

Entwicklung eines Bauwerks-Management- Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 50



bast

Entwicklung eines Bauwerks-Management- Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3

von

Ralph Holst

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 50

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M- Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 02 244
Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems
für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 3-86509-473-2

Bergisch Gladbach, Mai 2006

Kurzfassung – Abstract

Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3

Das Bundesfernstraßennetz beinhaltet eine große Anzahl von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken, wie Tunnel, Lärmschutzeinrichtungen und Stützwände. Die für diese Bauwerke aufzustellenden Erhaltungsprogramme erfordern nicht nur erhebliche Geldmittel, sondern beeinflussen auch Wirtschaft und Gesellschaft insgesamt. Neben den ständig wachsenden Verkehrsbeanspruchungen, insbesondere im Schwerverkehr durch zunehmende Anzahl, Auslastung und zulässige Gewichte der Fahrzeuge, zwingen die ungünstiger werdende Altersstruktur und der wirtschaftliche Einsatz der zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel alle Beteiligten dazu, die Erhaltung der Bundesfernstraßen zu systematisieren, um auch zukünftig den Verkehrsteilnehmern eine ausreichende Qualität der Verkehrswege zu sichern. Diese Aufgabe wird in Zukunft durch die Anwendung von individuellen Computerprogrammen im Rahmen eines umfassenden Management-Systems (Bauwerks-Management-System, BMS) unterstützt und erleichtert.

Das BMVBW realisiert ein umfassendes Bauwerks-Management-System (BMS) mit Teilmodulen für Bundes- und Länderverwaltungen, welches als Hilfsmittel für die Erstellung von Erhaltungsplanungen dient und als Controlling-Instrument die Realisierung von Zielen und Strategien ermöglicht. Angestrebt werden damit eine bundesweite Vereinheitlichung von Planungsverfahren sowie die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Erhaltung der Bauwerke des Bundesfernstraßennetzes.

Im Rahmen des AP-Projektes 02 244/B4 „Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems (BMS) für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3“ werden die Entwicklung der Stufe 3 „Bewertungsverfahren auf Netzebene“ des Bauwerks-Management-Systems für die Straßenbauverwaltungen der Länder und die Umsetzung in die Verwaltungspraxis beschrieben.

Der Schlussbericht beschreibt die bereits existierenden Regelungen und Verfahren der Stufe 3 des BMS zum Einsatz in Straßenbauverwaltungen sowie diejenigen Entwicklungen, die derzeit für Computeranwendungen bereitgestellt werden.

Wesentliche Einzelthemen sind Erhaltungsplanung, Optimierung auf Netzebene, Multiple-Knapsack-Probleme und Erhaltungsstrategien.

Development of a management system for the maintenance of structures for the German trunk road network, level 3

The federal road network of Germany contains a large number of highway structures like bridges, tunnels, retaining walls and others engineering structures. The maintenance programs to be prepared for this purpose not only require a high budget, but also influence the economy and society as a whole. Due to growing volumes of traffic and higher weights of trucks, bridges are subjected to increasing loads which implies that maintenance costs will be rising in the future. Considering the fact that financial resources become continuously tighter, the maintenance costs have to be spent in a way to obtain the greatest possible benefits. This task will in the future be supported by the application of individual computer programs in the frame of a comprehensive Management System (Bridge Management System, BMS).

Firstly, the BMS is to provide the Federal Ministry with an overview of the current situation at the overall network level, and allow it to come to financial requirements as well as strategies for realising long-term objectives. Secondly, the states and authorities are to be supplied with recommendations for performing improvements at the object level and the state network level in compliance with given strategies and budgetary restrictions.

Some of the above mentioned topics have already been realised. Computer programs are currently being prepared. However, some essential issues are still in the development phase.

The final report of AP 02 244/B4 "Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3" describes the existing regulations and procedures as well as those which are going to be developed in phase 3 in the frame of the development of the BMS for state application.

Important topics are maintenance planning, optimisation on network level, multiple-knapsack-problematic and maintenance strategies.

Inhalt

1	Einführung	7	4.2.5	Zustandsentwicklung der Bauteilgruppe „Verschleißbauteile“	24
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	7	4.2.6	Der Duale Bestandwert als Konzept für den Bestandwert	27
1.2	Vorgehen	7	4.3	Strategien	28
2	Begriffliche Grundlagen	9	4.3.1	Die Entscheidungsregel „Grundhafte Instandsetzung gegenüber Ersatz“	28
3	Verfahren zur Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen auf Netzebene (BMS-EP)	10	4.3.1.1	Überbauten – Grundhafte Instandsetzung	28
3.1	Problemstellung	10	4.3.1.2	Überbauerneuerung	29
3.2	Lösungsansatz	10	4.3.1.3	Weitere Bauteilgruppen (Verschleißbauteile)	29
3.2.1	Das Multiple-Choice-Knapsack-Problem	11	4.3.2	Simulation von Neubauten	30
3.2.1.1	Algorithmus	12	4.3.2.1	Motivation und Ansatz	30
3.3	Maßnahmenbewertung	12	4.3.2.2	Integration geplanter Baumaßnahmen	30
3.3.1	Algorithmus	13	4.3.2.3	Erzeugung von Neubaumaßnahmen auf Basis einer jährlichen Investitionssumme	31
3.4	Budgetknappheit und Budgetplanung	13	4.3.3	Einfügen eines Finanzkorridors	33
3.4.1	Algorithmus für die periodenübergreifende Planung	14	4.4	Systemstruktur	34
3.4.2	Algorithmus für die Mindesterhaltungsplanung	15	4.5	Darstellung der Simulationsergebnisse	34
3.4.3	Algorithmus für die periodenweise Optimierung	16	5	Weitere Entwicklungsschritte	35
3.5	Fachliche Feinkonzeption	16	6	Zusammenfassung	35
3.5.1	Systemstruktur und Schnittstellen	16	7	Literatur	36
3.5.2	Rechenkern	17			
4	Verfahren zur Szenarienbildung	18			
4.1	Aufgabenstellung	18			
4.2	Der objektbezogene Ansatz für die Szenarienbildung	19			
4.2.1	Motivation	19			
4.2.2	Berücksichtigung der Bauteilgruppenzustandsnoten aus SIB-Bauwerke	21			
4.2.3	Besonderheiten kleiner Brücken	21			
4.2.4	Zustandsentwicklung der Bauteilgruppe „Überbau“	22			

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Bundesfernstraßennetz mit seiner zentralen Lage in Europa trägt die Hauptlast des Transitverkehrs und wird durch den erweiterten europäischen Binnenmarkt ständig zunehmende Verkehrsbelastungen aufnehmen müssen. Das Anlagevermögen des Bundesfernstraßennetzes beträgt 170 Mrd. Euro; davon entfallen rund 50 Mrd. Euro auf Bauwerke (Brücken, Tunnel, Stützbauwerke u. a.). Bereits geringe Störungen im Netz durch Verkehrsbeschränkungen oder durch den Ausfall einzelner Anlagenteile führen zu starken Verkehrsbehinderungen mit erheblichen Folgekosten für den Straßennutzer und die Volkswirtschaft sowie zu negativen Auswirkungen auf die Umwelt.

Die Erhaltung der Bundesfernstraßen ist eine Aufgabe zur langfristigen Sicherung der Mobilität von Wirtschaft und Gesellschaft. Anzustreben ist eine nachhaltige Entwicklung, d. h., die Bedürfnisse der Gegenwart sind zu befriedigen, ohne zu riskieren, dass zukünftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht mehr befriedigen können. Dies beinhaltet wirtschaftliche Effizienz unter Berücksichtigung von sozialer und ökonomischer Verantwortung. Im Fall der Bauwerkserhaltung bedeutet dies die Sicherstellung des Substanz- und Gebrauchswertes sowie des derzeitigen Sicherheitsstandards unter Berücksichtigung von Umweltgesichtspunkten.

Neben den ständig wachsenden Verkehrsbeanspruchungen, insbesondere im Schwerverkehr durch zunehmende Anzahl, Auslastung und zulässige Gewichte der Fahrzeuge, zwingen die ungünstiger werdende Altersstruktur und der wirtschaftliche Einsatz der zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel alle Beteiligten dazu, die Erhaltung der Bundesfernstraßen zu systematisieren, um auch zukünftig den Verkehrsteilnehmern eine ausreichende Qualität der Verkehrswege zu sichern.

Wesentlicher Baustein eines künftigen Gesamtsystems Straßenerhaltung ist ein umfassendes Bauwerks-Management-System (BMS), mit dem der Bauwerksbestand auf Objekt- und Netzebene umfassend erfasst und bewertet werden kann und das zur Unterstützung von Bund und Ländern bei der Planung und Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen eingesetzt werden soll. Die besonderen Randbedingungen hinsichtlich des Bauwerksbestands und der gesetzlich vorgegebenen Verwal-

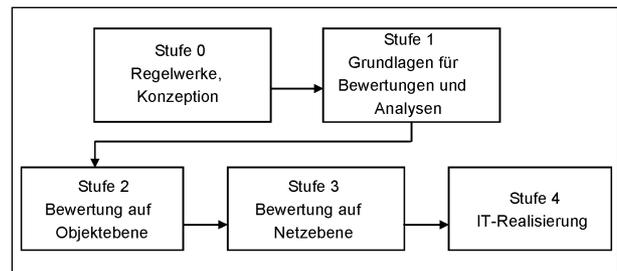


Bild 1: Stufenplan zur Entwicklung des BMS zum Einsatz auf Länderebene

tungsstruktur sind als wesentliche Voraussetzungen zu berücksichtigen.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVWB) die Konzeption des zukünftigen BMS sowie einen Stufenplan zur Realisierung erarbeitet [1]. Die Konzeption sieht eine Aufteilung in Planungs- und Realisierungsprozesse der Länderverwaltungen sowie Controllingprozesse der Bundesverwaltung vor, die jeweils in eine Anzahl unterschiedlicher Themenfelder untergliedert sind.

Der Stufenplan stellt die einzelnen Realisierungsschritte des BMS zum Einsatz auf Länderebene dar (siehe Bild 1.)

Die Ausgangsstufe 0 wurde im Jahr 1998 mit der Bereitstellung von Regelwerken und Konzeptionen realisiert. Die Stufen 1 und 2 folgten im Jahr 2003. Stufe 3 beinhaltet die Entwicklung von Verfahren zur Bewertung auf Netzebene sowie zur Erstellung von Erhaltungsprogrammen und Stufe 4 die Realisierung dieser Verfahren in Form von Computerprogrammen zum Einsatz in den Länderverwaltungen.

Dieser Bericht stellt die Fortsetzung des AP-Projektes 99245/B4 „Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems (BMS) für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 1 und 2“ dar. Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Bereitstellung der in Bild 1 dargestellten Stufe 3 des Bauwerks-Management-Systems (BMS) als Grundlage für die Realisierung von Computerprogrammen zum Einsatz in den Straßenbauverwaltungen.

1.2 Vorgehen

Zur Entwicklung der Stufe 3 war es erforderlich, Teilaufgaben abzugrenzen und mit dem BMVWB sowie Bund/Länder-Gremien abzustimmen. Die Bearbeitung der Teilaufgaben erfolgte im Rahmen

von Forschungsvorhaben, die aus Ressortmitteln des BMVBW sowie aus Haushaltsmitteln der BAST finanziert wurden. Die fachliche Betreuung und Koordinierung dieser Forschungsvorhaben erfolgten unter Leitung der Bundesanstalt für Straßenwesen in der Arbeitsgruppe „Entwicklung des Bauwerks-Management-Systems“ des Bund/Länder-Hauptausschusses Brücken- und Ingenieurbau. Im Einzelnen wurden die folgenden Vorhaben durchgeführt. Da die Stufe 3 auch auf Forschungsvorhaben der Stufen 1 und 2 zurückgreift, sind an dieser Stelle die Forschungsvorhaben aller drei bisher durchgeführten Stufen aufgeführt.

Stufe 1

FE 15.297/1998/HRB, Erarbeitung von Modellen zur Schadens- und Zustandsentwicklung, KÖNIG und HEUNISCH, Leipzig

FE 15.318/1999/HRB, Entwicklung eines Kataloges von Erhaltungsmaßnahmen, KÖNIG und HEUNISCH, Leipzig

FE 15.319/1999/HRB, Ermittlung des Eingreifzeitpunktes für Erhaltungsmaßnahmen an Brücken und Ingenieurbauwerken, KÖNIG und HEUNISCH, Leipzig

FE 89.104/2001/AP, Grundlagen der Optimierung von Erhaltungsstrategien auf Objektebene, ILEK, Stuttgart

FE 15.370/2002/HRB, Weiterentwicklung von Verhaltensmodellen im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems, ILEK, Stuttgart

FE 15.371/2002/HRB, Weiterentwicklung des Verfahrens zur Ermittlung von Baulasträgerkosten bei der Erhaltungsplanung von Brücken- und Ingenieurbauwerken, KÖNIG und HEUNISCH, Leipzig

FE 15.383/2003HRB, Weiterentwicklung der Schadensprognose und Wirkung der Erhaltungsmaßnahmen im BMS, ILEK, Stuttgart

Stufe 2

FE 15.320/1999/HRB, Verfahren zur Ermittlung der ökonomischen Wirkungen von Erhaltungsmaßnahmen, RS-Consult, Berlin

FE 15.323/2.000/HRB, Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung von Maßnahmenvarianten, RS-Consult, Berlin

FE 15.346/2001/HRB, Entwicklung eines Verfahrens zur Erhaltungsplanung auf Bauwerksebene

(fachliche Feinkonzeption BMS-MB), RS-Consult, Berlin

FE 15.385/2003/HRB, Beispielanwendungen der Verfahren des BMS auf Objektebene, RS-Consult, Berlin

Stufe 3

FE 15.322/2.000/HRB, Grundlagen zur Optimierung der Erhaltungsplanung, PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe

FE 15.344/2001/HRB, Entwicklung eines Verfahrens zur Szenarienbildung, PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe

FE 15.347/2001/HRB, Entwicklung eines Verfahrens für die Erstellung des Erhaltungsprogramms auf Netzebene, Heller Ingenieurgesellschaft, Darmstadt

FE 15.369/2002/HRB, Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Erhaltungsplanung für Brücken- und Ingenieurbauwerke (fachliche Feinkonzeption BMS-EP), PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe

FE 15.384/2003/HRB, Beispielanwendungen der Verfahren des BMS auf Netzebene, PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe

In Kapitel 2 werden die wichtigsten Begriffe für den Bereich der Erhaltung von Straßen und den beinhaltenen Ingenieurbauwerken noch einmal vorgestellt. Diese Darstellung, ergänzt um Abschnitte zu den Grundlagen der systematischen Erhaltungsplanung, sind im Bericht zu den Stufen 1 und 2 [32] beschrieben.

In Kapitel 3 wird das Verfahren zur Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen auf Netzebene beschrieben. Hierbei wird neben der Problemstellung der gewählte Lösungsansatz beschrieben und im weiteren Verlauf wird auf die damit verbundenen Lösungsalgorithmen eingegangen.

Das Kapitel 4 beinhaltet das Verfahren zur Szenarienbildung. Dabei wird die Aufgabenstellung der Szenarienbildung im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems dargestellt und beschrieben, welcher Lösungsansatz gewählt wurde. Ferner werden wichtige Detailfragen beleuchtet.

In Kapitel 5 erfolgt eine Darstellung der weiteren Entwicklungsstufen des BMS. Mit einer Zusammenfassung und einem ausführlichen Literaturverzeichnis schließt der Bericht.

2 Begriffliche Grundlagen

Die Beschreibung und Abgrenzung der Aufgabenstellung erfordern einige begriffliche Definitionen aus dem Gebiet der Erhaltung von Ingenieurbauwerken.

Die Erhaltung von Bauwerken beinhaltet alle Maßnahmen, die die Sicherheit und Funktionalität gewährleisten sollen, und damit alle baulichen und verwaltungsmäßigen Aufwendungen für:

- die bauliche Unterhaltung (bauliche Maßnahmen kleineren Umfangs, die den Gebrauchswert nicht anheben),
- die Instandsetzung (bauliche Maßnahme größeren Umfangs, die eine deutliche Anhebung des Gebrauchswertes bewirken),
- die Erneuerung (Ersatz von Bauwerksteilen, durch die der volle Gebrauchswert wieder hergestellt wird) und
- Umbau-/Ausbaumaßnahmen ohne kapazitive Wirkung.

In Abgrenzung dazu bestehen auf der einen Seite die Maßnahmen der „betrieblichen Unterhaltung“ (u. a. Betriebskosten, Pflege, Winterdienst, Vorhaltung von Immobilien und Gerät) und auf der anderen Seite die „Erweiterungsmaßnahmen“ (Umbau-/Ausbaumaßnahmen mit kapazitiver Wirkung auf das Straßennetz und Neubau-/Ersatzanlagen).

Damit auch kommende Generationen in den Genuss des aktuellen Infrastrukturstandards gelangen, wird eine nachhaltige Bewirtschaftung angestrebt.

Dem Leitziel Nachhaltigkeit als Tenor einer systematischen Straßenerhaltung werden die folgenden Teilziele zugeordnet:

- höchstmöglicher Gebrauchswert,
- minimale gesamtwirtschaftliche Kosten,
- höchstmögliche Umweltverträglichkeit.

Das Zielkriterium Gebrauchswert stellt einen nutzerrelevanten Ausdruck für „Komfort“, „Sicherheit“ und „Dispositionsfreiheit“ dar. Dagegen umfasst das Kostenkriterium sowohl nutzer- als auch baulastträgerrelevante Anteile. Die nutzerrelevanten Anteile werden von den „Zeitkosten“, den „Fahrzeug- und Betriebskosten“ sowie den „Unfall- und Unfallfolgekosten“ gebildet. Baulastträgerrelevante Kostenkriterien können in „Baukosten“, „Erhal-

tungskosten“, „Betriebskosten“ und „Verwaltungskosten“ aufgeteilt werden. Als Umweltkriterium sind die Belastung des Menschen und seiner Umwelt, der Ressourcenverbrauch und die Identifikationsmöglichkeit zwischen Mensch und Umwelt aufzuführen. Die einzelnen Ziele können durch konkurrierende oder komplementäre Relationen miteinander verbunden sein [1].

Vom BMVBW wurden in Zusammenarbeit mit der BAST folgende Unterziele zum Leitziel der Erhaltungsstrategie für Brücken und Straßen formuliert [1]:

- Festlegen, Erreichen und Einhalten eines akzeptablen Zustandsniveaus der Bundesfernstraßen bei minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten.
- Festlegen, Erreichen und Einhalten eines akzeptablen Leistungsniveaus des Verkehrs auf Gesamtnetz-, Teilnetz- und Korridorebene bei minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten.
- Festlegen, Erreichen und Einhalten eines akzeptablen Sicherheitsniveaus für das Bundesfernstraßennetz bei minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten.
- Festlegen, Erreichen und Einhalten eines akzeptablen Umweltschutzniveaus für das Bundesfernstraßennetz bei minimalen gesamtwirtschaftlichen Kosten.

Zur Erreichung dieser Unterziele ist der Einsatz eines Management-Systems zielführend.

Ein Management-System ist ein Instrument, das die technischen und operativen Funktionen umfasst, die für den effizienten Betrieb und die Auswahl der optimalen Erhaltungsmaßnahmen zur Erreichung der vorgegebenen Ziele erforderlich sind. Es liefert Empfehlungen zur Durchführung von Verbesserungen, die mit den oben aufgeführten Zielsetzungen und Haushaltszwängen vereinbar sind, jedoch keine Entscheidungen. Diese sind von den jeweiligen Entscheidungsträgern zu treffen.

Für ein Management-System ist festzulegen, welche Anlagenanteile der Straßeninfrastruktur in weitergehende Überlegungen einzubeziehen sind. Die Anlagenanteile der Straßeninfrastruktur bestehen aus Straßenverkehrs- und Nebenanlagen. Die Straßenverkehrsanlagen umfassen dabei den Straßenoberbau, sonstige Anlagenanteile von Straßen wie Unterbau, Bepflanzung, Zubehör und Ingenieurbauwerke. Die Nebenanlagen werden durch Betriebsflächen, Nebenbetriebe und sonstige Hoch-

bauten wie z. B. Gebäude von Meistereien gebildet. Zu den Ingenieurbauwerken gehören Brücken, Verkehrszeichenbrücken, Tunnel- und Trogbauwerke, Lärmschutzbauwerke, Stützbauwerke und sonstige Bauwerke. In der aktuellen Ausbaustufe des Bauwerks-Management-Systems (BMS) werden die Ingenieurbauwerke berücksichtigt, wobei ein Schwergewicht auf Brückenbauwerke gelegt wird.

Parallel zum BMS wurde von der BAST, dem BMVBW und den Straßenbauverwaltungen ein Pavement-Management-System (PMS) entwickelt, welches die Erhaltungsplanung für die Straßenbefestigungen unterstützt und sich in der Länderanwendung befindet.

