

Neue Ansätze für ein Lebenszyklusmanagement der Straßeninfrastruktur

Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Fakultät für Architektur und Bauwesen
Institut für Prävention im Bauwesen
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe
Tel.: 0721 / 925-1038, Fax: 0721 / 925-1005
E-Mail: markus.stoeckner@hs-karlsruhe.de

Prof. Dr. sc. tech. Andreas Gerdes
Dr. Matthias Schwotzer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Funktionale Grenzflächen
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen,
Tel.: 0721 / 608 25972, Fax: 0721 / 608 23478
E-Mail: andreas.gerdes@kit.edu
E-Mail: matthias.schwotzer@kit.edu

Verfahren zur Berechnung der theoretischen Lebensdauer der Straßeninfrastruktur werden für bestimmte Anlagenteile bereits seit längerem eingesetzt und stellen zumindest einen Teil eines Lebenszyklusmanagements dar. Im Bereich der Außerortsstraßen wird ein PMS analog den RPE-Stra und diversen Weiterentwicklungen eingesetzt, im Innerortsbereich werden davon abgeleitete Vorgehensweisen zumindest in größeren Kommunen eingesetzt. Unter anderem war die Gruppe an einem F-Projekt zur Ausarbeitung eines kommunalen PMS beteiligt. Ähnliche Systeme werden für den Bereich der Bauwerke angewandt. Solche Systeme decken mit der Nutzungsphase einen Teilbereich des Lebenszyklus ab. In der Planungsphase werden durch die Auswahl geeigneter Baustoffe und Baustoffgemische die Grundlagen für das spätere Nutzungsverhalten gelegt. Ein Beispiel hierfür ist die vor einigen Jahren eingeführte Bemessung nach den RDO Asphalt bzw. RDO Beton. Allerdings können Lebensdaueranalysen noch wesentlich weiter gefasst werden, wenn es gelingt, das reale Verhalten der Konstruktionen auch aufgrund statistischer und naturwissenschaftlicher Ansätze zu beschreiben. Lebensdauerbetrachtungen können nur sinnvoll gerechnet werden, wenn zum einen die relevanten Bewertungsparameter ausreichend erfasst und zum anderen das tatsächliche Materialverhalten weitgehend exakt beschrieben werden kann. Im Bereich der Bemessung von Fahrbahnkonstruktionen wurde versucht, nicht aufgrund fixierter Eingangsgrößen das Bemessungsergebnis zu erhalten, sondern materialbedingte und ausführungsbedingte Schwankungen statistisch zu erfassen und darauf basierend das tatsächliche Bemessungsergebnis zu berechnen. Risiken bezüglich unvermeidbarer Qualitätsschwankungen können damit besser erfasst werden. Zur Verbesserung der Lebensdauermodelle werden in der Gruppe neue Ansätze verfolgt, mit Hilfe naturwissenschaftlich basierter Werkstoffmodelle im Grundlagenbereich Bewertungsmodelle für das tatsächliche Verhalten von Bauteilen abzuleiten. Dies eignet sich besonders für Brückenbauwerke, bei denen die chemischen Prozesse der Carbonatisierung bzw. Chloridangriffs analysiert wurden, darauf ein Verfahren zur Zustandserfassung und -bewertung sowie bautechnische Verfahren entwickelt wurden. Weitere Arbeiten konzentrieren sich auf die Einbindung der Einzelaspekte in ein umfassendes Lebenszyklusmanagement für Verkehrsanlagen.

1 Einleitung

Die Mobilität der Zukunft stellt aktuell ein gesellschaftlich viel diskutiertes und auch relevantes Problem dar. Aktuelle Forschungsthemen der Mobilität beziehen sich auf Fragen der Energie, der Reduktion von Treibhausgasen, dem Klimawandel, der Fahrzeugtechnologie, der Optimierung von Verkehrsströmen und einigen anderen Themen. Die Fragen der Infrastruktur spielt dabei eine eher untergeordnete Rolle. Unabhängig von der Frage, welche Antriebskomponenten zum Einsatz kommen oder wie Verkehr organisiert wird, man wird das Mobilitätsbedürfnis der Bevölkerung nicht ignorieren können und man wird dazu eine geeignete Infrastruktur benötigen.

