

Methodenstudie zur Life-Cycle-Bewertung von Straßenbefestigungen und Ableitung konsensfähiger Bewertungsmodelle

FA 9.140

Forschungsstelle: Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (Prof. Dr.-Ing. W. Ressel)

Bearbeiter: Ressel, W./ Tejkl, K./ Klöpfer, C.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: November 2011

1 Einleitung

Die Methodik der Life-Cycle-Bewertung von Straßenbefestigungen gewinnt im Hinblick auf neue Bauvertragsformen, welche neben der Herstellung auch die langfristige Erhaltung der Funktionalität eines Straßenkörpers beinhalten, immer mehr an Bedeutung. Im Vordergrund steht hierbei der betriebs- wie auch gesamtwirtschaftliche Vergleich alternativer Oberbauweisen mit einer über die Herstellung hinausgehenden Berücksichtigung des zu erwartenden Erhaltungsaufwands.

Basis einer Life-Cycle-Bewertung bildet die Zustandsprognose von der Herstellung bis zum Ende der Lebens- bzw. Nutzungsdauer eines Objekts und darauf aufbauend – bei der monetären Life-Cycle-Cost-Analyse – die Ermittlung der über die Herstellungskosten (Nettoinvestitionen) hinaus in diesem Zeitraum anfallenden Folgekosten (Ersatzinvestitionen), welche zum Erhalt eines geforderten Zustandsniveaus notwendig sind.

Der Vergleich alternativer Bauweisen erfordert zudem die Festlegung eines von der Lebensdauer in der Regel abweichenden einheitlichen Bewertungszeitraums und dadurch den Ansatz eines ggf. noch vorhandenen Restwerts. Probleme bei der vergleichenden Lebensdauerbetrachtung bereitet die kontinuierliche technische Weiterentwicklung, wodurch Eingangsparameter einem ständigen Wandel unterliegen, weshalb auch keine abschließenden Antworten zu erwarten sind. Umso wichtiger ist es, für die Bauweisenbewertung über ihre gesamte Lebensdauer auf eine Methodik zurückgreifen zu können, die allgemein akzeptiert wird und unabhängig vom konkreten Wert der Einflussgrößen auch für zukünftige Bauweisen und bautechnische Entwicklungen einsetzbar ist.

2 Aufgabenstellung

Das Forschungsprojekt "Methodenstudie zur Life-Cycle-Bewertung von Straßenbefestigungen" gliedert sich in zwei Stufen. In der ersten Stufe sollten zunächst mithilfe einer Literaturrecherche, die die Analyse bereits bestehender Modelle im In- und Ausland umfasste, die methodischen Grundlagen einer vergleichenden Lebenszyklusbetrachtung erarbeitet sowie die hierzu notwendigen Daten erfasst werden. Ziel war es aufbauend auf diesen Ergebnissen ein konsensfähiges Bewertungsmodell im Hinblick auf das in Deutschland vorherrschende Gebrauchsverhalten von Straßenbefestigungen abzuleiten. Mithilfe einer ersten EDV-technischen Umsetzung zu Testzwecken war zudem eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen.

Die zweite Projektstufe beinhaltete zunächst die Überarbeitung des vorgeschlagenen Modells und der verwendeten Parameter

auf Grundlage der durchgeführten Sensitivitätsanalyse, mit dem Ziel, im Ergebnis ein abgestimmtes und allgemein nutzbares Life-Cycle-Modell vorzulegen. Im Vordergrund stand die Erstellung einer Software zum Bauweisenvergleich, welche sich auf Eingangsgrößen und Randbedingungen stützt, die vom Auftraggeber, betreuenden Arbeitskreis und speziell auch von den betroffenen Industrievertretern im Arbeitsausschuss anerkannt werden.

Die Bewertung beschränkt sich ausschließlich auf den Bereich des Straßenoberbaus und den Vergleich standardisierter Bauweisen nach RStO 01 mit den auf deutschen Autobahnen vorherrschenden Bauklassen SV und I.

