für den Baustellenbereich [53; 54]. Für die unterschiedlichen Verkehrsregime bzw. Baustellentypen sind Anzahl und Breite der Fahrstreifen je Richtungsfahrbahn sowie Vorgaben und Empfehlungen hinsichtlich Geschwindigkeitsreduktion und Signalisation vorhanden.

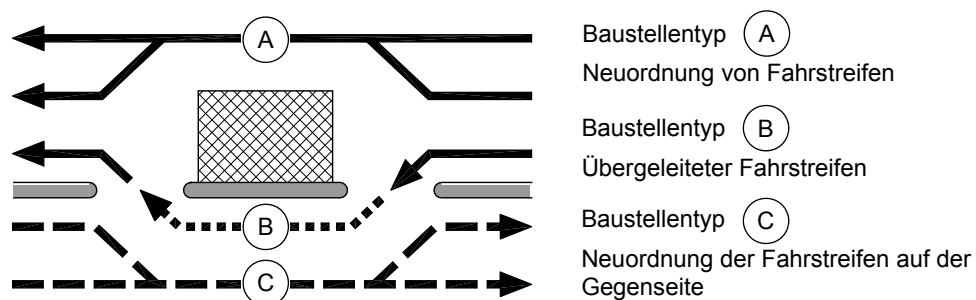


Abb. 2.10 Baustellentypen auf Autobahnen [53]

Ein Baustellentyp nach Schweizer Norm [53] ist gekennzeichnet durch seine Art der Verkehrsführung. Grundsätzlich existieren drei verschiedene Baustellentypen (vgl. Abb. 2.10). Typ A wird als Neuordnung von Fahrstreifen definiert, Typ B als übergeleiteter Fahrstreifen und Typ C als Neuordnung von Fahrstreifen der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn. „Der Baustellentyp A kommt in jedem Fall vor. Muss ein Fahrstreifen in den Gegenverkehr übergeleitet werden, so sind“ entsprechende Sicherheits- „Massnahmen für jenen Bereich zu treffen. Dabei sind der Typ B und der Typ C zusätzlich nötig.“ [53]

Im Sinne der Systemtheorie existieren damit vier grundsätzliche Arten der Kopplung hinsichtlich Verkehrsführung zwischen den Elementen der Richtungsfahrbahn:

- keine Änderung der Verkehrsführung zwischen zwei Elementen
- Verschwenkung bzw. Rückverschwenkung der Fahrstreifen
- Überleitung bzw. Rückführung von Fahrstreifen
- Reduktion von Fahrstreifen

Die Abbildung 2.11 soll die Begriffe Verschwenkung und Rückverschwenkung sowie die Überleitung und Rückführung verdeutlichen. Demnach wechselt die Verkehrsführung einer normalen 2x2-streifigen Autobahn mit durchgehend baulicher Richtungstrennung

(freie Strecke) am Anfang einer Baustelle auf einer Richtungsfahrbahn durch eine Verschwenkung zur Betriebsform 2 (vgl. Abb. 2.11 bzw. Abb. 2.12).

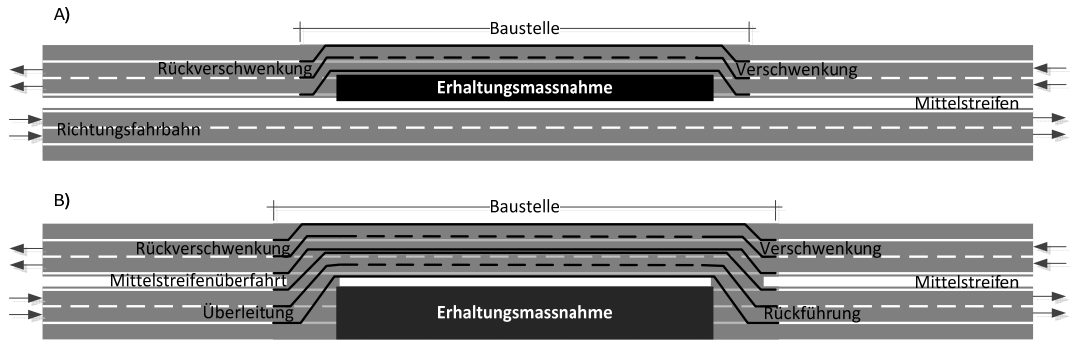


Abb. 2.11 Baustelle A) mit Verschwenkung und Rückverschwenkung, B) mit Überleitung und Rückführung auf einer 2x2-streifigen Autobahn mit durchgehend baulicher Richtungstrennung

Eine Auswirkung auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn besteht dabei nicht. Eine Betriebsform 3+1 mit einer Baustelle auf einer Richtungsfahrbahn entsteht durch eine Überleitung eines Fahrstreifens. Dadurch besteht eine Auswirkung auf den Verkehr der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn. Dies gilt auch für eine Betriebsform 4+0 und die damit vorhandene Überleitung bzw. Rückführung von zwei Fahrstreifen. Dabei findet auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn eine Verschwenkung bzw. Rückverschwenkung statt (vgl. Abb. 2.11).

Abb. 2.12 Betriebsformen der Verkehrsführung an einer Autobahnbaustelle [53; 54]

Querschnittdarstellung der Verkehrsführung im Baustellenbereich	Betriebsform	Überleitung
	2	keine
	2+2 (analog 3+3)	keine
	3+1	1-streifig
	4+0	2-streifig
	4+1	1-streifig
	4+2	1-streifig
	5+1	2-streifig

In Abbildung 2.12 sind die verschiedenen Verkehrsführungen im Baustellenbereich dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die Betriebsformen 3+1, 4+0, 4+1, 4+2 und 5+1 beide Richtungsfahrbahnen betreffen. Das heisst die Baustellentätigkeit auf der einen hat gleichzeitig Auswirkungen auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn durch die baustellenbedingte Verkehrsführung. Bei den Betriebsformen 2+2 und 3+3 sind beide Richtungsfahrbahnen von einer Baustelle betroffen. Die Verkehrsführung erfolgt jedoch unter Anordnung von Verschwenkungen und ohne eine Überleitung von Fahrstreifen. Nur in

der Betriebsform 2 erfolgt die Baustellentätigkeit und Verkehrsführung unabhängig von der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn.

2.2.4 Definition der relevanten Attribute

Attribute der Systemzustände

Die Strassenverkehrsanlage kann als ein Verkehrssystem beschrieben werden, welches allgemein durch den Anspruch an die Qualität bei seiner Benutzung charakterisiert wird. Dieses Qualitätsniveau wird schon bei seiner Entstehung durch den Planungsschritt der verkehrstechnischen Dimensionierung [55] definiert. Es sind die Zustände *Auslastungsgrad* X und *Sicherheitsniveau* SiN , welche das System in Form der Verkehrsqualität charakterisieren und zusätzlich durch den vorhandenen Input aus der Umgebung beeinflusst werden. Sie führen zu einem Output des Systems an seine Umgebung (vgl. Abb. 2.7).

Diese beiden funktionalen Zustände müssen jedoch zerlegt werden, da sie von einer Menge von verschiedenen Attributen und dazugehörigen Funktionen abhängen. Diese sind die physischen Zustände der Strassenverkehrsanlage. Ropohl [vgl. 41, S.316] spricht dabei von Funktionszerlegung. Zum Teil wird dann ein Wechsel in der Hierarchieebene notwendig, da ein System nicht vollständig von einer Hierarchieebene beschrieben werden kann. Unter Umständen werden Zusammenhänge erst durch eine zusätzliche Analyse der Struktur deutlich. Die durch die Zerlegung entstehende Menge an Attributen (unterteilt in die von Ropohl verwendeten Kategorien) und Funktionen werden im Folgenden näher betrachtet. Es erfolgt anhand der relevanten Zustandsattribute zuerst eine Definition der Input- und Outputattribute und anschliessend eine Herleitung der vorhandenen Funktionen. Die Grundlage hierfür sind Forschungsergebnisse der Verkehrswissenschaften, die im Bereich der Empirie verschiedene Zusammenhänge und Gesetzmässigkeiten zwischen den Attributen hervorgebracht haben.

Auslastungsgrad

Der Zustand des *Auslastungsgrades* X wird gemäss Schweizer Norm [56; 57] als Quotient der Verkehrsstärke Q und der Leistungsfähigkeit cap definiert. Dabei ist der Auslastungsgrad je nach Abschnitt k der Strassenverkehrsanlage unterschiedlich.

$$X_k = \frac{Q_k}{cap_k} \{k = 0, 1, 2, \dots, n\} \quad (3)$$

mit X_k -Auslastungsgrad eines Abschnitts k
 Q_k -Verkehrsstärke eines Abschnitts k
 cap_k -Leistungsfähigkeit eines Abschnitts k

Die *Verkehrsstärke* entspricht der Anzahl von Verkehrselementen, die einen Querschnitt einer Anlage in einem Zeitintervall (i.d.R. 1 h) durchfahren.

Die *Leistungsfähigkeit* cap einer Verkehrsanlage wird oft als Kapazität [55] bezeichnet. Sie gibt die grösstmögliche Anzahl von Fahrzeugen eines Verkehrsstromes an, die erwartungsgemäss eine definierte Strecke oder einen Abschnitt dieser Anlage während eines gegebenen Zeitintervalles, bei gegebenen Strassen-, Verkehrs- und Betriebsbedingungen, durchfahren kann. Diese Randbedingungen werden durch verschiedene physische Zustandseigenschaften der Strassenverkehrsanlage beeinflusst, was im Folgenden näher erläutert wird.

Strassenbedingungen

Zu den Strassenbedingungen zählen die durch die bestehende Anlage gegebenen geometrischen und baulichen Eigenschaften sowie der Strassenzustand und die Witterungsverhältnisse [55]. Die geometrischen und baulichen Eigenschaften sind die gegebenen Kenngrössen aus Entwurf bzw. Projektierung [58] der bestehenden Strassenverkehrsanlage infolge der Überlagerung von geometrischer Linienführung und Strassenquerschnitt

[59]. Aus dem Input durch den Strassenbetreiber folgen einerseits *Längsneigung* i , *Kurvigkeit* KU und *Sichtweiten* S als Ergebnis der Linienführung. Andererseits ergeben sich aus dem Strassenquerschnitt die *Anzahl* n_{FS} und die *Breite* b_{FS} der Fahrstreifen, die *Querneigung* p sowie das Vorhandensein und die Beschaffenheit von Stand- und Mittelstreifen. Die Linienführung wird durch Attribute des Raumes definiert und der Fahrbahnaufbau durch Attribute der Masse. Das bestehende Autobahnnetz der Schweiz ist ein bereits durch den Menschen geschaffenes System. Die oben genannten physischen Zustände der bestehenden Anlage aus der Dimensionierung sind deshalb bereits definiert und ändern sich im Gegensatz zum Strassenzustand und der Witterungsverhältnisse in der Regel nicht. Eine Änderung tritt temporär oder bleibend bei Eingriffen durch den Strassenbetreiber auf. Einen temporären Einfluss haben ebenfalls der Strassenutzer (z.B. Verkehrsbelastung) und die Witterung (z.B. Regen bzw. Schnee). Auf Autobahnen treten somit temporäre oder bleibende Änderungen der Strassenbedingungen auf. Diese sind zum Beispiel:

- Temporärer Änderungen durch Umnutzung des Pannestreifens im Rahmen des Verkehrsmanagements (Erweiterung der Fahrstreifenanzahl)
- Temporäre Änderungen durch Störungen infolge eines unvorhersehbaren Ereignisses, z.B. Unfall oder Panne (Reduzierung der Fahrstreifenanzahl)
- Temporäre Änderungen während einer Massnahme im Baustellenbereich durch eine Tages- oder Dauerbaustelle (z.B. Fahrstreifenanzahl und -breite)
- Bleibende Änderung nach einer Massnahme (z.B. Erneuerung oder Erweiterung durch zusätzlichen Fahr- bzw. Standstreifen oder Veränderung der Fahrstreifenbreiten)
- Änderung der Verkehrsbelastung (temporär)
- Temporäre Änderungen der Fahrbahnoberflächeneigenschaften durch die Witterung

Strassenzustand

Der Strassenzustand gehört zu den Attributen des Systems und zeigt auf, in wie weit ein Objekt seine Transport- und Verbindungsfunktion aufgrund der physischen Zustandseigenschaften der Substanz erfüllen kann. Dazu gehört einerseits der Zustand der Fahrbahnoberfläche. Andererseits zählt hierzu der Zustand von Bauteilen einer Brücke, welche tragende Funktionen haben und die Lasteinwirkungen auf die Fahrbahnoberfläche in den Untergrund leiten. Die Veränderung des Strassenzustands kann sehr langsam aber kontinuierlich oder plötzlich auftreten. Damit ist der Zustand zeitabhängig. Diese Veränderungen erfolgen durch den Input des Strassennutzers, hauptsächlich durch den Schwerverkehr. Die Umgebung, durch die kurzfristigen Einwirkungen des Wetters und die langfristigeren Einflüsse des Klimas sowie durch den Untergrund, beeinflusst ebenfalls die Substanz der Strassenverkehrsanlage. Es wird somit Energie und Masse zu- oder abgeführt. Die daraus resultierenden Attribute ergeben sich aus einer horizontalen und einer vertikalen Betrachtung des jeweiligen Objekts der Strassenverkehrsanlage. In der Folge werden die Systemzustände im Rahmen einer periodischen Zustandserhebung (Überwachung) der relevanten Attribute durch eine visuelle oder messtechnische Erfassung an den unterschiedlichen Objekten aufgenommen.

Eine horizontale Betrachtung erfolgt dabei durch die Zustandsaufnahme der Fahrbahnoberfläche, auf welcher sich der Strassenutzer bewegt. Die Fahrbahnoberfläche stellt eine Schnittstelle zwischen System und Nutzer dar. In der schweizerischen Praxis und gemäss Schweizer Norm [60] wird der Zustand der Fahrbahnoberfläche durch unterschiedliche relevante Eigenschaften der jeweilig erhobenen Zustandstrecken in Bezug auf den Fahrkomfort und verkehrssicherheitsrelevante Aspekte definiert. Die Fahrbahnoberfläche beeinflusst den Strassenutzer hinsichtlich seines Fahrverhaltens, der Auswirkungen auf sein Kraftfahrzeug und die Verkehrssicherheit.

In der vertikalen Betrachtung wird deutlich, welchem Teilsystem eine bestimmte Strecke angehört oder zugeordnet ist. Je nach Teilsystem erfolgen dabei teilsystemspezifische Zustandsaufnahmen hinsichtlich sicherheitsrelevanter Eigenschaften, z.B. in Bezug auf dessen Tragfunktion oder technischer Funktionstüchtigkeit. Diese Eigenschaften des Systems sind mit einer Unsicherheit behaftet und ein darauf zurückzuführendes Versagen kündigt sich zum Teil an, tritt aber meist plötzlich auf. Beim Eintreten des Versagens

der Tragfunktion oder der Funktionstüchtigkeit ist meist mit einer sehr grossen einschneidenden Wirkung auf den Strassennutzer und der generellen Zerstörung der Substanz zu rechnen. Bei dem Teilsystem Fahrbahnen betrifft dies die Tragfähigkeit des Strassenoberbaus. Für die Kunstbauten ist der Zustand der verschiedenen Bauteile oder für die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen der Zustand der unterschiedlichen Anlageteile von Bedeutung.

Witterungsbedingungen

Witterungsbedingungen und deren Folgen sind zeitlich begrenzte und je nach Jahreszeit typische Ereignisse (z.B. Frost) sowie plötzlich auftretende Kurzzeitereignisse infolge des Wetters. Hierzu zählen ebenfalls Naturgefahren. Alle diese Ereignisse sind nur bedingt oder gar nicht vorhersehbar. Sie beeinflussen den funktionalen Zustand der Leistungsfähigkeit einer Strassenverkehrsanlage durch die Verschlechterung relevanter Zustandseigenschaften (Attribute), z.B. bei starkem Regen oder Schneefall, die Sichtweite, die Griffigkeit und die nutzbare Fahrbahnbreite bzw. die Anzahl der nutzbaren Fahrstreifen. Dies betrifft den Zustand einer Strecke oftmals nur temporär für die Dauer des auftretenden Ereignisses. Zusätzlich wird der Strassennutzer erfahrungsgemäss teilweise sein Verhalten durch eine Reduktion der Geschwindigkeit ändern, womit gleichzeitig eine Reduktion der Verkehrsstärke stattfindet [vgl. 61]. Zum Teil erfolgt ein Eingreifen des Strassenbetreibers im Rahmen einer vorhandenen Information durch Signalisation, z.B. Geschwindigkeitsbeschränkung bei Nässe, oder durch Massnahmen des betrieblichen Unterhalts, z.B. Winterdienst.

Dabei sind jedoch die substanziellen Zustandseigenschaften (Attribute) in Bezug auf die Tragfunktion infolge ausreichender statischer Dimensionierung nicht oder in einem vernachlässigbarem Ausmass betroffen. Bei einem Extremereignis im Bereich der Naturgefahren, welches die Annahmen der Dimensionierungsgrössen und zusätzlich vorhandene Sicherheitsbeiwerte übersteigt, besteht die Möglichkeit einer Beschädigung bishin zur völligen Zerstörung eines Strassenobjekts, z.B. durch eine Flut, einen Murengang oder eine Schneelawine. Dieser Vorgang kann ebenfalls mit Attributen aus den Kategorien Energie und Masse beschrieben werden. Diese Ereignisse sind durch ihr sehr seltenes Auftreten nicht Bestandteil der Dimensionierung, müssen aber infolge von eventuell sehr einschneidenden Konsequenzen hinsichtlich ihres Risikos, das heisst des Einflusses einer Konsequenz in Zusammenhang mit seiner Auftretenswahrscheinlichkeit, bewertet werden. Dieser Bewertungsprozess kann zur Errichtung von zusätzlichen Schutzeinrichtungen führen, um die unterschiedlichen von eventuellen Extremereignissen betroffenen Objekte der Strassenverkehrsanlage im Ereignisfall zu schützen. Beispielhaft sind hier Lawinenschutz- oder Steinschlagschutzeinrichtungen zu nennen.

Verkehrsbedingungen

Die Verkehrsbedingungen sind vereinfacht betrachtet Attribute der Kategorie Energie und werden in der Regel durch die Verkehrsteilnehmer bestimmt. Sie sind somit abhängig vom Input der Strassennutzer. Von Bedeutung sind hierbei die Verkehrsstärke und die Zusammensetzung des Verkehrs, speziell betrifft dies den Schwerverkehrsanteil (Langsamfahrzeuge), aber auch Pendler- bzw. Transitverkehr (Verkehrsverhalten in Bezug auf Ortskenntnis und Reisezweck). Zusätzlich spielt die Aufteilung des Verkehrs gesamthaft auf die beiden entgegengesetzten Richtungsfahrbahnen und im Detail auf die vorhandenen Fahrstreifen eine Rolle. Für eine Modellbildung sind je nach Bedürfnissen makroskopische und mikroskopische Ansätze zum Beispiel für Simulationen vorhanden.

Aufgrund des langfristigen Zeithorizonts der Erhaltungsplanung (vgl. Kapitel 2.2.6) und der Betrachtung von grösseren Teilen des Autobahnnetzes sind die makroskopischen Kenngrössen von Bedeutung. Diese setzen sich aus *Verkehrsstärke* Q sowie *Verkehrsdichte* k und *mittlerer Geschwindigkeit* \bar{v}_m aller betrachteten Fahrzeuge zusammen. Aus der Annahme eines homogenen (gleiche Geschwindigkeit aller Fahrzeuge über eine definierte Strecke) und stationären (gleiche Geschwindigkeit aller Fahrzeuge über ein definiertes Zeitintervall) Verkehrsflusses folgt die Zustandsgleichung [vgl. u.a. 62; 63; 64; 65]

$$Q = k \cdot \bar{v}_m \quad (4)$$

Ist die Problemstellung eher beschränkt auf einen kurzfristigen Zeithorizont sowie einen kleineren Netzteil, so gewinnt die mikroskopische Betrachtung an Bedeutung. Dabei sind mikroskopische Kenngrößen des Verkehrs, wie *Distanzen* Δs_i und *Zeitlücken* Δt_i des einzelnen Fahrzeuges i zu seinem Vorgänger sowie dessen jeweilige *Geschwindigkeit* v_i relevant. Dies ist im Verkehrsmanagement und eventuell bei der Planung von Tagesbaustellen der Fall.

Im schweizerischen Autobahnnetz existieren netzweit an unterschiedlichen Standorten automatische Zählstellen. Diese zeichnen die Daten der einzelnen den Querschnitt j passierenden Fahrzeuge auf (mikroskopisch). Aus diesen lokalen Messungen lassen sich nach Leutzbach [63] die makroskopischen Daten wie folgt ermitteln. Bei lokalen Messungen ergeben sich aus der Menge der berücksichtigten Fahrzeuge M_j im betrachteten Zeitintervall Δt_j die *Verkehrsstärke*

$$Q_j = \frac{M_j}{\Delta t_j} \quad (5)$$

und die *mittlere lokale Geschwindigkeit*

$$\bar{v}_{l,j} = \frac{1}{M_j} \cdot \sum_{i=1}^{M_j} v_i \quad (6)$$

Zur Berechnung der Verkehrsdichte ist jedoch die *mittlere momentane Geschwindigkeit* notwendig. Diese wird im betrachteten Wegabschnitt Δs_k

$$\bar{v}_{m,k} = \frac{1}{M_k} \cdot \sum_{i=1}^{M_k} v_i \quad (7)$$

Wardop [62] zeigte abgeleitet aus der Kontinuitätsüberlegung (vgl. (4)) den Zusammenhang zwischen lokaler und momentaner Geschwindigkeit mit

$$\bar{v}_{l,j} = \bar{v}_{m,k} + \frac{\sigma_{m,k}^2}{\bar{v}_{m,k}} \quad (8)$$

auf. Dies verdeutlicht, dass die lokal ermittelte Geschwindigkeit immer grösser als die momentane Geschwindigkeit ist, wenn man von einer Streuung der Geschwindigkeiten grösser Null ausgeht. Deshalb setzt man häufig die momentane Geschwindigkeit gleich dem harmonischen Mittel der lokalen Geschwindigkeit mit

$$\bar{v}_{m,k} = \frac{M_j}{\sum_{i=1}^{M_j} \left(\frac{1}{v_i} \right)} \quad (9)$$

Für die *Verkehrsdichte* ergibt sich dann

$$k = \frac{Q}{\bar{v}_m} = \frac{\sum_{i=1}^{M_j} \left(\frac{1}{v_i} \right)}{\Delta t_j} \quad (10)$$

Damit können die makroskopischen Daten für die Berücksichtigung des Verkehrs aus den vorhandenen automatischen Zählstellen je nach Zeitintervalle (1, 5, 15 oder 60 min) für den betreffenden Querschnitt ermittelt werden. Diese stellen dann die Grundlage für

die Berücksichtigungen der Funktionen aus dem Verkehrsgeschehen dar. Wie in Abbildung 2.13 gezeigt, können diese makroskopischen Daten des jeweiligen Querschnitts auch in einem Fundamentaldiagramm dargestellt werden [65].

Es stellt die Verkehrsverhältnisse, stabil und instabil, in einer dreidimensionalen Punktwolke von Messintervallen der drei genannten Grössen dar. Die generelle Form des Fundamentaldiagramms ist dabei abhängig von der Geschwindigkeit des freien Verkehrs v_{frei} , der maximal möglichen Verkehrsdichte k_{max} des stehenden Verkehrs und der maximalen Verkehrsstärke q_{max} bei optimalen Verhältnissen von Geschwindigkeit v_{opt} und Verkehrsdichte k_{opt} [66].

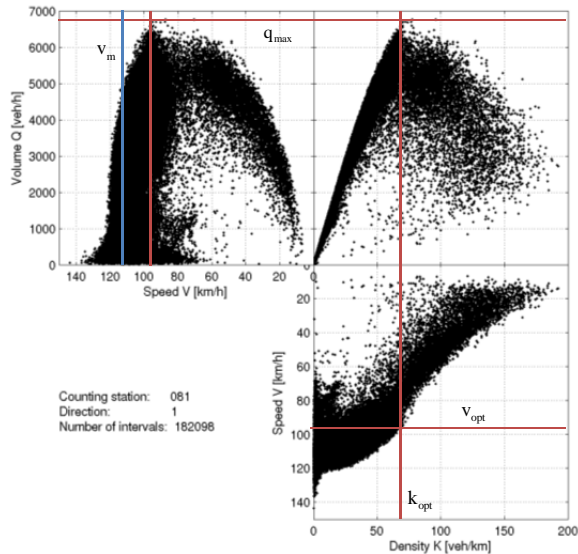


Abb. 2.13 Fundamentaldiagramm für den Autobahnquerschnitt der ASTRA-Zählstelle Muttenz (081) auf der Grundlage von 5-Minutenintervallen [vgl. 67] mit den relevanten verkehrstechnischen Kenngrössen

Betriebsbedingungen

Die Betriebsbedingungen sind alle Anordnungen zur Steuerung und Regelung des Verkehrs und werden durch den Strassenbetreiber vorgegeben. Dazu zählen die signalisierte Geschwindigkeit, Gewichtsbeschränkungen, Fahrstreifensperrungen oder Überholverbote. Es sind somit Attribute der Masse, in Form der Verkehrsschilder als Träger, und Information durch ihre Beschriftung, welche wiederum den Strassenutzer in seinem Verkehrsverhalten beeinflussen.

Sicherheitsniveau

Das Sicherheitsniveau lässt sich durch das vorhandene Unfall- und Verunfalltengeschehen quantifizieren. Eine Beurteilung des vorhandenen Unfallgeschehens ermöglichen Bezugsgrössen, durch einen Vergleich zu anderen Strecken oder Knoten im Strassenetz. Im konkreten Fall der Baustelle ist die Differenz im Vergleich zum Unfallgeschehen ohne Baustelle von Bedeutung. Die *Unfallrate* $u_{r,i}$ als Attribut für definierte Strecken gibt die Unfälle U_i je eine Million Fahrzeugkilometer auf einem Abschnitt i an. Die *Unfallziffer* $u_{z,j}$ quantifiziert die Unfälle je eine Million Fahrzeuge an einem abgegrenzten Knoten j . Analog ergeben sich Bezugsgrössen Verunfalltenrate $vu_{r,i}$ und Verunfalltenziffer $vu_{z,j}$ [vgl. 68; 69].

Attribute des Systeminputs und -outputs

Nach der genauen Betrachtung der Attribute der Zustände der Strassenverkehrsanlage, haben sich die wesentlichen Kenngrössen von Input und Output herauskristallisiert. Zur

Umgebung des Gesamtsystems gehören, wie schon erwähnt, Strassenbetreiber, Strassennutzer sowie Dritte.

Der Strassenbetreiber, der in der Regel durch die öffentliche Verwaltung repräsentiert wird, hat die Aufgabe, ein sicheres und wirtschaftliches Abwickeln des Verkehrs zu gewährleisten. Dabei haben die Nationalstrassen besonderen verkehrstechnischen Anforderungen zu genügen [1]. Der Strassenbetreiber erfüllt diese Aufgabe mit Hilfe von unterschiedlichen Massnahmen (Input). Diese Massnahmen umfassen den Aufgabebereich des Neubaus, des Betriebs, der Erhaltung – gemäss SIA 469 [70] gehören dazu Überwachung, betrieblicher und baulicher Unterhalt sowie Veränderung – und des Rückbaus. Für die mittel- bis langfristige Baustellenplanung sind hauptsächlich die Massnahmen mit Verkehrseinfluss, d.h. des baulichen Unterhalts und der Veränderung, von Bedeutung. Bei der Durchführung von Erhaltungsmassnahmen im Rahmen des baulichen Unterhalts werden vorrangig die Betriebsbedingungen temporär verändert und im Anschluss wieder auf den vorherigen Zustand versetzt. Bei den Erhaltungsmassnahmen der Veränderung erfolgt zusätzlich zur temporären Änderung der Betriebsbedingungen eine Schaffung neuer Betriebszustände nach der Durchführung der Erhaltungsmassnahme. Alle Massnahmen des Strassenbetreibers bedeuten einen Input in Form der Attributskategorien Information (z.B. Änderung der Signalisation), Masse (z.B. Zuführung von Baumaterialien) und Energie (z.B. Anwendung von Einbauverfahren). Hinzu kommen noch die Attribute des Raumes (z.B. Baustellenausdehnung) und der Zeit (z.B. Baustellendauer).

Die temporäre Veränderungen von Attributen der Strassenverkehrsanlage durch Erhaltungsmassnahmen hat direkten Einfluss auf den Zustand des Systems und indirekt Einfluss auf den Strassennutzer. Zum Teil sind verschiedene Zusammenhänge in der bisherigen Forschung noch nicht durch Funktionen belegt. Dies betrifft vor allem das Sicherheitsniveau. Teilweise existieren subjektive Annahmen dafür. Für eine Kosten-Nutzen-Analyse sind abgestützte Funktionen jedoch notwendig, um die Konsequenzen daraus zu quantifizieren. Auf den daraus abzuleitenden Forschungsbedarf wird in Kapitel 4 noch eingegangen. Je nach daraus entstehenden Zustandsänderungen sind im Baustellenbereich folgende Attribute von Relevanz:

- Signalisierte Geschwindigkeit am Beginn der Baustelle (z.B. Auslastungsgrad: Engstelle der Leistungsfähigkeit; Sicherheitsniveau: mehr Unfälle durch inhomogenes Geschwindigkeitsniveau)
- signalisierte Geschwindigkeit v_{signal} im Baustellenbereich (z.B. Auslastungsgrad: konstante Leistungsfähigkeit; Sicherheitsniveau: weniger Unfälle durch homogenes Geschwindigkeitsniveau)
- Temporäre Veränderung der Fahrstreifenanordnung (z.B. Sicherheitsniveau: Unsicherheiten des Strassennutzers im Bereich des übergeleiteten Fahrstreifens)
- Temporäre veränderte Anzahl der Fahrstreifen n_{FS} und eventuell fehlender Pannestreifen (z.B. Auslastungsgrad: Engstelle der Leistungsfähigkeit; Sicherheitsniveau: mehr Unfälle durch inhomogenes Geschwindigkeitsniveau)
- Temporäre Verringerung der Breite der Fahrstreifen $b_{FS,i}$ (z.B. Sicherheitsniveau: Unsicherheiten des Strassennutzers Fahrstreifen mit verengter Breite)
- Temporäre Veränderung der räumliche Linienführung (*Längsneigung i* , *Kurvigkeit KU* , *Sichtweiten S* , *Querneigung p*) (z.B. Sicherheitsniveau: Unsicherheiten des Strassennutzers im Bereich von Verschwenkungen, Überleitungen, Aus-/Einfahrten im Baustellenbereich)

Bei der Durchführung der Massnahmen ergeben sich als Output für den Strassenbetreiber in der Regel Massnahmenkosten. Zusätzlich entstehen Informationen, welche er wiederum in seinen Planungsprozessen integrieren kann (Wirkungsanalyse von Massnahmen). Diese Informationen dienen der Verbesserung der Planung. Hierzu zählen neben den bautechnischen auch die verkehrstechnischen Auswirkungen zur Durchführung von Massnahmen. Von grossem Interesse sind dabei alle Informationen über die zu erwartenden Auswirkungen von Baustellen. Dies gilt in Bezug auf Strassenbetreiber (in erster Linie Massnahmenkosten), Strassennutzer (z.B. zusätzliche Reisezeit- und Unfallkosten)

und Dritte (z.B. Lärm- oder Schadstoffbelastung und daraus resultierende Gesundheitskosten). Bei der Ermittlung der Auswirkungen auf den Strassennutzer erfolgt eine Betrachtung von Input, Output und Zuständen des Systems, welche den Strassennutzer unmittelbar betreffen. Der Strassennutzer erbringt schematisch betrachtet Input in Form von Energie in das System ein. Diese wird durch seine Mobilität im Autobahnnetz mit seinem motorisierten Fahrzeug von seiner Ausgangsposition (Quelle) bis zu seinem Zielort (Ziel) erzeugt. Zusätzlich spielt sein Fahrverhalten und die Achslast (Kategorien Masse und Energie) eine grosse Rolle.

Indem der Strassennutzer einen Input erbringt, erfolgt eine Veränderung der vom Input betroffenen Zustände der Strassenverkehrsanlage. Die Zustandsänderung der Strassenverkehrsanlage wird durch den Input der gesamten Umgebung hervorgerufen, das heisst Beeinflussung durch Wetter und Klima, Erhaltungsmaßnahmen, Verkehrsbelastung und -verhalten inklusive der Schwerverkehrsbelastung. Aus dieser Zustandsänderung resultiert ebenfalls ein Output mit einer Bedeutung für den Strassennutzer. Dadurch werden folgende relevante Kenngrössen verändert [vgl. 71]:

- Verringerung der mittleren Geschwindigkeit v_i und in Folge dessen Verlängerung der Reisezeit $t_{reise,i}$
- Wahl einer Ausweichroute und damit Veränderung der Länge des Reiseweges $s_{reise,i}$ sowie der Reisezeit $t_{reise,i}$
- Erhöhte Dauer des Fahrzeugbetriebs und dadurch höherer Kraftstoffverbrauch und erhöhter längen- und zeitabhängigen Verschleiss (aus Strassenzustand, Reiseweg und Reisegeschwindigkeit)
- Verringerte Verkehrssicherheit infolge erhöhtem Auftreten und grösserer Schwere (Anzahl Verletzte V , Getötete G bzw. Verunfallte VU) von Unfällen U

Dritte sind ebenfalls durch die Zustandsveränderung der Strassenverkehrsanlage betroffen. Dieser lässt sich durch die folgenden für diese Gruppe relevanten Kenngrössen ausdrücken [vgl. 71]:

- Schwerere bzw. häufigere Unfallschäden (mit Auswirkungen auf die Allgemeinheit)
- Erhöhter Schadstoffausstoss infolge des Verkehrs oder infolge der Durchführung von Massnahmen und daraus resultierende Auswirkungen (Schadstoffbelastung) auf Dritte
- Erhöhter Ausstoss von Kohlendioxid und anderen schädlichen Gasen und daraus folgende Klimabelastung
- Höhere Lärmemission infolge des Verkehrs oder der Durchführung von Massnahmen und daraus resultierende Auswirkung (Lärmimmission) auf Dritte

Damit sind alle Attribute für die Strassenverkehrsanlage an Autobahnen systematisch unter Berücksichtigung der relevanten Gliederung der Umgebung im Bereich der Baustellenplanung definiert. In einem nächsten Schritt werden die Zusammenhänge der Attribute (nach Ropohl [41] die Funktionen) aufgezeigt.

2.2.5 Funktionen aus dem Verkehrsgeschehen

Im Folgenden erfolgt eine Ableitung der relevanten Attribute und deren Zusammenhänge bzw. Funktionen zueinander für die Baustellenplanung aus der verkehrstechnischen Forschung. Die hier definierten Kennrössen können dann, je nach Ansatz im Modell direkt berücksichtigt werden.

Verkehrsbelastung

Für eine Beschreibung der vorhandenen Verkehrsbelastung existieren verschiedene Ansätze im Bereich der Verkehrstechnik. Generell existieren für eine erste Beschreibung der täglichen Verkehrsbelastung zwei Kenngrössen, welche als ein tägliches Jahresmittel angegeben werden und einen Hinweis über die verkehrstechnische Bedeutung dieses Querschnitts geben. Der durchschnittliche tägliche Verkehr DTV gibt die mittlere Verkehrsbelastung aller Tage über das Jahr an. Der durchschnittliche werktägliche Verkehr

DWV ist ein jährliches Mittel über alle Werkzeuge Montag bis Freitag des Jahres [72]. Eine sehr grobe Abschätzung der stündlichen Verkehrsmenge auf den Autobahnen erfolgt anhand von Dauerkurven der Verkehrsbelastung (vgl. Abb. 2.14). Daraus wird es möglich, eine Aussage über die Höhe der Verkehrsbelastungen in den meist belasteten Stunden des Jahres zu treffen. Diese Dauerkurven geben jedoch keine Auskunft, wann diese Verkehrsbelastung aufgetreten ist oder bei einer Prognose, auftreten wird. Für die Ermittlung der Nutzerkosten infolge der Ausführung einer Baustelle zu einem bestimmten Zeitpunkt sind die Angaben über die dabei jeweilig auftretende Verkehrsbelastung von Bedeutung.

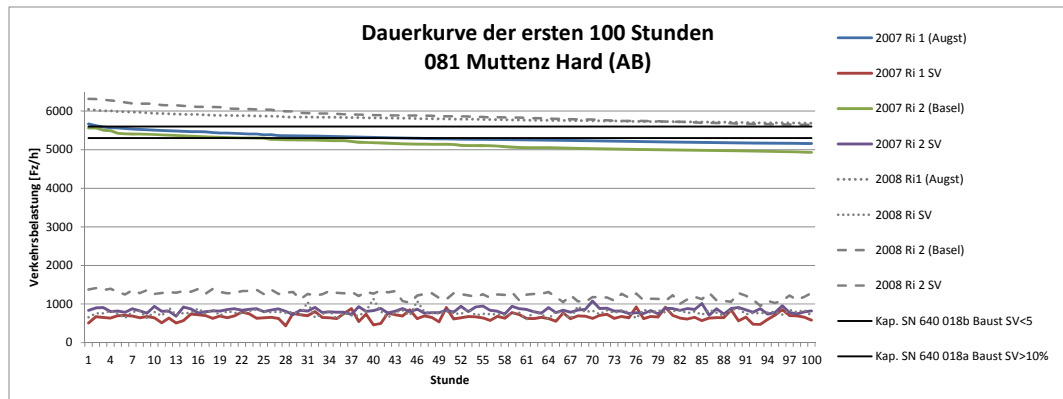


Abb. 2.14 Dauerkurve der ersten 100 Stunden des Gesamtverkehrs je Richtung für die Jahre 2007/2008 aus Daten der Zählstelle 081 MuttENZ Hard (AB) und zugeordnetem Schwerverkehrsanteil (SV)

Diese Dauerkurven können aus den Angaben der *DTV* - bzw. *DWV* -Kenngrossen gemäss dem *k*-Wert-Verfahren der FGSV [71] abgeschätzt werden. Dabei erfolgt eine Unterscheidung nach verschiedenen Fahrzweckgruppen, wie Normalwerkzeuge, Urlaubstage, Sonn- und Feiertage sowie der Fahrbahnquerschnitte. Es wird ein gleichartiger Verkehrsablauf für verschiedene definierte Gruppen angenommen, welche sich hinsichtlich Fahrzweckgruppe, Strassentyp sowie Gesamt- und Güterverkehrsbelastung unterscheiden. Dafür sind für jede dieser Kombinationen fünf *k*-Werte, d.h. *DTV* -Anteile für definierte Stunden der Dauerkurve (30., 70., 200., 700. und letzte der nach Verkehrsaufkommen absteigend sortierten Stunde im Jahr), festgelegt. Durch eine Multiplikation der *k*-Werte mit der *DTV* -Kenngrosse werden die Verkehrsbelastungen der jeweiligen Stunde errechnet. Mit Hilfe einer Aufteilung auf die vorhandenen Fahrrichtungen kann dann die Verkehrsbelastung je Richtung und definierter Stunde bestimmt werden. Diese Methode eignet sich für eine grobe Abschätzung der Verkehrsbelastung. Für die Baustellenplanung sind jedoch mindestens wochentagspezifische Informationen zur Verkehrsbelastung notwendig.

Schon Dietrich [73] verwies darauf, dass eine Ableitung der Verkehrsbelastung für die Schweiz mit seinen örtlich sehr unterschiedlichen zeitlichen und strukturellen Eigenheiten individuell erfolgen muss. Dabei kann zum Teil auf die vorhandenen Zählstellen der Hochleistungsstrassen zurückgegriffen werden. Diese liefern relativ präzise Verkehrsdaten. Unter dem Einsatz von typisierten Ganglinien wird es möglich, auch in Streckenbereichen ohne festinstallierte Zählstellen auf der Grundlage von Kurzzeitmessungen realitätsnahe Aussagen über die Verkehrsbelastung zu treffen. Die bisherige Erarbeitung von Ganglinien erfolgte jedoch nicht richtungstrennt und unter Berücksichtigung eines definierten Normalzeitbereichs frei von winterlichen Einflüssen und ausserhalb der Ferienzeit [74].

Bernard [75] verdeutlicht in Anlehnung an frühere Erkenntnisse [76] die Bedeutung der Richtungstrennung und der Verkehrszusammensetzung für die Erarbeitung realitätsnaher typisierten Ganglinien. Auch zeigte Bernard [75] auf, dass die Typisierung nicht mehr eindeutig zu Reisezweck, Ortstyp oder Sprachregion zuordenbar ist. Im Rahmen der Forschung zur Überprüfung der schweizerischen Ganglinien wurden analog zu Brilons Forderung [77] alle Tage des Jahres in die Auswertung integriert, ohne einen

Normalzeitbereich zu definieren. Dadurch wird der Kritik von Brilon [77] hinsichtlich einer fehlenden Signifikanz der bisherigen typisierten Ganglinien Rechnung getragen. Infolge der Auswertung der schweizerischen Verkehrsdaten der Jahre 2005 und 2006 im Rahmen einer Clusteranalyse stehen nun in der Schweiz Ganglinien auf der Grundlage der ganzjährigen Verkehrsbelastung zur richtungsgenauen Bestimmung der Verkehrsdaten zur Verfügung [72; 75].

Ein weiterer Ansatz ist die Modellierung der Verkehrsnachfrage durch Umlegungsverfahren. Hierbei können gestützt durch Verkehrsbefragungen und Einzelmessungen Quell-Ziel-Matrizen ermittelt werden, welche in einem gegebenen Strassennetz und verschiedenen vorhandenen (Ist-Zustand) oder angenommenen (Prognose-Zustand) Randbedingungen die Verkehrsbelastung hinsichtlich der Routenwahl simulieren. Das Ergebnis aus dieser Simulation ist unter anderem die Reisezeit der Strassennutzer. Die Modellierung der Verkehrsnachfrage geht zurück auf Wardops Gleichgewichtsprinzip [62] nachdem in einer Situation des Gleichgewichts in einem Netzwerk die Reisezeit auf allen durch die Simulation benutzten Routen zwischen jedem Quell-Ziel Paar gleich ist und keine noch nicht benutzte Verbindungsrouten mit geringerer Reisezeit existiert. Diese Gleichgewichtssituation für ein Strassennetz bedeutet, dass kein Nutzer seine Reisezeit durch eine individuelle Routenänderung verringern kann. Die praktische Erfahrungen zeigen, dass diese Art von Modellierung in gesättigten Systemen (z.B. Autobahnen in Agglomerationsgebieten) derzeit nur bedingt anwendbar sind. Hier besteht im Bereich der Inputparameter zur Verkehrsumlagerung weiterhin Forschungsbedarf. Der grosse Vorteil dieser Modellierung ist die Abbildung der netzweiten Auswirkungen einer Baustelle für den Strassennutzer [vgl. 78].

Leistungsfähigkeit

Ein klassischer Ansatz zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit ist es, eine fest definierte Kenngrösse anzunehmen. Dieser wurde aus der Empirie unter definierten Randbedingungen ermittelt. Im deutschsprachigen Raum sind diese in verschiedenen Richtlinien für die freie Strecke definiert [79; 80].

Abb. 2.15 Leistungsfähigkeit cap [Kfz/h] für eine zweistreifige Autobahn in Abhängigkeit von zulässiger Höchstgeschwindigkeit v_{zul} , Schwerverkehrsanteil SVA und Längsneigung i gemäss [57]

	zulässige Geschwindigkeit v_{zul}								
	120 km/h			100 km/h			80 km/h		
	Längsneigung i								
Schwerverkehrsanteil SVA	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%
≤ 5%	4000	3800	3550	4000	3800	3600	4000	3800	3650
5...15%	3800	3500	3150	3800	3600	3350	3800	3700	3450
15...25%	3600	3200	2800	3600	3400	3000	3600	3500	3200

Abb. 2.16 Leistungsfähigkeit cap [Kfz/h] für eine dreistreifige Autobahn in Abhängigkeit von zulässiger Höchstgeschwindigkeit v_{zul} , Schwerverkehrsanteil SVA und Längsneigung i gemäss [57]

	zulässige Geschwindigkeit v_{zul}								
	120 km/h			100 km/h			80 km/h		
	Längsneigung i								
Schwerverkehrsanteil SVA	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%
≤ 5%	5800	5450	5050	5800	5600	5250	5800	5650	5500
> 5...15%	5450	5050	4500	5550	5250	4950	5600	5500	5200
> 15...25%	5100	4600	4000	5400	5000	4300	5500	5300	4550

Für die Schweiz erfolgt die Angabe der Leistungsfähigkeit von Autobahnen der freien Strecke in der Schweizer Norm [57] für zweistreifige und dreistreifige Autobahnen unter der Gliederung von zulässigen Geschwindigkeiten, Längsneigungen und verschiedenen Schwerverkehrsanteilen (vgl. Abbildungen 2.15 und 2.16).

Schon Dietrich [73] zeigte auf, dass die Leistungsfähigkeit keine feste Grösse ist und vorhandene fest definierte Leistungsfähigkeitsangaben [aus 81] zum Teil erheblich von den tatsächlich vor Ort herrschenden Verhältnissen abweichen können. Ponzlet [82] zeigte ebenfalls, dass die Leistungsfähigkeit stochastischen Schwankungen unterliegt, was bei genauer Betrachtung der Definition (vgl. Kapitel 2.2.4) und den darin enthaltenen Randbedingungen nicht anders zu erwarten ist.

Brilon [77] geht von einer Zufallsgrösse für die Kapazität aus. Zur Definition für das Erreichen der Kapazitätsgrenze bei vorhandener Verkehrsstärke in einem 5-Minuten-Intervall wird eine Grenzgeschwindigkeit von 70 km/h angenommen. Brilon [77] beschränkt sich dabei vorerst auf definierte Engstellen im deutschen Autobahnnetz. Regler [61] erweiterte die Untersuchungen um die Analyse von Abschnitten der freien Strecke. Diese Ergebnisse griff Bernard [67] auf und entwickelte analog zu Brilon ein Bemessungsverfahren für die schweizerischen Verhältnisse auf Basis der Fahrzeitverluste. Dabei erfolgte eine Definition der kritischen Geschwindigkeit für das Erreichen der Kapazität in einem 5-Minuten-Intervall von 2/3 der signalisierten Geschwindigkeit.

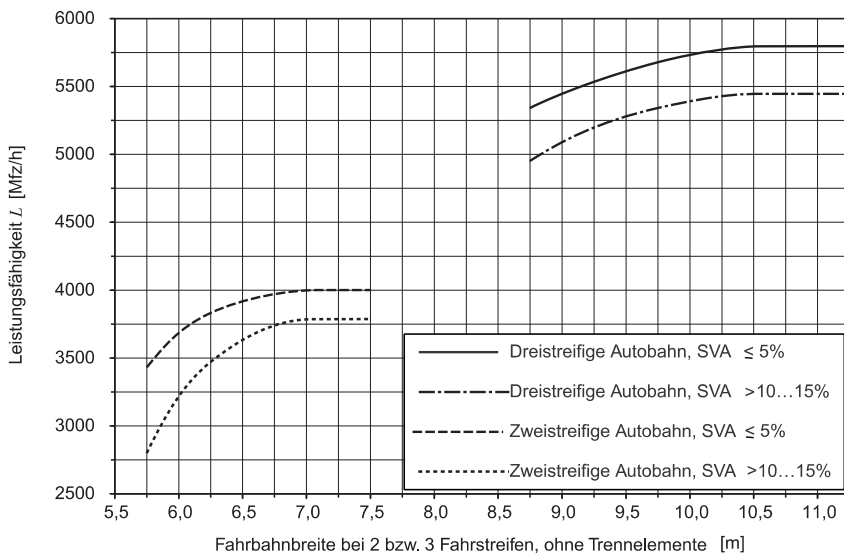


Abb. 2.17 Leistungsfähigkeit von HLS-Engstellen in Abhängigkeit von Fahrstreifenbreite, Schwerverkehrsanteil und Fahrstreifenzahl (schematisiert) [57]

Erste Überlegungen in der Schweiz zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit im Baustellenbereich auf Autobahnen wurden ansatzweise durch Werdin [83] angestellt. Die folgende Abbildung 2.17 zeigt die Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der Fahrbahnbreite für verschiedene Schwerverkehrsanteile. Dabei wurden je für zweistreifige und dreistreifige Autobahnen die Entwicklung der Leistungsfähigkeit angegeben. Werdin [83] hält fest, dass die empirisch ermittelten Leistungsfähigkeiten zum Teil viel höher liegen als in den Arbeiten von Ressel [84], welche in Zusammenhang mit der Leistungsfähigkeit im Baustellenbereich immer wieder Erwähnung finden.

Geschwindigkeitsverlauf

Grundsätzlich ist der Geschwindigkeitsverlauf beeinflusst von der signalisierten Geschwindigkeit. Im Gegensatz zu Deutschland (unbegrenzt) oder Österreich (130 km/h) existiert in der Schweiz ein generelles Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h. Damit ist die freie, das heisst von anderen Fahrzeugen unbeeinflusste, Geschwindigkeit der Fahrzeuge auf den schweizerischen Autobahnen niedriger als in diesen Ländern. Die Zusammenhänge unterscheiden sich damit nicht grundlegend, jedoch unter Umständen

in ihrer quantitativen Aussage. Aus diesem Grund sollten vordergründig Zusammenhänge zwischen Verkehrskenngrößen an schweizerischen Verkehrsdaten überprüft und quantifiziert werden.

Mit steigender Verkehrsstärke nimmt die Geschwindigkeit ab. Zusätzlich spielen der Anteil des Schwerververkehrs und die Längsneigung eine entscheidende Rolle. Dieser Zusammenhang wurde durch Werdin [57; 83] gezeigt. Der Geschwindigkeitsverlauf ergibt sich für die verschiedenen Tempolimiten 80/100/120 km/h bei dreistreifigen Autobahnen mit einem Schwerververkehrsanteil von $SVA \leq 5\%$ und einer Längsneigung von $i < 2\%$ (vgl. Abb. 2.18) wie folgt.

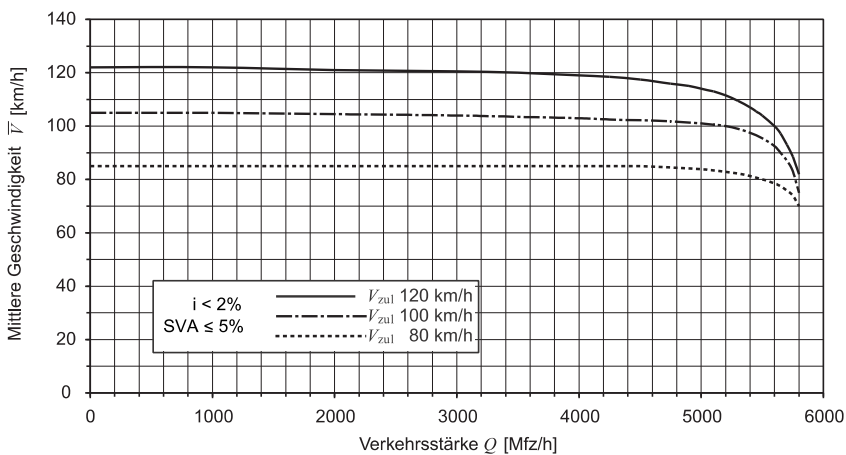


Abb. 2.18 Q-V-Diagramm für eine dreistreifige Autobahn und für verschiedene zulässige Höchstgeschwindigkeiten V_{zul} , bei einem Schwerverkehrsanteil $SVA \leq 5\%$ und einer Steigung $i < 2\%$ [57; 83]

Eine weitere Möglichkeit zur Abschätzung des Geschwindigkeitsverlaufs in Abhängigkeit des Auslastungsgrads wurde durch Bernard [67] wiederum als Zufallsvariablen für schweizerische Autobahnen aufgezeigt. Neben der mittleren von Zusammenbrüchen nicht beeinflussten Geschwindigkeit wird auch die dazugehörige Geschwindigkeit bei einem Zusammenbruch ermittelt. Dies geschieht analog zur Leistungsfähigkeit als Zufallsvariable aus den Daten von Zählstellen der schweizerischen Autobahnen. Dabei stützt sich Bernard [67] auf die BPR (Bureau of Public Roads)-Funktion [85] angepasst auf ein Zeitintervall von 60 Minuten (vgl. BPR-Funktion (12)).

$$v_m = \frac{v_0}{1 + \alpha \cdot r_{60}^\beta} \quad (11)$$

mit	v_m	mittlere Geschwindigkeit
	v_0	freie Geschwindigkeit
	r_{60}	stündlicher Auslastungsgrad
	α, β	Parameter der BPR-Funktion

Die freie Geschwindigkeit v_0 sowie die Parameter α und β der BPR-Funktion wurden von Bernard [67] anhand der unterschiedlichen Zählstellendaten jeweils für die Fahrzeugklassen mIV und SV sowie die Autobahntypen mit 100 und 120 km/h zulässiger Höchstgeschwindigkeit geschätzt.

Reisezeit

Die Reisezeit, als direkte Folge der gefahrenen Geschwindigkeit zwischen Quell- und Zielort, ist eine grundlegende Bewertungsgrösse im Zusammenhang mit den Auswirkungen auf den Strassenutzer. Im Rahmen dieses Projektes ist nur die reine Fahrzeit im Autobahnnetz relevant. Sie gehört zum Mengengerüst im Bereich der Kosten-Nutzen-Analyse des Verkehrs. Das Verhalten des Strassenutzers wird durch die zu benötigende Reisezeit beeinflusst. Dieser Einfluss wird bei Verkehrssimulationen genutzt, um das

Verhalten des Strassennutzers in einem Modell zu definieren. Gleichzeitig wird es möglich, durch eine monetäre Definition eine Vergleichbarkeit innerhalb des Wertegerüsts zu anderen Kostengrössen herzustellen (vgl. Kapitel 2.3.2).

Für die Ermittlung der Reisezeit existieren sehr viele Modelle, welche sich zum Teil auf eine Form der sogenannten Kapazitätsbeschränkungsfunktion (CR-Funktion) stützen [86]. Die bekannteste Form wurde durch das Bureau of Public Roads (BPR) – jetzt Federal Highway Administration des U.S. Department of Transportation definiert [85].

$$t(q) = t_0 \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q}{cap} \right)^\beta \right) \quad (12)$$

mit	$t(q)$	Reisezeit in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung
	$t_0 = \frac{s}{v_m}$	freie unbehinderte Reisezeit in einer Autobahnstrecke s
	q	stündliche Verkehrsbelastung
	cap	vorhandene stündliche Leistungsfähigkeit
	α, β	Parameter der BPR-Funktion ($\alpha = 0.15, \beta = 4$ [33])

Je nach Zustand haben noch verschiedene Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche und die Linienführung Einfluss auf die Geschwindigkeit und damit auch auf die Reisezeit. Gerade bei einer Betrachtung im Teilsystem Fahrbahnen über einen Zeitraum von 30–40 Jahren gewinnen diese Aspekte an Bedeutung [vgl. 33; 87]. Ein schlechter Zustand der Fahrbahnoberfläche reduziert die mittlere Geschwindigkeit und führt zu einer erhöhten Reisezeit. Auf Autobahnen erfolgt in der Regel schon im Vorfeld einer infolge schlechten Zustands notwendigen Realisierung von Erhaltungsmassnahmen eine Reduktion der signalisierten Geschwindigkeit durch den Strassenbetreiber. Damit soll einer eventuellen Gefährdung der Verkehrssicherheit vorgebeugt werden. Dies ist für einen Vorher-Nachher-Vergleich im Rahmen der Erhaltungsplanung der Teilsysteme von Bedeutung.

Für eine Betrachtung der Baustellenperiode sind die Einflüsse der Fahrbahnoberfläche während der Baustellendauer nicht relevant. Von Bedeutung sind die reduzierten Fahrgeschwindigkeiten infolge Baustellensignalisation. In der Regel beträgt die signalisierte Geschwindigkeit im Baustellenbereich 80 bzw. 100 km/h in Sonderfällen 60 km/h [vgl. 53, Tabelle 1]. Mit der Annahme der mittleren Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung für diese Fälle wäre eine Berechnung möglich. Zur Zeit fehlen jedoch ausreichend abgestützte Erkenntnisse für eine Quantifizierung der Kennwerte des Verkehrs im Baustellenbereichs in der Schweiz.

Berücksichtigung von Stau und stauähnlichen Ereignissen

Bei den bisherigen Betrachtungen wird immer eine definierte Strecke mit entsprechenden Attributen für die Ableitung der benötigten verkehrstechnischen Grundlagen herangezogen. Es stellt sich jedoch die Frage, welche Folgen eine Überlastung für weiter stromaufwärts liegende Strecken hat. Gleiches gilt für Stellen im Autobahnnetz, an denen Engstellen, d.h. Übergänge zu einer verminderten Leistungsfähigkeit vorhanden sind. Diese entstehen durch dauernd oder temporär vorhandene Unstetigkeiten, wie ein Fahrstreifenabbau, ein Unfall bzw. eine Panne oder eine Baustelle. An diesen Stellen führt ein hoher Auslastungsgrad X_i durch die Leistungsfähigkeitsverringering zu einem erhöhten Staurisiko.

In der Schweiz erfolgt für die Autobahnen eine Definition von Stau und stockender Verkehr im Sinne der Verkehrsinformation durch die entsprechende Schweizer Norm [88]. Verkehrssituationen auf Autobahnen werden demnach als Stau bezeichnet, wenn die stark reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeit während mindestens einer Minute unter 10 km/h liegt und der Verkehr häufig zum Stillstand kommt. Weiter werden Verkehrssituatio-

nen als stockender Verkehr bezeichnet, wenn die stark reduzierte Fahrzeuggeschwindigkeit während mindestens einer Minute unter 30 km/h liegt oder es teilweise zu kurzem Stillstand kommt.

Für die Berechnung der zusätzlichen Reisezeit infolge von Stau- oder stauähnlichen Ereignissen werden im Rahmen dieser Forschungsarbeit makroskopische Modelle herangezogen.

Makroskopisch deterministische Warteschlangenmodelle

Dieser deterministische Modellansatz beschränkt sich auf eine rein zeitliche Betrachtungsweise unter Verwendung makroskopischer Verkehrskenngrößen. Zudem werden stochastische Einflüsse vernachlässigt und konstante Verkehrszustände über definierte Zeitabschnitte angenommen. Dadurch treten Stauungen erst bei einem Auslastungsgrad X_i grösser 1 auf. Nach Ressel [84] wird es möglich, durch die zeitliche und räumliche Diskretisierung des gestauten Verkehrsablaufs ein mathematisches Modell abzuleiten. In Abbildung 2.19 sind Verkehrsbelastung und Leistungsfähigkeit am Anfang der Engstelle als Summenlinie aufgetragen.

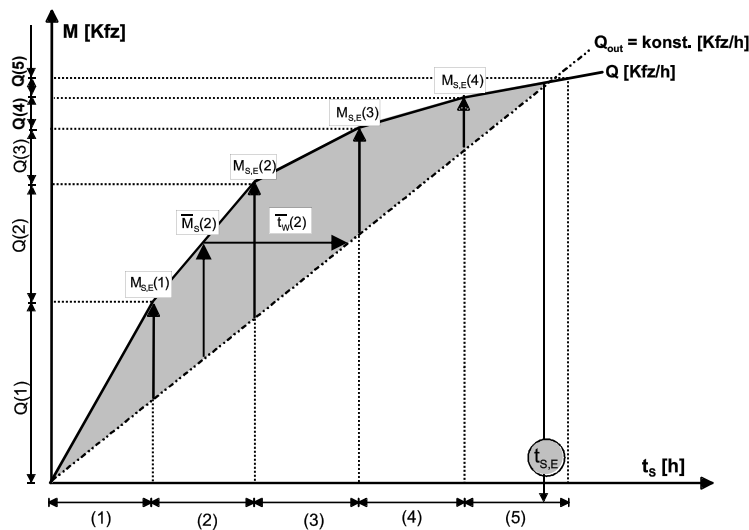


Abb. 2.19 makroskopisch deterministisches Warteschlangenmodell zur Bestimmung von Rückstaulängen [vgl. 89; 90]

Er zeigt damit die unterschiedlichen Schritte der Berechnung auf. Die mittlere Warteschlange der im Stau befindlichen Fahrzeuge einer Stunde, unter der Voraussetzung, dass der Stau über diese Stunde anhält, berechnen sich zu

$$\bar{M}_S(t_S) = M_{S,A}(t_S) + \frac{1}{2} \cdot (Q(t_S) - cap_{site}) \tag{13}$$

$$M_{S,A}(t_S) = Q(t_{S-1}) - cap_{site} \tag{14}$$

- mit \bar{M}_S mittlere Warteschlange der Fahrzeuge
- $M_{S,A}$ Warteschlange am Anfang der Stunde
- Q Verkehrsbelastung
- cap_{site} Leistungsfähigkeit der Engstelle
- t_S volle Staustunde

Die Warteschlange am Ende einer Stunde ist

$$M_{S,E} = M_{S,A} + (Q - cap_{site}) \tag{15}$$

- mit $M_{S,E}$ Warteschlange am Ende der Stunde

Fällt die Verkehrsbelastung unter die Leistungsfähigkeit der Engstelle, beginnt der Abbau der Warteschlange. Die mittlere Warteschlange für die letzte Staustunde, in der die Stauauflösung stattfindet ergibt sich zu

$$\bar{M}_s = M_{s,A} \cdot t_{s,E} = \frac{M_{s,A}^2}{|Q - cap_{site}| \cdot 2} \tag{16}$$

$$t_{s,E} = \frac{M_{s,A}}{|Q - cap_{site}|} \tag{17}$$

mit	\bar{M}_s	mittlere Warteschlange der Fahrzeuge
	$M_{s,A}$	Warteschlange am Anfang der Stunde
	Q	Verkehrsbelastung
	cap_{site}	Leistungsfähigkeit der Engstelle
	$t_{s,E}$	Zeitpunkt des Stauendes in der letzten Stunde

Die gesamte Wartezeit aller Fahrzeuge während der Staudauer ergibt sich zu

$$T_w = \sum_{s=1}^n \bar{M}_s(t_s) \tag{18}$$

mit	\bar{M}_s	mittlere Warteschlange in Anzahl der Fahrzeuge je Staustunde
	T_w	Gesamtwartezeit aller Fahrzeuge

Die mittlere Rückstaulänge einer Stunde ergibt sich zu

$$\bar{L}_s(t_s) = \frac{\bar{M}_s(t_s)}{k} \tag{19}$$

mit	\bar{L}_s	mittlere Rückstaulänge der Staustunde
	k	Verkehrsdichte

Für eine Abschätzung der Verkehrsdichte stellt Ressel [84] die Verkehrsdichten in Abhängigkeit des Schwerverkehrsanteils und der Verkehrsführung im Engstellenbereich dar.