Im Rahmen des vorliegenden Berichtes werden ausschließlich die netzbezogene Bewertung sowie die Szenarienbildung betrachtet. Die Informationsbereitstellung sowie die objektbezogene Bewertung sind in [32] dargestellt.

Im Folgenden werden die einzelnen Themen im Detail vorgestellt.

3 Verfahren zur Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen auf Netzebene (BMS-EP)

3.1 Problemstellung

Die Summe der mit hoher Priorität bewerteten Maßnahmen auf Objektebene liefert einen ersten Ansatz für ein Erhaltungsprogramm ohne Berücksichtigung von Randbedingungen und Restriktionen.

Wegen zusätzlicher Bedingungen ist der objektbezogene Ansatz auf Netzebene zu optimieren. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Analysen auf Objektebene werden mit BMS-EP optimierte netzweite Reihungen von Erhaltungsmaßnahmen zur Verfügung gestellt.

Ziel des Verfahrens zur netzweiten Optimierung der Bauwerkserhaltung ist die möglichst effiziente Nutzung von Finanzmitteln zur Erreichung eines möglichst „guten“ Bauwerkszustands im betrachteten Teilnetz. Auf Grund der Ausrichtung des Verwaltungshandels nach dem Grundsatz der Wirtschaftlichkeit kommen die beiden möglichen Ausprägungen des so genannten ökonomischen Prinzips für die netzweite Bauwerkserhaltung in Frage:

- Erreiche einen optimalen Bauwerkszustand im Netz bei gegebenem Budget (politisch: Finanzszenario; mathematisch: primales oder originäres Problem).
- Erreiche einen vorgegebenen Bauwerkszustand im Netz bei minimalem eingesetzten Budget (politisch: Qualitätsszenario; mathematisch: duales oder komplementäres Problem).

Dabei werden die folgenden Nebenbedingungen berücksichtigt [13]:

- jährliche Budgetbeschränkungen,
- Mindesterhaltungsstandards für die Bauwerke,
- Begünstigung von Bauwerken mit hoher verkehrlicher Funktion,
- Begünstigung der Umsetzung von mehreren Maßnahmen innerhalb eines Streckenzuges und
- Vermeidung der parallelen Durchführung von Maßnahmen an Streckenzügen, die Alternativrouten zueinander darstellen.

Die Lösung des dualen Problems lässt sich durch die Anwendung eines Suchverfahrens (Binärsuche) auf die Lösung des primalen Problems zurückführen. Im Interesse der Verständlichkeit für den Anwender (Einarbeitung in ein Verfahren anstelle von zweien) wird deshalb, abgesehen von der Beschreibung des Suchverfahrens, im Wesentlichen nur auf das primale Problem eingegangen.

Nebenbedingungen der Optimierung bilden die Sicherstellung eines Mindestzustands von Bauwerken (z. B. Zustandsnote 3,5) in jedem Jahr des betrachteten Zeitraums sowie das Auftreten von Maßnahmeausschlüssen, d. h., in einem Jahr kann an einem Bauwerk nur höchstens eine Maßnahme eingeplant werden. Dabei kann es sich bei einer „Maßnahme“ im Sinne der netzweiten Optimierung sowohl um eine Einzelmaßnahme als auch um eine Kombination von Einzelmaßnahmen, welche innerhalb desselben Jahres an einem Bauwerk durchgeführt werden, handeln.

3.2 Lösungsansatz

Auf Grund der algorithmischen Komplexität des Problems wurde zur Lösung des primalen Problems ein heuristisches Verfahren gewählt. Dieses besteht aus einer jahresweisen Optimierung durch

Lösung des jeweiligen Knapsack-Problems sowie einer periodenübergreifenden Planung (Backtracking-Verfahren) zur Vermeidung von Sackgassen.

Sackgassen können bei einem nicht vorausschauenden Ansatz, der in jedem Jahr die aktuell besten Maßnahmen auswählt, dann auftreten, wenn in einem Jahr zur Einhaltung der geforderten Nebenbedingungen (Mindesterhaltungszustand eines Bauwerks) so viele Erhaltungsmaßnahmen notwendig werden, dass für diese das Budget in diesem Jahr nicht ausreicht.

Die periodenübergreifende Planung erreicht die Vermeidung von Sackgassen durch die Fixierung notwendiger Maßnahmen in bestimmten Jahren, verbunden mit dem Anstoßen einer Neuplanung mit dem dann reduzierten Budget (Backtracking).

Das Problem der Budgetplanung innerhalb eines Jahres führt auf die Lösung eines so genannten Knapsack-Problems (siehe Bild 2). Dabei entspricht das Gewicht eines Gegenstandes den Maßnahmenkosten, das maximal mögliche Gesamtgewicht dem Budget und der Wert eines Gegenstandes dem Nutzen einer Maßnahme (z. B. bewertete Verbesserung der Zustandsnote etc.):

- Gewicht = Kosten einer Maßnahme,
- maximales Gesamtgewicht = Budget,
- Wert = „Nutzen“ einer Maßnahme.

Zur Lösung dieses Problems existieren zum einen heuristische Verfahren, welche im Allgemeinen in kurzer Zeit gute Lösungen berechnen, jedoch die Lösungsqualität und/oder die Rechenzeit nicht garantieren können. Zum anderen sind effiziente

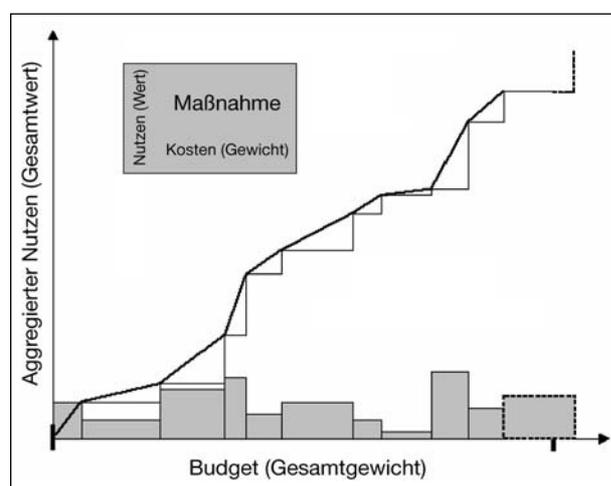


Bild 2: Budgetplanung innerhalb eines Jahres

Näherungsverfahren der Dynamischen Programmierung bekannt, welche die Annäherung an die optimale Lösung mit einer beliebig wählbaren Genauigkeit ermöglichen.

Die Vorteile der Verfahren der Dynamischen Programmierung liegen in der garantierten Rechenzeit, dem a priori bekannten Speicherplatzbedarf und der garantierten Lösungsqualität. Deshalb wurde diesem Verfahren der Vorzug gegeben.

Die Komplexität des grundlegenden Optimierungsproblems wird durch die Existenz von Maßnahmenausschlüssen noch verschärft.

Werden die Nebenbedingungen (Mindesterhaltungszustand in jedem Jahr, Maßnahmenausschlüsse) ignoriert, so stellt die periodenübergreifende Optimierung eine Erweiterung des 0-1-Knapsack-Problems von einem auf mehrere Rucksäcke dar. Man spricht deshalb von einem Multiplen Knapsack-Problem (MKP). Dabei entspricht ein Gegenstand einer Maßnahme, sein Wert dem Nutzen der Maßnahme und jeder Knapsack einem Jahresbudget.

Unabhängig von der exakten Einordnung des Problems, kann aus der theoretischen Analyse geschlossen werden, dass weder ein effizientes exaktes Verfahren noch ein effizientes Näherungsverfahren mit garantierter, skalierbarer Approximationsgüte zur Lösung des vorliegenden Optimierungsproblems existieren. Um angesichts der vorliegenden Problemgröße dennoch zu akzeptablen Ergebnissen zu kommen, ist deshalb ein heuristisches Vorgehen notwendig. Weitere Angaben zu der Komplexität des Herausarbeitens eines geeigneten Verfahrens sind in [14] beschrieben.

3.2.1 Das Multiple-Choice-Knapsack-Problem

Das Multiple-Choice-Knapsack-Problem (MCKP) leitet sich aus dem 0-1-Knapsack-Problem durch Hinzunahme einer weiteren Nebenbedingung ab. Die Maßnahmenmenge ist zusätzlich in Klassen eingeteilt, und aus jeder Klasse darf maximal eine Maßnahme gewählt werden. Damit ergibt sich folgende Optimierungsaufgabe:

$$\begin{aligned} \max! f &= \sum_{i=1}^{n_B} \sum_{j=1}^{n_i} u_{ij} x_{ij} \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^{n_B} \sum_{j=1}^{n_i} c_{ij} x_{ij} &\leq C \end{aligned}$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} \leq 1 \text{ für alle } i$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

wobei

- n_B = Anzahl der Klassen,
- n_i = Anzahl der Maßnahmen in Klasse i ,
- u_{ij} = Nutzen von Maßnahme j in Klasse i ,
- c_{ij} = Kosten von Maßnahme ij ,
- x_{ij} = Entscheidungsvariable (0 oder 1) für Maßnahme M_j in Klasse i und
- C = Budget.

Im Kontext des Bauwerks-Management-Systems eignet sich das MCKP dazu, in einer einzigen Problemformulierung auch die Ausschlussbedingungen zwischen Maßnahmen abzubilden, ohne dazu auf einen Branch-and-Bound-Ansatz ausweichen zu müssen. Als „Maßnahme“ im Sinne der netzweiten Optimierung zählt dabei jede zu berücksichtigende sinnvolle Kombination von Einzelmaßnahmen an einem Bauwerk in einem Jahr. Zusätzliche Kombinationen werden vom MCKP-Algorithmus nicht gebildet.

3.2.1.1 Algorithmus

Für das Bauwerks-Management-System wird vorausgesetzt, dass u_{ij} , c_{ij} und C bei geeigneter Einheitenwahl ganzzahlig sind. Das MCKP kann dann mit dem folgendem Algorithmus gelöst werden. Dabei enthält jeder Eintrag der Matrix $A(i, c)$ nach Ausführung eines Algorithmus den mit Budget c und den Maßnahmen der Klassen $1 \dots i$ maximal erreichbaren Nutzen.

3.3 Maßnahmenbewertung

Als erster Schritt zu einer netzweiten Optimierung der Bauwerkserhaltung ist das Optimierungsziel zu präzisieren. Dieses besteht in der Erreichung eines optimalen Bauwerkszustands mit begrenztem Budget (primales Problem). Es wird erreicht durch Auswahl der „besten“ Maßnahmen, d. h., die bauwerkszustandsorientierte Betrachtung wird durch eine maßnahmenorientierte Betrachtung ersetzt. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit der Bewertung von Maßnahmen durch einen Gütwert. Dabei wird die Güte einer Maßnahme, d. h. ihr bauwerks-

bezogener Nutzen, anhand der durch sie erreichten Zustandsverbesserung am Bauwerk bewertet.

Diese Bewertung kann zum einen direkt aus der Auswirkung einer Maßnahme auf den Zustand des betroffenen Bauwerkes abgeleitet werden (zustandsorientierte Maßnahmenbewertung).

Zum anderen ist die Einbeziehung volkswirtschaftlicher Aspekte, beispielsweise von Nutzerkosten, denkbar, wie sie auch innerhalb der objektbezogenen Bewertung von Maßnahmen vorgenommen wird. Sie wird durch eine gewichtete Summe mit dem Nutzer-Parameter α , $0 \leq \alpha \leq 1$ erreicht.

$$\text{Nutzen}_{MN} = \alpha \cdot \text{Nutzen}_{BW} + (1-\alpha) \cdot \text{Nutzen}_{VWL}$$

Für $\alpha = 1$ ergibt sich eine rein bauwerksbezogene Nutzenbewertung, während für $\alpha = 0$ ausschließlich der volkswirtschaftliche Nutzen berücksichtigt wird. Weitere mögliche Einflüsse auf die Bewertung bzw. Gewichtung einer Maßnahme, beispielsweise DTV, DTV-SV oder die „Netzbedeutung“ des betroffenen Bauwerkes, wurden bisher nicht betrachtet.

Zu beachten ist bei einer rein zustandsorientierten Maßnahmenbewertung, dass damit nur solche Maßnahmen angewendet werden, die auch eine messbare positive Zustandsänderung bewirken. Bewirkt eine Maßnahme etwa eine Verbesserung der Verkehrssicherheit, ohne gleichzeitig die Gesamtnote eines Bauwerkes zu verändern (Maximumprinzip), so wäre für sie bei einer Maßnahmenbewertung allein auf Basis der Zustandsnote des Bauwerkes dennoch kein Nutzen festzustellen.

Mit einer volkswirtschaftlichen Maßnahmenbewertung kann die Berücksichtigung sinnvoller Maßnahmen, die sich nicht oder nur in geringem Maß in einer Zustandsverbesserung des betroffenen Bauwerkes niederschlagen, bei der Budgetplanung erreicht werden. Dabei ist jedoch zu fragen, ob dies nicht dem eigentlichen Optimierungsziel, nämlich der Erreichung eines möglichst guten Bauwerkszustands zuwiderläuft. Im Extremfall könnte eine derartige Maßnahmenbewertung zu einer kontinuierlichen Verschlechterung des Gesamtzustands trotz „eigentlich“ ausreichendem Budget führen.

Um bauteilgruppenspezifische Auswirkungen von Maßnahmen abbilden zu können, wird der Bauwerkszustand anhand der Zustandsnoten der Bauteilgruppen bewertet. Dieses Vorgehen besitzt den Vorteil, dass auf dieser Abstraktionsebene auch Alterungsfunktionen zur Beschreibung der Entwick-

lung der Zustände der Bauteilgruppen ohne Maßnahme vorliegen [16]. Demgegenüber wird auf eine weitere Aufschlüsselung nach Standfestigkeit, Dauerhaftigkeit und Verkehrssicherheit verzichtet.

3.3.1 Algorithmus

Der bauwerksbezogene Nutzen einer Maßnahme M_{ij} an einem Bauwerk B_i in der Planungsperiode p ergibt sich aus der Differenz der Bewertung des resultierenden Bauwerkszustands mit Maßnahme (Anwendung der Effektfunktion effekt_{ij} der Maßnahme auf den vorhergehenden Zustand $s_{i,p-1}$) und der Bewertung des Zustands ohne Maßnahme (Anwendung der Alterungsfunktion altern_i auf $s_{i,p-1}$). Der Zustand $s_{i,p-1} = (s_{i,p-1,1} \dots s_{i,p-1,n_{BTG}})$ ist dabei durch den Vektor der Zustandsnoten der Bauteilgruppen $1 \dots n_{BTG}$ gegeben.

Unter Einbeziehung des Gewichtungsfaktors α zur zusätzlichen Berücksichtigung des volkswirtschaftlichen Nutzens VW_{ijp} und eines Faktors w_i zur Bewertung der Wichtigkeit des Bauwerks erhält man folgende Bewertungsfunktion:

$$\text{Nutzen}_{MNijp} = \alpha w_i * (u(\text{effekt}_{ij}(s_{i,p-1})) - u(\text{altern}_i(s_{i,p-1}))) + (1-\alpha) VW_{ijp}$$

Es wird zur Bewertung des Zustands $s_{i,p}$ von Bauwerk i in der Periode p durch die Funktion u , das gewichtete Mittel der Zustandsnoten $s_{i,p,j}$ der einzelnen Bauteilgruppen

$$u(s_{i,p}) = \sum_{j=1}^{n_{BTG}} \beta_j * v(s_{i,p,j})$$

mit in einer Datenbank vorgegebenen Gewichten β_j und der Funktion v zur Bewertung der Zustände der einzelnen Bauteilgruppen verwendet. Diese Wahl der Bewertungsfunktion besitzt den Vorteil, alle Einflüsse von Maßnahmen auf den Bauwerkszustand zu berücksichtigen.

Demgegenüber kann bei einer allein auf der Gesamtnote des Bauwerks beruhenden Bewertung, etwa

$$u(s_{i,p}) = 4,0 - \text{Bauwerksnote}(s_{i,p})$$

mit Berechnung der Bauwerksnote gemäß [9] (Anwendung des „Maximumprinzips“ unter Einbeziehung von Zu- und Abschlägen), der Fall eintreten, dass der Nutzen einer Maßnahme, die erhebliche Verbesserungen an einer bestimmten Bauteilgruppe bewirkt, sehr gering oder gar mit null bewertet wird, weil die Gesamtnote gemäß Maximumprinzip durch eine andere Bauteilgruppe bestimmt wird.

Derzeit liegt noch keine endgültige Form für die Funktion v vor, eine Festlegung kann voraussichtlich erst nach Abschluss der umfangreichen Testphase im Anschluss an die Programmierung vorgenommen werden. Dennoch kann vorerst eine im wesentlichen affine Funktion

$$v(s_{ipj}) = 4,0 - s_{ipj}, \text{ falls } s_{ipj} \leq 4,0 \text{ und}$$

$$v(s_{ipj}) = c, \text{ falls } s_{ipj} = \text{„unzulässig“}$$

mit einem negativen Wert c , beispielsweise $c = -1.000$, angenommen werden, welche den korrekten qualitativen Verlauf aufweist. Die Erweiterung der Funktion über den zulässigen Bereich der Zustandsnoten hinaus wird hierbei ausschließlich aus verfahrenstechnischen Gründen vorgenommen, um nicht erwünschte Bauwerkszustände entsprechend schlecht bewerten zu können.

Es werden als Effektfunktionen zunächst einfache Rücksetzwerte angenommen, welche die Zustandsnoten von Über- und Unterbau bei Beton bzw. Stahlbrücken

- auf 1,4 bzw. 1,6 nach Erneuerung und
- auf 1,7 bzw. 1,9 nach Instandsetzung

und die Zustandsnoten der übrigen von einer Maßnahme betroffenen Bauteilgruppen

- auf 1,0 nach Erneuerung und
- auf 1,7 nach grundhafter Instandsetzung

setzen. Von dieser vorläufigen Festlegung unberührt bleibt die Einplanung allgemeinerer Effektfunktionen für realistische Maßnahmen im Rahmen der endgültigen Festlegungen.

3.4 Budgetknappheit und Budgetplanung

Zur Lösung des Problems der Optimierung über alle Planungsperioden, etwa über die 6 Jahre zwischen zwei Bauwerkshauptprüfungen, sind verschiedene Verfahren denkbar (siehe Kapitel 2.2.2 in [14]). Die Auswahl des geeigneten Verfahrens hängt insbesondere vom Schwierigkeitsgrad des Optimierungsproblems auf dieser Planungsebene ab. Dieser wird maßgeblich von der Knappheit des zur Verfügung stehenden Budgets, d. h. vom Verhältnis des jährlichen Budgets zu den zu erwartenden Mindestkosten, bestimmt. Dies sind die Kosten, mit denen zur Erhaltung des Mindestzustands (schlechteste zulässige Zustandsnote) gerechnet werden muss.

Der Optimierungsansatz führt naturgemäß dazu, dass nur solche Maßnahmen ergriffen werden, die innerhalb des Planungszeitraums einen hohen Nutzen bringen. Daher besteht die Gefahr der Verschiebung notwendiger Ausgaben in die Zukunft. Hieraus ergibt sich die Frage nach der Existenz einer übergeordneten, längerfristigen (Finanz-)Planung zur Vermeidung von Mittelknappheit nach Ablauf des Planungszeitraums.

Für das Netz der Bundesfernstraßen gelten folgende Randbedingungen:

- Es muss mit einem knappen bis sehr knappen Budget gerechnet werden.
- Es wird bei der Maßnahmenplanung die Möglichkeit vorgesehen, für einzelne Bauwerke auf Mindestnoten zu verzichten.
- Es existiert eine übergeordnete Finanzbedarfsplanung (Prognose) über 15 bis 20 Jahre für die Mittelbereitstellung, die jedoch nicht in die konkrete Budgetoptimierung integriert ist.

Aus der anzunehmenden Budgetknappheit ist zu folgern, dass ein einfacher Greedy-Algorithmus zur periodenübergreifenden Planung nicht ausreicht und bei einem Suchverfahren mit einer hohen Anzahl zu behandelnder Sackgassen (Jahre, in denen das Budget nicht ausreicht) gerechnet werden muss. Um den hieraus resultierenden Rechenaufwand (jeder Backtracking-Schritt bedeutet den Anstoß einer jahresweisen Knapsack-Optimierung) zu minimieren, wurden Methoden zur A-priori-Abschätzung der Budgetknappheit und zum Setzen notwendiger Maßnahmen vor der jeweiligen jahresweisen Optimierung entwickelt und implementiert.

Der Verzicht auf Mindestnoten bei bestimmten Bauwerken würde es zum einen ermöglichen, ohnehin zum Abriss vorgesehene Bauwerke aus der Optimierung zu nehmen, und zum anderen eine Szenariobildung mit Behandlung dieser Bauwerke außerhalb des Optimierungssystems, etwa durch Zuweisung gesonderter Finanzmittel oder durch vorübergehende Sperrung und spätere Sanierung, erlauben.