Eine anforderungsgerechte Verkehrsinfrastruktur ist damit Grundvoraussetzung für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung eines Landes. Damit werden grundlegende Anforderungen wie die Verteilung von Gütern zur Versorgung oder der Zugang zu Bildung, Gesundheitswesen erfüllt. Aufgabe der Gesellschaft und damit der Baulastträger ist, die Verkehrsinfrastruktur nachhaltig in einem Zustands zu halten, der die Erfüllung dieser Aufgaben sicherstellen kann. Dazu bedarf es zunächst einer konsequenten Netzplanung, die den tatsächlichen Bedarf erkennt und abdeckt, einer Entwurfs- und Ausführungsplanung, die für den späteren Betrieb die notwendigen Leistungskennwerte sicherstellt, eine Bauphase, mit deren Qualität die Dauerhaftigkeit der Anlagen gewährleistet wird und eine Betriebsphase, in der für den Wertehalt und anforderungsgerechten Betrieb der Anlage gesorgt wird. In allen Phasen besteht die Aufgabe der Abwägung verschiedener Ansprüche, so dass stets Optimierungsaufgaben zu lösen sind, um eine jeweils möglichst optimale Lösung zu erzielen. Arbeitsansätze zur Lösung dieser Aufgabe bieten Lebensdaueranalysen oder Lebensdauerkostenanalysen. Diese sollten sich dabei auf die Gesamtanlage beziehen, die wiederum aus verschiedenen Teilen besteht, ganz grob zum Beispiel Bauwerke, Fahrbahnen oder Ausstattung. Die Aufgabenstellung ist seit langem erkannt, in verschiedenen Bereichen stehen Systeme zur Verfügung, die Hilfestellung bei operativen oder strategischen Entscheidungen geben- Für die Fahrbahnen werden beispielsweise die Vorgaben der „Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßen“ (RPE-Stra, 2001) [1] in einem Pavement Management System (PMS) umgesetzt, für den Innerortsbereich wurden analoge Algorithmen in einem unlängst abgeschlossenen Forschungsprojekt aufgestellt [2]. Die Umsetzung in das Regelwerk ist aktuell in Arbeit. Analoge Systeme existieren für die Bauwerkserhaltung.

Ziel dieser Systeme ist aufgrund einer Zustandserfassung eine objektive Bewertung des Bauwerkszustandes vorzunehmen, darauf basierend Aussagen zur Notwendigkeit einer Maßnahme nach Art und Zeitpunkt abzuleiten sowie aufgrund von definierten Zielvorgaben zu Qualität und/oder Finanzen Hilfestellung und Grundlagen für Entscheidungen im Erhaltungsmanagement vorzubereiten. Damit sind eine Reihe von Modellannahmen und Berechnungen verbunden, mit denen als wesentlicher Kernpunkt das Alterungsverhalten beschrieben werden kann. Die hier wesentlichen Parameter werden anfangs durch Auswahl von Bauweisen und Bemessung in der Planungsphase festgelegt, z. B. [3] oder [4], und dann in der Bauphase durch eine qualitätsgerechte Bauausführung umgesetzt. Diese Parameter sind damit zunächst fixiert. Das tatsächliche Verhalten der Konstruktion während der Betriebsphase wird durch eine Reihe weiterer Einflüsse aus Verkehrsbelastung, Klima und weiteren Umwelteinflüssen beeinflusst. Dies trägt zu einer stetigen Verschlechterung des Zustandes der Konstruktion bei. Das Alterungsverhalten kann dann mit Hilfe von Prognosemodellen beschrieben werden, wenn die Faktoren und deren Einfluss auf den Alterungsprozess hinreichend bekannt sind. Die veränderlichen Parameter während der Betriebsphase müssten daher geschätzt werden. Die Probleme mit sich ändernden Verkehrsbelastungen sind hinreichend bekannt, ebenso der Einfluss klimatischer Randbedingungen.