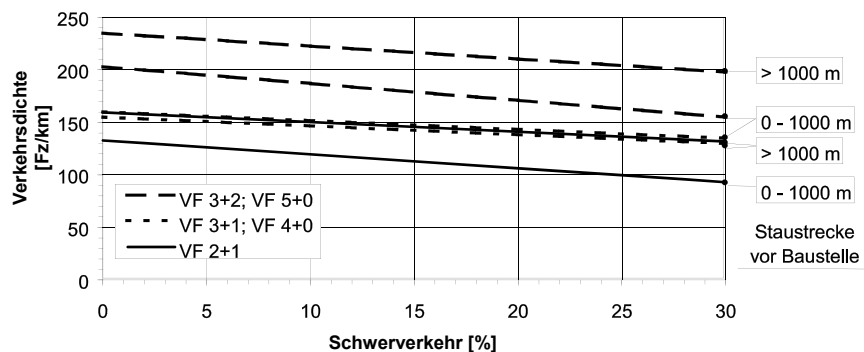


Abb. 2.20 mittlere Verkehrsdichte im Stau in Abhängigkeit des Schwerverkehrsanteils [vgl. 84; 89]

Hinsichtlich der von Brilon [77] angemahnten fehlenden Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung des Staus wird durch Beckmann [90] mit einer Ergänzung der Gleichungen

Abhilfe geschaffen. Die mittlere Staulänge und mittlere Wartezeit je Fahrzeug ergibt sich demnach zu

$$\bar{L}_{S,korr}(t_S) = \frac{\bar{M}_S(t_S)}{k_{con}} + \bar{L}_{S,korr}(t_S) \cdot \frac{k(t_S)}{k_{con}} = \frac{\bar{M}_S(t_S)}{k_{con} - k(t_S)} \quad (20)$$

mit $\bar{L}_{S,korr}$ korrigierte Rückstaulänge am Ende einer Stautunde
 k_{con} Verkehrsdichte im Staubereich
 k Verkehrsdichte

$$\bar{t}_{W,korr} = \frac{\bar{M}_S(t_S) \cdot \left(1 + \frac{\bar{L}_{S,korr}(t_S)}{v(t_S)}\right)}{cap_{site}} \quad (21)$$

mit \bar{M}_S mittlere Warteschlange der Fahrzeuge je Stautunde
 $\bar{t}_{W,korr}$ mittlere korrigierte Wartezeit je Fahrzeug

Makroskopisch stochastische Warteschlangenmodelle

Brilon [77] nutzt in diesem Zusammenhang die Erkenntnis, dass stark ausgelastete stochastisches Warteschlangensysteme sich ähnlich der deterministischen verhalten. Dabei verlieren die „Details der Zufälligkeiten wie geringe Unterschiede der Zeitlücken am fließenden Strom“ [77] an Bedeutung. Es erfolgt die Verwendung der Transformationstechnik von Kimber [91]. Danach erfolgt die Verwendung des makroskopisch deterministischen Modells durch Einsetzen in das mikroskopisch stochastische Modell. Dadurch ergibt sich die Staulänge zu

$$\bar{M}_{con}(t_S) = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{A^2 + B} - A \right) \quad (22)$$

$$A = \left(1 - \frac{q}{cap}\right) \cdot cap \cdot t_S + 1 - M_{con,S-1} \quad (23)$$

$$B = 4 \cdot \left(M_{con,S-1} + \frac{q}{cap} \cdot cap \cdot t_S \right) \quad (24)$$

mit \bar{M}_{con} mittlere Warteschlange der Fahrzeuge in t
 $M_{con,S-1}$ mittlere Warteschlange der Fahrzeuge in t_0
 q Verkehrsbelastung
 cap Leistungsfähigkeit

Makroskopisch stochastisches Modell

Hess [92] entwickelte für die Planung von Tagesbaustellen ein makroskopisch stochastisches Modell. Dies nutzt analog zu Bernard [67] die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit (vgl. Leistungsfähigkeit). Damit können Aussagen getroffen werden, wann und auch in welchem Zeitfenster die Ausführung von Tagesbaustellen ohne grössere Überlastungserscheinungen des Verkehrsflusses erfolgen sollte. Er formuliert die Überlastungswahrscheinlichkeit ebenfalls als Wahrscheinlichkeit, dass die Differenz zwischen Leistungsfähigkeit und Verkehrsbelastung und damit die Reserveleistungsfähigkeit gleich Null oder negativ wird. Jedoch definiert er im Gegensatz dazu die Leistungsfähigkeit im Bereich der Tagesbaustelle, als diejenige Verkehrsbelastung nach einem Zusammenbruch (und somit nicht, wie üblich, die grösstmögliche Verkehrsbelastung vor einem Zusammenbruch),

welche als Abfluss aus dem Stau heraus realisiert werden kann.

Makroskopische deterministische Modelle nach Kontinuitätstheorie

Die Grundlage für diese Modelle stellt die Beschreibung des Verkehrsflusses anhand der Kontinuitätsgleichung aus der Hydrodynamik und Gastheorie, bei der die Erhaltung der Fahrzeugzahl vorausgesetzt wird [93]. Lighthill und Whitham [64] beschrieben damit die Ausbreitung von kinematischen Wellen (Stauwellen) und diskontinuierliche Dichteänderungen im Verkehrsfluss. Unter der Voraussetzung der Fluss-Dichte-Beziehung gilt folgende Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial}{\partial t} k(s,t) + \frac{\partial}{\partial s} q(s,t) = 0 \quad (25)$$

mit k Verkehrsdichte
 q Verkehrsbelastung

Die Stauwellengeschwindigkeit beim Zusammentreffen zweier unterschiedlicher Verkehrszustände berechnet sich aus

$$u_{12} = \frac{q_2 - q_1}{k_2 - k_1} \quad (26)$$

mit u_{12} Stosswellengeschwindigkeit zwischen Verkehrszuständen 1 und 2
 q_1 Verkehrsbelastung im Verkehrszustand 1
 k_1 Verkehrsdichte im Verkehrszustand 1
 q_2 Verkehrsbelastung im Verkehrszustand 2
 k_2 Verkehrsdichte im Verkehrszustand 2

Überträgt man dies auf eine Engstelle, z.B. eine Baustelle im Autobahnnetz, unter der Annahme, dass die Verkehrsbelastung der freien Strecke die Leistungsfähigkeit des Baustellenquerschnitts überschreitet, so entsteht eine Stosswelle. Diese wandert stromaufwärts. Dabei wird von einer verminderten Leistungsfähigkeit ausgegangen. Das heisst, es fließen an der Engstelle zu Beginn der Baustelle kontinuierlich Fahrzeuge ab. Tritt ein neuer Zustand ein mit einer Verkehrsbelastung unter der Leistungsfähigkeit der Baustelle, entsteht eine zweite Stosswelle, welche sich in Verkehrsrichtung d.h. stromabwärts bewegt bis Auflösung des Staus. Nach Beckmann [90] berechnet sich die Staulänge und die zum Zeitpunkt t_i nach

$$\begin{aligned} L_{con}(t_i) &= -\frac{\Delta q(t_i)}{\Delta k(t_i)} \cdot (t_i - t_{i-1}) + L_{con}(t_{i-1}) \\ &= -\frac{q(t_i) - cap_{con}}{k(t_i) - k_{con}} \cdot (t_i - t_{i-1}) + L_{con}(t_{i-1}) \end{aligned} \quad (27)$$

$$t_{TT.con}(t_i) = L_{con}(t_i) \cdot \left(\frac{1}{v_{con}} - \frac{1}{v(t_i)} \right) \quad (28)$$

mit $L_{con}(t_i)$ Staulänge zum Zeitpunkt t_i
 $t_{TT.con}(t_i)$ Verlustzeit eines Fahrzeugs zum Zeitpunkt t_i
 $q(t_i)$ Verkehrsbelastung der freien Strecke zum Zeitpunkt t_i
 $k(t_i)$ Verkehrsdichte der freien Strecke zum Zeitpunkt t_i

$v(t_i)$	Geschwindigkeit der freien Strecke zum Zeitpunkt t_i
cap_{con}	Leistungsfähigkeit der Engstelle
k_{con}	Verkehrsdichte im Stau vor der Engstelle
v_{con}	Geschwindigkeit im Bereich des Staus

Sicherheitsniveau auf Autobahnen

Die Schweizer Norm [69] gibt die verschiedenen Kenngrößen zur Quantifizierung der Verkehrssicherheit an. Dies beinhaltet ebenfalls folgende Raten für die verschiedenen Nationalstrassentypen (vgl. Abb. 2.21).

Abb. 2.21 Unfallraten, Verletztenraten und Getötetenraten auf Autobahnen und Autostrassen, ohne Dunkelziffer [69]

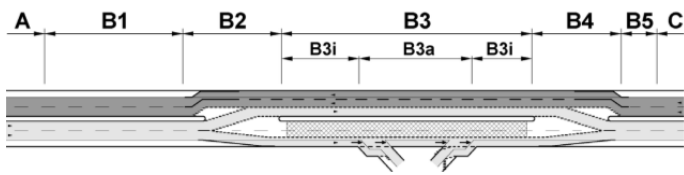
Strassenart	Unfallrate [Unfälle pro 10 ⁶ Fzkm]	Verletztenrate [Verletzte pro 10 ⁶ Fzkm]	Getötetenrate [Getötete pro 10 ⁶ Fzkm]
Autobahn 2-streifig	0.42	0.1574	0.0032
Autobahn 3-streifig	0.55	0.1632	0.0011
Autostrasse	0.51	0.2269	0.0105

Es hat sich gezeigt, dass das Sicherheitsniveau im Bereich von Autobahnbaustellen je nach örtlichen Randbedingungen unterschiedlich hoch ist. Es führen Fahrstreifenreduktionen, z.B. im Baustellenbereich, zu starken Leistungsfähigkeitseinbussen, wobei das Risiko von Verkehrsunfällen stark ansteigt. Spacek [94] konnte deutlich zeigen, dass Verkehrsführungen mit Fahrstreifenreduktionen im Baustellenbereich schon bei mittlerer Verkehrsbelastung zu einer überproportionalen Erhöhung der Unfallhäufigkeit führt.

Unterteilung in Längsrichtung

Ebenso konnte festgestellt werden, dass in einem Baustellenbereich unterschiedliche Sicherheitsniveaus vorzufinden sind. Aus diesem Grund wird, wie in Abbildung 2.22 dargestellt, eine Baustelle hinsichtlich ihrer Verkehrsführung in Längsrichtung in verschiedene Bereiche untergliedert.

Abb. 2.22 Unterteilung in Längsrichtung der Verkehrsführung an einer Autobahnbaustelle [94]



A	Unbeeinflusster Vorbereich
B1	Beschilderter Bereich mit Geschwindigkeitsbeschränkung
B2	Überleitungs- und/oder Verschwenkungsbereich am Anfang der Baustellen
B3	Baustelleninnenbereich, entspricht der Länge der Baustelle
B3i	Baustelleninnenbereich ohne Abschnitt mit Verzweigung oder Autobahnanschluss
B3a	Baustelleninnenbereich im Abschnitt einer Autobahnein- bzw. ausfahrt
B3b	Baustelleninnenbereich im Abschnitt mit Verzweigung
B4	Überleitungs- und/oder Verschwenkungsbereich am Ende der Baustellen
B5	Entflechtungsbereich nach der Baustelle
C	Unbeeinflusster Bereich nach der Baustelle

Unfallgeschehen in Längsrichtung

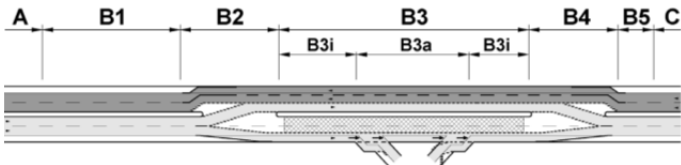
Betrachtet man die verschiedenen Betriebsformen der Verkehrsführung im Baustellenbereich stellt sich die Frage, welche Einflüsse und Zusammenhänge sich im Hinblick auf

das Sicherheitsniveau bzw. die Unfallhäufigkeit erkennen lassen. Der klassische Ansatz ist eine generelle Annahme eines erhöhten Unfallrisikos. Laube [95] spricht anfangs von einem um 50% höheren Risiko. Spätere Erkenntnisse von Spacek [94] zeigten, dass eine Baustelle auf einem Autobahnabschnitt an sich noch kein erhöhtes Unfallrisiko darstellt. Kritisch sind vor allem die Anfangs und zum Teil die Endbereiche einer Baustelle. Ein stark erhöhtes Unfallrisiko zeigt sich ebenfalls, wenn zusätzlich Ein- und Ausfahrten bzw. Anschlussstellen im Baustellenabschnitt vorhanden sind. Es konnte auch festgestellt werden, dass sich die Verkehrssicherheit im Gegensatz zu früheren Unfallauswertungen zum Teil stark verbessert hat. Zudem werden erhebliche Potentiale in einer besseren Gestaltung der Signalisation im Baustellenbereich gesehen [94; 96].

Eine Auswertung von Spacek [94] nach räumlicher Verteilung und Betriebsform (vgl. Kapitel 2.2.3) wird in der folgenden Abbildung 2.23 zusammengefasst. Dabei ist zu bemerken, dass die Unfallauswertungen auf einer nur sehr geringen Zahl von Baustellen basiert. Aus diesem Grund wurde auf eine Quantifizierung verzichtet.

Wie aus Abbildung 2.23 ersichtlich ist das Unfallgeschehen in den Bereichen A, B5 und C nicht beeinflusst. Nach Spacek [94] wurden folgende Erkenntnisse im Unfallgeschehen sichtbar. Im signalisierten Bereich mit Geschwindigkeitsbeschränkung (B1) zeigte sich eine zum Teil erhöhte Unfallhäufigkeit, welches auf ein inhomogenes Geschwindigkeitsniveau und häufige Fahrstreifenwechsel zurückgeführt wurde. Die Anschlussbereiche (B3a) bilden klare Schwerpunkte im Unfallgeschehen der Baustellenbereiche. Im baulich getrennten Innenbereich der Baustelle (B3i) dagegen, herrschte ein auffallend niedriges Unfallgeschehen. Eine erhöhte Unfallhäufigkeit im Bereich der Überleitungen (B2) konnte entgegen früherer Forschungsarbeiten [z.B. 97] nicht bestätigt werden.

Abb. 2.23 Auswertung des Unfallgeschehens nach Betriebsform und Gliederung in Längsrichtung des Baustellenbereichs [94]



	Gliederung in Längsrichtung Betriebsform			
	3/1	4/0	4/1	4/2
A	-/+	-/+	-/+	-/+
B1	erhöht	-/+	erhöht	erhöht
B2	-/+	-/+	-/+	-/+
B3	nachts erhöht	nachts erhöht	nachts erhöht	nachts erhöht
B3i	-/+	-/+	-/+	-/+
B3a	stark erhöht	erhöht	stark erhöht	erhöht
B3b	erhöht	erhöht	erhöht	erhöht
B4	-/+	-/+	erhöht	erhöht
B5	-/+	-/+	-/+	-/+
C	-/+	-/+	-/+	-/+

Neueste Untersuchungen in Deutschland [98] haben die Einteilung in Längsrichtung bestätigt und anhand von quantifizierten Kenngrößen konkretisiert. Dabei konnten die folgenden wesentlichen Ergebnisse festgestellt werden:

- Bereiche B3i sind unabhängig von ihrer Breite und der signalisierten Baustellengeschwindigkeit nicht auffällig, sondern bei Betrachtung der Unfallrate eher sicherer im Vergleich zur freien Strecke ohne Baustelle
- Auffällig und problematisch sind Überleitungen und Verschwenkungen innerhalb der Baustelle und Bereiche B3a bei Behelfsanschlussstellen

- Bereiche B4 bei vorhandenen Verschwenkungen und Aufheben der signalisierten Baustellengeschwindigkeit sind ebenfalls unfallauffällig

Für die verschiedenen Bereiche erfolgte eine Quantifizierung des Sicherheitsniveaus durch die Angabe der Unfallraten. Wie aus Abbildung 2.24 ersichtlich, herrscht in den Bereichen der Annäherung (B1) und dem Baustelleninnenbereich (B3i) ein unterdurchschnittliches Unfallgeschehen. Die erste Überleitung oder erste Verschwenkung (B2) sind ebenfalls unauffällig. Problematisch zeigen sich die Bereiche der Rückverschwenkungen (B4), Verschwenkungen innerhalb und Überleitungen innerhalb des Baustellenbereichs. Anschlussstellen sind ebenfalls nicht auffällig. Jedoch wurde im Bereich von Behelfsanschlussstellen ein sehr hohes Unfallgeschehen verzeichnet.

Damit stimmen diese Erkenntnisse von Bakaba [98] weitgehend mit denen von Spacek [94] überein. Bei diesem Vergleich von unterschiedlichen Baustellenbereichen mit der Anzahl Abschnitte und vorhandenen Unfällen mit Personen- (P) und Sachschäden (S) ist allerdings zu beachten, dass die mittleren Unfallraten (UR) auf deutschen Bundesautobahnen (BAB) ca. 3 Mal höher liegen, als auf schweizerischen Autobahnen. Weiterhin handelt es sich bei der Unfallkostenrate (UKR) um eine auf den Untersuchungsraum angepasste Kostenkenngrösse im Vergleich zu den schweizerischen pauschalen Ansätzen (vgl. Abb. 2.24).

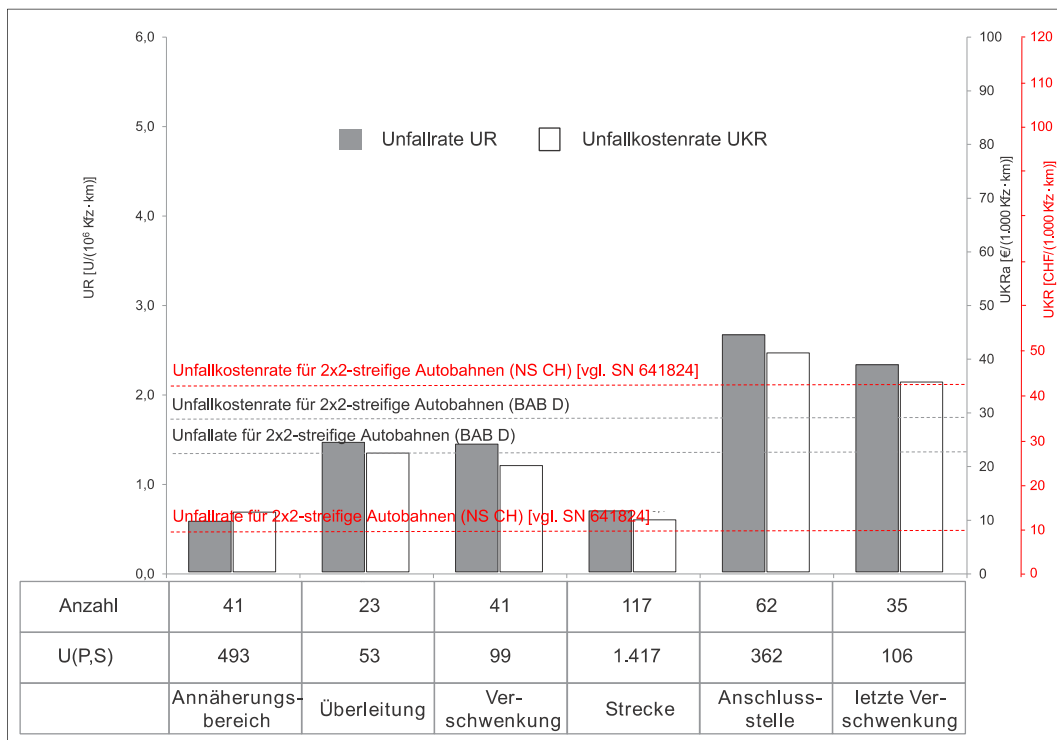


Abb. 2.24 Unfallkenngrößen in den Baustellenbereichen auf Autobahnen im Vergleich zur freien Strecke (durch Baustellen unbeeinflusst) einer 2x2-streifigen Autobahn [vgl. 98]

Fahstreifenbreiten

Bakaba [98] stellt hinsichtlich einer Abhängigkeit des Verkehrsgeschehens zur Fahrbahnbreite keine Auffälligkeiten fest, da die Strecken innerhalb einer Baustelle unabhängig von ihrer Breite und der signalisierten Geschwindigkeit zum Teil sogar ein niedrigeres Unfallgeschehen aufweisen, als die freie Strecke ohne Baustelle.

Länge des Baustellenabschnitts

Eine Beeinflussung des Unfallrisikos durch die Baustellenlänge konnte in der Literatur auch international nicht gefunden werden. Khattak [99] konnte lediglich feststellen, dass hauptsächlich eine erhöhte Dauer einen negativen Einfluss auf das Auftreten von Unfällen mit und ohne Verletzte hat. Ein eindeutiges Ergebnis in Verbindung mit der steigenden Baustellenlänge konnte bisher nicht gefunden werden.

2.2.6 Planungsprozess des Strassenbetreibers

Zeitliche Einordnung

Im Vordergrund der Baustellenplanung (BP) auf Autobahnen als ein Planungsprozess stehen Erhaltungs-, Neubau- oder Veränderungsmassnahmen im schweizerischen Nationalstrassennetz. Aus diesem Grund sind nur Baustellen längerer Dauer relevant. Die bei der schweizerischen Unterhaltsplanung auf Nationalstrassen (UPlaNS) zu berücksichtigenden Massnahmen benötigen einen Projektierungszeitraum von ca. vier Jahren. Darauf folgt der Betrachtungszeitraum für die Baustellenplanung. Dieser ist Teil des Zeitraums der langfristigen Lebenszyklusbetrachtung von 20-50 Jahren. Der ursprüngliche UPlaNS-Zeitraum wurde auf 10 Jahre definiert [100]. Je nach Detaillierungsgrad sind unterschiedliche Betrachtungszeiträume möglich. Für das hier vorgestellte Verfahren wird vorerst vereinfacht für die Fallbeispiele ein Betrachtungszeitraum von 2 Jahren festgelegt. Dabei erfolgt die Einteilung in 4 Perioden. Eine Periode entspricht somit der Dauer eines halben Jahres. Dadurch können verschiedene Verkehrsführungen in Abhängigkeit der Bauphasen infolge der Hauptarbeiten abgebildet werden. Die folgende Abbildung 2.25 soll dies an einem Zeitstrahl verdeutlichen.

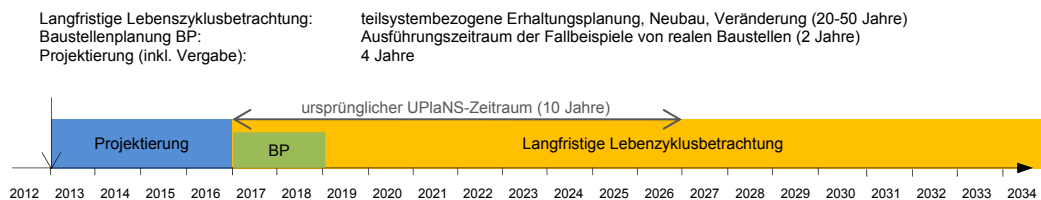


Abb. 2.25 Zeitliche Einordnung verschiedener Betrachtungszeiträume [vgl. 100]

Systemtheoretische Einordnung

Wie in Kapitel 2.2.1 schon erwähnt, ist die Baustellenplanung an Autobahnen ein Planungsprozess des Strassenbetreibers der analog des Sachsystems ebenfalls mit Hilfe der Systemtheorie dargestellt werden kann. Die Strassenverkehrsanlage ist ein vom Menschen erschaffenes technisches System. Das von Ropohl entworfene Handlungssystem stellt ein „System, das handelt“ dar [41]. Dabei versteht er darunter das Handeln wirklicher Menschen, Organisationen und Staaten. Das Handlungssystem ist ein echtes, offenes und dynamisches System – es besteht aus Funktionen und einer Struktur, steht mit seiner Umgebung in Beziehung und wird sich ebenfalls über die Zeit anpassen oder verändern. Dabei bedeutet das Handeln eine Transformation einer Situation und deren Teilmenge gemäss eines gesetzten Ziels.

Aufbauend auf seinem allgemeinen systemtheoretischen Ansatz definiert sich ein Handlungssystem analog des Sachsystems durch ein Quadrupel von Handlungsattributen H_A und zugehörigen Funktionen H_F sowie Teilsystemen bzw. Elementen des Handlungssystems H_L und deren Relationen H_P . Die Attribute $A_j \in H_A$ werden analog des Sachsystems in Input, Output und Zustand kategorisiert. Das Handlungssystem G_H bzw. seine Systemteile $L_k \in H_L$ stellen Handlungsträger und seine Funktionen $F_{Hj} \in H_F$ Handlungen dar [43, S.42].

$$G_H = (H_A, H_F, H_L, H_P) \quad (29)$$

$$\text{mit } H_A \sim \alpha, H_F \sim \varphi, H_L \sim \lambda, H_P \sim \pi$$

Zielsystem

Nach Ropohl wird im Allgemeinen das Handeln als eine Art des menschlichen Verhaltens mit ausdrücklicher Zielorientierung verstanden. Ziele sind somit eine grundlegende Voraussetzung für ein Handlungssystem. Sie zählen zu den Zustandsattributen eines Handlungssystems und können sowohl intern erzeugt, als auch in Form von Befehlen

aus der Umgebung aufgenommen werden. „Handlungssysteme handeln also auf Grund vorgegebener oder selbst gesetzter Ziele“, wobei vorgegebene Ziele letztlich auch zu eigenen umgewandelt werden können [41, S.98].

„Ein Ziel ist ein als möglich vorgestellter Sachverhalt, dessen Verwirklichung erstrebt wird. [...] Sachverhalte sind z. B. Zustände, Gegenstände, Handlungen, Prozesse, Beziehungen. Einen bereits bestehenden Sachverhalt in Zukunft zu erhalten, bedeutet einen Sonderfall der vorstehenden Definition. Ein Ziel wird in einem Zielsatz formuliert. Ein Zielsatz enthält zwei Bestandteile: (a) die beschreibende Kennzeichnung des Sachverhaltes, (b) die Auszeichnung dieses Sachverhaltes als erstrebt, erwünscht, gefordert, befürwortet. Wenn der Zielcharakter eines gemeinten Sachverhaltes aus dem Zusammenhang eindeutig ersichtlich ist, genügt häufig schon die Kennzeichnung des Sachverhaltes“ [41, S.151]. In seiner Definition wird der Begriff Ziel um die Sachverhalte Bedürfnisse, Wünsche, Zwecke, Interessen, Normen und Werte erweitert.

Handlungssysteme verfolgen in der Regel mehrere Ziele, welche meist in einem Zusammenhang stehen. Damit lässt sich das Systemmodell ebenfalls darauf anwenden. Ein Zielsystem besteht aus einer Menge σ von Zielen Z_k und der Menge π zugehöriger Relationen P_m .

$$S_z = (\sigma, \pi) \quad (30)$$

$$\text{mit } \sigma = \{Z_k\}, \pi = \{P_m\}$$

Ropohl [41] führt aus, dass zwischen den Zielen verschiedene Typen von Relationen existieren können. Für ein Zielsystem muss mindestens eine Relationmenge definiert sein. Es wird zwischen folgenden vier Relationstypen unterschieden:

- Indifferenzrelation: zwei Ziele Z_1 und Z_2 sind unabhängig von einander erfüllbar und beeinträchtigen sich nicht gegenseitig
- Konkurrenzrelation: zwei Ziele Z_1 und Z_2 sind unverträglich, d.h. die Erfüllung des Ziels Z_1 führt zwangsläufig zum Verfehlen des Ziels Z_2 sind unabhängig von einander erfüllbar und beeinträchtigen sich nicht gegenseitig
- Präferenzrelation: der Erfüllbarkeit des Ziels Z_1 wird ein Vorrang gegenüber der Erfüllbarkeit des Ziels Z_2 gegeben
- Instrumentalrelation: Zweck-Mittel-Beziehung, d.h. wenn Ziel Z_1 erfüllt ist, ebenfalls Ziel Z_2 erfüllbar wird (Zielkette)

Funktionen des Handlungssystems

Die Funktionen des Handelns stellen Verknüpfungen der vorherig benannten Attribute dar. Sie bewirken die Veränderung der Umgebung (externes Handeln) und des eigenen Zustands (internes Handeln). Beides wird in der Regel parallel ablaufen. Ein Handlungssystem, das auf seine Umgebung einwirkt, muss sich eventuell ändernden Randbedingungen (Input) ebenfalls anpassen. Dies wird deutlich, wenn man die allgemeinen Funktionen des Handelns in Teilfunktionen zerlegt [41, S.95 ff]. Dies führt zu dem in Abbildung 2.26 dargestellten Handlungskreis. Das Handlungssystem setzt sich in diesem zuerst ein Ziel, plant das Vorgehen, führt die Handlung dementsprechend aus und prüft das Ergebnis. Stimmt das Ergebnis mit den gestellten Zielen überein, ist der Handlungskreis abgeschlossen. Ist dies nicht der Fall erfolgt eine Rückkopplung zur Planungsphase, in der Anpassungen durchgeführt werden. Werden die Zielvorgaben auch nach einigen Durchläufen nicht erreicht oder sind schon in der Planungsphase Unstimmigkeiten zu erkennen, erfolgt eine Rückkopplung zu den Zielsetzungen. Diese werden danach in geeigneter Form angepasst.

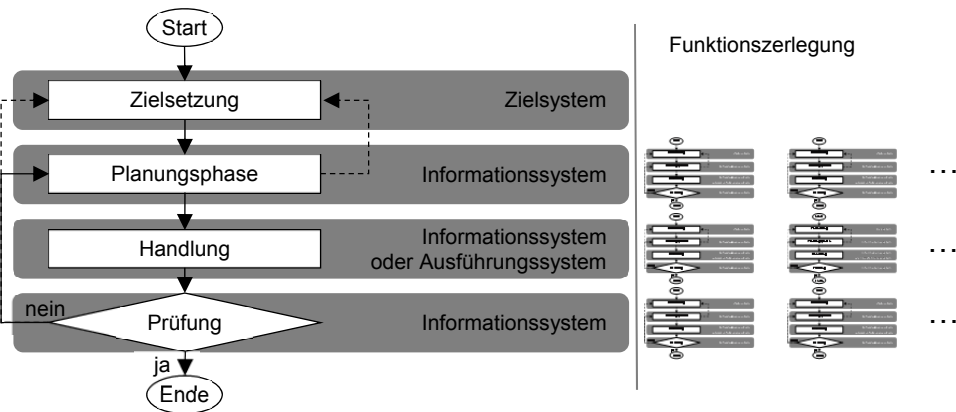


Abb. 2.26 Handlungskreis [vgl. 41; 43]

Dies Handlungskreis lässt sich in verschiedenen Detaillierungsstufen des Handelns anwenden. Betrachtet man zum Beispiel den Strassenbetreiber als ein Handlungssystem, welches Massnahmen auf dem Autobahnnetz plant und ausführt, so wird deutlich, dass dies eine sehr grobe Modelldefinition darstellt. Eine genaue Analyse des Vorgehens zeigt dann, dass die verschiedenen Schritte im Handlungskreis in Funktionen (Handlungsketten) zerlegt werden können. Bei der Ausführung dieser Teilschritte erfolgt wiederum das Vorgehen analog des Handlungskreis (vgl. Abb. 2.26). So umfasst die Planungsphase im Bereich der Erhaltung unter anderem die Schritte Zustandserfassung und –bewertung, Erhaltungsplanung, Baustellenplanung, Projektierung und Vergabe. Die Ausführung der Handlung selbst erfolgt in der Regel durch Bauunternehmungen. Dabei kann ebenfalls in verschiedene Arbeitsschritte des Bauablaufs unterschieden werden. Am Ende erfolgt eine Abnahme der Bauleistung und die Überprüfung der gesamten Vorgehensweise. Die daraus hervorgehenden Erkenntnisse gehen wieder in den Planungsablauf und wenn notwendig auch in die Zieldefinitionen mit ein (Wirkungsanalyse).

Handlungsprozess der Baustellenplanung an Autobahnen

Im Folgenden soll nun versucht werden, das bestehende Vorgehen bzw. den Handlungsprozess bei der Baustellenplanung zu analysieren, um daraus Ansätze für eine Möglichkeit des Einsatzes eines Optimierungsverfahrens abzuleiten. Die Baustellenplanung im Allgemeinen gehört zu den Planungsprozessen des Strassenbetreibers. Dabei stellt sie das Bindeglied zwischen der langfristigen objektbezogenen Erhaltungsplanung in den einzelnen Teilsystemen und einem Entscheidungsprozess zur Festlegung von Erhaltungsprojekten mit dazugehöriger Verkehrsführung dar. Die Baustellenplanung ermöglicht als netzbezogene Erhaltungsplanung im Gesamtsystem den Einbezug der Auswirkungen einer Baustelle auf den Strassennutzer und Dritte im gesamten Strassennetz. Das Ergebnis sind verschiedene Szenarien von Baustellen bzw. Erhaltungsprojekten mit dazugehöriger Verkehrsführung, welche in Bezug auf die jeweiligen unterschiedlichen Randbedingungen optimal sind. Diese werden im anschliessenden Entscheidungsprozess gegenübergestellt, geprüft und evaluiert. Kann keine Entscheidung getroffen werden, sind die Randbedingungen anzupassen und erneut Szenarien von Baustellen zu bilden. Wird ein Erhaltungsprojekt mit dazugehöriger Verkehrsführung gewählt, erfolgt die Genehmigung und Projektierung der Massnahmen.

Die Ziele der Baustellenplanung an Autobahnen in der Schweiz leiten sich aus der Funktion dieser Verkehrswege und dem Auftrag aus der schweizerischen Gesetzgebung [1] ab (vgl. Zielsystem). Sicherheit und Wirtschaftlichkeit des Verkehrs stellen die Oberziele im gesamten Bereich der Autobahnen dar. Ausgehend von den existierenden verkehrstechnischen Zusammenhängen in Bezug auf die Verkehrsqualität (vgl. Kapitel 2.2.4) sind dabei die Systemzustände Sicherheitsniveau und Auslastungsgrad relevant. Der Strassenbetreiber hat das Ziel der Sicherstellung von Sicherheit, definierter Leistungsfähigkeit und Verträglichkeit. Die Notwendigkeit von Massnahmen an Autobahnen besteht, wenn die Systemzustände bleibend in einen kritischen bzw. nicht akzeptierten Bereich fällt. Dies geschieht durch die Absenkung des Sicherheitsniveaus und einen Anstieg des Auslastungsgrades, ausgelöst durch:

- eine sinkende Leistungsfähigkeit bei vorhandener Verkehrsbelastung oder ein sinkendes Sicherheitsniveau durch vorhandene Defizite der Strassenverkehrsanlage in Bezug auf die Substanz oder die vorhandene Signalisation
- eine steigende Verkehrsbelastung bei vorhandener Leistungsfähigkeit aufgrund der Verkehrsentwicklung

Die Baustellenplanung ist Teil eines langfristiger Planungsprozesses Erhaltungsplanung. Einen Einfluss auf die einzelnen detaillierten Verkehrsführungen während des Bauablaufs und die damit verbundenen Sicherheitsaspekte hat sie nicht direkt. Dies wird im Detail durch die Projektierung und bei der Ausführung selbst sichergestellt. Es können jedoch durch eine grobe Definition der Verkehrsführung unwirtschaftliche Varianten in Bezug auf die Gesamtkosten ausgeschlossen werden.

Im Folgenden soll das Zielsystem der Baustellenplanung abgeleitet werden. Grundlage hierfür sind die in der Praxis aufgestellte sogenannten „UPlaNS-Philosophie“ [100] für die Baustellenplanung. Danach muss die Baustellenplanung mit folgenden Randbedingungen durchgeführt werden:

- Volkswirtschaftliche Kostenüberlegungen
- Langfristiges Unterhaltsprogramm
- Integrale Planung
- Zentrale Steuerung
- Strategische Vorgaben (minimaler Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Baustellen, maximale Länge einer Baustelle und minimaler Zeitraum ohne Baustelle am gleichen Ort) und Budgetbegrenzung

Aus diesen Randbedingungen lässt sich ein Zielsystem entwickeln, welches die Grundlage zur Strukturierung des Prozesses bildet. Dieses Zielsystem soll im Folgenden den Handlungsprozess rückwärtslaufend entstehen.

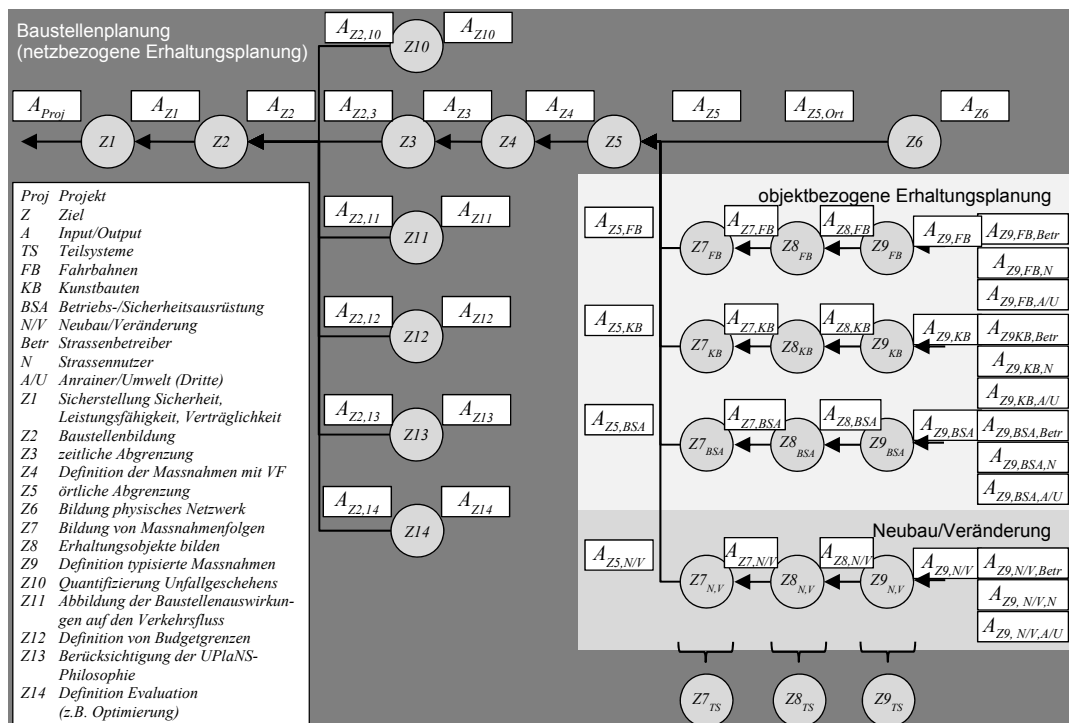


Abb. 2.27 Zielsystem der Baustellenplanung als verzweigte Zielkette

Ausgehend von den Oberzielen des Strassenbetreibers stellen optimale Projekte im Autobahnnetz den Output A_{Proj} eines übergeordneten Entscheidungsprozesses über unterschiedliche langfristige Projekte dar. Dieser Output geht dann als Input A_{Proj} in den

Prozess der Projektierung und Ausführung ein. Der Entscheidungsprozess hat das Hauptziel Z_1 , die Sicherheit, definierte Leistungsfähigkeit und Verträglichkeit des Autobahnnetzes bzw. eines Abschnitts sicherzustellen. In diesen Entscheidungsprozess fließen die unterschiedlichen Baustellenszenarien mit unterschiedlichsten Randbedingungen aus wirtschaftlichen oder auch politischen Vorgaben (Input A_{Z_1}). Grundlage dafür sind unterschiedliche Szenarien (z.B. Budgetbegrenzungen oder Längenbegrenzung) aus der Baustellenplanung (Input A_{Z_1}). Dieser Input führt zusammen mit der Hauptzielsetzung Z_1 im betrachteten Autobahnabschnitt oder -netz zur Entscheidung über die Projektierung und Ausführung von Projekten auf Autobahnen (Output A_{Proj}).

$$F_{H_{Z_1}} : Z_1 \times A_{Z_1} \rightarrow A_{Proj}$$

Das setzt voraus, dass in einem vorherigen Schritt verschiedene Szenarien gebildet werden können. Diese Szenarien entstehen durch die Änderung von Randbedingungen. Eine Optimierung stellt im mathematischen Sinn die Minimierung oder Maximierung einer Zielfunktion unter definierten Randbedingungen innerhalb eines festgelegten Betrachtungszeitraums dar. Die Definition der Zielfunktion und den beschränkenden Randbedingungen erfolgt durch eine inhaltliche, zeitliche und räumliche Abgrenzung. Damit entsteht eine Zielkette (Zweck-Mittel-Beziehung) von zwei aufeinanderfolgenden Teilziele als wirtschaftliche Baustellenbildung (Ziel) und als Abgrenzung nach Raum, Inhalt und Zeit (Mittel). Es soll hier vorerst auf den Begriff Optimierung verzichtet werden, da dieser Begriff bei einer manuellen Baustellenbildung nicht mit Sicherheit zutrifft und von einem z.B. minimalen Ergebnis gesprochen werden kann. Diese Zielkette kann dann durch eine detaillierte Erweiterung die einzelnen Schritte vom Anfang bis zum Abschluss der Baustellenplanung spezifiziert werden (vgl. Abb. 2.27).

Das Ergebnis der Baustellenbildung (Teilziel Z_2) sind wirtschaftliche Baustellen mit unterschiedlichen Randbedingungen (Output A_{Z_1}). Dabei ist es notwendig, neben der grundsätzlichen Abgrenzung (Teilziele $Z_{3..6}$) das Unfallgeschehen (Teilziel Z_{10}) und den Verkehrsfluss (Teilziel Z_{11}) zu berücksichtigen. Sollen Randbedingungen, wie Budgetgrenzen (Teilziele Z_{12}) und strategische Vorgaben (Teilziele Z_{13}) vorgesehen werden, müssen diese ebenfalls mit in die Baustellenbildung im Input A_{Z_2} integriert werden. Zusätzlich muss eine Definition des Vorgehens bei der Evaluation erfolgen (Teilziele Z_{14}). Das heisst, A_{Z_2} wird gebildet aus

- Output $A_{Z_{2,3}}$ grundsätzliche Abgrenzungen aus den aufeinander folgenden Teilzielen Z_3 zeitlicher Abgrenzung, Z_4 Verkehrsführung, Z_5 örtliche Abgrenzung und Massnahmen aus objektbezogener Erhaltungsplanung und Neubau/Veränderung)
- Output $A_{Z_{2,10}}$ Unfallkenngrossen aus dem Teilziel Z_{10} Quantifizierung des Unfallgeschehens
- Output $A_{Z_{2,11}}$ Reisezeit aus dem Teilziel Z_{11} Abbildung der Baustellenauswirkungen auf den Verkehrsfluss
- Output $A_{Z_{2,12}}$ Budgetbegrenzung aus dem Teilziel Z_{12} Definition von Budgetgrenzen
- Output $A_{Z_{2,13}}$ strategische Vorgaben aus dem Teilziel Z_{13} Berücksichtigung der UPlaNS-Philosophie
- Output $A_{Z_{2,14}}$ Vorgehen bei der Evaluation der Objekte bei der Baustellenbildung aus dem Teilziel Z_{14} Definition Evaluation

Dies wird unter anderem in Abbildung 2.28 verdeutlicht. Diese zeigt das aufzustellende Zielsystem in seinen Handlungsfunktionen und den Schnittstellen zu relevanten Organisationsprozessen und zugehörigen Beurteilungseinheiten dargestellt. Eine Beurteilungseinheit gibt jeweils an, in welche Hierarchiestufe das jeweilige Ergebnis eines Handlungsprozesses einzuordnen ist.

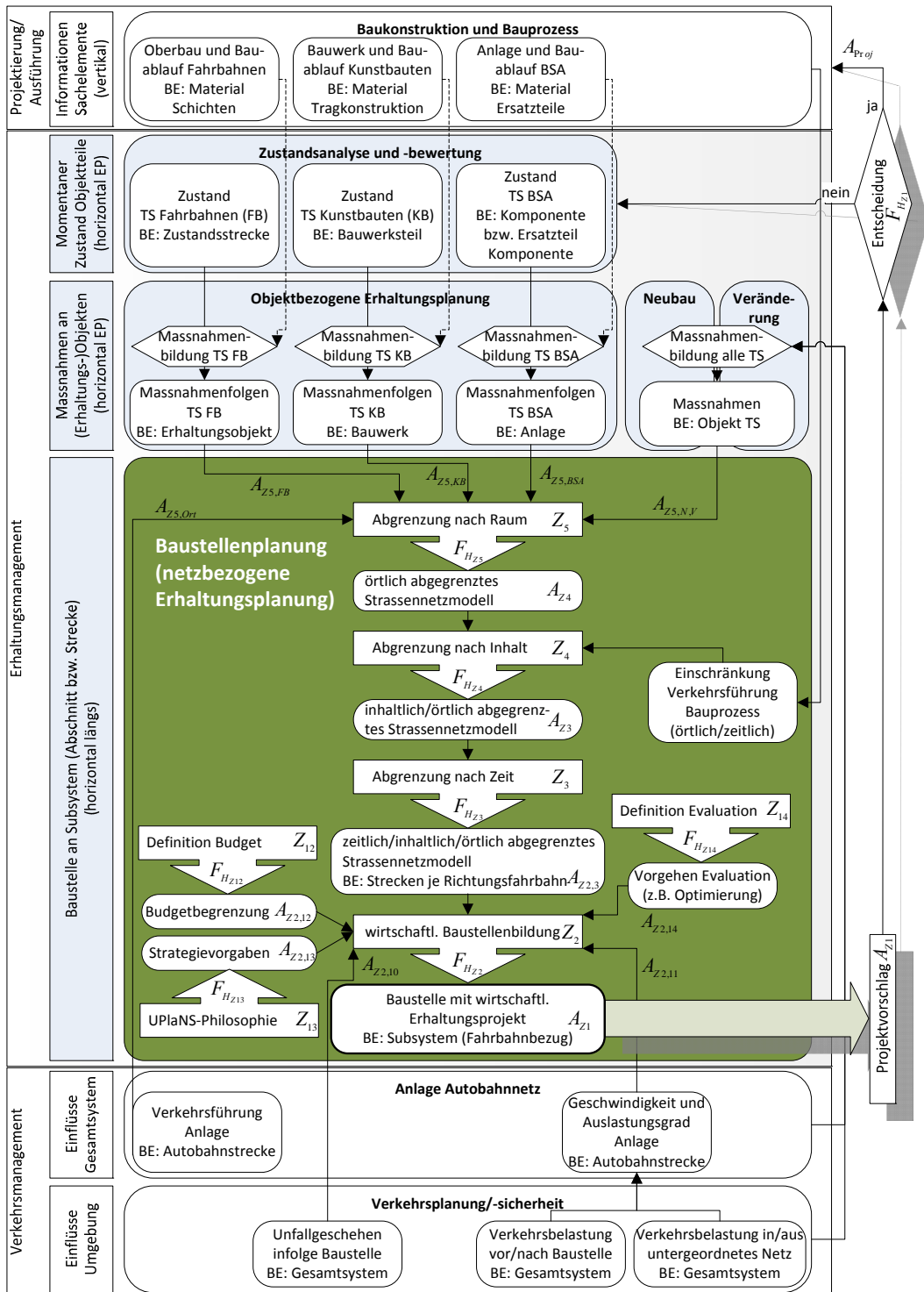


Abb. 2.28 Handlungsfunktionen der Baustellenplanung an Autobahnen mit der Darstellung von Schnittstellen zu anderen relevanten Organisationsprozessen und zugehöriger Beurteilungseinheit BE

Der Input A_{Z_2} enthält den für die Baustellenbildung gemäss der integrierten Teilmole notwendigen Input. Dieser beinhaltet die Informationen für die Erfüllung der Zielstellung Z_2 und damit das Bilden von optimalen Baustellen bei wechselnden Randbedingungen, welches die jeweils nachgeordneten Zielstellungen Z_3 bis Z_{14} erfüllt. Durch jeweilige Veränderungen des Modells können unterschiedliche Baustellenszenarien (Output A_{Z_1}) für den übergeordneten Entscheidungsprozess mit dem Hauptziel Z_1 gebildet werden.

$$F_{H_{Z_2}} : Z_2 \times A_{Z_2} \rightarrow A_{Z_1}$$

$$\text{mit } A_{Z_2} = A_{Z_{2,3}} + A_{Z_{2,10}} + A_{Z_{2,11}} + A_{Z_{2,12}} + A_{Z_{2,13}} + A_{Z_{2,14}}$$

Bei der zeitlichen Abgrenzung (Teilziel Z_3) erfolgt die Definition eines Zeitraums, z.B. 2 Jahre, in welchem die inhaltlich (Output A_{Z_3} und A_{Z_4}) und räumlich (Output A_{Z_5}) abgegrenzt Massnahmen der Baustelle ausgeführt werden.

$$F_{H_{Z_3}} : Z_3 \times A_{Z_3} \rightarrow A_{Z_{2,3}}$$

Die inhaltliche Abgrenzung der Verkehrsführung (Teilziel Z_4) kombiniert die Erhaltungsmaßnahmen aus den Teilsystemen (Massnahmenfolgen) im betrachteten Strassennetz mit unterschiedlichen Erhaltungsobjekten (Output A_{Z_4}) mit der möglichen Verkehrsführungen auf den unterschiedlichen Erhaltungsobjekten. Dies führt zur Definition von Massnahmen, das heisst Baumassnahmen mit zugeordneter Verkehrsführung im Bereich der Baustelle (Output A_{Z_3}).

$$F_{H_{Z_4}} : Z_4 \times A_{Z_4} \rightarrow A_{Z_3}$$

Die inhaltliche Abgrenzung der Teilsysteme (Teilziel Z_5) erfolgt durch die Definition aller zu integrierenden Erhaltungsobjekte mit den benötigten dazugehörigen Informationen. Sie führt dem räumlich definierten Strassennetz (Output $A_{Z_5,Ort}$) die Informationen der Erhaltungsobjekte inkl. evaluierter Massnahmenfolgen durch Lebenszyklusanalysen der objektbezogenen Erhaltungsplanung der Teilsysteme (Output $A_{Z_5,FB}$, $A_{Z_5,KB}$, $A_{Z_5,BSA}$) und aus dem Neubau bzw. der Veränderung (Output $A_{Z_5,NV}$) zu. Als Output A_{Z_4} steht nun ein definiertes Strassennetz mit den notwendigen Erhaltungsobjekten aus den Teilsystemen und dazugehörige Informationen zu verschiedenen Massnahmenfolgen zur Verfügung.

$$F_{H_{Z_5}} : Z_5 \times A_{Z_5} \rightarrow A_{Z_4}$$

$$\text{mit } A_{Z_5} = A_{Z_5,Ort} + A_{Z_5,FB} + A_{Z_5,KB} + A_{Z_5,BSA} + A_{Z_5,NV}$$

Die gesamte Zielkette beginnt mit einer räumlichen Abgrenzung (Teilziel Z_6) in Bezug auf die Anforderungen der Baustellenplanung an die Detaillierung (z.B. Berücksichtigung von Mittelstreifenüberfahrten). Hier erfolgt die Definition des zu berücksichtigenden Autobahnnetzes (Output $A_{Z_5,Ort}$). Der Input A_{Z_6} hierfür sind z.B. administrative Vorgaben bzw. Kompetenzgrenzen oder gebietsbestimmende Informationen aus dem Bereich des baulichen Unterhalts (Betrachtung eines Autobahnabschnitts mit schlechtem Zustand der Erhaltungsobjekte). Soll eine Betrachtung des Strassennetzes analog der objektbezogenen Erhaltungsplanung erfolgen, kann auf deren räumliche Abgrenzung (Teilziel $Z_{9,TS}$) zurückgegriffen werden.

$$F_{H_{Z_6}} : Z_6 \times A_{Z_6} \rightarrow A_{Z_5,Ort}$$

Als zusätzliches Kriterium wurde ein langfristiges Unterhaltsprogramm formuliert. Dies wird in der Zielkette der objektbezogenen Erhaltungsplanung der Teilsysteme sowie von Neubau und Veränderung definiert. Gleiches gilt für den Ansatz einer volkswirtschaftlichen Kostenüberlegung. Mit dem Ziel $Z_{7,TS}$ wird die Bildung der wirtschaftlichen (optimalen) Massnahmenfolgen je Teilsystem aus Lebenszyklusanalysen (Output $A_{Z_5,TS}$) verfolgt.

$$F_{H_{Z_7}} : Z_7 \times A_{Z_7,TS} \rightarrow A_{Z_5,TS}$$

Der Betrachtungszeitraum für ein langfristiges Bauprogramm mit notwendigen Erhaltungsmaßnahmen auf der Grundlage von Lebenszyklusanalysen wird durch das Ziel

$Z_{8,TS}$ (zeitliche Abgrenzung) formuliert. Der inhaltlichen und räumlichen Abgrenzung wird in der objektbezogenen Erhaltungsplanung bzw. Neubau/Veränderung (Output $A_{Z8,TS}$) noch eine zeitliche Komponente hinzugefügt (Output $A_{Z7,TS}$). Dies ist eine Voraussetzung um wirtschaftliche (optimale) Massnahmenfolgen mittels Lebenszyklusanalysen zu bilden. Der angestrebte Ansatz von volkswirtschaftlichen Kostenüberlegungen setzt die Berücksichtigung der monetär bewerteten Auswirkungen der Massnahmen auf Strassenbetreiber (Output $A_{Z9, \dots, Betr}$), Strassennutzer (Output $A_{Z9, \dots, N}$) sowie Dritte (Output $A_{Z9, \dots, AU}$) voraus. Dies muss schon bei der inhaltlichen und räumlichen Abgrenzung der objektbezogenen Erhaltungsplanung Berücksichtigung finden. Die inhaltliche Abgrenzung sowie die räumliche Abgrenzung wurden zur Vereinfachung in einem Ziel $Z_{9,TS}$ zusammengefasst.

Durch das in Abbildung 2.28 dargestellte Handeln erfolgt eine örtlich, inhaltlich und zeitlich aufeinander abgestimmte Wahl von Massnahmenvarianten aller Teilsysteme. Der Schritt der Baustellenbildung nach der durchgeführten zeitlichen, räumlichen und inhaltlichen Abgrenzung ist in Abbildung 2.29 nochmals in einem Weg-Zeit-Diagramm dargestellt. Dabei sind die Massnahmen der unterschiedlichen Teilsysteme je Richtungsfahrbahn mit den notwendigen zeitlichen Verschiebungen aufgezeigt. Erfolgt parallel dazu die Ermittlung der Gesamtkosten, kann aus verschiedenen Szenarien die Baustelle mit den niedrigsten Gesamtkosten gewählt werden.

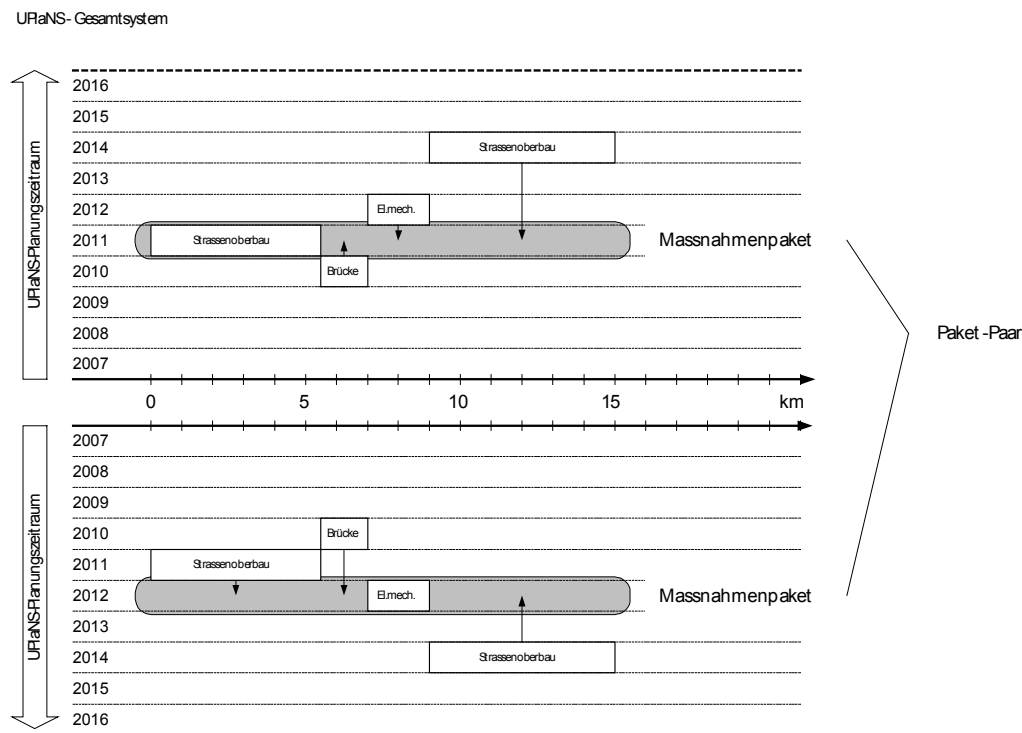


Abb. 2.29 Paket-Paar bestehend aus zwei Massnahmenpaketen [100]

Die Ermittlung von unterschiedlichen Massnahmenpaketen wird in der schweizerischen Praxis zur Zeit noch manuell und ohne ein Verfahren zur Entscheidungshilfe durchgeführt. Es stellt sich nun die Frage, wie man diesen Vorgang durch ein Optimierungsverfahren unterstützen kann. Dabei lässt sich der Handlungsprozess der Baustellenbildung $F_{H_{ZZ}}$ als Optimierungsschritt bei dem eine Zielfunktion unter Randbedingungen minimiert bzw. maximiert wird, ohne weiteres umwandeln.

2.3 Methodik

2.3.1 Grundsatz

Ausgehend von einem systemtheoretischen Ansatz für die Baustellenplanung an Auto-

bahnen und dem daraus abgeleiteten Zielsystem erfolgt eine Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung von Autobahnbaustellen. Dieses Verfahren muss einerseits die Strassenverkehrsanlage ausreichend abbilden können. Daraus und unter Berücksichtigung von Kapitel 2.2 ergibt sich die Anforderung, dass neben den Randbedingungen der Anlage auch der Verkehr mit seinen auf Autobahnen spezifischen Zusammenhängen und der Bauablauf (Massnahmen) zu berücksichtigen sind ($F_{H_{Z3..6}}$). Berücksichtigung muss hierbei die vorhandene Datenstruktur der Strassendatenbank finden, welche bereits auf der Grundlage der Netzwerktheorie beruht. Die gängige Definition einer Strecke mit Anfangs- und Endort oder eines Abschnitts mit Anfangs- und Endknoten [Verkehrsknoten, vgl. 50] lässt sich passend mit der Graphentheorie abbilden. Diese erlaubt durch die Definition eines gerichteten Graphen, weg von einer Objektbetrachtung hin zu einer Netzbeachtung zu gelangen [vgl. u.a. 4]. Das heisst, es erfolgt eine Definition der Beziehungen (Vorgänger-Nachfolger-Beziehung) zwischen den Objekten. In Bezug auf die Begriffssystematik wird in der Graphentheorie ein Objekt, sei es nun, z.B. Strecke oder Abschnitt, als Kante bezeichnet. Im Gegensatz zur Terminologie der VSS [Verkehrsknoten, vgl. 50] werden Orte, welche auch Verkehrsknoten darstellen können, generell als Knoten bezeichnet.

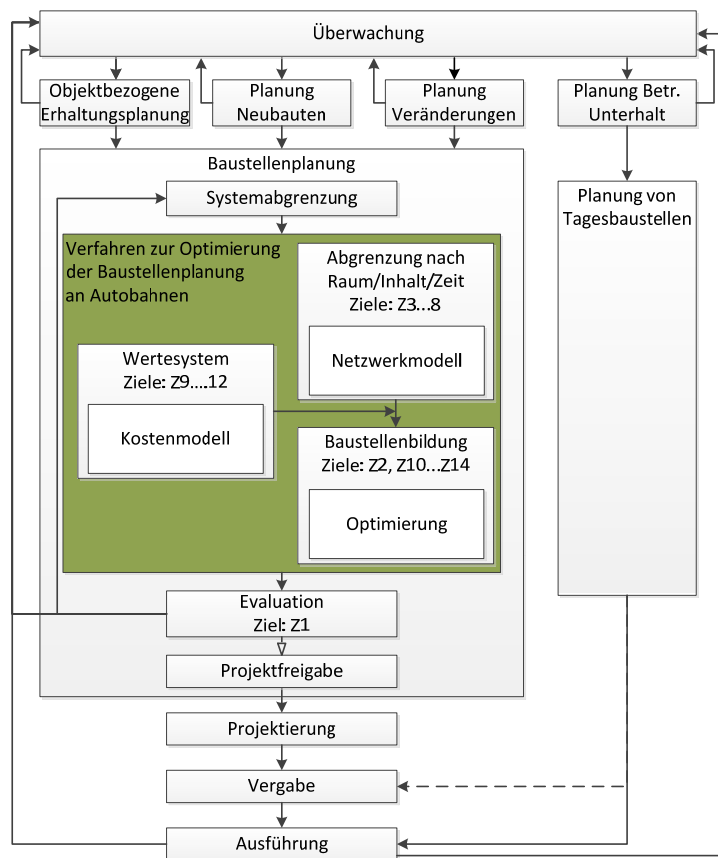


Abb. 2.30 Methodik zur Planung von optimalen Baustellen an Autobahnen

Mit einem gerichteten Graphen, der die Autobahn modellhaft abbildet, wird angestrebt, optimale Baustellen aufgrund der Minimierung einer Zielfunktion und gegebenen Randbedingungen zu ermitteln ($F_{H_{Z2}}$). Das bedeutet, dass alle Bedürfnisse und Auswirkungen, die sich im Rahmen von Baustellen an Autobahnen ergeben, in einem Wertesystem mit einander vergleichbar gemacht werden müssen. Schon in vergangenen Forschungsarbeiten [z.B. 6; 15; 33] hat sich dabei ein rein monetäres Modell bewährt. Dies muss durch ein über alle Schritte konsistentes Kostenmodell sichergestellt sein. Das heisst, es kann somit nicht nur für die Baustellenplanung gelten, sondern auch bereits in der Erhaltungsplanung und der Planung von Neubau und Veränderung Anwendung finden.

Für die Methodik leitet sich aus dem gängigen Vorgehen im Fachgebiet Operation Research bei der Optimierung auf Graphen bzw. Netzwerken ein dreigliedriges Verfahren (vgl.

Abb. 2.30) ab. Es wird ein Schritt zur Bildung eines Netzwerkmodells notwendig. Das Netzwerkmodell bildet die im Handlungsprozess Baustellenplanung durchgeführte räumliche, inhaltliche und zeitliche Abgrenzung für die Optimierung ab. In einem zweiten Schritt ist das übergreifende Kostenmodell zu entwickeln. Dieses quantifiziert die Auswirkungen von Massnahmen an Autobahnen auf Strassenbetreiber, -nutzer sowie Dritte in monetärer Form. Ein dritter Schritt umfasst die Optimierungsmethode, welche anwendbar auf das Netzwerk- und das Kostenmodell sein muss und dabei in der Lage ist, nicht nur lokale Optima zu finden (heuristische Methoden) sondern sicherstellt, dass die Lösung global optimal ist. Das heisst, es existiert neben der gefundenen Lösung keine weitere bessere Lösung.

2.3.2 Monetäre Quantifizierung

Grundsatz

Wie in Kapitel 2.1 festgelegt, wird ein rein monetäres Wertesystem auf der Grundlage der Kosten-Nutzen-Analyse [21], das heisst ein volkswirtschaftlicher Ansatz für die Anwendung des ökonomischen Minimalprinzips gewählt (vgl. Kapitel 2.2.6). Das hier verwendete Wertesystem bezieht sich im Gegensatz zur Schweizer Norm [21] im Wesentlichen auf

Erhaltungs-, Veränderungs- und Neubaumassnahmen der bestehenden Infrastruktur. Es werden damit nicht die Zustände des Systems nur vor und nach sondern während einer Massnahme betrachtet. Dadurch wird es möglich nicht nur eine Entscheidung über die grundlegende Notwendigkeit einer Massnahme sondern eine Entscheidung über den Zeitpunkt und den Standort einer Massnahme zu treffen.

In Abbildung 2.31 ist die Kostenstruktur der Gesamtkosten aufgezeigt. Dabei wurden nur die Massnahmenkosten im Betrachtungszeitraum der Baustellenbildung ausführlich betrachtet. Die Folgekosten werden aus der Erhaltungsplanung der Teilsysteme übernommen. Je nach Kostenmodell der Erhaltungsplanung sind neben den Strassenbetreiberkosten auch die Strassennutzerkosten und die monetarisierten Auswirkungen auf Dritten berücksichtigt [vgl. 33].