Diese Option kann vorgesehen werden, ob sie umgesetzt wird, wird sich in der Realisierungsphase zeigen. Eine Umsetzung könnte im zu konzipierenden Programm beispielsweise durch gezielte Anpassung der Bewertung der Maßnahme „Nichts tun“ für ein solches Bauwerk oder durch Herausnehmen des Bauwerks aus der jahresweisen Opti-

mierung auf der Ebene der periodenübergreifenden Planung geschehen.

Auf Grund der übergeordneten Finanzplanung und des Prinzips der rollierenden Optimierung, bei der von einem neuen Optimierungslauf des Programms nach jedem Jahr mit den dann aktuellen Bauwerksdaten ausgegangen wird, wird im Rahmen des konzipierten Optimierungssystems auf eine über den Planungshorizont von 6 Jahren hinausgehende längerfristige Planung verzichtet. Zudem wird die Einplanung von konkreten Maßnahmen auf Grund der zunehmenden Unschärfe z. B. in den Verhaltensmodellen mit vergrößertem Planungszeitraum immer schwieriger.

3.4.1 Algorithmus für die periodenübergreifende Planung

Der Grundgedanke für die periodenübergreifende Planung besteht darin, für jedes Bauwerk zunächst eine kostenminimale Maßnahmenauswahl über alle Jahre des Planungszeitraums von 6 Jahren zu bestimmen, die das Unterschreiten des Mindesthaltungszustands verhindert. Diese Maßnahmen werden nachfolgend als Default-Maßnahmen bezeichnet, weil sie erst endgültig eingeplant werden, wenn die nachfolgende Knapsack-Optimierung nicht noch bessere Maßnahmen vorschlägt. Erfordert ein Bauwerk in einem Jahr keine Maßnahme zur Einhaltung des Mindestzustands, so gilt „Nichts tun“ (mit Kosten = 0 und Effekt = normale Alterung) als Default-Maßnahme.

Vor dem Eintritt in die sequentielle periodenweise Optimierung werden die zuvor ermittelten Default-Maßnahmen besonders markiert. Alle Jahresbudgets werden um die Kosten der gesetzten Default-Maßnahmen reduziert. Alle Maßnahmen, die in einer Periode weniger Effekt zeigen als die gesetzte Default-Maßnahme für das Bauwerk, werden gestrichen. Alle Maßnahmen, die in einem Jahr mehr Effekt zeigen als eine ggf. gesetzte Default-Maßnahme für das Bauwerk, werden beibehalten, aber ihre Kosten und ihr Nutzen werden um Kosten und Nutzen der Default-Maßnahme vermindert. Diese Vorbereitung wirkt sich so aus, dass bei der periodenweisen Knapsack-Optimierung nur noch Verbesserungen gegenüber der Default-Maßnahme zur Auswahl stehen. Sieht man die Menge der Default-Maßnahmen in einem Jahr als „Pflichtprogramm“ an, so verteilt die periodenweise Optimierung das Restbudget nach Abzug der Pflichtprogramm-Kosten auf die Verbesserungen mit dem größten zusätzlichen Nutzen.

Die Bestimmung der Default-Maßnahmen erfolgt für alle Bauwerke einmal zu Beginn der Optimierung. Sie bleibt gültig, solange bei der periodenweisen Planung tatsächlich nur die Default-Maßnahmen ausgewählt werden. Reicht das Budget dagegen, um eine weitergehende Maßnahme zu realisieren, so werden die für das betroffene Bauwerk für die Folgejahre gesetzten Default-Maßnahmen verworfen und neu berechnet. Im Allgemeinen reichen in einem solchen Fall weniger Default-Maßnahmen aus, weil die weitergehende Maßnahme zu einem günstigeren Bauwerkszustand führt als die Default-Maßnahme.

Eine Fehler- oder Warnmeldung ist auszugeben, wenn keine Optimierung möglich ist, weil das zur Verfügung stehende Budget noch nicht einmal zur Ausführung des Pflichtprogramms ausreicht. Dieser Fehler kann nicht innerhalb der Optimierung, sondern nur auf einer übergeordneten Planungsebene, etwa durch Erweiterung des Budgets, Lockerung der Anforderungen für den Mindestzustand oder Herausnehmen von Bauwerken aus der Optimierung, behandelt werden.

3.4.2 Algorithmus für die Mindesterhaltungsplanung

Wie schon im vorhergehenden Kapitel erläutert, besteht das Ziel der Mindesterhaltungsplanung darin, für ein gegebenes Bauwerk eine kostenminimale Kombination von Maßnahmen zu bestimmen, die sicherstellt, dass der Zustand dieses Bauwerks nach jeder Planungsperiode den Mindestanforderungen genügt.

Hierzu wird zunächst unter Verwendung der Alterungsfunktionen der Bauteilgruppen der Alterungsprozess des Bauwerks simuliert, um kritische Bauteilgruppen zu identifizieren. Anschließend werden für die nachfolgende Suche nach der kostengünstigsten Kombination von Default-Maßnahmen diejenigen Maßnahmen ausgewählt, die zum einen geeignet sind, den Mindestzustand dieser Bauteilgruppen rechtzeitig sicherzustellen, und zum anderen innerhalb des gegebenen (Restbudgets) bezahlbar sind. Außerdem werden nur solche Maßnahmen betrachtet, die nicht von anderen dominiert werden, d. h., es werden nur die bezüglich der Rettung kritischer Bauteilgruppen kostengünstigsten Einzelmaßnahmen betrachtet.

Bei der sich anschließenden Berechnung von Default-Maßnahmen wird vereinfachend davon ausgegangen, dass es genügt, eine Bauteilgruppe ein-

mal instandzusetzen, um den Mindestzustand bis zum Ende des Planungszeitraums von 6 Jahren sicherzustellen. Diese Annahme erscheint realistisch, da zwischen der Maßnahme und dem Ende des Planungszeitraums maximal 5 Jahre vergehen können. Sie ermöglicht es, im Rahmen der Suche nach der optimalen Maßnahmenkombination die kritischen Bauteilgruppen in einer festen Reihenfolge, etwa beginnend mit der Gruppe mit der niedrigsten Indexnummer, nacheinander abzarbeiten, ohne nach jeder fiktiven Anwendung einer Maßnahme eine teilweise Neuberechnung der kritischen Bauteilgruppen und der sinnvollen Rettungsmaßnahmen vornehmen zu müssen, und reduziert somit massiv die Komplexität des Algorithmus.

Zur Berechnung der Default-Maßnahmen werden zunächst für jede kritische Bauteilgruppe die zu ihrer Instandsetzung in Frage kommenden Maßnahmen zusammengestellt. Dabei wird zwecks effizienter Berücksichtigung von Maßnahmenauschlüssen – in einem Jahr kann nur höchstens eine Maßnahme (von der netzweiten Optimierung wird jede erlaubte Kombination von Einzelmaßnahmen als eigene „Maßnahme“ betrachtet) pro Bauwerk angewendet werden – für jede Periode eine eigene Liste angelegt. Da bei der Suche nach der besten Maßnahme zur Instandsetzung einer Bauteilgruppe davon ausgegangen wird, dass kritische Bauteilgruppen mit niedrigeren Indexnummern bereits instandgesetzt worden sind, können anschließend aus jeder Liste diejenigen Maßnahmen wieder entfernt werden, die bezüglich der noch zu rettenden Bauteilgruppen von anderen Maßnahmen der Liste dominiert werden. Eine Maßnahme wird von einer anderen dominiert, wenn sie teurer als diese ist, ohne zusätzliche kritische Bauteilgruppen instandzusetzen.

Zur eigentlichen Berechnung der kostengünstigsten Maßnahmenkombination wird ein rekursives Suchverfahren verwendet. Es prüft zunächst, ob die aktuell betrachtete Maßnahmenkombination (Menge von „Maßnahmen“ in unterschiedlichen Perioden) alle Bauteilgruppen des aktuellen Bauwerks instandsetzt, und aktualisiert in diesem Fall die Liste der besten Maßnahmen. Sonst wird die nächste kritische Bauteilgruppe betrachtet und es werden alle von den Kosten her viel versprechenden Maßnahmen zu ihrer Rettung durchprobiert. Hierzu wird jede solche Maßnahme zur aktuell betrachteten Maßnahmenkombination hinzugefügt und es werden die Kosten dieser Maßnahmenkom-

bination berechnet. Außerdem wird die Menge der noch zur Verfügung stehenden freien Perioden verkleinert und es werden die verbleibenden kritischen Bauteilgruppen festgestellt. Mit den verbleibenden abzuarbeitenden Bauteilgruppen und den übrigen aktualisierten Zwischenergebnissen wird dann der Algorithmus rekursiv aufgerufen. Dabei reduziert ein weiterer Dominanztest die Menge der für die nächste kritische Bauteilgruppe durchzuprobierenden Maßnahmen.

3.4.3 Algorithmus für die periodenweise Optimierung

Die periodenweise Optimierung verläuft weitestgehend unverändert nach dem in Kapitel 3.2.1.1 beschriebenen Algorithmus für das Multiple-Choice-Knapsack-Problem (MCKP).

Der einzige Unterschied besteht darin, dass vor der Berechnung Budget und Maßnahmenkosten um die Kosten der Default-Maßnahmen reduziert werden, ebenso die Maßmannutzen um den Nutzen der Default-Maßnahme. Maßnahmen, die nicht

wenigstens dieselben Bauteilgruppen instandsetzen wie die Default-Maßnahme, scheiden von vornherein aus. Am Ende der Berechnung werden die ausgewählten Maßnahmen eingeplant. Wurde keine Maßnahme ausgewählt, aber eine Default-Maßnahme gesetzt, so wird diese eingeplant.

3.5 Fachliche Feinkonzeption

3.5.1 Systemstruktur und Schnittstellen

Das zu erstellende Programmsystem hat im Wesentlichen die folgenden Aufgaben zu erfüllen:

- Interaktion mit dem Benutzer (Parameter),
- datenbankbasiertes Einlesen von Bauwerks- und Maßnahmendaten,
- Durchführung der Optimierung,
- Ausgabe der Ergebnisse (Reporting, Ablage in Datenbank).

Zur Bewältigung der hieraus resultierenden sehr unterschiedlichen programmtechnischen Anforder-

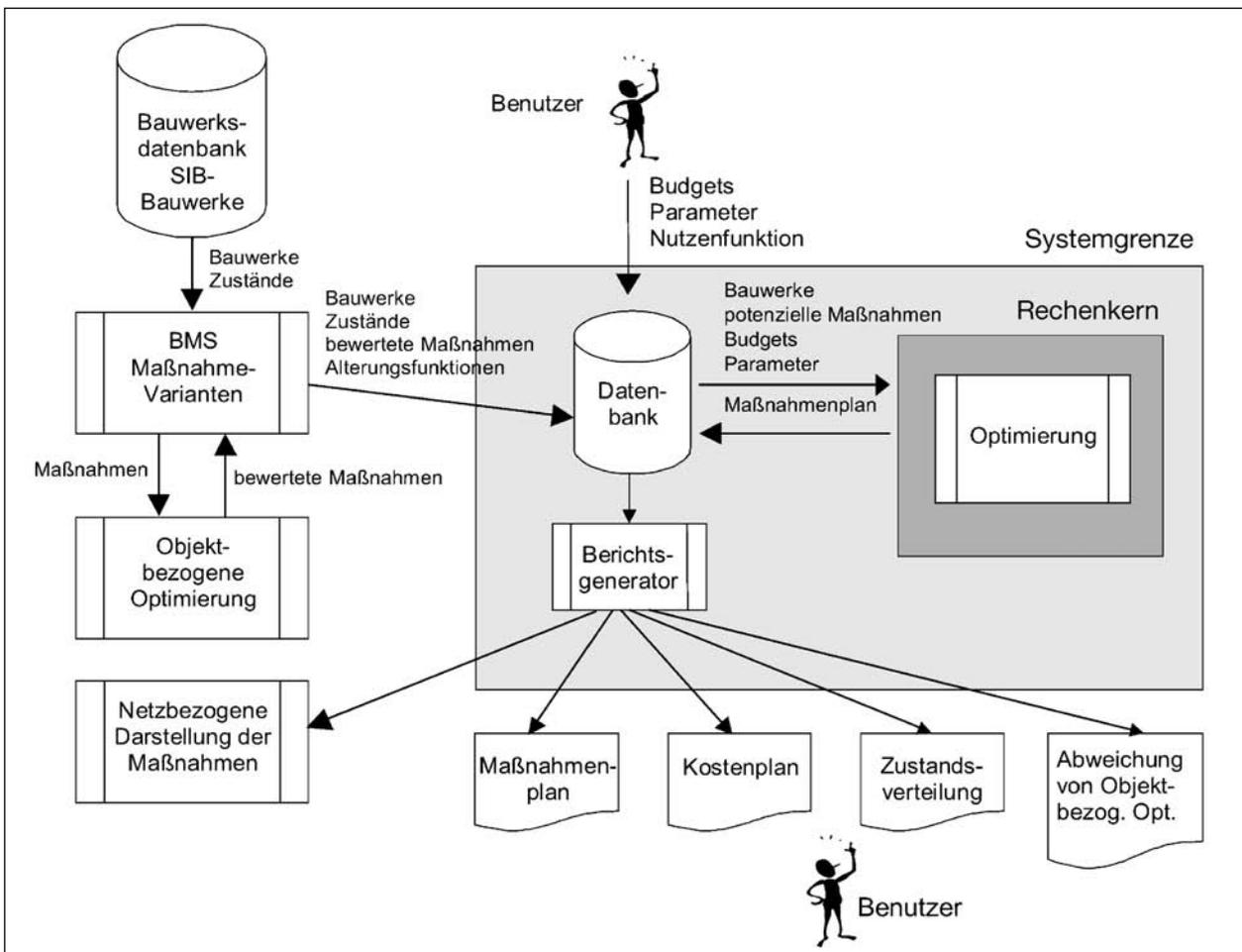


Bild 3: Systemüberblick und Datenfluss

rungen wurde ein komponentenbasiertes System gewählt, dessen Struktur in Bild 3 zusammengefasst ist.

Sinnvoll erscheint insbesondere die Aufteilung in ein Rahmenprogramm mit grafischer Benutzeroberfläche (GUI) zur Benutzerinteraktion und Koordination des Datenflusses, ein Datenbankmodul zur Datenverwaltung und Archivierung sowie den eigentlichen Rechenkern. In Bild 3 bezeichnet der äußere Rahmen die Systemgrenze. Nachfolgend werden zunächst die fünf externen Schnittstellen beschrieben, die sich daraus ergeben.

Aus dem Modul „BMS-MV“, welches der Verwaltung und Bereitstellung von Maßnahmenvarianten (Strategien) dient, werden sowohl die Bauwerksdaten als auch die Maßnahmenalternativen übernommen. Erstere stammen ursprünglich aus der Datenbank SIB-Bauwerke und enthalten alle Bauwerke mit ihrer eindeutigen Kennzeichnung, dem zuletzt festgestellten Bauwerkszustand (Zustandsnoten aller Bauteilgruppen) und weiteren relevanten Ordnungsmerkmalen. Die Maßnahmenalternativen werden von BMS-MV erzeugt, durch die objektbezogene Optimierung (BMS-MB) bewertet und anschließend über BMS-MV mit Kosten und Nutzen an die netzweite Optimierung weitergegeben.

Der Benutzer gibt das Budget für jedes Jahr vor und steuert die Maßnahmenwahl durch Einstellen der gewünschten Nutzenfunktion und weiterer Verfahrensparameter. Unter anderem kann er Maßnahmen für bestimmte Jahre fest vorgeben.

Nach der Berechnung wird das Ergebnis (der ausgewählte Maßnahmenplan) an das Programm zur netzweiten Darstellung der Erhaltungsmaßnahmen exportiert, das z. B. alle Maßnahmen in einer einheitlichen Streckenbanddarstellung visualisiert (gemäß [15]).

Neben dieser Exportschnittstelle werden dem Benutzer verschiedene Auswertungen über den Maßnahmenplan, den damit verbundenen Kostenverlauf, die Zustandsverteilung nach jedem Jahr sowie die budgetbedingt vorgenommenen Abweichungen vom Vorschlag aus der objektorientierten Bewertung zur Verfügung stehen. Die Auswertungen werden zum Teil tabellarisch, zum Teil auch als Grafik erzeugt.

Es ist vorgesehen, dass innerhalb des Programmsystems alle Ein- und Ausgabedaten in einer relationalen Datenbank gespeichert werden. Ein Rahmenprogramm wird dem Benutzer die Möglichkeit geben, Datenimporte und -exporte anzustoßen und die für ihn zugänglichen Parameter einzusehen und zu verändern.

3.5.2 Rechenkern

Der Rechenkern wird vom Rahmenprogramm aufgerufen, das ihn mit den Eingabedaten versorgt. Er gliedert sich in unterschiedliche Module, welche gemeinsam die Lösung des primalen (Finanzszenario, Bild 4) und des dualen Optimierungsproblems (Qualitätsszenario, Bild 5) ermöglichen. In den Bildern sind die jeweils nicht aktiven Blöcke grau hinterlegt dargestellt.

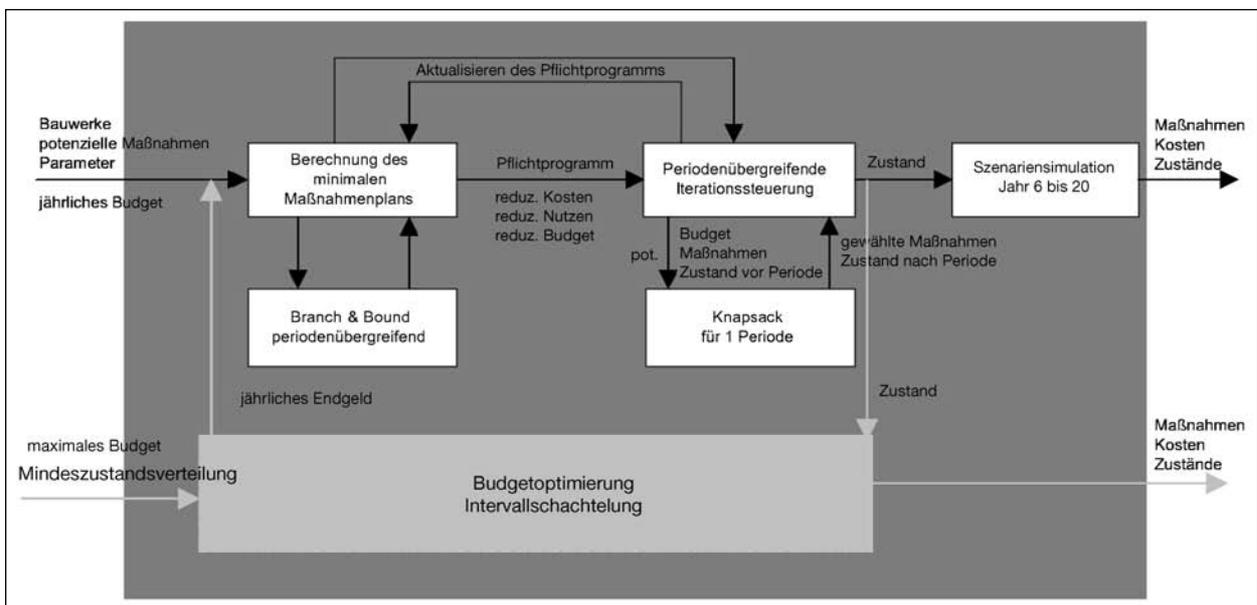


Bild 4: Lösung des primalen Optimierungsproblems (Finanzszenario)

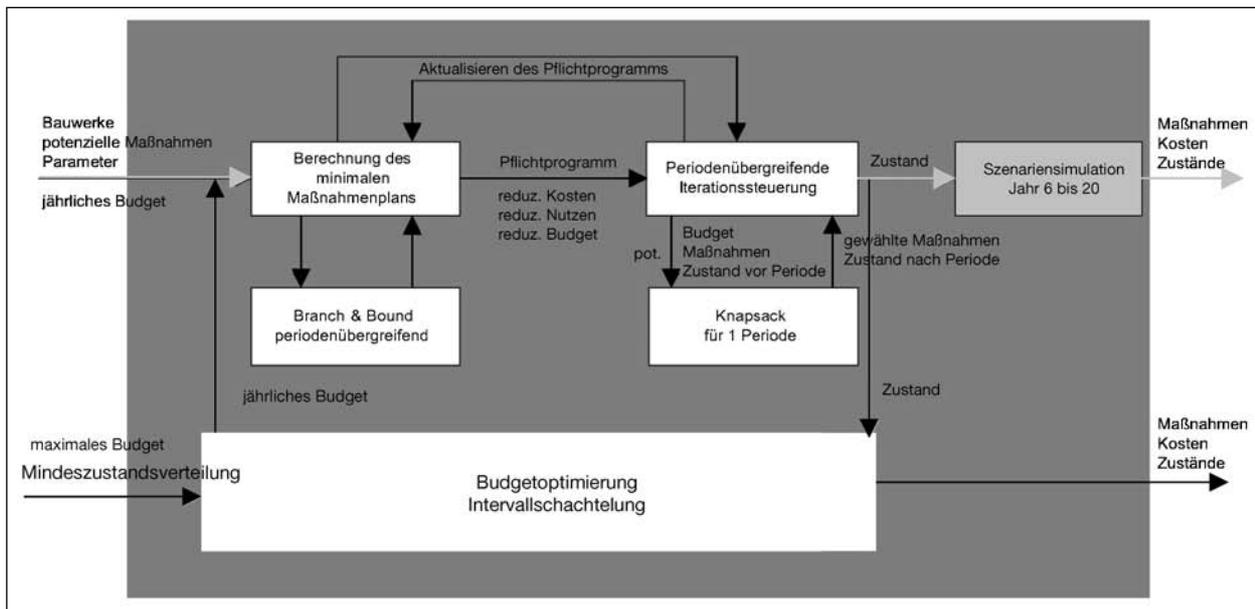


Bild 5: Lösung des dualen Optimierungsproblems (Qualitätsszenario)

Das Finanzszenario besteht aus den Schritten:

- Berechnung des minimalen Maßnahmenplans für alle Jahre („Pflichtprogramm“),
- periodenübergreifende Iterationssteuerung (Jahr 1 bis 6) und
- Szenariensimulation.