Aktuelle Vorgehensweisen arbeiten diesbezüglich eher oberflächenorientiert, der an der Oberfläche der Fahrbahn messbare Zustand geht als Eingangsgröße in die weiteren Überlegungen mit ein. Die Qualität solcher Rechenmodelle und damit die Prognosequalität könnte verbes-

sert werden, wenn beispielsweise statistische oder naturwissenschaftliche Aspekte mit in die Modelle einfließen würden. Dabei ist klar, dass solche Ansätze oftmals an hohen Datenanforderungen scheitern, die auf wirtschaftlichem Weg nicht beschaffbar sind. Führt man also Verbesserungen in den aktuellen Prognosemodellen ein, müssen unter organisatorischen und wirtschaftlichen Aspekten die Daten erfassbar sein und die Rechenmodelle robust und verlässlich arbeiten. Zudem sollen diese Rechenmodelle in die bisherigen Verfahren integrierbar sein, um komplexe Neuentwicklungen von generellen Verfahren zu vermeiden. Es liegt damit auf der Hand, dass solche Veränderungen nur punktuell und bezogen auf definierte Anlagenbestandteile aufgezeigt werden können. Aktuelle Entwicklungen werden daher für Straßennetze und im Schwerpunkt für Bauwerke aufgezeigt.

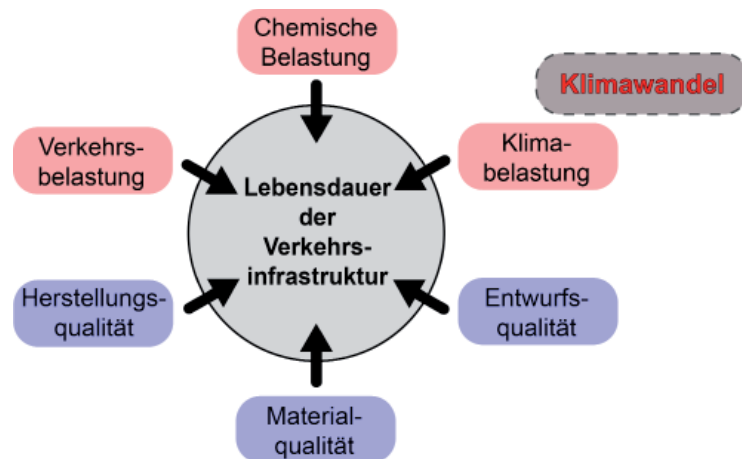


Bild 1: Einflussfaktoren auf die Lebensdauer der Verkehrsinfrastruktur

2 Aktuelles Vorgehen für kommunale Straßen

Anforderungen an kommunale Straßen sind seit kurzem in der Neuausgabe der „Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen“ (E EMI 12), Ausgabe 2012 [5]. Während die E EMI 2012 mehr allgemein bleiben, finden sich detaillierte Angaben in den weiteren Arbeitspapieren AP 9 zur „Systematik der Straßenerhaltung“, Reihe „kommunale Belange“ [6]. Die Grundlagen hierzu wurden im Arbeitskreis AK 4.1.2 „Erhaltung kommunaler Straßen“ sowie in einem FOPs-Projekt „Daten und Methoden für ein systematisches Erhaltungsmanagement innerörtlicher Straßen“ [2] erarbeitet. Von den Arbeitspapieren zur „Systematik der Straßenerhaltung“, Reihe K „Kommunale Belange“ wird vor allem Abschnitt 4 „Rechnergestützte Erhaltungsplanung“ von Interesse sein, da hier der aktuelle Wissensstand für verschiedene Anwendungsfälle beschrieben wird.