Diese Kostenstruktur ermöglicht eine Berücksichtigung von Strassenbetreiber-, Strassennutzerkosten sowie monetarisierte Auswirkungen auf Dritte und sollte bereits bei der Erhaltungsplanung der Teilsysteme Verwendung finden. Dadurch wird die Konsistenz zwischen Teilsystemen und Gesamtsystem der Autobahnen sichergestellt. Die Gesamtkosten setzen sich gemäss Abbildung 2.31 (vgl. Kapitel 2.3.1). Nach Girmscheid [15] und Lüking [33] erfolgt dabei immer eine Betrachtung einer Kostendifferenz zwischen einem Planungs- und Referenzfall. Der Planungsfall stellt die Ausführung der gewählten Massnahme des einzelnen Objekts und der Referenzfall die Massnahme „Nichtstun“ auf der bestehenden Autobahn im Betrachtungszeitraum dar.

Jede wählbare Massnahme initiiert eine in den Teilsystemen definierte Erhaltungsstrategie bzw. Massnahmenfolge. Diese Massnahmenfolgen müssen aus der objektbezogenen Erhaltungsplanung der Teilsysteme übernommen werden. Die Kosten einer Massnahmenfolge unterteilen sich in Kosten der initialen Erhaltungsmassnahme im Betrachtungszeitraum der Baustellenplanung und der Folgekosten dieser Massnahme.

Die Gesamtkosten einer Baustelle berechnen sich einerseits aus den objektbezogene Kosten der Massnahmen (initiale Massnahmen) und deren Folgekosten. Andererseits müssen baustellenbedingte Kosten, welche nicht einem Objekt ungeordnet werden können ebenfalls integriert werden. Dabei werden alle drei Anspruchsgruppen berücksichtigt. Dies wird im Folgenden näher erläutert.

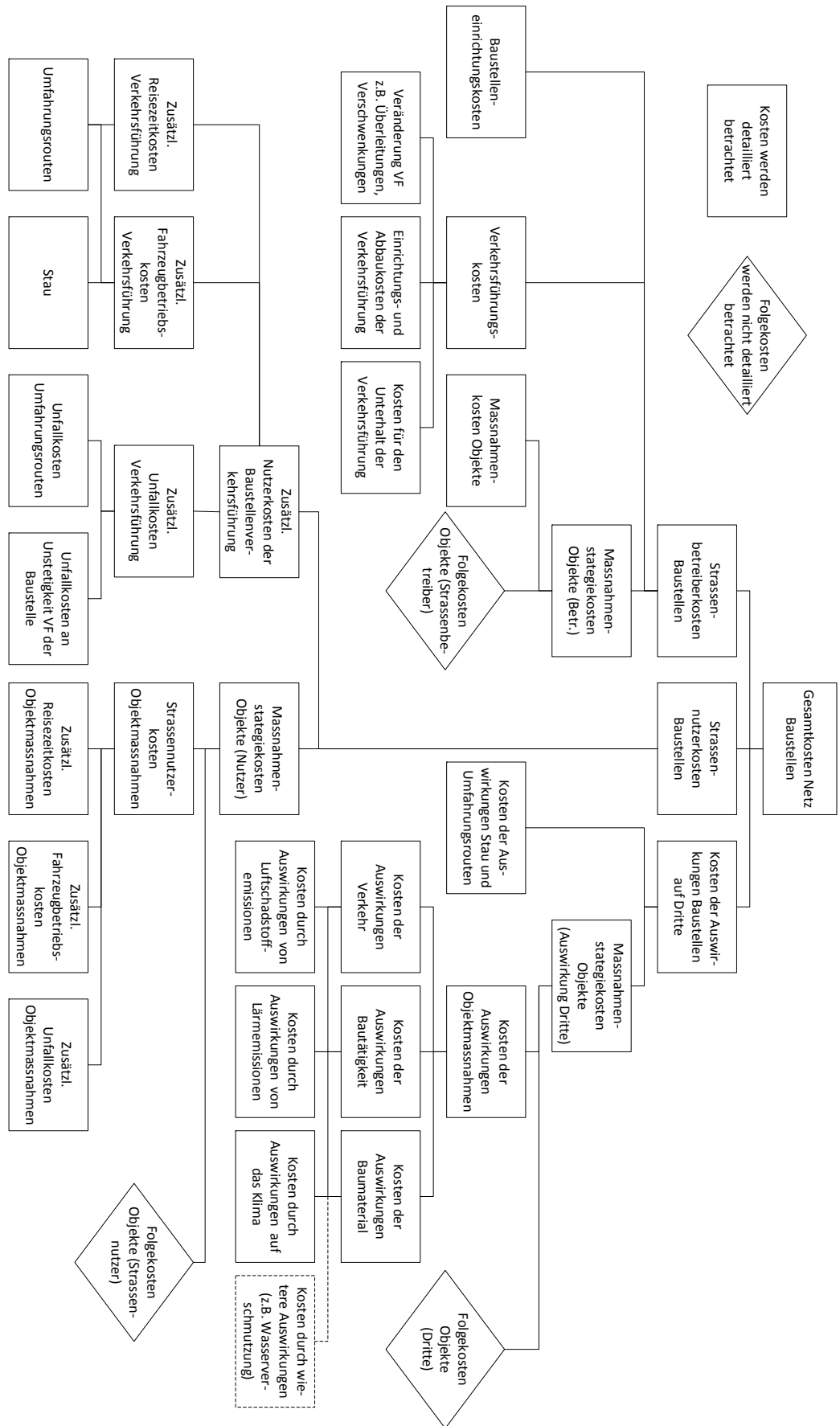


Abb. 2.31 Kostenstruktur der Gesamtkosten der Baustellen im betrachteten Netz für die Modellbildung im Rahmen der Baustellenplanung an Autobahnen

Strassenbetreiberkosten

Zur Berücksichtigung der Strassenbetreiberkosten werden für die Baustellenplanung folgende Kostengruppen im Modell verwendet (vgl. Abb. 2.31):

- Verkehrsführungskosten (variable und fixe Kosten)
- Baustelleneinrichtungskosten (fixe Kosten)
- Kosten der initialen Erhaltungsmassnahme der Massnahmenfolge oder der Neubau- bzw. Veränderungsmassnahmen (variable Kosten)
- Folgekosten der Massnahmenfolgen der Objekte (variable Kosten)

Verkehrsführungskosten

Zu den Verkehrsführungskosten gehören alle Kosten, welche benötigt werden, um eine definiertes Verkehrsregime umzusetzen. Dabei sind neben den variablen Kosten für die temporäre Verkehrsführung mit ihren Sicherheitseinrichtungen und Signalisationen fixe Kostenanteile für alle polizeilichen Massnahmen, die Öffentlichkeitsarbeit, flankierende Massnahmen, die Umfahrungssignalisation oder Verkehrslotseneinsätze (in der Schweiz militärisch Verkehrsplanton genannt) zu berücksichtigen. Im Idealfall liegen die Kostendaten für jedes Verkehrsregime getrennt vor und geben ebenfalls Auskunft über die variable Kosten für Einrichtung/Abbau sowie für den Unterhalt. In der Schweiz wurden diese Daten bis jetzt noch nicht für verschiedene Verkehrsregime erhoben oder ausgewertet. Einen Anhaltspunkt für die Kosten verschiedener Verkehrsführungsregime mit unterschiedlichen Trennungseinrichtungen für Arbeitsstellen längerer Dauer (Dauerbaustellen) bei verschiedenen Autobahnmeistereien in Deutschland gibt Fischer [101]. Diese Befragungsergebnisse (vgl. Abb. 2.32) sind nicht repräsentativ für die Schweiz, jedoch können damit Grössenordnungen zumindest für die Sicherheitseinrichtungen (SE) und Signalisationen im Baustellenbereich abgeschätzt werden.

Abb. 2.32 Laufende Kosten für den Betrieb einer Arbeitsstelle längerer Dauer (Befragungsergebnisse) [101]

	4s+0, Markierung	4s+0, transp. SE	3s+1, transp. SE	3s+0, transp. SE
Einrichtung/ Abbau (ABD Nordbayern)	20.000 €/km	30.000 €/km	45.000 €/km	30.000 €/km
Betrieb, Wartung, Kontrolle (ABD Nordbayern)	400 €/(km*Tag)	400 €/(km*Tag)	500 €/(km*Tag)	400 €/(km*Tag)
Einrichtung/Abbau (Hessen)	k. A.	25.000 €/km	27.000 €/km	23.500 €/km
Betrieb, Wartung, Kontrolle (Hessen)	k. A.	175 €/(km*Tag)	190 €/(km*Tag)	165 €/(km*Tag)
Betrieb, Wartung, Kontrolle (Saarland)	100 €/(km*Tag)	750 €/(km*Tag)	750 €/(km*Tag)	750 €/(km*Tag)
Einrichtung, Ab- bau, Betrieb, War- tung und Kontrolle (Rheinland-Pfalz)	k. A.	430 €/(km*Tag)	470 €/(km*Tag)	k. A.

Für die beiden in diesem Forschungsauftrag betrachteten schweizerischen Baustellen konnten in Bezug auf die Verkehrsführung keine aussagekräftigen Kostendaten erhoben werden. Diese lagen nur unvollständig und nicht detailliert vor (vgl. Kapitel 2.5). Weitere Kostenerhebungen und Untersuchungen des Einflusses auf den Strassennutzer wären hierfür notwendig. Jedoch zeigte sich im Einzelfall, dass nicht nur die Kosten sondern auch die Auswirkungen auf den Strassennutzer relevant werden.

Baustelleneinrichtungskosten

Die Baustelleneinrichtungskosten sind fixe Kosten des Strassenbetreibers und ergeben sich einerseits aus den jeweiligen Baustelleneinrichtungen der auszuführenden Massnahmen an den einzelnen Objekten. Andererseits bestehen gewisse Synergieeffekte durch die gemeinsame Verknüpfung der Objekte in einer Baustelle. Diese Kosten fallen im

Betrachtungszeitraum der Baustellenausführung an.

Kosten der initialen Erhaltungsmassnahme der Massnahmenfolge oder der Neubau- bzw. Veränderungsmassnahmen

Die Kosten der initialen Erhaltungsmassnahmen der Massnahmenfolgen sind wie auch die Kosten für Neubau- bzw. Veränderungsmassnahmen variable Kosten des Strassenbetreibers und fallen im Betrachtungszeitraum der Baustellenausführung an. Diese Kosten werden aus der Erhaltungsplanung oder der Planung von Neu- und Veränderungsmassnahmen übernommen.

Folgekosten der Erhaltungsmassnahmen der Objekte (Strassenbetreiber)

Die Folgekosten des Strassenbetreibers fallen nicht im Betrachtungszeitraum zur Baustellenausführung an. Sie beziehen sich auf den in der Erhaltungsplanung definierten Folgezeitraum. Je nach Szenario bzw. Massnahmenfolge beinhalten diese dabei neben den Folgekosten infolge zukünftiger Erhaltungsmassnahmen auch Folgekosten durch einen eventuell später vorherrschenden schlechten Zustand der Erhaltungsobjekte. Diese können z.B. durch einen erhöhten betrieblichen Unterhalt zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit entstehen.

Strassennutzerkosten

Die Strassennutzerkosten entstehen hauptsächlich durch die zusätzlich Reisezeitkosten, erhöhten Fahrzeugbetriebskosten und zusätzlich entstehende Unfallkosten (vgl. Abb. 2.31 und Kapitel 2.2.5). Dabei spielen einerseits die Kosten infolge geringerer Geschwindigkeit bei der Ausführung der Massnahmen eine Rolle. Andererseits ist bei Leistungsfähigkeitsengpässen am Anfang der Baustelle mit zusätzlicher Reisezeitkosten und erhöhtem Fahrzeugbetriebskosten infolge Stauerscheinungen zu rechnen. Zusätzlich existieren in den einzelnen Baustellenbereichen unterschiedliche Verkehrssicherheitsniveaus. Aus diesem Grund sind bei den Strassennutzerkosten folgende Kostengruppen von Bedeutung:

- Zusätzliche Reisezeitkosten infolge Stau (Anfang Baustelle)
- Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten infolge Stau (Anfang Baustelle)
- Zusätzliche Unfallkosten in den unterschiedlichen Baustellenbereichen
- Zusätzliche Reisezeitkosten infolge reduzierter Geschwindigkeit innerhalb der Baustelle
- Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten infolge reduzierter Geschwindigkeit innerhalb der Baustelle
- Objektbezogene Folgekosten für den Strassennutzer durch die Realisierung von Folgemassnahmen

Reisezeitkosten

Zusätzliche Reisezeit für den Strassennutzer entsteht durch die reduzierte Geschwindigkeit im Baustellenbereich und durch die Staubildung infolge von Leistungsfähigkeitsengpässen am Anfang der Baustelle. Für die monetäre Quantifizierung der Reisezeit nach den Detailnormen der Kosten-Nutzen-Analyse [21ff] existiert ein Wertgerüst für den Personenverkehr [102] und den Güterverkehr [103]. Dabei kann je nach Detaillierungsgrad des Mengengerüsts ein unterschiedliches Wertegerüst angewendet werden. Hier soll nur die allgemeine Form ohne Unterteilung in Wegzweck und Reiselänge verwendet werden. Für eine weitere Detaillierung wird auf die genannten Schweizer Normen verwiesen. Für den Personen-Individualverkehr ergibt sich demnach für alle Wegzwecke ein durchschnittlicher Zeitkostensatz mit Bezugsjahr 2007 von

$$K_{\text{Zeit, PmV}} = 23.29 \frac{\text{CHF}}{\text{h} \cdot \text{Pers}}$$

Dies gilt für Personenfahrten. Die Verkehrszahlen beziehen sich jedoch auf Fahrzeuge. Deshalb ist der Zeitkostensatz für Personenfahrten mit einem für die Kosten-Nutzen-Analyse KNA relevanten Besetzungsgrad zu multiplizieren. Dieser kann mit

$$B_{pmlV} = 1.54 \frac{Pers}{Fz}$$

für alle Wegzwecke im Jahr 2007 angenommen werden [vgl. 102].

Für den Güterverkehr ergibt sich ein Zeitkostensatz von

$$K_{Zeit,GmlV} = 15.03 \frac{CHF}{h \cdot Fz}$$

im Jahr 2005 [103].

Der Zeitkostensatz ergibt sich dann mit einer Anpassung des Güterverkehr-Zeitkostensatzes von 2.8% auf der Grundlage der Nominallohnentwicklung an die Preisbasis 2007 [104] analog Personenfahrten und in Abhängigkeit zum Schwerverkehrsanteil zu:

$$K_{Zeit} = 15.03 \cdot 1.028 \cdot x + 23.29 \cdot 1.54 \cdot (1 - x) \quad (31)$$

mit K_{Zeit}
 x

Kosten pro Zeiteinheit und Fahrzeug
Anteil des Schwerverkehrs
(bzw. Güterverkehr)

Fahrzeugbetriebskosten

Die Fahrzeugbetriebskosten gliedern sich grundsätzlich in Kosten für die Strassenutzer, welche den Baustellenbereich durchfahren und diejenigen, die Umfahrrouten benutzen. Beim Durchfahren des Baustellenbereichs ergeben sich erhöhte Fahrzeugbetriebskosten einerseits durch die Geschwindigkeitsreduktion und andererseits durch eventuell am Beginn der Baustelle entstehenden Stau (vgl. Kapitel 2.2.5). Je nach Verkehrsbelastung und Grad der Behinderung sollten die Umfahrrouten nicht vernachlässigt werden, da diese auch Auswirkungen auf untergeordnete Netze haben. Beim Extremfall einer Vollsperrung des Baustellenbereichs werden alle Strassenutzer gezwungen, die Umfahrrouten zu wählen.

Die Fahrzeugbetriebskosten setzen sich aus drei Kostenkomponenten zusammen, eine zeitabhängige und eine längenabhängige Komponente sowie die Treibstoffkosten. Im Bereich der Baustellen sind die zeitabhängigen Fahrzeugbetriebskosten und die Treibstoffkosten relevant, da durch die Differenzbildung von Planungs- und Referenzfall die längenabhängige Kostenkomponente gleich Null wird. Die zurückgelegte Distanz über eine Autobahnstrecke mit Baustelle wird dabei gleich der gleichen Strecke ohne Baustelle sein. Dadurch treten keine Differenzkosten bei einer reinen Längenabhängigkeit auf. Diese Differenz der längenabhängigen Fahrzeugbetriebskosten wird bei der Berücksichtigung von Umfangsrouten ungleich Null, da in der Regel eine längere Strecke zurückgelegt werden muss.

Unfallkosten

Die erhöhten Unfallrisiken sind gemäss Kapitel 2.2.5 in den verschiedenen Baustellenbereichen unterschiedlich. Die Quantifizierung in Form der Unfallkosten wird durch die Unfallkostenrate ausgedrückt. Diese bezieht sich auf Strecken und gibt die Unfallkosten pro 1000 Fahrzeugkilometer an [69].

$$UKR_i = \frac{S_{Ri} \cdot 10^3}{DTV_i \cdot 365 \cdot T_{Ri} \cdot L_i} \quad (32)$$

mit	UKR_i	Unfallkostenrate im Abschnitt i
	S_{Ri}	Summe der monetären durch Unfälle verursachten Schäden des Abschnitts i in T Jahren
	DTV_i	durchschnittlich täglicher Verkehr im Abschnitt i
	T_{Ri}	Betrachtete Zeitperiode im Abschnitt i
	L_i	Länge des Abschnitts i

Für die Kosten-Nutzen-Analyse KNA werden folgende Unfallkostenraten angegeben:

Abb. 2.33 Unfallkostenraten auf Autobahnen und Autostrassen inklusive Dunkelziffer [69]

Strassenart	Unfallkostenrate [CHF pro 10 ³ Fzkm]
Autobahn 2-streifig	42.2
Autobahn 3-streifig	41.8
Autostrasse	75.7

Die in Abbildung 2.33 aufgeführten Unfallkostenraten wurden inklusive Dunkelziffer ermittelt. Dem gegenüber stehen die Unfallraten ohne Dunkelziffer (vgl. Abb. 2.21). Durch die Berücksichtigung der Dunkelziffer erfolgt der Einbezug von Unfällen, welche durch die Polizei in der Unfallstatistik nicht erfasst werden. Die Schweizer Norm SN 641 824 [69] verwendet geschätzte angepasste Dunkelziffern für die schweizerischen Autobahnen und Autostrassen [69].

Folgekosten Objekte Strassenbetreiber

Die Folgekosten für den Strassennutzer werden analog der Folgekosten des Strassenbetreibers aus der Erhaltungsplanung übernommen. Hierbei ist zu erwähnen, dass in den Folgekosten der Strassennutzer in der Regel keine Staukosten enthalten sind, da Aussagen über Stauereignisse nur in Zusammenhang mit der Baustellenbildung getroffen werden können. Eine Ausnahme bilden hier Einzelereignisse von Bautätigkeiten, welche innerhalb eines abgegrenzten Bereiches stattfinden und bei denen fest steht, dass diese auch einzeln und nicht innerhalb einer grösseren Baustelle durchgeführt werden. Dies sind zum Beispiel Tagesbaustellen, welche im Rahmen des betrieblichen Unterhalts durchgeführt werden.

Kosten der Auswirkung auf Dritte

Die Kosten der Auswirkungen auf Dritte betreffen die Anrainer der Strassenverkehrsanlage und die Umwelt. Diese Kostenträger werden durch die Auswirkungen infolge Stau am Beginn der Baustelle und durch die einzelnen Massnahmen an den mit der Baustelle umfassten Objekten belastet. Analog der Kosten für Strassenbetreiber und –nutzer existieren auch hier zusätzlich Folgekosten durch die Folgemassnahmen der Erhaltungsmassnahmen.

Die Auswirkungen der Massnahmen an den Objekten auf Dritte unterteilen sich in Verkehr, Transport- und Bautätigkeit sowie Materialherstellung. Diese Auswirkungen können im Prinzip auf Luftschadstoffemissionen, Lärmemissionen und CO₂-Emissionen zurückgeführt werden. Einen ersten Ansatz bietet dazu die Kosten-Nutzen-Analyse der Schweizer Norm [105]. Es fehlen jedoch relevante Kenngrössen und Zusammenhänge der Auswirkungen, welche sich nicht auf Neubauprojekte sondern auf Erhaltungsprojekte beziehen. Es ist wichtig diese Variablen im Modell bereits zu berücksichtigen, obwohl diese Auswirkungen noch nicht abschliessend bekannt sind.

2.3.3 Modellierung Strassenverkehrsanlage, Verkehrsführung und Bauablauf

Nach der Definition der Anforderungen an das Kostenmodell mit einem volkswirtschaftlichen Ansatz stellt sich die Frage, welche systemrelevanten Eigenschaften im Netzwerkmodell zu integrieren sind. Trägt man die relevanten monetären Einzelaspekte der Gesamtkosten in einer Kostenstruktur zusammen (vgl. Abb. 2.31), lässt sich zeigen, dass neben der Massnahmenart diese Einzelaspekte zusätzlich durch die Eigenschaften der Strassenverkehrsanlage, den Bauablauf und die temporäre Verkehrsführung beeinflusst werden. Damit müssen alle drei Ursachen im Modell berücksichtigt werden. Die Randbedingungen werden im Folgenden zuerst einzeln analysiert. Dabei erfolgt eine Definition von relevanten Eigenschaften.

Grundsätzlich sind innerhalb des bestehenden Autobahnnetzes Objekte mit bestimmten Anlageeigenschaften für die Erhaltungsplanung definiert. Diese Eigenschaften werden nun als Grundlage bei einer Modellierung der Anlage für die Baustellenplanung benötigt. Gemäss Kapitel 2.2.2 sind bei einer Betrachtung des Gesamtsystems die Beziehungen zu allen anderen Objekten des Gesamtsystems notwendig. Dabei kann auf die Strassendatenbanken [50] zurückgegriffen werden. Die Autobahnen sind darauf aufbauend in einem Räumlichen Basis Bezugssystem (RBBS), welches ein räumliches, lineares und auf den Strassenverlauf aufbauendes Koordinatensystem definiert. Gemäss der in der Schweizer Norm vorhandenen Begriffsdefinition ist für die in dieser Arbeit erforderliche Abgrenzung ein Streckennetz zu definieren. Dieses besteht aus einer Menge von Strecken. Eine Strecke wird als ein beliebiges Teilstück einer Richtungsfahrbahn definiert, welches durch Anfangs- und Endort begrenzt ist. Folgende topologische Eigenschaften sind bei einer Abgrenzung der Autobahnen von Bedeutung:

- Der räumliche Aufbau besteht aus zusammenhängenden Strecken (Konnektivität).
- Zusammenhängende Strecken sind einfach und in einer Richtung durchfahrbar und damit gerichtet (Route).
- Es existiert keine Mehrfachbelegung durch verschiedene Strecken (Überlappungsfreiheit).
- Die Knoten sind von verkehrstechnischer Bedeutung und betreffen die Schnittpunkte von Strassenachsen (Schnittpunkt).

Wie schon in Kapitel 2.3.1 erläutert, wird in der Graphentheorie ein Graph generell aus Knoten (Orte oder Verkehrsknoten) und Kanten (z.B. Strecke oder Abschnitt) gebildet. Im Modell wird sich später zur Vereinheitlichung an der Begriffssystematik der Graphentheorie orientiert.

Es stellt sich nun die Frage, welche Randbedingungen im Modell erforderlich sind.

Randbedingungen der Strassenverkehrsanlage

Die Randbedingungen der Strassenverkehrsanlage umfassen diejenigen Eigenschaften der vorhandenen Objekte, welche sich auf die bestehende Autobahn beziehen. Eine grundlegende Eigenschaft der Objekte ist die Zuordnung zu den einzelnen Teilsystemen. Dies sind im Wesentlichen Fahrbahnenstrecken, Kunstbauten sowie Betriebs- und Sicherheitsausrüstung. Die Objekte der Fahrbahnen und Kunstbauten (mit Brücken, Tunnel, Gallerien) bilden die Strecken im Netzwerk und sind über Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen verbunden. Die Objekte der Betriebs- und Sicherheitsausrüstung und übrige Objekte der Kunstbauten sind jeweils Bauwerken und zum Teil Fahrbahnstrecken zugeordnet. In Bezug auf die Querschnittsdefinition beziehen sich die Objekte bei Fahrbahnen im Vergleich mit Brücken zum Teil auf unterschiedliche Hierarchieebenen. Fahrbahnen werden in der Regel richtungsbezogen betrachtet. Deshalb liegen die einzelnen Objekte jeweils auf einer Richtungsfahrbahn (Hierarchieebenen längs und quer). Brücken dagegen nehmen je nach Grösse den gesamten Fahrbahnquerschnitt ein. Diese Objekte sollten dann analog der Hierarchiestruktur der Fahrbahnen ebenfalls in horizontaler Längs- und Querrichtung gegliedert werden. Als Bezugsebene für alle Objekte wird deshalb die Richtungsfahrbahn gewählt. Eine gleiche hierarchische Struktur der unterschiedlichen Objekte muss gewährleistet werden, damit das Modell als Graph gebildet werden

kann.

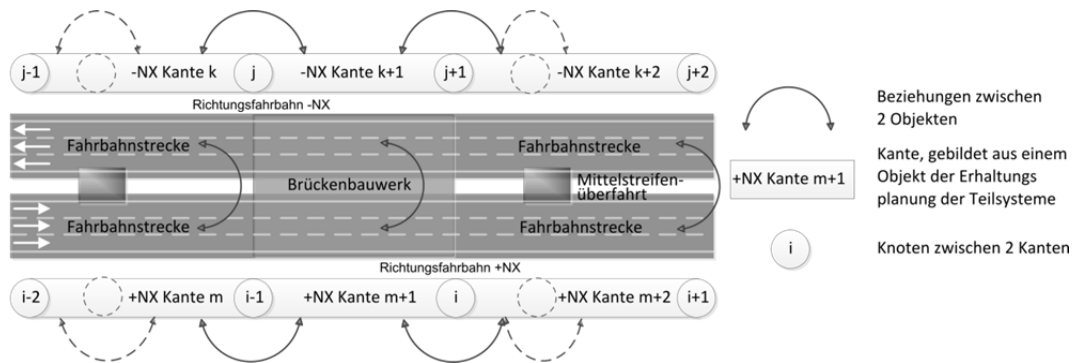


Abb. 2.34 Notwendige Berücksichtigung der Beziehungen zwischen den Objekten bei der Netzmodellierung der Anlage

Bei der Berücksichtigung der Randbedingungen der Strassenverkehrsanlage für die Baustellenplanung reicht es jedoch nicht aus, die Objekte mit ihren Eigenschaften aus der Massnahmenplanung zu übernehmen. Zusätzlich wird es notwendig, die Orte im Netz zu definieren, an denen eine Mittelstreifenüberfahrt (vgl. Abb. 2.34) oder Ein- und Ausfahrten vorhanden sind, wenn diese im Graphen-Modell (Knoten und Kanten) berücksichtigt werden sollen. Ebenso sind Unstetigkeiten, wie eine Änderung der anlagebedingten Fahrstreifenanzahl oder Breitenänderung mit einzubeziehen, wenn dies noch nicht durch die Erhaltungsplanung geschehen ist. Diese werden in der Regel jedoch berücksichtigt. Liegt eine Unstetigkeit in der Mitte eines Objekts (z.B. Mittelstreifenüberfahrt in der Mitte einer Fahrbahnstrecke), wird dieses Objekt im Graph geteilt (vgl. Abb. 2.34). Zusätzlich sind die aus der Situation an Autobahnen entstehenden Beziehungen zwischen den Objekten der beiden Richtungs-fahrbahnen zu definieren. Das heisst z.B. es sind durch die Anordnung der Richtungs-fahrbahnen bei einer Baustelle in einer Richtung eventuell Auswirkungen auf die Gegenrichtung Beeinträchtigungen möglich. Liegen beide Richtungs-fahrbahnen nicht nebeneinander, ist auch keine gegenseitige Beeinflussung zu erwarten. Dies ist in Bezug auf den Verkehrsfluss durch ein entsprechendes Attribut im Modell zu berücksichtigen.

Verkehrsführungsbedingte Randbedingungen

Neben den Randbedingungen der Strassenverkehrsanlage sind die verkehrsführungsbedingten Randbedingungen, welche temporär durch die geplante Baustelle auftreten, mit einzubeziehen. Im Bereich von Baustellen sind nach Kapitel 2.2.3 drei verschiedene Baustellentypen in Bezug auf die Anordnung der Fahrstreifen definiert. Durch die Neuordnung der Fahrstreifen im Baustellenbereich erfolgt der Eingriff in die vorhandene Verkehrsführung der bestehenden Strassenverkehrsanlage. Neben den daraus resultierenden Auswirkungen auf den Verkehrsfluss des jeweiligen Objekts einer temporären Neuordnung der Fahrstreifen sind ebenfalls die Auswirkungen auf den Verkehrsfluss an anderen Objekten zu berücksichtigen. Die einzelnen aus der Baustelle resultierenden Änderungen müssen im Streckennetzmodell berücksichtigt werden, da die jeweilige temporäre Verkehrsführung einerseits Kosten für den Strassenbetreiber verursacht und andererseits auch Auswirkungen auf den Strassenutzer und auf Dritte hat. Es sind deshalb neben den verkehrsführungsbedingten Beziehungen der Objekte zum Vorgänger- bzw. Nachfolgerobjekt auch jene zum Objekt der gegenüberliegenden Richtungs-fahrbahn zu berücksichtigen (vgl. Abb. 2.34).

Je nach Umfang der Massnahme ist bei den dafür notwendigen Bautätigkeiten ein bestimmter Platzbedarf auf der Fahrbahnoberfläche vorhanden. Das heisst bei kleineren Massnahmen wird nur eine Neuordnung von Fahrstreifen der betroffenen Richtungs-fahrbahn (Baustellentyp A) notwendig. Dabei erfolgt eine Verschwenkung mit oder ohne eine Reduktion der vorhandenen Anzahl an Fahrstreifen. Die gegenüberliegende Richtungs-fahrbahn ist davon nicht betroffen. Bei Massnahmen mit grösserem Umfang erfolgt, eine Überleitung von einem oder mehreren Fahrstreifen auf die gegenüberliegende Richtungs-fahrbahn. Dabei erfolgt dort ebenfalls eine Neuordnung der Fahrstreifen. Obwohl keine

Bautätigkeit auf dieser Richtungsfahrbahn stattfindet, ist eine Auswirkung auf den Verkehr durch die Massnahme der Gegenseite vorhanden.

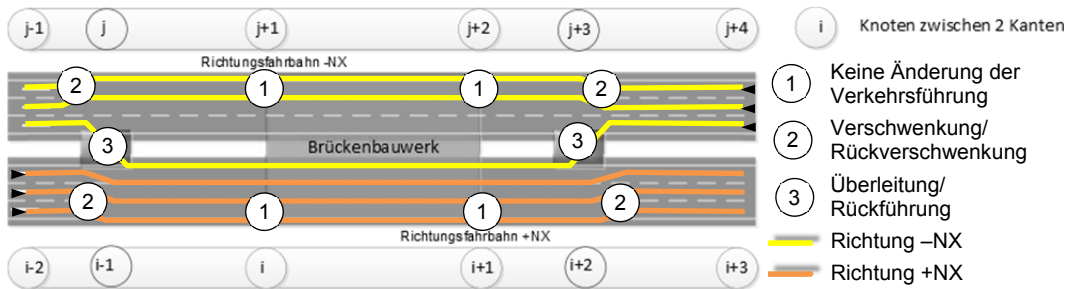


Abb. 2.35 Eigenschaften bei einer 4+2 Verkehrsführung im Bereich einer Baustelle

Bedingt durch die Anordnung der mit einer Baustelle umfassten Objekte, wie Fahrbahnstrecken und Brückenbauwerke, können verschiedene Arten der Verkehrsführung bei unterschiedlichen Platzverhältnissen vorkommen. Gerade über eine grössere Baustellenlänge sind unterschiedliche Verkehrsregime innerhalb der Baustelle nicht selten.

Randbedingungen aus dem Bauablauf

Je nach definierter Erhaltungsmassnahme für ein Objekt werden neben den anlage- und verkehrsführungsbedingten Eigenschaften zusätzlich Informationen über den zeitlichen Verlauf, das heisst den Bauablauf der Massnahme benötigt. Je nach Wahl der Verkehrsführung (verkehrsbedingte Randbedingung) auf der bestehenden Anlage (anlagebedingte Randbedingung) kann dies Auswirkungen auf den Bauablauf haben. Eine Berücksichtigung dieser zeitlichen Randbedingung ermöglicht die Abbildung der Zusammenhänge der unterschiedlichen Auswirkungen bei der Art und Weise der Baustellenausführung. Bei einer Vollsperrung könnte die Bautätigkeit auf dem betroffenen Objekt innerhalb kürzester Zeit erfolgen. Im Gegensatz dazu sind bei einer Ausführung der Massnahmen unter Verkehr je nach Verkehrsführung und anlagenbedingten Randbedingungen erheblich längere Bauzeiten einzuplanen. Dabei sind Verkehrsführungen im Baustellenbereich mit einer Sperrung einer Richtungsfahrbahn (z.B. 4+0) gegenüber einer nur teilweisen Sperrung (z.B. 3+1) für den Bauablauf vorteilhafter. Behinderungen des Bauablaufs werden dadurch verringert und die Dauer der Baumassnahme verkürzt. Die Dauer einer Massnahme hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auswirkungen auf Strassennutzer und Dritte und damit auf die Gesamtkosten.

Neben der Dauer sind zusätzlich die Bauphasen von Interesse. Hier entstehen unter Umständen zusätzliche Wechsel in den Verkehrsführungen zwischen den verschiedenen Baustellenbereichen. Dies ist gerade im Hinblick auf die verkehrssicherheitsrelevante Auswirkungen auf den Strassennutzer und den damit verbundenen Kosten von Bedeutung (vgl. Kapitel 2.2.5).

2.3.4 Optimierung

Die Optimierung ist im Allgemeinen die Minimierung oder Maximierung einer Zielfunktion unter der Berücksichtigung von definierten Randbedingungen innerhalb eines definierten Zeithorizonts. Gemäss dem in Kapitel 2.2.6 aufgestellten Zielsystem der Baustellenplanung bilden diese Zielfunktion die Gesamtkosten. Die Variablen dieser Zielfunktion bilden dann die einzelnen in Abbildung 2.31 dargestellten Kostengruppen eines jeden Objekts im betrachteten Autobahnabschnitt.

Die Randbedingungen werden einerseits durch das gerichtete Netzwerk vorgegeben, in dem die Objekte als Strecke (Kante) zwischen zwei Orten (Knoten) linear geordnet mit einander verbunden vorliegen. Dabei wird auf jedem Objekt eine definierte Anzahl von Massnahmen zugelassen. Es stellt sich nun die Frage, welche Baustelle mit Verkehrsführung abgebildet im Netzwerk zu den geringsten Gesamtkosten führen.

Dies ist eine klassische Aufgabe, welche man mit Hilfe der Modellierung eines Graphs algorithmisch lösen kann. Graphen haben den Vorteil einer sehr einfachen Struktur, wel-

che mit Hilfe von Adjazenzmatrizen oder Inzidenzmatrizen abgebildet ist. Adjazenzmatrizen definieren die benachbarten Knoten. Inzidenzmatrizen definieren die Kanten durch Anfangs- und Endknoten. Das vorhandene Netzwerk lässt sich somit mit Hilfe der Graphentheorie sehr einfach modellieren. Zudem existieren zur Lösung des praktischen Problems der Ermittlung der Baustelle unter Minimierung der Gesamtkosten erprobte Algorithmen, welche zum gesuchten Optimum führen.

Das Optimum wird durch die eindeutige Belegung der Objekte mit Massnahmen gefunden. Es wird sich für oder gegen eine Massnahme entschieden. Eine Doppelbelegung wird ausgeschlossen. Das Problem ist somit binärer Natur und wird aus diesem Grund als ein binäres lineares Optimierungsproblem formuliert. Zur Lösung existieren einerseits exakte wenn auch aufwendige Verfahren und andererseits eine Vielzahl von Heuristiken. Ein exaktes Standardverfahren ist das Branch and Bound Verfahren. Aufgrund der standardmässigen Verfügbarkeit und der Aussicht einer exakten und damit optimalen Lösungsvariante wird hier dieses Lösungsverfahren unter Anwendung der graphentheoretischen Modellierung gewählt. Die heuristischen werden aus gleichem Grund ausgeschlossen und in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

2.4 Einsatz der Graphentheorie und mathematische Programmierung

2.4.1 Allgemeine Definition von Graphen

Ein Graph $G = (N, A)$ ist eine aus zwei Mengen bestehende Menge (2-Tupel). Die zwei Untermengen sind die Menge der Knoten N und die Menge der Kanten A . Eine Kante ist wiederum ein aus Elementen von N gebildetes 2-Tupel. Umgangssprachlich besteht ein Graph also aus Knoten und Kanten die jeweils zwei Knoten miteinander verbinden.

Ein Graph kann gerichtet oder ungerichtet sein. Der Unterschied besteht in der Art der Kanten. In einem ungerichteten Graph sagt das Vorhandensein der Kante $A(A, B)$ aus, dass es sowohl eine Verbindung von A nach B als auch eine von B nach A gibt. In einem gerichteten Graph sagt diese Beispielkante lediglich aus, dass es eine Verbindung von A nach B gibt. Um gleichfalls eine Verbindung von B nach A zu haben, muss es auch die Kante $A(B, A)$ geben.

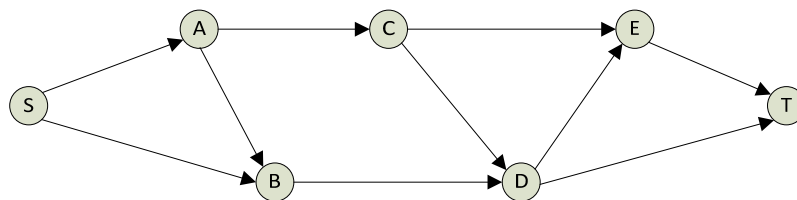


Abb. 2.36 Beispiel eines gerichteten Graphen mit Quelle und Senke

2.4.2 Graphenprobleme

Die Graphentheorie als Gebiet der Mathematik bzw. theoretischen Informatik setzt sich mit Graphen und den auf ihnen definierten Problemstellungen auseinander. Die vielleicht bekanntesten sind kürzeste Wege, maximale Flüsse und Färbung. Viele dieser Probleme sind sehr gut untersucht und können teilweise durch sehr effiziente Algorithmen gelöst werden. Graphen eignen sich deshalb sehr gut zur Modellierung verschiedener Problemstellungen aus der Praxis.

Maximaler Fluss

Die Problemeformulierungen des maximalen Flusses werden üblicherweise auf einem gerichteten Graphen betrachtet der mit der Quelle (s) und der Senke (t) zwei besondere Knoten hat (vgl. Abbildung 2.36). Durch diesen Graph wird nun ein Fluss transportiert der gesamthaft in S beginnt und komplett in T endet. Es geht somit kein Fluss im Gra-

phen verloren. Alle übrigen Knoten übernehmen den Fluss aus ankommenden Kanten und leiten den Fluss komplett weiter in ausgehenden gerichteten Kanten. Jeder Kante wird dabei eine Kapazität zugewiesen. Diese gibt an, welche Kapazität ein Fluss, der über diese Kante transportiert wird, maximal haben darf. Das Ziel dieser Problemstellung ist nun die Maximierung des Flusses der durch das Netzwerk transportiert wird [106]. Dies soll beispielhaft Abbildung 2.37 zeigen.

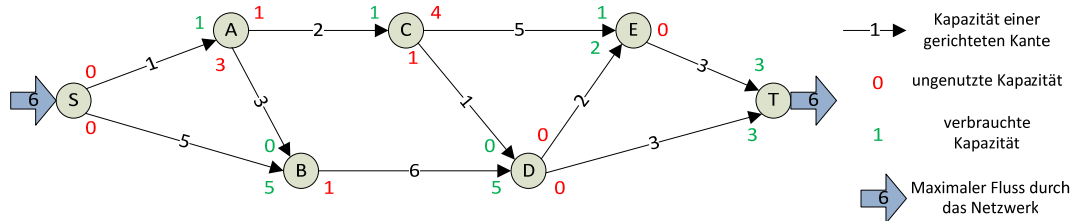


Abb. 2.37 Beispiel des maximalen Flusses in einem Netzwerk

2.4.3 Mathematische Programmierung

Ein mathematisches Programm ist eine Sammlung von (Un)Gleichungen und Randbedingungen mit denen ein Optimierungsproblem formal beschrieben wird. Es besteht aus einer Zielfunktion und Randbedingungen. Dabei hängt die Zielfunktion von Variablen ab, deren Wertemenge durch die Randbedingungen eingeschränkt wird. Die Zielfunktion beschreibt den Wert der mini- oder maximiert werden soll. Die Randbedingungen definieren Abhängigkeiten, die zusätzlich beachtet werden müssen. Dies soll durch folgendes Beispiel gezeigt werden.

$$\text{Minimiere} \quad 5x_1 + 3x_2 \tag{33}$$

$$\text{so dass} \quad 5x_1 + 2x_2 = 24 \tag{34}$$

$$x_1, x_2 \in \mathbb{N}_0 \tag{35}$$

Die Gleichung (33) stellt die Zielfunktion dar, welche in diesem Beispiel minimiert werden soll. Dabei muss die Randbedingung in Gleichung (34) erfüllt werden. Zusätzlich sind für die Variablen x_1 und x_2 nur ganze Zahlen zugelassen. Das in den Gleichungen beschriebene Problem kann auch graphisch dargestellt werden (vgl. Abb. 2.38). Hierbei werden die Zielfunktion als Gerade und die Randbedingungen durch die Ganzzahligkeitsbedingung als Punkte dargestellt.

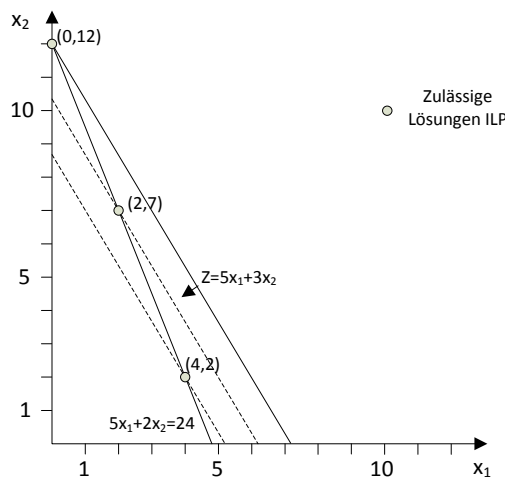


Abb. 2.38 Beispiel in graphischer Form

Eine zulässige Lösung des Programms belegt die Variablen ohne eine Verletzung der definierten Randbedingung. Eine optimale Lösung ist eine zulässige Lösung deren Zielfunktionswert mindestens (bei einem Maximierungsproblem) bzw. höchstens (bei einem Mi-

nimierungsproblem) so gross ist, wie der Zielfunktionswert aller anderen zulässigen Lösungen. Die Definition einer optimalen Lösung zeigt schon auf, dass es durchaus mehrere (gegebenenfalls total unterschiedliche) zulässige Lösungen geben, kann die alle den gleichen optimalen Zielfunktionswert haben.

Dieses mathematische Programm ist in zweierlei Hinsicht besonders. Erstens sind sowohl die Zielfunktion als auch die Nebenbedingung linear, es wird daher auch linear genannt. Zweitens dürfen seine Variablen lediglich ganzzahlige Werte annehmen, es wird daher ganzzahliges lineares Programm genannt (im Englischen: Integer Linear Program ILP). Das in diesem Forschungsauftrag verwendete Programm ist ein binäres lineares Programm (BLP) [vgl. u.a. 4], es stellt somit ein ganzzahliges lineares Programm dar, welches ausschliesslich binäre Variablen verwendet. Aus diesem Grund wird nur kurz auf lineare Programme (LP) und im weiteren Verlauf nur auf ILPs näher eingegangen.

Die Komplexität des in den Gleichungen (33) bis (35) gezeigten Beispiels ist sehr gering. Bei zwei Variablen und einer Nebenbedingung zuzüglich der Ganzzahligkeitsbedingung ist eine Berechnung schliesslich ohne weiteres im Kopf möglich. Die Abbildung von realen Problemen in einem mathematischen Programm ist weitaus komplexer.

2.4.4 Komplexitätstheorie

Um zu bestimmen, wie schwierig das Finden einer Lösung für ein bestimmtes Problem ist oder auch um wie Schwierigkeit verschiedener Probleme miteinander zur vergleichen wird die Komplexität eines Problems untersucht. Diese definiert sich nicht darüber, wie lange die Lösung einer bestimmten Problem Instanz auf einem bestimmten Rechner benötigt. Stattdessen werden obere Schranken für die Laufzeit oder den Speicherbedarf der Lösung eines allgemeinen Problems in Abhängigkeit von der Grösse der Eingabe (z.B. Anzahl der berücksichtigten Objekte) bestimmt. Unter Laufzeit versteht man dabei hier, die Anzahl der Schritte des Algorithmus bis das Problem gelöst ist (im Falle eines Optimierungsproblems also bis eine optimale Lösung gefunden ist). Aufgrund dieser Werte werden die Probleme in Komplexitätsklassen unterteilt. Eine der wichtigsten Klassen ist P . Diese beinhaltet alle Probleme, die in Polynomzeit gelöst werden können. Damit ist gemeint, dass sich die Abhängigkeit der Laufzeit von der Eingabe durch ein Polynom darstellen lässt. Welchen Grad dieses Polynom hat, spielt dabei keine Bedeutung. Auch wenn sich in P viele unterschiedliche Probleme mit höchst unterschiedlichen Laufzeiten befinden, so haben doch alle diese Probleme gemeinsam, dass man sie als effizient lösbar bezeichnet.

Obwohl die Probleme ausserhalb von P , d.h. NP -Probleme seit Jahren das Objekt intensiver Forschung sind, so hat man dennoch bisher ein paar grundlegende Fragen nicht klären können. Allgemein wird z.Z. davon ausgegangen, dass es für sie keinen effizienten (d.h. in Polynomzeit lösbaren) Algorithmus gibt. Dies ist allerdings nicht bewiesen.

2.4.5 Lineare Programme (LP) und ganzzahlige lineare Programme (ILP)

Ein LP ist ein mathematisches Programm, für welches gilt, dass sowohl Zielfunktion als auch Nebenbedingungen linear sind. Die Wertemenge der Variablen ist Teil der reellen Zahlen \mathbb{R} . Für LPs gibt es mehrere Algorithmen, die diese effizient lösen können. Der wohl bekannteste ist der Simplexalgorithmus. Obwohl dieser, im Gegensatz zu anderen Algorithmen, nicht immer in polynominaler Zeit zum Erfolg führen muss, hat er sich doch in der Praxis bisher als der beste erwiesen.

Im Gegensatz zu LPs sind ILPs i.A. nicht mehr effizient lösbar. Einfach ausgedrückt heisst das, dass es für jedes als ILP formulierte Problem und jeden Lösungsalgorithmus eine Instanz gibt, bei der die Anzahl der zur Berechnung der Lösung benötigten Schritte exponentiell von der Grösse der Eingabe abhängt. Wie oben schon ausgeführt ist dies nur eine Vermutung, die jedoch den aktuellen Stand der Wissenschaft widerspiegelt.

Warum ILPs so viel schwieriger sind als LPs lässt sich gut am sogenannten Rucksackproblem nachvollziehen. Gegeben sei ein Rucksack, der ein gewisses Gewicht aufnehmen kann. Des Weiteren gebe es eine grosse Menge an Elementen, die jeweils ein Ge-

wicht als auch einen Wert haben. Der Rucksack soll nun derart gepackt werden, dass die Summe der Werte der eingepackten Elemente maximiert aber die Gewichtsgrenze nicht überschritten wird. Für jedes Element gibt es dann eine Variable, die sich zwischen 0 (nicht eingepackt) und 1 (eingepackt) bewegt.

Wenn das Problem als LP formuliert wird, dürften die Variablen auch alle Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Bezogen auf die eingepackten Elemente hiesse das, dass ein Element auch zerteilt und teilweise eingepackt werden darf. Die Lösung ist unter diesen Bedingungen sehr einfach zu finden. Die Dichte eines Elementes wird als Wert/Gewicht definiert. Es müssen dann lediglich die Elemente nach ihrer Dichte sortiert und immer das Element mit der grössten Dichte, welches sich noch nicht im Rucksack befindet, eingepackt werden. Falls das Element mit der grössten Dichte ausserhalb des Rucksackes nicht mehr ganz in den Rucksack passt, wird von diesem Element ein so grosses Stück genommen, dass es die verbleibende Lücke im Rucksack genau ausfüllt. Bei der Füllung jedes Teils des Rucksackes wurde also stets das Element mit der grössten verfügbaren Dichte eingepackt. Es ist also nicht möglich die Dichte der eingepackten Elemente zu erhöhen. Da gleichzeitig auch das Gewicht der eingepackten Elemente nicht erhöht werden kann, wird auf diese Weise schnell die optimale Lösung gefunden. Algorithmen die dieser Vorgehensweise folgen nennt man auch Greedy(=gierig)-Algorithmen.

Wird das Problem hingegen als ILP formuliert, so können die Variablen nur die Werte 0 und 1 annehmen. Ein Element kann also nur ganz eingepackt werden oder gar nicht. Nun werden die Elemente wiederum der Dichte nach sortiert. Es ist nun aber extrem unwahrscheinlich, dass durch das Einpacken der ersten i Elemente der Rucksack genau gefüllt werden kann. Und auch bei der Betrachtung aller möglichen Kombinationen der eingepackten Elemente ist es sehr unwahrscheinlich, dass der Rucksack genau gefüllt werden kann. Der Algorithmus muss nun also versuchen, einerseits die verbleibende Lücke möglichst klein zu halten, aber andererseits auch die durchschnittliche Dichte der eingepackten Elemente möglichst hoch. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es bei n Elementen $\sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!}$ potenzielle Lösungen gibt (die jedoch nicht alle zulässig sind), würden das Finden einer optimalen Lösung durch einfaches untersuchen aller Lösungen viel zu lange dauern. Die zu bewältigende Schwierigkeit bei der Modellierung des Algorithmus liegt also darin, einen Weg zu finden, möglichst wenig zulässige Lösungen zu betrachten und dennoch eine optimale zu erhalten.

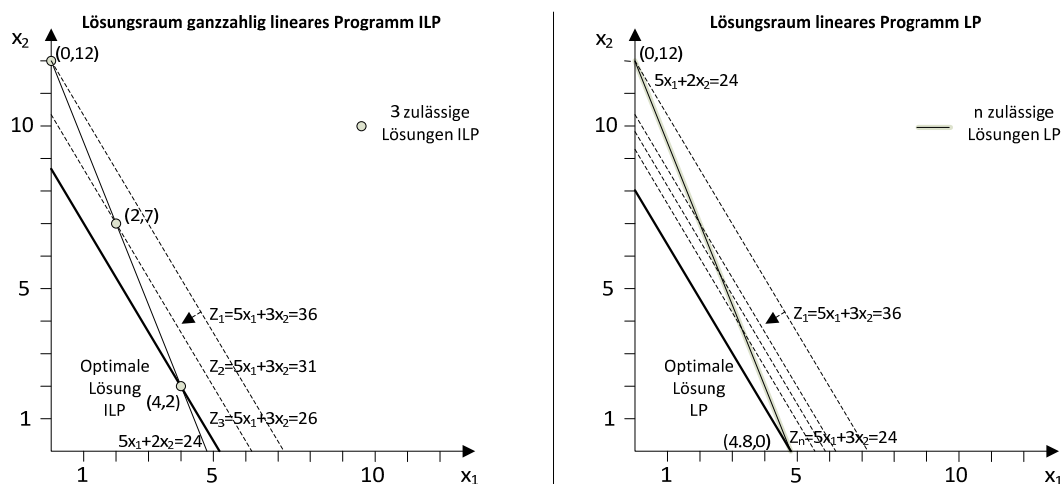


Abb. 2.39 Vergleich des Lösungsraums bei ILP und LP im Beispiel

Vergleicht man die Formulierung und Lösungen des Beispiels als ILP und LP, wird deutlich worin der Unterschied liegt (vgl. Abb. 2.39). Dies zeigt aber auch, dass der Lösungsraum einerseits auf ganzzahlige Variablen eingeschränkt wird, andererseits bei sehr komplexen Problemen und der Verwendung von abschätzenden Algorithmen (z.B. auf der Grundlage der LP Formulierung) das Optimum nicht gefunden werden kann.

Trotz dieser theoretischen Schwierigkeit lassen sich gerade Problemstellungen in der Praxis oft nur mit ganzzahligen linearen Programmen darstellen. Bei der Herstellung eines Produktes ist nur eine ganzzahlige Lösung zulässig. Bei gewissen Problemen kommt noch hinzu, dass es sich auf die binären Variablen 0 und 1 beschränkt. Gerade im Bereich der Entscheidungsfindung gibt es meist nur die Lösung für oder gegen eine Entscheidung. Gerade binäre lineare Programme lassen sich zum Teil leichter lösen. Wie oben schon erwähnt kommt es dabei auf den Algorithmus und die Struktur der Problem Instanz an, d.h. die Formulierung der Problemstellung in einer geeigneten Struktur des mathematischen Programms [106].

2.4.6 Branch-and-Bound

Diese Methode wurde im Bereich der Optimierung schon auf viele Problemstellungen erfolgreich angewendet. Besonders weit verbreitet ist der Einsatz der Branch-and-Bound-Methode zur Lösung von ILPs [106].

Die Herangehensweise basiert darauf, dass zu betrachtende Problem immer weiter in Teilprobleme zu unterteilen (Branch engl. Verzweigung) werden. Für diese Teilprobleme erfolgt die Ermittlung von unteren bzw. oberen Schranken der Lösungsmenge. Mit Hilfe dieser Schranken wird es möglich zu erkennen, dass gewisse Teilprobleme aus der zukünftigen Betrachtung ausgeschlossen werden können ohne das Ergebnis zu verändern (Bound engl. Schranke). Die Anzahl der zu betrachtenden Lösungen wird dadurch u.U. erheblich gesenkt [106].

2.5 Datengrundlagen

2.5.1 Vorbemerkungen

In den bisherigen Abschnitten erfolgte die Darstellung der Grundlagen, welche zur Herleitung des Verfahrens und der dafür erforderlichen Quantifizierung notwendig sind. Zusätzlich wurden zur Validierung des Optimierungsverfahrens zwei Baustellenbeispiele aus dem schweizerischen Autobahnnetz verwendet. Diese Beispiele wurden aufgrund der vorhandenen Ressourcen und Möglichkeiten zur Erhebung der relevanten Daten ausgewählt.

Aus diesem Grund wurde eine allgemeine Umfrage zu ausgesuchten Baustellenabschnitten bei den ASTRA-Filialen und zugehörigen Gebietseinheiten durchgeführt. Damit wurden erste Informationen zu den unterschiedlichen Baustellen und die vorhandenen Möglichkeiten zur Datenerhebung gewonnen.

2.5.2 Evaluation der Baustellenobjekte

Bei der Evaluation erfolgte die Durchführung einer Umfrage bei verschiedenen Filialen und Gebietseinheiten über sieben Autobahnbaustellenprojekte mit verschiedenen Erhaltungsmaßnahmen an Fahrbahnen, Kunstbauten oder Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen. Dabei wurden allgemeine Informationen zur Anlage, zur Verkehrsbelastung und zur Baustellensituation erfragt. Die folgende Abbildung 2.40 gibt eine Übersicht über die einbezogenen Autobahnbaustellen.

Aus diesen sieben Autobahnbaustellen wurden zwei Baustellenobjekte gewählt. Da umfangreiche Datenerhebungen hinsichtlich Kosten, Verkehrsführung und Bauablauf geplant waren, erfolgte die Evaluation dieser zwei Baustellenobjekte hinsichtlich der Zugänglichkeit zu den Daten. Für die Autobahnbaustellen A1 St. Gallen/Rheineck und A2/A3 Basel Hagnau-Augst standen die Daten zur Verfügung.

Abb. 2.40 Autobahnbaustellen der Umfrage bei verschiedenen Filialen und Gebietseinheiten

Baustellen	Länge	FS	V _{signal} [km/h]	DTV [Fz/d]	Massnahmen	TS	Kosten [Mio CHF]
A1 Kriegstetten/Önsingen	18 km	2x2	120	82000 (?% SVA)	Erneuerung FB, Instandsetzung KB, BSA	FB, KB, BSA	123
A1 St Gallen St. Fiden-Rheineck	17 km	2x2	120	58000/ 41000 (6% SVA)	Instandsetzung FB, KB	FB, KB	106
A2 Emmen Verzw. A2/A14	4.3 km	2x3	100 (80)	62000 (15% SVA)	Instandsetzung FB, LSW	FB	123
A2 Zürich West	4.5 km	2x2	100	? (?% SVA)	Instandsetzung FB, KB, BSA	FB, KB, BSA	73
A3 Richterswil Blatt-Tunnel	3 km	2x2	100 (80)	50000 (10% SVA)	Erneuerung BSA, Entwässerung	BSA	27.5
A2/A3 Basel Hagnau-Augst	10 km	3x3	120 (100)	130000 (6.5% SVA)	Erneuerung FB, Instandsetzung KB	FB, KB	185
A9 Arzimar Bex/Martigny	13 km	2(3)x2	120	32000 (5% SVA)	Instandsetzung FB, KB, BSA	FB	96.5

FS Fahrstreifen
 FB Fahrbahnen
 KB Kunstbauten
 BSA Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen
 SVA Schwerverkehrsanteil
 LSW Lärmschutzwände

2.5.3 A2/A3 Basel Hagnau-Augst

Situation und Massnahmen an der Strassenverkehrsanlage

Im Bereich des ca. 10 km langen Autobahnabschnitts der Nationalstrasse A2/A3 zwischen den Verzweigungen Hagnau und Augst mit drei-streifigen Richtungsfahrbahnen erfolgte in den Jahren 2006 und 2007 eine Erneuerung der gebundenen Schichten in Verbindung mit einer Planieabsenkung. Diese Planieabsenkung erfolgte zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Oberbaus durch eine Ergänzung einer Kaltmischfundationsschicht auf der bestehenden Kiessandfundationsschicht. Nach einer erneuten Dimensionierung im Rahmen der Planung wurde eine zu geringe Oberbaudicke verzeichnet. Der Zustand zeigte sich zum Teil mit sehr starken Schäden im Bereich der Belagsschäden hinsichtlich Ebenheit [107]. Vor- und Nacharbeiten wurden zusätzlich in den Jahren 2005 und 2008 durchgeführt.

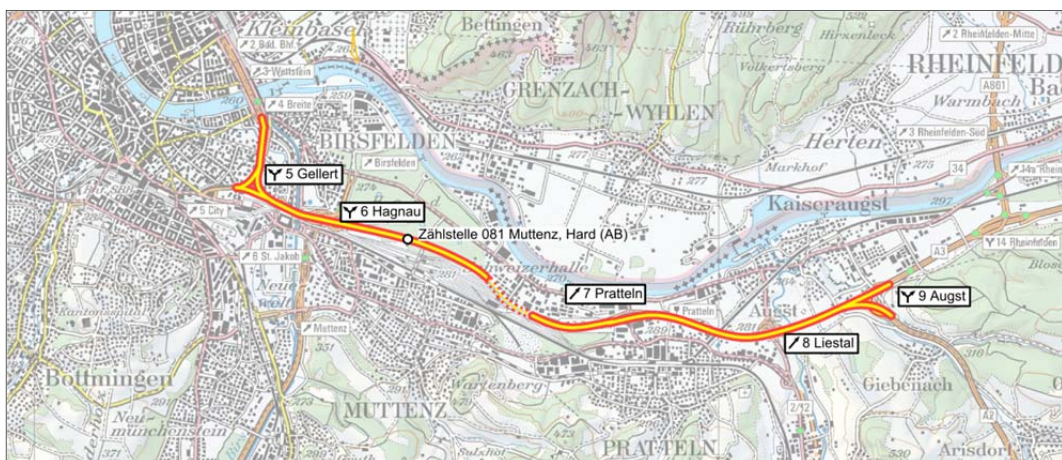


Abb. 2.41 Situationsplan der Autobahnbaustelle A2/A3 Basel Hagnau-Augst [Hintergrundkarte vgl. 108]

Diese erste umfassende Instandsetzung und Erneuerung in diesem Bereich erfolgte nach insgesamt 35 Jahren Betriebszeit und mit dem Ziel, diesen Autobahnabschnitt weitere 10-15 Jahre ohne eine Erhaltungsmassnahme sicher zu betreiben. Durch die starke Verkehrsbelastung soll zusätzlich der Pannestreifen bei Bedarf als Fahrstreifen zur Verfügung stehen. Zum Schutz der auf dem bisherigen Pannestreifen befindlichen Schächte wurden zusätzlich die Entwässerungsleitungen erneuert und die Schachtstandorte ausserhalb der Fahr- und Pannestreifen gelegt. Neben den Massnahmen für Fahrbahnen erfolgten ebenfalls Erhaltungsmassnahmen an verschiedenen Kunstbauten der Strecke.

Vorgehen bei der Baustellenplanung

Die Baustellenplanung für diese Autobahnbaustelle erfolgte durch die Abteilung Hochleistungsstrassen des Kantons Basel-Landschaft in Abstimmung mit dem Bundesamt für Strassen ASTRA.

Verkehrsbelastung

Der Autobahnabschnitt A2/A3 Basel Hagnau-Augst gehört bei drei Fahrstreifen je Richtung zu den höchstbelasteten Nationalstrassen der Schweiz. Neben dem nicht unerheblichen Teil des europäischen Transitverkehrs muss dieser Bereich noch den Agglomerationsverkehr bewältigen. Dies führt generell zu erheblichen Auswirkungen bei der Realisierung von Erhaltungsmassnahmen auf den Strassennutzer.

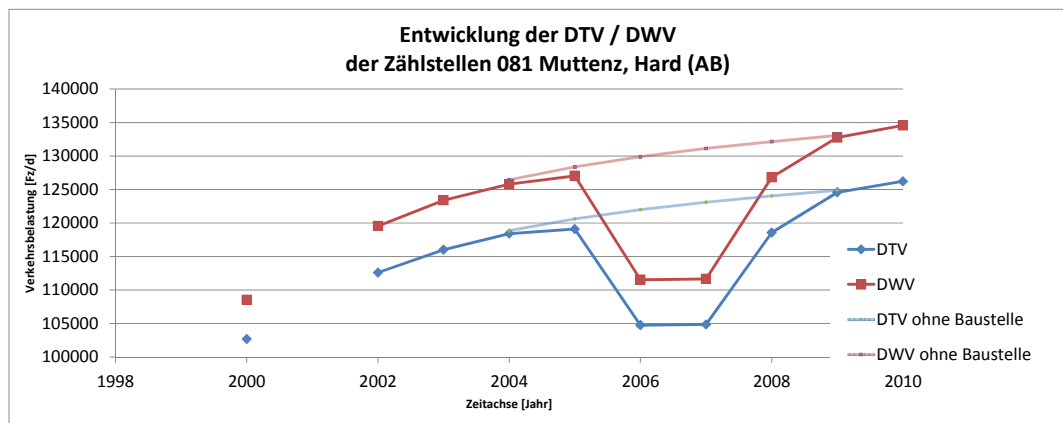


Abb. 2.42 Entwicklung des gesamten DTV und DWV (beide Richtungen) aus Daten der Zählstelle 081 Muttenz Hard (AB)

Die Abbildung 2.42 verdeutlicht dies an der Entwicklung des durchschnittlich täglichen Verkehrs (DTV) und des durchschnittlichen wochentäglichen Verkehrs (DWV) an der automatischen Zählstelle 081 Muttenz, Hard (AB) bis zum Jahr 2010. Weitere Verkehrsdaten standen nicht zur Verfügung. Aus diesem Grund wird vereinfacht auf die stündlichen, täglichen und jährlichen Verkehrsdaten dieser Zählstelle stellvertretend für den gesamten Baustellenbereich zurückgegriffen.