3 Untersuchungsmethodik

International werden im Rahmen von Infrastrukturprojekten Life-Cycle-Bewertungen unterschiedlicher Oberbauweisen, häufig bindend, bereits in der Planungsphase eingesetzt. Vorliegende nationale Modelle wurden zwar entwickelt, fanden jedoch letztlich keine Anwendung in der Praxis. Aus diesem Grund wurde in dem Forschungsprojekt zunächst eine Literaturrecherche zu bestehenden und vor allem auch international angewandten Life-Cycle-Modellen durchgeführt. Augenmerk lag dabei auf den jeweiligen Modellgrundlagen und deren Anwendbarkeit auf standardisierte, deutsche Straßenbefestigungen der Bauklasse SV und I.

Nach Identifizierung und Festlegung der Bewertungsmethodik folgte eine Untersuchung der erforderlichen Eingangsparameter für die relevanten Bauweisen. Entscheidend war hier vor allem die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Daten. Folgende Parameter wurden u. a. untersucht:

- Kostensätze für Neubau und Erhaltungsmaßnahmen
- Maximal aufnehmbare Anzahl kumulativer 10 t-äquivalenter Achsübergänge
- Restwertbestimmung unter Berücksichtigung des Oberflächenzustands sowie der Restsubstanz
- Zusätzliche Nutzerkosten infolge von Erhaltungsmaßnahmen und eines ungenügenden Straßenzustands
- Verfahren der Investitionsrechnung zur Berücksichtigung des Zeitpunkts einzelner Zahlungen
- Einfluss der Fahrstreifenanzahl, insbesondere die Trennung von Haupt- und Überholfahrstreifen mit unterschiedlichen Erhaltungsintervallen

Aufbauend auf der durchgeführten Sensitivitätsanalyse der verwendeten Parameter konnte letztlich ein weiter zu verfolgendes Life-Cycle-Modell für die zweite Projektstufe vorgeschlagen werden. Nach Abstimmung im betreuenden Arbeitskreis erfolgte eine weitere Überarbeitung des Bewertungsverfahrens und letztlich dessen Umsetzung in einer Software für den Bauweisenvergleich.

4 Untersuchungsergebnisse

Aus der Literaturrecherche ging hervor, dass sowohl zur Methodik von Life-Cycle-Bewertungen als auch zum Langzeitverhalten von Straßenbefestigungen als zentrales Element einer Lebensdauerbetrachtung, sowohl national wie auch international bereits eine Vielzahl an Untersuchungen existieren. Insbesondere in den USA ist dieses Instrument als fester Bestandteil innerhalb des Planungsprozesses zur Auswahl wirtschaftlich optimaler Bauweisen weit verbreitet. Generell scheitert jedoch eine direkte Übertragbarkeit auf deutsche Verhältnisse oftmals bereits an den Randbedingungen (Bauweisen, Zustandsindikatoren, klimatische Bedingungen usw.). Während sich zwar in der eigentlichen Methodik häufig Parallelen zeigen, so liegen die Probleme meist in der mangelhaften Verfügbarkeit von Berechnungsparametern, insbesondere bei Modellen zur Zustandsprognose.

Gerade von dieser Prognose ist allerdings die Aussagekraft von Bewertungsergebnissen in starkem Maße abhängig. Unsicherheiten entstehen vor allem aufgrund der Vielzahl und Komplexität an (teilweise unbekannt) Einflussgrößen wie z. B. Klima oder Einbaubedingungen. Grundlage vorhandener Modelle sind in der Regel empirische Erhebungen, meist in Form ausgewerteter Zustandserfassungen, in Verbindung mit einer reduzierten Anzahl erfassbarer und signifikanter Einflussgrößen. Einschränkung ist anzumerken, dass damit nur die Entwicklung aus der Vergangenheit abgebildet wird.

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit einer Bauweise sind Art, Zeitpunkt und damit Häufigkeit notwendiger Erhaltungsmaßnahmen über den Bewertungszeitraum. Unter Anwendung vorliegender Verhaltensfunktionen für die Standardbauweisen deutscher Autobahnen erfolgte daher im Hinblick auf eine Beurteilung signifikanter Einflussgrößen eine Betrachtung prognostizierter Ausfallzeitpunkte.