Die wesentliche strukturelle Änderung besteht in der Unterscheidung eines operativen und eines strategischen Ansatzes. Das operative Ziel ist objektbezogen ausgerichtet und besteht in erster Linie im Aufstellen einer Prioritätenliste zum Erhaltungsbedarf. Das Festlegen der Prioritäten wird dabei auf der Basis des allgemeinen Zustands und weiterer kommunalspezifischer Faktoren vorgenommen. Daraus lässt sich eine kurz- bis mittelfristige Prioritätenliste samt erforderlichem Finanzbedarf ableiten. Das strategische Ziel ist netzorientiert ausgerichtet. Mit der strategischen Aufgabenstellung wird die langfristige Entwicklung des Zustandes und anderer quantifizierbarer Faktoren (z. B. Verkehrsbelastung) prognostiziert und darauf aufbauend die Auswirkungen von definierten Szenarien unter vorgegebenen Randbedingungen abgeschätzt.

Im vorliegenden Zusammenhang ist der strategische Ansatz von Interesse. Für Kommunen wird der Begriff Erhaltungsmanagementsystem/Kommunal, EMS/K gebraucht (Bild 2). Gesucht wird damit eine geeignete Erhaltungsstrategie oder deren Auswirkungen. Dabei kann mit Hilfe eines Qualitätsszenarios die Frage nach dem notwendigen Erhaltungsaufwand oder

mit Hilfe eines Finanzszenarios die Frage nach den mittel- bis langfristigen Auswirkungen eines vorgegebenen Budgets auf die Netzentwicklung beantwortet werden. Diese Vorgehensweise ist grundsätzlich bekannt, neu ist aber der Nachweis der grundsätzlichen Tauglichkeit für kommunale Netze, auch wenn noch weiterer Forschungsbedarf zur Modellbildung besteht.

Die Auswertungen werden wie folgt vorgenommen: Die homogenen Abschnitte werden die Schadensabschnitte zunächst einer Zustandsprognose unterzogen, um diesen Abschnitten „Eingreifzeiträume“ zuordnen zu können. Mit Hilfe von Mängelklassenmodellen werden dann technisch sinnvolle Maßnahmentypen und -folgen zugeordnet. Daraus können sich dann eine Reihe möglicher Handlungsvarianten ergeben, aus denen dann unter strategischen Zielen eine optimierte Auswahl getroffen wird. Auch wenn die Ergebnisse auf einer Aggregation einzelner Erhaltungsobjekte basieren, könne diese nicht objektorientiert zum Aufstellen von Bauprogrammen verwendet werden. Der strategische Ansatz kann daher den operativen Ansatz nicht ersetzen, sondern lediglich ergänzen. Dies ist unter anderem darin begründet, dass der strategische Ansatz Modellannahmen verwendet, mit denen die Wirklichkeit abgebildet werden soll. Es ist aber gerade im kommunalen Bereich kaum möglich, alle für ein Erhaltungsprogramm erforderlichen Einflussfaktoren vollständig zu beschreiben und zu quantifizieren. Zudem bauen die Zustandsprognosen auf einem statistisch-deterministischen Ansatz auf und zeichnen sich durch eine erhebliche Streuung aus. Die mangelhafte Aussagekraft und Zuverlässigkeit der bisher verwendeten Zustandsprognosen bei Anwendung auf der Objektebene ist bekannt. Zudem existieren derzeit noch keine Forschungsergebnisse zur Anwendbarkeit der bekannten Prognoseverfahren für kommunale Verkehrsflächen. Brauchbare Ergebnisse können jedoch erzielt werden, wenn die Prognose zunächst objektscharf durchgeführt wird, anschließend dann netzweite Betrachtungen im Sinne einer Strategiebewertung stattfinden [7].