Nach der Betrachtung der Entwicklung der Verkehrsbelastung ohne die Jahre 2005 bis 2008 folgt der Trend gut einer ansteigenden logarithmischen Funktion, mit der fiktive DTV- und DWV-Werte geschätzt werden konnten (vgl. Abb. 2.42). Dies zeigt einerseits eine abschätzbare Grössenordnung des Verkehrs auf den Ausweichrouten und eventuelle Änderungen des Modal Splits. Andererseits wird durch den abnehmenden Anstieg des Trends auch die Annäherung der Verkehrsbelastung an die Kapazitätsgrenze dieses Autobahnbereichs deutlich. In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass für diese Baustelle bei einer Beibehaltung der Anzahl der Fahrstreifen eine Engstellenproblematik vorherrscht.

Bei der Betrachtung der Jahresganglinien der täglichen Verkehrsbelastung über die Jahre 2007, 2008 und 2010 wird der Unterschied zwischen der Zeit mit und ohne Realisierung der Baustelle ebenfalls deutlich (vgl. Abb. 2.43).

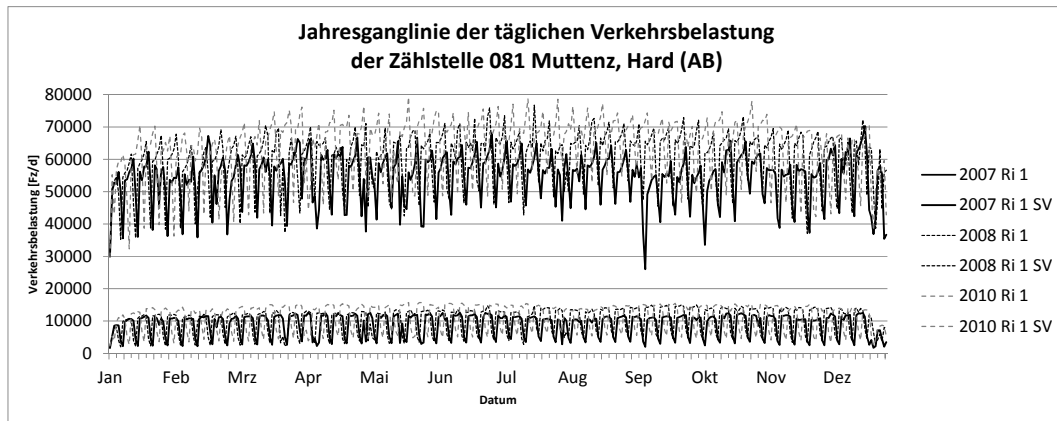


Abb. 2.43 Jahresganglinie der täglichen Verkehrsbelastung des Gesamtverkehrs der Richtung 1 (Augst) der Jahre 2007, 2008 und 2010 aus Daten der Zählstelle 081 MuttENZ Hard (AB) mit zugeordnetem Schwerverkehrsanteil (SV)

Auffallend ist die Annäherung der Kurven für die Jahre 2007, 2008 und 2010 im Monat Dezember. Die Verkehrsbeeinträchtigungen existierten im Dezember des Jahres 2007 nur noch minimal nach Abschluss der Hauptarbeiten der Instandsetzungsmassnahmen. Im Jahr 2008 erfolgten zwischen Januar und Juni die Abschlussarbeiten und zeigen dafür ebenfalls noch eine tiefere Verkehrsbelastung.

Betrachtungen zur Leistungsfähigkeit

Je nach Ansatz kann die Leistungsfähigkeit einerseits als feste Grösse [57] oder als Zufallsgrösse beschrieben [vgl. 67] werden. Wie in Kapitel 2.2.5 ausgeführt, gelten gemäss [57] folgende Leistungsfähigkeitsangaben für die drei-streifigen Richtungsfahrbahnen. Dabei wird zur Vereinfachung über den gesamten Autobahnabschnitt eine Längsneigung von kleiner zwei Prozent angenommen (vgl. Abb. 2.44). Die signalisierte Geschwindigkeit beträgt im Normalzustand 120 km/h.

Für eine Betrachtung der Verkehrsqualität des Baustellenbereichs erfolgt eine Bildung der Dauerkurve für die ersten 100 Stunden mit den stündlichen Daten der automatischen Zählstelle 081 MuttENZ, Hard (AB). Vergleicht man die Dauerkurve dieses Abschnitts einer Richtung während der Bauphasen 4 und 5 im Jahr 2007 mit denen im Jahr 2008, zeigt sich der Unterscheid der Verkehrsnachfrage ebenfalls (vgl. Abb. 2.45).

Abb. 2.44 Leistungsfähigkeit cap [Kfz/h] für den Autobahnabschnitt A2/A3 Basel Hagnau-Augst

	zulässige Geschwindigkeit v_{zul}								
	120 km/h			100 km/h			80 km/h		
Schwerverkehrsanteil SV	Längsneigung i								
	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%
≤ 5%	5800	5450	5050	5800	5600	5250	5800	5650	5500
> 5...15%	5450	5050	4500	5550	5250	4950	5600	5500	5200
> 15...25%	5100	4600	4000	5400	5000	4300	5500	5300	4550

Bei einem Vergleich mit der näherungsweise ermittelten Leistungsfähigkeit im Baustellenbereich und der entsprechenden Beurteilung nach [57] zeigt sich in den massgebenden Stunden 30 bis 100 ein Auslastungsgrad von 1.01 bis 0.97 in Richtung Augst im Jahr 2007 mit einer Schwerverkehrsbelastung zwischen 5 und 10 %. Dafür wurde eine Leistungsfähigkeit bei 9,5 m Fahrbahnbreite und drei Fahrstreifen von 5600 Fz/h angenommen (nach SN 640 018a).

Geht man von einer Kappung der Verkehrsbelastung durch die geringere Leistungsfähigkeit aus – dies ist anzunehmen, da die Zählstelle im Baustellenbereich liegt – und setzt hypothetisch die Verkehrsbelastung des Jahres 2008 für diesen Bereich an, zeigt sich der Auslastungsgrad in den massgebenden Stunden 30 bis 100 der Richtung Augst zwischen 1.10 und 1.07. Dadurch wird die Annahme einer Engstelle noch erhärtet.

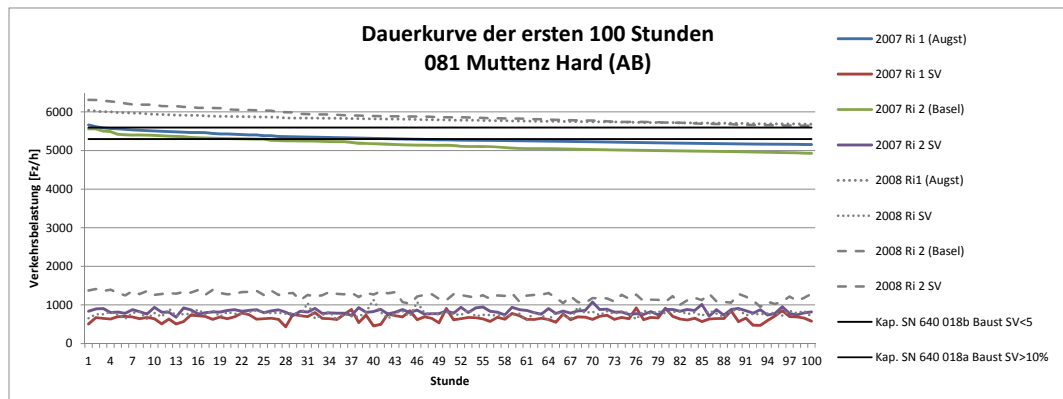


Abb. 2.45 Dauerkurve der ersten 100 Stunden des Gesamtverkehrs je Richtung für die Jahre 2007/2008 aus Daten der Zählstelle 081 MuttENZ Hard (AB) mit zugeordnetem Schwerverkehrsanteil (SV)

Aufbereitung der erhobenen Kostendaten

Für eine Analyse der Baustellenplanung wird es notwendig, anhand des monetären Wertesystems die Kosten zu berechnen. Das Verfahren auf Basis der Graphentheorie nutzt die Kosten zur Kantengewichtung (vgl. Kapitel 2.4). Dazu sind die Kosten für einen Einsatz im entwickelten Verfahren zu strukturieren. Die vorhandenen Kostendaten vor einer Vergabe oder bei der Archivierung nach der Ausführung und Abnahme der Bauleistung lagen ausschliesslich in Form des Normenpositionskatalogs (NPK) vor.

Die Erhebung der Kosten erfolgte für alle aus der Ausschreibung vorhandenen Baulose der Fahrbahnen und Kunstbauten sowie zusätzlicher Massnahmen. Zur Verfügung standen alle Kostendaten aus den Schlussrechnungen der Bauunternehmungen der Baulose im Kanton Basel-Landschaft. Dadurch konnten nur die Kosten der Leistungen der Bauunternehmungen und nicht die Leistungen hinsichtlich Verkehrsführung erhoben werden.

Abb. 2.46 Kostenzusammenstellung aller Baulose des Autobahnabschnitts A2/A3 Basel Hagnau-Augst im Bereich Basel-Landschaft

Baulos	Beschreibung	Gesamt CHF
C1	Fahrbahnen	39'118'451.70
C2	Kunstbauten	9'955'074.85
C3	Senkungstrichter Hard	1'097'308.05
C4	Entwässerungsleitungen	406'458.60
C5	Fahrzeugrückhaltesysteme	3'412'421.55
VB	Verlängerung Beschleunigungsspur	2'036'586.50
Viola	Trasseverbreiterung Violenbach	1'439'733.45
Vorsort	Vorsortierung Hagnau	2'028'282.55
Total Leistungen Kanton Basel-Landschaft		59'494'317.25

Eine Möglichkeit der Kostenerhebung stellt die Unterteilung in die vorhandenen NPK-Hauptgruppen dar. Je nach Relevanz können diese dann in verschiedene Hauptgruppen zusammengefasst werden. Im Folgenden wird dies anhand der Baulose Fahrbahnen und Kunstbauten kurz dargestellt.

Abb. 2.47 Kostenzusammenstellung für Leistungen an Fahrbahnen des Autobahnabschnitts A2/A3 Basel Hagnau-Augst im Bereich Basel-Landschaft

NPK	Beschreibung	Einheit	Einheitspreis CHF je Einheit	Gesamt CHF
113	Baustelleneinrichtung	1.00 Stk	6'536'703.95	6'536'703.95
211	Erdarbeiten	22'988.00 m	37.84	869'862.94
221	Fundationsschichten und Materialgewinnung	265'030.55 m2	1.97	522'616.07
223	Belagsarbeiten	265'030.55 m2	83.62	22'161'169.41
286	Markierung auf Verkehrsflächen	265'030.55 m2	6.13	1'623'495.44
	151 WL, 237 K+E, 241 OBet	22'988.00 m	293.82	6'754'351.17
	Restarbeiten 114,116,117,121,131,135...	265'030.55 m2	2.45	650'252.72
Total Fahrbahnen (Basel-Landschaft)				39'118'451.70

Die in Abbildung 2.47 aufgeführten Kostenhauptgruppen für das Baulos Fahrbahnen geben nur zum Teil Aufschluss über die relevanten Bautätigkeiten. Bei einer näheren Betrachtung der Untergruppen im Normenpositionskatalog wird deutlich, dass für einen Rückschluss auf die Bautätigkeiten zum Teil die Untergruppen analysiert und gegebenenfalls je nach Leistung unterschiedlich gruppiert werden müssten. Für die in Abbildung 2.47 aufgeführten Kostengrößen gemäss NPK sind unter anderem folgende Informationen nur durch eine detaillierte Analyse zugänglich.

Baustelleneinrichtung (113) sind die fixen Kosten der Installation für die gesamte Baustelle der Fahrbahnen, welche von der Art der Erhaltungsmaßnahme nicht aber der Länge der Baustelle abhängen. Sie entsprechen damit zum Teil den Installationskosten. Zusätzlich zur Kostenhauptgruppe Baustelleneinrichtung sind in anderen Hauptgruppen ebenfalls Baustelleneinrichtungskosten als Untergruppen vorhanden. Die Kostenhauptgruppe 113 ist somit nicht umfassend. Auffallend ist die Höhe der Baustelleneinrichtungskosten. Diese erscheint zum Teil etwas hoch. Da es sich bei den Schlussrechnungen um die Kalkulationen der Bauunternehmung handelt, sind die jeweiligen Kosten abhängig von der jeweiligen Definition und Abgrenzung der Baustelleneinrichtungskosten. Somit wird diese Position nicht immer die realen Einrichtungskosten enthalten.

Erdarbeiten (211) sind alle Kulturerdarbeiten am Oberboden, Aushub Entwässerung, Bankettverbreiterung für die Entwässerung sowie Böschungsherstellung und –sicherung. Diese Position beinhaltet damit Informationen für zusätzlich ausgeführte Tätigkeiten. Im Beispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst sind es die Erdarbeiten für die Neuverlegung der Entwässerung. Je nach Detaillierungsgrad sind diese Kosteninformationen ausreichend.

Fundationsschichten und Materialgewinnung (221) sind alle Arbeiten zu den Fundationschichten und der Planieerstellung. Diese Position beinhaltet Informationen zu den ungebundenen Schichten. Rückbaumassnahmen der gebundenen Schichten sind dabei nicht enthalten. Je nach Detaillierungsgrad sind diese Kosteninformationen ebenfalls ausreichend.

Belagsarbeiten (223) beinhalten alle Rückbauarbeiten und die Neuerstellung der gebundenen Schichten. Für eine Aufarbeitung der Kosten für eine Zuordnung zu den Bautätigkeiten sind damit die Untergruppen mit ihren Einzelpositionen zu analysieren. Sind separate Arbeiten mit Bezug zur Verkehrsführung durchgeführt worden, können diese Leistungen nur mit grossem Aufwand erhoben werden. Die Kosteninformationen der Hauptgruppe sind nur für eine grobe Abschätzung ausreichend.

Markierung auf Verkehrsflächen (286) umfassen das Entfernen oder Überdecken alter Markierung sowie das Aufbringen temporärer und endgültiger Markierungen auf der Strassenoberfläche. Somit ist ohne eine genaue Analyse der Untergruppen eine Trennung zwischen Verkehrsführungsmaßnahmen der Baustelle (temporäre gelbe Markierung) und der Bauausführung (weisse Markierung) nicht möglich. Die Kosteninformationen der Hauptgruppe sind somit ungenau und nicht ausreichend.

Werkleitungen (151), Kanalisationen und Entwässerungen (237) sowie Ortbetonbau (241) umfassen alle Arbeiten zu den Werkleitungen, Kanalisationen, Entwässerungen und Ortbetonbauten wie kleine Stützmauern. Je nach Detaillierungsgrad sind diese Kosteninformationen ausreichend.

In einer Gruppierung *Restarbeiten* wurden alle restlichen für die Fahrbahnen im Umfang der Tätigkeiten und Kosten nicht relevanten aber in diesem Projekt anfallenden Arbeiten zusammengefasst. Dazu gehören die folgenden Hauptgruppen:

- Regiearbeiten (111)
- Abholzen, Roden (116)
- Abbruch und Demontage (117)
- Sichern, Unterfangen, Verstärken und Verschieben (121)
- Bohren und Trennen von Beton und Mauerwerk (132)
- Bauarbeiten für Werkleitungen (151)
- Garten- und Landschaftsbau (181)
- Baugrubenaushub (212)
- Pflasterungen und Abschlüsse (222)

Bei der Betrachtung der Fahrbahnen wurden zusätzlich die erhobenen Kostendaten der Kunstbauten näher analysiert. Es hat sich dabei gezeigt, dass bei der Baustelle A2/A3 Basel Hagnau-Augst eine Schlussrechnung alle betroffenen Kunstbauten enthält. Eine Zuordnung zu den Bauwerken der Kunstbauten ist nur durch eine intensive Analyse der Einzelpositionen möglich, da viele Leistungen bei den Objekten je nach Umfang gleich anfallen. Aus diesem Grund ist eine Zuordnung hinsichtlich NPK-Gruppen nicht zielführend. Die gängige Praxis in der Schweiz [109] ist hier eine definierte Kostenstrukturierung nach kostenrelevanten Bauteilen der Kunstbauten [110] vorzunehmen. Darauf musste aufgrund des immensen Aufwands verzichtet werden.

Abb. 2.48 Kostenzusammenstellung für Leistungen an Kunstbauten des Autobahnabschnitts A2/A3 Basel Hagnau-Augst im Bereich Basel-Landschaft

Objekt-Nr.	Name	Relevant für Verkehrsführung	Gesamt CHF
1051	Fussgängerbrücke Hagnau	Nein	89'293.00
1052	Überführung über Stammlinie	Ja (nicht für Stammlinie)	1'816'633.32
1057	Überführung Kreuzungsbauwerk	Ja (nicht für Stammlinie)	468'880.44
1059	Überführung Kreuzungsbauwerk	Ja (nicht für Stammlinie)	651'088.96
1403	Ergolzbrücke	Ja	37'785.00
1607	Überführung Rampe Liestal-Basel	Ja (nicht für Stammlinie)	536'738.07
1608	Überführung Salinenstrasse	Ja (nicht für Stammlinie)	157'727.82
1610	Überführung Krummeneich Pratteln	Nein	679'790.85
1613	Überführung Gemeindestrasse Augst	Nein	525'055.51
2051	Unterführung unter Stammlinie Süd	Ja	944'762.08
2053	Unterführung unter Stammlinie	Ja	1'106'252.23
10541	Unterführung unter Stammlinie	Ja (nicht für Stammlinie)	384'896.62
10542	Unterführung unter Stammlinie	Ja (nicht für Stammlinie)	586'073.10
10543	Unterführung unter Stammlinie	Ja	928'928.98
10544	Unterführung unter Stammlinie	Ja	1'041'168.87
Gesamt Kunstbauten			9'955'074.85

Verkehrsführung

Im gesamten Baustellenabschnitt war für die Durchführung der Erhaltungsmaßnahmen keine für die Bauzeit dauerhafte Fahrstreifenreduktion zulässig. Mit Blick auf die Entwicklung der Verkehrsbelastung während der Bauzeit scheint diese Entscheidung richtig. Der Bauherr gab für die Bauausführung eine verbindliche Verkehrsführung „4+2“ vor. Es wur-

den schon im Vorfeld keine Alternativen zugelassen. Das ausführende Unternehmen reichte jedoch zusätzlich zum geforderten Amtsvorschlag zwei weitere Verkehrsführungsalternativen „4+2 Plus“ und „5+1“ mit Vergleichsargumentarium zum Angebot ein. Davon wurde letztlich eine Variante „4+2 Plus“ ausgeführt (vgl. Abb. 2.49). Grundsätzlich können diese drei Varianten hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Verkehrsführung hier auf die zwei Varianten „4+2“ und „5+1“ reduziert werden. Das Prinzip des Bauablaufs mit Verkehrsführung ist in Abbildung 2.49 dargestellt.

Unabhängig von den verschiedenen Varianten der Verkehrsführung war in der Galerie Schweizer Halle eine 3+3 Führung für alle Varianten aus Platzgründen zwingend. Für die Überleitung des Verkehrs standen bestehende Mittelstreifenüberfahrten zur Verfügung. Durch die Bauunternehmung wurde eine zusätzliche Mittelstreifenüberfahrt im Bereich der Verzweigung Hagnau erstellt.

Kostendaten für die Verkehrsführung standen nicht umfassend und differenziert für die einzelnen Verkehrsregime zur Verfügung. Im Rahmen der Umsetzung des Verkehrsregimes und der Vermeidung von Sicherheitsdefiziten und Überlastungen wurden neben der temporären Verkehrsführungseinrichtung (Einrichtung, Abbau, Unterhalt) polizeiliche Massnahmen, Öffentlichkeitsarbeit und flankierende Massnahmen durchgeführt sowie für Engpasssituationen ein Konzept zum Einsatz von Verkehrslotsen (Plantonkonzept) umgesetzt.

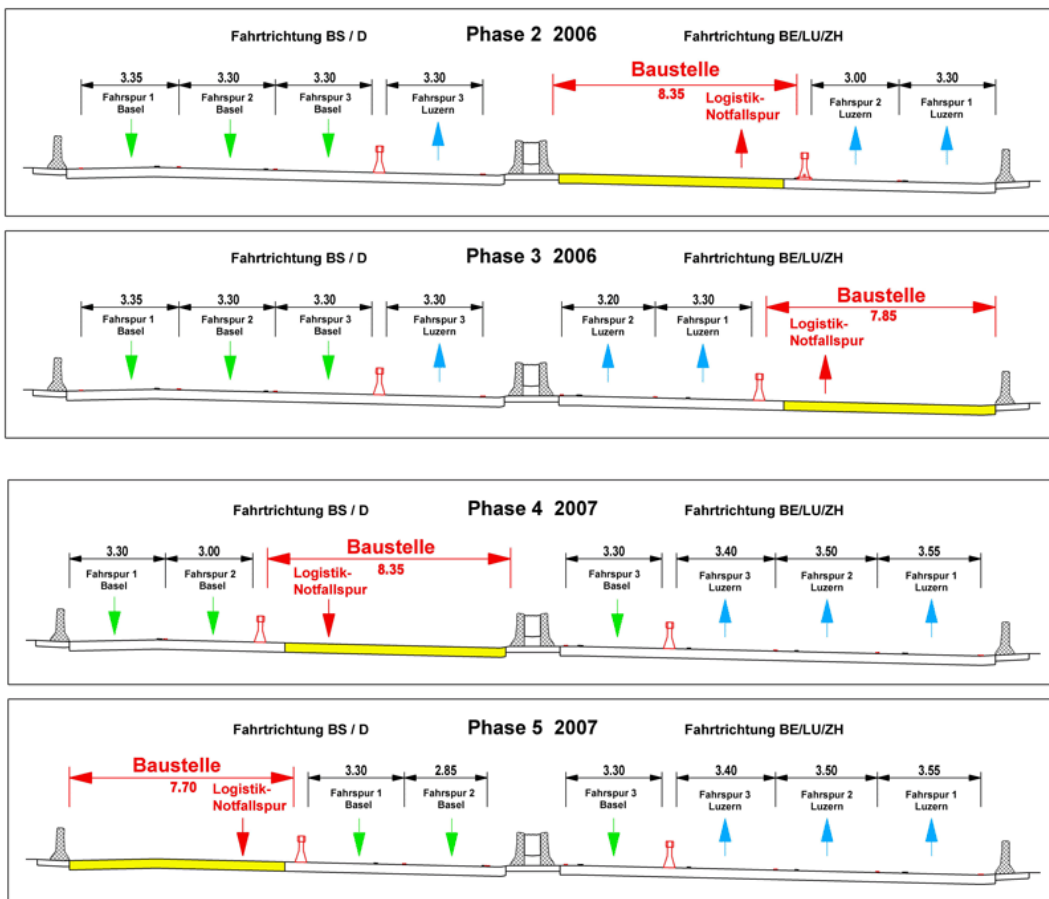


Abb. 2.49 Prinzip des Bauablaufs mit Verkehrsführung der Autobahnbaustelle A2/A3 Basel Hagnau-Augst im Bereich Basel-Landschaft der ausgeführten Variante „4+2 Plus“ [Planunterlagen]

2.5.4 A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck Situation der Strassenverkehrsanlage

Der Oberbau des etwa 17 km lange Autobahnabschnitts der A1 St. Gallen St. Fiden-

Rheineck mit zwei streifigen Richtungsfahrbahnen besteht aus einer Betondecke und wurde in den Jahren 2004 und 2005 im Rahmen einer Instandsetzungsmassnahme einer bitumenhaltigen Oberflächenbehandlung unterzogen.



Abb. 2.50 Situationsplan der Autobahnbaustelle A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck [Hintergrundkarte vgl. 108]

Nacharbeiten erfolgten noch im Jahr 2006, jedoch waren diese nicht von grossem Umfang. Ziel war die Verbesserung der Oberflächeneigenschaften der weitgehend intakten Betondecke. Zusätzlich zu den Erhaltungsmassnahmen der Fahrbahnen wurden ebenfalls Erhaltungsmassnahmen an verschiedene Kunstbauten und Galerien der Strecke durchgeführt und in verschiedenen Bereichen Lärmschutzwände errichtet. Als zusätzliche Massnahme erfolgte eine teilweise Erneuerung der Entwässerung in diesem Bereich.

Verkehrsbelastung

Der 17 km langen Autobahnabschnitt A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck besteht aus zwei zweistreifigen Richtungsfahrbahnen mit Pannestreifen. Beim Kilometer 398 befindet sich die Verzweigung Meggenhus. Vereinfachend werden aus diesem Grund in der weiteren Betrachtung die Daten von zwei automatischen Zählstellen verwendet.

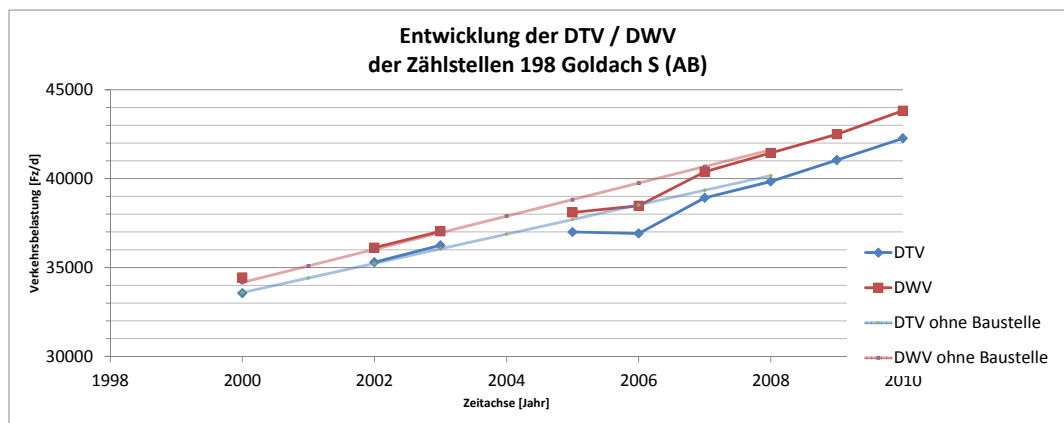


Abb. 2.51 Entwicklung des gesamten DTV und DWV (beide Richtungen) aus Daten der Zählstelle 198 Goldach S (AB)

Dies sind Nr. 198 Goldach S (AB) im Bereich Meggenhus bis Rheineck und Nr. 243 St. Gallen Bergbach-Viadukt (AB) im Bereich St. Fiden bis Meggenhus. In diesem Bereich ist neben dem Agglomerationsverkehr durch die Nähe zur österreichischen Grenze auch ein Teil des europäischen Transitverkehrs zu bewältigen. Dadurch lag der Schwerverkehr im Jahr 2007 in den Spitzenstunden für Nr. 243 bei ca. 10-15% und für Nr. 198 bei ca. 15-20%. Es liegen für Nr. 243 nur wenige Verkehrsdaten in Form der DTV für das Jahr 2005 und weiter ab dem Jahr 2007 vor. Zusätzlich sind kantonale Zählungen sowie solche des Bundes nicht ganz kongruent (vgl. Abb. 2.51 bis 2.53). Aus diesem Grund konnten für ei-

ne Bewertung der Baustellensituation zum Teil nur die kantonalen DTV-Werte der Verkehrsentwicklung herangezogen werden.

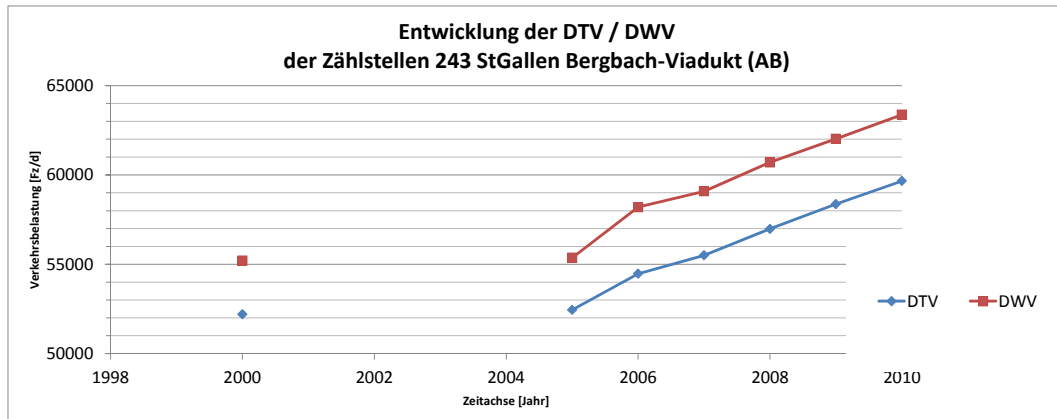


Abb. 2.52 Entwicklung des gesamten DTV und DWV (beide Richtungen) aus Daten der Zählstelle 243 St. Gallen Bergbach-Viadukt (AB)

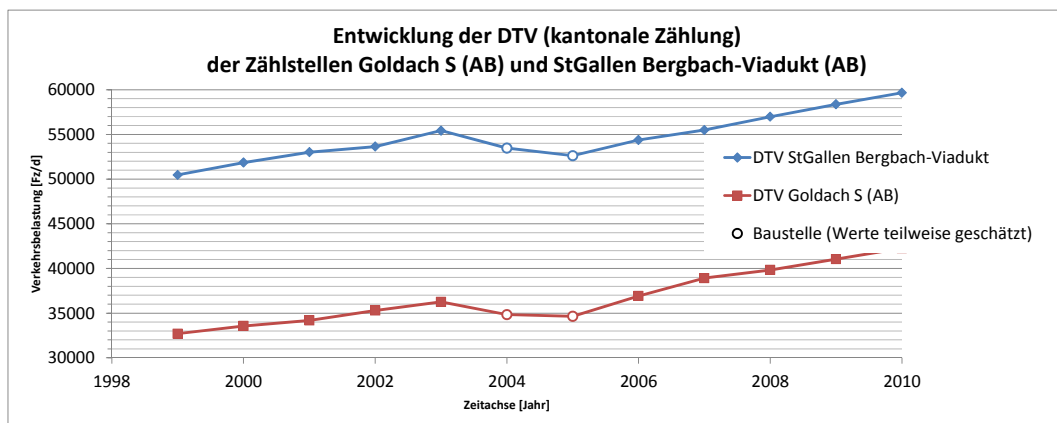


Abb. 2.53 Entwicklung des gesamten DTV und DWV (beide Richtungen) aus Daten der Zählstellen 243 St. Gallen Bergbach-Viadukt (AB) und 198 Goldach S (AB)

Da die Daten in den Abbildungen 2.51 und 2.52 zu wenig aussagekräftig sind, wurde versucht, zumindest aus den kantonalen DTV-Daten der beiden Zählstellen eine Entwicklung darzustellen (vgl. Abb. 2.53). Diese aggregierten DTV-Daten sind jedoch zum Teil abgeschätzt und können nur für eine qualitative Betrachtung herangezogen werden. Es zeigt sich für beide Zählstellen ein linearer Anstieg für den durchschnittlichen täglichen Verkehr. Im Zeitraum der Baustelle war ein Abfall der Verkehrsbelastung zu verzeichnen, was zum Teil auf die Geschwindigkeitsreduktion zurückzuführen ist.

Betrachtungen der Leistungsfähigkeit

Analog des Autobahnabschnitts A2/A3 Basel Hagnau-Augst und wie in Kapitel 2.2.5 ausgeführt, gelten gemäss [57] folgende Leistungsfähigkeitsangaben für die zweistreifigen Richtungsfahrbahnen.

Zur Vereinfachung wird ebenfalls wie beim Autobahnabschnitt A2/A3 Basel Hagnau-Augst über den gesamten Autobahnabschnitt eine Längsneigung von kleiner zwei Prozent angenommen (vgl. Abb. 2.54). Die signalisierte Geschwindigkeit beträgt im Normalzustand 120 km/h.

Abb. 2.54 Leistungsfähigkeit cap [Kfz/h] für den Autobahnabschnitt A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck

Schwerverkehrsanteil SVA	zulässige Geschwindigkeit v_{zul}								
	120 km/h			100 km/h			80 km/h		
	Längsneigung i								
	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%	< 2%	2...4%	> 4%
≤ 5%	4000	3800	3550	4000	3800	3600	4000	3800	3650
5...15%	3800	3500	3150	3800	3600	3350	3800	3700	3450
15...25%	3600	3200	2800	3600	3400	3000	3600	3500	3200

Für die Betrachtung der Verkehrsqualität des Baustellenbereichs erfolgt eine Bildung der Dauerkurve für die ersten 100 Stunden mit den stündlichen Daten der automatischen Zählstellen 198 Goldach S (AB) und 243 St. Gallen Bergbach-Viadukt.

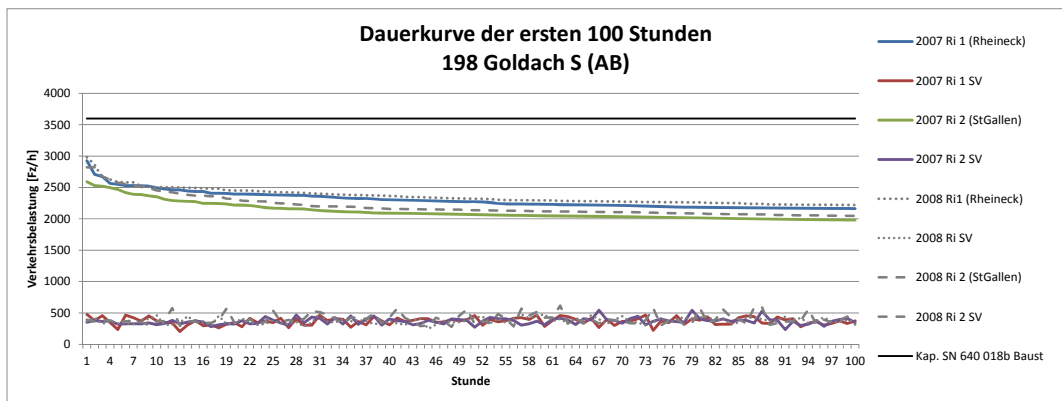


Abb. 2.55 Dauerkurve der ersten 100 Stunden je Richtung für die Jahre 2007/2008 aus Daten der Zählstelle 198 Goldach S (AB)

In Abbildung 2.55 wird deutlich, dass für den Abschnitt zwischen der Verzweigung Meggenhus und Rheineck auf Basis der stündlichen Daten mit Annahme der Leistungsfähigkeit nach [57] von 3600 Fz/h bei einem Schwerverkehrsanteil von über 10% vorrangig keine Engstellenproblematik besteht. Der Auslastungsgrad liegt zwischen den Stunden 30 und 100 kleiner als 0.66, selbst in der ersten Stunde beträgt der Auslastungsgrad 0.81.

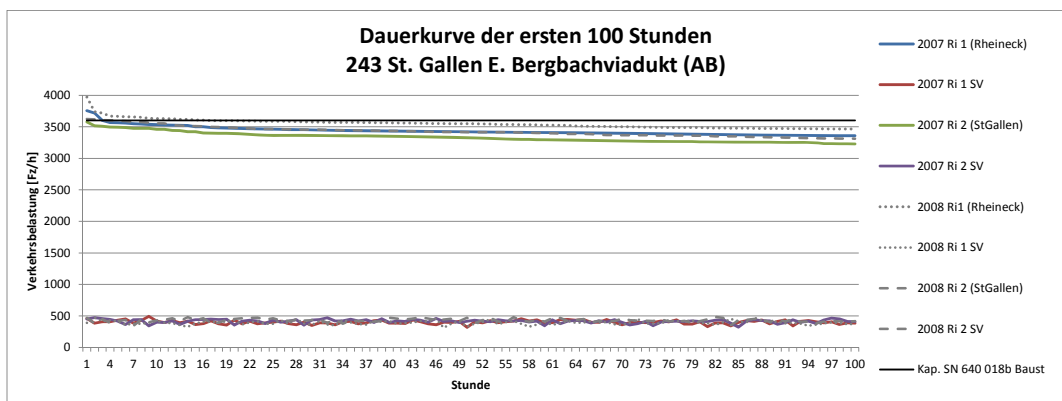


Abb. 2.56 Dauerkurve der ersten 100 Stunden je Richtung für die Jahre 2007/2008 aus Daten der Zählstelle 243 St. Gallen E. Bergbachviadukt (AB)

Anders zeigt sich der Abschnitt zwischen der Verzweigung Meggenhus und St. Gallen. Bei einer Betrachtung der stündlichen Daten von 2007 wird deutlich, dass die Verkehrsbelastung in diesem Bereich grösser ist und die Näherung der Leistungsfähigkeit im

Baustellenbereich nach [57] zum Teil überschreitet. In den massgebenden Stunden 30 bis 100 beträgt der Auslastungsgrad 0.96 bis 0.93. Dies deutet trotz der Beibehaltung von zwei Fahrstreifen je Fahrtrichtung auf eine Engstellenproblematik hin (vgl. Abb. 2.56).

Aufbereitung der erhobenen Kostendaten

Die Kosten für den Baustellenabschnitt St. Gallen St. Fiden-Rheineck wurden anhand der Schlussrechnungen auf der Basis des NPK erhoben. Eine Strukturierung der Ausschreibung durch Baulose erfolgte für Fahrbahnen und Kunstbauten sowie weitere zusätzliche Massnahmen (vgl. Abb. 2.57). Die Kostendaten lagen nur in Papierform vor. Aus diesem Grund konnte die Bauleistung nur mit einer begrenzten Detaillierung erhoben werden. Eine zusätzliche Erhebung der Kosten für die Verkehrsführung war nicht möglich.

Abb. 2.57 Kostenzusammenstellung aller Baulose des Autobahnabschnitts A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck

Baulos	Beschreibung	Gesamt CHF
C	Fahrbahnen	47'874'204.20
D	Arbeiten ausserhalb Fahrbahnen	1'747'440.61
E	Kunstbauten	34'084'091.49
F	Galerien	4'071'619.39
G	Schächte UKK	0.00
H	Lärmschutzwand LSW	2'325'583.42
Total Leistungen		90'102'939.11

Die Fahrbahnen wurden dabei nach der Erhebung die Kostendaten analog des Baustellenabschnitts Basel Hagnau-Augst in die folgenden Kostengruppen unterteilt. Zusätzlich wurde die Hauptgruppe 281 Leitschranken und Geländer aus den Restarbeiten herausgelöst.

Abb. 2.58 Kostenzusammenstellung für Leistungen an Fahrbahnen des Autobahnabschnitts A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck

NPK	Beschreibung	Einheit	Einheitspreis CHF je Einheit	Gesamt CHF
113	Baustelleneinrichtung	1.00 Stk	8'135'235.50	8'135'235.50
211	Erdarbeiten	32'600.00 m	9.50	309'564.40
221	Foundationsschichten und Materialgewinnung	309'700.00 m ²	8.33	2'580'782.90
223	Belagsarbeiten	309'700.00 m ²	49.38	15'291'630.30
281	Leitschranken und Geländer	32'600.00 m	289.31	9'431'555.60
286	Markierung auf Verkehrsflächen	309'700.00 m ²	2.03	629'912.35
	151 WL, 237 K+E, 241 OBet	32'600.00 m	233.39	7'608'627.15
	Restarbeiten 114,116,117,121,131,135...	309'700.00 m ²	13.55	4'196'460.40
Total Fahrbahnen				47'874'204.20

Bei der Betrachtung der Kosten auf Niveau der NPK Hauptgruppen von beiden Baustellenabschnitten in Bezug auf die gesamte Richtungsfahrbahnfläche und -länge lässt sich auch hier nur sehr ungenau auf die Bautätigkeit schliessen. Ein Vergleich von verschiedenen Positionen der beiden Baustellenabschnitte (vgl. Abb. 2.47 und 2.57) erscheint ohne die genaue Kenntnis der Kalkulation auf Stufe der NPK Hauptgruppen nicht sinnvoll.

Es wird deutlich, dass die Schlussrechnungen nach NPK je nach Abgrenzung der Definition der Teilsysteme nicht nur die Fahrbahnen betreffenden Positionen enthalten sondern

ebenfalls die der Kanalisation und wenn vorhanden der zusätzlichen Objekte (Leitschranken und Geländer). Dies zeigt, dass für eine Wirkungsanalyse der verschiedenen Massnahmen die Systemabgrenzung im Bereich des Erhaltungsmanagement sich konsequent auf die Bautätigkeiten in Bezug auf die verschiedenen Teilsysteme übertragen muss. Dies betrifft vor allem den Bereich Fahrbahnen.

Die Kosten für die Bauleistungen der Kunstbauten zeigen sich sehr unterschiedlich. Im Rahmen des Auftrages wurde jedes Bauwerk als separates Projekt abgerechnet. Im Gegensatz zu Basel Hagnau-Augst lässt sich dadurch jedes einzelne Bauwerk separat betrachten. Die Kosten für Kunstbauten und Galerien sind in den Abbildungen 2.59 und 2.60 zusammengestellt.

Abb. 2.59 Kostenzusammenstellung für Leistungen an Kunstbauten des Autobahnabschnitts A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck

Objekt-Nr.	Name	Relevant für Verkehrsführung	Gesamt CHF
E1-174	Viadukt Bergbach	Ja	9'598'171.15
E2-176	Viadukt Untere Waid	Ja	3'629'532.05
E3-177	Uf Haltelhus	Nein	427'840.16
E4-178	Uf Biberhund	Nein	539'871.44
E5-208	Viadukt Goldach	Ja	12'320'924.98
E6-214	Uf St. Annaschlossstr	Ja	709'984.51
E7-218	Brücke Mühletobelstrasse	Ja	2'495'058.40
E8-221	Uf Linkolnsbergstrasse	Ja	613'713.85
E9-229	Uf SBB Buriel	Ja	2'315'078.24
E10	Nebenobjekte	Nein	411'685.30
E11-179/180	Uf Rampen Ko-Ch_StG-Ko	Ja	1'022'231.40
Gesamt Kunstbauten			34'084'091.49

Abb. 2.60 Kostenzusammenstellung für Leistungen an Galerien des Autobahnabschnitts A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck

Objekt-Nr.	Name	Relevant für Verkehrsführung	Gesamt CHF
	Galerie Lindental	Ja	2'357'792.82
	Galerie Harzbüchel	Ja	1'713'826.57
Gesamt Kunstbauten			4'071'619.39

Je nach Bauprojekt können sehr grosse Schwankungen in den Kosten der Bauleistungen entstehen. Eine grobe Abschätzung ist jedoch möglich. Für eine Wirkungsanalyse der durchgeführten Massnahmen als Rückführung von Informationen des Ergebnisses der Ausführung in die Teilsysteme sind die Daten nicht ausreichend. Die Kostendaten sollten besser auf die Bautätigkeit abgestimmt sein, das heisst eine Gruppierung in Schritten des Bauablaufs oder analog der Kunstbauten in kostenrelevanten Bauteilen. Zusätzlich sind die zwingend die Kosten für die Verkehrsführung als Sach- und Dienstleistung, Präventivmassnahmen zu Verbesserung der Verkehrssicherheit und Planungsleistungen sowie Öffentlichkeitsarbeit mit zu erfassen.

Verkehrsführung

Im Baustellenabschnitt A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck wurden im Rahmen der Ausführung der Erhaltungsmassnahme die Verkehrsführungen 3+1 und 4+0 angewendet. Eine Fahrstreifenreduktion wurde somit auch hier vermieden. Aus Platzgründen musste ab dem Tunnel Stephanshorn (St. Gallen, km 384 vgl. Abb. 2.61) der Verkehr auf 2+2 geführt werden. Es wurden zwei Bauphasen definiert, wobei bei der 3+1 Führung für eine Richtungsfahrbahn in zwei Etappen notwendig waren. Dafür wurde der Fahrstreifen auf

der Baustellenseite nochmals verlegt. Für die Bauphase 2 ist die Verkehrsführung in Abbildung 2.61 dargestellt. Es zeigt sich eine etwas abgeänderte Fragestellung im Vergleich zum Abschnitt Basel Hagnau-Augst. Offensichtlich ist die 4+0 Verkehrsführung für den Bauablauf und die Fahrbahnqualität die bessere Wahl. Hinsichtlich der Platzverhältnisse, speziell in Bezug auf die Fahrbahnbreiten und den dadurch entstehenden Einschränkungen für den Strassennutzer, wurde jedoch die 3+1 Verkehrsführung gewählt. Nun sind die Wahl der bestehenden Mittelstreifenüberfahrten und eine Entscheidung über eventuelle Verbreiterungen von Bedeutung.

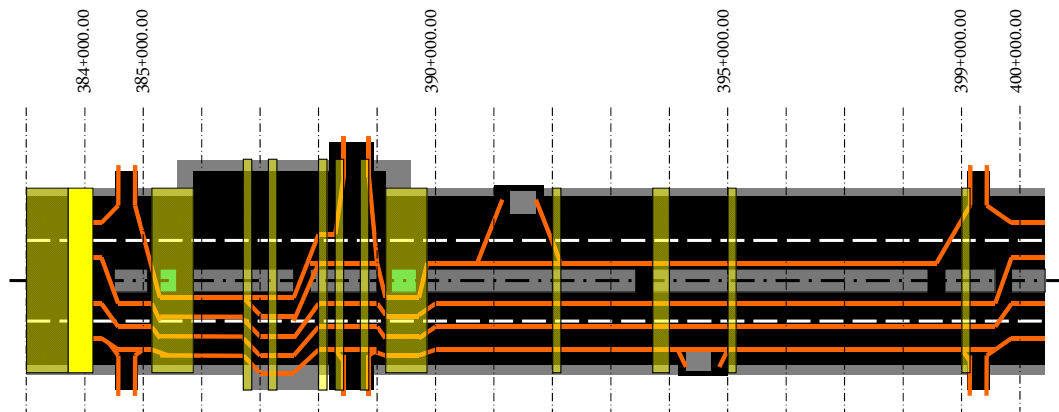


Abb. 2.61 Verkehrsführung der Bauphase 2 im Autobahnabschnitt St. Gallen St. Fiden-Rheineck

Kostendaten für die Umsetzung der Verkehrsführung standen auch im Beispiel St. Gallen St. Fiden-Rheineck nicht zur Verfügung. Es wurden jedoch neben der temporären Verkehrsführungseinrichtung (Einrichtung, Abbau, Unterhalt) zur Vermeidung von Sicherheitsdefiziten und Überlastungen polizeiliche und flankierende Massnahmen durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Herleitung eines Verfahrens für die Planung von optimalen Autobahnbaustellen

3.1.1 Zielsetzung

Baustellen haben einen entscheidenden Einfluss auf den Verkehrsablauf und damit auf die Strassennutzer und die Auswirkungen auf Dritte (vgl. Kapitel 2.2). Aus diesem Grund ist bei der Baustellenplanung an Autobahnen dieser Einfluss mit zu berücksichtigen. Für Autobahnen mit einer hohen Verkehrsbelastung bedeutet das, ein rein klassischer Betreiberkostenansatz mit Ausrichtung auf den Bauablauf wird den Zielen einer sicheren und wirtschaftlichen Verkehrsabwicklung gemäss Kapitel 2.2.6 nicht gerecht.

Das Ziel der Baustellenplanung ist im Allgemeinen die Ermittlung örtlich und zeitlich optimaler Massnahmen der verschiedenen Teilsysteme auf Basis des ökonomischen Minimalprinzips unter Einbezug von Strassenbetreiber, -nutzer und Dritte. Dabei müssen verschiedene Randbedingungen, wie Budgetgrenzen oder strategische Vorgaben, für die Autobahnen, berücksichtigt werden. Aus dieser Zielsetzung zusammen mit den genannten Anforderungen resultieren für die Baustellenplanung folgende Fragestellungen:

- Welche Massnahmen der Teilsysteme sollten unter den gegebenen Bedingungen innerhalb einer Baustelle, d.h. zum gleichen Zeitpunkt, realisiert werden und welche grobe Verkehrsführung ergibt sich innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraums?

Welche Länge sollten die Baustellen haben und welche Autobahnstrecken sind dabei mit einzubeziehen? Das Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Verfahrens, welches beide Fragestellungen gleichzeitig unter Einbezug der obengenannten Randbedingungen für die Planung von optimalen Autobahnbaustellen beantworten kann.

3.1.2 Problemstellung

Für eine Lösung der Fragestellungen ist es unumgänglich, die verschiedenen Elemente von Fahrbahnstrecken, Kunstbauten und je nach Berücksichtigung Objekte anderer Teilsysteme, in ihrem Zusammenhang zu betrachten. Der Grund dafür wurde ausführlich in den Grundlagen zur Systemabgrenzung (vgl. Kapitel 2.1) erläutert. Eine erfolgreiche Anwendung von Hajdin [3; 4; 5; 6] zeigt die Realisierung mit Hilfe der Graphentheorie. Diese ermöglicht eine Netzbetrachtung, welche die Elemente analog der Systemtheorie zusammen mit ihren Relationen in einem Modell verknüpft (vgl. Kapitel 2.4).

Das durch Hajdin [3; 4; 5; 6] verwendete Netzwerkmodell zeigt sich für die Abbildung der Realität im Rahmen der Baustellenplanung an Autobahnen noch zu ungenau. Eine mögliche Erweiterung des Modells für mehrere Zeitperioden und die Verknüpfung von Massnahmen beider Richtungsfahrbahnen erscheinen für die Abgrenzung bei Autobahnen notwendig. Die daraus resultierende höhere Komplexität des Netzwerkes darf jedoch nicht zu stark anwachsen. Für eine Umsetzung in die Praxis bedarf es einer Lösung, mit welcher ein Ergebnis mit einem vertretbaren Rechenaufwand gefunden werden kann. Aus diesem Grund wurden zwei real existierende Autobahnstrecken als Fallbeispiele einem Realitätstest unterzogen.

3.1.3 Lösungsansatz

Für diese Forschungsarbeit erfolgte ebenfalls eine Modellbildung auf der Grundlage der Graphentheorie. Dabei bildet die Strassenverkehrsanlage bei Autobahnen ein physisches Netzwerk, genauer einen gerichteten Graphen mit Knoten und Kanten (vgl. Kapitel 2.4). Die Kanten stellen dabei die Objekte von Fahrbahnen und Kunstbauten dar. Die Knoten sind Anfangs- und Endort dieser Objekte. Zusätzlich zu den physisch vorhandenen Längen der Kanten erhalten diese eine Bewertung bzw. Gewichtung in Form von Kostendaten aus einem Kostenmodell für die Baustellenplanung.

Durch eine Erweiterung des physischen Netzwerkes wird es aufbauend auf Hajdin [3; 4; 5;

6] möglich, einerseits mehrere Zeitperioden und andererseits jedes beliebige physische Element für Erhaltungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Gleichzeitig wird durch die Einführung von zusätzlichen Randbedingungen die Verknüpfung von Massnahmen beider Richtungsfahrbahnen realisiert.

Für dieses Netzwerk wurde ein Kostenmodell erarbeitet. Dieses berücksichtigt auf der Grundlage eines volkswirtschaftlichen Ansatzes der Kosten-Nutzen-Analyse [21] Strassenbetreiber- und Strassennutzerkosten sowie die Kosten der Auswirkungen auf Dritte. Das Optimierungsproblem wird als binäres lineares Programm (BLP) formuliert und mit Hilfe des Branch and Bound Algorithmus gelöst. Dabei kommt die Software MS Excel mit einem handelsüblichen Softwarepaket zur Lösung von mathematischen Programmen zum Einsatz.

Das Ergebnis dieser Optimierung sind mit Blick auf die Gesamtkosten optimale Baustellen unter den definierten Randbedingungen. Dabei wird ein Betrachtungszeitraum von 2 Jahren berücksichtigt und mit der Integrierung der Langzeitkosten zusätzlich ein Lebenszyklusansatz verfolgt. Optimale Baustellen umfassen gesamthaft optimale Massnahmen der Verkehrsführung und Erhaltung in Art und Zeit an unterschiedlichen von der Baustelle betroffenen Erhaltungsobjekten aller Teilsysteme.

3.2 Modelldefinitionen für die Baustellenplanung

3.2.1 Netzwerkentwicklung

Ausgehend von den physischen Knoten des Autobahnnetzes erfolgt eine Erweiterung des Netzwerkmodells für die Erstellung des binären linearen Programms (BLP) in zwei Schritten. Die Erweiterung wird notwendig, um eine lückenlose Abbildung der Massnahmen zu ermöglichen. Um mehrere Massnahmen an benachbarten Erhaltungsobjekten miteinander zu kombinieren, ist eine weitere Kante einzuführen. Diese verbindende Kante zwischen den benachbarten Erhaltungsobjekten bildet einen Wechsel zwischen den beiden angrenzenden Massnahmen ab und ist in der folgenden Abbildung 3.62 im erweiterten physischen Modell dargestellt. Dieses erweiterte physische Modell wird an die konkrete Problemstellung angepasst. Das heisst unter anderem, die Implementierung der Massnahmen, Zeitperioden und zusätzliche Randbedingungen. Es entsteht ein Netzwerkmodell für die Optimierung mit binär linearer Programmierung (BLP).

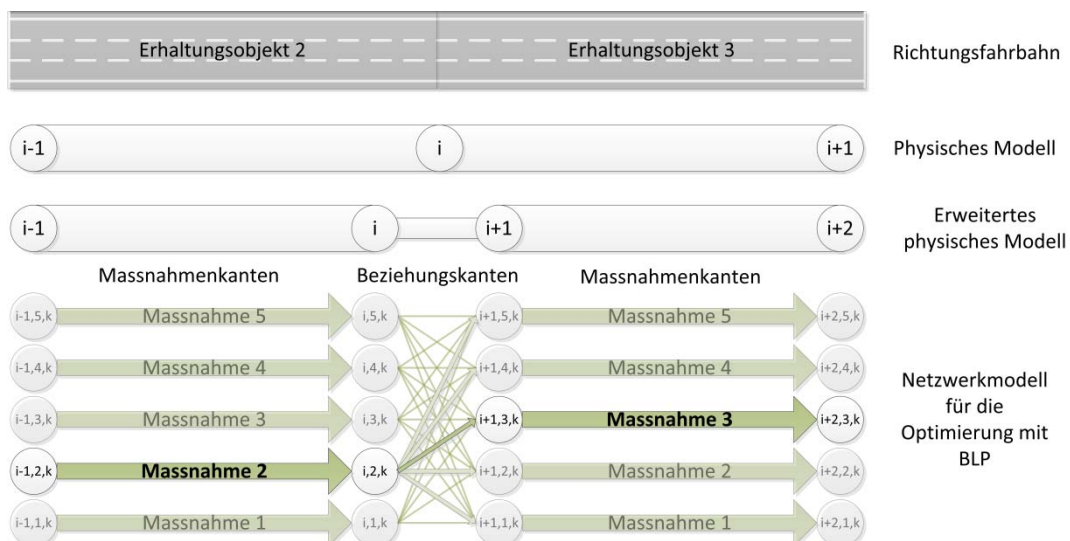


Abb. 3.62 Schrittweise Erweiterung des Netzwerkmodells für die Bildung eines BLP bei einer Richtungsfahrbahn und einer Zeitperiode

Das nach Abbildung 3.62 in einem ersten Schritt gebildete erweiterte physische Modell ermöglicht somit die Erstellung eines Netzwerkmodells für die Kombination von mehreren Massnahmen an benachbarten Strassenstrecken. Die dafür eingeführte Verbindungskante kann eine fiktive Länge (z.B. 0.001 m) haben. Sie ist damit im erzeugten gerichteten

Graphen des Netzwerkmodells vorhanden, taucht aufgrund der Grösse jedoch nicht in Darstellungsplänen auf. Es wird dadurch verhindert, dass ungewollt ein Streckenbereich der Richtungsfahrbahn bei einer Massnahmenwahl unberücksichtigt bleibt.

In Abhängigkeit der Zielsetzung muss der Detaillierungsgrad für die Netzwerkbildung festgelegt werden. Dies geschieht hauptsächlich in Bezug auf die Anzahl von Massnahmen und zu berücksichtigenden Zeitperioden. Für eine Verknüpfung mehrerer Massnahmen zu einer Baustelle sind die Netzwerkknoten des physischen Modells hauptsächlich der örtlich möglichen Massnahmenart entsprechend, z.B. an Erhaltungsobjekten der Brücken bzw. Fahrbahnen, zu setzen (vgl. Abbildung 3.62). Dies entspricht in der Regel einer groben Auflösung des Strassennetzes unter Berücksichtigung der Erhaltungsobjekte aus den Teilsystemen.

Zusätzlich wird es notwendig bestehende Mittelstreifenüberfahrten und in diesem Zusammenhang eventuell Baustellenanfangs- und -endbereiche im Modell mit abzubilden. Für die Mittelstreifenüberfahrten erfolgt ebenfalls die Einführung von weiteren Kanten in das Modell. Diese haben dann im Gegensatz zu den fiktiven Kanten eine wahre Länge, wie in Abbildung 3.63 verdeutlicht.

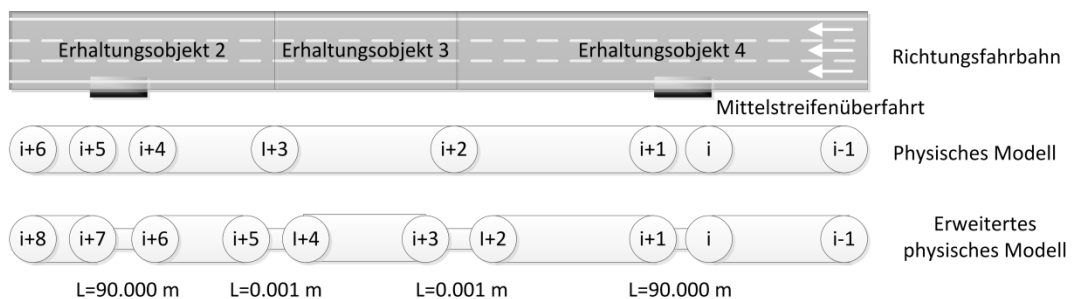


Abb. 3.63 Detaillierte Modellbildung der vorhandenen Richtungsfahrbahn als physisches und erweitertes physisches Netzwerkmodell

Durch die Einführung der Mittelstreifenüberfahrten (vgl. Abbildung 3.63) als Verbindungskante ermöglicht das Netzwerkmodell eine Berücksichtigung der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn. Dies bedingt eine zusätzlich Zuordnung von Massnahmenkanten, welche sich jeweils auf den beiden Richtungsfahrbahnen gegenüberliegen. Dies muss ebenfalls im Netzwerkmodell für die Optimierung mit BLP definiert werden.

3.2.2 Netzwerkmodell

Massnahmenliste

Mit Bezug auf die Erläuterungen zur Verkehrsführung im Baustellenbereich in Kapitel 2.2.3 erfolgt eine Definition der zu berücksichtigenden Massnahmen. Dabei fließen die Verkehrsführung hinsichtlich der räumlichen Ausdehnung und ihrer Auswirkungen und ein grober Bauablauf in Bezug auf die Zeit und die Kosten mit ein. Die Zusammenführung von verschiedenen Erhaltungsmassnahmen aus den Teilsystemen zu Autobahnbaustellen erfordert somit neben einer Berücksichtigung der Massnahmenart, Massnahmenauswirkung und räumlichen Ausdehnung auch eine Unterscheidung hinsichtlich ihrer Dauer. Für jede Massnahme sind deshalb folgende Definitionen zu spezifizieren:

- Massnahmenkosten, zusammengesetzt aus fixen Kosten und variablen, flächenbedingten Kosten (vgl. Kapitel 3.2.3)
- Einfluss der Massnahme auf einer Richtungsfahrbahn auf die Gegenrichtung durch eine zugehörige gegenüberliegende Massnahme (eine Auswirkung ohne Bautätigkeit muss somit eine separate Massnahme darstellen)
- Dauer der Massnahme in Zeitperioden

Für eine Begrenzung der Komplexität (vgl. Kapitel 2.4.4) im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird vorerst die Liste der Massnahmen bewusst beschränkt. Es wurden folgende unterschiedliche Massnahmentypen definiert (vgl. Abb. 3.64). Neben einem Massnahmentyp „Nichtstun“ N existieren zwei kleine A1 und A2 sowie zwei grosse Massnahmen

B1 und B2 mit unterschiedlicher Bedeutung.

Abb. 3.64 Definition der Modellmassnahmen für die Bildung von Baustellen an Autobahnen

Nr	Massnahme	Schematische Darstellung der Verkehrsführung bei 3 FS je RIFB	Verkehrsführung bei 2 FS je RIFB	Massnahme auf gegenüberliegenden RIFB	Dauer in Perioden
N	Nichts tun			N, A1	1
A1	Kleine unabhängige Massnahme			N, A1	1
A2	Kleine abhängige Massnahme			A2	1
B1	Grosse Massnahme			B1	2
B2	Auswirkung von B1			B2	2

Massnahme N

Eine Massnahme N besitzt eine Dauer von einer Periode und hat zur Folge, dass keine Massnahme durchgeführt wird. Diese Massnahme hat keine Beschränkung und kann immer stattfinden bzw. gewählt werden. Auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn kann zum gleichen Zeitpunkt ebenfalls eine Massnahme N oder A1 durchgeführt werden. Das Verkehrsregime der Massnahmen N stellt die Situation ohne Baustelle dar.

Massnahme A1

Die Massnahme A1 mit einer Dauer von einer Periode findet nur auf einer Richtungsfahrbahn statt. Sie hat keinen Einfluss auf die Gegenseite. Das heisst sie stellt eine kleine Bautätigkeit mit einer einseitigen Einschränkung durch die Verkehrsführung dar. Diese Massnahme darf einmal innerhalb der gesamten Perioden ausgeführt werden. Auf diesem Erhaltungsobjekt kann innerhalb des Betrachtungszeitraums noch die Massnahme B2 und N gewählt werden. Hinsichtlich der Verkehrsführung sind am Anfang und Ende der Massnahme Verschwenkungen vorhanden. Auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn kann dabei ebenfalls eine Massnahme N oder A1 stattfinden. Bei diesen beiden Massnahmen ist die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn somit völlig unabhängig. Eine Überleitung des Verkehrs findet nicht statt.

Massnahme A2

Bei einer kleinen Massnahme A2 mit einer Dauer von einer Periode werden kleine Bautätigkeiten mit Einschränkungen der Verkehrsführung durchgeführt, die beide Richtungsfahrbahnen betreffen. Diese Massnahme darf nur einmal im Betrachtungszeitraum stattfinden. Als weitere Massnahme ist nur die Massnahme N zugelassen. Hier existiert ein Einfluss auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn mit ebenfalls einer Massnahme A2. Die Verkehrsführung bei dieser Massnahme beinhaltet analog der Massnahme A1 Verschwenkungen jeweils am Anfang und Ende der betroffenen Strecken. Es findet jedoch analog der Massnahmen A1 keine Überleitung des Verkehrs statt.

Massnahme B1 und B2

Die beiden grossen Massnahmen B1 und B2 haben jeweils eine Dauer von zwei Perioden. B1 stellt dabei die Massnahme mit einer Bautätigkeit dar. B2 ist die Auswirkung von B1. Diese beiden Massnahmen ermöglichen zusammen die Realisierung der Überleitung des Verkehrs und sind als zusammen als eine Massnahme B1 mit ihrer Auswirkung B2 zu verstehen. Das heisst, findet auf einer Seite die Massnahmen B1 statt, muss zwangsläufig auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn B2 im gleichen Zeitraum liegen. Dadurch sind an Anfang und Ende der Massnahme B1 Überleitungen vorhanden. Die Massnahme B2 setzt dann Verschwenkungen und Fahrstreifen mit Gegenverkehr vor.

raus. Bei der Massnahme B1 sind im Betrachtungszeitraum nur die weiteren Massnahmen B2 oder N zulässig. Im Gegensatz dazu sind bei den Objekten mit einer Massnahme B2 im gesamten Betrachtungszeitraum die Massnahmen B1, N oder A1 zulässig.