Auf Schwierigkeiten im Rahmen einer langfristigen Zustandsprognose stößt aktuell noch die Quantifizierung der Auswirkungen einzelner Erhaltungsmaßnahmen. Hierzu liegen nur wenige abgesicherte Erkenntnisse vor. Dies gilt auch für die Bewertung der Befestigungssubstanz, welche neben dem nutzerorientierten Oberflächenzustand den bautechnischen Wert einer Straßenbefestigung darstellt. Näherungsweise wird diese mithilfe altersabhängiger Dickenäquivalenzfaktoren einzelner Schichten beschrieben.

In den letztlich abgeleiteten Bewertungsmodellen erfolgt die Prognose des Oberflächenzustands mithilfe von Verhaltensfunktionen, welche auf den Ergebnissen der bisherigen bundesweit durchgeführten Zustandserfassungen von Bundesfernstraßen basieren. Diesen Funktionen liegt eine einheitliche Potenzialfunktion zugrunde. Als unabhängige Variable zur Beschreibung der Entwicklung der Zustandsmerkmale Allgemeine Unebenheit, Spurrinnen und der Merkmalsgruppe Substanzmerkmale (Oberfläche) findet die Anzahl 10 t-äquivalenter Achsübergänge Eingang. Die Berücksichtigung der Einflussgrößen Bauweise, Längsneigung, Bemessungsindex und Fahrstreifen erfolgt über den Ansatz unterschiedlicher Funktionsparameter. Zur Ermittlung von Maßnahmenzeitpunkten werden für die prognostizierten Zustandsgrößen Ausfallkriterien für homogene Streckenabschnitte definiert. Der strukturelle Zustand der Straßenbefestigung (Substanz) wird über den Bemessungsindex

als Quotient aus erforderlicher und vorhandener altersabhängiger äquivalenter Schichtdicke beschrieben. Sämtliche für die Bewertung relevanten Erhaltungsmaßnahmen sind in einem Maßnahmenkatalog hinterlegt. Neben Maßnahmenumfang werden auch die unmittelbaren und langfristigen Maßnahmenwirkungen (Rücksetzwerte und Folgeverhalten) auf den Oberflächenzustand angegeben. Das Folgeverhalten wird dabei über einen in Abhängigkeit der Maßnahmenart noch festzulegenden Folgefaktor, welcher eine Stauchung der Verhaltensfunktion bewirkt, beschrieben.

Als Kosteneinflussgrößen bei der monetären Bewertung werden auf der betriebswirtschaftlichen Seite die Baulastträgerkosten als Summe aus Herstellungs-, Unterhaltungs-, Erhaltungs- und Wiederherstellungskosten angesetzt. Für Herstellung und Erhaltung sind hierzu Einheitskostensätze hinterlegt. Die Wiederherstellungskosten ergeben sich als prozentualer Anteil der Herstellungskosten in Abhängigkeit des Straßenzustands zum Bewertungsende. Als gesamtwirtschaftliche Kostenkomponente werden zusätzliche Nutzerkosten und Kosten der Allgemeinheit infolge Geschwindigkeits- und Kapazitätseinschränkungen bei Erhaltungsmaßnahmen bzw. infolge zustandsbedingter Geschwindigkeitsbeschränkungen angesetzt. Für diese Fälle werden die im Vergleich zum behinderungsfreien Zustand veränderten Zeit-, Kraftstoff-, Unfall- und CO₂-Kosten, ggf. unter Berücksichtigung eines auftretenden Rückstaus vor dem Baustellenbereich, bestimmt. Mithilfe der Kapitalwertmethode als Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung erfolgt eine Diskontierung der Baulastträgerkosten auf einen einheitlichen Bezugszeitpunkt im Startjahr.

Aufbauend auf diesen Grundlagen wurde zunächst ein monetäres Bewertungsverfahren entwickelt, welches zum gesamtwirtschaftlichen Bauweisenvergleich ein Kosten-Minimum-Kriterium heranzieht. Als Entscheidungsgrößen werden die gesamten Baulastträgerkosten, deren Kapitalwert sowie zustands- und maßnahmenbedingte Nutzerkosten berechnet.