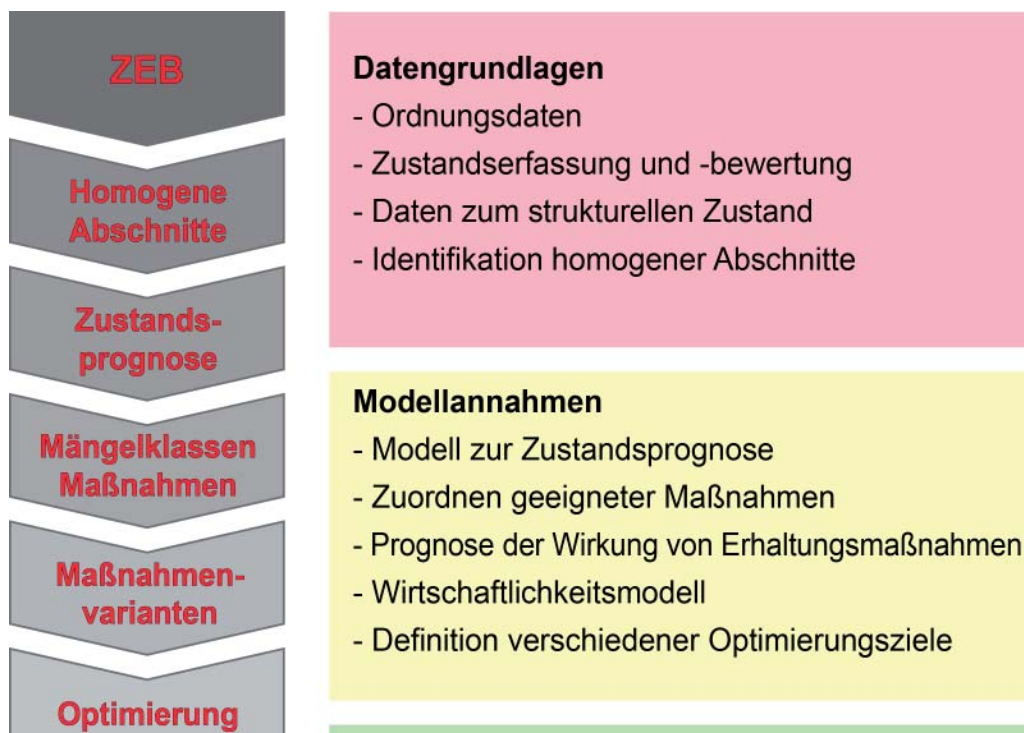


Bild 2: Modell für ein strategisches EMS/K

Zum Nachweis des Rechenverfahrens wurden Testanwendungen mit zwei verschiedenen Rechensystemen durchgeführt. Da beide Systeme ursprünglich für Außerortsstraßen erstellt wurden, wurden die für eine kommunale Anwendung entwickelten Algorithmen in die Systemkonfigurationen integriert. Die Testanwendungen konnten für drei Kommunen mit jeweils unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt werden. Grundsätzlich lassen sich mit solchen

Auswertungen neben anderen Aussagen belastbare Hinweise zum Finanzbedarf und dessen Auswirkungen ableiten. Dies kann beispielhaft in den Bildern 3 und 4 erkannt werden. Das Bild 3 unterstellt ein verfügbares Budget von 2 Mio. EUR p.A., Bild 4 ein verfügbares Budget von 4 Mio. p.A.. Beide Szenarien haben gleiche Daten- und Modellgrundlagen. Für die Interpretation dürfen nur die Jahre bis 2015 betrachtet werden, da ab 2016 kein Budget mehr angesetzt wurde. In den Bildern sind für folgende Parameter Zustandsentwicklungen angegeben: In der mittleren Zeile folgen von rechts nach links Gesamtwert, Teilwert Gebrauch, Teilwert Substanz (Oberfläche), in der unteren Zeile Teilwert Substanz (Gesamt), Schadenswert RIO und der Zustandwert Planographensimulation (PGR).