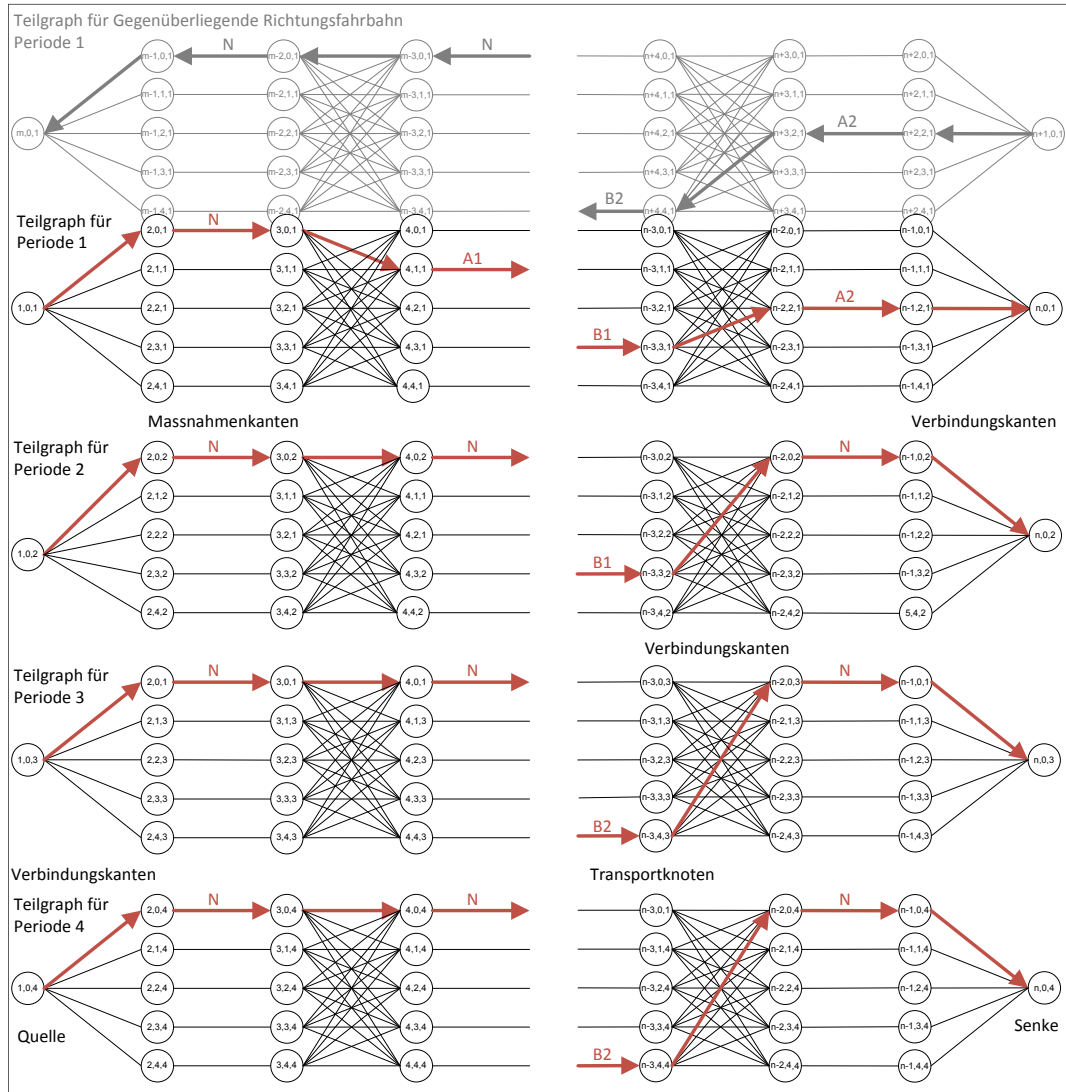


Abb. 3.65 Aufbau des Netzwerks unter Berücksichtigung von fünf verschiedenen Massnahmen und vier Zeitperioden (für eine Richtungsfahrbahn) und Beispiel einer Flussbelegung

Berücksichtigung mehrerer Zeitperioden

Aus den Massnahmendefinitionen geht hervor, dass mehrere Zeitperioden notwendig sind. Für das Verfahren der Optimierung der Baustellenplanung im Rahmen dieses Forschungsprojekts wird vorerst ein Betrachtungszeitraum von vier Zeitperioden festgelegt. Für den Praxisbezug wird für eine Analyse der Baustelle eine Zeitperiode als ein halbes Jahr definiert. Theoretisch kann für eine Periode jeder beliebige Zeitraum bestimmt werden. Mit dieser Definition der Periodendauer erfolgt eine Gesamtbetrachtung über einen Zeitraum von zwei Jahren. Für eine Umsetzung der verschiedenen Zeitperioden erfolgt ein Vervielfachen des gerichteten Massnahmennetzwerks einer Zeitperiode (vgl. Abb. 3.65). Das bedeutet für jede Zeitperiode existiert nun ein eigener gerichteter Graph, der nun vom Anfangsknoten (Quelle) bis zum Endknoten (Senke) mit einem Fluss belegt werden kann (vgl. Kapitel 2.4.3). Das Problem wird somit als minimaler Kostenfluss generiert. Das bedeutet, dass jede Kante mit einem Kostenkennwert, z.B. für eine Massnahme oder einen Übergang, gewichtet wird.

Abbildung 3.65 zeigt schemenhaft den Anfangs- und Endbereich der vier als Netzwerk

definierten gerichteten Graphen (jeweils eine Richtungsfahrbahn). Beispielhaft wurde eine Flussbelegung von Quelle über die Transportknoten zur Senke je Zeitperiode durchgeführt. Diese zeigt, dass immer nur eine Massnahme gewählt wird. Deutlich sind die Massnahmenkanten von den Verbindungskanten zu unterscheiden. Diese Beschreibung und Darstellung (vgl. Abb. 3.65) ist bewusst auf einen Graphen je Zeitperiode vereinfacht worden. Bei komplexeren Situationen der Anlage analog der Fallbeispiele, z.B. beide Richtungsfahrbahnen, Verzweigungen oder Ein- und Ausfahrten, existieren für eine Zeitperiode mehrere unterschiedliche Quell- und Senkknoten. Es stellt somit ein Art Problem des kürzesten Weges dar. Dieses wird als Problem des minimalen Kostenflusses gelöst. Es muss sichergestellt werden, dass zwischen den unterschiedlichen Quell- und Senkknoten immer ein Fluss ohne doppelte Belegung existiert. Für die Gewichtung der Kanten wird ein Kostenmodell benötigt, mit dem sich das nächste Kapitel 3.2.3 befasst. Für die Lösung des Optimierungsproblems eines minimalen Kostenflusses wird der in Abbildung 3.65 schemenhaft dargestellte gerichtete Graph als Netzwerkmodell in ein binär lineares Programm (BLP) umgewandelt, wie in Kapitel 3.2.4 ausführlich beschrieben ist.

3.2.3 Kostenmodell

Durch das Kostenmodell erfolgt eine Definition der Massnahmen hinsichtlich ihrer monetären Auswirkung auf Strassenbetreiber, Strassennutzer sowie Dritte. Diese Auswirkungen stellen als Kosten im Graphennetzwerk die Gewichtung der Kanten dar, welche bei der Optimierung in einem Fluss durchlaufen werden. Jede Massnahme existiert dabei als Kante im Massnahmennetzwerk und kann durch eine binäre Variable im BLP gewählt werden. Das Kostenmodell wird zuerst an dem Teilgraphen in einer Richtung und einer Zeitperiode erklärt. Im Anschluss erfolgt eine notwendige Aufgliederung der Kosten auf die verschiedenen Zeitperioden und räumliche Ausdehnung auf beide Richtungsfahrbahnen.

Grundsätzlich werden alle Kanten jeweils durch die Kosten der Anspruchsgruppen Strassenbetreiber, Strassennutzer und Dritte belegt. Das heisst, es gilt es jeweils zu berücksichtigen:

- Kosten der Massnahmen bzw. Auswirkungen von Massnahmen im Betrachtungszeitraum der Baustelle (2 Jahre) auf jeder Massnahmenkante getrennt für Strassenbetreiber, Strassennutzer und Dritte
- Folgekosten der Massnahmen bzw. Auswirkungen von Massnahmen aus der langfristige teilsystembezogenen Erhaltungsplanung (20-50 Jahre) auf jeder Massnahmenkante getrennt für Strassenbetreiber, Strassennutzer und Dritte
- Kosten, welche bedingt durch die Baustelle in deren Betrachtungszeitraum entstehen auf Massnahmen- und Verbindungskanten getrennt für Strassenbetreiber, Strassennutzer und Dritte

Die Massnahmenkosten und Folgekosten werden einem Erhaltungsobjekt zugeordnet. Diese Kosten belegen somit ausschliesslich Massnahmenkanten. Die baustellenbedingten Kosten können nur zum Teil Erhaltungsobjekten direkt zugeordnet werden. Einem Erhaltungsobjekt zuordenbare baustellenbedingte Kosten treten deshalb an Massnahmenkanten und nicht zuordenbare baustellenbedingte Kosten an Verbindungskanten auf. Die unterschiedlichen Kostenkenngrössen der Anspruchsgruppen Strassenbetreiber, Strassennutzer und Dritte separat für Massnahmen- und Verbindungskanten sind in Abbildung 3.66 dargestellt.

Das Kostenmodell wird in den folgenden Abschnitten gemäss Abbildung 3.66 konkret für jede Anspruchsgruppe erarbeitet. Die Modelle für die Ermittlung der jeweiligen Kostenkenngrössen sind in Kapitel 2.3.2 zu finden.

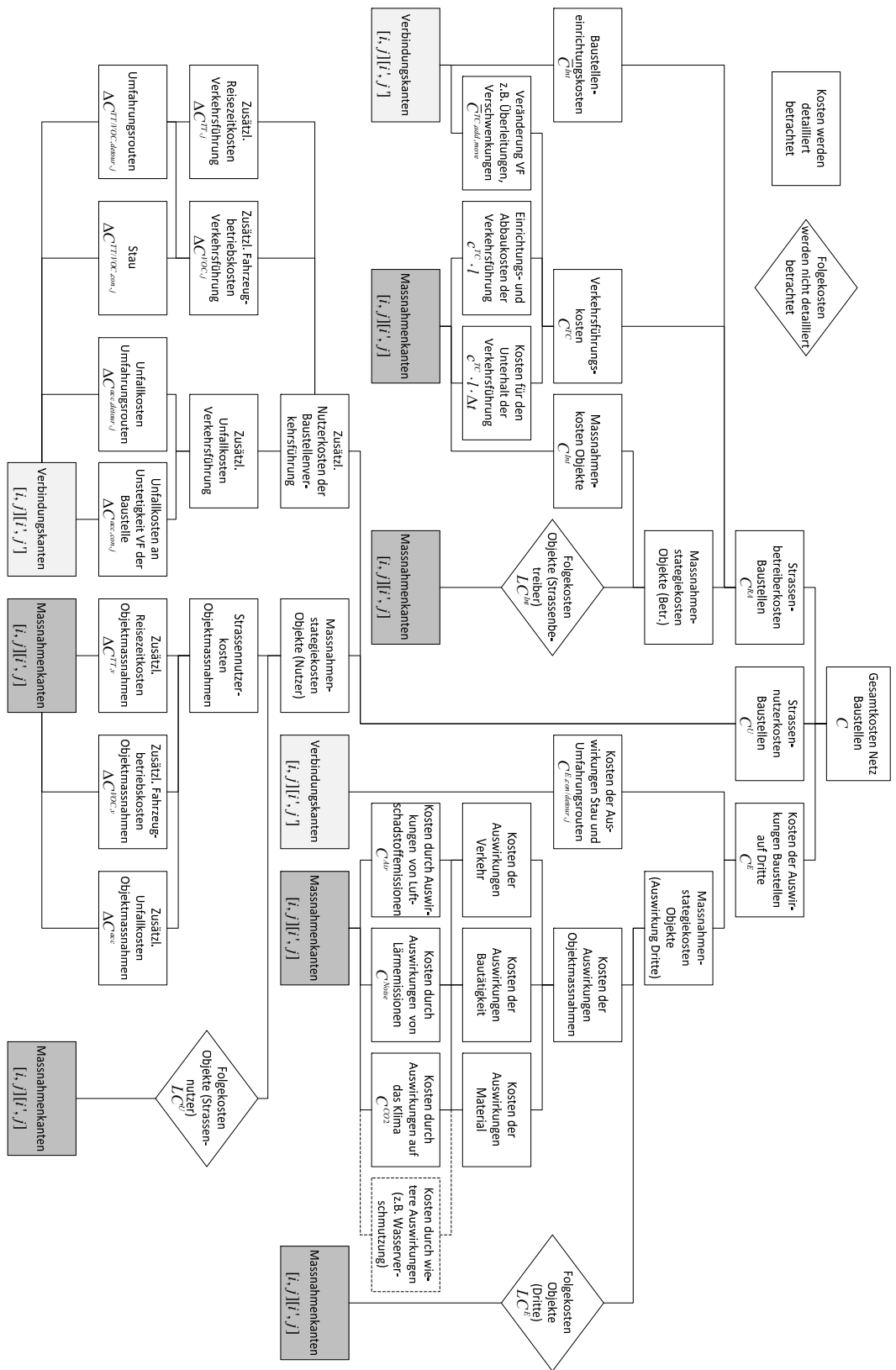


Abb. 3.66 Kostenstruktur der Gesamtkosten der Baustellen im betrachteten Netz für die Modellbildung aufgeteilt auf Massnahmen- und Verbindungskanten

Strassenbetreiberkosten

Die Strassenbetreiberkosten C^{RA} setzen sich zusammen einerseits aus den objektbezogenen Kosten der Massnahmenfolgen – d.h. Massnahmenkosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{Int}$ und deren Folgekosten $LC_{[i,j][i+1,j]}^{Int}$ – sowie den baustellenbedingte Kosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC}$ der Verkehrsführung auf den von der Baustelle umschlossenen Erhaltungsobjekten. Andererseits zählen die baustellenbedingten Kosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC}$ der Verkehrsführung sowie baustellenbedingten Kosten der Baustelleneinrichtung $C_{[i,0][i+1,j]}^{Setup}$ an den Verbindungskanten dazu.

$$C^{RA} = \sum_{i=1}^n \left(C_{[i,j][i+1,j]}^{Int} + LC_{[i,j][i+1,j]}^{Int} + C_{[i,j][i+1,j]}^{TC} + C_{[i,j][i+1,j]}^{TC} + C_{[i,0][i+1,j]}^{Setup} \right) \quad (35)$$

Objektbezogene Massnahmenkosten

Die Massnahmenkosten sind objektbezogen und beziehen sich auf eine definierte Massnahmenkante vom Knoten $[i, j]$ zum Knoten $[i+1, j]$. Sie beinhalten die Kosten der Bauleistungen für die jeweilige Massnahme am Erhaltungsobjekt innerhalb des Betrachtungszeitraums der Baustellenplanung. Die Massnahmenkosten ergeben sich aus idealisierten Einheitskosten der Teilsysteme.

Sie können aus folgenden Kostenfaktoren mit unterschiedlichen Bezugsgrössen bestehen:

- flächenabhängige variable Kosten der Bauleistung $c_j^{Int,A}$, welche mit der Fläche eines Erhaltungsobjekts $A_{(i,j)} = l_{(i,j+1)} \cdot b_{(i,j+1)}$ (bezogen auf eine Richtungsfahrbahn) multipliziert werden,
- längenabhängige variable Kosten der Bauleistung $c_j^{Int,J}$, welche mit der Länge eines Erhaltungsobjekts $l_{(i,j+1)}$ multipliziert werden und
- variable Kosten der Bauleistung in Abhängigkeit der Anzahl z.B. von gleichen Bauteilen $no_{(i,j+1)}$ an einem Erhaltungsobjekt $c_j^{Int,no}$.

Damit ergeben sich die objektbezogenen Massnahmenkosten zu

$$C_{[i,j][i+1,j]}^{Int} = C_{[i,j][i+1,j]}^{Int,A} + C_{[i,j][i+1,j]}^{Int,J} + C_{[i,j][i+1,j]}^{Int,no} = c_j^{Int,A} \cdot l_{(i,j+1)} \cdot b_{(i,j+1)} + c_j^{Int,J} \cdot l_{(i,j+1)} + c_j^{Int,no} \cdot no_{(i,j+1)} \quad (35)$$

Objektbezogene Folgekosten

Jede Massnahme an einem Erhaltungsobjekt in der Baustelle erzeugt Konsequenzen über den Betrachtungszeitraum der Baustellenplanung hinaus (vgl. Kapitel 2.2.6). Dies sind je nach definierten Randbedingungen, wie z.B. zustandsabhängige Eingreifgrenzen für Erhaltungsmaßnahmen, notwendige Erhaltungsmaßnahmen am gleichen Erhaltungsobjekt zu einem zukünftigen Zeitpunkt. Diese Konsequenzen der Massnahme werden monetär durch die Folgekosten $LC_{[i,j][i+1,j]}^{Int}$ einer Massnahme j der Kante $[i, j][i+1, j]$ ausgedrückt.

Aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung ergeben sich bei Lebenszyklusbetrachtungen für jede Massnahme (initiale Erhaltungsmaßnahme) an einem Erhaltungsobjekt Folgemaassnahmen (vgl. Abb. 3.67). Die Massnahmenkosten werden durch die initiale Erhaltungsmaßnahme gebildet. Die Folgekosten ergeben sich aus den Folgemaassnahmen. Die Summe der auf einen Zeitpunkt t_0 diskontierten Kosten der Folgemaassnahmen einer initialen Massnahme an einem Erhaltungsobjekt stellt dann die Folgekosten dar [vgl. z.B. 111]. Diese Folgekosten sind ebenfalls objektbezogen und fallen an einer definierten Massnahmenkante vom Knoten $[i, j]$ zum Knoten $[i+1, j]$ an.

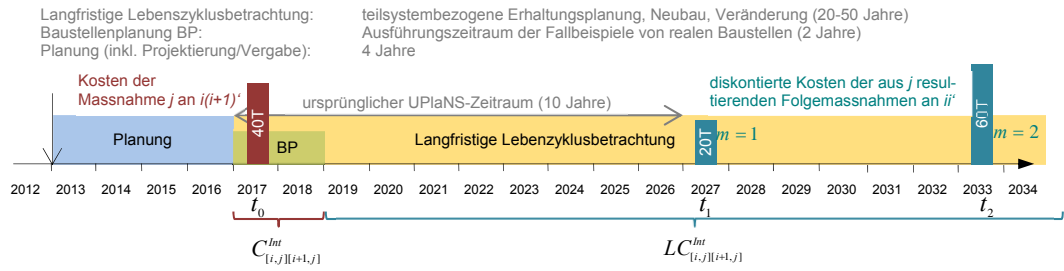


Abb. 3.67 Zeitstrahl mit einem Beispiel einer Massnahmenfolge und daraus resultierenden Massnahmenkosten und Folgekosten an einem Erhaltungsobjekt ii'

Bei der Anzahl n von Folgemassnahmen m zum jeweiligen Zeitpunkt t_m innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraums einer Lebenszykluskostenanalyse ergeben sich die Folgekosten der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung eines Erhaltungsobjekts (Massnahmenkante $[i, j][i', j']$) zu

$$LC_{[i,j][i+1,j]}^{RA} = LC_{[i,j][i+1,j]}^{Int} = \sum_{m_0=1}^n C_{[i,j][i+1,j]}^{Int, m_0} \quad (35)$$

mit $C_{[i,j][i+1,j]}^{Int, m_0}$ auf den Zeitpunkt t_0 diskontierte Kosten der Folgemassnahme m in t_m

Baustellenbedingte Verkehrsführungskosten der Erhaltungsobjekte

Die baustellenbedingten Verkehrsführungskosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC}$ der Erhaltungsobjekte bzw. der Massnahme j an einer Kante $[i, j][i+1, j]$ bestehen aus den

- von der Längen eines Erhaltungsobjekts $l_{(i,i+1)}$ abhängigen Kosten für die Einrichtung der Verkehrsführung c_j^{TC} ,
- Kosten $c_j^{TC, \Delta t}$ für den Unterhalt der Verkehrsführung in Abhängigkeit der Länge und Baustellendauer Δt_j der Massnahme j und
- zusätzlichen von Länge und Zeit unabhängige Kosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC, add}$ im Rahmen der Massnahme j .

Ein Beispiel für die Entstehung von Länge und Zeit unabhängigen Kosten ist eine Erstellung einer Fahrbahnverbreiterung an einem Erhaltungsobjekt. Bei der Kostenberechnung für Fahrbahnverbreiterungen wäre es richtig, nur einen Teil der Kosten anzusetzen, da diese Investition nicht nur für diese eine Massnahme sondern auch für zukünftige betriebliche bzw. bauliche und je nach Länge eventuell auch für verkehrstechnische Zwecke Nutzen stiftet.

$$C_{[i,j][i+1,j]}^{TC} = C_{[i,j][i+1,j]}^{TC, l} + C_{[i,j][i+1,j]}^{TC, \Delta t} + C_{[i,j][i+1,j]}^{TC, add} = c_j^{TC} \cdot l_{(i,i+1)} + c_j^{TC, \Delta t} \cdot l_{(i,i+1)} \cdot \Delta t + C_{[i,j][i+1,j]}^{TC, add} \quad (35)$$

Baustellenbedingte Verkehrsführungskosten an Verbindungskanten

Weitere Verkehrsführungskosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC}$ fallen an den Verbindungskanten an. Diese sind baustellenbedingt und können keinem Erhaltungsobjekt allein zugeordnet werden. Die Verkehrsführungskosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC}$ entstehen durch Kosten infolge Verschwenkungen (bzw. Rückverschwenkungen) $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC, narrow}$ oder Überleitungen $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC, cross}$ (bzw. Rückführungen) im Rahmen der temporären Verkehrsführung im Baustellenbereich.

Beispielsweise bedingt eine Überleitung auf einer definierten Verbindungskante $[i, j][i+1, j']$ zur Massnahme $j' = 3 (j \neq 3)$ mit der Dauer von zwei Perioden eventuell eine Umsetzung nach der ersten Periode. Gleichzeitig existiert an dieser Verbindungskante

dann keine Verschwenkung. Es entstehen dabei Kosten der Verkehrsführung $C_{[i,j][i+1,3]}^{TC,cross1}$ durch den Wechsel zwischen zwei Bauphasen auf einer Richtungsfahrbahn (vgl. Kapitel 2.5.3 und 2.5.4).

Ein weiteres Beispiel sind spezielle Leistungen hinsichtlich der Verkehrsführung, z.B. eine Neuerstellung einer Mittelstreifenüberfahrt $C_{[i,j][i+1,3]}^{TC,cross2}$. Dadurch ergeben sich die Strassenbetreiberkosten an einer neuzuerstellenden Mittelstreifenüberfahrt (Verbindungskante) $[i, j][i', 3]$ am Anfang eines Erhaltungsobjekts mit einer Massnahme $j' = 3 (j \neq 3)$ zu

$$C_{[i,j][i+1,3]}^{TC} = C_{[i,j][i+1,3]}^{TC,narrow} + C_{[i,j][i+1,3]}^{TC,cross} = 0 + C_{[i,j][i+1,3]}^{TC,cross1} + C_{[i,j][i+1,3]}^{TC,cross2} \quad (35)$$

Baustellenbedingte Baustelleneinrichtungskosten

Ein wichtiger Kostenfaktor des Strassenbetreibers sind die Baustelleneinrichtungskosten $C_{[i,0][i+1,j]}^{Setup}$. Diese treten am Baustellenanfang, das heisst an einer Verbindungskante $[i, 0][i + 1, j']$ von einer Massnahme N ($j = 0$) zu einer anderen Massnahme A1, A2 oder B1/B2 ($j' = 1...4$) auf.

Zusammenfassung der Strassenbetreiberkosten

Die Strassenbetreiberkosten sind zusammenfassend nochmals in Abbildung 3.68 dargestellt.

Abb. 3.68 Strassenbetreiberkosten mit Bezug zum Erhaltungsobjekt bzw. zur Baustelle

Kostenarten		objektbezogen	baustellenbedingt
Massnahmenkosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{Int}$	flächenabhängig längenabhängig abhängig von der Anzahl	$C_{[i,j][i+1,j]}^{Int,A}$ $C_{[i,j][i+1,j]}^{Int,J}$ $C_{[i,j][i+1,j]}^{Int,no}$	-
Folgekosten $LC_{[i,j][i+1,j]}^{Int}$		$\sum_{m=1}^n C_{[i,j][i+1,j]}^{Int,m_0}$	-
Verkehrsführungskosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC}$ und $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC}$		$C_{[i,j][i+1,j]}^{TC,J}$ $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC,J,I}$ $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC,add}$	$C_{[i,j][i+1,j]}^{TC,narrow}$ $C_{[i,j][i+1,j]}^{TC,cross}$
Baustelleneinrichtungskosten		-	$C_{[i,0][i+1,j]}^{Setup}$

Strassennutzerkosten

Die Strassennutzerkosten ΔC^U werden in der Regel als Differenzkosten zwischen Planungsfall mit Ausführung der Massnahmen und Referenzfall ohne Ausführung dieser Massnahmen bzw. einer Baustelle berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.3.2). Das Ergebnis sind die zusätzlich anfallenden Kosten infolge einer Massnahme bzw. Baustelle. Sie sind Ausdruck der monetären Bewertung der Reisezeit, des Fahrzeugbetriebs und des Unfallrisikos. Auslöser gemäss Kapitel 2.2.5 dafür sind

- die Reduktion des Geschwindigkeit infolge der niedrigeren signalisierten Baustellen- geschwindigkeit,
- die Verringerung der Leistungsfähigkeit der Baustellenstrecken und dadurch eventuell auftretende Stauereignisse bzw. Verkehrsumlagerungen auf Ausweichrouten sowie
- die Veränderung des Unfallrisikos an Autobahnstellen im Baustellenbereich bzw. an Stellen auf den Umfahrrouten.

Die Strassennutzerkosten ergeben sich damit zu

$$\Delta C^U = \Delta C^{TT} + \Delta C^{VOC} + \Delta C^{ac} \quad (35)$$

Grundsätzlich werden die Strassennutzer in objektbezogene Kosten der Auswirkungen der Massnahmen und baustellenbedingte Kosten unterteilt.

$$\Delta C^U = \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{U,int} + \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{U,int} + \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{U,site} \quad (35)$$

Objektbezogene Kosten und Folgekosten der Auswirkung von Massnahmen

Die objektbezogenen Strassennutzerkosten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^U$ stellen die monetäre Bewertung der Auswirkungen der Massnahmen an den einzelnen Erhaltungsobjekten in der Baustelle auf den Strassennutzer und deren Folgekosten für den Strassennutzer dar.

Es erhöhen sich die Strassennutzerkosten durch

- zusätzliche Reisezeitkosten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{TT,v}$ infolge signalisierter Geschwindigkeitsreduktion,
- zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{VOC,v}$ infolge signalisierter Geschwindigkeitsreduktion sowie
- zusätzliche Unfallkosten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac}$

im Bereich der Erhaltungsobjekte innerhalb der Baustelle.

Die Folgekosten der Auswirkungen von Massnahmen auf den Strassennutzer $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^U$ setzen sich zusammen aus zusätzlichen diskontierte zusätzliche Reisezeitkosten infolge signalisierter Geschwindigkeit $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{TT,v}$ und wenn in den Folgekosten quantifizierbar diskontierte zusätzliche Staukosten durch Leistungsfähigkeitsreduktion (z.B. Engstellenproblematik bei Tagesbaustellen) $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{TT,con}$, zusätzliche diskontierte Fahrzeugbetriebskosten infolge signalisierter Geschwindigkeit $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{VOC,v}$ und eventuell quantifizierbare Staubildung $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{VOC,con}$ sowie zusätzliche Unfallkosten $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{ac}$ berücksichtigt. Analog der Strassenbetreiberkosten erfolgt die Ermittlung der Folgekosten durch die Bildung der Summe der diskontierten Kosten der Auswirkungen der Folgemaassnahmen einer Erhaltungsmassnahme (vgl. Abb. 3.67).

Bei der Anzahl n von Folgemaassnahmen m zum jeweiligen Zeitpunkt t_m innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraums einer Lebenszykluskostenanalyse ergeben sich die Folgekosten aus der teilsystembezogenen Erhaltungskostenplanung eines Erhaltungsobjekts (Massnahmenkante $[i, j][i', j']$) zu

$$\begin{aligned} \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^U &= \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{TT,v} + \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{TT,con} + \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{VOC,v} + \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{VOC,con} + \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{ac} \\ &= \sum_{m=1}^n \left(\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{TT,v,m_0} + \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{TT,con,m_0} + \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{VOC,v,m_0} + \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{VOC,con,m_0} + \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac,m_0} \right) \end{aligned} \quad (35)$$

Baustellenbedingte Kosten

Die baustellenbedingten Strassennutzerkosten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^U$ stellen die monetäre Bewertung der Auswirkung der gesamten Baustelle auf das gesamte Strassennetz dar. Wie in Kapitel 2.2.3 aufgezeigt, ist am Beginn der Baustelle im beschilderten Bereich vor der Baustelle und je nach Abstufung der Geschwindigkeitssignalisation und verbleibender Fahrstreifen unmittelbar vor dem Verschwenkbereich bzw. Überleitungsbereich eine Engstellenproblematik vorhanden. Dadurch kommt es häufiger zu einem Zusammenbruch der Leistungsfähigkeit mit Staubildung.

Dies hat für den Strassennutzer

- zusätzlich Reisezeitkosten $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{TT.con}$,
- zusätzlich Fahrzeugbetriebskosten $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{VOC.con}$ sowie
- zusätzlich Unfallkosten $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{ac.con}$

am Eingangsbereich der Baustelle durch Staubildung zur Folge. Gleichzeitig kommt es zu Verkehrsumlagerungen in untergeordnete Strassennetze, weil einige Strassennutzer der Staufahrt über Umfahrungsrouten entgehen wollen.

Dies verursacht auf den Umfahrungsrouten für den dort bereits existierenden und den zusätzlichen aufgrund der Baustelle umgelagerten Verkehr ebenfalls

- zusätzlich Reisezeitkosten $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{TT.detour}$,
- zusätzlich Fahrzeugbetriebskosten $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{VOC.detour}$ sowie
- zusätzlich Unfallkosten $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{ac.detour}$.

Aufgrund der Erkenntnisse der Unfallforschung ist bekannt, dass im Bereich innerhalb der Baustelle an verschiedenen Stellen unterschiedliche Unfallrisiken bestehen (vgl. Kapitel 2.2.5). Je nach Lage werden die aus den unterschiedlichen Unfallkostenraten ermittelten zusätzlichen Unfallkosten Verbindungskanten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac.site}$ (z.B. bei einer Überleitung) oder den Massnahmenkanten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac.site}$ (z.B. bei einer Strecke im Baustelleninnenbereich ohne Unstetigkeit) zugeordnet.

Zusammenfassung der Strassennutzerkosten

Die Strassennutzerkosten sind zusammenfassend nochmals in Abbildung 3.69 dargestellt.

Abb. 3.69 Strassennutzerkosten mit Bezug zum Erhaltungsobjekt bzw. zur Baustelle

Kostenarten	objektbezogen	baustellenbedingt
Zusätzliche Reisezeitkosten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{TT}$ und $\Delta C_{[0,j][i+1,j]}^{TT}$	$\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{TT.v}$ $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{TT.v}$ $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{TT.con}$	$\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{TT.con}$ $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{TT.detour}$
Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{VOC}$ und $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{VOC}$	$\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{VOC.v}$ $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{VOC.v}$ $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{VOC.con}$	$\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{VOC.con}$ $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{VOC.detour}$
Zusätzliche Unfallkosten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac}$ und $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac}$	$\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac}$ $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{ac}$ $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac.site}$	$\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{ac.con}$ $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{ac.detour}$ $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac.site}$

Kosten der Auswirkungen auf Dritte

Die Kosten der Auswirkungen auf Dritte ΔC^E , d.h. Anrainer der Autobahnen und Umwelt, werden analog der Strassennutzerkosten als Differenzkosten zwischen Planungsfall mit Ausführung der Massnahmen und Referenzfall ohne Ausführung dieser Massnahmen bzw. einer Baustelle berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.3.2). Das Ergebnis sind die zusätzlich anfallenden Kosten infolge der Auswirkungen einer Massnahme bzw. Baustelle. Sie sind Ausdruck der monetären Bewertung von derzeit drei Hauptauswirkungen von Luftschadstoffemissionen ΔC^{Air} , Lärmemissionen ΔC^{Noise} und Klimaschäden durch CO₂-Emission ΔC^{CO_2} . Dies ist nicht als abschliessend zu betrachten.

$$\Delta C^E = \Delta C^{Air} + \Delta C^{Noise} + \Delta C^{CO2} \quad (35)$$

Weitere relevante Kenngrößen sind bei der zukünftigen Erweiterung der Erkenntnisse möglich. Die Ursachen für eine Veränderung der Auswirkungen bei Baustellen sind dabei jedoch umfassend auf die Einflüsse von Verkehr, Bautätigkeit und Materialherstellung im Rahmen der Baustellenausführung zu suchen.

Grundsätzlich werden die Kosten der Auswirkungen auf Dritte ebenfalls in objektbezogene Kosten der Auswirkungen der Massnahmen und baustellenbedingte Kosten unterteilt.

$$\Delta C^E = \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{E,int} + \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{E,int} + \Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{E,site} \quad (35)$$

Objektbezogene Kosten der Auswirkungen auf Dritte

Mit den zusätzlichen Kosten der Auswirkungen von Luftschadstoffemissionen $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Air}$, Lärmemissionen $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Noise}$ und Klimaschäden durch CO2-Emission $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{CO2}$ ergeben sich die Kosten der Auswirkungen infolge der Erhaltungsmassnahmen an den Massnahmenkanten zu

$$\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{E,int} = \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Air,int} + \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Noise,int} + \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{CO2,int} \quad (35)$$

Hierbei muss Beachtung finden, dass die genannten Auswirkungen der Erhaltungsmassnahmen von mehreren Einflussfaktoren abhängig sind. Dazu zählen neben dem Verkehr auf dem Erhaltungsobjekt unter anderem die Bautätigkeit (z.B. Maschineneinsatz), das verwendete Material (z.B. Herstellungsprozesse) sowie Transport von und zur Baustelle. Diese Aufzählung ist als nicht abschliessend zu sehen.

Zusätzlich fallen auch hier Folgekosten an. Analog der Strassenbetreiber- und Strassenutzerkosten ergeben sich diese aus den diskontierten Kosten der zukünftigen Folge-massnahmen der Erhaltungsmassnahmen der Baustelle. Bei der Anzahl n von Folge-massnahmen m zum jeweiligen Zeitpunkt t_m innerhalb eines definierten Betrachtungs-zeitraums einer Lebenszykluskostenanalyse ergeben sich die Folgekosten aus der teil-systembezogenen Erhaltungsplanung eines Erhaltungsobjekts (Massnahmenkante $[i, j][i+1, j]$) zu

$$\begin{aligned} \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{E,int} &= \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{Air,int} + \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{Noise,int} + \Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{CO2,int} \\ &= \sum_{m=1}^n \left(\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Air,int,m_0} + \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Noise,int,m_0} + \Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{CO2,int,m_0} \right) \end{aligned} \quad (35)$$

Baustellenbedingte Kosten der Auswirkungen auf Dritte

Die baustellenbedingten Kosten der Auswirkungen auf Dritte $C_{[i,j][i+1,j]}^{E,site}$ stellt die monetär Bewertung der Baustelle durch die Quantifizierung der drei Hauptfaktoren analog der objektbezogenen Kosten dar. Die Ursachen für diese Auswirkungen liegen bei Stauereignissen und Umfahrungsrouten. Diese Kosten werden auf die Verbindungskanten $[i, 0][i+1, j]$ am Anfang einer Baustelle gelegt. Damit ergeben sich die baustellenbedingten Kosten zu

$$\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{E,site} = \Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{Air,con} + \Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{Air,detour} + \Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{Noise,con} + \Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{Noise,detour} + \Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{CO2,con} + \Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{CO2,detour} \quad (35)$$

Zusammenfassung der Kosten der Auswirkungen auf Dritte

Die Kosten der Auswirkungen auf Dritte sind zusammenfassend nochmals in Abbildung 3.70 dargestellt.

Abb. 3.70 Kosten der Auswirkungen auf Dritte mit Bezug zum Erhaltungsobjekt bzw. zur Baustelle

Kostenarten	objektbezogen	baustellenbedingt
Zusätzliche Kosten der Auswirkung durch Luftschadstoffemissionen $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Air}$ und $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Air}$	$\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Air,int}$ $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{Air,int}$	$\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{Air,con}$ $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{Air,detour}$
Zusätzliche Kosten der Auswirkung durch Lärmemissionen $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Noise}$ und $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Noise}$	$\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{Noise,int}$ $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{Noise,int}$	$\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{Noise,con}$ $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{Noise,detour}$
Zusätzliche Kosten der Auswirkung durch CO ₂ -Emissionen $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{CO_2}$ und $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{CO_2}$	$\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{CO_2,int}$ $\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{CO_2,int}$	$\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{CO_2,con}$ $\Delta C_{[i,0][i+1,j]}^{CO_2,detour}$

Zeitliche und räumliche Aufgliederung der Kosten im Netzwerkmodell

Nachdem die einzelnen Kosten für Massnahmen und Baustelle aufgestellt wurden, erfolgt nun eine notwendige zeitliche und räumliche Aufgliederung zur Berücksichtigung im Netzwerkmodell für die Optimierung mit BLP. Die objektbezogenen Kosten gelten zum Teil für eine gesamte Massnahme an einem Erhaltungsobjekt über deren gesamte Dauer. Für das Modell werden die Massnahmenkosten je Periode (hier ½ Jahr) benötigt. Hat beispielsweise eine Massnahme j die Dauer p_j von zwei Perioden, wie in den Fallbeispielen die Massnahme B1 und ihrer Auswirkung B2 mit der Dauer von einem Jahr, werden die Kosten je Periode berechnet. Die Kosten einer Massnahmen je Zeitperiode berechnen sich damit zu

$$C_{[i,j,k][i+1,j,k]} = \frac{C_{[i,j][i+1,j]}}{p_j} \quad (35)$$

Die baustellenbedingten Kosten gelten grundsätzlich für die gesamte Baustelle in zeitlicher und räumlicher Sicht. Das heisst, es müssen einerseits in zeitlicher Hinsicht die Anzahl der Perioden und andererseits in räumlicher Hinsicht die betroffenen Richtungsfahrbahnen berücksichtigt werden. Eine Baustelle ist abhängig von der Dauer p_j der Massnahme j und kann eine oder zwei Richtungsfahrbahnen, d.h. die gesamte Fahrbahn, betreffen ($G_j = \{1,2\}$). Dies betrifft Massnahmen und Verbindungskanten. Die Kosten müssen nun je nach zeitlichem und räumlichem Bezug aufgegliedert werden. Damit ergeben sich die baustellenbedingten Kosten an den Massnahmenkanten zu

$$C_{[i,j,k][i+1,j,k]} = \frac{C_{[i,j][i+1,j]}}{G_j \cdot p_j} \quad (35)$$

bzw. an den Verbindungskanten zu

$$C_{[i,j,k][i+1,j',k]} = \frac{C_{[i,j][i+1,j]}}{G_{j'} \cdot p_{j'}} \quad (35)$$

Budgetbetrachtungen des Strassenbetreibers als Randbedingung

Im Rahmen einer Budgetbetrachtung sind mit Ausnahme der Folgekosten alle Kosten des Strassenbetreibers relevant. Das heisst alle Kosten, welche im Betrachtungszeitraum der Baustelle dem Strassenbetreiber entstehen, müssen je Periode der jeweiligen Bud-

getbegrenzung R_k der Periode k gegenübergestellt werden. Zu den budgetrelevanten Kosten gehören objektbezogene und baustellenbedingte Kosten des Strassenbetreibers. Das heisst die Strassenbetreiberkosten aller Kanten, welche die Baustelle mit den gewählten Massnahmen j auf den einzelnen Kanten in der jeweiligen Periode bilden. Die Randbedingung einer Budgetbegrenzung R_k der Strassenbetreiberkosten C_k^{RA} für eine Zeitperiode k ergibt sich dabei zu

$$C_k^{RA} \leq R_k \quad (35)$$

Bei der Berücksichtigung eines Gesamtbudgets über den gesamten Betrachtungszeitraum von 2 Jahren, müssen alle vier Perioden mit in die Budgetbetrachtung mit einfließen. Die Randbedingung einer Budgetbegrenzung R der Strassenbetreiberkosten für den gesamten Betrachtungszeitraum ergibt sich zu

$$\sum_{k=1}^4 C_k^{RA} \leq R \quad (35)$$

Gesamtkosten als Zielfunktion der Optimierungsaufgabe

Zur Gewährleistung einer ganzheitlichen Betrachtung erfolgt die Optimierung unter Betrachtung der Gesamtkosten. Dabei sind alle Anspruchsgruppen in Bezug auf die Kosten zu berücksichtigen. Zusätzlich wird der zeitliche Horizont über den Betrachtungszeitraum der Baustellenplanung von zwei Jahren durch den Einbezug der langfristigen Konsequenzen der gewählten Massnahmen innerhalb einer Baustelle erweitert. Diese langfristigen Konsequenzen werden durch die Langzeitkosten aus der langfristigen teilsystembezogenen Erhaltungsplanung ausgedrückt. Dadurch wird eine Integrierung der Lebenszyklusbetrachtungen aus den Teilsystemen in das Modell ermöglicht.

Das Ziel der Optimierungsaufgabe ist die Minimierung der Gesamtkosten. Die Zielfunktion Z wird somit aus den Gesamtkosten C gebildet, die es zu minimieren gilt. Diese Gesamtkosten beinhalten einerseits die Kosten der vier Zeitperioden und andererseits die Langzeitkosten der Baustellenbildung jeweils unter Einbezug aller Anspruchsgruppen. Damit ergibt sich die zu minimierende Zielfunktion Z zu

$$Z = C = \sum_{k=1}^4 C_k + LC = \sum_{k=1}^4 (C_k^{RA} + C_k^U + C_k^E) + LC^{RA} + LC^U + LC^E = \min! \quad (35)$$

3.2.4 Optimierung mittels binärer linearer Programmierung (BLP)

In diesem Abschnitt wird die binär lineare Programmierung (BLP) zur Berechnung der optimalen Baustellen im erstellten Netzwerkmodell für die Optimierung erläutert. Im Folgenden bezeichnet A die Menge aller Kanten im Modell und $y_{[i,j,k][i+1,j',k]}$ eine boolesche Variable, die mit der Kante vom Knoten $[i, j, k]$ zum Knoten $[i+1, j', k]$ verbunden ist. Der aus diesen Variablen entstehende Vektor y ist der Lösungsvektor des Optimierungsproblems und dementsprechend wird seine Belegung vom Optimierungsalgorithmus auf 0 oder 1 gesetzt. Eine 1 sagt aus, dass der Fluss über diese Kante fliesst. Eine 0 gibt an, dass diese Kante durch keinen Fluss belegt ist. Weiter bezeichnet s die Quelle und t die Senke des Flusses. s leitet jeweils einen Fluss zu allen Anfangsknoten des Netzwerkmodells und besitzt dabei grundsätzlich keine eingehenden Kanten. In der Senke t endet jeweils der Fluss aller Endknoten des Netzwerkmodells und damit besitzt t grundsätzlich keine ausgehenden Kanten (vgl. Abb. 3.71).

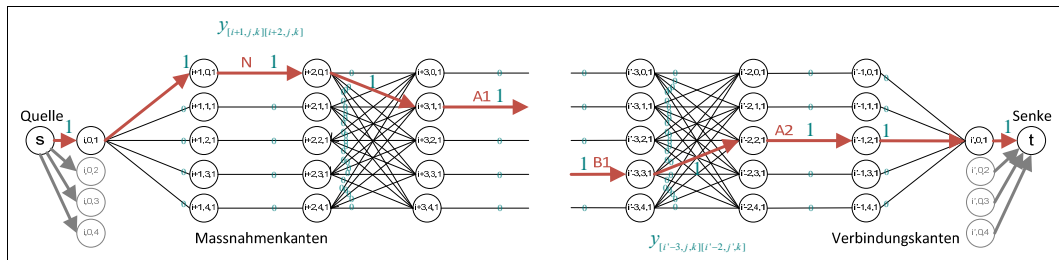


Abb. 3.71 Beispiel einer Flussbelegung mit zugehöriger Variable $y_{[i,j,k][i+1,j',k]}$ (für eine Richtungsfahrbahn bzw. einen Anfangsknoten i bzw. Endknoten i' im Netzwerkmodell für eine von vier Zeitperioden $k = 1$)

$N = \{1, 2, \dots, n\}$ gibt die Menge der Knoten im erweiterten physischen Modell, $M = \{0, \dots, 4\}$ die Menge der Massnahmen und $T = \{1, \dots, 4\}$ die Menge der Perioden an. Des Weiteren seien $i, i' \in N, j, j' \in M$ und $k \in T$ und M_i genau die Teilmenge aus M , die in i vorkommen kann. Für die Bezeichnung der Massnahmen gilt (vgl. Kapitel 3.2.2):

- $j = 0$: N, nichts tun,
- $j = 1$: A1, kleine unabhängige Massnahme,
- $j = 2$: A2, kleine abhängige Massnahme,
- $j = 3$: B1, grosse Massnahme und
- $j = 4$: B2, Auswirkungen grosse Massnahme.

Weiter sei p_j die Dauer einer Massnahme j . Die Dauer einer Massnahme wird über folgende Funktion bestimmt:

$$\begin{aligned}
 p_j &: M \setminus \{0\} \rightarrow \{1, 2\} \\
 p_1 &= p_2 = 1 \\
 p_3 &= p_4 = 2
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

Für die Massnahme $j = 0$ (nichts tun) kann keine Dauer fixiert werden, da ihr Auftreten auf einem Abschnitt davon abhängt, welche anderen Massnahmen gewählt werden.

Neben der Zielfunktion erfolgt die Definition diverser Nebenbedingungen zur Sicherstellung der richtigen Modellformulierung für die Optimierung.

Kontinuitätsbedingungen

Die Kontinuitätsbedingungen stellen sicher, dass es einen durchgängigen Fluss von s nach t gibt.

Startknoten des Netzwerks für die Optimierung mit BLP

Grundsätzlich sind Startknoten im erweiterten physischen Modell Anfangsknoten von Verbindungskanten und haben keinen Vorgängerknoten. Durch die Berücksichtigung mehrerer Zeitperioden werden in Abhängigkeit der Anzahl der Zeitperioden $|T|$ aus jedem Startknoten im erweiterten physischen Modell genau $|T|$ Startknoten $[i, 0, k]$ im Netzwerkmodell für die Optimierung mit BLP mit $i \in N_{start}$. N_{start} stellt die Menge der Startknoten des erweiterten Modells dar. Die Startknoten des Netzwerkmodells besitzen im Gegensatz zu allen anderen Anfangsknoten von Verbindungskanten $[i, j, k][i+1, j', k]$ nur eine eingehende Kante $s[i, 0, k]$. Alle anderen besitzen eine eingehende Massnahmenkante $[i-1, j, k][i, j, k]$ (vgl. Abb. 3.72).

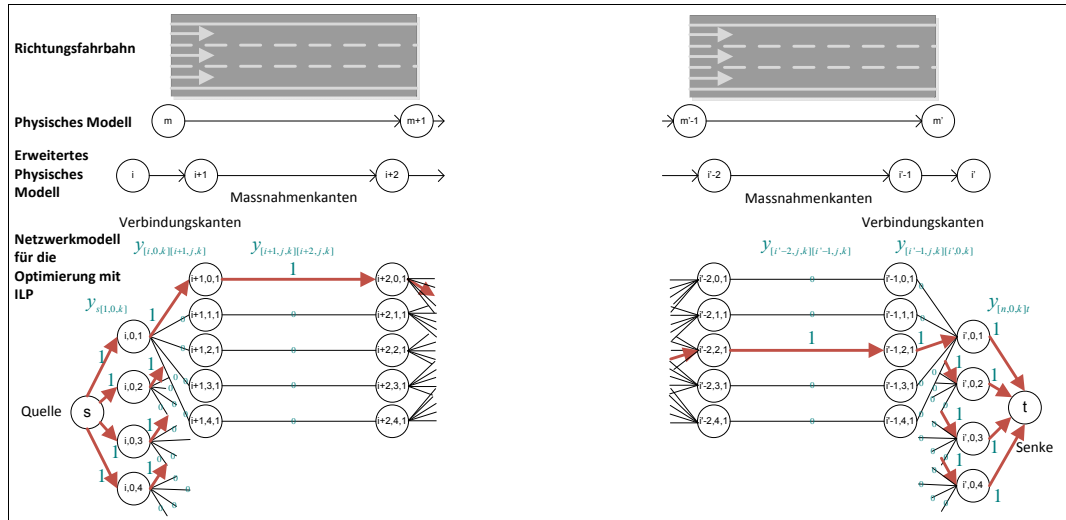


Abb. 3.72 Kanten der Start- und Endknoten

Die Kontinuitätsbedingung für die Menge der Startknoten $[i, 0, k]$ im Netzwerkmodell mit $i \in N_{start}$ lautet

$$y_{s[i,0,k]} = 1 \quad \forall [i, 0, k] : (s[i, 0, k]) \in A \tag{36}$$

mit $y_{s[i,0,k]} \in \{0, 1\}$

Damit existiert vom Quellknoten s zu jedem Startknoten im Netzwerkmodell ein Fluss, d.h. für jede Zeitperiode.

Endknoten des Netzwerks für die Optimierung mit BLP

Gleiches muss für alle Kanten in den Senkknoten t definiert werden, damit ein Fluss von der Quelle s zur Senke t in jeder Zeitperiode vorhanden ist. Alle Endknoten N_{end} im erweiterten physischen Modell bilden im Netzwerkmodell in Abhängigkeit von der Anzahl der Zeitperioden $|T|$ die Menge der Endknoten $[i', 0, k]$ mit $i' \in N_{end}$. Diese Endknoten besitzen wie alle anderen Knoten Endknoten von der Verbindungskanten, abgesehen von Zusammenführungen, jeweils fünf eingehenden Verbindungskanten $[i'-1, j, k][i', j', k]$ in Abhängigkeit von der Anzahl definierter Massnahmen $|M|=5$. Sie besitzen nur eine ausgehende Kante $[i', 0, k]t$ nach t (vgl. Abb. 3.72). Die Kontinuitätsbedingung für alle Endknoten $[i', 0, k]$ im BLP mit $i' \in N_{end}$ im Netzwerkmodell lautet

$$y_{[i',0,k]t} = 1 \quad \forall [i', 0, k] : ([i', 0, k]t) \in A \tag{36}$$

mit $y_{[i',0,k]t} \in \{0, 1\}$

Massnahmen- und Verbindungskanten sowie Verzweigungen und Zusammenführungen

Für die übrigen Knoten der Massnahmen- und Verbindungskanten muss jeweils gelten, dass nur ein Fluss je Zeitperiode im Netzwerkmodell existiert. Es muss damit jeder Knoten, welcher einen eingehenden Fluss hat, diesen auch weiter an den nächsten Knoten fließen lassen. Eine Ausnahme bilden verzweigende und zusammenführende Knoten (vgl. Abb. 3.73).

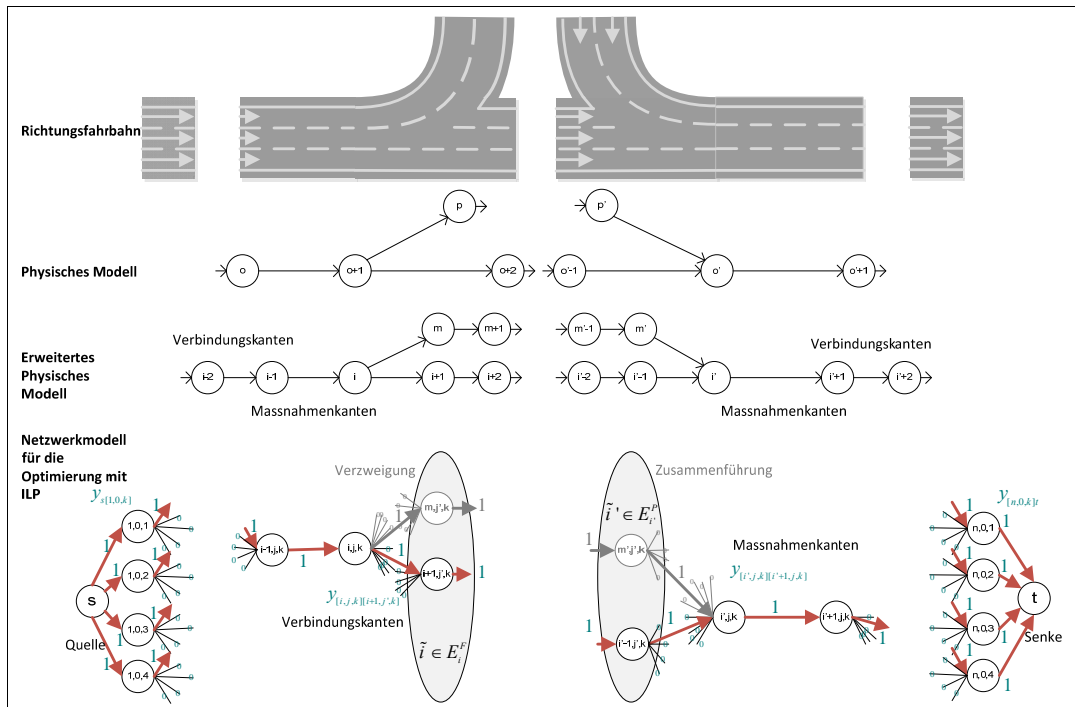


Abb. 3.73 Anfangs- und Endknoten von Massnahmen- und Verbindungskanten mit Verzweigung und Zusammenführung

Da im Netzwerkmodell auf allen Kanten immer ein Fluss in der Grösse von 1 fließen soll, muss bei einem Verzweigungsknoten der Fluss um die Anzahl der zusätzlich notwendigen ausgehenden Flüsse erhöht werden. Im Gegensatz dazu wird der Fluss bei einer Zusammenführungsknoten um die Anzahl der überzählig eingehenden Flüsse verringert. Vereinfachend erfolgt nochmals die Betrachtung des erweiterten physischen Modells in Abbildung 3.73. Die Anzahl jeweils eingehender Kanten E_i^P und ausgehender Kanten E_i^F eines Knotens i im erweiterten physischen Modell hat Einfluss auf die Kontinuitätsbedingungen. Ausgehenden und eingehenden Kanten bilden das Verhältnis α_i am Knoten i mit

$$\alpha_i = \frac{|E_i^F|}{|E_i^P|} \tag{36}$$

Dieses Verhältnis wird bei einer Verzweigung $\alpha_i > 1$, da mehr ausgehende E_i^F als eingehende E_i^P Flüsse vorhanden sind. Bei einer Zusammenführung wird $\alpha_i < 1$ durch $|E_i^F| < |E_i^P|$. Schliesslich ist das Verhältnis $\alpha_i = 1$ durch $|E_i^F| = |E_i^P|$ bei allen übrigen Knoten mit Ausnahme von Quelle s und Senke t .

Durch die Verwendung von α_i als Faktor der eingehenden Kanten kann der Fluss der ausgehenden Kanten je nach Art des Knotens angepasst werden.

Damit lauten die Kontinuitätsbedingungen für alle Anfangsknoten einer Verbindungskante, zu denen auch Verzweigungsknoten gemäss Abbildung 3.73 gehören, mit beliebigen Nachfolgerknoten $\tilde{i} \in E_i^F$

$$\alpha_i \cdot \sum_{[i-1,j,k] \in A} y_{[i-1,j,k][i,j,k]} = \sum_{[\tilde{i},j',k] \in A} y_{[i,j,k][\tilde{i},j',k]} \tag{36}$$

mit $y_{[i-1,j,k][i,j,k]}, y_{[i,j,k][\tilde{i},j',k]} \in \{0,1\}$

Die Kontinuitätsbedingungen für alle Anfangsknoten einer Massnahmenkante gemäss Abbildung 3.73, zu denen auch Zusammenführungsknoten gehören, mit beliebigen Vorgängerknoten $\tilde{i}' \in E_i^P$ lautet

$$\alpha_{i'} \cdot \sum_{[\tilde{i}',j,k][i',j,k] \in A} y_{[\tilde{i}',j,k][i',j,k]} = \sum_{[i',j,k][i'+1,j,k] \in A} y_{[i',j,k][i'+1,j,k]} \quad (36)$$

mit $y_{[\tilde{i}',j,k][i',j,k]}, y_{[i',j,k][i'+1,j,k]} \in \{0,1\}$

Weitere modellbedingte Randbedingungen

Wahl und Dauer der Massnahmen

Eine Massnahme $j = \{1, 2, 3\}$ auf einer Massnahmenkante im physischen Netzwerkmodell dauert genau p_j Zeitperioden (vgl. Kapitel 3.2.2). Dies wird durch die Gleichung (36) gewährleistet. Es seien N_B die Menge der Knoten des erweiterten physischen Modells, die den Beginn einer Massnahmenkante markieren. $x_{[i,j][i+1,j]}$ stellt eine binäre Variable dar, welche für jede Massnahme $j = \{1, 2, 3\}$ unabhängig von ihrer Dauer im Fall ihrer Wahl 1 gesetzt wird.

Gleichzeitig muss gewährleistet sein, dass an einem einer Massnahmenkante nur eine Massnahme $j = \{1, 2, 3\}$ im Betrachtungszeitraum der Baustellenplanung stattfindet. Dies garantiert Gleichung (36). Davon ausgenommen sind die Massnahmen mit $j = \{0\}$ „Nichtstun“ sowie $j = \{4\}$ die Auswirkung der Massnahme B1.

Die Bedingungen für die Wahl und Dauer einer Massnahme, kann dann wie folgt realisiert werden

$$\forall i \in N_B \forall j \in M \setminus \{0\} \forall (i+1) \in E_i^F \sum_{k=1}^4 y_{[i,j,k][i+1,k]} = x_{[i,j][i+1,j]} \cdot p_j \quad (36)$$

$$\forall i \in N_B \forall (i+1) \in E_i^F \sum_{j=1}^3 x_{[i,j][i+1,j]} \leq 1 \quad (36)$$

$$\forall i \in N_B \forall j \in M \setminus \{0\} x_{[i,j][i+1,j]} \in \{0,1\} \quad (36)$$

Im Fall der Wahl von Massnahme $j = \{3\}$, welche zwei Perioden (Dauer 1 Jahr) dauert, soll diese nicht unterbrochen, sondern in zwei aufeinanderfolgenden Zeitperioden durchgeführt werden. Dies garantieren Gleichungen (36) bis (36). Dadurch wird indirekt auch sichergestellt, dass bei einer Wahl von Massnahme 4 (Dauer 1 Jahr), diese in zwei aufeinander folgenden Perioden stattfindet.

$$\forall i \in N_B \forall (i+1) \in E_i^F y_{[i,3,1][i+1,3,1]} + y_{[i,3,3][i+1,3,3]} \leq 1 \quad (36)$$

$$\forall i \in N_B \forall (i+1) \in E_i^F y_{[i,3,1][i+1,3,1]} + y_{[i,3,4][i+1,3,4]} \leq 1 \quad (36)$$

$$\forall i \in N_B \forall (i+1) \in E_i^F y_{[i,3,2][i+1,3,2]} + y_{[i,3,4][i+1,3,4]} \leq 1 \quad (36)$$

Berücksichtigung der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn

Es muss jetzt noch sichergestellt werden, dass die Massnahmen auf gegenüberliegenden Kanten auch zusammenpassen. $G_{[i+1]}$ bezeichne die Menge der Kanten die parallel zur Kante zwischen i und $(i+1)$ im erweiterten physischen Modell liegen. Falls es keine solche Kante im erweiterten physischen Modell gibt oder sie die Rampe eines Kreuzes o.ä. repräsentiert, ist diese Menge leer. Ansonsten enthält sie genau ein Element.

Damit muss für die Massnahmenkanten $[i, j, k][i+1, j, k]$ und deren gegenüberliegende

Kanten jeder Zeitperiode k im konkreten Fall der Massnahmen $j \in \{2, 3, 4\}$ gelten

$$\begin{aligned} \forall i \in N_B \quad \forall (i+1) \in E_i^F \quad \forall [(i_G+1), i_G] \in G_{[i,i+1]} \quad \forall j \in \{2, 3, 4\} \\ y_{[i,2,k][i+1,2,k]} - y_{[(i_G+1),2,k][i_G,2,k]} = 0 \wedge \\ y_{[i,3,k][i+1,3,k]} - y_{[(i_G+1),4,k][i_G,4,k]} = 0 \wedge \\ y_{[i,4,k][i+1,4,k]} - y_{[(i_G+1),3,k][i_G,3,k]} = 0 \end{aligned} \quad (37)$$

Zusätzlich zu diesen Bedingungen an den Massnahmekanten der parallelen bzw. gegenüberliegenden Kanten stellen die Kontinuitätsbedingungen (36) bis (36) sicher, dass an den eingehenden Verbindungskanten jeweils die richtigen Massnahmen j bzw. j' gewählt werden. Und mit den Kontinuitätsbedingungen (36) und (36) wird auch an der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn ein durchgängiger Fluss gewährleistet.

Zusätzliche Randbedingungen

Budgetbegrenzung

Die durch das Budget gesetzte Obergrenze für die Kosten des Strassenbetreibers einer Periode muss ebenfalls beachtet werden. Dabei werden alle Verbindungs- und die Massnahmekanten mit einbezogen:

$$R = \sum_{k=1}^4 R_k \quad (38)$$

$$\forall k \in \{1, \dots, 4\}$$

$$\sum_{([i,j,k][i+1,j',k]) \in A} y_{[i,j,k][i+1,j',k]} (C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{RA}) + \sum_{([i',j,k][i'+1,j,k]) \in A} y_{[i',j,k][i'+1,j,k]} (C_{[i',j,k][i'+1,j,k]}^{RA}) \leq R_k \quad (39)$$

Dabei bezeichnet R_k das Budget für das k -te Jahr.

Begrenzung der Länge einer Baustelle je Zeitperiode

Die maximal erlaubte Länge einer Baustelle werde mit l_{Max} bezeichnet. Max_i sei die Menge der Knoten, an der eine Baustelle, die am Knoten i beginnt, spätestens enden muss. Max_i enthält genau dann mehr als ein Element, wenn es nach einem maximalen Abstand von l_{Max} hinter i mindestens eine Verzweigung gibt. Für jeden physikalischen Weg, der von i aus gegangen werden kann, wird der Knoten i^* gesucht, der als erster eine Entfernung zu i hat, die grösser als l_{Max} ist. Es gelte dann $i^* \in Max_i$.

Die Bedingung, dass es keine Baustelle gibt, die länger als l_{Max} ist, lässt sich nun folgendermassen schreiben:

$$\begin{aligned} \forall i \in N \setminus N_B \quad \forall i_p \in E_i^P \quad \forall i^* \in Max_i \quad \forall k \in \{1, \dots, 4\} \\ \sum_{j \in M_i \setminus \{0\}} y_{[i_p,0,k][i,j,k]} - \sum_{j \in M_{i_p}} y_{[i_p,j,k][i^*,0,k]} \leq 0 \end{aligned} \quad (40)$$

Wobei i_p^* einer der Vorgänger von i^* sei. Falls i^* mehr als einen Vorgänger hat, reicht es dennoch, diese Bedingung nur für einen Vorgänger zu überprüfen, da wenn sie für einen gilt, sie automatisch auch für die übrigen gilt. Da der minimale Abstand zwischen zwei Baustellen grösser als die maximale Länge einer Baustelle ist, reicht es aus zu überprüfen, ob die gewählte Massnahme an den Knoten in Max_i gleich $j = 0$ ist. Falls nämlich die Baustelle schon vor dem Erreichen der maximalen Länge endete, kann aufgrund des minimalen Abstandes zwischen zwei Baustellen bis zu diesem Punkt keine neue Baustelle begonnen haben.

Mindestabstand zwischen zwei Baustellen je Zeitperiode

Es bezeichne jetzt l_{Min} den minimalen Abstand zwischen zwei Baustellen. Min_i sei die

Menge der Knoten, an denen wieder eine neue Baustelle beginnen darf, wenn an i eine endet. Für jeden physikalischen Weg, der von i aus gegangen werden kann, wird der Knoten i^* gesucht, der als erster mindestens eine Entfernung zu i hat, die schon l_{\min} beträgt. Es gilt dann $i^* \in \text{Min}_i$. W_{i,i^*} ist die Menge der Knoten die auf dem Weg zwischen i und i^* liegen (exklusive i und i^*).