Zunächst wird das Pflichtprogramm ermittelt. Die sich anschließende periodenübergreifende Iterationssteuerung stellt die Zustandsfortschreibung sicher, ruft für jedes Jahr den Multiple-Choice-Knapsack-Algorithmus auf und sorgt nach jedem Jahr für eine Aktualisierung des Pflichtprogramms. Der Block „Szenariensimulation“ dient der Hochrechnung der Bauwerkszustände nach Ablauf des Maßnahmenzeitraums (Jahr 1 bis Jahr 6) auf das Ende des Bewertungszeitraums (Jahr 20) mit Hilfe des in [16] entwickelten Moduls zur Szenarienbildung.

Das Qualitätsszenario wird auf den Aufruf des Finanzszenarios ohne Szenariensimulation mit unterschiedlichen Budgetvorgaben zurückgeführt. Ausgehend von einem Maximalbudget wird durch Intervallschachtelung ermittelt, welches Budget zur Erreichung der Qualitätsvorgabe mindestens notwendig ist.

4 Verfahren zur Szenarienbildung

4.1 Aufgabenstellung

Ziel des Verfahrens zur Szenarienbildung war es, einen praktikablen Weg zur kurzfristigen Erstellung von Qualitäts- oder Finanzszenarien im Rahmen der Bauwerkserhaltung von Bund und Ländern aufzuzeigen.

Bei der Konzeption wurde der Weg gewählt, das Verfahren auf der Objektebene anzusiedeln, wohl wissend, dass hiermit eine komplexe Verfahrensweise gewählt wird, die aber den gravierenden Vorteil mit sich bringt, Entscheidungslogiken, über die Szenarien letztlich abgebildet werden, beim einzelnen Bauwerk ansetzen zu können.

Daraus ergab sich zum einen, dass zahlreiche, in anderen F+E-Projekten im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems auf der Objektebene bereits geleistete Arbeitsschritte adäquat auf die Makroebene eines Simulationsmodells übertragen werden mussten, zum anderen aber auch, dass völlig neu auftretende Fragestellungen für die Szenarienmodellierung gelöst werden mussten. Im Zentrum der Weiter- und Neuentwicklungen standen:

- die Verhaltensfunktionen für Überbauten („S-Kurven“), auch nach einer grundhaften Instandsetzung,
- die Verhaltensfunktionen für die weiteren Bauteilgruppen („Verschleißbauteile“),

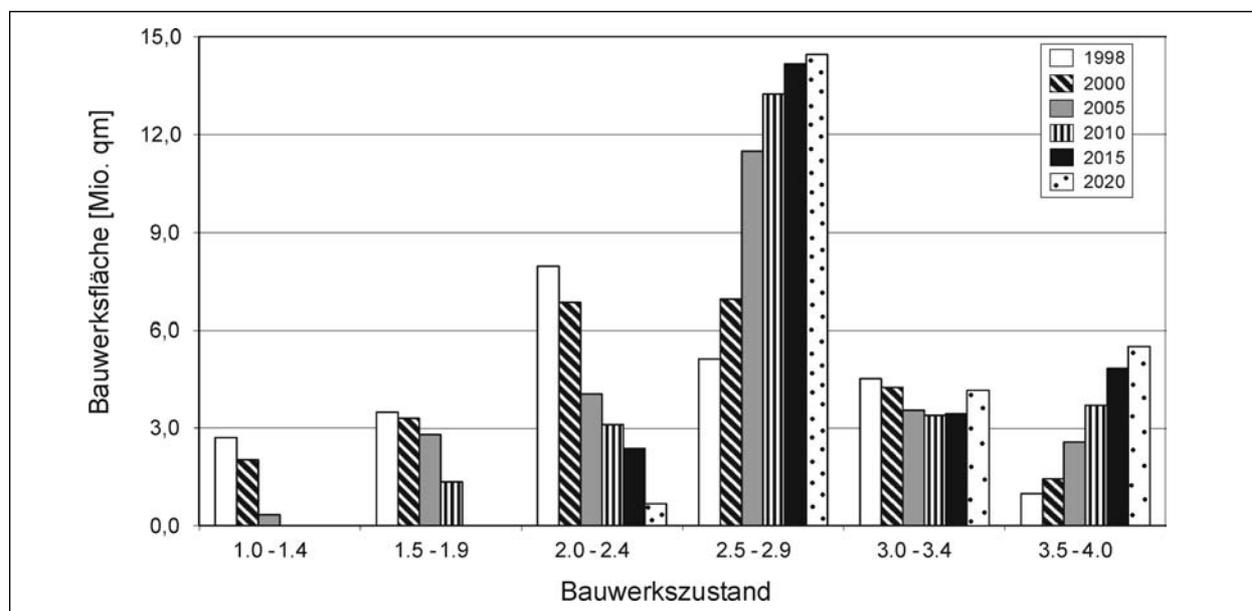


Bild 6: Entwicklung der Zustandsnoten ohne Erhaltung

- die Entscheidungsregel „Grundhafte Instandsetzung gegenüber Erneuerung“ in Abhängigkeit von Zustandsnote und Alter,
- Kostensätze und in der Brückenfläche degressive Kostenfunktionen,
- eine adäquate Definition des Bestandwertes,
- Plausibilitätstests für die Existenz von Bauteilgruppen,
- Strategien bei Geldmangel und Geldüberschuss (Finanzkorridor) und
- Modellierung fiktiver Neubauten.

4.2 Der objektbezogene Ansatz für die Szenarienbildung

4.2.1 Motivation

Bedeutsam für die in die Erhaltungsplanung eingebundenen Verwaltungen ist die Beantwortung von Fragen hinsichtlich der Auswirkung von Budgetbegrenzungen und anderen Restriktionen sowie Strategien auf den prognostizierten Zustand der Bauwerke oder deren prognostizierten Bestandwert. Mit diesen Erkenntnissen lässt sich die Bedeutung einer ausreichenden Erhaltung für eine nachhaltige Mobilität besonders deutlich machen.

Im Rahmen von Voruntersuchungen der BAST wurde ein Verfahren für die Berechnung der Auswirkungen von Szenarien bereitgestellt [4]. Hierbei werden netzweite Zustandsverteilungen mit Verhaltensfunktionen, Erhaltungsstrategien und Kosten

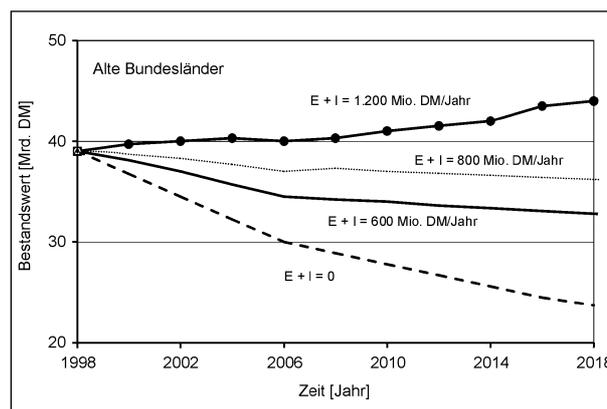


Bild 7: Bestandwert in Abhängigkeit von Aufwendungen für Erhaltung

verknüpft. Als Ergebnis konnte die zeitliche Entwicklung des Bauwerkszustandes bei vorgegebenem Mitteleinsatz angegeben werden (Bild 6).

Mit Hilfe des Verfahrens in BMS-SB ist es auch möglich, auf kurzem Wege Strategieuntersuchungen durchzuführen, deren Ergebnisse als Eingangsparameter für detailliertere netzbezogene Untersuchungen mit BMS-EP dienen können.

Definiert man den Bestandwert der Bauwerke als den Wiederbeschaffungswert minus den Kosten für durchzuführende Erhaltungsmaßnahmen zur Beseitigung der Schäden und Mängel und beschreibt man die Kosten für Erhaltung näherungsweise als Funktion der Zustandsnoten nach RI-EBW-PRÜF, lässt sich die zeitliche Entwicklung des Bestandwertes in Abhängigkeit der aufgewendeten Mittel für Ersatz und Instandsetzung angeben (s. Bild 7).

Aufbauend auf den vorgenannten Punkten zur Analyse der in der BAST-Studie [1] vorgestellten Modelle wurde das Verfahren zur Szenarienbildung im Rahmen der Erhaltungsplanung zwar in Anlehnung an die Studie entwickelt, jedoch für die Berechnungen auf die Objektebene gewechselt. Die Gründe hierfür waren folgende:

1. Wichtigster Ansatzpunkt in der Weiterentwicklung des Modells ist eine Verknüpfung zwischen der Zustandsnote der Bauwerke und deren Alter. Das Alter der Bauwerke dient als unmittelbares Korrektiv für die Entscheidung zwischen grundlegender Instandsetzung und Ersatzneubauten/Erneuerungen bzw. zukünftig für die Erfassung unterschiedlicher Kostensätze (z. B. bei Unterbauinstandsetzungen). Alter und Zustandsnote sind bei den Verschleißbauteilen wie beim Über- und Unterbau über die Verhaltensfunktionen gekoppelt. Grundlage der Berechnungen im Rahmen des Verfahrens bilden somit sowohl die Zustandsnoten der Bauwerke als auch das zugehörige Alter. Beide Angaben sind in SIB-Bauwerke enthalten.

2. Soll eine verbesserte Kostenprognose durchgeführt bzw. die Auswirkung von Erhaltungsszenarien auf den Bauwerksbestand untersucht werden, so sind detailliertere Kenntnisse über den Bauwerksbestand erforderlich. Im Verfahren zur Szenarienbildung werden das Alter, die Gesamtzustandsnote und die zugehörigen Bauteilgruppenzustandsnoten separat ausgelesen und ausgewertet. Dieser Ansatz erfordert den Übergang auf eine objektbezogene Auswertung, da sich die Auswirkungen unterschiedlicher Erhaltungsstrategien auf Grund der Anzahl der Einflussparameter nicht mehr durch einen globalen Ansatz auf der Grundlage von Verteilungen verfolgen lassen. Trotz dieser auf dem Einzelobjekt basierenden Auswertung werden Aussagen über die Wirkung verschiedener Szenarien nur auf der Makroebene bezüglich des gesamten Bestandes eines Netzes oder Teilnetzes getroffen, da auf Grund der naturgemäßen Vereinfachung einzelner Modellansätze die Aussagezuverlässigkeit auf Objektebene nicht ausreichend ist.

Der Ablauf der Berechnung innerhalb des weiterentwickelten Modells ist in Bild 8 dargestellt.

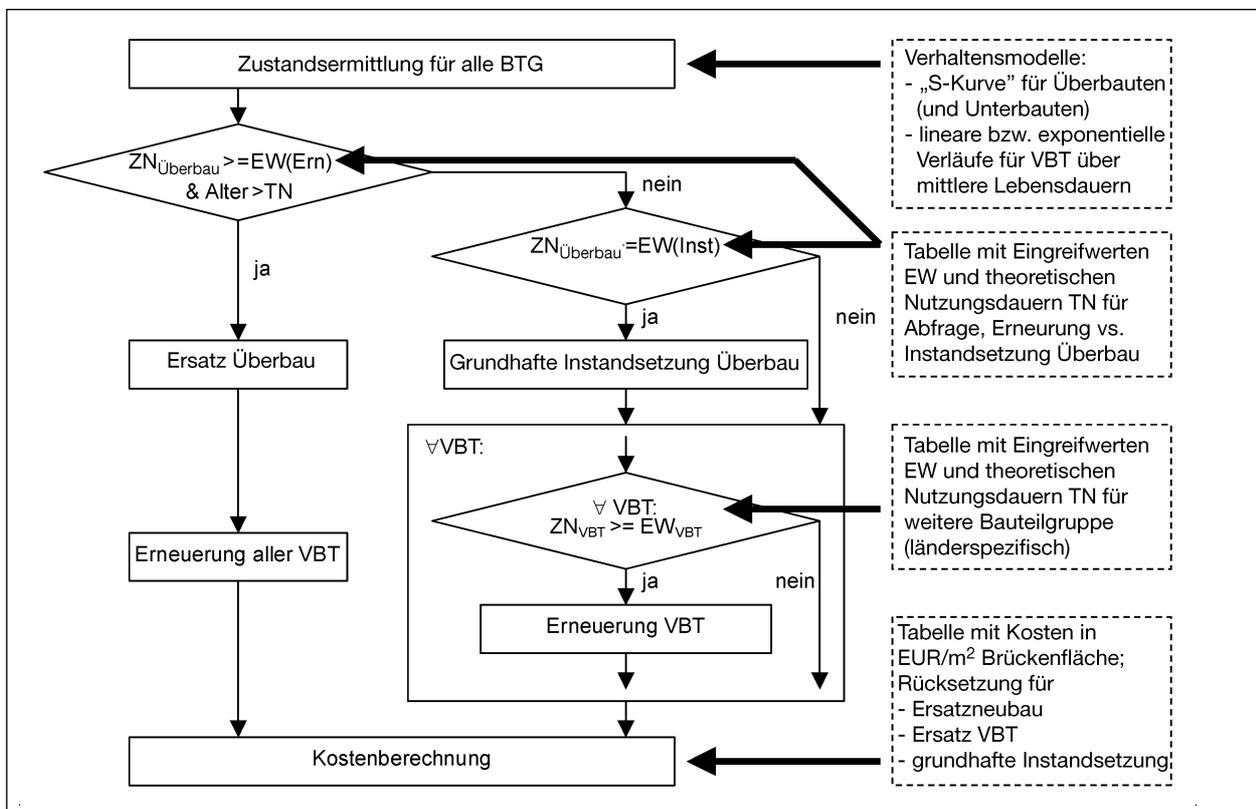


Bild 8: Ablaufschema der objektbezogenen Szenarienbildung (BTG = Bauteilgruppen, ZN = Zustandsnote, EW = Eingreifwert, Ern = Erneuerung, Inst = grundhafte Instandsetzung, VBT = Verschleißbauteile, d. h. alle Bauteilgruppen ohne Überbau und Unterbau)

Dabei erfolgten nach dem Einlesen der Bauwerksdaten zunächst eine Datenaufbereitung und eine Ermittlung der Verteilung der Zustandsnoten sowie der Altersstruktur. Unter Zugrundelegung bestimmter Auswahlkriterien werden zunächst Bauwerke, deren Zustand einen sofortigen Ersatz erfordert, gefiltert und die dafür notwendigen Haushaltsmittel berechnet. Danach erfolgten die Ermittlung der Bauwerke bzw. Bauteile, an denen eine grundlegende Instandsetzung erforderlich ist, sowie ebenso die daraus entstehenden Mittelanforderungen. Im letzten Schritt werden die Zustandsnoten nach Ersatz bzw. grundlegender Instandsetzung berechnet. Diese Vorgehensweise wird in Jahresschritten für das gesamte Brückenkollektiv wiederholt, bis das Ende des Prognosezeitraums erreicht ist.

Durch die gewählte Vorgehensweise, bei der das Verfahren auf den Daten jedes einzelnen Bauwerks aufbaut und damit auf der Objektebene angesiedelt wird, kommt es unwillkürlich zu einer größeren Komplexität. Der Wechsel auf die Objektebene macht es allerdings erst möglich, verschiedene Erhaltungsstrategien bzw. -vorgehensweisen abzubilden und somit ein strategisches Planungswerkzeug für die Szenarienbildung zu realisieren.

4.2.2 Berücksichtigung der Bauteilgruppenzustandsnoten aus SIB-Bauwerke

Mit der Umstellung von SIB-Bauwerke, Version 1.6 R 3.3, auf die Version 1.7 ist es möglich geworden, die Zustandsnoten der Bauteilgruppen (BTG) in

Bauteilgruppe	Kostensatz für Ersatz	Vorschlag für Zuordnung/Verarbeitung
Vorspannungen	Bei schlechter ZN für BTG Vorspannungen: Kostensätze für BTG Überbau mit Faktor belegen	Werden BG „Überbau“ zugeordnet; in der Regel kein Ersatz der Spannglieder, sondern nur Instandsetzung; die Ermittlung der weiterzuverarbeitenden Zustandsnote erfolgt nach dem Maximumprinzip
Gründungen	Bei schlechter ZN bei Gründungen: Kostensatz für BTG Unterbau mit Faktor belegen	Werden BG „Unterbauten“ zugeordnet, da kein separates Verhaltensmodell und in der Regel Schädigung durch unvorhersehbare Ereignisse (z. B. Unterspülung) erfolgen; die Ermittlung der zu verarbeitenden Zustandsnote erfolgt nach dem Maximumprinzip
Erd- und Felsanker	Keine Berücksichtigung beim Kostensatz	Werden „Unterbau“ zugeordnet; jedoch keine Anwendung des Maximumprinzips; Warnung ausgeben, wenn BT-Gruppe schlechte ZN (> 3,0) hat
Brückenseile und Brückenkabel	Bei schlechter ZN für BTG: Kostensatz für BTG Überbau mit Faktor belegen	Werden Überbau zugeordnet; die Ermittlung der zu verarbeitenden Zustandsnote erfolgt nach dem Maximumprinzip

Tab. 1: Integration der fehlenden Bauteilgruppen in das Szenarienprogramm

das Verfahren zur Szenarienbildung einzubeziehen. Für die Bauteilgruppen Vorspannungen, Gründungen, Erd- und Felsanker sowie Brückenseile und -kabel liegen zurzeit weder Kostensätze noch Modelle zur Verhaltensprognose vor. Aus diesem Grund wurden die Zuordnung zu einer der bisherigen Bauteilgruppen sowie die Ermittlung einer „Gesamtzustandsnote“ nach dem Maximumprinzip gemäß Tabelle 1 gewählt.

Mit der Zuordnung der Bauteilgruppen gemäß Tabelle 1 zu den bestehenden Bauteilgruppen „Überbau“ und „Unterbau“ werden mehrere Zustandsnoten nach dem Maximumprinzip zusammengefasst. Für den Fall der Überbauten können – entsprechendes Vorliegen der Bauteilgruppen vorausgesetzt – maximal drei Bauteilgruppen zusammengefasst werden (Vorspannungen und/oder Brückenseile und -kabel mit Überbau).

Je nach Verteilung der einzelnen Bauteilgruppenzustandsnoten ist es vorstellbar, eine Anpassung der Kostensätze vorzunehmen. Beispielsweise könnte der Kostensatz für die grundlegende Instandsetzung des Überbaus erhöht werden, wenn sowohl der Überbau als auch Vorspannungen oder Brückenseile eine Zustandsnote oberhalb des Eingreifwertes besitzen. Dies würde bedeuten, dass bei schlechtem Zustand aller genannten Bauteile ein erhöhter Aufwand, verbunden mit höheren Kosten, für die Beseitigung der Schäden anfällt.

4.2.3 Besonderheiten kleiner Brücken

Bei kleineren Bauwerken, z. B. charakterisiert über eine geringe Brückenlänge oder -fläche, sind oftmals keine Lager oder Übergangskonstruktionen vorhanden. Da neben der Bauwerksgröße auch der Hauptbaustoff des Überbaus über das Nicht-Vorhandensein von Bauteilgruppen (BTG) bei Bauwerken mit entscheidend ist, ist es wichtig, dass die Situation von Bauwerken, bei denen einzelne BTG nicht vorhanden sind, korrekt im Simulationsmodell erfasst wird.