Bild 3: Ergebnisse eines strategischen EMS/K/Finanzscenario A



Bild 4: Ergebnisse eines strategischen EMS/K/Finanzscenario B

Leicht erkennbar sind die Auswirkungen der beiden unterschiedlichen Budgets. Das kleinere Budget führt zu einer Verschlechterung, vor allem bei der Substanz, während das größere Budget zu einer Konstanz und letztlich zu einer Verbesserung führt. Man kann nun mit der Berechnung diverser Szenarien eine Art optimales Budget ermitteln, mit dem das Netz in einem wertstabilen Zustand gehalten werden kann. Zudem weist die Analyse der ausgegebenen Werte auf ein deutliches Substanzproblem des Netzes hin, also kann man auch Rückschlüsse auf eine sinnvolle technische Strategie ziehen, diese wäre im vorliegenden Fall substanzorientiert anzusetzen. Bei der Erstellung des Rechenmodells ist aber besondere Vorsicht geboten. Für die Modellierung sind zwei „Stellschrauben“ maßgebend. Zum einen ist dies die Beschreibung der Zustandsentwicklung vor und nach einer Maßnahme, zum anderen ist dies der Umfang des Betrachtungszeitraumes. Letzteres, der Umfang des Betrachtungszeitraumes ist einfacher festzulegen. Im aufgezeigten Fall ist ein Planungszeitraum, also der Zeitraum, für den Erhaltungsmaßnahmen geplant werden, auf fünf Jahre festgelegt. Dies ist für das Aufstellen konkreter Bauprogramme ein vernünftiger Zeitraum. Der Betrachtungszeitraum, also der Zeitraum, für den die Auswirkungen betrachtet werden, ist mit 10 Jahren festgelegt. Verändert man diesen Zeitraum, verändert sich die Maßnahmenauswahl. Ein kürzerer Zeitraum führte im vorliegenden Projekt und auch anderen eigenen Analysen in weiteren Projekten zu einfacheren Maßnahmen, z. B. eher Deckschichtenenergien, ein längerer Zeitraum zu umfangreicheren Maßnahmen, beispielsweise grundhaften Erneuerungen. Dies hängt mit der Vorgehensweise bei der Bewertung des Nutzens zusammen. Betrachtet wird die Flächendifferenz zwischen dem Fall „Nichts-Tun“ und dem Fall „Erhaltungsmaßnahme“ bezüglich der Zustandsentwicklung über die Zeitachse. Es liegt auf der Hand, dass bei einer Nutzen-Kosten-Betrachtung unter diesen Randbedingungen die umfangreicheren Maßnahmen Nachteile bei kürzeren Betrachtungszeiträumen haben. Dies kann man aber leicht durch angemessenes Auswählen der jeweiligen Zeiträume kontrollieren.

Wesentlich schwieriger hingegen ist der Ansatz der Zustandsentwicklung vor einer Maßnahme, das sind die bekannten Verhaltensfunktionen einschließlich deren Weiterentwicklungen, sowie die Zustandsentwicklung nach einer Maßnahme, beschrieben durch die Rücksetzwerte und Änderung der Verhaltensklasse, die zu berücksichtigen sind. Damit wird versucht, das Verhalten von bestimmten Maßnahmentypen zu beschreiben, indirekt damit aber auch das physikalische Materialverhalten. Damit werden äußerst komplexe Zusammenhänge für eine erste Anwendung pragmatisch vereinfacht, die aktuellen Ansätze gelten derzeit als weitgehend brauchbare Lösung. In verschiedenen Projekten zeigte sich aber, dass gerade an dieser Stelle der größte Einfluss auf das spätere Berechnungsergebnis auftritt, verbunden mit der klaren Erkenntnis, dass die Berücksichtigung eines Kennwertes zur Substanz des Aufbaus absolut notwendiger Bestandteil des Gesamtsystems ist. Hier wurde hilfsweise und in Ermangelung detaillierter Daten eine vom Arbeitspapier 9/S „Substanzwert (Bestand) [8] vorgeschlagene Größe eingesetzt. Verbesserte Verhaltensmodelle erfordern aber auch einen wesentlich höheren Dateninput als derzeit verfügbar. Ob und wie das Problem zu lösen ist, kann nur durch weitere Forschungsarbeiten beantwortet werden.

3 Analyse künftiger Anforderungen für ein Lebenszyklusmanagement

Im vorliegenden Beitrag wird nicht der Anspruch formuliert, ein umfassendes Lebenszyklusmanagement zu beschreiben, das Ziel besteht vielmehr im Aufzeigen verschiedener Ansätze, aktuelle Vorgehensweisen durch neue Überlegungen und fachliche Ergänzung maßgeblich zu verbessern. Am Beispiel des aktuellen EMS/K für kommunale Anwendungen konnte ein funktionierender Ablauf gezeigt werden, der sowohl in der Modellformulierung als auch von der Betrachtungstiefe erweitert werden muss. Der aktuelle Stand stellt trotz aller Kritik aber den derzeit besten verfügbaren Ansatz dar. Wenn man das Verbesserungspotenzial des aktuellen Systemansatzes betrachtet, kann man folgende Aspekte anführen:

- Die Beschreibung des Straßenzustandes erfolgt aktuell anhand des optisch erfassbaren Oberflächenzustandes. Selbst mit einer stark vereinfachten Betrachtung der Substanz des Aufbaus konnten schon wesentlich plausible Ergebnisse erzielt werden.
- Bei der Erfassung werden die Zustandsgrößen und -werte zu Abschnitten zusammengefasst, Informationen zu örtlicher Lage und Verteilung gehen verloren.
- Aktuell werden die Oberflächeneigenschaften einer vereinfachten Prognose unterzogen. Weitere verfügbare Daten zu örtlichen Gegebenheiten oder Materialparameter werden nicht berücksichtigt.
- Die Struktureigenschaften werden dem Grunde nach keiner Prognose unterzogen, da das aktuelle Modell einer Abschreibungsfunktion entspricht.
- Das Langzeitverhalten der Maßnahmen wird aktuell nur grob beschrieben.
- Die Entscheidungsfindung ist derzeit nur auf die Anforderungen Verkehrssicherheit und Substanzerhalt ausgerichtet. Weitere nutzerbezogene Parameter wie Stauzeiten, Energieverbrauch und Klimaschutz fehlen.

Betrachtet man über dieses Beispiel hinaus die Einflussfaktoren auf die Lebensdauer, kommen weitere Parameter hinzu. Neben angemessenen Planungsvorgaben, die in der Bemessung der Bauteile angesetzt werden, spielt die Material- und Ausführungsqualität eine maßgebende Rolle. Auf diese Annahmen bauen später die Analysemodelle im Rahmen des Erhaltungsmanagements auf, insofern besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Planung, Bauausführung und den Rechenmodellen innerhalb eines PMS. Letztlich wurden die Prognosefunktionen anhand von Langzeitbeobachtungen kalibriert, diese wiederum nach den zum Herstellungszeitpunkt aktuell gültigen Technischen Regelwerken erstellt. Dies bedeutet aber auch künftig, der sachgerechten Auswahl von Bauverfahren und deren Langzeitwirkung eine größere Bedeutung beizumessen.

Für ein erfolgreiches Erhaltungsmanagement der Verkehrsinfrastruktur ergibt sich deshalb folgende Schlussfolgerung: Der komplexe Bewertungsprozess kann nur dann erfolgreich sein, wenn die Werkstoffeigenschaften als maßgebender Ausgangsfaktor bekannt sind und eine verlässliche Aussage über deren Langzeitverhalten erlauben. Des Weiteren muss der im Bewertungsprozess kalkulierte Kosten-Nutzen-Faktor durch eine qualitativ hochwertige Ausführung auch erreicht werden. Dies ist nach derzeitigem Stand jedoch bei den derzeit vorgesehenen Systemen zwar einigermaßen möglich, allerdings sind beide Ausgangsfaktoren unzureichend berücksichtigt. Ferner ist die generelle Funktion der Managementsysteme ausgerichtet auf Teilproblem zu einem Asset-Management als Instrument zur volkswirtschaftlichen Werterhaltung aller Verkehrsinfrastrukturteile. Langfristig muss eine stärkere Vernetzung innerhalb der Phasen Planung, Bau, Betreiben und Rückbau von Infrastrukturbauwerken erreicht werden.