Die Bedingung für den minimalen Abstand sieht dann wie folgt aus

$$\forall i_p \in N \setminus (N_B \cup \{s, t\} \cup E_t^P \cup E_s^F) \quad \forall i \in E_{i_p}^F \quad \forall i' \in \text{Min}_{i_p} \quad \forall k \in \{1, \dots, 4\} \quad (41)$$

$$\left(\sum_{j \in M_i \setminus \{0\}} y_{[i_p, j, k][i, 0, k]} \right) \times |W_{i, i'}| - \sum_{i' \in W_{i, i'}} y_{[i_p, 0, k][i', 0, k]} \leq 0$$

Dabei sei i_p^* wieder der Vorgänger von i^* auf dem entsprechenden $W_{i, i'}$.

Zielfunktion

Zuletzt muss nun noch die Zielfunktion angegeben werden. Diese besteht aus der Summe aller entstehenden Kosten und Folgekosten jeweils für Strassenbetreiber, Strassennutzer und Auswirkungen auf Dritte. Diese beziehen sich einerseits auf die Massnahmen und die Verbindungskanten. Für alle Kanten im BLP werden Kosten und Folgekosten von Strassenbetreiber, -nutzer und Auswirkungen auf Dritte gemäss dem erarbeiteten Kostenmodell mit einbezogen (vgl. Kapitel 3.2.3).

Die Gesamtkosten ergeben sich dann aus den Kosten aller mit einem Fluss belegten Verbindungs- und Massnahmenkanten im Netzwerkmodell sowie den Langzeitkosten aller mit einem Fluss belegten Massnahmenkanten des erweiterten physischen Modells zu:

$$Z=C = \sum_{([i, j, k][i+1, j', k]) \in A} y_{[i, j, k][i+1, j', k]} \left(C_{[i, j, k][i+1, j', k]} \right) +$$

$$\sum_{([i', j, k][i+1, j, k]) \in A} y_{[i', j, k][i+1, j, k]} \left(C_{[i', j, k][i+1, j, k]} \right) + \quad (42)$$

$$\sum_{i' \in N} \sum_{(i'+1) \in E_{i'}^F} LC_{i'(i'+1)}$$

$$Z = C = \min!$$

Und das Ziel des Optimierungsalgorithmus ist es diesen Wert zu minimieren. Wobei bei der Ausgabe des Ergebnisses jeweils in Kosten des Strassenbetreibers und –nutzes sowie der Auswirkungen von Dritten unterschieden wird (vgl. Kapitel 3.2.3).

3.2.5 Informatikwerkzeug

Eine manuelle Lösung des in Kapitel 3.2.4 beschriebene BLP ist bei der zu erwartenden grossen Anzahl von Knoten nicht zielführend. Dafür müssen Software-Werkzeuge eingesetzt werden. Dabei existieren grundsätzlich zwei Ansätze. Zum einen kann der Algorithmus selbst programmiert und implementiert werden. Dies ermöglicht eine genaue Abstimmung auf das gegebene Problem, benötigt aber auch einen entsprechend grossen Aufwand, insbesondere wenn wirklich die Feinheiten der Problemstellung ausgenutzt werden sollen. Zum anderen kann auf einen der vielen auf dem Markt verfügbaren kommerziellen Solver zurückgegriffen werden, da dadurch der Aufwand extrem verringert wird.

Um den Aufwand gering zu halten wurde ein kommerzieller Solver zur Lösung eingesetzt. Dabei handelt es sich um das von der Firma Lindo vertriebene Excel-Plugin „What'sBest!“. Dies ermöglicht das Arbeiten in einer gewohnten Umgebung, ist leicht zu benutzen und bietet eine breite Palette an mathematischen Funktionen.

nahmen und einem Betrachtungszeitraum von zwei Jahren. Dies entspricht vier Zeitperioden von je einem halben Jahr.

Bei der Bildung des Kostenmodells werden Kosten von Strassenbetreiber und Strassenutzer berücksichtigt. Zur Ermittlung der Strassenbetreiberkosten erfolgte eine Bildung von Erhaltungsobjekten. Für jedes Erhaltungsobjekt wurden im Vorfeld Massnahmenfolgen über einen langfristigen Planungszeitraum gebildet, welche die Massnahmenkosten und Folgekosten aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung zur Verfügung stellen.

Die Strassennutzerkosten werden in Differenz zum Zustand ohne Baustelle auf der jeweiligen Autobahnstrecke gesehen. Diese entstehen zu einem grossen Teil durch Unterschiede in der Reisezeit. Die Unterschiede in der Reisezeit können auch durch Simulationen der Verkehrsumlagerung berechnet werden. Der Vorteil besteht in einer zusätzlichen Berücksichtigung der Umfahrungsrouten. Dies wurde im vorliegenden Fall nicht durchgeführt. In den folgenden zwei Beispielen wurden die Reisezeitverluste bedingt durch signalisationsbedingte Geschwindigkeitsreduktion und auftretende Stauereignisse am Anfang der Baustelle berechnet. Eine Berücksichtigung von eventuell möglichen Umfahrungsrouten erfolgte nicht.

Eine Betrachtung der Kosten infolge Auswirkungen auf Dritte ist für die Fallbeispiele in der Hinsicht nicht möglich, da keine Inputdaten (Lärm- und Schadstoffe) hinsichtlich der Bauausführung, Transport und Materialherstellung (Asphalt/Beton) bei unterschiedlichen Erhaltungsmassnahmen vorliegen. Eine Betrachtung nur in Bezug auf Verkehrsbelastung und Verkehrsbehinderungen zur Ermittlung der Kosten infolge Auswirkungen auf Dritte ist für eine Bewertung von Erhaltungsmassnahmen nicht sinnvoll. Zudem beziehen sich die relevanten Kostenkenngrössen im jetzigen Normenwerk der Kosten-Nutzen-Analysen [21] ausschliesslich auf den Neubau von Strassen. Erlauben neue Erkenntnisse eine Berücksichtigung dieser Kosten, sind sie ohne weiteres mit in das Kostenmodell integrierbar (vgl. Kapitel 3.2.3).

Nach der Bildung des Kostenmodells werden die objektbezogenen Kosten den jeweiligen Erhaltungsobjekten, d.h. den Massnahmenkanten im Netzwerkmodell für die Optimierung mit BLP, zugeordnet. Die baustellenbedingten Kosten können keiner Massnahmenkante zugeordnet werden. Diese gehören an eine Verbindungskante, welche den Anfang oder das Ende einer Baustelle darstellt. Danach erfolgt die Umwandlung in ein binäres lineares Programm BLP. Dieses ermöglicht mit Hilfe des Branch-and-Bound-Verfahrens eine effektive Lösung der Optimierungsaufgabe.

3.3.2 A2/A3 Basel Hagnau-Augst

Bildung des erweiterten physischen Modells

Im erweiterten physischen Modell werden Fahrbahnstrecken und alle Kunstbauten berücksichtigt, welche einen Einfluss auf die Verkehrsführung der Stammlinie haben. Eine Baustelle stellt eine Menge von aufeinanderfolgenden Strecken (Erhaltungsobjekt) dar, auf denen jeweils eine Massnahme durchgeführt wird. Beide Richtungsfahrbahnen werden separat als gerichtete Graphen aus Knoten und verbindenden Kanten definiert. Die Anzahl der Knoten im erweiterten physischen Modell beträgt 74. Es erfolgt eine Definition von Massnahmenkanten. Diese stellen die Erhaltungsobjekte mit Massnahmen dar. Dazwischen liegen die Verbindungskanten, um einen Wechsel von Massnahmen bei zwei benachbarten Strecken zu ermöglichen. Dies ist in Abbildung 3.75 dargestellt.

Zusätzlich erfolgte eine Definition hinsichtlich der Parallelität zur gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn, wodurch deren gegenseitiger Einfluss berücksichtigt werden kann. Dadurch wird eine Abbildung der Verkehrsführung bei der Überleitung von Fahrstreifen ermöglicht. Die real vorhandenen Mittelstreifenüberfahrten wurden als Möglichkeit der Überleitung (ÜL) im Lageplan (vgl. Abb. 3.75) kenntlich gemacht.

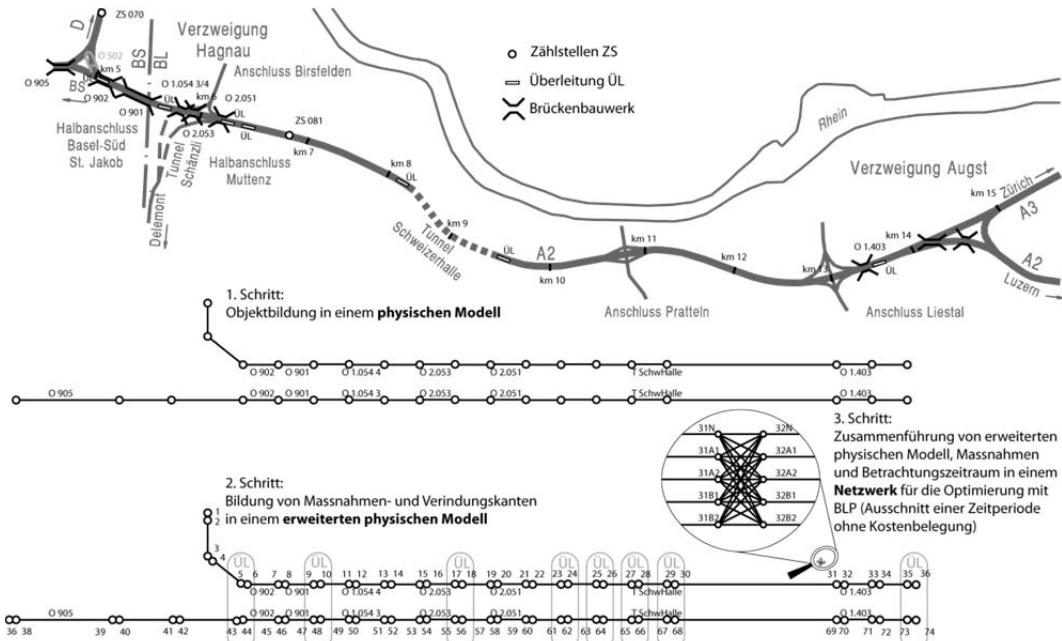


Abb. 3.75 Schrittweise Netzwerkbildung am Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst

In Abbildung 3.75 wird die Netzwerkmodellbildung vom Lageplan zum Netzwerkmodell für die Optimierung mit BLP in drei Schritten verdeutlicht.

Neben der graphischen Abbildung (vgl. Abb. 3.75) stehen Strassendaten aus den Datenbanken in Tabellenform zur Verfügung. Diese lassen sich um die notwendigen Attribute für die Daten aus dem Netzwerkmodell und Kostenmodell für die Optimierung erweitern. Die Abbildung 3.76 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der Grunddaten der Massnahmen- und Verbindungskanten, welche durch das erweiterte physische Modell abgebildet werden. Weitere Attribute der Kanten sind unter anderem auch die unterschiedlichen Kosten, gegliedert nach Strassenbetreiber und –nutzer. Bei der Knoten- bzw. Kantenummerierung wurde vereinfacht eine Zuordnung zur Kilometrierung der Nationalstrasse gewählt. Neben den Attributen der Kilometrierung von Anfangs- und Endknoten der gerichteten Kanten ist ebenfalls die Fahrtrichtung im Vergleich zur Kilometrierung für jede Kante definiert. Dies hat Bedeutung für die Flussrichtung im Netzwerkmodell. Bei einer negativen Richtung (N-) wird die Kante demnach entgegengesetzt durchlaufen. Zusätzlich werden die parallelen Kanten der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn durch den Anfangsknoten zugeordnet. Existiert eine parallele Kante kann beim Vorhandensein von Mittelstreifenüberfahrten der Verkehr auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn geleitet werden.

KantenNr	KnotenA	KnotenE	kmA	kmE	Fahrt- richtung	Verbind- ungen	Parallel	FS	Breite	Längen	Fläche inkl. SFS	DTV
Richtung Basel Stadt												
1	1	2	4.4	4.400001	N-	S			2	3.5	1E-06	0
2	2	3	4.400001	4.55	N-		2		2	3.5	0.149999	1420
3	3	4	4.55	4.550001	N-		1		2	3.5	1E-06	0
4	4	5	5.04	5.040001	N-		2		2	3.5	0.489999	4650
5	5	6	5.04	5.040001	N-		1	43	2	3.5	1E-06	0
6	6	7	5.24	5.240001	N-		2	44	3	3.5	0.199999	2600
7	7	8	5.24	5.240001	N-		1	45	3	3.5	1E-06	0
8	8	9	5.6	5.600001	N-		2	46				58389
9	9	10	5.6	5.600001	N-		1	47				58389
10	10	11	5.75	5.750001	N-		2	48				58389
11	11	12	5.75	5.750001	N-		1	49				58389
12	12	13	5.750001	5.79	N-		2	50				58389

Legendendefinitionen:

- Übergänge
- Fahrbahnstrecken

Abb. 3.76 Ausschnitt der Datensätze des Netzwerks entlang der Stammlinie am Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst

Kostenmodell

Das Kostenmodell berücksichtigt neben den Strassenbetreiberkosten für die Erhaltungsmaßnahmen auch die Strassennutzerkosten. Dabei werden folgende objektbezogene Kostengrößen als Gewichtung der Massnahmenkanten und baustellenbedingte Kostengrößen als Gewichtung der Verbindungskanten mit einbezogen (vgl. Abb. 3.77).

Abb. 3.77 Berücksichtigte Kosten im Kostenmodell des Fallbeispiels A2/A3 Basel Hagnau-Augst

Anspruchsgruppe	Kostenarten	objektbezogen	baustellenbedingt
Strassenbetreiber	Baustelleneinrichtungskosten		$C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{Setup}$
	Massnahmenkosten (inkl. Verkehrsführungskosten $C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{TC}$)	$C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{Int}$	
	Folgekosten der Massnahmen	$LC_{[i,j][i+1,j]}^{Int}$	
Strassennutzer	Folgekosten durch Massnahmen	$\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{TT+VOC+ac}$	
	Zusätzliche Reisezeitkosten infolge der signalisierten Geschwindigkeit	$\Delta C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{TT,v}$	
	Zusätzliche Unfallkosten infolge der Massnahmen	$\Delta C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{ac}$	
	Zusätzliche Reisezeitkosten durch Staubildung am Baustellenanfang		$\Delta C_{[i,0,k][i+1,j',k]}^{TT,con}$
	Zus. zeit- und treibstoffverbrauchsabhängige Fahrzeugbetriebskosten durch Staubildung am Baustellenanfang		$\Delta C_{[i,0,k][i+1,j',k]}^{VOC,con}$

Vorgehen bei der Ermittlung der Massnahmenfolgen

Für das folgende Beispiel lagen weder Zustandsdaten noch Daten aus der teilsystembezogene Erhaltungsplanung vor. Aus diesem Grund wurde aufbauend auf fiktiven Annahmen eine Zustandsbewertung und teilsystembezogene Erhaltungsplanung über einen Zeitraum von 20 Jahren durchgeführt.

Es wurde sehr vereinfacht vorgegangen, um die notwendigen Kostendaten zu ermitteln. Dabei erfolgte die Bildung von drei typisierten Erhaltungsmaßnahmen aufgrund eines einzigen Gesamtindex I_x der Fahrbahnoberfläche. Für die Erhaltungsobjekte der Kunstbauten (KB), welche den Verkehr auf der Stammlinie direkt beeinflussen, wurden ebenfalls Annahmen für eine teilsystembezogene Erhaltungsplanung getroffen.

Vereinfacht wurde angenommen, dass bei den vorhandenen Kunstbauten innerhalb der Jahre 2006-2011 eine Instandsetzungsmassnahme durchgeführt werden muss. Werden diese Massnahmen nicht im Betrachtungszeitraum der Baustellenplanung durchgeführt, sind die Erhaltungsmaßnahmen an Kunstbauten einzeln durchzuführen. Das heisst, jede Kunstbaute verursacht dann separat als definiertes abgeschlossenes Massnahmenereignis neben Strassenbetreiber- auch Strassennutzerkosten. In Abbildung 3.78 sind die Datensätze der Massnahmenkanten in beiden Richtungen zusammengestellt. Verbindungskanten spielen für die teilsystembezogene Erhaltungsplanung keine Rolle. Jede Massnahmenkante ist mit Kilometrierung, Länge und Breite angeben. Es existieren u.a. Informationen hinsichtlich der Teilsystemzugehörigkeit zu Fahrbahnen (KB: nein) bzw. Kunstbauten (KB: ja), der Anzahl Fahrstreifen (FS), des durchschnittlich täglicher Verkehrs (DTV) und des Zustandsindex I_x .

Der Input aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung sind Massnahmenfolgen aus typisierten Erhaltungsmaßnahmen jeweils für jedes Erhaltungsobjekt. Dies sollte für jedes Erhaltungsobjekt getrennt nach Teilsystem separat für einen einheitlichen Betrachtungszeitraum von mindestens 20 bis zu 50 Jahren vorliegen. Diese Massnahmenfolgen bilden die Grundlage zur Berechnung der Massnahmenkosten im Betrachtungszeitraum der Baustellenplanung und ermöglichen die Ermittlung der jeweiligen Folgekosten aus den Folgemaassnahmen.

K.- Nr.	von km	nach km	Länge [km]	Breite [m]	KB	FS	DTV	I _x	K.- Nr.	von km	nach km	Länge [km]	Breite [m]	KB	FS	DTV	I _x
keine parallele Richtungsfahrbahnen (eine Verkehrsüberführung über Mittelstreifenüberfahrten ist nicht möglich)																	
									36	4.4	4.6	0.150	9.5	ja	2	12900	2.9
2	4.4	4.6	0.150	9.5	nein	2	49000	2.5	38	4.6	4.8	0.250	9.5	nein	2	12900	2.4
4	4.6	5.0	0.490	9.5	nein	2	39000	4.7	40	4.8	5.0	0.240	9.5	nein	2	65000	2.4
parallele Richtungsfahrbahnen (eine Verkehrsüberführung über Mittelstreifenüberfahrten ist möglich)																	
6	5.0	5.2	0.200	13.0	ja	3	65000	4.6	42	5.0	5.2	0.200	13.0	ja	3	65000	4.6
8	5.2	5.6	0.360	13.0	ja	3	65000	4.8	44	5.2	5.6	0.360	13.0	ja	3	65000	4.7
10	5.6	5.8	0.150	13.0	nein	3	65000	4.5	46	5.6	5.8	0.150	13.0	nein	3	65000	4.6
12	5.8	5.8	0.040	13.0	ja	3	65000	4.8	48	5.8	5.8	0.040	13.0	ja	3	65000	2.4
14	5.8	5.9	0.080	13.0	nein	3	65000	4.7	50	5.8	5.9	0.080	13.0	nein	3	65000	4.5
16	5.9	5.9	0.030	13.0	ja	3	65000	4.8	52	5.9	5.9	0.030	13.0	ja	3	65000	4.8
18	5.9	6.2	0.250	13.0	nein	3	65000	4.3	54	5.9	6.2	0.250	13.0	nein	3	65000	4.7
20	6.2	6.2	0.020	13.0	ja	3	65000	4.7	56	6.2	6.2	0.020	13.0	ja	3	65000	4.8
22	6.2	7.2	0.990	13.0	nein	3	65000	4.8	58	6.2	7.2	0.990	13.0	nein	3	65000	4.3
24	7.2	7.2	0.070	13.0	nein	3	65000	2.7	60	7.2	7.2	0.070	13.0	nein	3	65000	4.7
26	7.2	8.3	1.050	13.0	nein	3	65000	4.7	62	7.2	8.3	1.050	13.0	nein	3	65000	4.8
28	8.3	9.6	1.330	13.0	ja	3	65000	4.8	64	8.3	9.6	1.330	13.0	ja	3	65000	4.8
30	9.6	13.2	3.620	13.0	nein	3	65000	3.7	66	9.6	13.2	3.620	13.0	nein	3	65000	4.7
32	13.2	13.3	0.090	13.0	ja	3	65000	4.8	68	13.2	13.3	0.090	13.0	ja	3	65000	4.9
34	13.3	14.0	0.680	13.0	nein	3	65000	4.2	70	13.3	14.0	0.680	13.0	nein	3	65000	2.4

Abb. 3.78 Vereinfacht definierte Zustandsdaten für die betrachteten Massnahmenkanten zur Festlegung von Massnahmenstrategien am Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst

Für das Fallbeispiel wurden aufgrund eines angenommenen Zustands der Fahrbahnoberfläche (vgl. Abb. 3.78) Massnahmen und Folgemassnahmen gebildet. An den Objekten der Kunstbauten erfolgte dies ebenfalls aufgrund des Zustands der Fahrbahnoberfläche unter zusätzlicher Berücksichtigung einer definiert notwendigen Massnahmen an Kunstbauten zwischen 2006 und 2011 (vgl. folgende Massnahmendefinition). In der Praxis sollte für das Teilsystem Kunstbauten oder jedes weitere zu berücksichtigende Teilsystem eine separate teilsystembezogene Erhaltungsplanung durchgeführt werden. Dies führt bei den Kunstbautenobjekten ebenfalls zu Massnahmenfolgen, welche die Ermittlung der Massnahmen- und Folgekosten ermöglichen.

Die vereinfachte Ermittlung der Massnahmenfolgen im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst wird im Folgenden kurz aufgezeigt:

- Bildung von Erhaltungsobjekten anhand des erweiterten physischen Modells unter der Berücksichtigung der vorhandenen Brücken, Tunnel, Mittelstreifenüberfahrten und zwischenliegenden Fahrbahnstrecken,
- Annahme von Daten eines fiktiven Gesamtindex I_x der Fahrbahnoberfläche,
- Annahme eines Verfallsmodells des fiktiven Gesamtindex I_x für die Fahrbahnoberfläche ohne separates Verfallsmodell der Kunstbauten,
- Definition von drei typisierten Erhaltungsmassnahmen des Trassees, welche als initiale Erhaltungsmassnahmen mit den unterschiedlichen Massnahmen der Verkehrsüberführung im Netzmodell korrespondieren,
- Definition von jeweiligen Eingreifgrenzen, Rücksetzwerten und Kosten der typisierten Erhaltungsmassnahmen des Trassees,
- Definition von Randbedingungen zur Erzeugung von Massnahmenfolgen über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren (2006-2025) eines jeden Erhaltungsobjekts z.B.:
 - Initiale Erhaltungsmassnahme im Jahr 2006 der jeweiligen Massnahmenfolge am Erhaltungsobjekt,
 - Darauf folgende Erhaltungsmassnahmen frühestens erst nach weiteren 10 Jahren analog der zeitliche UPlaN S Vorgaben,
 - Variante „Nichtstun“ hat keine Massnahmen im Betrachtungszeitraum der Baustellenplanung an den jeweiligen Erhaltungsobjekten, verursacht jedoch Folgekosten durch zustandsbedingten betrieblichen Unterhalt
- Aufstellung von Massnahmenfolgen für unterschiedliche Varianten je typisierte Erhaltungsmassnahme und Erhaltungsobjekt für das Teilsystem Trassee

- Evaluation auf der Grundlage eines Nutzen-Kosten-Verhältnisses, wobei der Nutzen als Funktion des Zustands und der DTV berücksichtigt wird
- Aufstellen von vier unterschiedlichen Massnahmenfolgen (korrespondierend mit N, A1, A2, B1/B2) separat gebildet für jedes Erhaltungsobjekt aus drei typisierten Erhaltungsmaßnahmen zu unterschiedlicher Zeit über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren (2006-2025) unter Einbezug von Massnahmen an den Kunstbauten

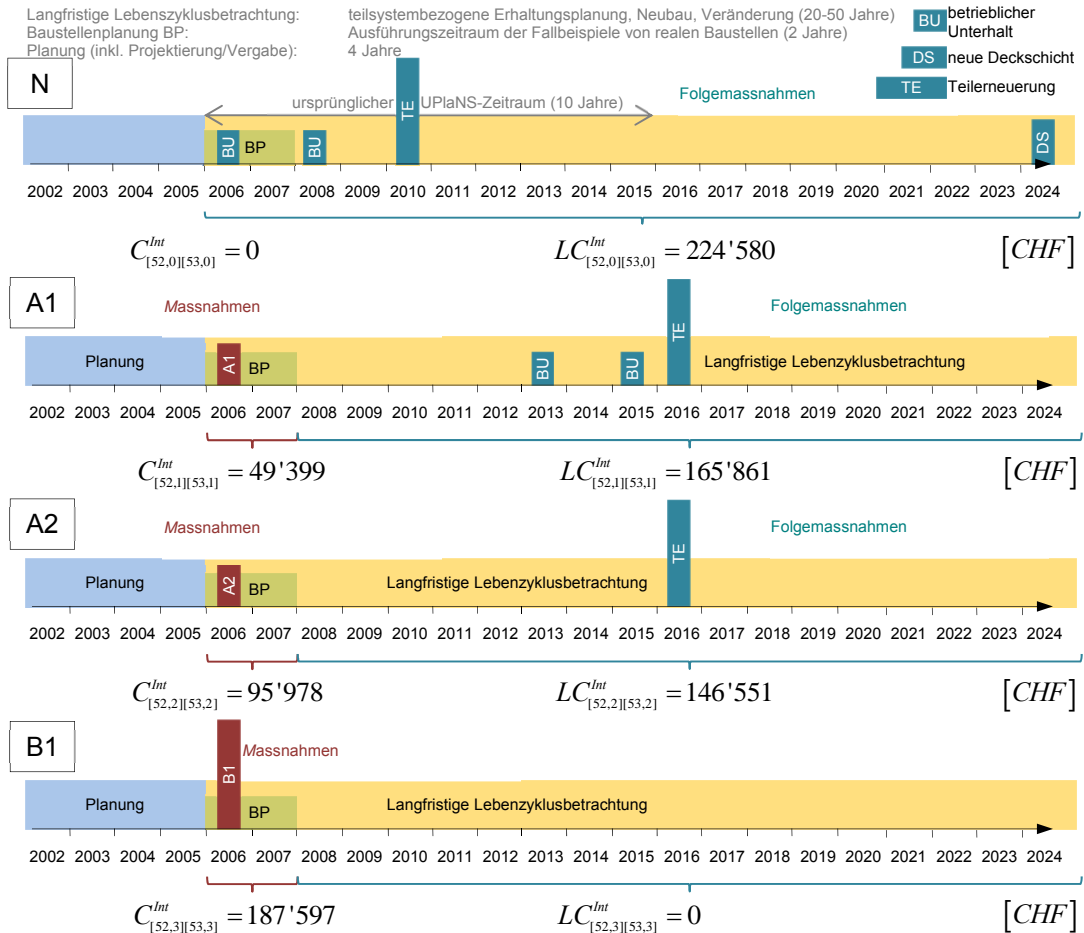


Abb. 3.79 Zeitstrahl mit der an der Massnahmenkante (52,53) berücksichtigten Massnahmenfolgen bei N, A1, A2, B1 und daraus resultierenden Massnahmenkosten $C_{[52,j][53,j]}^{Int}$ und Folgekosten $LC_{[52,j][53,j]}^{Int}$ für den Strassenbetreiber

Das aufgezeigte Vorgehen führt zu jeweiligen Massnahmenfolgen je Erhaltungsobjekt der Fahrbahnstrecken bzw. Kunstbauten. Für eine Massnahmenkante vom Knoten 52 zum Knoten 53 wurden die vier Massnahmen in Abbildung 3.79 mit der dazugehörigen Massnahmenfolge sowie objektbezogener Massnahmen- und Langzeitkosten dargestellt. Die objektbezogenen Massnahmenkosten enthalten die jeweiligen Verkehrsführungskosten bereits, da nur objektbezogene Verkehrsführungskosten berücksichtigt wurden.

Definition der Massnahmen unter Einbezug der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung

Die einzelnen Massnahmenfolgen mit einer Erläuterung der Zuordnung zu den Massnahmen der Verkehrsführung werden folgend beschrieben. Diese Definition ist Grundlage für die teilsystembezogene Erhaltungsplanung und für die Baustellenplanung auf Gesamtsystemebene. Bei der Beschreibung werden auch fiktive Annahmen mit Auswirkungen auf den Strassennutzer begründet. Die folgend beschriebenen Massnahmen werden im Netzwerk jeweils auf einer Massnahmenkante ausgeführt. Diese Massnahmenkanten

stellen in der Regel die Erhaltungsobjekte der teilsystembezogene Erhaltungsplanung dar. Eine Übernahme der Kosten für die Baustellenplanung ist deshalb ohne grosse Anpassungen möglich. Im Netzwerkmodell werden u.a. zusätzlich die Mittelstreifenüberfahrten als örtliche Randbedingungen mit einbezogen. Wurden die Erhaltungsobjekte im Netzwerk aufgrund der örtlichen Randbedingungen unterteilt, müssen die Kosten in Abhängigkeit der Länge oder Fläche auf die im Netzwerkmodell vorhandenen Massnahmenkanten angepasst werden.

Massnahme N, $j = 0$ (Nichtstun)

In den Jahren 2006-2009 findet keine Massnahme statt. Auf den Massnahmenkanten mit einem Gesamtindex der Fahrbahnoberfläche von $I_x \geq 4$ muss aus Sicht der Verkehrssicherheit eine Reduktion der signalisierten Geschwindigkeit von $v_{\text{Signal}}=120$ km/h auf $v_{\text{Signal}}=100$ km/h erfolgen und zusätzlich eine Sofortmassnahme im Rahmen des betrieblichen Unterhalts jedes zweite Jahr durchgeführt werden. Diese dauert maximal zwei Tage (Tagesbaustelle), ist begrenzt auf die jeweilige Strecke und begleitet von einem Fahrstreifenabbau von drei auf zwei Fahrstreifen für die Dauer der Tagesbaustelle. Dadurch entstehen in Spitzenstunden zusätzliche Stauzeiten, welche Berücksichtigung finden. Gleichzeitig erhöht sich auch das Unfallaufkommen (Umfang und Schwere) im Verhältnis 1:10 im Vergleich zu Autobahnstrecken ohne Baustellen. Es ist bekannt, dass Tagesbaustellen ein erhöhtes Risiko darstellen. Diese Annahme wurde jedoch künstlich sehr überhöht, um einen spürbaren Effekt bei den Unfallkosten zu erzielen. Dies ist für die Praxis zu hinterfragen. Eine umfassende Erhaltungsmassnahme wird erst 2010 stattfinden. In diesem Zusammenhang erfolgt auch die Massnahme an der Struktur der Kunstbauten und der Entwässerung.

Massnahme A1, $j = 1$ (kleine unabhängige Massnahme)

In den Jahren 2006/2007 findet eine Erneuerung der Deckschicht statt. Diese Massnahme dauert 40 Tage und ist nur auf den Fahrbahnoberbau beschränkt. Durch die Baustelle erhöht sich das Unfallaufkommen (Umfang und Schwere) im Verhältnis 1:3 im Vergleich zu Autobahnstrecken ohne Baustellen. Die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn ist dabei unabhängig und wird nicht mit in die Betrachtung mit einbezogen, deshalb ist die Breite der Fahrstreifen im Rahmen der temporären Verkehrsführung gegenüber den anderen Massnahmen eingeengt. Dies führt zu einer zusätzlichen Verminderung der Leistungsfähigkeit im Baustellenbereich im Gegensatz zum den anderen Massnahmen.

Die Erhaltungsmassnahme an der Struktur der Kunstbauten wird nicht durchgeführt. Diese muss innerhalb der darauffolgenden 5 Jahre separat an jeder Kunstbaute durchgeführt werden. Dadurch entstehen an jeder einzelnen Kunstbaute in Spitzenstunden zusätzliche Stauzeiten, welche Berücksichtigung finden. Da diese Massnahme substanziell nicht umfassend genug für den Strassenoberbau ist, muss nach 10 Jahren eine grosse Fahrbahnerhaltungsmassnahme durchgeführt werden. Dabei wird zusätzlich die Entwässerung erneuert.

Fällt der Zustand des Gesamtindex der Fahrbahnoberfläche in den Massnahmenkanten in ein kritisches Niveau von $I_x \geq 4$ muss aus Sicht der Verkehrssicherheit eine Reduktion der signalisierten Geschwindigkeit von $v_{\text{Signal}}=120$ km/h auf $v_{\text{Signal}}=100$ km/h erfolgen und zusätzlich eine Sofortmassnahme im Rahmen des betrieblichen Unterhalts jedes zweite Jahr durchgeführt werden. Diese dauert maximal zwei Tage (Tagesbaustelle), ist begrenzt auf die jeweilige Strecke und begleitet von einem Fahrstreifenabbau von drei auf zwei Fahrstreifen für die Dauer der Tagesbaustelle. Dadurch entstehen in Spitzenstunden zusätzliche Stauzeiten, welche Berücksichtigung finden. Gleichzeitig erhöht sich auch das Unfallaufkommen (Umfang und Schwere) im Verhältnis 1:10 im Vergleich zu Autobahnstrecken ohne Baustellen. Es ist bekannt, dass Tagesbaustellen ein erhöhtes Risiko darstellen. Diese Annahme wurde jedoch künstlich sehr überhöht, um einen spürbaren Effekt bei den Unfallkosten zu erzielen. Dies ist für die Praxis zu hinterfragen.

Massnahme A2, $j = 2$ (kleine abhängige Massnahme):

In den Jahren 2006/2007 findet eine Erneuerung der Deck- und Binderschicht statt. Diese Massnahme dauert 120 Tage und ist analog zu Massnahme A1 nur auf den Fahrbahnoberbau beschränkt. Durch die Baustelle erhöht sich das Unfallaufkommen (Umfang und

Schwere) im Verhältnis 1:3 im Vergleich zu Autobahnstrecken ohne Baustellen. Die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn ist dabei ebenfalls von einer Massnahme M2 betroffen. Beide werden im Zeitraum dieser 120 Tage realisiert.

Die Erhaltungsmassnahme an der Struktur der Kunstbauten wird nicht durchgeführt. Diese muss innerhalb der darauffolgenden 5 Jahre separat in jeder Kunstbaute durchgeführt werden. Dadurch entstehen an jeder einzelnen Kunstbaute in Spitzenstunden zusätzliche Stauzeiten, welche Berücksichtigung finden. Da diese Massnahme substanziell nicht umfassend genug für den Strassenoberbau ist, muss nach 10 Jahren eine grosse Fahrbahnerhaltungsmassnahme durchgeführt werden. Dabei wird zusätzlich die Entwässerung erneuert.

Massnahme B1, $j = 3$ (grosse abhängige Massnahme) mit Auswirkung auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn Massnahme B2, $j = 4$

In den Jahren 2006/2007 findet eine Erneuerung der gebundenen Schichten statt. Diese Massnahme dauert 210 Tage und umfasst neben dem Fahrbahnoberbau auch die Struktur der Kunstbauten sowie die Entwässerung. Die Massnahmen B1 ist somit die einzige Massnahme bei der zusätzlich die Kunstbauten und Entwässerung während der Baustelle instandgesetzt werden.

Durch die Baustelle erhöht sich das Unfallaufkommen (Umfang und Schwere) im Verhältnis 1:3 im Vergleich zu Autobahnstrecken ohne Baustellen. Im Betrachtungszeitraum findet keine nächste Massnahme mehr statt. Die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn erfährt durch die Verkehrsführung eine Massnahme B2 und ist somit durch Auswirkungen von B1 betroffen. Bei dieser Massnahme findet keine bauliche Tätigkeit auf den betroffenen Teilstrecken statt. Sie dient nur der Verkehrsführung während der Massnahme B1 auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn. In diesem Zeitraum kann dadurch keine andere Massnahme auf den Strecken mit B2 durchgeführt werden. Die Massnahmen sind in Abbildung 3.80 nochmals zusammengefasst und schematisch dargestellt.

Abb. 3.80 Definition der Modellmassnahmen für die Bildung von Baustellen an Autobahnen im Fallbeispiel A2 Basel Hagnau-Augst




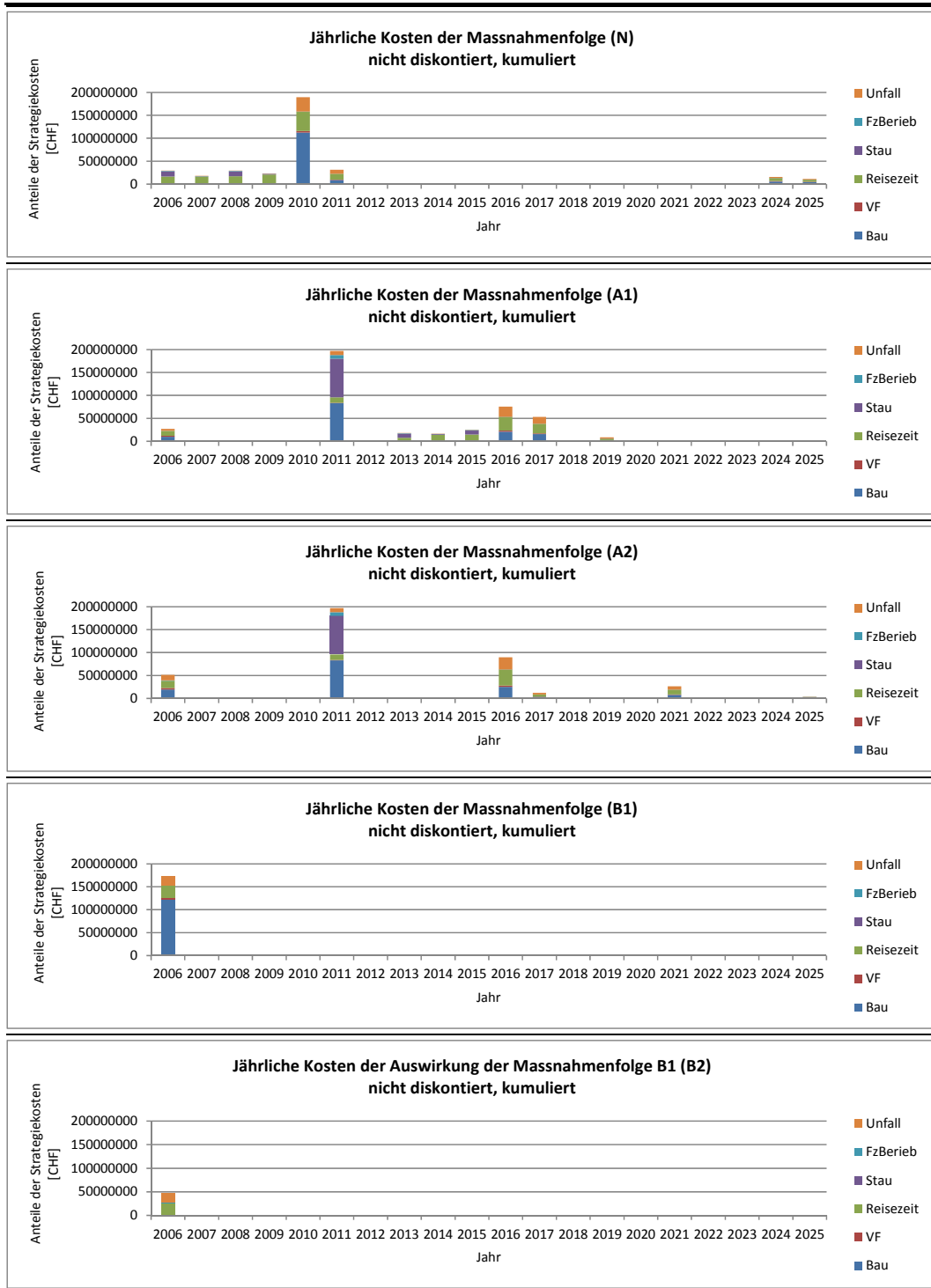
Nr	Massnahme	Parallele Richtungsfahrbahn	weitere Perioden	Dauer in Perioden	Randbedingungen	Geschwindigkeitsniveau
N	Nichts tun	N oder A1	N A1 A2 B1 B2	1	Reduktion v_{signal} und betr. Unterhalt bei $I_G \geq 4$	 mIV: $v_m=115.2$ km/h SV: $v_m=96.4$ km/h  mIV: $v_m=94.4$ km/h SV: $v_m=84.6$ km/h
A1	Kleine unabhängige Massnahme	N oder A1	N B2	1	erste Massnahme Ersatz Deckschicht, keine Kunstbauten	
A2	Kleine abhängige Massnahme	A2	N	1	erste Massnahme Ersatz Deck-/Binderschicht, keine Kunstbauten	 mIV: $v_m=78.9$ km/h SV: $v_m=78.9$ km/h
B1	Grosse Massnahme	B1	N B2	2	erste Massnahme Ersatz der geb. Schichten, mit Kunstbauten	
B2	Auswirkung von B2	B2	N A1 B1	2		

Abb. 3.81 Jährliche Kosten der Massnahmenfolgen über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren für die Bildung von Baustellen an Autobahnen am Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst



Kosten aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung

Eine Übersicht über die in jedem Jahr des Betrachtungszeitraums anfallenden, d.h. nicht diskontierten Kostenkenngrößen für das Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst gibt die Abbildung 3.81. Dargestellt sind die jährlichen Kosten über den Betrachtungszeitraum der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung von 20 Jahren. Diese Kosten entstehen, wenn im Jahr 2006 an allen Erhaltungsobjekten die gleiche initiale Erhaltungsmassnahme durchgeführt wird. Die Folgemassnahmen sind individuell für jedes einzelne Erhaltungsobjekt

in Abhängigkeit des jeweiligen Zustands und unter der Berücksichtigung der in den folgenden Abschnitten definierten Randbedingungen für jede Massnahme.

Das Ergebnis aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung sind vier Massnahmenfolgen mit Massnahmenkosten und Folgekosten je Erhaltungsobjekt als Grundlage für das Kostenmodell. Als Massnahmenjahr der initialen Erhaltungsmaßnahmen gilt das Jahr 2006. Diese stellen auszuführende Massnahme im Betrachtungszeitraum der Baustellenplanung dar. Bei der Durchführung einer Baustelle wird grundsätzlich von einer baustellenbedingte Reduktion der signalisierten Geschwindigkeit von $v_{\text{Signal}}=120$ km/h auf $v_{\text{Signal}}=80$ km/h während der Ausführungsdauer ausgegangen.

Hinsichtlich der hinausgeschobenen Brückeninstandsetzungen bei Massnahme A1 und A2 wurden diese auf den letztmöglichen Termin nach 5 Jahr geschoben. In der Realität werden die Kunstbauten, wenn auf ihnen Erhaltungsmaßnahmen unabhängig durchgeführt werden, nicht alle im gleichen Jahr instandgesetzt. Die Massnahmen werden natürlich über die definierten fünf Jahre verteilt durchgeführt. Damit jedoch keine ungewollten Kostenschwankungen bei verschiedenen Strecken durch unterschiedliche Ausführungszeitpunkte mit Auswirkung auf die Diskontierung der Einzelmassnahmen entstehen, wurde der günstigste Fall und damit der späteste Ausführungszeitpunkt angenommen. Die Massnahmen- und Langzeitkosten sind kumuliert in Abbildung 3.82 dargestellt.

Diese jährlichen Kosten führen durch eine Unterscheidung zu Massnahmenkosten im Jahr 2006 und Folgekosten in den Folgejahren. Dabei wird für die Massnahmen „Nichtstun“ definiert, dass Kosten für den betrieblichen Unterhalt im Jahr 2006 ebenfalls als Konsequenz in die Langzeitkosten fliessen. Massnahmen- und Folgekosten aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung sind in Abbildung 3.82 dargestellt.

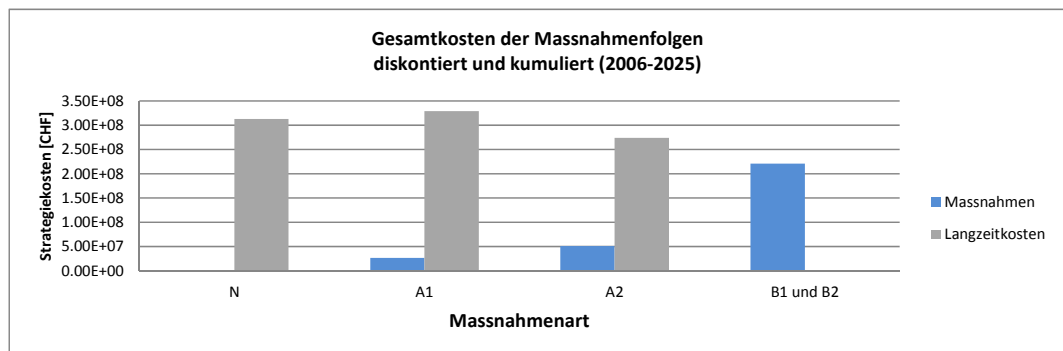


Abb. 3.82 Kummulierte Gesamtkosten der Massnahmenfolgen aller Erhaltungsobjekte getrennt nach Massnahmen- und Langzeitkosten im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst über den Betrachtungszeitraum der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung

Die folgenden Abbildung 3.83 gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen Kostenanteile der kumulierten Gesamtkosten je Massnahmenfolge über alle Erhaltungsobjekte. Diese wurden aus den Massnahmenfolgen abgeleitet und enthalten noch nicht die baustellenbedingten Kosten. Die Staukosten aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung entstehen durch Folgemaassnahmen in Form von Tagesbaustellen des betrieblichen Unterhalts und Einzelmassnahmen an den Kunstbauten (Strategien A1 und A2).

Die Gesamtkosten (Massnahmen- und Folgekosten) der vier Massnahmenfolgen über alle Erhaltungsobjekte aus Abbildung 3.83 werden in Abbildung 3.84 für Strassenbetreiber und Strassennutzer gezeigt. Diese ergeben sich wiederum durch eine Summierung der Massnahmenfolgen mit gleicher initialer Erhaltungsmaßnahme über alle Erhaltungsobjekte. Damit wird angenommen, dass eine jeweilige initiale Erhaltungsmaßnahme im Jahr 2006 über den gesamten betrachteten Autobahnabschnitt durchgeführt wird.

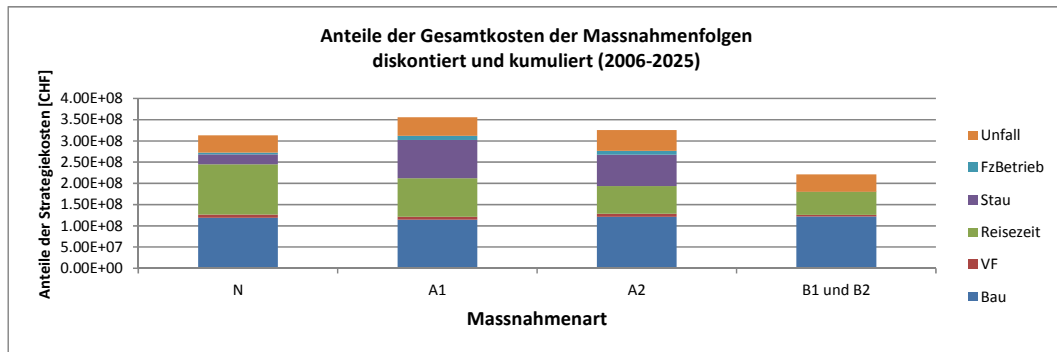


Abb. 3.83 Höhe und Anteile der kumulierten Gesamtkosten der Massnahmenfolgen aller Erhaltungsobjekte im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst über den Betrachtungszeitraum der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung

Auf jedem Erhaltungsobjekt existiert in den Folgejahren eine individuelle Anordnung der typisierten Erhaltungsmassnahmen unter Berücksichtigung der jeweiligen Massnahmendefinition (N, A1, A2, B1/B2). Es fällt auf dass die Strassenbetreiberkosten über den Betrachtungszeitraum bei den vier Massnahmenfolgen doch recht ähnlich liegen. Die Strassennutzerkosten zeigen dagegen grosse Unterschiede in den Massnahmenfolgen auf (vgl. Abb. 3.84).

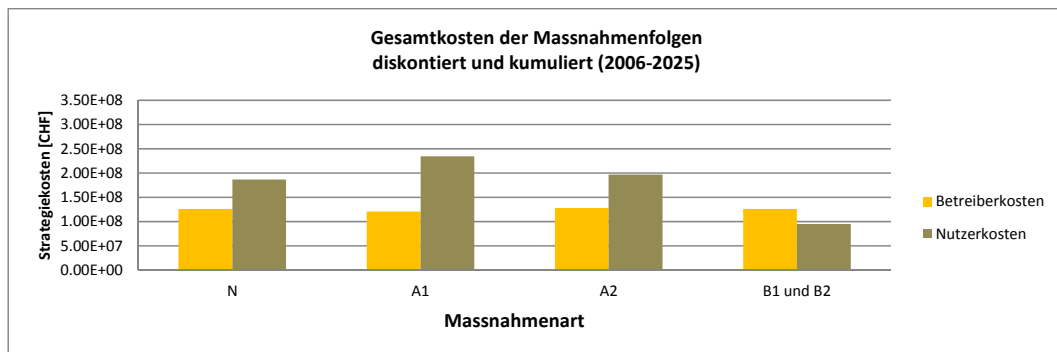


Abb. 3.84 Kumulierte Gesamtkosten der Massnahmenfolgen aller Erhaltungsobjekte getrennt nach Strassenbetreiber und -nutzer im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst über den Betrachtungszeitraum der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung

Kostenermittlung Strassenbetreiberkosten

Kosten, die dem Strassenbetreiber durch die Erhaltungsmassnahme entstehen, beinhalten die Baustelleneinrichtungs-, Bau- sowie die Verkehrsführungskosten. Bei der Kalkulation der Baukosten erfolgte eine Unterscheidung in Fahrbahnstrecken auf einer Strassenoberbaukonstruktion im Gelände mit Entwässerung und Fahrbahnstrecken auf Brücken bzw. in Tunneln. Dabei sind die Massnahmenkosten für die Fahrbahnen und Kunstbauten flächenabhängig und jene für die Entwässerungsleitungen längenabhängig. Vereinfachend wurden für alle Kunstbauten, d.h. Brücken und Tunnel, die gleichen Einheitskosten angesetzt. In der Praxis sind die Kosten für Tunnelinstandsetzungen höher und zum Teil sind Tunnelmassnahmen auch viel zeitintensiver als Brückenmassnahmen. Die vereinfachten Kostenansätze, wie sie für die Beispielrechnungen verwendet wurden, sind in der folgenden Abbildung 3.85 aufgeführt. Sie beruhen zum Teil auf Angaben aus den Kostenerhebung an zwei Baustellen. Für die Praxis müssen die Kostenansätze grundlegend überprüft werden. Dabei sollten mehrere Projekte nicht nur in Massnahmenart sondern auch in Bezug auf ihre Baustellenlänge analysiert werden.

Abb. 3.85 Kostenansätze für Strassenbetreiberkosten der Modellmassnahmen für die Bildung von Baustellen an Autobahnen

Nr	Massnahme	Fahrbahnen [CHF m ²]	Kunstabauten [CHF m ²]	Werkleitungen [CHF m]	Baustelleneinrichtung [CHF]	Verkehrsführung [CHF km·d]	[CHF km]
N	Nichts tun	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A1	Kleine unabhängige Massnahme	40.00	0.00	0.00	2'000'000.00	750.00	20'000.00
A2	Kleine abhängige Massnahme	80.00	0.00	0.00	3'000'000.00	750.00	40'000.00
B1	Grosse Massnahme	140.00	1500.00	300.00	3'250'000.00	750.00	67'500.00
B2	Auswirkung von B1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Baustelleneinrichtungskosten (Betreiber)

Die Baustelleneinrichtungskosten sind baustellenbedingte Kosten und fallen unabhängig von der Anzahl der Erhaltungsobjekte an. Diese belegen im Normalfall die Verbindungskanten $[i, 0, k][i+1, j', k]$. Diese wird jeweils immer auf beiden Richtungsfahrbahnen ausgeführt. Aus diesem Grund erfolgt eine Aufteilung der Baustelleneinrichtungskosten bei einer Massnahme $j=2$ (A2) auf beide Richtungsfahrbahnen. Ähnlich wird bei einer Massnahme $j=3$ (B1) vorgegangen. Hier erfolgt die Aufteilung auf Massnahme $j=3$ (B1) und Massnahme $j=4$ (B2) und jeweils zusätzlich auf die Zeitperioden. Damit ergeben sich die Baustelleneinrichtungskosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{Setup}$ beispielhaft für eine Massnahme $j=3$ (B1) der Strecke vom Knoten $i=52$ zum Knoten $i+1=53$ wie auch bei der zugehörigen Strecke vom Knoten $i=(-)14$ zum Knoten $i+1=(-)13$, d.h. hier ist die Flussrichtung entgegengesetzt zur Knotennummerierung, mit der Massnahmen $j=4$ (B2) zu

$$C_{[i,0,k][i+1,j',k]}^{Setup} = \frac{C_j^{Setup}}{M_j \cdot p_j}$$

$$C_{[51,0,k][52,3,k]}^{Setup} = C_{[14,4,k][13,0,k]}^{Setup} = \frac{3'250'000.00 \text{ CHF}}{2 \cdot 2}$$

$$= 812'500.00 \text{ CHF}$$

Massnahmenkosten (Betreiber)

Bei einer Massnahme N (Nichtstun) wird keine Bautätigkeit durchgeführt und damit entstehen keine Baukosten. Bei den Massnahmen A1 (kleine unabhängige Massnahme) und A2 (kleine abhängige Massnahme) fallen nur Kosten infolge der Arbeit an den Deck- oder Binderschichten der Fahrbahnstrecken an. Bei einer Massnahme B1 entstehen Kosten durch die Arbeiten an den gebundenen Schichten und der Entwässerungsleitungen. Befindet sich die Fahrbahnstrecke auf einer Brücke bzw. in einem Tunnel, werden die Einheitskosten für Fahrbahnen und Kunstbauten hier als Summe berücksichtigt. In dem Fall entstehen keine separaten Kosten für die Entwässerungsleitungen, da diese bereits in den Kosten für die Kunstbauten integriert sind. Damit ergeben sich die Baukosten $C_{[i,j][i+1,j]}^{Int}$ beispielhaft für eine Massnahme $j=3$ (B1) der Strecke vom Knoten $i=52$ zum Knoten $i+1=53$ bei einer Kantenlänge $l_{(52,53)} = 0.080 \text{ km}$ nach Gleichung (35) zu

$$C_{[i,j][i+1,j]}^{Int} = \sum c_{j,o}^{Int,j} \cdot l_{(i,i+1)} + \sum c_{j,p}^{Int,A} \cdot l_{(i,i+1)} \cdot b_{(i,i+1)} + \sum c_{j,q}^{Int,indp}$$

$$C_{[52,3][53,3]}^{Int} = 300 \cdot 80 + 140 \cdot 80 \cdot 13 + 0$$

$$= 169'600.00 \text{ CHF}$$

Diese Kosten beziehen sich auf die Massnahme $j=3$ (B1) mit einer Dauer von zwei Zeitperioden (1 Jahr). Es muss somit noch eine Aufteilung auf eine Zeitperiode k nach

Gleichung (35) stattfinden.

$$C_{[i,j][i+1,j,k]}^{Int} = \frac{C_{[i,j][i+1,j]}^{Int}}{P_j}$$

$$C_{[52,3,k][53,3,k]}^{Int} = \frac{169'600.00}{2}$$

$$= 84'800.00 CHF$$

Verkehrsführungskosten (Betreiber)

Bei den Kosten der Verkehrsführung erfolgt eine Berücksichtigung von Einrichtungskosten und Unterhaltskosten, die der Verkehrsführung zugeordnet werden können. Dabei sind die Einrichtungskosten längenabhängig und die Unterhaltskosten längen- und zeitabhängig. Die Einrichtungskosten sind stark abhängig in welchem Ausmass die gegenüberliegende Strecke der entgegengesetzten Richtungsfahrbahn mit betroffen ist. Am grössten werden diese, wenn Verkehrsüberleitungen analog der Massnahmen B1 mit ihrer Auswirkung B2 vorhanden sind. Die Verkehrsführungskosten berechnen sich analog der Baukosten für die Kante [52,3][53,3] nach Gleichung (35) zu

$$C_{[i,j][i+1,j]}^{TC} = c_j^{TC} \cdot l_{(i,j+1)} + c_j^{TC,1} \cdot l_{(i,j+1)} \cdot \Delta t + C_{[i,j][i+1,j]}^{TC,add}$$

$$C_{[52,3][53,3]}^{TC} = 67500 \cdot 0.080 + 750 \cdot 0.080 \cdot 410 + 0$$

$$= 18'000.00 CHF$$

Diese Kosten beziehen sich ebenfalls auf die Massnahme $j = 3$ (B1) mit einer Dauer von zwei Zeitperioden (1 Jahr). Es muss somit noch eine Aufteilung auf eine Zeitperiode k nach Gleichung (35) stattfinden.

$$C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{TC} = \frac{C_{[i,j][i+1,j]}^{TC}}{P_j}$$

$$C_{[52,3,k][53,3,k]}^{TC} = \frac{18'000.00}{2}$$

$$= 9'000.00 CHF$$

Strassennutzerkosten

Zusätzliche Strassennutzerkosten infolge der Baustelle entstehen grundsätzlich durch zusätzliche Reisezeit, Fahrzeugbetrieb und Unfälle im Vergleich ohne Baustelle (vgl. Kapitel 3.2.3). Im Rahmen der Fallbeispiele wurde keine makroskopische Verkehrssimulation durchgeführt. Somit fehlen Kostenkenngrössen, welche durch eine Berücksichtigung der Umfahrungsrouten berechnet werden können. Dies sind zusätzliche Reisezeit-, Fahrzeugbetriebs- und Unfallkosten auf den Umfahrungsrouten. Die Strassennutzerkosten beziehen sich somit nur auf die zusätzlichen Strassennutzerkosten im Baustellenbereich unter Vernachlässigung der Umfahrungsrouten.

Bei den Ermittlungen der Strassennutzerkosten und der dabei notwendigen Berechnungen der unterschiedlichen Reisezeiten und des Unfallaufkommens erfolgte eine Verwendung der öffentlich zugänglichen stündlichen Zählstellendaten der Autobahnzählstelle Muttenz, Hard (081) [112] aus dem Jahr 2008. Die Verkehrsbelastung im Jahr 2008 entspricht etwa derjenigen im Jahr 2005. Dabei wurde die Verkehrsbelastung über den Betrachtungszeitraum von 20 Jahren nicht erhöht sondern gleich beibehalten, da dieser Autobahnabschnitt in der jetzigen Form schon ohne behindernde Erhaltungsmassnahme in den Spitzenstunden im Grenzbereich der Leistungsfähigkeit liegt. Zusätzlich wurden die Zählendaten auf allen Abschnitten als gleich angesehen. Für den praktischen Einsatz sollten verkehrsspezifische Daten unter Berücksichtigung der unterschiedlichen örtlichen Rahmenbedingungen benutzt werden. Diese können z.B. durch Verkehrssimulationen in Verbindung mit örtlichen Verkehrszählungen ermittelt werden.

Zusätzliche Reisezeitkosten (Nutzer)

Im Rahmen der Ermittlung der Reisezeitkosten infolge Geschwindigkeitsreduktion erfolgte eine weitere Vernachlässigung möglicher Umfahrrouten. Einerseits existiert ein hoher Auslandsverkehr auf dieser Strecke, welcher über die Autobahnen A861 und A98 in Deutschland eine ähnlich lange alternative Autobahnroute wählen kann. Andererseits sind zwei Verzweigungen und drei Anschlüsse nur innerhalb des Baustellenstücks vorhanden. Die Berechnung der Reisezeitkosten erfolgte mit der gängigen BPR-Funktion (vgl. Kapitel 2.2.5, Gleichung (12)) über die betroffenen Stunden des Betrachtungszeitraums und den bekannten Kostensätzen [33]. Dabei wurden nicht die signalisierten Geschwindigkeiten angesetzt, sondern die mittlere Geschwindigkeit für die schweizerischen Autobahnen nach Bernard [67].

Für eine spezifische Spitzenstunde a (a : Juni, Montag, 17 Uhr) der Kante [52,3][53,3] in Richtung Augst ergeben sich für die Massnahme $j = 3$ (B1) zusätzliche Reisekosten

$$\begin{aligned}\Delta C_{[i,j][t+1,j]}^{TT,v,a} &= \frac{l_{(i,j+1)}}{\Delta v_m} \cdot \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{q_{60}}{cap_{60}} \right)^\beta \right) \cdot (q_{60,mIV} \cdot C_{mIV}^{TT} + q_{60,sV} \cdot C_{sV}^{TT}) \\ \Delta C_{[52,3][53,3]}^{TT,v,a} &= \left(\frac{1}{78.4} - \frac{1}{115.2} \right) \cdot 0.08 \cdot \left(1 + 0.15 \cdot \left(\frac{5692}{5100} \right)^4 \right) \cdot (4892 \cdot 30.93 + 800 \cdot 15.60) \\ &= 65.82 CHF\end{aligned}$$

Diese Kosten beziehen sich jeweils auf eine konkrete Stunde und müssen auf eine jeweilige Zeitperiode k angepasst werden. Dafür erfolgt eine Addition aller relevanten Stunden im Zeitraum von 210 Tagen des Jahres 2008 (Dauer von B1) mit anschliessender Division durch die Dauer $p_j = 2$ nach Gleichung (35).

Die Staukosten wurden einerseits für die Baustelle berechnet. Eine Engstellenproblematik, wodurch Staukosten entstehen, liegt im Beispiel im Annäherungsbereich an die Baustelle vor. Andererseits sind im Rahmen der Langzeitkosten für die isolierten Massnahmenereignisse des betrieblichen Unterhalts (Tagesbaustellen) infolge schlechten Zustands und die separaten Brückeninstandsetzungen Staukosten ermittelt worden (vgl. Massnahmendefinition und Gleichung (28)). Dies wurde möglich, da jede dieser Massnahmen als in sich abgeschlossenes Ereignis Betrachtung fand. Weitere Ereignisse, z.B. Unfälle, welche einen Stau im Baustellenbereich hervorrufen können, wurden nicht berücksichtigt. Weitere zukünftige Staukosten bei den einzelnen Fahrbahnstrecken sind nicht realitätsnah, da diese Kosten abhängig von der Anzahl der Engstellen sind. Wie die Baustellen aus den einzelnen Strecken der Teilsysteme in den Folgejahren gebildet werden, d.h. wie viele Engstellen bei einer späteren Baustellenbildung entstehen, ist nicht bekannt.

Für eine andere Spitzenstunde b in Richtung Augst (b : April, Montag, 17 Uhr) ergeben sich folgende zusätzliche Reisekosten auf der Grundlage des Dichtestosswellenmodells [89] infolge Leistungsfähigkeitsreduktion und Staugeschwindigkeit ($cap_{60,con} = 4000$ Fz/h, $v_{m,con} = 30$ km/h) durch eine Tagesbaustelle im Bereich der Kante [52,0][53,0]. Diese wird infolge des schlechten Zustands errichtet bei einer Reduktion um einen Fahrstreifen. Die signalisierte Geschwindigkeit infolge schlechten Zustands beträgt 100 km/h. Da die Verkehrsbelastung in dieser Stunde sehr hoch ist, beträgt die mittlere Geschwindigkeit ohne Zusammenbrüche in dieser Stunde auf Basis der BPR-Funktion [67] $v_{m,b,mIV} = 72.61$ km/h und $v_{m,b,sV} = 70.97$ km/h. Es wird jeweils davon ausgegangen, dass der Stau sich innerhalb der betrachteten Stunde wieder auflöst und die „Staugeschwindigkeit“ konstant bleibt. Es wird zuerst die Staulänge $L_{con,b}$ errechnet.

$$L_{con,b} = -\frac{q_{60} - cap_{60,con}}{v_m - v_{m,con}} = -\frac{5866 - 4000}{72.61 - 30} = 35.51 km$$

Damit ergibt sich eine zusätzliche Reisezeit von

$$t_{con,b,mIV} = L_{con,b} \cdot \left(\frac{1}{v_{con}} - \frac{1}{v_{m,b,mIV}} \right) = 35.51 \cdot \left(\frac{1}{30} - \frac{1}{72.61} \right) = 0.6946 h \text{ und } t_{con,b,SV} = 0.6832 h$$

Dies führt zu zusätzlichen Staukosten in der betrachteten Stunde infolge der Engpassproblematik durch die Tagesbaustelle von

$$\begin{aligned} \Delta C^{TT,con,b} &= t_{con,b,mIV} \cdot q_{60,mIV} \cdot C_{mIV}^{TT} + t_{con,b,SV} \cdot q_{60,SV} \cdot C_{SV}^{TT} \\ \Delta C^{TT,con,b} &= 0.6946 \cdot 5077 \cdot 30.93 + 0.6832 \cdot 789 \cdot 15.60 \\ &= 117483.25 CHF \end{aligned}$$

Diese Kosten gehören zu den jeweiligen Folgekosten der relevanten Massnahmen (N, A1, A2) im Rahmen der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung.

Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten (Nutzer)

Zusätzliche Fahrzeugbetriebskosten wurden hinsichtlich Reisezeit und Treibstoffverbrauch eventuell entstehender Stauzeiten und Staulängen berücksichtigt. Fahrzeugbetriebskosten infolge der Geschwindigkeitsreduktion über die Baustellenlänge wurden nicht berücksichtigt. Hier wurde davon ausgegangen, dass sich Einsparungen, durch die signalisierte Geschwindigkeitsreduktion im Baustellenbereich, und Mehraufwand, durch Stop-and-Go sowie eventuell entstehende Staus infolge Unfälle, der Fahrzeugbetriebskosten gegeneinander aufheben. Alternativrouten wurden ebenfalls nicht berücksichtigt. Dadurch sind für die Differenzkosten der Baustellen nur die Fixkosten pro Reisestunde sowie die Treibstoffkosten relevant. Die variablen Kosten pro Fahrzeugkilometer entfallen, da keine Alternativrouten mit unterschiedlicher Länge berücksichtigt werden.

Die Fahrzeugbetriebskosten infolge des Staus der Spitzenstunde b in Richtung Augst (b : April, Montag, 17 Uhr) setzen sich zusammen aus den Kosten der zusätzlich anfallenden Reisezeit im Stau $\Delta C^{VOCh,con,b}$ und den Kosten für den zusätzlichen Treibstoffverbrauch $\Delta C^{VOcfuel,con,b}$. Diese ergeben sich jeweils mit

$$\begin{aligned} \Delta C^{VOCh,con,b} &= t_{con,b,mIV} \cdot q_{60,mIV} \cdot C_{mIV}^{VOCh,vehh} + t_{con,b,SV} \cdot q_{60,SV} \cdot C_{SV}^{VOCh,vehh} \\ \Delta C^{VOCh,con,b} &= 0.6946 \cdot 5077 \cdot 1.91 + 0.6832 \cdot 789 \cdot 6.16 \\ &= 10056.10 CHF \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta C^{VOcfuel,con,b} &= L_{con,b} \cdot (q_{60,mIV} \cdot (0.73 \cdot \Delta fuel_{mIV,d} \cdot C_{fuel,d} + 0.27 \cdot \Delta fuel_{mIV,gas} \cdot C_{fuel,gas}) \\ &\quad + q_{60,SV} \cdot \Delta fuel_{SV,gas} \cdot C_{fuel,gas}) \\ \Delta C^{VOcfuel,con,b} &= 35.51 \cdot (5077 \cdot (0.73 \cdot 0.006 \cdot 0.58 + 0.27 \cdot 0.007 \cdot 0.53) + 789 \cdot 0.141 \cdot 0.58) \\ &= 2929.85 CHF \end{aligned}$$

Diese Kosten gehören zu den jeweiligen Folgekosten der relevanten Massnahmen (N, A1, A2) im Rahmen der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung.

Zusätzliche Unfallkosten (Nutzer)

Grundlage für die Ermittlung der zusätzlichen Unfallkosten bilden die überschläglichen Unfallkostenraten auf Autobahnen der Schweizer Norm [113]. Hier sind Unfallkostenraten für die freie Strecke auf Autobahnen ohne Baustelle vorhanden (vgl. Abb. 2.24). Es fehlen jedoch Angaben zu Unfallkostenraten im Baustellenbereich. Für die Fallbeispiele er-

folgte eine Abschätzung der Unfallkostenraten im Baustellenbereich für die Baustelle und die Tagesbaustellen des betrieblichen Unterhalts der Folgejahre. Dabei wurden die Unfallkostenraten überhöht definiert, um in den Fallbeispielen die zusätzlichen Unfallkosten nicht zu gering ausfallen zu lassen. Für die Praxis sind diese Werte nicht geeignet. Ausserdem sollte dann eine Differenzierung zwischen den einzelnen Baustellenbereichen erfolgen (vgl. Abb. 2.24). Bisher fehlen diese Ansätze für Baustellen bzw. unterschiedliche Baustellenbereiche sowie Tagesbaustellen auf schweizerischen Autobahnen. Es wurde angenommen, dass das Unfallaufkommen im gesamten Baustellenbereich im Jahresvergleich höher ist (Faktor 3) als auf den freien, nicht von einer Baustelle betroffenen Strecken. Für die Tagesbaustellen wurde dieser jahresbezogene Faktor überhöht auf 10 gesetzt. Für die Strecke vom Knoten $i = 52$ zum Knoten $i + 1 = 53$ und einer Massnahme B1, d.h. im Netzwerk einer Zeitperiode die Massnahmenkante $[52,3][53,3]$ in Richtung Augst ergeben sich zusätzliche Unfallkosten $\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac}$ zu

$$\begin{aligned}\Delta C_{[i,j][i+1,j]}^{ac} &= (ACR_{site} - ACR_{normal}) \cdot 10^{-3} \cdot \sum q_{60} \cdot l_{(i,i+1)} \cdot T \\ \Delta C_{[52,3][53,3]}^{ac} &= (3 - 1) \cdot 41.8 \cdot 10^{-3} \cdot 12'638'898 \cdot 0.080 \cdot \frac{210}{365} \\ \Delta C_{[52,3][53,3]}^{ac} &= 48'633.10 \text{ CHF}\end{aligned}$$

Diese Kosten beziehen sich ebenfalls auf die Massnahme $j = 3$ (B1) mit einer Dauer von zwei Zeitperioden (1 Jahr). Es muss somit noch eine Aufteilung auf eine Zeitperiode k nach Gleichung (35) stattfinden.

$$\begin{aligned}C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{ac} &= \frac{C_{[i,j][i+1,j]}^{ac}}{p_j} \\ C_{[52,3,k][53,3,k]}^{ac} &= \frac{48'633.10}{2} \\ &= 24'316.55 \text{ CHF}\end{aligned}$$

Neue internationale Erkenntnisse (vgl. Kapitel 2.2.5, Abb. 2.24) führen zu einer differenzierteren Ermittlung von Unfallkosten. Dabei werden verschiedene Unsteigkeitsstellen, wie z.B. Überleitungen, betrachtet. Liegen dafür Unfallkostenraten vor sind die berechneten Kosten an den relevanten Verbindungskanten anzusetzen. Diese wurden in den Fallbeispielen noch nicht mit einbezogen, da sie nicht ohne weiteres auf schweizerische Verhältnisse anwendbar sind.

Fiktive Kostenfaktoren als Steuerungsmechanismus

Zusätzlich erfolgte die Abbildung der vorhandenen Mittelstreifenüberfahrten durch eine Überhöhung der Kostenbelegung der Verbindungskanten. Das heisst an jeder Verbindungskante, an der keine Überleitung aufgrund fehlender Mittelstreifenüberfahrt möglich ist, erfolgte eine Belegung mit fiktiven 10^{12} CHF für die Massnahmen B1 und B2. Alle Verbindungskanten mit einer Mittelstreifenüberfahrt wurden jeweils, wenn vorhandenen, mit den real vorhandenen Kosten gewichtet. Zusätzlich zu den Massnahmenkanten erfolgt eine Berücksichtigung von definierten Übergängen. Bei der aktuellen Fragestellung werden die Baustellenlänge und der Umfang der Massnahmen durch die Optimierung definiert.

Bildung des Netzwerks für die Optimierung mit BLP

Auf der Grundlage des erweiterten physischen Modells, der Massnahmendefinition und der Definition des Betrachtungszeitraums muss nun das Netzwerk für die Optimierung mit BLP gebildet werden. Dieses wird so aufgebaut, dass die relevanten Kosten an den Kanten als Gewichtung angesetzt werden können. Die Problemstellung muss so im Netzwerkmodell umgesetzt werden, dass durch einen Kostenfluss im Netzwerkmodell die Baustelle für alle vier Zeitperioden mit ihren Massnahmen simuliert werden kann. Das heisst, dass die Massnahmen an den Erhaltungsobjekten bzw. Massnahmenkanten in Art und Zeit sowie die Baustellenauswirkungen an den Verbindungskanten berücksichtigt

werden (vgl. Kapitel 3.2). Das Netzwerk ist so aufgebaut, dass in der Regel für jede Massnahmenkante fünf Massnahmen zu Auswahl stehen und die Dauer des Betrachtungszeitraums zwei Jahre beträgt. Das heisst es müssen vier Zeitperioden mit jeweils einem halben Jahr berücksichtigt werden. Dies wird in Abbildung 3.65 angedeutet.

Erstellung des binären linearen Programms BLP

Nachdem alle Kosten zugeordnet wurden, erfolgte die Datenübertragung in die Knotenmatrizen (Adjazenzmatrizen) des Informatikwerkzeugs für die Bildung des binären linearen Programms. Dabei werden die verschiedenen Knotenmatrizen in eine Form einer Inzidenzmatrix geschrieben, welches durch eine Implementierung der Kosten und der Gleichungen des BLP dem Solver des Programms ermöglicht, die Optimierungsaufgabe zu lösen.

Dabei wurden folgende Bedingungen berücksichtigt (vgl. Kapitel 3.2.4)

- Anzahl der Zeitperioden für den Fluss
- Anzahl und Dauer der unterschiedlichen Massnahmen
- Zugehörige Massnahme auf der gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn
- Vorhandene Mittelstreifenüberfahrten zur Realisierung der Überleitungen
- Budgetbegrenzung je Periode
- Maximale Baustellenlänge
- Minimaler Baustellenabstand

Die folgende Abbildung 3.86 zeigt einen Ausschnitt aus dem erzeugten binären linearen Programm (BLP) mit Binärvariablen.

Gesamtkosten		0	Strassenbetreiber		Total		0	Strassennutzer		Total		0
Kontrolle	0	0	LT-Kosten		Kosten			LT-Kosten		Kosten		
			0	0	Gesamtbu	4000		0	0			
Interventionskosten Periode 1			0	<=	1000			0				
Interventionskosten Periode 2			0	<=	1000			0				
Interventionskosten Periode 3			0	<=	1000			0				
Interventionskosten Periode 4			0	<=	1000			0				
maximale Baustellenlänge			3,7									
minimaler Baustellenabstand			4									
					Total			Strassenbetreiber		Strassennutzer		
Verbindu	Ja/Nein		LT-Kosten	Kosten	Längen	LT-Kosten	Kosten	LT-Kosten	Kosten	1N1	2N1	2A11
2N1-1N1	0	0	0	0	1E-06	0	0	0	0	1	-1	
2A11-1N1	0	0	0	2	1E-06	2	0	0	0	1		-1
3N1-2N1	0	0	1.0496	0	0.149999	0.298002	0	0.751597	0			1
3A11-2A11	0	0	0	0.664763	0.149999	0	0.278248	0	0.386515			1
4N1-3N1	0	0	0	0	1E-06	0	0	0	0			
4N1-3A11	0	0	0	0.941576	1E-06	0	0	0.941576	0			
4A11-3N1	0	0	0	2	1E-06	2	0	0	0			
4A11-3A11	0	0	0	0	1E-06	0	0	0	0			
5N1-4N1	0	0	6.700071	0	0.489999	1.093983	0	5.606088	0			
5A11-4A11	0	0	0	2.171571	0.489999	0	0.908948	0	1.262623			
6N1-5N1	0	0	0	0	1E-06	0	0	0	0			
6N1-5A11	0	0	0	0.941576	1E-06	0	0	0.941576	0			

Abb. 3.86 Ausschnitt aus dem erzeugten binären linearen Programm (Fallbeispiels A2/A3 Basel Hagnau-Augst)

Ergebnisse der Optimierung

Die Optimierung erfolgt durch die Minimierung der Gesamtkosten. Diese beinhalten Strassenbetreiber- und Strassennutzerkosten. Als Randbedingungen können neben einer maximalen Baustellenlänge und einem minimalen Baustellenabstand in einer Periode auch Budgetgrenzen definiert werden. Für einen Praxistest erfolgte eine Szenarienbildung hinsichtlich unterschiedlicher Kostenumlegung auf die Kanten und verschiedener Definition von Randbedingungen. Damit sollen die Ergebnisse in Hinblick auf den Einfluss unterschiedlicher Kostenkennwerte, einer Budgetgrenze sowie der Begrenzung von Baustellenlänge und minimalem Abstand betrachtet werden. Die folgenden Szenarien wurden gebildet:

- Szenario 1: Minimierung der Gesamtkosten ohne Budgetbeschränkung unter Verwendung aller Kostenanteile der Massnahmen- und Verbindungskanten
- Szenario 2: Minimierung der gesamten Strassenbetreiberkosten
- Szenario 3: Minimierung der gesamten Strassennutzerkosten
- Szenario 4: Minimierung der Gesamtkosten ohne Budgetbeschränkung mit Längenbeschränkung auf 3.7 km und einem minimalen Abstand von 4 km der Baustellen in einer Periode
- Szenario 5: Minimierung der Gesamtkosten unter einer Budgetbeschränkung von jeweils 10 Mio in den ersten beiden und jeweils 15 Mio in den letzten beiden Perioden

Beim Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst erfolgt eine Betrachtung über einen gesamten Autobahnabschnitt zwischen zwei verkehrstechnischen Knoten mit der Länge von ca. 10 km. Die Verkehrsbelastung wird über den gesamten Abschnitt als gleich angenommen. Die Ergebnisse der Optimierung durch die Minimierung der Gesamtkosten sind in Abbildung 3.87 mit Blick auf die Kosten dargestellt und jeweils **Minimum** und **Maximum** hervorgehoben.

Abb. 3.87 Kosten der unterschiedlichen Szenarien A2/A3 Basel Hagnau-Augst

Nr.	Gesamt	Strassenbetreiber			Strassennutzer		
		Total	Kosten 06/07	Folgekosten	Total	Kosten 06/07	Folgekosten
01	249'839'388	135'871'122	115'277'589	20'593'533	113'968'266	65'209'035	48'759'231
02	351'824'386	124'590'917	14'972'225	109'618'692	227'233'469	17'208'291	210'025'178
03	250'560'651	138'686'836	118'976'788	19'710'048	111'873'815	71'333'154	40'540'661
04	275'682'286	133'799'658	38'196'254	95'603'404	141'882'628	30'382'939	111'499'689
05	273'101'434	130'236'101	47'545'324	82'690'777	142'865'333	51'262'130	91'603'203

Nach einer Betrachtung der Kosten in Abbildung 3.87 wird deutlich, dass das Szenario 01 ohne Beschränkungen und unter Einbezug von Strassenbetreiber- und -nutzerkosten die geringsten Gesamtkosten beinhaltet. Dies ist ein schlüssiges Ergebnis. Das Szenario 01 erzeugt nach Szenario 03 die geringsten Folgekosten für Strassenbetreiber und Strassennutzer. Notwendige umfangreiche Massnahmen werden damit innerhalb der Baustelle durchgeführt. Dies zeigt die Nachhaltigkeit dieses Optimierungsansatzes auf. Gleichzeitig liegen die Strassenbetreiberkosten knapp unter deren maximal möglichen und die Strassennutzerkosten nicht weit über deren minimal möglichen Gesamtkosten im Szenariovergleich. Der Strassenbetreiber hat dabei ca. 9 % Mehrkosten im Vergleich zu seinen Minimalkosten bei alleiniger Minimierung der Strassenbetreiberkosten zu tragen. Diese 9 % Mehrkosten des Strassenbetreibers erzeugen jedoch knapp 50 % Einsparungen beim Strassennutzer im Vergleich zum Szenario mit minimalen Strassenbetreiberkosten (Szenario 02).

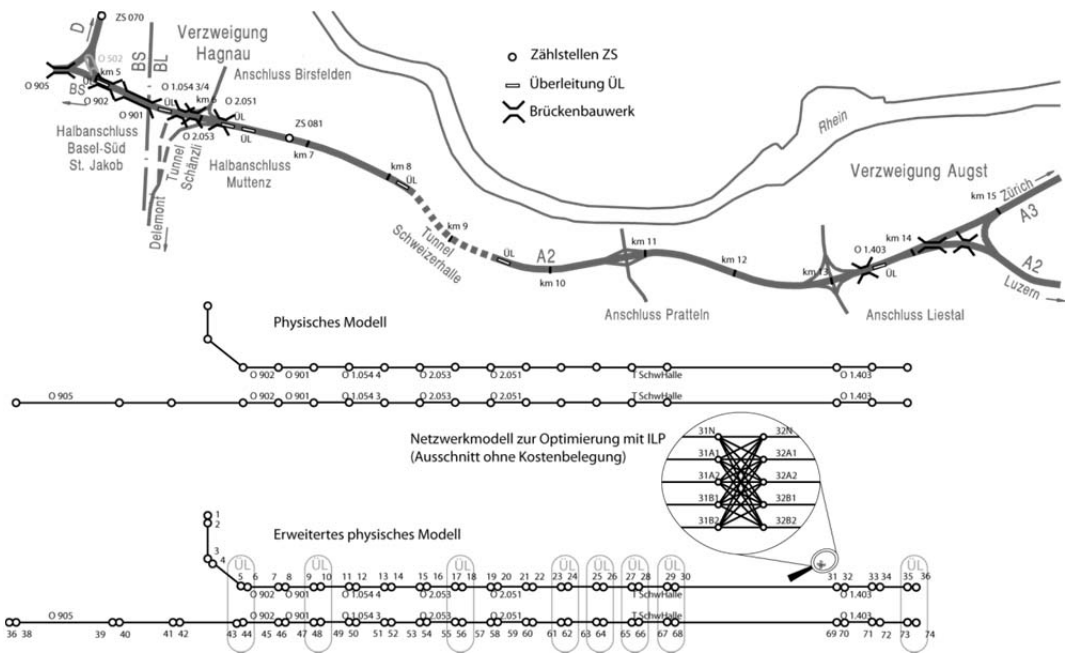
Szenario 02 zeigt einen grossen Nachteil auf. Die Kosten in den Jahren der Baustelle werden für den Strassenbetreiber minimal. Demgegenüber steht ein Maximum an Folgekosten im Vergleich zu allen Szenarien. Notwendige umfangreiche Erhaltungsmassnahmen werden in die Folgejahre verschoben. Mit Blick auf den Nachhaltigkeitsaspekt ist dieses Szenario nicht geeignet. Das Ergebnis ist jedoch plausibel unter den dafür definierten Randbedingungen.

Bei einer Betrachtung von Szenario 1 und 3 zeigt sich, dass dem Strassennutzer bei einer Minimierung der Gesamtkosten ohne Beschränkungen nur knapp 2 % Mehrkosten entstehen im Vergleich zu einer alleinigen Minimierung der Strassennutzerkosten. Dem gegenüber kann der Strassenbetreiber ca. 2 % Einsparungen verzeichnen. Szenario 03 zeigt zusätzlich auf, dass für Strassennutzer und -betreiber maximale Kosten und minimale Folgekosten entstehen. Es werden somit umfangreiche Massnahmen innerhalb der Baustelle durchgeführt und nicht in die Folgejahre verschoben. Dieses Ergebnis zeigt sich ebenfalls plausibel. Eine Bündelung von Massnahmen zeigt sich vor allem für den Strassennutzer als Nutzenpotential und ist für den Strassenbetreiber unter Berücksichti-

gung seiner Gesamtkosten nicht mit grossen Verlusten verbunden.

Szenario 04 und 05 zeigen auf, dass eingeführte beschränkende Randbedingungen die Strassenbetreiberkosten im Vergleich zum Szenario 01 reduzieren können (ca. 2-4 %). Dem Strassenutzer entstehen dadurch jedoch in beiden Fällen ca. 25 % Mehrkosten im Vergleich zum Szenario 01.

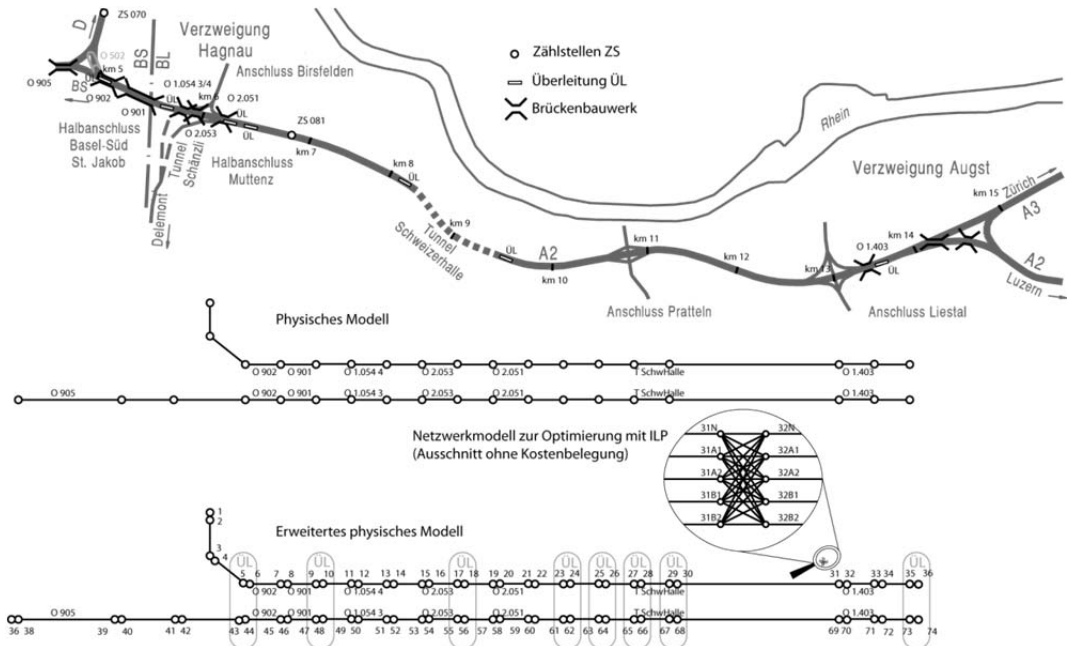
Die folgende Abbildungen 3.88 bis 3.90 zeigen die Massnahmen und die verwendeten Überleitungen in den einzelnen Perioden der verschiedenen Szenarien. Dabei sind die verwendeten Mittelstreifenüberfahrten blau gekennzeichnet. Grau hinterlegte Mittelstreifenüberfahrten sind für diese Verkehrsführung nicht notwendig. Die Massnahmen wurden farbig gekennzeichnet mit N (grün), A1 (gelb), A2 (orange) und B1/B2 (rot).



Szenario 1

Periode	2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35
Periode 1	N	N	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	N	N	A1
38-39	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
40-41	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
42-43	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
44-45	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
46-47	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
48-49	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
50-51	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
52-53	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
54-55	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
56-57	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
58-59	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
60-61	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
62-63	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
64-65	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
66-67	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
68-69	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
70-71	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
72-73	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
Periode 2	N	N	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	N	N	N
38-39	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
40-41	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
42-43	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
44-45	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
46-47	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
48-49	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
50-51	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
52-53	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
54-55	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
56-57	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
58-59	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
60-61	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
62-63	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
64-65	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
66-67	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
68-69	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
70-71	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
72-73	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
Periode 3	N	N	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	N	N	N
38-39	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
40-41	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
42-43	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
44-45	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
46-47	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
48-49	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
50-51	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
52-53	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
54-55	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
56-57	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
58-59	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
60-61	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
62-63	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
64-65	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
66-67	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
68-69	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
70-71	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
72-73	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
Periode 4	N	N	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	N	N	N
38-39	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
40-41	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
42-43	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
44-45	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
46-47	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
48-49	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
50-51	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
52-53	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
54-55	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
56-57	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
58-59	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
60-61	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
62-63	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
64-65	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
66-67	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
68-69	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
70-71	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N
72-73	N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	N	N	N

Abb. 3.88 Szenario 1 im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst



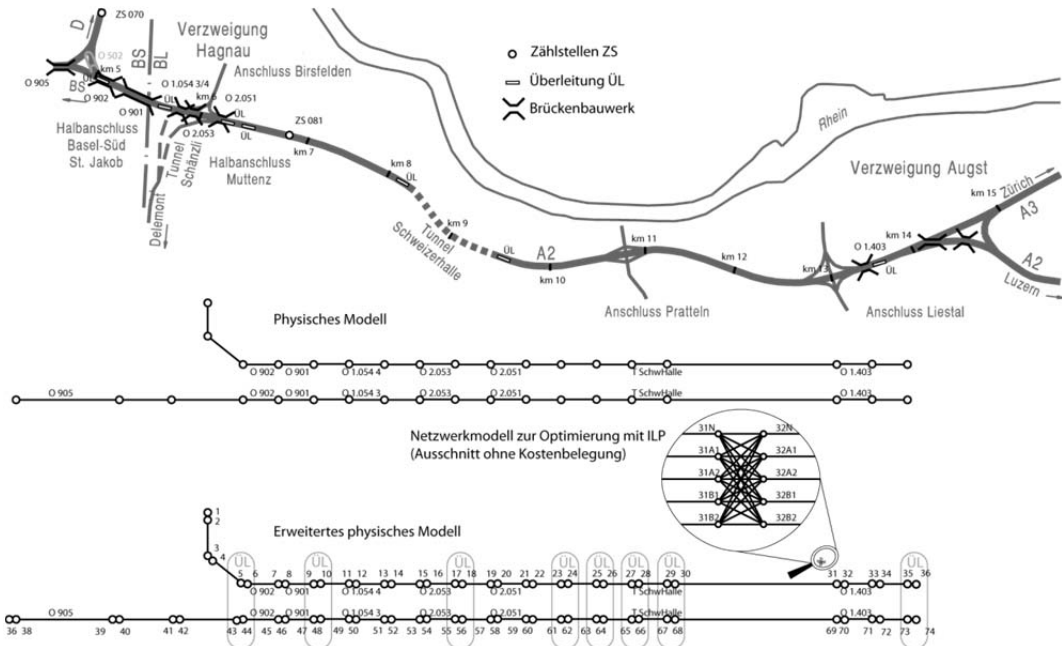
Szenario 2

Periode 1	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL		
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	N	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A2	A1	
N	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A2	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73

Szenario 3

Periode 1	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL		
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	N	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B1	B2	B1	N	N	N	
N	N	N	B2	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B2	B1	B2	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	N	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B1	B2	B1	N	N	N	
N	N	N	B2	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B2	B1	B2	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
A1	A1	A1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B1	B2	B1	N	N	N	
N	N	N	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B1	B2	B1	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	N	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B1	B2	B1	A2	N	N	
N	N	N	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B1	B2	B1	A2	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73

Abb. 3.89 Szenario 2 und 3 im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst



Szenario 4

Periode 1		UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL		
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	A2	A2	N	N	N	N	
N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B1	B1	B1	A2	A2	N	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73
Periode 2		UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL		
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
A1	A1	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	N	N	N	N	N	N	
A1	A1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	N	N	N	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73
Periode 3		UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL		
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A1	N	N
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73
Periode 4		UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL		
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	A1	N	N
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73

Szenario 5

Periode 1		UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL			
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35		
N	N	N	N	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	A1	A1	N	N		
N	N	N	N	N	N	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	
Periode 2		UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL			
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35		
N	N	N	N	N	N	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	A1	A1	N	N
N	N	N	N	N	N	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	A1	A1	N	N
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	
Periode 3		UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL			
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35		
A1	A1	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	N	N	N	N	N	
A1	A1	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	N	N	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	
Periode 4		UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL			
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	17-18	19-20	21-22	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35		
N	N	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	N	N	N	N	N	
A1	A1	A1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	N	N	N	N	
38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	50-51	52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	

Abb. 3.90 Szenario 4 und 5 im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst

3.3.3 A1 St. Gallen St. Fiden/Rheineck

Bildung erweitertes physisches Netzwerk

Analog des Fallbeispiels A2/A3 Basel Hagnau-Augst erfolgte für den Abschnitt A1 St. Gallen St. Fiden/Rheineck ebenfalls eine Bildung des erweiterten physikalischen Modells. Auch hier wurden wieder neben der Bildung der Massnahmen- und Verbindungskanten die real existierenden Mittelstreifenüberfahrten integriert. Die sich gegenüberliegenden Kanten auf den beiden Richtungsfahrbahnen wurden definiert. Hinsichtlich der Struktur unterscheiden sich beide gebildeten Netzwerkmodelle kaum voneinander. Der Abschnitt ist beim Fallbeispiel A1 St. Gallen St.Fiden-Rheineck 7 km länger, was sich auf die Anzahl der Strecken auswirkt. Dadurch steigt auch die Anzahl der Knoten im erweiterten physischen Modell auf 100 an.

Der grosse Unterschied zwischen den beiden Strecken liegt in ihrer Verkehrsbelastung, wie aus Kapitel 2.5 ersichtlich. Dadurch ist der Anteil der Nutzerkosten an den Gesamtkosten geringer als bei Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst.

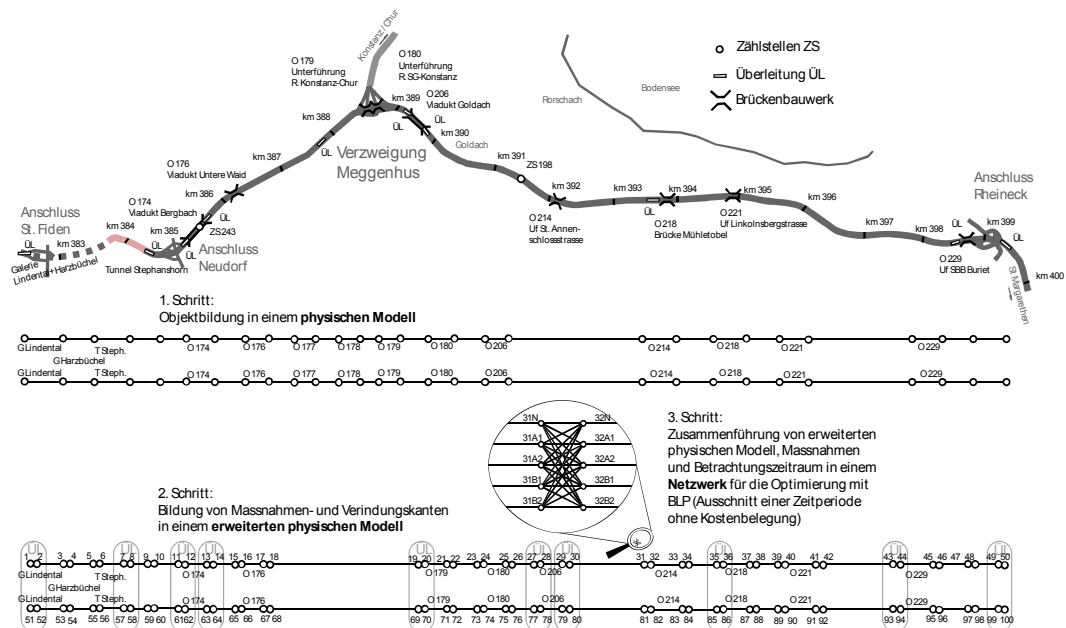


Abb. 3.91 Schrittweise Netzwerkbildung am Beispiel A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck

Kostenmodell

Beim Fallbeispiel A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck erfolgt eine Betrachtung über zwei gesamte Autobahnabschnitte innerhalb eines Erhaltungsabschnitts des ASTRA mit einer Länge von 17 km. Auf den Autobahnabschnitten im Fallbeispiel A1 St. Gallen St.Fiden-Rheineck existiert eine Verkehrsbelastung, welche nicht an der Leistungsfähigkeitsgrenze liegt. Das Verkehrsregime im Normalfall sind je zwei Fahrstreifen auf einer Richtungsfahrbahn.

Das Kostenmodell integriert Strassenbetreiber- und Strassennutzerkosten anhand von objektbezogenen und baustellenbedingten Kostenkenngrössen. Die objektbezogene Kostenkenngrössen werden für eine Gewichtung der Massnahmenkanten berücksichtigt und baustellenbedingten Kostenkenngrössen fallen an den Verbindungskanten an. Diese wurden analog dem Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst ermittelt und sind nochmals in Abbildung 3.92 zusammengefasst. Auf eine erneute ausführliche Erläuterung wird hier verzichtet und auf das Kapitel 3.3.2 verwiesen.

Abb. 3.92 Berücksichtigte Kosten im Kostenmodell des Fallbeispiels A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck

Anspruchsgruppe	Kostenarten	objektbezogen	baustellenbedingt
Strassenbetreiber	Baustelleneinrichtungskosten		$C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{Setup}$
	Massnahmenkosten	$C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{Int}$	
	Folgekosten der Massnahmen	$LC_{[i,j][i+1,j]}^{Int}$	
	Verkehrsführungskosten	$C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{TC}$	
Strassennutzer	Folgekosten durch Massnahmen	$\Delta LC_{[i,j][i+1,j]}^{TT+VOC+ac}$	
	Zusätzliche Reisezeitkosten infolge der signalisierten Geschwindigkeit	$\Delta C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{TT,v}$	
	Zusätzliche Unfallkosten infolge der Massnahmen	$\Delta C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{ac}$	
	Zusätzliche Reisezeitkosten durch Staubildung am Baustellenanfang		$\Delta C_{[i,0,k][i+1,j',k]}^{TT,con}$
	Zus. zeit- und treibstoffverbrauchsabhängige Fahrzeugbetriebskosten durch Staubildung am Baustellenanfang		$\Delta C_{[i,0,k][i+1,j',k]}^{VOC,con}$

Vorgehen bei der Ermittlung der Massnahmenfolgen

Wie auch schon im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst erfolgte für die Bildung der Massnahmenfolgen je Erhaltungsobjekt vereinfacht und auf der Grundlage von angenommenen Daten eines fiktiven Gesamtindex. Wie auch schon im ersten Fallbeispiel standen keine Zustandsinformationen für den betrachteten Netzteil zur Verfügung. Deshalb wurde analog des Fallbeispiels A2/A3 Basel Hagnau-Augst vorgegangen. Dies ermöglichte auch hier eine Ermittlung der Kosten und Folgekosten je Teilstrecke mit Hilfe einer Lebenszyklusanalyse innerhalb eines Betrachtungszeitraums von 20 Jahren. Als Massnahmenjahr wurde das Jahr 2004 definiert. Analog zu den Definitionen im ersten Fallbeispiel gilt: hat eine Erhaltungsmassnahme in einem Jahr auf einer Teilstrecke stattgefunden, sind für die nächsten 10 Jahre keine Massnahmen erlaubt.

K.- Nr.	von km	nach km	Länge [km]	Breite [m]	KB	FS	DTV	ix	K.- Nr.	von km	nach km	Länge [km]	Breite [m]	KB	FS	DTV	ix
parallele Richtungsfahrbahnen (eine Verkehrsüberführung über Mittelstreifenüberfahrten ist möglich)																	
2	382.4	383.2	0.800	9.5	ja	2	27379	2.5	51	382.4	383.2	0.800	9.5	ja	2	27379	2.9
4	383.2	383.7	0.500	9.5	ja	2	27379	4.7	53	383.2	383.7	0.500	9.5	ja	2	27379	2.4
6	383.7	384.3	0.600	9.5	ja	2	27379	4.6	55	383.7	384.3	0.600	9.5	ja	2	27379	2.4
8	384.3	384.8	0.500	9.5	nein	2	27379	4.8	57	384.3	384.8	0.500	9.5	nein	2	27379	4.6
10	384.8	385.0	0.200	9.5	nein	2	27379	4.5	59	384.8	385.0	0.200	9.5	nein	2	27379	4.7
12	385.0	385.5	0.500	9.5	ja	2	27379	4.8	61	385.0	385.5	0.500	9.5	ja	2	27379	4.6
14	385.5	386.1	0.550	9.5	nein	2	27379	4.7	63	385.5	386.1	0.550	9.5	nein	2	27379	2.4
16	386.1	386.2	0.100	9.5	ja	2	27379	4.8	65	386.1	386.2	0.100	9.5	ja	2	27379	4.5
18	386.2	388.5	2.350	9.5	nein	2	27379	4.3	67	386.2	388.5	2.350	9.5	nein	2	27379	4.8
20	388.5	388.6	0.050	9.5	ja	2	27379	4.7	69	388.5	388.6	0.050	9.5	ja	2	27379	4.7
22	388.6	388.7	0.100	9.5	nein	2	27379	4.8	71	388.6	388.7	0.100	9.5	nein	2	27379	4.8
24	388.7	388.7	0.050	9.5	ja	2	27379	2.7	73	388.7	388.7	0.050	9.5	ja	2	27379	4.3
26	388.7	389.0	0.300	9.5	nein	2	19486	4.7	75	388.7	389.0	0.300	9.5	nein	2	19486	4.7
28	389.0	389.6	0.600	9.5	ja	2	19486	4.8	77	389.0	389.6	0.600	9.5	ja	2	19486	4.8
30	389.6	392.0	2.400	9.5	nein	2	19486	3.7	79	389.6	392.0	2.400	9.5	nein	2	19486	4.8
32	392.0	392.2	0.150	9.5	ja	2	19486	4.8	81	392.0	392.2	0.150	9.5	ja	2	19486	4.7
34	392.2	393.8	1.650	9.5	nein	2	19486	4.2	83	392.2	393.8	1.650	9.5	nein	2	19486	4.9
36	393.8	393.9	0.100	9.5	ja	2	19486	2.7	85	393.8	393.9	0.100	9.5	ja	2	19486	2.4
38	393.9	394.9	1.000	9.5	nein	2	19486	4.7	87	393.9	394.9	1.000	9.5	nein	2	19486	4.7
40	394.9	395.0	0.050	9.5	ja	2	19486	4.8	89	394.9	395.0	0.050	9.5	ja	2	19486	4.9
42	395.0	397.0	2.050	9.5	nein	2	19486	3.7	91	395.0	397.0	2.050	9.5	nein	2	19486	2.4
44	397.0	398.8	1.800	9.5	nein	2	19486	2.5	93	397.0	398.8	1.800	9.5	nein	2	19486	2.9
46	398.8	398.9	0.050	9.5	ja	2	19486	4.7	95	398.8	398.9	0.050	9.5	ja	2	19486	2.4
48	398.9	399.0	0.150	9.5	nein	2	19486	3.7	97	398.9	399.0	0.150	9.5	nein	2	19486	4.5

Abb. 3.93 Vereinfacht definierte Zustandsdaten für die betrachteten Strecken zur Festlegung von Massnahmenstrategien am Fallbeispiel A1 St. Gallen St.Fiden-Rheineck

Die Zusammenstellung der Strecken in Abbildung 3.93 zeigt die angenommenen Zustandsdaten des Abschnitts A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck. Eine baustellenbedingte Reduktion der signalisierten Geschwindigkeit erfolgt von $v_{\text{Signal}} = 120 \text{ km/h}$ auf $v_{\text{Signal}} = 80 \text{ km/h}$ während der Ausführungsdauer. Zusätzlich wurde für die Kunstbauten eine durchzuführenden Erhaltungsmaßnahmen innerhalb der ersten 10 Jahre für die Strategiebildung definiert. Die Massnahmenfolgen wurden unter den gleichen Voraussetzungen wie im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst gebildet. Jedoch liegt der Betrachtungszeitraum für die Baustellenplanung in den Jahren 2004 und 2005.

Definition der Massnahmen unter Einbezug der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung







Die Definition der Massnahmen wurde analog des Fallbeispiels A2/A3 Basel Hagnau-Augst durchgeführt. Die einzelnen Massnahmen werden folgend nochmals stichpunktartig aufgeführt. Auf eine ausführliche Beschreibung wird mit Verweis auf Kapitel 3.3.2 verzichtet.

Folgende Massnahmen werden im Fallbeispiel A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck verwendet:

- Massnahme N, $j = 0$ (Nichtstun)
- Massnahme A1, $j = 1$ (kleine unabhängige Massnahme)
- Massnahme A2, $j = 2$ (kleine abhängige Massnahme)
- Massnahme B1, $j = 3$ (grosse abhängige Massnahme) mit Auswirkung auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn Massnahme B2, $j = 4$

Die Massnahmen sind in Abbildung 3.94 nochmals zusammengefasst und schematisch dargestellt.

Abb. 3.94 Definition der Modellmassnahmen für die Bildung von Baustellen an Autobahnen im Fallbeispiel A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck

Nr	Massnahme	Parallele Richtungsfahrbahn	weitere Perioden	Dauer in Perioden	Randbedingungen	Geschwindigkeitsniveau
N	Nichts tun	N oder A1	N A1 A2 B1 B2	1	Reduktion v_{signal} und betr. Unterhalt bei $I_G \geq 4$	 mIV: $v_m = 115.2 \text{ km/h}$ SV: $v_m = 96.4 \text{ km/h}$  mIV: $v_m = 94.4 \text{ km/h}$ SV: $v_m = 84.6 \text{ km/h}$
A1	Kleine unabhängige Massnahme	N oder A1	N B2	1	erste Massnahme Ersatz Deckschicht, keine Kunstbauten	
A2	Kleine abhängige Massnahme	A2	N	1	erste Massnahme Ersatz Deck-/Binderschicht, keine Kunstbauten	  mIV: $v_m = 78.9 \text{ km/h}$ SV: $v_m = 78.9 \text{ km/h}$
B1	Grosse Massnahme	B1	N B2	2	erste Massnahme Ersatz der geb. Schichten, mit Kunstbauten	
B2	Auswirkung von B2	B2	N A1 B1	2		

Kosten aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung

Im Gegensatz zum Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst liegen die Gesamtkosten für

den Strassennutzer generell unter denen des Strassenbetreibers (vgl. Abb. 3.95 und 3.96). Dies ist auf den geringeren Auslastungsgrad zurückzuführen. Damit werden im Baustellenfall wenig bis keine Engstellen erzeugt. Stau bildet sich je nach Verkehrsbelastung damit selten, wodurch die Staukosten geringer ausfallen als im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst (vgl. Abb. 3.96). Gleiches zeigt sich bei der Betrachtung der anderen einzelnen Kostenkenngrößen für die langfristige Massnahmenplanung (vgl. Abb. 3.96). Die Strassennutzerkosten mit zusätzlichen Unfall-, Fahrzeugbetriebs- und Reisezeitkosten sind im Vergleich geringer als im Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst.

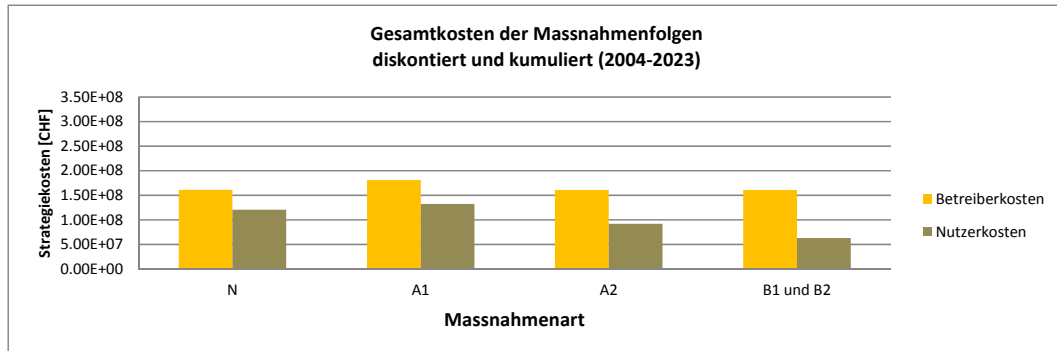


Abb. 3.95 Kumulierte Gesamtkosten der Massnahmenfolgen aller Erhaltungsobjekte getrennt nach Strassenbetreiber und -nutzer im Fallbeispiel A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck über den Betrachtungszeitraum der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung

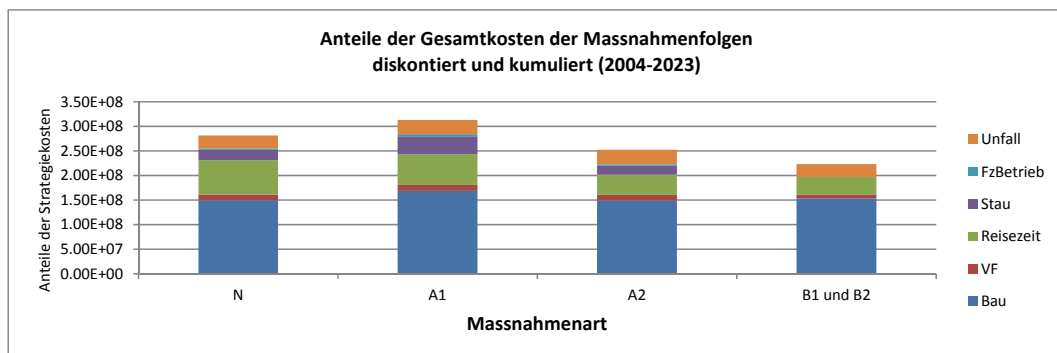


Abb. 3.96 Höhe und Anteile der kumulierten Gesamtkosten der Massnahmenfolgen aller Erhaltungsobjekte im Fallbeispiel A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck über den Betrachtungszeitraum der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung

Die Massnahmen- und Langzeitkosten sind in Abbildung gegenübergestellt und zeigen sich ähnlich in ihrem Verhältnis im Vergleich zum Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst.

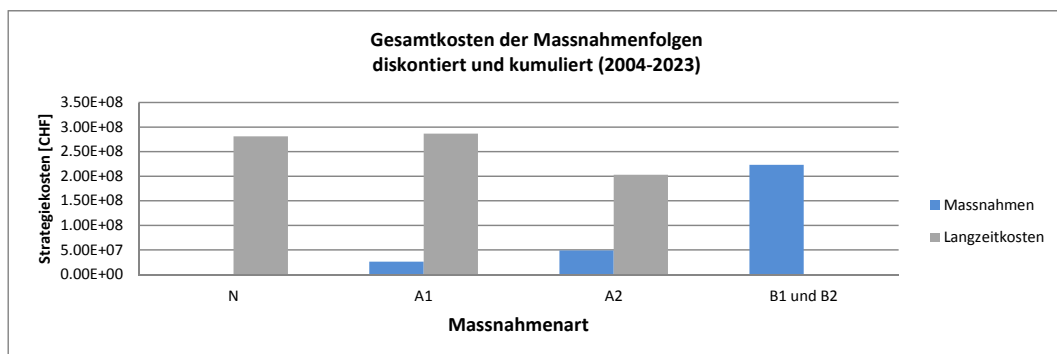
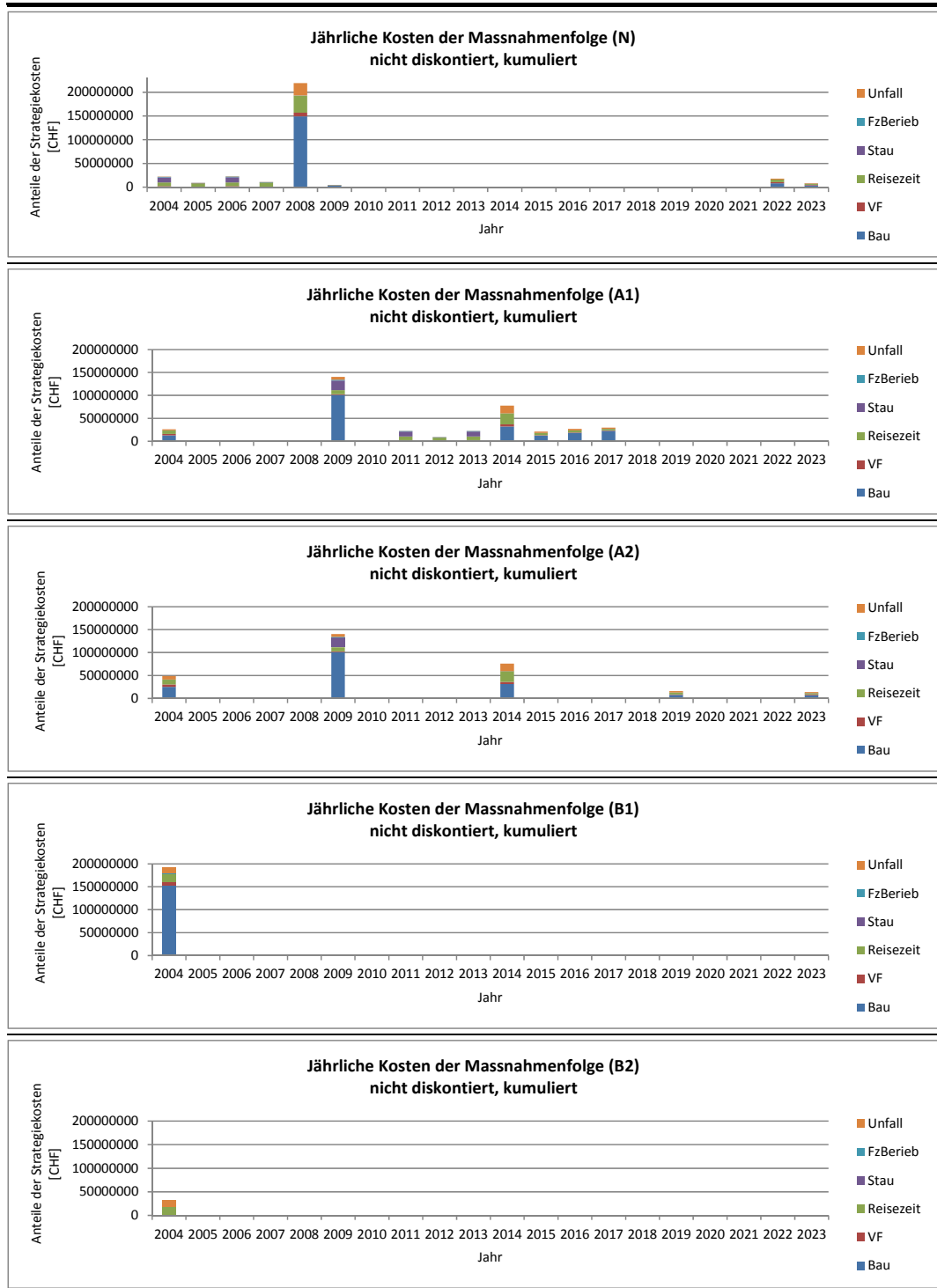


Abb. 3.97 Kummulierte Gesamtkosten der Massnahmenfolgen aller Erhaltungsobjekte getrennt nach Massnahmen- und Langzeitkosten im Fallbeispiel Erhaltungsplanung A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck über den Betrachtungszeitraum der teilsystembezogenen

Abb. 3.98 Jährliche Kosten der Massnahmenfolgen über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren für die Bildung von Baustellen an Autobahnen am Fallbeispiel A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck



Die gebildeten Massnahmenfolgen aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung sind nochmals zusammengefasst in Abbildung 3.98 dargestellt. Dabei werden die jährlich anfallenden und nicht diskontierten Kosten in ihren Anteilen aus der teilsystembezogenen Erhaltungsplanung aufgeführt.

Bildung des Netzwerkmodells für die Optimierung mit BLP

Die Bildung des Netzwerkmodells erfolgt analog Kapitel 3.3.2.

Erstellung des binären linearen Programms BLP

Die Erstellung des binären linearen Programms erfolgt analog Kapitel 3.3.2.

Ergebnisse der Optimierung

Die Optimierung erfolgt ebenfalls durch die Minimierung der Gesamtkosten. Als Randbedingungen können neben der Definition einer maximalen Baustellenlänge und einem minimalen Baustellenabstand in einer Periode auch Budgetgrenzen definiert werden. Analog zum Kapitel 3.3.2 erfolgte eine Aufstellung von Szenarien. Folgende Szenarien hinsichtlich der Kostenumlegung auf die Kanten wurden gewählt:

- Szenario 1: Minimierung der Gesamtkosten ohne Budgetbeschränkung unter Verwendung aller Kostenanteile der Massnahmen- und Verbindungskanten
- Szenario 2: Minimierung der gesamten Strassenbetreiberkosten
- Szenario 3: Minimierung der gesamten Strassennutzerkosten
- Szenario 4: Minimierung der Gesamtkosten mit Längenbeschränkung auf 5 km und einem minimalen Abstand von 10 km der Baustellen in einer Periode
- Szenario 5: Minimierung der Gesamtkosten mit einer Budgetbeschränkung von jeweils 15 Mio in den ersten beiden und jeweils 25 Mio in den letzten beiden Perioden

Die Ergebnisse der Optimierung durch die Minimierung der Gesamtkosten im Hinblick auf die Kosten mit jeweils hervorgehobenem **Minimum** und **Maximum** sind in Abbildung 3.99 dargestellt.

Abb. 3.99 Kosten der unterschiedlichen Szenarien A1 St.Gallen St.Fiden-Rheineck

Nr.	Gesamt	Strassenbetreiber			Strassennutzer		
		Total	Kosten 06/07	Folge- kosten	Total	Kosten 06/07	Folge- kosten
01	200'473'506	166'496'149	162'469'486	4'026'663	33'977'357	31'990'914	1'986'443
02	276'237'862	158'222'925	23'547'345	134'675'580	118'014'937	12'863'231	105'151'706
03	200'793'479	166'936'480	163'041'111	3'895'369	33'856'999	32'029'956	1'827'043
04	243'993'908	165'824'030	43'466'851	122'357'179	78'169'878	17'309'473	60'860'405
05	221'565'505	163'539'190	73'153'779	90'385'411	58'026'315	21'638'740	36'387'575

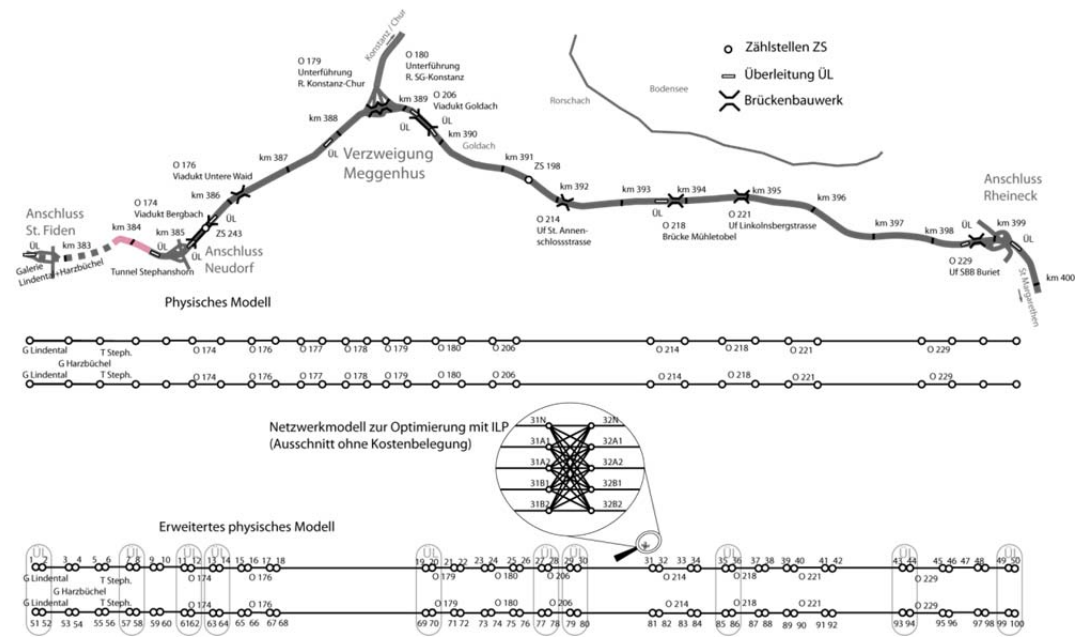
In Abbildung 3.99 wird deutlich, dass das Szenario 01 ohne Beschränkungen und unter Einbezug von Strassenbetreiber- und –nutzerkosten analog zum Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst die geringsten Gesamtkosten beinhaltet. Das Szenario 01 erzeugt nach Szenarion 03 die geringsten Folgekosten für Strassenbetreiber und Strassennutzer.

Die Strassenbetreiberkosten im Vergleich zum Szenario 02 liegen um ca. 5 % höher im Vergleich zu seinen Minimalkosten bei alleiniger Minimierung der Strassenbetreiberkosten. Diese 5 % Mehrkosten des Strassenbetreibers können jedoch zu ca. 71 % Einsparungen beim Strassennutzer führen. Szenarion 02 zeigt den gleichen grossen Nachteil auf. Die Kosten in den Jahren der Baustelle werden für den Strassenbetreiber minimal. Demgegenüber steht ein Maximum an Folgekosten im Vergleich zu allen Szenarien. Notwendige umfangreiche Erhaltungsmassnahmen werden in die Folgejahre verschoben.

Bei einer Betrachtung von Szenario 1 und 3 zeigt sich ein ähnliches Bild zum Fallbeispiel A2/A3 Basel Hagnau-Augst. Strassenbetreiber und Strassennutzer haben annähernd gleiche Kosten. Grundsätzlich werden umfangreiche Massnahmen innerhalb der Baustelle durchgeführt und nicht in die Folgejahre verschoben. Die Szenarien 04 und 05 zeigen auf, dass eingeführte beschränkende Randbedingungen die Strassenbetreiberkosten im Vergleich zum Szenarion 01 reduzieren können (ca. 2-4 %). Dem Strassennutzer entstehen dadurch jedoch in beiden Fällen im Schnitt das Doppelte an Mehrkosten im Vergleich zum Szenarion 01.

Die folgende Abbildungen 3.100 bis 3.102 zeigen die Massnahmen und die verwendeten

Überleitungen in den einzelnen Perioden der verschiedenen Szenarien. Dabei sind die verwendeten Mittelstreifenüberfahrten blau gekennzeichnet. Grau hinterlegte Mittelstreifenüberfahrten sind für diese Verkehrsführung nicht notwendig. Die Massnahmen wurden farbig gekennzeichnet mit N (grün), A1 (gelb), A2 (orange) und B1/B2 (rot).



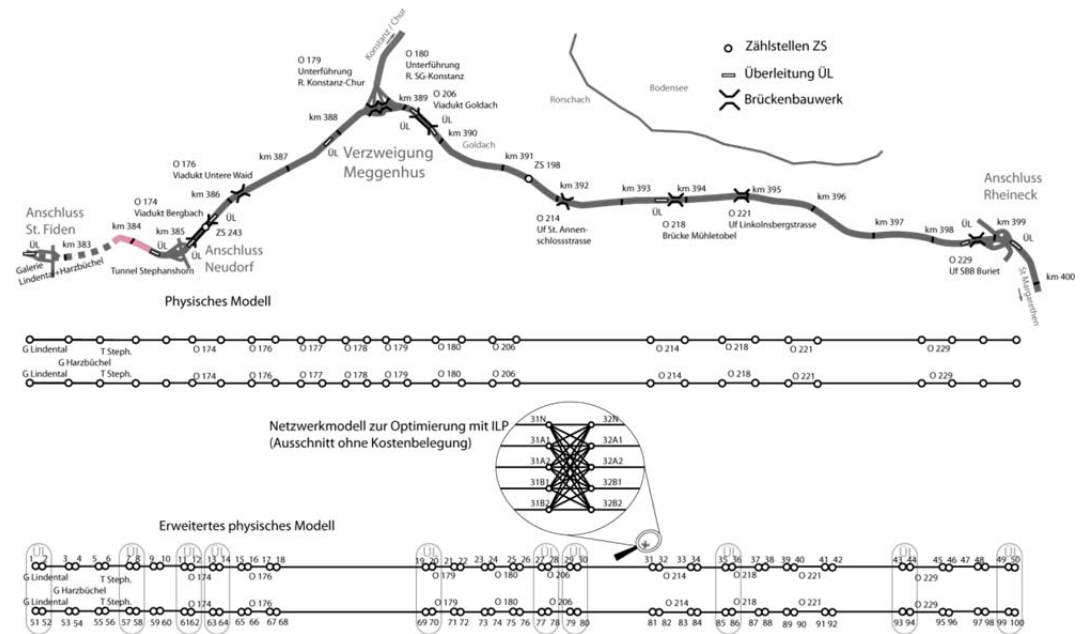
Szenario 1

ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL				
Periode 1																								
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	
B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	N	N	N
B2	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	N	N	N	N
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99	
Periode 2																								
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	
B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	N	N	N
B2	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	N	N	N	N
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99	
Periode 3																								
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	
B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	N	N	N	N
B2	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	N	N	N	N
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99	
Periode 4																								
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	
B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	A2	A2	N
B2	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	N	N	N	N
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99	

Szenario 2

ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL	ÜL				
Periode 1																								
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99	
Periode 2																								
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99	
Periode 3																								
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	
N	A2	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A2	A1	A1	A2	A2	A2	A1	
A1	A2	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A2	A1	A1	A2	A2	A2	N	
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99	
Periode 4																								
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99	

Abb. 3.100 Szenario 1 und 2 im Fallbeispiel A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck



Szenario 5

Periode 1																																
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	
N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N								
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99									
Periode 2																																
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	
N	N	N	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N								
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99									
Periode 3																																
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	
N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2								
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99									
Periode 4																																
2-3	4-5	6-7	8-9	10-11	12-13	14-15	16-17	18-19	20-21	22-23	24-25	26-27	28-29	30-31	32-33	34-35	36-37	38-39	40-41	42-43	44-45	46-47	48-49	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	UL	
N	N	N	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2								
52-53	54-55	56-57	58-59	60-61	62-63	64-65	66-67	68-69	70-71	72-73	74-75	76-77	78-79	80-81	82-83	84-85	86-87	88-89	90-91	92-93	94-95	96-97	98-99									

Abb. 3.102 Szenario 5 im Fallbeispiel A1 St. Gallen St. Fiden-Rheineck

3.3.4 Zusätzliche Problemstellungen

Weitere Analysen für zusätzliche Problemstellungen sind theoretisch möglich, wenn relevante Kostendaten zur Verfügung stehen. So können neben Optimierungsszenarien auch Kosten für die unterschiedlichen Fragestellungen definiert werden und im Anschluss miteinander verglichen werden (z.B. die Anordnung von Fahrbahnverbreiterungen oder zusätzlichen Mittelstreifenüberfahrten). Dies immer unter der Voraussetzung, dass abgestützte Kostendaten vorhanden sind. Mittels der durchgeführte Kostensimulation können verschiedene Szenarien miteinander in Bezug gesetzt und verglichen werden. Mit dieser Methode als Ergänzung zur bisherigen Baustellenplanung bekommt der Ingenieur bei der Entscheidungsfindung ein sinnvolles Argumentationswerkzeug in die Hand, um

- die Erhaltungsplanung auf Gesamtsystemebene durchzuführen,
- sinnvolle Planungsszenarien vorzuschlagen,
- unwirtschaftliches Verkehrsregime oder Budgetkürzungen zu vermeiden und
- eventuell auch Zusatzinvestitionen stichhaltig zu begründen.

In den folgenden Abschnitten werden kurz beispielhaft einige Problemstellungen erklärt und notwendige Kostendaten aufgeführt. Wichtig erscheint, dass für die Varianten die vorhandenen Auswirkungen auf bzw. Konsequenzen für alle berücksichtigten Anspruchsgruppen definiert werden können.