Es ist davon auszugehen, dass die Information, ob eine BTG bei einem Bauwerk vorhanden ist, der Datenbank SIB-Bauwerke entnommen werden kann, sodass eine besondere Behandlung „kleiner Brücken“ theoretisch entfallen könnte. Falls dieses nicht der Fall ist, unterstützen die im BMS vorgesehenen umfangreichen Vollständigkeits- und Plausibilitätskontrollen dabei, die Daten zu verbessern bzw. zu ergänzen.

Solche Plausibilitätskriterien mit Hilfe der beiden Parameter Brückenfläche und Konstruktionsart, die Hinweise darauf geben, ob das Fehlen einer Bauteilgruppe sachlogisch möglich ist, gibt die nachfolgende Liste. Warnungen aus der Plausibilitätskontrolle werden dem Bearbeiter zur Verfügung gestellt.

Plausibilitätskontrollen bei Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken

- Falls kein Lager und/oder ÜKO bei Brückenlänge > 15 m und < 80 m in der Datenbank vorhanden: Warnung ausgeben, keine algorithmische „Ergänzung“ der Bauteilgruppe.
- Falls kein Lager und/oder ÜKO bei Brückenlänge > 80 m in der Datenbank vorhanden: Warnung ausgeben und Simulation inklusive ergänzter Bauteilgruppe durchführen.

Plausibilitätskontrollen bei Stahlbrücken

- Stahlbrücken besitzen in der Regel immer Lager und ÜKO; falls diese Bauteilgruppen dennoch nicht vorhanden sind: Warnung ausgeben und Simulation inkl. ergänzter Bauteilgruppen durchführen.

Für alle Bauwerksarten

- Bauwerke ohne Kappen und Schutzeinrichtungen bzw. Belag und Abdichtung in der Datenbank: Warnung ausgegeben, jedoch keine algorithmische „Ergänzung“ der Bauteilgruppen.
- Für alle bisher nicht behandelten Bauteilgruppen erfolgt keine separate Plausibilitätskontrolle. Sofern in diesen Fällen ausgewählte Bauteilgruppen in der Datenbank nicht vorhanden sind, werden diese für eine weitere Prognose auch nicht ergänzt.

Umgekehrt wäre es auch möglich, wahrscheinlich fehlerhaft eingetragene Bauteilgruppen zu erkennen, beispielsweise

Plausibilitätskontrollen bei Mauerwerksbrücken

- Mauerwerksbrücken besitzen in der Regel nie Lager und ÜKO; falls diese Bauteilgruppen dennoch vorhanden sind: Warnung ausgeben und Simulation des Zustandes des Bauwerks ohne diese Bauteilgruppen durchführen.

4.2.4 Zustandsentwicklung der Bauteilgruppe „Überbau“

Der Prognose der Zustandsentwicklung der Brückenüberbauten liegt die so genannte S-Kurve zugrunde. Die S-Kurve gilt für die Vorhersage der Zustandsentwicklung von Stahlbeton- und Spannbetonüberbauten unter der Voraussetzung, dass Schäden an Verschleißbauteilen regelmäßig beseitigt sowie regelmäßige Unterhaltungsarbeiten an den Überbauten durchgeführt werden.

Aus technischer Sicht kann der Verlauf der S-Kurve (Bild 9) folgendermaßen erklärt werden (Spannbetonbrücke):

1. Nach der Herstellung des Bauwerkes werden in der Regel innerhalb relativ kurzer Zeit (bis 10–15 Jahre nach Herstellung) Baumängel bzw. deren kurzfristige Auswirkungen auf den Bauwerkszustand sichtbar. Dies führt zu einem relativ schnellen Anstieg der Zustandsnoten in den ersten Jahren.
2. Ist dieser Zeitraum überstanden, kommt es zu einer Verlangsamung der Zustandsnotenverschlechterung. Geht man davon aus, dass notwendige Unterhaltungsmaßnahmen (Säuberung anfälliger Bauteile, Austausch von Verschleißbauteilen) in diesem Zeitraum durchgeführt werden, wirken lediglich die Betonschädigungen Karbonatisierung und Chlorideindringung auf das Bauwerk ein. In der Regel kann dabei festgestellt werden, dass die Brückenüberbauten den anfälligeren Teil darstellen, da sie den Einwirkungen aus Spritzwasser stärker ausgesetzt sind.
3. Da die vorgenannten Schädigungsmechanismen zunächst lediglich die Depassivierung des Stahls zur Folge haben, wird die Tragfähigkeit noch nicht eingeschränkt. Eine Verschlechterung der Schadensbewertung in der „Dauerhaftigkeit“ hat dabei eine vergleichsweise geringe Gewichtung auf die Zustandsnote des Gesamtbauwerkes. Kommt es durch die Depassivierung des Stahls zu einer Korrosion des Bewehrungsstahls, führt dies zu einer schwereren Schädigung des Bauwerks. Dies erklärt den steileren Anstieg der Zustandsnoten in den Jahren 75–100 nach Herstellung.

Für Stahlbrücken wurde vom Thüringer Landesamt für Straßenbau eine Auswertung analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise zur Verfügung gestellt, die die Zustandsentwicklung ebenfalls in

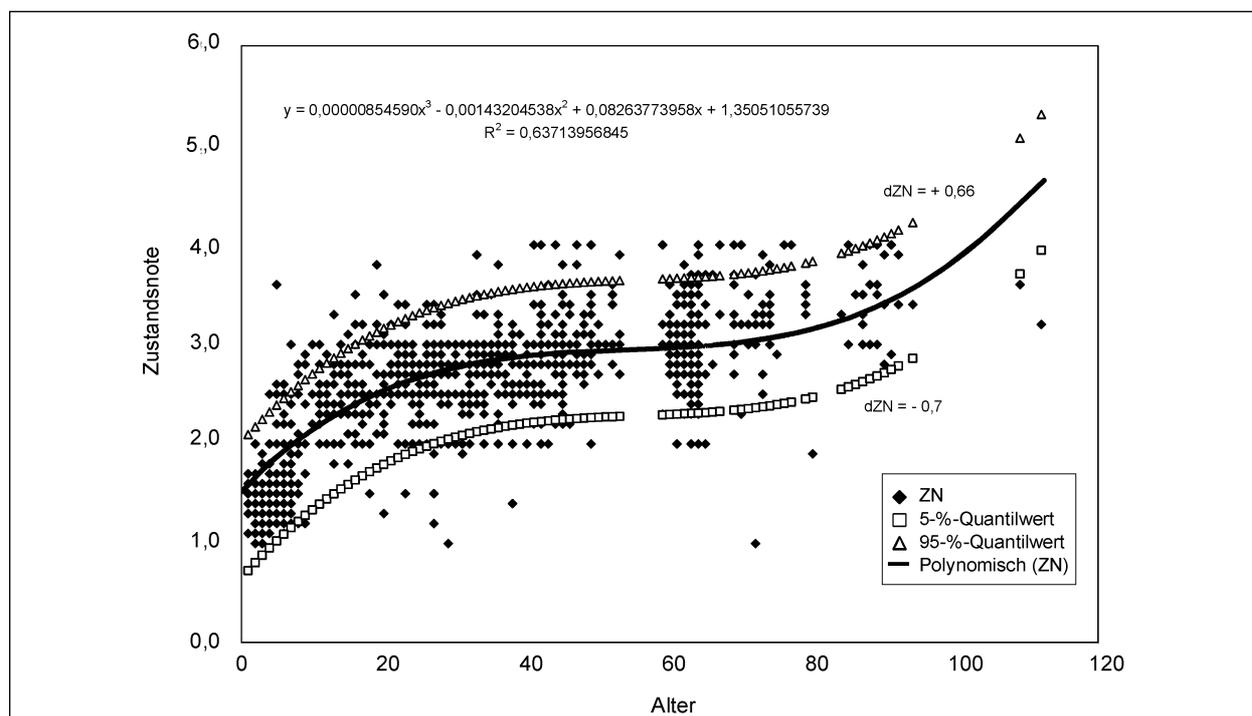


Bild 9: S-Kurve zur Beschreibung des Zustandsverlaufes von Betonüberbauten

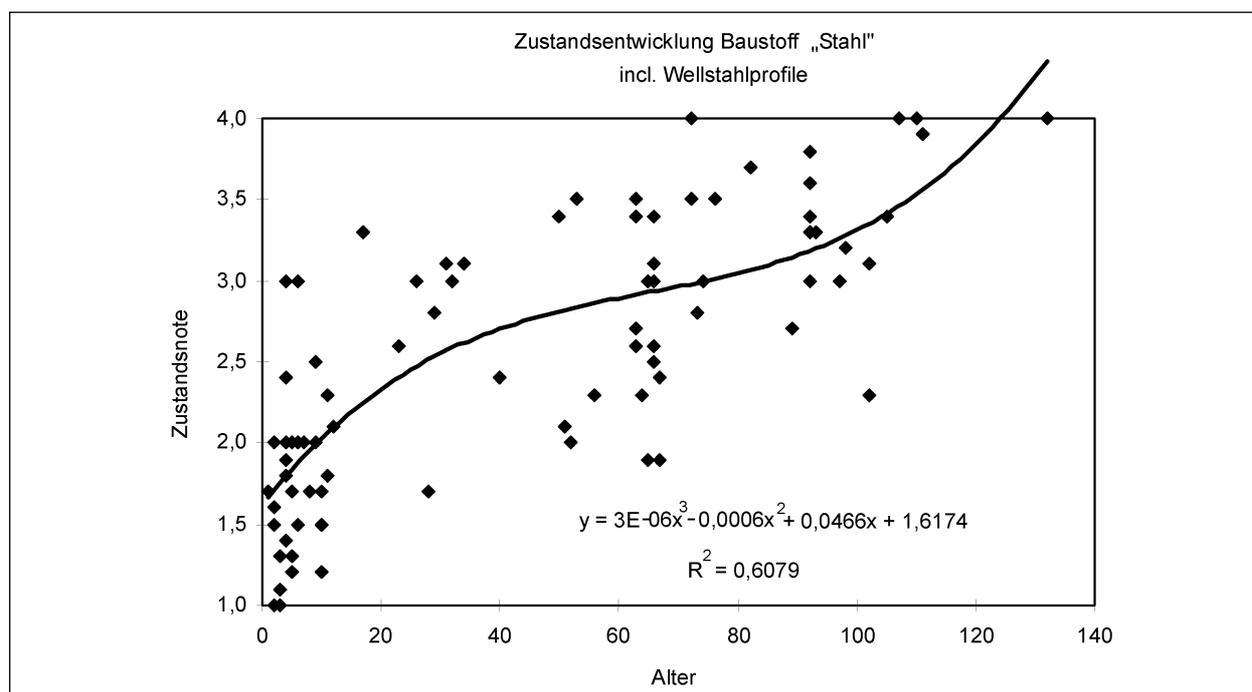


Bild 10: Zustandsentwicklungskurve für Stahlbrücken

Form einer S-Kurve darstellt (siehe Bild 10). Diese ist als mittlere Funktion des Zustandsverlaufes von Stahlüberbauten dem Verfahren der Szenarienbildung zugrunde gelegt.

Eine analoge Angabe für Steinbrücken ist auf Grund der wesentlich größeren Streuungen im Bereich der Zustandsnoten nicht sinnvoll (Bild 11).

Da der bundesdeutsche Bauwerksbestand eine Vielzahl verschiedener Hauptbaustoffe des Überbaues enthält, werden diese gemäß Tabelle 2 zur Auswahl gestellt. Bedingt durch die Verfügbarkeit der S-Kurven ausschließlich für Beton- (Stahlbeton und Spannbeton) und Stahlüberbauten laufen innerhalb der Szenarienbildung die Alterungsprozesse

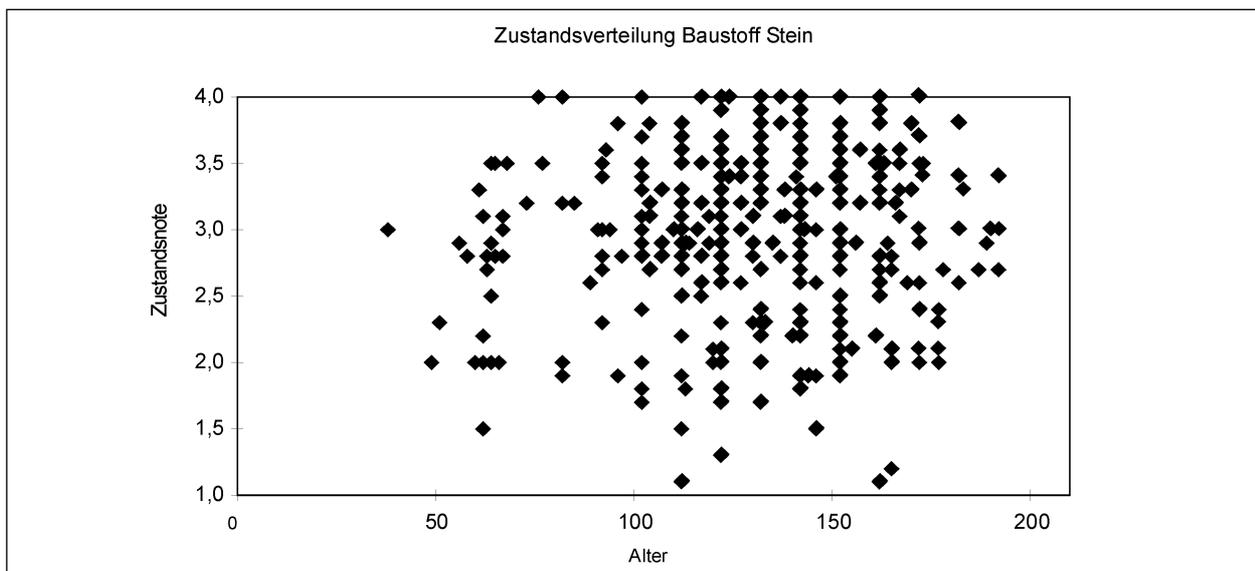


Bild 11: Zustandsverteilung für Steinbrücken, Thüringer Landesamt für Straßenbau

se für alle weiteren Hauptbaustoffe des Überbaus gemäß der Kategorie „Beton“. Diese Übergangslösung führt bei Steinbrücken auf Grund ihrer langen Lebensdauer zu einer Überschätzung der Häufigkeit von Erneuerungen. Sofern sich in der Zukunft Modelle für Überbauten mit weiteren Hauptbaustoffen aus Bauwerksdaten oder Erfahrungswerten ableiten lassen, können diese problemlos in das Verfahren integriert werden.

Im Verfahren zur Szenarienbildung wird die Gültigkeit der S-Kurve für Brückenüberbauten unter der Voraussetzung unterstellt, dass Schäden an Verschleißbauteilen zeitnah beseitigt werden. Ist dies nicht der Fall, zieht eine unterlassene Verschleißbauteilerneuerung in einigen Fällen (z. B. bei Lager- und ÜKO-Schäden) Folgeschäden nach sich, die in diesem Verfahren derzeit nicht berücksichtigt sind.

4.2.5 Zustandsentwicklung der Bauteilgruppe „Verschleißbauteile“

Der Zustand der Verschleißbauteile geht in die Berechnung der Gesamtzustandsnote nach dem Maximumprinzip ein. Durch diesen Berechnungsalgorithmus, der auch in SIB-Bauwerke implementiert ist, wird sichergestellt, dass auch Verschleißbauteilschäden ausreichende Berücksichtigung finden und die Gesamtzustandsnote beeinflussen. Unterlassene Verschleißbauteilinstandsetzungen wirken sich somit direkt auf die Gesamtzustandsnote eines Bauwerks aus.

Die Gesamtzustandsnote des Brückenbauwerks wird gemäß den „Algorithmen zur Zustandsbewer-

tung von Ingenieurbauwerken“, Berichte der BASt, Heft B22 [9], berechnet. Sie ergibt sich danach aus der maximalen Zustandsnote der Bauteilgruppen, d. h. der maximalen Zustandsnote von Überbau und Verschleißbauteilen. Der ohnehin geringe Zu- oder Abschlag auf die Gesamtzustandsnote um 0,1 in Abhängigkeit von der Anzahl der Schädigungen einzelner Bauteilgruppen lässt sich in der Prognose dabei nicht exakt bestimmen, da die Anzahl der Schädigungen je Bauteilgruppe im vorliegenden Modell auf Grund von deren Detaillierungsgrad als Datensatz nicht mitgeführt wird. Näherungsweise wird daher im Verfahren zur Szenarienbildung eine Bauteilgruppe als geschädigt bezeichnet, wenn ihre Zustandsnote größer als 1,8 ist. Der Abschlag von -0,1 wird angewendet, wenn weniger als 25 % der Bauteilgruppen eine Zustandsnote $> 1,8$ besitzen, der Zuschlag von +0,1, wenn mehr als 50 % der Bauteilgruppen eine Zustandsnote $> 1,8$ aufweisen.

Für die Prognose der Entwicklung der Verschleißbauteilgruppen (dazu gehören z. B. Geländer, Lager, Belag, Abdichtung, etc.) werden zunächst lineare Verhaltensfunktionen entsprechend den in [24] ermittelten Lebensdauern, ergänzt um den separaten Ansatz von Belag und Abdichtung, angesetzt.

Die Geraden laufen jeweils durch den Nullpunkt und denjenigen Punkt, der durch die theoretische Nutzungsdauer und die Zustandsnote 3,5 (bzw. den Eingreifwert) definiert ist. Die theoretischen Nutzungsdauern wurden zunächst für alle Bundesländer einheitlich angesetzt (siehe Tabelle 3). Eine

Baustoff des Überbaus		Zuordnung	
Unbewehrter Beton		Beton	Tabelle 5.32
Stahlbeton		Beton	dto.
Spannbeton		Beton	dto.
Stahlleichtbeton		Beton	dto.
Spannleichtbeton		Beton	dto.
Faserbeton		Beton	dto.
Wellprofil		Stahl	Tabelle 5.33
Walzprofil		Stahl	dto.
Schweißprofil		Stahl	dto.
Spundwand		Stahl	dto.
Stahlseil		Stahl	dto.
Kettenwerk		Stahl	dto.
Guss		Stahl	dto.
Aluminium		Stahl	dto.
Heimisches Vollholz		Holz	dto.
Heimisches Leimholz		Holz	dto.
Tropisches Vollholz		Holz	dto.
Tropisches Leimholz		Holz	dto.
Naturstein		Stein	dto.
Künstlicher Stein		Stein	dto.
Kunststoff		Kunststoff	dto.
Glas		Kunststoff	dto.
Polykarbonat		Kunststoff	dto.
Acryl		Kunststoff	dto.
Stahltragwerk mit Betonplatte im Verbund	(Verbundkonstruktion)	Beton	Tabelle 5.34
Stahltragwerk mit Betonplatte ohne Verbund	(Verbundkonstruktion)	Beton	dto.
Walzträger in Beton		Beton	dto.
Stahltragwerk mit Betonfertigteilen im Verbund	(Verbundkonstruktion)	Beton	dto.
Stahltragwerk mit Betonfertigteilen ohne Verbund	(Verbundkonstruktion)	Beton	dto.
Maschendraht mit Holzbelag		Holz	dto.
Stahlträger mit Holzbelag		Stahl	dto.
Stahlbetonfertigteile mit Ortbeton		Beton	dto.
Stahlbetonfertigteile mit Ortbeton im Verbund		Beton	dto.
Stahlbetonfertigteile mit Ortbeton ohne Verbund		Beton	dto.
Spannbetonfertigteile mit Ortbeton		Beton	dto.
Spannbetonfertigteile mit Ortbeton im Verbund		Beton	dto.
Spannbetonfertigteile mit Ortbeton ohne Verbund		Beton	dto.

Tab. 2: Zuordnung der Hauptbaustoffe gemäß ASB 98, Tabellen 5.32–34

weitere Unterteilung der Bauteilgruppen in einzelne Bauarten (wie z. B. Elastomer- oder Rollenlager) ist nicht implementiert, könnte jedoch bei Bedarf in späteren Schritten berücksichtigt werden.

Verschleißbauteilgruppe bzw. -kategorie	Alter bei Zustandsnote 3,5 (= LD der VBT)
Belag	15
Abdichtung	30
Übergangskonstruktion	20
Lager	30
Betonkappen	25
Geländer und Schutzplanken	30
Sonstiges (Entwässerung)	30

Tab. 3: Nutzungsdauer der Verschleißbauteilgruppen (VBT)

Das dargelegte Verfahren führt jedoch mit linearen Verhaltensfunktionen dazu, dass sich in den Intervallen der Zustandsnote von 1,5 bis 1,9 und 2,0 bis 2,4 eine geringe Anzahl von Bauwerken befindet, da meistens ein VSBT – mit gegenüber dem Überbau kurzer theoretischer Nutzungsdauer – mit schlechter Zustandsnote die Gesamtzustandsnote gemäß Maximumprinzip „nach unten zieht“. Dieses Verfahren tendiert also dazu, Investitionen des Bundes in ihren Auswirkungen auf die Substanz der Brückenbauwerke zu unterschätzen. Im Intervall 1,0 bis 1,4 der Zustandsnoten können sich darüber hinaus gemäß Verlauf der S-Kurve für die Überbauten ohnehin nur neu erstellte Brückenbauwerke mit Stahlüberbauten befinden, sodass sich insgesamt tendenziell eine rechtlastige Verteilung ergibt.