Ein zusätzlich entwickeltes alternatives Verfahren zeigt die Möglichkeit eines nicht-monetären Bauweisenvergleichs auf, welcher den prognostizierten Erhaltungsaufwand als Entscheidungskriterium verwendet. Hierzu wird neben den Gebrauchsgrößen und der Substanzgröße zur Beschreibung des Oberflächenzustands ein Substanzindex eingeführt, der das Verhältnis von altersabhängiger äquivalenter Schichtdicke und konstanter äquivalenter Schichtdicke nach Neubau, also den Substanzabbau, darstellt. Im Zuge von Erhaltungsmaßnahmen wird dieser Substanzindex in Abhängigkeit des Maßnahmenumfangs anteilig verbessert. Basierend auf diesen Größen erhält jede im Vergleich angesetzte Bauweise einen Rang zugewiesen entsprechend der Erfüllung der abgeleiteten Zielkriterien optimaler Restwert, minimale Maßnahmenanzahl und maximale Maßnahmeneffektivität bei minimalem Maßnahmenumfang.

Im Ergebnis der ersten Projektstufe lagen somit die methodischen Grundlagen zweier Bewertungsverfahren zum Bauweisenvergleich unter Berücksichtigung des Lebenszyklus vor. Diese wurden detailliert in Form von Struktogrammen (sog. Nassi-Shneiderman-Diagrammen) formuliert und anschließend im Software-Tool "LCD – Life-Cycle-Analyse an Straßenkonstruktionen in Deutschland" zunächst zu Testzwecken EDV-technisch umgesetzt. Zur Identifizierung der Abhängigkeiten

zwischen einzelnen Eingangs-, Berechnungs- und Ergebnisgrößen der Verfahren erfolgte mithilfe der Software eine Sensitivitätsanalyse. Große Unsicherheiten und ein entsprechender Forschungsbedarf wurden vor allem bei den für eine Bewertung wichtigen Verfahren zur Prognose des Oberflächenzustands und der Befestigungssubstanz festgestellt.

In der zweiten Projektstufe wurde das nicht-monetäre Verfahren nach Festlegung im betreuenden Arbeitskreis nicht mehr weiterverfolgt, da es aufgrund der verwendeten Bewertungsgrößen nur schwer für Außenstehende nachvollziehbar ist. Die Untersuchungen zum monetären Verfahren wurden durch eine erweiterte Sensitivitätsanalyse vertieft und das Modell darauf aufbauend entsprechend angepasst.

Aufgrund technischer Schwierigkeiten konnte die Testsoftware LCD nicht weiterentwickelt werden, weshalb das monetäre Verfahren letztlich von Grund auf neu in der finalen Softwareversion LCD2 umgesetzt wurde. Dabei wurde zur Anpassung der sich ständig weiterentwickelnden Randbedingungen insbesondere auch auf eine starke Parametrisierung des Verfahrens geachtet. Mithilfe der Software berechnete Fallbeispiele zum Bauweisenvergleich verdeutlichen die Möglichkeiten des Bewertungsverfahrens.

5 Folgerungen für die Praxis

Entsprechend dem Projektziel einer Methodenstudie konnte im Ergebnis ein abgestimmtes und allgemein nutzbares Bewertungsverfahren sowie eine Software zur Entscheidungsunterstützung im Bauweisenvergleich unter konkreten Randbedingungen erstellt werden.

Es bleibt jedoch anzumerken, dass in nahezu allen Komponenten der Life-Cycle-Bewertung noch Defizite im aktuellen Forschungsstand bestehen. Dies betrifft insbesondere die grundlegenden und bewertungsrelevanten Verfahren zur Substanzbewertung, Zustandsprognose, Beschreibung von Maßnahmenwirkungen (insbesondere auch von kleineren Unterhaltungsmaßnahmen) sowie Restwertberechnung. Eine zusätzliche Absicherung der Life-Cycle-Bewertung erfordert daher weitergehende Parameterstudien. Zur Anpassung von Berechnungsparametern wurde die vorliegende Software entsprechend offen gestaltet.