Anordnung von zusätzlichen Mittelstreifenüberfahrten

Wie in den Fallbeispielen gezeigt werden konnte, erfolgt bei der Definition des Verkehrsregimes eine Belegung der notwendigen Mittelstreifenüberfahrten. Soll im Rahmen der Baustellenplanung geprüft werden, inwieweit die Erstellung einer zusätzlichen Mittelstreifenüberfahrt notwendig ist, kann dies ohne grosse Anpassungen des Netzwerkmodells mit Hilfe des Verfahrens durchgeführt werden. Eine Voraussetzung dafür ist die Berücksichtigung der zusätzlichen Mittelstreifenüberfahrt im Netzwerkmodell. Es muss somit im Voraus definiert werden, an welcher Stelle im Autobahnabschnitt eine neue Mittelstreifenüberfahrt erstellt werden sollte. Zusätzlich sind unter anderem folgende Kostendaten notwendig. Dabei werden die

- objektbezogenen Kosten: verschiedener Verkehrsregime, ein eventueller Nutzen der Verkehrsregime, z.B. für den Bauablauf,
- baustellenbedingte Kostenkenngrößen: Neubaukosten, Verkehrsführungskosten von Überleitungen bzw. Verschwenkungen, ein eventueller Nutzen einer Mittelstreifenüberfahrt, z.B. für den Bauablauf oder den späteren betrieblichen Unterhalt

Die notwendigen Kostenkenngrößen für eine Berücksichtigung von Mittelstreifenüberfahrten in einer konkreten Problemstellung sind nochmals in Abbildung 3.103 aufgeführt.

Abb. 3.103 Notwendige Kostenkenngrößen für eine Berücksichtigung von Mittelstreifenüberfahrten

Anspruchsgruppe	Kostenarten	objektbezogen	baustellenbedingt
Strassenbetreiber	Neubaukosten Mittelstreifenüberfahrt ÜL		$C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{cross2}$
	Verkehrsführungskosten des Verkehrsregimes mit Überleitung/Rückführung	$C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{TC}$	$C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{cross1}$
	Verkehrsführungskosten Verkehrsregimes mit Rück-/Verschwenkung	$C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{TC}$	$C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{narrow}$
	Kostenkenngrösse eines eventuellen Nutzens durch die Mittelstreifenüberfahrt		$C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{TC,benefit}$
	Kostenkenngrösse eines eventuellen Nutzens aus einem Verkehrsregime	$C / LC_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{TC,benefit}$	
Strassennutzer	Unfallkosten Überleitung Baustellenanfang		$C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{acc,cross,start}$
	Unfallkosten Rückführung Baustellenende		$C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{acc,cross,end}$
	Unfallkosten Überleitung/Rückführung Baustellenmitte		$C_{[i,j,k][i+1,j',k]}^{acc,cross,site}$
	Unfallkosten je Verkehrsregime auf einer Baustellenstrecke	$C_{[i,j,k][i+1,j,k]}^{acc,site_j}$	

Vergleich von verschiedenen Varianten des Verkehrsregimes

Das Modell eignet sich ebenfalls für einen Variantenvergleich. Kosten können für jede Kante im Netzwerkmodell separat definiert werden. Sollten zwei gleichwertige Verkehrsregime mit einander verglichen werden, sind die im Kostenmodell angegebenen Kostenkenngrößen notwendig. Für jede Variante wird eine Kostengewichtung der Kanten durchgeführt und der Kostenfluss auf den jeweilig notwendigen Kanten manuell geführt. Dies wird für jede Variante separat realisiert und im Anschluss zeigt ein Szenarienvergleich der Kosten die jeweilig bessere Variante auf.

Zusätzliche Massnahmen zur Verhinderung der Leistungsfähigkeitsreduzierung

Ähnlich verhält es sich mit zusätzlichen Massnahmen zur Verhinderung der Leistungsfähigkeit. Es müssen lediglich die Kosten der Massnahmen und deren Konsequenzen innerhalb der Baustellenzeit und eventuell darüber hinaus bekannt sein. Diese Kosten gehen dann ebenfalls in die Gewichtung der Kanten ein.

4 Folgerungen und Empfehlungen

4.1 Folgerungen

4.1.1 Vorbemerkungen

Ausgangspunkt für dieses Forschungsprojekt war das von Hajdin [3; 4; 5; 6] entwickelte Verfahren zur Optimierung von Autobahnbaustellen. In der vorliegenden Arbeit wurde dieses Verfahren in seiner Modelldefinition erweitert. Dadurch erfolgte eine bessere Anpassung an die in der Praxis real existierenden Problemstellungen und Randbedingungen in der Baustellenplanung. Einerseits wurden durch die Erweiterungen die Berücksichtigung der Abhängigkeiten beider Richtungsfahrbahnen und mehrere Zeitperioden möglich. Andererseits wurde als monetäres Wertgerüst ein Kostenmodell entwickelt, welches auf der Grundlage der Kosten-Nutzen-Analyse [vgl.21] Strassenbetreiber und –nutzer sowie Dritte berücksichtigt. Zusätzlich wurde das erweiterte Verfahren erfolgreich an zwei realen Baustellen getestet. Ein Vergleich zwischen den real ausgeführten und den durch die Optimierung erhaltenen Massnahmen konnte aufgrund der unvollständigen Daten (vgl. Kapitel 2.5) nicht durchgeführt werden.

4.1.2 Netzwerkmodellierung

Wie bereits durch Hajdin [3; 4; 5; 6] erfolgreich gezeigt, ist eine Modelldefinition mit Knoten und Kanten, wie sie in der Graphentheorie verwendet wird, bei Autobahnen für die Optimierung sehr geeignet. Gleichzeitig zeigt sich die in Bezug auf die Definitionen in vorhandenen Strassendatenbanken als sehr praxisbezogen [z.B.114]. Dadurch sind die in der Praxis vorhandenen Strassendaten sofort für eine Modelldefinition eines Graphen anwendbar. Die Definition und Bearbeitung des Modells kann unkompliziert von eventuell vorhandenen GIS-Systemen visuell oder nur in einer vorhandenen Listenform der Objekte mit Anfang und Endpunkt für das Kostenmodell angewendet und in Matrixform (Adjazenz- oder Inzidenzmatrix) leicht umgewandelt sowie abgespeichert werden.

Die im erweiterten Modell angewendete Definition von Verbindungs- und Massnahmenkanten erlaubt eine Darstellung der Beziehungen zwischen den Objekten und damit eine Berücksichtigung der Auswirkungen eines Autobahnobjekts auf seine benachbarten Objekte. Die Erweiterungen im Modell ermöglichen gleichfalls eine realistische Abbildung der Verkehrsführung mit Verschwenkungen und Überleitungen auf die gegenüberliegende Richtungsfahrbahn. Mit der Ausdehnung des Modells auf mehrere Zeitperioden ist nicht nur eine Berücksichtigung der Veränderungen der Verkehrsführungen infolge des Bauablaufs nach einer groben Ablaufplanung möglich (vgl. Kapitel 4.1.3). Es stellt mit den Informationen von Ort, Ausführungszeitpunkt und –dauer der optimalen Baustellen über die betrachteten Zeitperioden auch eine praxisgerechte Abbildung von Szenarien für die Entscheidungsfindung bei der kurz- bis mittelfristigen rollenden Planung der Entscheidungsträger dar.

Dieses Modell lässt sich theoretisch auf das gesamte Autobahnnetz und deren untergeordnete Strassennetze erweitern. Gleichzeitig kann die Anzahl der zu berücksichtigenden Zeitperioden erhöht werden. Für eine Modelldefinition sind in dieser Hinsicht keine Grenzen gesetzt. In wie weit dies im Hinblick auf ein Lösung des Optimierungsproblems mit Hilfe eines geeigneten Algorithmus in vertretbarer Rechenzeit sinnvoll ist, bleibt weiterhin Forschungsthema.

4.1.3 Kostenmodell

Das Kostenmodell wurde aus den Zielsetzungen für die Baustellenplanung abgeleitet. Dieses baut auf den Kostendaten der Massnahmenplanung für die Objekte in den einzelnen Teilsystemen auf. Grundsätzlich werden im Modell objektbezogene und baustellenbedingte Kosten berücksichtigt. Dies erfolgt für Strassenbetreiber und -nutzer sowie Dritte. Massnahmenkanten werden mit objektbezogenen Kosten und Verbindungskanten mit baustellenbedingten Kosten belegt. Dies ermöglicht eine Integration der Kosten, welche durch den Einfluss eines Objekts auf andere Objekte und die damit verbundenen Auswir-

kungen entstehen. Ein Beispiel hierfür sind die Staukosten am Anfang einer Baustelle. Diese können unter anderem durch ein Staumodell berechnet werden.

Eine Verkehrsumlagerung zur Bestimmung der Reisezeit und daraus ableitbare Strassennutzerkosten wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Dadurch wird möglich, die Auswirkungen einer Baustelle auf alle anderen Objekte in Form der Auswirkungen auf den Verkehrsfluss im betrachteten Strassennetz zu berücksichtigen. Im vorliegenden Bericht wurden Umfahrrouten infolge der Baustelle nicht und nur die Auswirkungen auf die Objekte unmittelbaren vor und nach der Baustelle berücksichtigt. Für diese Erweiterung wird auf Schiffmann [78] verwiesen.

Analog Hajdin [3; 4; 5; 6] wird durch die Verwendung der Erhaltungsmaßnahmen, mit deren Folgekosten aus der Massnahmenplanung über einen langfristigen Betrachtungszeitraum ein Lebenszyklusansatz [vgl.15] mit eingebracht. Diese objektbezogenen Kosten sind je nach Art der Massnahmen unterschiedlich. Die Art einer Massnahme wird im Modell neben der Angabe der Kosten auch durch die Definition der Dauer in Zeitperioden festgelegt. Die Definition dieser beiden Parameter einer Massnahme ermöglicht eine grobe Berücksichtigung des Bauablaufs.

Eine Kostenerhebung von realen Kostendaten gestaltete sich durch die bisher vorhandene Struktur und Archivierung von Projektdaten sehr schwierig. Einerseits werden die Kostendaten beim Strassenbetreiber in einer vorgegebenen Struktur des Rechnungswesens auf vorhandene Kostenstellen abgelegt. Andererseits sind diese Kostenstellen nicht auf das hier definierte Kostenmodell abgestimmt. Bei der Betrachtung der vorhandenen Kostendaten verschiedener Projekte fällt ebenfalls auf, dass bisher nur Kostendaten zur Verkehrsführung aus der Schlussrechnung (NPK-Daten) der Unternehmung abgelegt wurden. Verschiedene Leistungen des Strassenbetreibers in Bezug auf die Verkehrsführung (z.B. mobile Leiteinrichtungen) und die Verkehrssicherungspflicht (z.B. polizeiliche Massnahmen oder Verkehrslotsen) wurden bisher nicht oder zumindest nicht innerhalb des Projektes erfasst. Diese Leistungen wurden zum Teil verwaltungsintern, das heisst z.B. durch andere Departemente, erbracht. Die Kosten zu diesen Leistungen sollten in Zukunft in den Projektdaten integriert werden.

4.1.4 Optimierungsmethode

Die vorher erzeugte Inzidenzmatrix als binäres lineares Programm stellte die Grundlage für eine Optimierung dar. Diese Matrixdarstellung ermöglicht eine strukturierte Darstellung des Netzwerkstroms, d.h. die Objekte und deren Beziehungen zueinander, der entsprechenden Kosten und der Zielfunktion, welche als Gesamtkosten über den betrachteten Autobahnabschnitt formuliert wird. Zur Lösung, das heisst zur Minimierung der Gesamtkosten, wurde die Branch-and-Bound Methode eingesetzt. Diese liefert bei einem Problem mit zulässigen Lösungen ein optimales Ergebnis. Bei den Fallbeispielen waren alle Szenarien lösbar und es wurde immer ein Optimum unter den gegebenen Randbedingungen gefunden. Die Rechenzeit des verwendeten standardmässigen Solvers bei fünf verschiedenen Massnahmen und vier Zeitperioden über eine Autobahnlänge von maximal 17 km ist überraschend gering, d.h. einige Sekunden. Lediglich bei den Szenarien mit einer Definition von Randbedingungen (Beschränkung der Baustellenlänge bzw. des Budget) wurden Rechenzeiten von einigen Minuten (Budgetgrenze) bis zu einer Stunde (Begrenzung Baustellenlänge) erreicht. Dies für das Fallbeispiel A1 St. Gallen/St.Fiden und bei einem Computer mit Intel Core 7i-262m, 2.70 GHz Prozessor und einem Arbeitsspeicher von 4Gb RAM. Dafür ist dieses Verfahren sehr geeignet, da es schnell die optimale Lösung bringt. Erst wenn die Rechenzeiten übermässig lang werden, muss über einen Wechsel zu heuristischen Verfahren, welche eventuell schneller aber nicht sicher das optimale Ergebnis liefern, nachgedacht werden.

Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit dieser standardmässigen Pakete zur Branch-and-Bound Methode bei einer Ausweitung des Modells über eine grössere Anzahl von Massnahmen oder Zeitperioden sowie eine Erweiterung des betrachteten Autobahnabschnitts sind noch nicht vorhanden.

4.1.5 Sensitivitätsanalyse

Nach einem Einsatz des hier gezeigten Verfahrens an zwei real durchgeführten Baustellen kann kein Vergleich mit den real durchgeführten Massnahmen getroffen werden. Da keine Daten hinsichtlich Zustand bzw. Zustandsentwicklung und geplante bzw. schon durchgeführte Massnahmen zur Verfügung standen, mussten fiktive Zustände der Autobahnabschnitte sowie ein Schadenprozessmodell zugeordnet werden. Generell konnte festgestellt werden, dass die Datenlage zur Erhebung sehr schlecht war. Die aktuelle Kostenerfassung erfolgt auf der Grundlage der Vorgaben aus dem Rechnungswesen. Diese Vorgaben stimmen nicht oder nur unzureichend mit den zur Optimierung notwendigen Kostenkenngrössen überein. Es standen die Schlussrechnungen der ausführenden Bauunternehmung zur Verfügung. Die Kosten des Strassenbetreibers umfassen neben den Planungsleistungen jedoch zusätzlich Kosten für die Umsetzung der Verkehrsführungen, Öffentlichkeitsarbeit, polizeiliche Massnahmen im Rahmen der Baustellen, flankierende Massnahmen sowie den Einsatz von Verkehrsleuten.

Die Eignung des verwendeten Netzwerk- und Kostenmodells hängt von den Inputdaten ab. Das Netzwerkmodell liess sich auf der Grundlage der vorhandenen Strassendaten sehr gut ableiten. Das Kostenmodell konnte nur ungenügend aus den – zumindest für die Forschungsstelle – zur Verfügung stehenden Daten gebildet werden. Es existieren zwei Möglichkeiten bei der jetzigen Datenlage eine Eignung des Kostenmodells herbeizuführen: entweder müssen die zur Verfügung stehenden Daten an Qualität gewinnen oder das Modell muss in seiner Detaillierung verkleinert werden. Je geringer die Detaillierung, umso kleiner ist die Aussagekraft. Grundsätzlich erfolgte die Ableitung des Kostenmodells aus den Zielsetzungen für die Baustellenplanung und auf der Grundlage der vorhandenen Standards [21]. Die Daten sind während der Durchführung einer Baustelle vorhanden und müssen nur in einer für die Baustellenplanung geeigneten Form historisiert abgelegt bzw. erfasst und gespeichert werden. Analog der netzweiten Zustandserfassung sind hier Kostenerhebungen jeder einzelnen Baustelle wünschenswert.

Die zu minimierende Zielfunktion umfasst die Gesamtkosten der Baustelle für alle drei zu berücksichtigenden Anspruchsgruppen. Die langfristigen Kosten auf der Grundlage des Zustands und der erwarteten Zustandsentwicklung, das heisst die Kosten der Erhaltungsmassnahmen und deren Folgekosten, werden für eine Berücksichtigung der Gesamtkosten benötigt, da sonst keine sinnvollen Ergebnisse erzielt werden. Jede Massnahme erzeugt Kosten für Strassenbetreiber, Strassennutzer und infolge Auswirkungen auf Dritte. Diese werden bei einer Minimierung der Gesamtkosten ohne eine Berücksichtigung von Folgekosten auf der Grundlage der Zustandsveränderung über die Zeit vermieden oder einfach hinausgeschoben. Aus diesem Grund wurden auf der Grundlage von fiktiven Zustandsdaten und einer angenommenen Zustandsentwicklung Erhaltungsmassnahmen und deren Folgemaassnahmen für drei Szenarien über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ermittelt. Die daraus abgeleiteten Kosten bildeten die Grundlage für die Sensitivitätsrechnungen.

Grundsätzlich zeigt sich bei einer reinen Berücksichtigung der Strassenbetreiberkosten, dass ein grosser Teil davon Folgekosten sind. Der Unterschied beim Total der Strassenbetreiber zwischen den Szenarien liegt gesamthaft für den Strassenbetreiber im Bereich von zwei bis vier Prozent. Dies erscheint in dieser Grössenordnung etwas unrealistisch. Dies könnte aber auf die getroffenen Annahmen zur Ermittlung der Folgekosten, das heisst Zustände, Zustandsentwicklung und Massnahmentypen der objektbezogenen Erhaltungplanung, zurückgeführt werden.

Die nicht in der Rechnung berücksichtigten Strassennutzerkosten im Gegensatz zum Szenario „Strassennutzer“ annähernd das Doppelte betragen können. Dies bestätigt die Behauptung, dass kleine Kostenänderungen für den Strassenbetreibers grosse Kostenauswirkungen auf den Strassennutzer haben können. Bei sehr hohen Verkehrsbelastungen im Bereich der Leistungsfähigkeit (z.B. Basel-Augst), können die Strassennutzerkosten die Strassenbetreiberkosten im ungünstigen Fall erheblich überschreiten (Faktor 1.6).

Es zeigt sich weiter, dass die Einführung von Randbedingungen, wie sie durch die strategischen Vorgaben definiert sind, zur Beschränkung des Lösungsraumes führt. Im un-

günstigen Fall wird die optimale Lösung dann nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund sollte bei Anwendung eines Optimierungsalgorithmus immer auch die Variante ohne beschränkende Randbedingungen geprüft werden.

4.2 Empfehlungen

Aus den Erkenntnissen dieser Forschungsarbeit können einerseits Empfehlungen für die zukünftige Datenerhebung bei der Durchführung von Baustellen auf Autobahnabschnitten gegeben werden. Andererseits leitet sich daraus weiterer Forschungsbedarf ab.

4.2.1 Erhebung der Daten bei Baustellenprojekten

Die Qualität der Input-Daten ist entscheidend für die Aussagekraft der Ergebnisse bei der Optimierung. Bis jetzt gestaltete sich eine Kostenerhebung im Bereich der Durchführung von Baustellen auf Autobahnen sehr schwierig. Für eine Weiterentwicklung der Planungsinstrumente sind neben den historisierten Zustandsdaten auch detailliertere Kostendaten von grosser Bedeutung. Damit wird es erst möglich, abgestützte Aussagen über mögliche Auswirkungen von Baustellen und darin eingebundene Erhaltungsmassnahmen zu treffen.

Mit der Durchführung dieses Forschungsprojektes zeigte, dass verschiedene Daten unzureichend im Rahmen der Fallbeispiele waren. So fehlten zum Teil makroskopische Daten der Verkehrsbelastung in der Baustelle und eventuell vorhandener Umfahrungsrouten. Es standen unzureichende Kostendaten zur Verkehrsführung und einzelner Erhaltungsmassnahmen zur Verfügung. Ebenfalls können keine Aussagen über das Unfallgeschehen im Baustellenbereich bei unterschiedlicher Verkehrsführung getroffen werden.

Verkehrsbelastung und Leistungsfähigkeit

Die Verkehrsbelastung als Inputgrösse des Strassennutzers ist die Grundlage für die Quantifizierung der Nutzerkosten auf Autobahnstrecken. Je nach Leistungsfähigkeit des Autobahnabschnitts fallen diese unterschiedlich aus. Wie in dieser Forschungsarbeit gezeigt, existieren verschiedene Ansätze zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Autobahnstrecken. Alle Ansätze nutzten als Basis richtungsbezogene mikroskopische Daten von Verkehrserhebungen. Diese werden entweder in mikroskopischen Modellen verwendet oder in richtungsbezogene makroskopische Daten umgewandelt. Auf dem schweizerischen Autobahnnetz stehen zum Teil automatische Zählstellen zur Verfügung, welche auch zum Teil bei den Fallbeispielen in dieser Forschungsarbeit verwendet wurden. Dabei wurde festgestellt, dass zum Teil die Daten während der Durchführung von Baustellen nicht archiviert wurden. Diese Daten sollten dennoch mit dem Hinweis auf Baustellen-tätigkeit abgespeichert werden. Zusätzliche richtungsbezogene Verkehrsdaten im Bereich vor und nach einer Baustelle wären wünschenswert. Inwieweit dies durch mobile Zählstellen regelmässig oder stichprobenartig durchgeführt werden kann, sollte überdacht werden.

Neben den Verkehrsdaten des Autobahnnetzes sind zusätzlich Daten aus dem untergeordneten Strassennetz in Bezug auf existierende Umfahrungsrouten von Bedeutung. Zum Teil existieren aktuell auch hier automatische Zählstellen. Im Rahmen der Fallbeispiele standen jedoch zum Zeitpunkt der Durchführung noch keine Daten zur Verfügung. Es wäre ebenfalls wünschenswert für jede Aus- und Einfahrt richtungsbezogene Verkehrsdaten für die Baustellenplanung zur Verfügung zu haben, um die Umfahringeffekte und eventuelle Rampenschliessungen bei den Strassennutzerkosten mit einfließen zu lassen.

Verkehrsführungen im Bereich der Baustelle

Für eine Evaluation von verschiedenen Verkehrsführungen ist es erforderlich die Unterschiede zwischen den einzelnen Verkehrsregimen zu kennen. Dabei sind nicht Tagesbaustellen oder kurzfristige Verkehrsveränderungen von Bedeutung, sondern das Verkehrsregime während einer Bauphase. Alle verkehrlichen Massnahmen zur Aufrechterhaltung dieser Verkehrsführung sind dabei mit einzubeziehen. Diese Daten ermöglichen dann auch einen Vergleich im Zusammenhang mit Erweiterungsmassnahmen, z.B. einer

vorherigen Verbreiterung der Fahrbahn.

Bei den Kostendaten zur Verkehrsführung sind folgende Details für die verschiedenen Verkehrsregime (z.B. 4+0, 3+1, 5+1) von Bedeutung:

- Installationskosten der Verkehrsführung (Einrichtung und Abbau: Geräte, Personal, fiktive oder reale Materialmiete)
- Unterhalt der Verkehrsführung (Reparaturmassnahmen, Umsetzung)

Gleichzeitig sind die Kosten für die Öffentlichkeitsarbeit, polizeiliche Massnahmen und den Einsatz von Verkehrslotsen zu erheben. Es muss darauf geachtet werden in wie weit diese Massnahmen generell vorhanden sind oder im Zusammenhang mit der einzelnen Verkehrsführung stehen, z.B. bei dem Einsatz von Verkehrslotsen. Werden zusätzliche Mittelstreifenüberfahrten gebaut, sollten diese Kosten ebenfalls separat Berücksichtigung finden.

Erhaltungsmassnahmen

Mit dem Forschungspaket Massnahmenplanung [8; 115] stehen erste standardisierte Kostendaten zu Erhaltungsmassnahmen an den Objekten der Fahrbahnen zur Verfügung. Diese sollten analog der Kunstbauten jedoch regelmässig nach der Durchführung einzelner Erhaltungsmassnahmen erfasst werden. Nach der Einführung der Ermittlung der Kostendaten für kostenbestimmende Bauteile einer jeden durchgeführten Erhaltungsmassnahme bei Kunstbauten für die Erfassung im Systeme KUBA [116] werden bereits die Kostendaten für Erhaltungsmassnahmen an Brücken regelmässig erfasst und bilden eine Grundlage für das Managementsystem der Kunstbauten KUBA. Für die Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen wird diese Grundlage gerade erarbeitet [12].

Bei der Durchführung von Baustellen ist im Zusammenhang mit den Erhaltungsmassnahmen an den einzelnen Objekten eine entscheidende Frage in wie weit die Baustelleneinrichtung der Objektmassnahmen durch die Baustellenausdehnung und die unterschiedliche Verkehrsführung beeinflusst wird.

Gleichzeitig ist die Dauer von einzelnen Erhaltungsmassnahmen an den Objekten je nach Verkehrsführung eine entscheidende Kenngrösse für den Strassennutzer. Diese sollte ebenfalls für die Baustellen erfasst werden. Dies wird durch den Einsatz einer makroskopischen Verkehrsumlagerung möglich. Nachdem Erath [17] die Bedeutung verschiedener Strassenabschnitte im schweizerischen Strassennetz evaluiert hat, ist eine Dauer von Erhaltungsmassnahmen bei Vollsperrung ebenfalls abzuschätzen. Dadurch könnten bei einer Optimierung alle möglichen Varianten der Verkehrsführung inklusive Vollsperrung mit der Erhaltungsmassnahmedauer mit einbezogen werden. Für den Einsatz der Verkehrsumlagerung zur Ermittlung der Strassennutzerkosten in diesem Verfahren wird auf Schiffmann [78] verwiesen.

Unfalldaten

Zur Erhebung von Unfalldaten stehen im Rahmen des Systems MISTRA [117] geeignete Werkzeuge zur Verfügung. Dies sind hoch sensible polizeiliche Daten und unterliegen dem Datenschutz. Zu beachten ist, dass die für die Optimierung übermittelten Unfalldaten den unterschiedlichen im Baustellenbereichen in Längsrichtung (vgl. Kapitel 2.2.3) ohne weiteres zugeordnet werden können. Diese Frage stellt sich vor allem bei Unfällen, welche infolge einer Staubildung an einer Engstelle aufgetreten sind. Die Unfälle sollten regelmässig für die unterschiedlichen Verkehrsführungen erhoben werden, um dies in Form der Unfallkostenraten im Kostenmodell berücksichtigen zu können.

4.2.2 Weiterer Forschungsbedarf

Aus dieser Forschungsarbeit leitet sich neben den Empfehlungen für die Praxis ebenfalls weiterer Forschungsbedarf ab. Dieser umfasst die Stabilität des Verfahrens bei der Ausdehnung des betrachteten Autobahnnetzes, das Verkehrsverhalten im Baustellenbereich sowie die Unfallanalyse im Baustellenbereich.

Stabilität des Verfahrens bei der Ausdehnung des betrachteten Autobahnnetzes

Bisher wurde das erweiterte Verfahren nur für Autobahnabschnitte bis zu 17 km erfolgreich angewendet. Die benötigte Rechenzeit zur Ermittlung der optimalen Baustellenkonfiguration im betrachteten Autobahnabschnitt innerhalb der vier definierten Zeitperioden war überraschend kurz. Es stellt sich die Frage ob dieser Algorithmus bei einer Netzerweiterung des Betrachtungsraumes in Bezug auf die benötigte Rechenzeit immer noch praktikabel ist, oder alternative neue Verfahren zum Einsatz kommen müssen.

Verkehrsverhalten im Baustellenbereich auf Autobahnen

Bisherige Forschungsarbeiten zum Verkehrsverhalten und zur Leistungsfähigkeit von Autobahnen [z.B. 67; 83] sind zum Grossteil nicht auf die Durchführung von Baustellen auf Autobahnabschnitten eingegangen. Obwohl Werdin [83] einen nicht breit abgestützten Ansatz präsentiert und dieser in der Normierung [57] Erwähnung findet, sieht auch Werdin in dieser Richtung weiteren Forschungsbedarf. Es sollte untersucht werden, welchen Einfluss Baustellen generell auf die Verkehrsbelastung haben. Zusätzlich sind auch Umfahrrouten mit einzubeziehen. Ebenfalls sollten unterschiedliche Verkehrsregime bei Baustellen hinsichtlich Verkehrsbelastung und Leistungsfähigkeit untersucht werden. Dabei ist nicht nur der Ansatz einer deterministischen [vgl.83] sondern auch einer stochastischen [vgl.67] Kenngrösse zu verfolgen.

Unfallgeschehen im Baustellenbereich auf Autobahnen

Die Quantifizierung der Unfälle im Baustellenbereich auf Autobahnen wurde durch Bakaba [98] entscheidend vorangebracht. Diese Forschungsarbeit bezieht sich auf das Unfallaufkommen im Baustellenbereich auf deutschen Autobahnen, bezieht aber auch schweizerische Forschungsarbeiten mit ein [94; 96]. Aufbauend auf diese Forschungsarbeit mit der Erweiterung durch den Einbezug von verschiedenen Verkehrsregimen im Baustellenbereich sollte das Unfallgeschehen im Baustellenbereich der schweizerischen Autobahnen vertiefter untersucht werden. Bei dieser Analyse sind neben der Quantifizierung durch Unfallraten analog der bestehenden schweizerischer Unfallforschung unbedingt die Unfallkosten und deren Quantifizierung durch Unfallkostenraten mit einzubeziehen. Dies sollte auch mit dem Hintergrund einer Aktualisierung der bestehenden Normierung [69] geschehen.

Abkürzungen

Begriff	Bedeutung
$ $	Betrag von, Anzahl von Elementen (Mächtigkeit) einer Menge
\in	Element von
\forall	für alle, für jedes
:	für die gilt, mit der Eigenschaft
$=$	gleich
$\{\}$	leere Menge
$\{1\}$	Menge bestehend aus 1
\setminus	ohne
\cap	Schnittmenge
\sum	Summe
\neq	ungleich
\cup	Vereinigungsmenge
€	Euro
AB bzw. A	Autobahn (Nationalstrasse)
Abb.	Abbildung
ABD	Autobahndirektion
AE	Anlageeinschränkungen
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BA	Bauablauf
BAB D	Bundesautobahnen in Deutschland
BE	Beurteilungseinheit
BfS	Bundesamt für Statistik
BLP	GanzzahligBinäres lineares Programm (engl.: binary linear program)
BP	Baustellenplanung
BPR	Bureau of Public Roads (jetzt Federal Highway Administration des U.S. Department of Transportation)
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen
ca.	Circa
CHF	Schweizer Franken
CR	Kapazitätsbeschränkung (engl.: Capacity Constraint / Capacity restriction)
DATEC	Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni
DETEC	Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication
DTV	durchschnittlicher täglicher Verkehr
DWV	durchschnittlicher Werktagsverkehr
EDV	elektronische Datenverarbeitung
EM	Erhaltungsmanagement
et. al.	und andere (Autoren)
ETH Zürich	Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
FB	Fahrbahnen
FGSV	Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen
FOKO	Forschungskommission
FS	Fahrstreifen
Fz	Fahrzeuge
Gb	Gigabyte (Speichergrösse)

Begriff	Bedeutung
GHz	Giga Hertz (Taktfrequenz)
GIS	Geographisches Informationssystem
h	Stunde
h	Stunde
HLS	Hochleistungsstrassen
IBI	Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement
ILP	Ganzzahliges lineares Programm (engl.: integer linear program)
IMC GmbH	Infrastructure Management Consultants Gesellschaft mit begrenzter Haftung
IVT	Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
K+E	Kanalisation und Endwässerung
KB	Kunstbauten
Kfz	Kraftfahrzeug
Kfz/h	Kraftfahrzeug pro Stunde
km	Kilometer
KUBA	Fachapplikation für Kunstbauten des Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr
LP	Lineares Programm (engl. linear program)
LSW	Lärmschutzwände
m	Meter
Mfz	Motorfahrzeug
Mfz/h	Motorfahrzeug pro Stunde
MISTRA	Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr
MPI	Massnahmenplanung
NPK	Normenpositionskatalog
Nr.	Nummer
NS CH	Nationalstrassen der Schweiz
NSG	Nationalstrassengesetz
OBet	Ortbeton
RAM	Random-Access Memory, Arbeitsspeicher des Computers
RBBS	Räumliches Basisbezugssystem
SIA	Schweizerischer Ingenieurs- und Architektenverband
SN	Schweizer Norm
St.	Sankt (in Ortsnamen)
SVA	Schwerverkehrsanteil
transp. SE	transportable Sicherheitseinrichtungen
Trassee	Fachapplikation für Trassee des Managementinformationssystem Strasse und Strassenverkehr
UKR	Unfallkostenrate
UKRa	angepasste Unfallkostenrate (keine pauschalen sondern Ansätze bezogen auf den Untersuchungsabschnitt)
ÜL	Überleitung
UPlaNS	Unterhaltsplanung Nationalstrassen
UR	Unfallrate
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
VF	Verkehrsführung
vgl.	vergleiche
WL	Werkleitungen
z.B.	zum Beispiel
ZS	Automatische Zählstelle der Strassenverkehrszählung Schweiz

Literaturverzeichnis

-
- [1] NSG (1960) Bundesgesetz über die Nationalstrassen, am vom 8. März 1960 (Stand am 1. Januar 2011)
-
- [2] ASTRA (2012) Strassen und Verkehr - Zahlen und Fakten 2012: Jährliche Publikation des Bundesamtes für Strassen, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern
-
- [3] Hajdin, R. und B. T. Adey (2005) An algorithm to determine optimal highway worksites subjected to distance and budget constraints, Vortrag, 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C.,
-
- [4] Hajdin, R. und H. P. Lindenmann (2007) Algorithm for the Planning of Optimum Highway Work Zones, Journal of infrastructure systems, 13 (3) pp. 202-214
-
- [5] Hajdin, R. und B. T. Adey (2006) Optimal worksites on highway networks subject to constraints, Vortrag, IFED International Forum on Engineering Decision Making, Lake Louise, Canada,
-
- [6] Rafi, A., R. Hajdin und U. Welte (2005) Optimierungsprozesse im Management der Strassenerhaltung (MSE), Schriftenreihe, 1109, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [7] ASTRA 15 003 (2008) Verkehrsmanagement in der Schweiz (VM-CH), Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern
-
- [8] Lindenmann, H. P., F. Baumgartner und F. Schiffmann (2008) Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement Fahrbahnen; Synthesebericht, Schriftenreihe, 1259, Schlussbericht VSS 2004/710, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [9] Hajdin, R. (2008) KUBA 4.0, The Swiss Road Structure Management System, Vortrag, Tenth International Conference on Bridge and Structure Management, Buffalo, NY,
-
- [10] Lindenmann, H. P., H. Bär, R. Hajdin, C. Morzier, A. Rafi, H. Scheidegger, C. Scholer und U. Welte (2000) Erhaltungsmanagement der Strassenverkehrsanlagen, Generelle Fachkonzepte MSE 99 / 00, Schriftenreihe, 492, Schlussbericht VSS 2000/413, Bundesamt für Strassen, UVEK, Zürich
-
- [11] Weninger-Vycudil, A. (2003) Entwicklung von Systemelementen für ein österreichisches Pavement Management System, Mitteilungen des Institutes für Straßenbau und Straßenerhaltung der Technischen Universität Wien, Heft 14, Technischen Universität Wien, Wien
-
- [12] ASTRA 83 003 (2012) Managementsystem für die Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen der Schweizer Nationalstrassen (EMS-CH): Fachkonzept, Bundesamt für Strassen ASTRA; Abteilung Strassennetze N; Standards, Forschung, Sicherheit SFS, Bern
-
- [13] Scazziga, I. (2008) Schadensprozesse und Zustandsverläufe, Schriftenreihe, Schlussbericht VSS 2004/712, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [14] Hajdin, R. und L. Peeters (2008) Bridging Data Voids, Advanced Statistical Methods for Bridge Management in KUBA, Vortrag, Tenth International Conference on Bridge and Structure Management, Buffalo, NY, Oktober 2008
-
- [15] Girmscheid, G. und A. Fastrich (2010) Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen, Schriftenreihe, Bern, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen, Bern
-
- [16] Bertalanffy, L. v. (1950) An Outline of General System Theory, The British Journal for the Philosophy of Science, 1 (2) 134-165
-
- [17] Erath, A., J. Birdsall, K. W. Axhausen und R. Hajdin (2009) Vulnerability Assessment of the Swiss Road Network, Vortrag, 88th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C.,
-
- [18] Schulz, C. (2012) The Identification of Critical Road Infrastructures – The Case of Baden-Wuerttemberg, Karlsruher Institut für Technologie; Fakultät für Wirtschaftswissenschaften, Karlsruher Institut für Technologie KIT
-
- [19] Bengtsson, J. und B. Tómasson (2008) Vulnerability and risk analysis of the road infrastructure in Reykjavik, Icelandic Road Administration Vegagerðin, Reykjavik
-
- [20] Fermaud, C., M. Sieber, C. Willi, C. Zulauf, M. Faber, J. Köhler, E. Sabiote und M. Schubert (2009) Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten – Ermittlung des Netzrisikos, Schriftenreihe, 619, Arbeitsgruppe Brückenforschung AGB, Bundesamt für Strassen ASTRA, Zürich
-
- [21] SN 640 820 (2006) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Grundnorm, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-


-
- [22] Shtub, A., J. F. Bard und S. Globerson (1994) *Project management engineering, technology, and implementation*, Prentice Hall, 0-13-556458-1, Englewood Cliffs, NJ
-
- [23] dTIMS™ CT (2004) basic guide, Deighton Associates Limited, Bowmanville (C), am
-
- [24] Walter, F., F. Gubler und H. Sommer (2003) NISTRA: Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte, Ein Instrument zur Beurteilung von Strasseninfrastrukturprojekten unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsziele., Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern
-
- [25] Patidar, V., S. Labi, K. C. Sinha und P. Thompson (2007) Multi-Objective Optimization for Bridge Management Systems, National Cooperative Highway Research Program NCHRP, No. 590, Transportation Research Board TRP, Washington, DC (US)
-
- [26] Li, Z. und K. C. Sinha (2004) A Methodology for Multicriteria Decision-Making in Highway Asset Management, Vortrag, 83th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., Januar 2004
-
- [27] Colonna, P., V. Ranieri und S. d. Amoja (2008) THE MODERN VISION OF THE PERFORMANCE ASSESSMENT OF THE ROADS: THE GLOBAL LEVEL OF SERVICE (GLS) AS A TOOL FOR ITS DETERMINATION, Vortrag, 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., Januar 2008
-
- [28] Minchin, R. E. J., M. I. Hammons, J. Ahn und B. Choubane (2008) A Highway Construction Quality Index for Florida, Vortrag, 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., Januar 2008
-
- [29] Smith, J. T. und S. L. Tighe (2006) THE ANALYTIC HIERACHY PROCESS AS A TOOL FOR INFRASTRUCTURE MANAGEMENT, Vortrag, 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., Januar 2006
-
- [30] Labi, S., V. Patidar, Z. Li und K. C. Sinha (2008) Development of Weights to Reflect the Relative Importance of Transportation Performance Criteria, Vortrag, 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., Januar 2008
-
- [31] Tsamboulas, D. A. (2005) A Decision Tool to Prioritize Multinational Transportation Infrastructure Investments, Vortrag, 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., Januar 2005
-
- [32] Small, P. E. und M. Swisher (1999) Integration of Bridge and Pavement Management Systems: A Proposed Strategy for Asset Management, Vortrag, 8th International Bridge Management Conference, Denver, Colorado, April 26-28, 1999
-
- [33] Lükling, J., T. Herrmann, N. Schindele, B. T. Adey und R. Hajdin (2008) Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmaßnahmen, Schriftenreihe, 1244, Schlussbericht VSS 2004/714, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [34] AASHTO (2010) User and Non-User Benefit Analysis for Highways, 3rd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO, Washington D.C.
-
- [35] Vuksanovic, B. (2010) Manual Cost Benefit Analysis, Republic of Serbia Belgrade, am
-
- [36] Farid, F., D. W. Johnston, B. S. Rihani und C.-J. Chen (1994) Feasibility of Incremental Benefit-Cost, Analysis for Optimal Budget Allocation in Bridge Management Systems, *Transportation Research Record: Maintenance of the Highway Infrastructure*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., p. 77-87
-
- [37] Morcoux, G. und Z. Lounis (2005) Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms, *Automation in Construction*, 14 (1) 129-142
-
- [38] Tang, Y. M. und S. I. J. Chien (2008) Scheduling Work Zones for Highway Maintenance Projects Considering a Discrete Time-Cost Relation, *Transportation Research Record*, (2055) 21-30
-
- [39] Lee, H.-Y. (2009) Optimizing schedule for improving the traffic impact of work zone on roads, *Automation in Construction*, 18 (8) 1034-1044
-
- [40] Jiang, X. M. und H. Adeli (2003) Freeway work zone traffic delay and cost optimization model, *Journal of Transportation Engineering-Asce*, 129 (3) 230-241
-
- [41] Ropohl, G. (1999) *Allgemeine Technologie, eine Systemtheorie der Technik*, Hanser, 9783446196063, München, Wien
-
- [42] Girmscheid, G. (2007) Forschungsmethodik in den Baubetriebswissenschaften, Institut für Bauplanung und Baubetrieb der ETH Zürich, Eigenverlag des IBB an der ETH, Zürich
-
- [43] Stempfle, H. (2008) *Systemtheorie im Brückenbau*, vdf, Hochsch.-Verl. an der ETH, 9783728131911,
-
- [44] Gabriel, R. und D. Beier (2003) *Informationsmanagement in Organisationen*, Kohlhammer W., 9783170172586,
-

-
- [45] Ropohl, G. (2009) *Signaturen der technischen Welt: neue Beiträge zur Technikphilosophie*, Lit Verlag, 9783643104656,
-
- [46] Wiener, N. (1948) *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, (Hermann & Cie) & Camb. Mass. (MIT Press), ISBN 9780262730099, Paris
-
- [47] SN 640 900a (2004) Erhaltungsmanagement (EM), Grundnorm, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [48] SN 640 961 (2001) Erhaltungsmanagement der technischen Ausrüstung (EMT): EMT-Inventar, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [49] SN 640 200a (2003) Geometrisches Normalprofil: Allgemeine Grundsätze, Begriffe und Elemente, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [50] SN 640 914 (2006) Strasseninformationssystem: Linearer Bezug, Netze und ihre Topologie, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [51] Lindenmann, H. P., F. Schiffmann, T. Weber, J. J. Mäder, D. Baer und M. Fontana (2003) Zustandserfassung und -bewertung Nationalstrassen (Fahrbahnen) ZEB-NS (1999-2002) Schlussbericht, Bundesamt für Strassen ASTRA, Zürich
-
- [52] ASTRA (2001) Richtlinie für die Datenerfassung der Kunstbauten der Nationalstrassen in KUBA, Bundesamt für Strassen ASTRA, Abteilung Strassennetze, Bern
-
- [53] SN 640 885c (1999) Signalisation von Baustellen auf Autobahnen und Autostrassen, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [54] ASTRA-Richtlinie Art. Nr. 308 103.d (2002) Berücksichtigung des Unterhalts bei der Projektierung und beim Bau der Nationalstrassen Planung und Durchführung des Unterhalts, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation,
-
- [55] SN 640 017a (1999) Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit: Grundlagenorm, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [56] Lindenmann, H. P. und P. Spacek (2005) Verkehr II, Teil Individualverkehr, Vorlesungsunterlage IVT, D-BAUG, BSc-Studiengang, ETH Zürich
-
- [57] SN 640 018a (2006) Leistungsfähigkeit, Verkehrsqualität, Belastbarkeit: Freie Strecke auf Autobahnen, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [58] SN 640 031 (1991) Projektierung, Grundlagen: Geschwindigkeit als Projektierungselement, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [59] Spacek, P. (2008) Entwurf von Strassen - Grundzüge, Vorlesungsunterlage IVT, D-BAUG, MSc-Studiengang, ETH Zürich
-
- [60] SN 640 925b (2003) Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen (EMF), Zustandserhebung und Indexbewertung, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [61] Regler, M. (2004) Verkehrsablauf und Kapazität auf Autobahnen, Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum,
-
- [62] Wardrop, J. G. (1952) Some theoretical aspects of road traffic research, Proceedings of the Institute of Civil Engineers, pp. 325-378
-
- [63] Leutzbach, W. (1972) *Einführung in die Theorie des Verkehrsflusses*, Springer-Verlag, 9783540057246,
-
- [64] Lighthill, M. H. und G. B. Whitham (1955) On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long, crowded roads, Nr. 1178, p. 317-345
-
- [65] Beckmann, H., F. Jacobs, K.-H. Lenz, R. Wiedemann und H. Zackor (1973) Das Fundamentaldiagramm - eine Zusammenstellung bisheriger Erkenntnisse, Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen Heft 89, Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen (FGSV) e.V., Köln,
-
- [66] Schick, P. (2003) Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses, Schriftenreihe, Heft 35, Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart, Stuttgart
-
- [67] Bernard, M. (2008) Entwicklung eines Bemessungskonzepts für Autobahnabschnitte unter Berücksichtigung der Zufallsgrößen Verkehrsnachfrage und Kapazität in der Risikoanalyse, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich
-
- [68] SN 641 716 (2010) Strassenverkehrssicherheit; Lokalisierung und Rangierung von Unfallschwerpunkten, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [69] SN 641 824 (2010) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Unfallraten und Unfallkostensätze, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-

-
- [70] SIA 469 (1997) Erhaltung von Bauwerken, SIA Verlag, Zürich
-
- [71] FGSV (1997) Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS) – Aktualisierung der RAS-W 86, FGSV-Nr. 132, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Köln, am
-
- [72] SN 640 005b (2010) Verkehrserhebungen: Ganglinien und durchschnittlicher werktäglicher Verkehr, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [73] Dietrich, K. und P. Spacek (1994) Nationalstrasse N2, Basel - Chiasso KAPAZITÄTSUNTERSUCHUNG / Verkehrstechnische Studie zur Beurteilung der heutigen Kapazitätsverhältnisse, Schriftenreihe des IVT, ETHZ, Transporttechnik Institut für Verkehrsplanung, Strassen- und Eisenbahnbau IVT, ETH Zürich, Zürich
-
- [74] SN 640 005a (2001) Verkehrserhebungen: Ganglinien und durchschnittlicher werktäglicher Verkehr (DTV), Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [75] Bernard, M. und K. W. Axhausen (2008) Überprüfung der schweizerischen Ganglinien, Schriftenreihe, 1276, Bundesamt für Strassen ASTRA, Zürich
-
- [76] Berg, W. und K. Troxler (2000) Aktualisierung der Gangliniennorm SN 640 005, Schriftenreihe, 1276, Bundesamt für Strassen ASTRA, UVEK, Bern
-
- [77] Brilon, W. und H. Zurlinden (2003) Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Straßenverkehrsanlagen, Schriftenreihe Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 870, Bau- und Wohnungswesen Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn
-
- [78] Schiffmann, F. (2013) Entscheidungsmodell zur Ermittlung einer optimalen Baustelle an Autobahnen aus gesamtwirtschaftlicher Sicht, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, laufende Forschungsarbeit (Stand April 2013)
-
- [79] FGSV (2001) HBS Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen Ausgabe 2001, FGSV-Nr. 299, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, am
-
- [80] RVS 03.01.11 (1995) Überprüfung der Anlageverhältnisse von Strassen ÜAS, Wien
-
- [81] HCM-85 (1985) Highway Capacity Manual, National Research Council, Washington D.C.
-
- [82] Ponzlet, M. (1996) Dynamik der Leistungsfähigkeiten von Autobahnen : Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflußmodellen, Schriftenreihe // Lehrstuhl für Verkehrswesen, Ruhr-Universität Bochum ;, Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen Ruhr-Univ.
-
- [83] Werdin, H., H. Honermann, R. Laube und I. Belopitov (2004) Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Autobahnen, Schriftenreihe, 1090, Schlussbericht VSS2000/337, Bundesamt für Strassen ASTRA, UVEK, Bern
-
- [84] Ressel, W. (1994) Untersuchungen zum Verkehrsablauf im Bereich der Leistungsfähigkeit an Baustellen auf Autobahnen, Informationen Verkehrsplanung und Strassenwesen, Universität der Bundeswehr München, München - Neubiberg
-
- [85] HCM-2000 (2000) Highway Capacity Manual, National Research Council, Washington D.C.
-
- [86] Spiess, H. (1990) Conical volume-delay functions, Transportation Science, 24 (2) p. 153-158
-
- [87] Brozek, B., J. Litzka und A. Weninger-Vycudil (2009) Entwicklung eines Nutzerkostenmoduls im österreichischen PMS, Schriftenreihe Strassenforschung, Innovation und Technologie Bundesministerium für Verkehr, Wien
-
- [88] SN 640 921 (2005) Strassenverkehrstelematik, Standardisierte Verkehrsinformation, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [89] Ober-Sundermeier, A. (2003) Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognose an Engpässen auf Autobahnen unter besonderer Berücksichtigung von Arbeitsstellen, Schriftenreihe Verkehr, Fachgebiet Verkehrssysteme und Verkehrsplanung, Fachgebiet Verkehrstechnik, Universität Kassel, Kassel
-
- [90] Beckmann, A. und H. Zackor (2000) Untersuchung und Eichung von Verfahren zur aktuellen Abschätzung von Staudauer und Staulängen infolge von Tages- und Dauerbaustellen auf Autobahnen, Schlußbericht zum Forschungsprojekt 03.313/1998/IGB, Universität Kassel, Bau- und Wohnungswesen Bundesministeriums für Verkehrs, Berlin
-
- [91] Kimber, R. M. und E. M. Hollis (1979) Traffic queues and delays at road junctions, TRRL laboratory report, Traffic Systems Division, Traffic Engineering Department, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne
-
- [92] Hess, R. (2006) Optimierte Planung von Arbeitsstellen an Autobahnen auf der Grundlage verkehrlicher Überlastungswahrscheinlichkeiten, Universität Karlsruhe
-

-
- [93] Neubert, L. (2000) Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellulärer Automaten, Fachbereich Physik-Technologie, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg
-
- [94] Spacek, P., M. F. Laube, G. Santel und W. Schüler (2005) Baustellen an Hochleistungsstrassen, Verkehrstechnische Massnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Verkehrsflusses, Schriftenreihe, 1124, Schlussbericht VSS 1999/127, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [95] Laube, M. F. (2001) Verkehrsverhalten und Unfallgeschehen im Bereich von Autobahnbaustellen, Vortrag, Swiss Transport Research Conference STRC, Ascona,
-
- [96] Spacek, P., C. Heil und N. Leemann (2008) Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich, Schriftenreihe, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [97] Boesefeld, J., W. Emde und H. Hamester (1983) Ermittlung der quantitativen und qualitativen Veränderung des Unfallgeschehens infolge vorgegebener Baustellensituationen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Strassenbefestigungen, Bau- und Wohnungswesen Bundesministerium für Verkehr, Bonn
-
- [98] Bakaba, J. E., M. Enke, A. Heine, C. Lippold, R. Maier, J. Ortlepp und R. Schulz (2012) *Untersuchung der Verkehrssicherheit im Bereich von Baustellen auf Bundesautobahnen*, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., 978-3-939163-45-9, Berlin
-
- [99] Khattak, A. J., A. J. Khattak und F. M. Council (2002) Effects of work zone presence on injury and non-injury crashes, *Accident Analysis & Prevention*, 34 (1) 19-29
-
- [100] ASTRA (2003) Fachkonzepte Gesamtsystem, Bundesamt für Strassen ASTRA,
-
- [101] Fischer, L.-H. (2009) Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Behelfsverkehrsführungen an Autobahnarbeitsstellen unter Berücksichtigung der Querschnittsabmessungen, Fakultät Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar
-
- [102] SN 640 822a (2009) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Zeitkosten im Personenverkehr, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [103] SN 640 823 (2007) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Zeitkosten im Güterverkehr, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [104] BfS (2012), Löhne, Erwerbseinkommen – Indikatoren, Bundesamt für Statistik BfS, http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/03/04/blank/key/lohnentwicklung/nominal_und_real.html,
-
- [105] SN 640 828 (2009) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr, Externe Kosten, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [106] Hillier, F. S. und G. J. Lieberman (2005) *Introduction to operation research*, McGraw-Hill, 007-123828-X, Singapore
-
- [107] Grieder, M. (2012) Projektsituation N3 Basel Hagnau-Augst am 28.06.2012
-
- [108] ASTRA (2012), Messstellennetz, dynamische Karte der Messstellenstandorte, Bundesamt für Strassen, <http://www.vde.admin.ch/>,
-
- [109] ASTRA (2008) KUBA Technisches Handbuch, Bern
-
- [110] Hajdin, R., F. Salamé, B. Schädler und A. Battiston (2000) KUBA-MS, Einheitskosten, Version 2.0, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern
-
- [111] Fastrich, A. (2011) Entwicklung, Bewertung und Optimierung von lebenszyklusorientierten Erhaltungsstrategien im Strassenunterhalt, Institut für Bau- und Infrastrukturmanagement IBI, ETH Zürich
-
- [112] ASTRA (2012), Daten der Schweizerische automatische Strassenverkehrszählung (SASVZ) und Schweizerische Strassenverkehrszählung (SSVZ), <http://www.astra.admin.ch/verkehrsdaten/00297/index.html?lang=de>, 27.02.2012
-
- [113] SN 640 824 (2009) Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Unfallraten und Unfallkostensätze, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [114] SN 640 911 (2006) Strasseninformationssystem: Linearer Bezug, Grundnorm, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS), Zürich
-
- [115] Gnehm, V. (2008) Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen, Standardisierte Erhaltungsmassnahmen, Schriftenreihe, 1235, Schlussbericht VSS 2004/711, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
-
- [116] ASTRA (2011) Richtlinie zur Datenerfassung der Kunstbauten der Nationalstrassen in KUBA, Bundesamt für Strassen ASTRA, Zürich
-
- [117] ASTRA (2010) Mistra News Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern, am Mai 2010
-

Projektabschluss

 <p>Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra</p>	<p>Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK Bundesamt für Strassen ASTRA</p>
---	---

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 04.04.2013

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA2006/007

Projekttitel: Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen

Enddatum: 17.04.2013

Texte

Zusammenfassung der Projektresultate:

Zentrale Fragestellung des Forschungsvorhabens war die Suche nach einem Verfahren zur Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen, d.h. der optimalen Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen eines längeren Autobahnabschnittes. Eine erste Idee zur Beantwortung dieser Fragestellung bildete eines von HAJDIN (2005) entwickeltes Verfahren. In der vorliegenden Arbeit wurde dieses Verfahren in seiner Modelldefinition erweitert. Dadurch erfolgte eine bessere Anpassung an die in der Praxis real existierenden Problemstellungen und Randbedingungen in der Baustellenplanung.

Auf der Grundlage der Graphentheorie konnte ein dreigliedriges Verfahren zur Planung von optimalen Baustellen auf Autobahnen entwickelt werden. Dabei erfolgte zuerst eine Abgrenzung der Anlageverhältnisse für Baustellen auf Autobahnen in einem Netzwerkmodell in Raum, Zeit und Inhalt. Dieses ermöglichte die Abbildung von verschiedenen temporären Verkehrsführungen im Baustellenbereich. Dabei erfolgte der Einbezug der vorhandenen Mittelstreifenüberfahrten und der dadurch beeinflussten gegenüberliegenden Richtungsfahrbahn. Für die Baustellenausführung wurde ein Zeithorizont von vier Halbjahresperioden berücksichtigt. In einem zweiten Schritt wurde ein Kostenmodell definiert, welches neben den Strassenbetreiberkosten auch die Strassennutzerkosten und die Kosten der Auswirkungen auf Dritte enthält. Durch die Struktur des Netzwerkmodells und die Definition des Kostenmodells liessen sich einerseits die objektbezogenen und andererseits die baustellenbezogenen Kosten abbilden und damit auch berücksichtigen. In einem dritten Schritt wurde als Optimierungsverfahren die Branch-and-Bound-Methode für die Anwendung in einem ganzzahlig linearen Programm ausgewählt. Damit wurde es möglich in Verbindung von Netzwerkmodell und Kostenmodell einen optimalen Plan für die Durchführung der erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen unter Verkehr einer entsprechenden Baustelle unter den gegebenen Randbedingungen zu finden.

Forschung im Strassenwesen des UVEK: Formular 3 Seite 1 / 3



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Zielerreichung:

Das Ziel dieser Forschungsarbeit bestand darin, ein Verfahren zur Optimierung von Baustellen zu suchen oder zu entwickeln. Das Verfahren sollte die Gesamtkosten der Massnahmen, d.h. einerseits die Strassenbetreiberkosten auf Basis von Lebenszykluskostenbetrachtungen und andererseits die Strassennutzerkosten sowie die Kosten der Auswirkungen auf Dritte, berücksichtigen. Zusätzlich sollten Möglichkeiten und Grenzen des entwickelten Verfahrens und dessen Zweckmässigkeit zum Einsatz für die Praxis anhand von konkreten Beispielen von Autobahnabschnitten aufgezeigt werden. Das Ziel konnte grundsätzlich erreicht werden. Jedoch musste infolge teilweise fehlender Datengrundlagen bei den Praxisbeispielen auf Annahmen beruhende Kostenkennwerte zurückgegriffen werden. Als Resultat liegt ein zumindest an zwei Beispielen validiertes Verfahren zur Optimierung der Baustellenplanung vor, welches sich auf die Fragestellung der Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen an Autobahnbaustellen unter Verkehr anwenden lässt.

Folgerungen und Empfehlungen:

In einem Praxistest konnte die Anwendung dieses dreigliedrigen Verfahrens an zwei real existierenden Baustellenabschnitten erfolgreich getestet werden. Dabei zeigte sich das Netzwerk- und Kostenmodell in Verbindung als sehr einfach auf die Strasseninfrastruktur anwendbar. Durch die entwickelten Erweiterungen konnten neben den Massnahmen auch die Verkehrsführung mit vorhandenen Mittelstreifenüberfahrten abgebildet werden. Das Kostenmodell berücksichtigt im Ansatz alle theoretisch ansetzbaren Kosten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass in der Praxis noch Untersuchungen zu einzelnen Kostenarten angestellt werden müssen (z.B. Verkehrsführungskosten), um mit diesem Modell realitätsnahe Ergebnisse zu erzielen. Zusätzlich sind in der vorliegenden Arbeit die Nutzerkosten in Bezug zur Reisezeit statisch ermittelt worden. Dabei wurden Umfahrungen des Baustellenbereichs durch einen Teil der Strassennutzer nicht berücksichtigt. Diese spielen in der Realität jedoch eine Rolle. Die gewählte Optimierungsmethode zeigte sich in der gewählten Struktur der mathematischen Programmierung des ganzzahligen linearen Programms mit Inzidenzmatrix als praktikabel. Die Lösung mit der Branch-and-Bound-Methode war schliesslich zielführend. Inwieweit sich diese Ansätze bei einem grösseren Netzbereich bewähren bleibt weiter ein Forschungsthema. In Zukunft sollten für die monetäre Abbildung im Modell zusätzliche Grundlagen wie z.B. das Unfallgeschehen und das Verkehrsverhalten im Baustellenbereich zur allfälligen Berücksichtigung im Modell erforscht werden.

Publikationen:

Hajdin, R. und B. T. Adey (2005) An algorithm to determine optimal highway worksites subjected to distance and budget constraints, Vortrag, 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., Januar 2005
Rafi, A., R. Hajdin und U. Welte (2005) Optimierungsprozesse im Management der Strassenerhaltung (MSE), Schriftenreihe, 1109, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern
Hajdin, R. und H. P. Lindenmann (2007) Algorithm for the Planning of Optimum Highway Work Zones, Journal of infrastructure systems, 13 (3) pp. 202-214

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Lindenmann

Vorname: Hans Peter

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

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Bearbeitung des Forschungsvorhabens führte zu einer praxistauglichen Erweiterung eines bestehenden Verfahrens. Es ermöglicht eine Optimierung eines Realisierungsplanes zur Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen unter Verkehr an Autobahnbaustellen unter Berücksichtigung aller relevanten Kostenkenngrößen. Das Produkt in Form einer allgemein anwendbaren Methode unter Verwendung eines dazu entwickelten Informatiktools auf der Basis einer Branch-and-Bound Optimierung lässt sich in der vorliegenden Form direkt für praktische Fragestellungen bei Autobahnbaustellen anwenden. Zum Nachweis dafür wurde das Verfahren im Rahmen von zwei längeren Autobahnabschnitten der Schweizerischen Nationalstrassen geprüft. Damit liessen sich die Zielsetzungen des Forschungsvorhabens weitgehend erfüllen. Allerdings war der Zeitaufwand unverhältnismässig hoch und kann nur zum Teil auf die schwierige Datenbeschaffung zurückgeführt werden.

Umsetzung:

Das hier erarbeitete Verfahren zur Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen erscheint vielversprechend. Es dürfte jedoch noch weitere Entwicklungsschritte bis zur allgemeinen, breiten Anwendungsreife erfordern, um sich später in der Praxis etablieren zu können. Die heute vorliegende Fassung lässt sich ohne Unterstützung der Entwickler kaum von Fachleuten selbständig einsetzen, auch wenn alle Grundlagen allgemein zur Verfügung stehen. Eine allfällige Normierung im jetzigen Zeitpunkt erscheint zu früh. Vielmehr wäre die Anwendung des Verfahrens an weiteren Beispielen anzustreben um weitere Erfahrungen damit zu sammeln.

weitergehender Forschungsbedarf:

- Unfallgeschehen und das Verkehrsverhaltens im Baustellenbereich
- Methodik zur Ermittlung von Kostenkenngrößen der Verkehrsführung

Einfluss auf Normenwerk:

- im heutigen Zeitpunkt kein Einfluss
- eine spätere Normierung des Verfahrens erscheint möglich

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Müller Vorname: Hansruedi

Amt, Firma, Institut: gsi Bau- und Wirtschaftsingenieure AG

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission: Postfach, CH-4002 Basel

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1356	SVI 2007/014	"Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen Coopération dans les gares et arrêts Coopération at railway stations and stops"	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs Activity oriented analysis of induced travel demand Analyse orientée aux activités du trafic induit	2012
1361	SVI 2004/043	"Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung Approches innovantes de la gestion du stationnement Innovative approaches to parking management"	2012
1357	SVI 2007/007	"Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars? L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?"	2012
1360	VSS 2010/203	"Akustische Führung im Strassentunnel Acoustical guidance in road tunnels Guidage acoustique dans les tunnels routiers"	2012
1365	SVI 2004/014	"Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining? De nouvelles découvertes sur le comportement de mobilité par Data Mining? New findings on the mobility behavior through Data Mining?"	2011
1359	SVI 2004/003	Wissens- und technologientransfer im Verkehrsbereich Know-how and technology transfer in the transport sector Transfert de savoir et de technologies dans le domaine des transports	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online –Daten Pronostics de trafic avec des données en temps réel Traffic forecast with real-time data	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen Principes de bases concernant la conception, la construction et la durabilité de voies de raccordement Basic Principles on the Design, Construction and Sustainability of Sidings	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betongranulat aus Betongranulat	2011
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
1371	ASTRA 2008/017	"Potenzial von Fahrgemeinschaften Potentiel du covoiturage Potential of Car Pooling"	2011
1374	FGU 2004/003	"Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schwiessnähte von KDB Développement d'une méthode d'essais non-déstructif pour des soudures de membranes polymères d'étanchéité Development of a nondestructive test method for welded seams of polymeric sealing membranes"	2012
1375	VSS 2008/304	"Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen Signalisations dynamiques sur des routes principales Dynamic signalling at primary distributors"	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	"Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau Expériences dans la construction de ponts en Suisse Experiences in Swiss Bridge Construction"	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	"Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen Harmonisation of procedures and user interface in Tunnel-Process Control Systems Harmonisation des processus et des interfaces utilisateurs dans les systèmes de supervision de tunnels "	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1380	ASTRA 2007/009	"Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität Mode of action and potential of combined mobility Mode d'action et le potentiel de la mobilité combinée"	2012
1381	SVI 2004/055	"Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr Bénéfices liés à une réduction des temps de parcours du trafic voyageur Benefits of travel time savings in passenger traffic"	2012
1383	FGU 2008/005	"Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel Influence de l'écoulement souterrain sur le gonflement du Keuper gypseux dans le Tunnel du Chienberg Influence of groundwater flow on the swelling of the Gipskeuper formation in the Chienberg tunnel"	2012
1386	VSS 2006/204	"Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich Réflexions du trafic routier aux ouvrages d'art Noise reflections on structures in the street"	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	"Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen Data storage in tunnel process control systems Enregistrement ds données de systèmes de supervision de tunnels"	2012
649	AGB 2008/012	"Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen Exigences par rapport à la résistance à la carbonatation des bétons Requirements for the carbonation resistance of concrete mixes"	2012
650	AGB 2005/010	"Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen Résistance à la corrosion des aciers d'armature inoxydables Use of stainless steels in concrete structures"	2012