Aus diesem Grund wurden exponentielle Verhaltensfunktionen eingeführt. Diese tragen nicht zuletzt der Tatsache Rechnung, dass bei einigen Bauteilgruppen (z. B. Lagern, Übergangskonstruktionen) tatsächlich in vielen Fällen keine lineare Zustandsverschlechterung eintritt, sondern bestimmte Hauptschäden, die zentral für das Absinken der Zustandsnote verantwortlich sind, zu einem relativ späten Zeitpunkt eintreten. Bei der Erfassung dieses Tatbestandes in einer analytischen Funktion wurden die in dem Vorhaben „Eingreifzeitpunkte“ [24] ebenfalls abgefragten Daten zu Hauptschäden und dem zugehörigen Alter bei Auftreten dieser Schäden für die verschiedenen Verschleißbauteile herangezogen (siehe Tabelle 4).

Die Beschreibung der „sprunghaften“ Zustandsverschlechterung in höherem Alter erfolgt über die folgende Funktion:

$$ZN_{VBT}(x) = \frac{x}{b * TN} + e^{\ln(3,5 - \frac{1}{b}) * (\frac{x}{TN})^a}$$

Dabei sind:

$ZN_{VBT}(x)$: Zustandsnote der Verschleißbauteilgruppe VBT bei x Jahren

x: Alter

TN: theoretische Nutzungsdauer der jeweiligen Verschleißbauteilgruppe

a, b Konstanten bzw. Parameter.

Der Parameter a steuert, ab wann der Funktionsverlauf „steil“ nach oben geht (Zeitpunkt der Hauptschädigung), der Parameter b das Ansteigen der Funktion bis zu diesem Knickpunkt. Die Konstanten a und b werden zunächst gemäß Aufstellung in Tabelle 4 voreingestellt. Sie können anwenderspezifisch angepasst werden. Damit ergibt sich z. B. für Übergangskonstruktionen der in Bild 12 dargestellte Funktionsverlauf.

Die Zustandsentwicklung aller weiteren Verschleißbauteilgruppen wird weiterhin mit linearen Verhal-

Bauteilgruppe	Hauptschaden	Alter bei Hauptschaden	Zustandsnote	Exponent a	Steigung b
Fahrbahnübergangskonstruktion	Schadhafte Verankerungen; Traversen-/Lamellenbrüche	15	1/0/1 = 1,5	8	2,5
Lager	Korrosion, Schäden an der Gleitpaarung	20	2/0/2 = 2,3	3	1,5
Geländer	Korrosionsschäden; evtl. fehlende Elemente	15	0/0/2 = 1,8	3	0,7
Entwässerungseinrichtungen	Korrosion bzw. fehlende Verbindungsmittel	15/20	1/0/2 = 2,2	3	0,7

Tab. 4: Anpassung der exponentiellen Funktionen für Verschleißbauteile

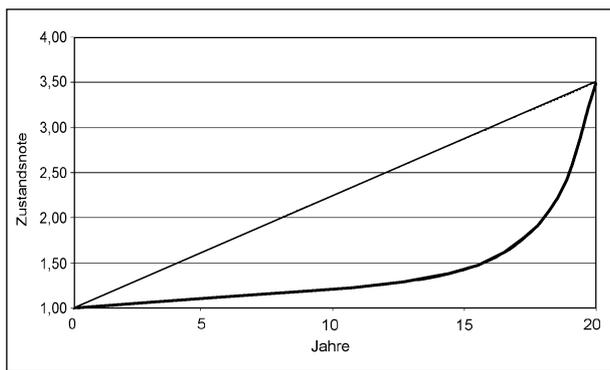


Bild 12: Exponentielle Alterungskurve am Beispiel der Fahrbahnübergangskonstruktionen

1 * (incl. 10 % Verwaltungskosten pauschal, gemäß Ablösungsrichtlinien)

** [1] enthält einen gemeinsamen Kostensatz für Belag und Abdichtung; Kosten wurden mit 65 % für Belag und 35 % für Abdichtung gewichtet und aufgeteilt, um für beide Bauteilgruppen getrennte Kostensätze aufweisen zu können

tensfunktionen abgebildet. Bei Vorliegen neuerer Erkenntnisse bzw. regionaler Unterschiede können Änderungen problemlos in die Datenbank eingepflegt werden.

Die degressiven Kostenkurven der SCHUBERT-Studie (Tabelle 5 [16]) beziehen sich auf eine Erhaltungsfläche, die für Instandsetzungsmaßnahmen an Überbauten datenseitig nicht bestimmt werden kann. Für alle weiteren Bauteilgruppen (Verschleißbauteile) können jedoch die von SCHUBERT vorgeschlagenen Kostenkurven implementiert werden, da die Erhaltungsfläche in der Definition von SCHUBERT der Erneuerung der Brückenfläche entspricht. Diese Kostenkurven geben somit einen Anhaltspunkt für die degressive Abnahme der auf die Brückenfläche bezogenen Erhaltungskosten für die einzelnen Bauteilgruppen in Abhängigkeit von der Brückengröße sowie für einige Bauteilgruppen darüber hinaus in Abhängigkeit von der Straßenart (Bundesautobahn bzw. Sonstige).

Als konkrete Einzelmaßnahmen werden Verschleißbauteile im Rahmen des Verfahrens ausschließlich erneuert. Die bauliche Unterhaltung umfasst alle Instandsetzungsarbeiten an Bauteilgruppen. Sie wird mit 10 % der jährlichen Erhaltungskosten angesetzt.

Instandsetzungsarbeiten bei Kappen, Fahrbahnübergangskonstruktionen und Belag könnten im Verfahren vorgesehen werden. Dieses würde jedoch einen erheblichen Mehraufwand bedeuten, da Verschiebungen der Verhaltensfunktionen etc. nach durchgeführter Instandsetzung analog dem

Bauteilgruppe	Nutzungsdauer	LVR 1985 DEM	BPL SB 2000 €	BPL SB 2000/1* €
Belag	15	120**		31,00
Abdichtung	30			58,00
Übergangskonstruktion	20	100,00	67,00	74,00
Lager	30	40,00	27,00	30,00
Betonkappen (bei Betonbrücken)	25	90,00	61,00	67,00
Geländer und Schutzplanken	30	30,00	20,00	22,00
Entwässerung	30	30,00	20,00	22,00
Grundhafte Instandsetzung Unterbau Beton		200,00	135,00	148,00
Ersatz Unterbau Beton	110	660,00	444,00	488,00
Grundhafte Instandsetzung Überbau Beton		200,00	135,00	148,00
Ersatz Überbau Beton	70	990,00	666,00	733,00
Grundhafte Instandsetzung Unterbau massiv		100,00	67,00	74,00
Ersatz Unterbau massiv	110	660,00	444,00	488,00
Grundhafte Instandsetzung Überbau Stahl				330,00
Ersatz Überbau Stahl	80	1.440,00	969,00	1.066,00

Tab. 5: Kostensätze für Erneuerung und Instandsetzung¹

Vorgehen beim Überbau implementiert werden müssten. Diese könnten entwickelt werden, bedeuteten jedoch eine Detaillierung, welche nahezu dem Standard des BMS entsprechen würde und somit die Eigenständigkeit des Verfahrens Szenarienburgung in Frage stellen würde.

4.2.6 Der Duale Bestandwert als Konzept für den Bestandwert

Der Bestandwert wird in [1] definiert: Der Bestandwert „... ergibt sich aus dem Wiederbeschaffungswert abzüglich der Kosten, die entstehen, um ein Bauwerk durch Neubau oder Instandsetzung auf einen sehr guten Bauwerkszustand (Zustandsnote 1,0 bis 1,4) anzuheben“. Dieser Ansatz wurde aus folgenden Gründen ergänzt:

- Ein Bestandwertansatz, der allein auf der Zustandsnote basiert, setzt ein grundhaft instandgesetztes Bauwerk mit einem neuen Bauwerk, ungeachtet der zu erwartenden Restnutzungsdauer, gleich.
- Gemäß Erfahrungen der Straßenbauverwaltungen der Länder wird nach einer Instandsetzung nicht mehr die gleich gute Zustandsnote wie beim Neubau erreicht (Abschlag ca. 0,2 bis 0,3).
- Der in [1] genannte Ansatz berücksichtigt pauschale Kostensätze pro Instandsetzungsmaßnahme und verknüpft diese mit einem fixen Rücksetzwert der Zustandsnote pro Instandsetzungsmaßnahme. Auf diese Art und Weise kann durch häufiges (kostengünstiges) Instandsetzen der Bestandwert überproportional angehoben werden, da die berücksichtigten Kosten nicht mit den tatsächlichen Kosten gemäß der Definition des Bestandwertes übereinstimmen.

Der in der betriebswirtschaftlichen Rechnungslegung verwendete Begriff des Restwertes als Differenz aus Erstellungskosten und Summe der jährlichen Abschreibungen lässt sich auf Brückenbauwerke schon allein deswegen nicht anwenden, weil hiernach durchaus gebrauchsfähige Brückenbauwerke am Ende ihrer theoretischen Nutzungsdauer den Rest- bzw. Bestandwert null hätten. Ferner suggeriert der Restwert einen Wiederverkaufswert, der bei Brückenbauwerken so nicht auszumachen ist.

² Anteil (Zustand) = $(3,9 - 1,7) / (3,9 - 1,4) = 0,88$ (Zustandsnote nach grundhafter Instandsetzung = 1,7 und Zustandsnote nach Erneuerung = 1,4)

Insgesamt ist bislang eine zielführende Definition des Bestandwertes bzw. des Restwertes im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems noch nicht gelungen.

Für die Auswertung der Ergebnisse des Verfahrens „Szenarienburgung“ ist jedoch der Bestandwert des Anlagevermögens des Bundes in verschiedenen Jahren und hierbei speziell der Brückenbauwerke in seiner Baulast neben der Verteilung der Zustandsnoten die zentrale Information. Deshalb wurde für das vorliegende Modell ein zweigeteilter Ansatz der Bestandwertberechnung entwickelt. Dieser wird im Folgenden als „Dualer Bestandwert“ bezeichnet und berücksichtigt sowohl Alter als auch Zustandsnote der Brückenbauwerke. Auch lässt sich die Anhebung des Bestandwertes durch eine grundhafte Instandsetzung mit diesem Ansatz darstellen.

Im Beispiel von Bild 13 ist der Bestandwert eines Brückenbauwerks mit einem Betonüberbau nach einer grundhaften Instandsetzung zu bestimmen. Im ersten Schritt wird dabei – pars pro toto – der Bestandwert des Überbaus (als Prozentsatz der Erstellungskosten) für das gesamte Brückenbauwerk angenommen.

Der rein über das Alter definierte Anteil des Bestandwertes ergibt sich aus der linearen Abschreibung der Erstellungskosten (Absetzungen für Abnutzungen = AfA). Im angeführten Beispiel eines Betonüberbaus beträgt dieser Anteil nach vergangenen 40 Jahren der theoretischen Nutzungsdauer von 80 Jahren noch 50 % (= $1 - 4/8$). Der zustandsabhängige Anteil des Bestandwertes ergibt sich aus dem Verhältnis der Differenz ($3,9 -$ aktuelle Zustandsnote) / ($3,9 -$ Zustandsnote nach Erneuerung), was im Jahr der grundhaften Instandsetzung 88 %² ergibt. Hierbei ist wiederum zu beachten,

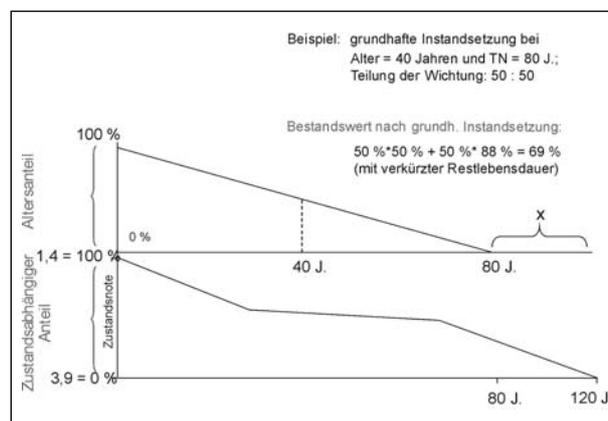


Bild 13: Beispiel für die Ermittlung des Dualen Bestandwertes

dass sich die Zustandsnote des Brückenbauwerks nach der grundhaften Instandsetzung durch die Verschiebung der S-Kurve entlang der y-Achse rascher verschlechtert als nach einer Erneuerung. Beide Bestandwertanteile gehen im Beispiel zu je 50 % in die Gesamtbewertung ein. Der resultierende Prozentsatz von 69 % wird mit der Brückenfläche und den Einheitspreisen der Erstellungskosten der Bauteilgruppen (ohne Verwaltungskosten) multipliziert.

Der Schwellenwert, bei dem der zustandsabhängige Anteil des Dualen Bestandwertes 0 % beträgt, wird auf 3,9 gesetzt. Dieses resultiert aus der gemäß RI-EBW-PRÜF [6] vorgegebenen Definition der Schadensbewertungen, nach der bei einer Note von 4 ein sofortiges Eingreifen und Beseitigen des Schadens erforderlich sind.

Dieses Grundverfahren ist hinsichtlich der folgenden Punkte erweitert worden:

- Prozentual wählbare Anteile des altersbezogenen und des zustandsbezogenen Bestandwertes.
- Durchführung des zweigeteilten Ansatzes für alle Bauteilgruppen sowie für den Überbau und den Unterbau getrennt. Der Unterbau altert ebenfalls gemäß S-Kurve und orientiert sich am Zustandsverlauf des Überbaus.
- Die Verschleißbauteile werden hierbei während der theoretischen Nutzungsdauer des Überbaus zyklisch erneuert, da ihre theoretische Nutzungsdauer deutlich geringer ist als die des Überbaus (vgl. Tabelle 3). Ihre AfA-Kurve hat daher einen „sägezahnartigen“ Verlauf.

Die Darstellung des Dualen Bestandwertes als Bestandwert eines Brückenbauwerks erfolgt durch die Summe der Dualen Bestandwerte aller Bauteilgruppen in konstanten Preisen des Jahres 2000. Die oben berechneten Prozentsätze werden dabei auf die Erstellungskosten ohne Verwaltungskosten angewendet, da Letztere kein abschreibungsfähiges Gut darstellen.

4.3 Strategien

4.3.1 Die Entscheidungsregel „Grundhafte Instandsetzung gegenüber Ersatz“

4.3.1.1 Überbauten – Grundhafte Instandsetzung

Zur Simulation der Auswirkungen unterschiedlicher Erhaltungsstrategien ist es erforderlich, die Instandsetzung bzw. Erneuerung einzelner Bauteile und nicht nur des gesamten Brückenbauwerks in die Betrachtung einzubeziehen. Dazu wurde für Überbauten festgelegt, dass sie innerhalb ihrer theoretischen Nutzungsdauer mehrfach grundhaft instandgesetzt werden können.

Die theoretische Nutzungsdauer beträgt bei Stahlüberbauten gemäß Ablösungsrichtlinien [19] 80 Jahre, bei Betonüberbauten 70 Jahre. Diese theoretische Nutzungsdauer (TN) kann im Verfahren um eine feste Zahl von Jahren erhöht oder verringert werden. Gemeinsam mit der Steuerung des Eingreifwertes für Erneuerung und grundhafte Instandsetzung kann somit die Zahl der grundhaften Instandsetzungen während der Lebensdauer der Überbauten gesteuert werden.

Grundhafte Instandsetzungen dienen dazu, die nach Erfahrung der Verwaltungen in Abständen von ca. 20 Jahren auftretenden Schäden insbesondere an Beton- bzw. Stahlflächen bzw. -bauteilen zu beseitigen und den Zustand der Überbauten deutlich zu verbessern. Den grundhaften Instandsetzungen wird ein eigener Kostensatz zugewiesen.

Steht der Ersatz von Fahrbahnübergangskonstruktion, Lager oder Belag an, so wird überprüft, ob in einem Zeitraum von 1 bis 5 Jahren danach eine grundhafte Instandsetzung oder Erneuerung des Überbaus durchzuführen wäre. Ist dies der Fall, werden anstehende grundhafte Instandsetzungen vorgezogen, d. h. grundhafte Instandsetzungen und Erneuerung der genannten Verschleißbauteile zu einem früheren Zeitpunkt gemeinsam durchgeführt. Damit wird eine Bündelung anstehender Maßnahmen auf Objektebene erreicht. In weiteren Entwicklungsschritten des Verfahrens ließen sich so auch Einsparungen bei der Verkehrsführung berücksichtigen.

Der Ablauf der Entscheidung für eine grundhafte Instandsetzung sieht folgendermaßen aus:

- a) Zunächst werden vom Anwender die Eingreifwerte für Erneuerung und grundhafte Instand-

setzung festgelegt. Dabei wird programmseits sichergestellt, dass der Eingreifwert für die grundhafte Instandsetzung [Eingreifwert(Inst)] nicht größer als der Eingreifwert für die Erneuerung [Eingreifwert(Ern)] ist. Der Eingreifwert ist dabei diejenige Zustandsnote, bei deren Erreichen die jeweilige Maßnahme durchgeführt wird.

- b) Eine grundhafte Instandsetzung wird durchgeführt, wenn die Zustandsnote $ZN > \text{Eingreifwert(Inst)}$ und das Alter $< TN$ gilt; eine Erneuerung wird durchgeführt, wenn die $ZN > \text{Eingreifwert(Ern)}$ und Alter $> TN$ gilt.
- c) Die Durchführung einer grundhaften Instandsetzung bedingt die Rücksetzung der Zustandsnote durch die erfolgte Zustandsverbesserung. Dabei wird bei Stahlüberbauten eine Rücksetzung auf 1,9 und bei Betonüberbauten auf 1,7 festgelegt (siehe Bild 14). Der Abschlag von 0,3 auf die Zustandsnote bei Erneuerung resultiert aus der Tatsache, dass erfahrungsgemäß eine grundhafte Instandsetzung nicht mit einem neuwertigen Überbau gleichgesetzt werden kann.
- d) Der Zustandsnotenverlauf nach durchgeführter grundhafter Instandsetzung ergibt sich gemäß der S-Kurve durch Parallelverschiebung auf der y-Achse. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass sich ein im Alter x grundhaft instandgesetzter Überbau nicht wie ein neuer verhält.

Für Unterbauten liegen keine separaten Funktionen zur Beschreibung des Zustandsverlaufs vor. Aus diesem Grund wird bei grundhaften Instandsetzungen der Überbauten gleichzeitig eine Unterbauinstandsetzung vorgesehen und kostenseitig eingestellt. Die Zustandsnote für die Unterbauten entspricht – ebenso wie der Rücksetzwert nach erfolgter Instandsetzung – der des zugehörigen Über-

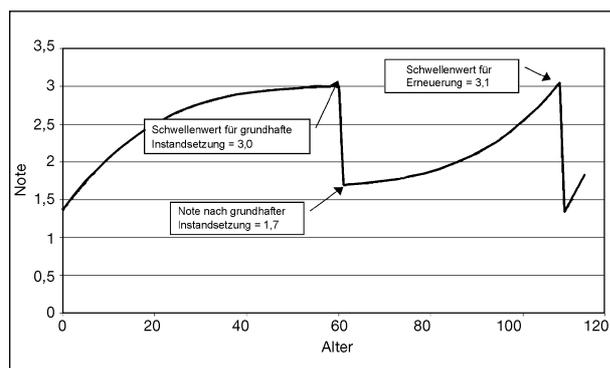


Bild 14: Zustandsentwicklung einer Brücke mit Betonüberbau

baus und geht in die Ermittlung des Dualen Bestandwertes ein. Die theoretische Nutzungsdauer des Unterbaus wird jedoch gemäß Ablösungsrichtlinien [19] mit 110 Jahren angesetzt.

4.3.1.2 Überbauerneuerung

Im vorigen Kapitel wurde die Abfrage zur Ermittlung des Bedarfs grundhafter Instandsetzungen erläutert. Da ab einem bestimmten Zustand bzw. Alter keine grundhaften Instandsetzungen mehr möglich oder nicht mehr wirtschaftlich vertretbar sind, wird als weitere Option die Erneuerung der Überbauten vorgesehen. Erneuerungen der Überbauten werden durchgeführt, wenn $ZN > \text{Eingreifwert(Ern)}$ und Alter $> TN$ gilt. Die Zustandsnote nach erfolgter Erneuerung des Überbaus beträgt im Falle der Stahlüberbauten 1,7 und bei Betonbrücken 1,4.

Mit einer Überbauerneuerung sind der Ersatz aller Verschleißbauteile sowie in der Regel die Erneuerung der Unterbauten verbunden. Letzteres gilt immer, wenn an Unterbauten bereits eine grundhafte Instandsetzung durchgeführt wurde oder es sich um ein Bauwerk im Zuge einer Bundesautobahn (BAB) handelt, dessen Baujahr vor einem aus Sicht der Verkehrsentwicklung kritischen Jahr liegt, d. h., wenn zu erwarten ist, dass die Unterbauten in erheblichem Maße nicht mehr den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen.

Bei der Erneuerung von Überbauten an Brückenbauwerken im Zuge von Bundesautobahnen mit einem Baujahr vor einem variabel vorzugebenden Schwellenjahr (z. B. 1950) wird die Brückenfläche pauschal um 30 % vergrößert, um dem gestiegenen Verkehrsaufkommen genähert Rechnung zu tragen. Dies entspricht der Erfahrung der Verwaltungen, nach der an Bauwerken ab einem bestimmten Alter grundsätzlich Fahrbahnverbreiterungen im Zuge eines dreispurigen Ausbaus der BAB durchgeführt werden müssen.

4.3.1.3 Weitere Bauteilgruppen (Verschleißbauteile)

Verschleißbauteile werden im Zuge dieses Verfahrens lediglich erneuert. Dabei werden die in Tabelle 3 aufgeführten Lebensdauern für die einzelnen Bauteilgruppen zugrunde gelegt. Kleinere Instandsetzungsarbeiten werden kostenseitig in den baulichen Unterhaltungskosten erfasst, die mit pauschal 10 % der jährlichen Erhaltungskosten angesetzt werden.

Gemäß den angegebenen Lebensdauern werden die Verschleißbauteile im Rahmen des Verfahrens zyklisch erneuert, sofern diese Zyklen nicht durch grundhafte Instandsetzungen oder Erneuerungen des Überbaus unterbrochen bzw. überlagert werden. Bei vorzeitiger Erneuerung beginnt der Zyklus ab diesem Zeitpunkt neu. Die Zustandsnote nach Erneuerung beträgt generell 1,0.

Die Erneuerung der Verschleißbauteile erfolgt bei Erreichen des vorzugebenden Eingreifwertes, der jedoch den Schwellenwert von 3,9 bzgl. der Zustandsnote nicht übertreffen darf. Über die linearen bzw. exponentiellen Verhaltensfunktionen für die Verschleißbauteile korrespondieren entsprechende theoretische Nutzungsdauern mit den Eingreifwerten. Die Schwellenwerte für Verschleißbauteilerneuerungen können für jede Bauteilgruppe separat festgelegt werden, sodass damit bereits eine Wichtung der Bedeutung einzelner Bauteilgruppen erreicht werden kann.

4.3.2 Simulation von Neubauten

4.3.2.1 Motivation und Ansatz

Auf Grund der Tatsache, dass es sich beim Netz der Bundesstraßen nicht um ein statisches, sondern um ein dynamisches Netz handelt, kommen neue Brücken zu dem bestehenden Kollektiv hinzu, die dann auch eine entsprechende Stärkung der Gruppe mit niedrigen, d. h. guten Zustandsnoten darstellen.

Bei der Simulation von Neubaumaßnahmen sind verfahrenstechnisch zwei Fälle zu unterscheiden. Zum einen sind konkret in der Planung befindliche Bauwerke zu berücksichtigen. Dies geschieht mit Hilfe einer Tabelle, in der zu jedem neuen Bauwerk das vorgesehene Baujahr, die Bauwerks-ID und die für die Simulation notwendigen technischen Daten abgelegt sind.

Zum anderen ist im Rahmen der langfristigen Simulation für solche Jahre, für die keine definitiven Bauwerksplanungen mehr vorliegen können, die Möglichkeit der Bestandserweiterung mittels „virtueller“ Bauwerke über eine mittlere Investitionssumme pro Jahr vorgesehen. Diese kann vom Anwender beispielsweise durch einen Prozentsatz vom Bestandswert des Brückenkollektivs (zum Dualen Bestandswert vgl. Kapitel 4.2.6) im Startjahr der Simulation oder absolut auf Basis von Erfahrungswerten vorgegeben werden. Sehr geringe Summen können entweder vernachlässigt oder über mehrere Jahre zusammengefasst werden.

In jedem Jahr der Simulation werden alle Neubauten mit den für die weitere Simulation notwendigen Detailangaben, z. B. Brückenfläche und Bauteilgruppen, mit Zustandsnoten, versehen. Da Neubaumaßnahmen aus anderen Haushaltsmitteln als Unterhaltungsaufwendungen finanziert werden, werden zwar die jährlichen Baukosten sowohl für die festgeplanten Neubaumaßnahmen als auch für die generierten „virtuellen“ Bauwerke separat angegeben, jedoch bei der Vorgabe von Budgetgrenzen (Finanzkorridor) nicht berücksichtigt. Die für die Neubauerhaltung aufgewendeten Kosten können einem Vergleich zwischen Szenarien mit und ohne Neubauten entnommen werden.

Im Hinblick auf eine realitätsnahe Simulation wurde der Ansatz verfolgt, dass die statistische Verteilung der Anzahl der erzeugten virtuellen Neubauten bezüglich der Attribute „Hauptbaustoff des Überbaus“ und „Größenklasse“ (Brückenfläche) langfristig der aktuellen Verteilung der bereits bestehenden Bauwerke entsprechen sollte. Diese Vorgehensweise besitzt jedoch den Nachteil, dass sich bestimmte bestehende Ungleichverteilungen bei Bauwerksarten in einzelnen Bundesländern oder Verwaltungen auch langfristig nicht ausgleichen lassen.

Aus diesem Grund wurde eine Generierung von Neubauten auf Basis einer seitens des Nutzers vorgegebenen Verteilung vorgesehen.

Bei einer bundesweiten Betrachtung ist die mittlere jährliche Investitionssumme zunächst gemäß dem Verhältnis der Brückenfläche je Bundesland zur gesamten Brückenfläche auf die Bundesländer aufzuteilen. Auch ist die Verteilung des Brückenkollektivs gemäß Hauptbaustoff des Überbaus und der Größenklasse länderspezifisch zu ermitteln (sofern nicht ohnehin eine landesspezifische Berechnung durchgeführt wird).

4.3.2.2 Integration geplanter Baumaßnahmen

Bei jedem Bauwerk wird von der Existenz von Überbau und Unterbau ausgegangen, da derzeit nur Brücken und beispielsweise keine weiteren Ingenieurbauwerke wie Verkehrszeichenbrücken oder Lärmschutzwände betrachtet werden.

Zusätzlich ist es möglich, Baukosten anzugeben, sofern diese nicht auf Basis der Simulationsparameter für Erneuerungen berechnet werden sollen. Alle existierenden Bauteilgruppen werden mit den im Simulationsprogramm hinterlegten Anfangswerten der jeweiligen Verhaltensfunktionen initialisiert.

4.3.2.3 Erzeugung von Neubaumaßnahmen auf Basis einer jährlichen Investitionssumme

Grundlage für die Generierung „virtueller“ Neubaumaßnahmen ist entweder die statistische Verteilung der bestehenden Bauwerke B_k , $k = 1 \dots Z$, bezüglich der Attribute „Hauptbaustoff des Überbaus“ und „Brückenfläche“ oder eine durch den Anwender vorgegebene Verteilung. Das Attribut „Hauptbaustoff des Überbaus“ kann die in Tabelle 6 aufgeführten Werte annehmen. Für die Brückenfläche F wird eine Approximation des kontinuierlichen Wertebereichs entsprechend Tabelle 7 vorgenommen.

Insgesamt ergibt sich hieraus eine Einteilung aller Bauwerke B_k in die Klassen $K_{ij} = K(A_i, B_j)$, $i = 1 \dots 5$, $j = 1 \dots 6$:

$$B_k \in K_{ij} \Leftrightarrow \text{Hauptbaustoff}(B_k) = A_i \wedge \text{Bauwerksfläche}(B_k) \in B_j$$

Für jede Klasse K_{ij} bezeichne Z_{ij} die Anzahl der erhaltenen Bauwerke. Die relative Häufigkeit h_{ij} der Bauwerke in der Klasse K_{ij} ergibt sich dann als:

$$h_{ij} = \frac{Z_{ij}}{Z} \text{ mit der Anzahl der Bauwerke } Z.$$

Als klassenbezogene Bauwerksfläche F_{ij} wird der Mittelwert der Flächen aller in der jeweiligen Klasse befindlichen Bauwerke berechnet:

$$F_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} * \sum_{B_k \in K_{ij}} \text{Bauwerksfläche}(B_k).$$

Bei der Generierung eines virtuellen Bauwerks aus der Klasse K_{ij} wird dem Hauptbaustoff der Wert A_i und der Bauwerksfläche der Wert F_{ij} („typische“ Fläche) zugewiesen.

Die Kosten C_{ij} für einen Neubau aus der Klasse K_{ij} werden auf Basis der im Simulationsprogramm verwendeten Kostenkurven oder Mittelwerte für Erneuerungen berechnet. Es ergibt sich der relative Anteil r_{ij} der Klasse K_{ij} an der jährlichen Investitionssumme.

A1	A2	A3	A4	A5
Beton	Stahl	Holz	Kunststoff	Stein

Tab. 6: Werte für Hauptbaustoff des Überbaus

B1	B2	B3	B4	B5	B6
$F \leq 200$	$200 < F \leq 500$	$500 < F \leq 1.000$	$1.000 < F \leq 2.000$	$2.000 < F \leq 5.000$	$5.000 < F$

Tab. 7: Einteilung der Brückenfläche

Dieser allgemeine Ansatz berücksichtigt implizit auch nichtlineare Zusammenhänge zwischen Bauwerksfläche und Kosten (Kostenkurven bzw. „Mengenrabatt“).

Bei Vorgabe der Verteilung durch den Anwender der Szenariensimulation entfallen die oben dargestellten Berechnungen. Stattdessen wird der Anteil r_{ij} an der jährlichen Investitionssumme I für jede Klasse K_{ij} in Form einer Tabelle vorgegeben. Dazu wurde eine Parametertabelle entwickelt und mit Defaultwerten belegt (siehe Tabelle 8).

Jede Zeile der Tabelle entspricht einer Bauwerksklasse K_{ij} . Für jede Klasse sind der Hauptbaustoff des Überbaus, die Größe (minimale, maximale und durchschnittliche Bauwerksfläche), die durchschnittliche Breite sowie der Anteil am jährlichen Budget r_{ij} angegeben. Klassen mit einem Anteil

Hauptbaustoffe	min_F [m²]	max_F [m²]	Fläche [m²]	Breite [m]	r_{ij} [%]
Beton	0	200	100	10	15
Beton	200	500	250	10	20
Beton	500	1.000	750	10	15
Beton	1.000	2.000	1.500	15	10
Beton	2.000	5.000	3.500	15	5
Beton	5.000	1.000.000	10.000	15	2
Stahl	0	200	100	10	0
Stahl	200	500	250	10	3
Stahl	500	1.000	750	10	5
Stahl	1.000	2.000	1.500	15	5
Stahl	2.000	5.000	3.500	15	10
Stahl	5.000	1.000.000	10.000	15	10
Holz	0	200	100	3	0
Holz	200	500	250	3	0
Holz	500	1.000	750	0	0
Holz	1.000	2.000	1.500	0	0
Holz	2.000	5.000	3.500	0	0
Holz	5.000	1.000.000	10.000	0	0
Kunststoff	0	200	100	3	0
Kunststoff	200	500	250	3	0
Kunststoff	500	1.000	750	0	0
Kunststoff	1.000	200	1.500	0	0
Kunststoff	2.000	5.000	3.500	0	0
Kunststoff	5.000	1.000.000	10.000	0	0
Stein	0	200	100	10	0
Stein	200	500	250	10	0
Stein	500	1.000	750	10	0
Stein	1.000	2.000	1.500	15	0
Stein	2.000	5.000	3.500	0	0
Stein	5.000	1.000.000	10.000	0	0

Tab. 8: Bauwerksklassen

$r_{ij} = 0\%$ beschreiben zum Teil nicht sinnvolle Kombinationen von Hauptbaustoff und Größenklasse und enthalten deshalb zum Teil den Wert „0“ für Länge und Breite.

Die durchschnittliche Brückenbreite dient dazu, aus der simulierten Brückenfläche eine für Plausibilitätskontrollen verwendbare Brückenlänge berechnen zu können. Sie wird mit steigender Brückenfläche von 10 m auf 15 m bei Stahlbeton- und Stahlbrücken erhöht, um dem Charakter größerer Brücken Rechnung zu tragen. Die geringere Breite bei Holz- und Kunststoffbrücken unterstellt, dass diese Bauarten hauptsächlich bei Geh- und Radwegbrücken vorkommen.

Bei der prozentualen Aufteilung auf die einzelnen Größenklassen in der Spalte „ r_{ij} “ wird das Budget zu ca. 2/3 auf Stahlbeton- und Spannbetonbauwerke und zu ca. 1/3 auf Stahlbrücken aufgeteilt. Holz-, Kunststoff- und Steinbrücken werden in dieser Standardeinstellung zunächst nicht neu gebaut. Zu berücksichtigen ist dabei, dass bei diesen Bauarten Größen ab ca. 500 m² im nennenswerten Umfang nicht zu erwarten sind und deshalb nicht Eingang in die Simulation finden.

Mit den oben beschriebenen Berechnungen bzw. Vorgaben steht jeder Klasse K_{ij} ein mittleres jährliches Investitionsvolumen $I_{ij} = r_{ij} \cdot I$ zur Verfügung. Da die Anzahl der Neubaumaßnahmen pro Jahr und Klasse immer ganzzahlig ist, ist es prinzipiell nicht möglich, die Verteilungsvorgaben jährlich exakt einzuhalten. Außerdem reicht in vielen Klassen, insbesondere solchen mit großen Bauwerken, die jährliche Investitionssumme I_{ij} pro Klasse bei weitem nicht zum Bau eines Bauwerks der Klasse, so dass auch keine ausreichend gute jahresbezogene Näherungslösung möglich ist.

Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit zu einer jahresübergreifenden Generierung von Neubaumaßnahmen. Dabei sind eine gleichmäßige Verteilung der jährlichen Baukosten und nach Möglichkeit die Einhaltung der vorgegebenen jährlichen Investitionssumme anzustreben. Allerdings ist zu beachten, dass diese unter gewissen extremen Umständen, beispielsweise in einem kleinem Bundesland, nicht ausreichend sein kann, um ein Bauwerk einer bestimmten Klasse neu zu errichten.

Als Lösung wurde ein Ansatz entwickelt, welcher die unterschiedlichen Anforderungen bei der Simulation von Neubauten entkoppelt (siehe Bild 15). Ein Generierungsmodul erzeugt jährlich neue Kan-

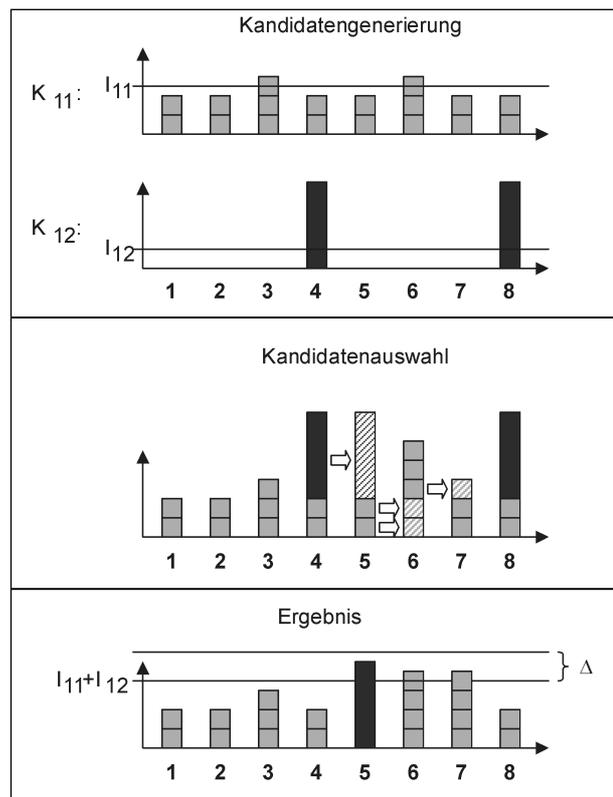


Bild 15: Kandidatengenerierung und -auswahl am Beispiel zweier Klassen K_{11} und K_{12}

didaten für den Neubau und stellt die langfristige Approximation der Verteilungsvorgabe sicher, ein zweites Modul wählt jeweils aus, welche der anstehenden Kandidaten gebaut werden und welche auf spätere Jahre verschoben werden. Für diese Entscheidung wird neben der zur Verfügung stehenden jährlichen Investitionssumme auch die Dringlichkeit eines Neubaus, repräsentiert durch die Jahre seiner Verschiebung, herangezogen.

Das Generierungsmodul führt für jede Klasse K_{ij} ein Konto, dessen Wert W_{ij} in jedem Jahr um die jährliche Investitionssumme I_{ij} der Klasse erhöht wird: $W_{ij} = W_{ij} + I_{ij}$. Anschließend werden so lange Bauwerke in die Kandidatenliste eingetragen und die jeweiligen Kosten vom Konto abgezogen ($W_{ij} = W_{ij} - C_{ij}$), wie der Kontostand größer als die Kosten für einen Neubau sind ($W_{ij} > C_{ij}$). Neben den normalen Eigenschaften (ID, Fläche, Baustoff, Bundesland, Kosten) wird für jedes Bauwerk auch eine Wartezeit von 0 Jahren eingetragen.

Das Auswahlmodul versucht anschließend, die zur Verfügung stehende Investitionssumme I fair zu verteilen. Dazu überprüft es zunächst für jedes Bauwerk der Kandidatenliste, ob bereits die höchstmögliche Wartezeit überschritten worden ist. In diesem Fall wird das Bauwerk virtuell gebaut,

d. h., es wird aus der Kandidatenliste entfernt, zum Bauwerksbestand der Simulation hinzugefügt und die Baukosten werden von der jährlichen Investitionssumme abgezogen $I = I - C_{ij}$. Anschließend werden alle übrigen Kandidaten virtuell gebaut, sofern dies nicht zu einem Überschreiten der Investitionssumme I führt, wobei diese Bedingung durch einen zusätzlichen Parameter D gelockert werden kann. Zum Schluss wird für jedes verbleibende Bauwerk der Kandidatenliste die Wartezeit um ein Jahr erhöht.

4.3.3 Einfügen eines Finanzkorridors

Die Kostenbilanz einer rein an der vorgegebenen Erhaltungsstrategie orientierten Budgetierung führt zu sehr großen Schwankungen in den Jahren des Betrachtungszeitraums. Da solche Schwankungen des Finanzbedarfs für öffentliche Haushalte nicht darstellbar sind, wurde für die Simulationen zu den Erhaltungsszenarien eine Überlagerung der gewählten Strategie mit einem Investitions- bzw. Finanzkorridor eingeführt. Dieser bedeutet, dass in jedem Jahr (pro Gebietseinheit) eine Mindestsumme investiert werden muss und eine Höchstsumme ausgegeben werden darf.

Im Folgenden wird das (algorithmische) Konzept für die Einhaltung des Finanzkorridors im Detail vorgestellt.

Zunächst wird geprüft, ob die aus den Benutzervorgaben folgenden Maßnahmen innerhalb des Finanzkorridors realisierbar sind. Bei Geldüberfluss, d. h., die Kosten liegen unterhalb der Untergrenze des Finanzkorridors, werden die Anforderungen so lange erhöht (d. h. benutzerdefinierte Eingreifwerte für Bauteilgruppen herabgesetzt) bis die Kosten innerhalb des Finanzkorridors liegen oder eine weitere Erhöhung nicht mehr sinnvoll ist (keine „vergoldeten Geländer“, Erreichen absoluter Untergrenzen). Wird der Finanzkorridor hingegen überschritten (Geldmangel), so werden die Anforderungen so lange gelockert (d. h. benutzerdefinierte Eingreifwerte für Bauteilgruppen heraufgesetzt), bis die Obergrenze eingehalten wird oder eine weitere Lockerung nicht mehr möglich ist (Erreichen absoluter Obergrenzen, in der Regel Zustandsnote 4,0). Die aus den so veränderten Anforderungen resultierenden Maßnahmen werden in die weitere Simulation integriert.

Dieses intuitiv verständliche Vorgehen ist jedoch in einigen Details zu spezifizieren. Die zentrale Frage dabei ist, welche Bauteilgruppen aus ingenieurwis-

senschaftlicher Sicht überhaupt und in Kombination mit welchen anderen Bauteilgruppen für eine Lockerung oder Verschärfung der Erhaltungsmaßnahmen in Frage kommen. Diesbezüglich wurden zwei Strategien untersucht, von denen eine stärker den Aspekt der Verkehrssicherheit und eine andere stärker den Aspekt der Dauerhaftigkeit betont.

Diese Strategien werden mit einer Hierarchie gekoppelt, die Brücken im Zuge von Bundesautobahnen höher als solche im Zuge von Bundesstraßen einstuft. Das bedeutet, dass für Brücken im Zuge von Bundesautobahnen bei Geldmangel als Letztes die Anforderungen gelockert und bei Geldüberfluss als Erstes die Anforderungen erhöht werden. Es wurde festgelegt, die Schwellenwerte für die Zustandsnoten der Bauwerke im Zuge von Bundesautobahnen und der Bauwerke anderer Verkehrswege nicht über eine 0,1-Stufe hinaus differenzieren zu lassen. Die Orientierung der zweiten Hierarchiestufe an der Verkehrsbedeutung der Bauwerke mit Hilfe von Angaben zu den DTV wird erst bei einer Verknüpfung von SIB-Bauwerke mit entsprechenden Straßendatenbanken bzw. bei Vorliegen ausreichend gepflegter Daten in SIB-Bauwerke möglich sein.

Es sind folgende Strategien für eine Absenkung der Eingreifwerte der Bauteilgruppen (Erhöhung der Anforderungen) bei reichlichem Budget (Geldüberfluss) möglich:

- Verbesserung der Verkehrssicherheit der Bauwerke durch Verringerung der Eingreifwerte (EW) in vorgegebenen Schritten in folgender Reihenfolge:
 - Schutzeinrichtungen,
 - Belag,
 - Fahrbahnübergangskonstruktion (ÜKO),
 - Entwässerung (Sonstiges),
 - Kappen,
 - Keine Veränderung der Eingreifwerte der Über- und Unterbauten.
- Verbesserung der Dauerhaftigkeit der Bauwerke durch Verringerung der Eingreifwerte in vorgegebenen Schritten in folgender Reihenfolge:
 - Überbau,
 - Abdichtung und Belag,
 - Unterbau,

- Lager,
 - Fahrbahnübergangskonstruktion (ÜKO),
 - Kappen.
- Bei zu knappem Budget werden die Anforderungen an die Zustände der Bauteilgruppen gelockert. Dies geschieht durch Erhöhung der Eingreifwerte der Bauteilgruppen in folgender Reihenfolge bis zu einem maximalen Eingreifwert (3,5 bis 4,0 je nach Vorgabe; Abstufungen der zulässigen Eingreifwerte je nach Bauteilgruppe möglich):
- Kappen,
 - Entwässerung (Sonstiges),
 - Belag,
 - Schutzeinrichtungen,
 - Lager,
 - Fahrbahnübergangskonstruktion (ÜKO),
 - Überbau,
 - Unterbau.

Diese Priorisierung führt zur Einsparung vieler kleiner Maßnahmen.

Die vorgestellten Strategien zur Umsetzung knapper bzw. reichlicher Budgets dienen als erster Anhaltspunkt. Um die Strategien den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten bestmöglich anpassen zu können, gibt es die Möglichkeit für eine zukünftige Implementierung im BMS, die Umsetzung der Strategien und damit die Änderung der Eingreifwerte variabel zu gestalten.

4.4 Systemstruktur

Bild 16 zeigt die Struktur des erstellten Prototypen. Den zentralen Baustein bildet das in Visual Basic geschriebene, direkt ausführbare Programm „Brückenkalkulation“, welches aus den Modulen „Import“, „Simulation“, „Diagramm-Generator“ und der grafischen Benutzeroberfläche („GUI“) besteht.

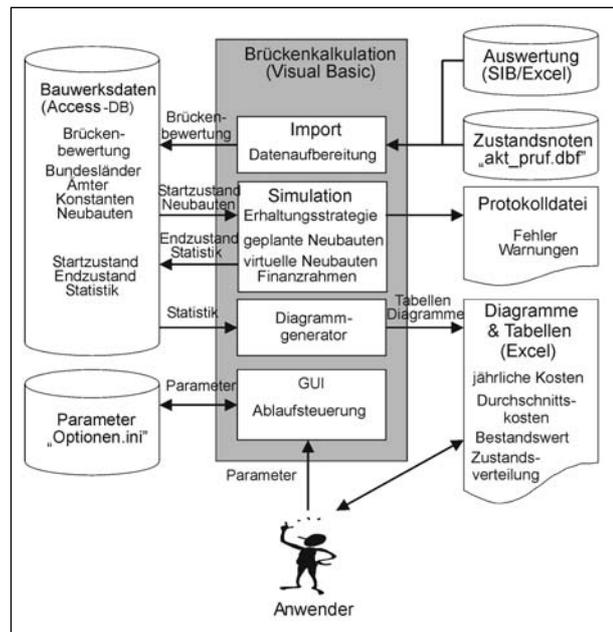


Bild 16: Struktur des Prototypen zur Szenarienbildung

4.5 Darstellung der Simulationsergebnisse

Bei der Darstellung der Ergebnisse eines Simulationslaufs wird eine Excel-Mappe mit den folgenden Tabellen und Diagrammen angelegt:

- Tabellenblatt „Kennziffern“ mit allen Programmparametern sowie den wichtigsten Kennziffern,
- Tabelle und Diagramm zur Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Maßnahmenkosten im Bewertungszeitraum,
- Tabelle und Diagramm zur Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Anzahl von Maßnahmen im Bewertungszeitraum,
- Tabelle und Diagramm mit geglätteten Kosten im Bewertungszeitraum,
- Tabelle und Diagramme mit Verteilungen der Zustandsnoten nach der Anzahl der Bauwerke,
- Tabelle und Diagramme mit Verteilungen der Zustandsnoten nach der Bauwerksfläche,
- Tabelle und Diagramm mit Anzahl der Neubauten und
- Tabelle und Diagramm mit Kosten der Neubauten.

5 Weitere Entwicklungsschritte

Die weiteren Entwicklungsschritte des BMS umfassen in erster Linie Aktivitäten zur Realisierung von DV-gestützten Verfahren:

- Überarbeitung des Entwurfes des Manteldokumentes zur Darstellung der Schnittstellen zwischen den Programmen BMS-MV, -MB, -EP und -SB sowie
- Überarbeitung der Ergebnisse der Beispielrechnungen auf Objektebene und Ergänzung der zugehörigen Feinkonzeptionen zur Bereitstellung für die Ausschreibung des Programms BMS-MB,
- Überarbeitung der Ergebnisse der Beispielrechnungen auf Netzebene und Ergänzung der zugehörigen Feinkonzeptionen zu BMS-EP und -SB zur Bereitstellung für die Ausschreibung der Programme BMS-EP und -SB,
- Erstellung der Ausschreibungsunterlagen für die EU-weite Ausschreibung der Programme BMS-MV, -MB, -EP und -SB,
- Erstellung des Entwurfes der Richtlinie für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Ingenieurbauwerken (RPE-ING). Die endgültige Fassung wird nach Erstellung und Erprobung der BMS-Programme erfolgen.

Die Entwicklung dieser Computerprogramme umfasst die Erstellung DV-technischer Feinkonzepte, die Programmierung, die Probeanwendung in ausgewählten Ländern und die Verfahrenseinführung in den Straßenbauverwaltungen. Die Vorgehensweise orientiert sich dabei am Phasenkonzept gemäß BVB-Planung.

Nach Fertigstellung der Programme sind weiterhin geplant:

- Erarbeitung von Handbüchern für den Einsatz der BMS-Programme,
- Weiterentwicklung der Ansätze der Szenarienbildung als Prognoseinstrumente,
- Untersuchungen zu Einarbeitung plausibler Alternativrouten.

6 Zusammenfassung

Das BMVBW realisiert ein umfassendes Bauwerks-Management-System (BMS) mit Teilmodulen für

Bundes- und Länderverwaltungen, welches als Hilfsmittel für die Erstellung von Erhaltungsplanungen dient und als Controlling-Instrument die Realisierung von Zielen und Strategien ermöglicht. Angestrebt werden damit eine bundesweite Vereinheitlichung von Planungsverfahren sowie die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Erhaltung der Bauwerke des Bundesfernstraßennetzes. Im Rahmen des AP-Projektes 04 244/B4 „Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems (BMS) für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3“ wird die Entwicklung der Stufe 3 „Bewertung auf Netzebene“ dargestellt.

Die Realisierung des BMS erfolgt in einzelnen DV-Programmen (Bild 17), die jeweils Teilergebnisse für die nachfolgenden Verfahren bereitstellen. Diese Vorgehensweise gewährleistet eine weitgehende Transparenz und die Möglichkeit von Eingriffen in den Gesamttablauf. Das Programm BMS-MV wird zur Ableitung von Informationen aus SIB-Bauwerke und den Straßendatenbanken und zur Bereitstellung dieser Informationen für die nachfolgenden Programme erstellt. Diese sind:

- BMS-MB zur Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen auf Objektebene,
- BMS-EP zur Optimierung der Erhaltungsplanung auf Netzebene und
- BMS-SB zur Visualisierung der Auswirkungen von Erhaltungsszenarien und -strategien.

Die fachliche Konzeption der DV-Programme erfolgt im Rahmen von AP-Projekten der BAST sowie von Ressortprojekten des BMVBW.

Die Koordinierung und Betreuung dieser Projekte werden von der BAST und der Arbeitsgruppe „Entwicklung des BMS“ in Abstimmung mit dem ehemaligen B/L-HA Brücken- und Ingenieurbau gewährleistet. Die Betreuung der DV-Entwicklung erfolgt über das Nachfolgegremium der PG 28 „Bauwerks-Management-System“ des ehemaligen B/L-FA IT Koordinierung der Projektgruppe.

Die Stufen

- 1: Grundlagenuntersuchungen und
- 2: Bewertungsverfahren auf Objektebene

sind [1] ausführlich dargestellt worden. Informationen hierzu können der entsprechenden Veröffentlichung entnommen werden.

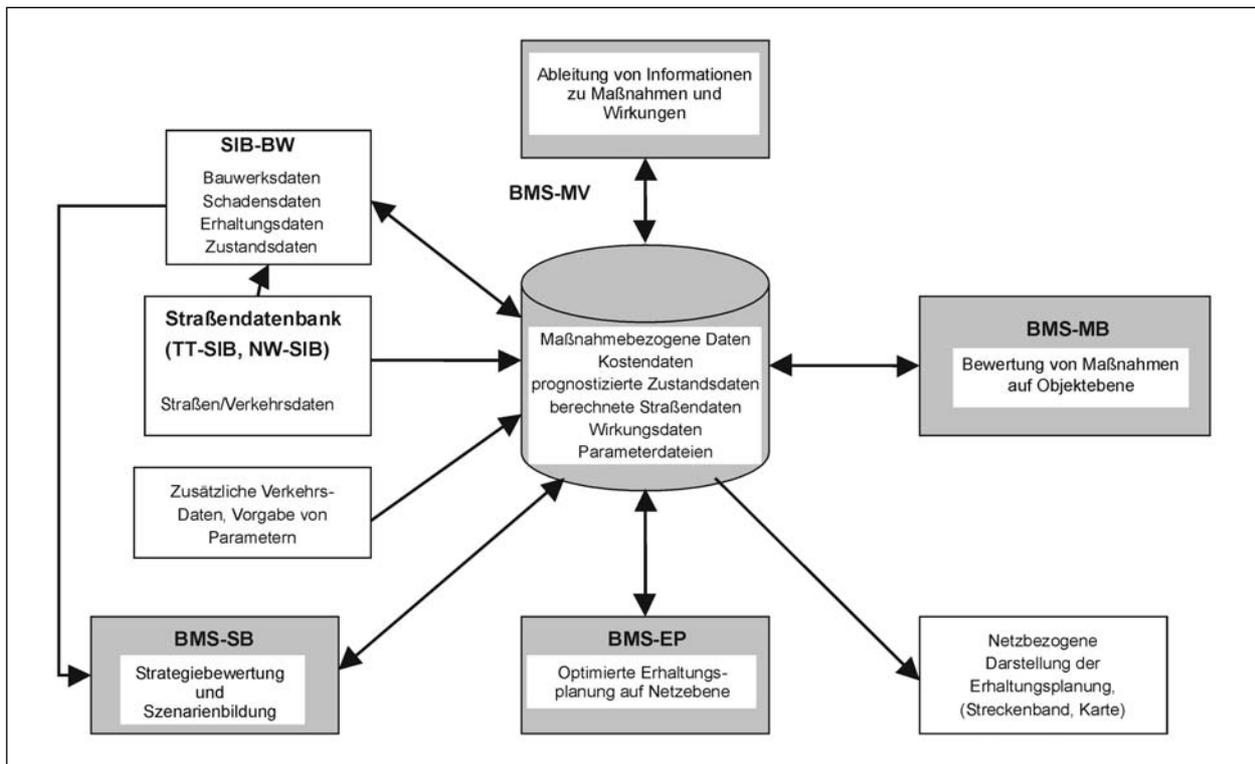


Bild 17: BMS – beteiligte vorhandene und geplante Programme

Stufe 3: Bewertungsverfahren auf Netzebene

Mit dem geplanten Programmsystem BMS-EP können Erhaltungsmaßnahmen auf Netzebene optimiert werden. Es werden dabei vor allem zwei Optimierungsvarianten dargestellt:

- Optimierung der Zustandsverteilung der Bauwerke bei gegebenen Finanzmitteln (Finanzszenario),
- Minimierung der Erhaltungsausgaben bei vorgegebener Zustandsverteilung (Qualitätsszenario).

Das Finanzszenario wird auf die Lösung des Problems der Auswahl der Maßnahmen, welche die größten Zustandsverbesserungen bewirken, zurückgeführt und mit Hilfe eines angepassten Algorithmus zur Knapsack-Optimierung gelöst. Ein Gewichtsparameter ermöglicht außerdem die Berücksichtigung weiterer Kriterien, etwa der volkswirtschaftlichen Auswirkungen von Maßnahmen (Nutzerkosten). Für das Qualitätsszenario wird ein Suchverfahren eingesetzt, welches das Lösungsverfahren des Finanzszenarios so lange mit unterschiedlichen Budgetvorgaben aufruft, bis das minimal erforderliche Budget gefunden ist.

Das geplante Programm BMS-SB liefert einen praktikablen Weg zur Simulation von Strategien für

die Erhaltungsplanung der Straßenbrücken in der Baulast des Bundes. Es wurde ein makroskopisches Simulationsmodell für sehr große Brückenkollektive entwickelt, das die Entscheidungen über Erhaltungsmaßnahmen jedoch auf Objektebene in Abhängigkeit von Bauwerkeralter und Zustandsnote trifft. Die verschiedenen Erhaltungsstrategien können über die Eingreifwerte für grundlegende Instandsetzung und Erneuerung als Parameter im Modell abgebildet werden. Das Ergebnis der Simulationsläufe sind die Verteilungen der Zustandsnoten sowie die jährlichen Kosten und Bestandswerte im Betrachtungszeitraum.

7 Literatur

- [1] HAARDT, P.: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken, Berichte der BAST, Heft B25, Bergisch Gladbach, 1999
- [2] Statistik der Bauwerke des Bundesfernstraßennetzes 2001: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2002, unveröffentlicht
- [3] Straßenbaubericht 2001: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2002

-
- [4] KRIEGER, J.: Entwicklung des Finanzbedarfs für die Erhaltung der Brücken der Bundesfernstraßen, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2000, unveröffentlicht
- [5] ASB: Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Verkehrsblatt-Verlag 2004
- [6] RI-EBW-PRÜF: Ausgabe 2004, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Verkehrsblatt-Verlag 2004
- [7] DIN 1076 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen: Überwachung und Prüfung, Ausgabe November 1999
- [8] Programmsystem SIB-Bauwerke: Ingenieurbüro WPM, im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2005
- [9] HAARDT, P.: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken, Berichte der BASt, Heft B22, Bergisch Gladbach, 1999
- [10] NAUMANN, J.: Erhaltungsmanagement der Bundesfernstraßen, BMS/BRIME-Kolloquium 2000, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2000
- [11] N. N.: Brückenerhaltung, Bericht einer wissenschaftlichen Expertengruppe der OECD, Paris 1992, erschienen in: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 666, 1994
- [12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS), Ausgabe 1997
- [13] FE 15.322/2.000/HRB: Grundlagen zur Optimierung der Erhaltungsplanung, PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, 2002, unveröffentlicht
- [14] FE 15.369/2002/HRB: Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Erhaltungsplanung für Brücken- und Ingenieurbauwerke (fachliche Feinkonzeption BMS-EP), PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, im Auftrag des BMVBW, 2003, unveröffentlicht
- [15] FE 15.347/2001/HRB: Entwicklung eines Verfahrens für die Erstellung des Erhaltungsprogramms auf Netzebene, Heller Ingenieurgesellschaft, Darmstadt, im Auftrag des BMVBW, 2003, unveröffentlicht
- [16] FE 15.344/2001/HRB: Entwicklung eines Verfahrens zur Szenarienbildung, PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, im Auftrag des BMVBW, 2003, unveröffentlicht
- [17] FE 15.318/1999/HRB: Entwicklung eines Kataloges von Erhaltungsmaßnahmen, KÖNIG und HEUNISCH, Leipzig, im Auftrag des BMVBW, 2002
- [18] RSA: Richtlinien für die Sicherung von Arbeitsstellen an Straßen, 4. Auflage 1995
- [19] Bundesministerium für Verkehr (BMV): Richtlinien für die Berechnung der Ablösungsbeträge der Erhaltungskosten für Brücken, Straßen, Wege und andere Ingenieurbauwerke, Stand 1988 (Ablöserichtlinie), Verkehrsblatt-Dokument Nr. B 6306, 1988
- [20] FE 89.104/2001/HRB: Grundlagen der Optimierung von Erhaltungsstrategien auf Objektebene, Universität Stuttgart, 2002, unveröffentlicht
- [21] FE 15.323/2.000/HRB: Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung von Maßnahmenvarianten, RS-Consult, Berlin, im Auftrag des BMVBW, 2002, unveröffentlicht
- [22] OEFNER, G.: Ermittlung von repräsentativem Kostensätzen für Erhaltungsmaßnahmen (Fahrbahnen), Schlussbericht zum Projekt BMVBW-V1002/UA1, Universität der Bundeswehr, München, 2001
- [23] FE 15.297/1998/HRB: Erarbeitung von Modellen zur Schadens- und Zustandsentwicklung, KÖNIG und HEUNISCH, Leipzig, im Auftrag des BMVBW, 2000, unveröffentlicht
- [24] FE 15.319/1999/HRB: Ermittlung des Eingreifzeitpunktes für Erhaltungsmaßnahmen an Brücken und Ingenieurbauwerken, KÖNIG und HEUNISCH, Leipzig, im Auftrag des BMVBW, 2001, unveröffentlicht
- [25] FE 15.320/1999/HRB: Verfahren zur Ermittlung der ökonomischen Wirkungen von Erhaltungsmaßnahmen, RS-Consult, Berlin, im Auftrag des BMVBW, 2001, unveröffentlicht

- [26] Bundesministerium für Verkehr (BMV): (Hrsg.): Gesamtwirtschaftliche Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen, Bewertungsverfahren für den Bundesverkehrswegeplan 1992, Schriftenreihe des BMV, Heft 72, 1993
- [27] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil Wirtschaftlichkeitsuntersuchen (RAS-W), Ausgabe 1986
- [28] Bundesministerium für Verkehr: Bauwerksprüfung nach DIN 1076 – Bedeutung, Organisation, Kosten, Dokumentation 1997, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund 1997
- [29] FE 15.370/2002/HRB: Weiterentwicklung von Verhaltensmodellen im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems, Universität Stuttgart, im Auftrag des BMVBW, 2003, unveröffentlicht
- [30] FE 15.371/2002/HRB: Weiterentwicklung des Verfahrens zur Ermittlung von Baulastträgerkosten bei der Erhaltungsplanung von Brücken- und Ingenieurbauwerken, KÖNIG und HEUNISCH, Leipzig, im Auftrag des BMVBW, 2003, unveröffentlicht
- [31] FE 15.346/2001/HRB: Entwicklung eines Verfahrens zur Erhaltungsplanung auf Bauwerksebene (fachliche Feinkonzeption BMS-MB), 2003, unveröffentlicht
- [32] HAARDT, P.: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufe 1 und 2, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B43, Bergisch Gladbach 2003

B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti
von Weschpfennig € 11,50

B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahn-
tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Küchler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Von A. Städing, T. Krocker € 12,00

B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das
deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50

B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50

B 45: Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus
wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brü-
ckenseilen und -kabeln
Hemmert-Halswick € 13,00

2004

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im
Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

B 48: Scannende Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von
Brückenbauwerken
Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann, Wiggenhauser
in Vorbereitung

B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf-
tung von Epoxidharz
Raupach, Rößler in Vorbereitung

B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für
das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.