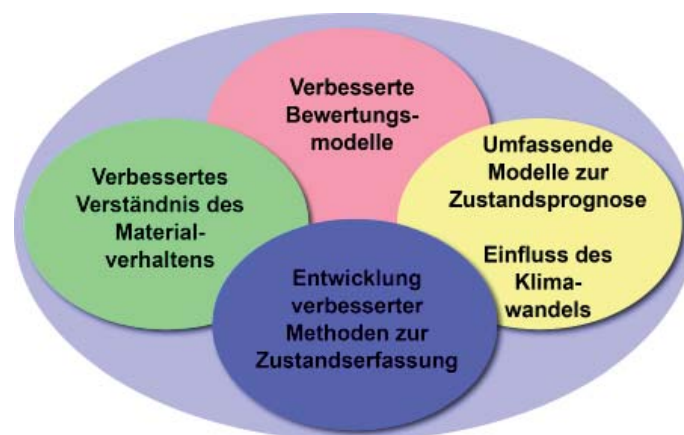


Bild 5: Anforderungen an Lebenszyklusbetrachtungen

4 Beispiele für verbesserte Modelle

Nachfolgend wird an zwei Beispielen, eines aus der Bemessung und eines aus der Bauwerkserhaltung aufgezeigt, wie mit Modifikationen und fachübergreifenden Überlegungen Verbesserungen in Lebensdauerbetrachtungen einfließen können.

Die rechnerische Bemessung der Schichtenfolge und -dicke von Verkehrsflächen aus Asphalt oder Beton basiert auf bauweisenspezifischen Rechenmodellen, die mit mehr oder weniger großer Genauigkeit auf der Basis von Materialeingangsgrößen und Belastungskennwerten Daten für die spätere Bauausführung liefern. Ziel dabei ist, ein ausreichendes Tragverhalten der Gesamtkonstruktion für eine zu erwartende Belastung zu erreichen. Unabhängig von der Art des Bemessungsverfahrens, empirisch nach den RStO oder analytisch nach den beiden RDO, wird vorausgesetzt, dass exakt die Eingangsgrößen in die Bemessung eingehalten werden. Dies ist dann Aufgabe der Baustoffhersteller sowie der ausführenden Unternehmen. Gelingt dies nicht, ist die mit der Bemessung verbundene Prognose der Lebensdauer nicht gültig, das tatsächliche Verhalten wird davon abweichen. Je nach Qualität der Bauausführung entstehen damit Risiken für die ausführenden Unternehmen. Dieser Ansatz war Grundgedanke für ein Forschungsprojekt „Risikoanalyse von Verfahren der rechnerischen Dimensionierung von Verkehrsflächen zum zielorientierten Einsatz in Lebensdauerbetrachtungen“ [9], in dem untersucht wurde, in wie weit es im Bemessungsprozess möglich ist, herstellungsbedingte Schwankungen zu berücksichtigen und deren Einfluss auf die Lebensdauer zu quantifizieren.

Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Bemessungsverfahren analysiert sowie eine eigene Software zu Versuchszwecken erstellt, die die aktuell gängigen Bemessungsverfahren abdeckt. Im Unterschied zu herkömmlichen Verfahren können aber material- und ausführungsbedingte Schwankungen im Rechenlauf berücksichtigt werden. Dazu müssen Kenngrößen für diese Schwankungen vorgegeben werden, mit Hilfe einer MonteCarlo-Simulation werden dann die für die Bemessung maßgebenden Kenngrößen ermittelt und daraus das Bemessungsergebnis in Abhängigkeit der Ausführungsqualität ermittelt. Die Endauswertungen laufen derzeit, wobei für eine Anwendung in der Praxis noch weitere Arbeiten erforderlich sind.

Aus einem ganz anderen Bereich stammt das zweite Beispiel, dass die Bedeutung zwischen Planung und den aus der Planung heraus zu erwartenden Eigenschaften der Werkstoffe und der bei der Erstellung des Bauwerks tatsächlich realisierten „Performance“ aufzeigt. Weiterhin soll deutlich werden, wie durch technische Maßnahmen der Werterhalt von Ingenieurbauwerken als Teil der Verkehrsinfrastruktur wirtschaftlich sichergestellt werden kann.

Im Rahmen einer Untersuchung wurde der Zustand von Mittelpfeilern an 17 Brücken des bayrischen Autobahnnetzes ermittelt. Dazu wurden zunächst sowohl zerstörungsfrei verschiedene Parameter (z. B. Betonüberdeckung) als auch Bohrkerne für die weiterführenden Laboruntersuchungen aus den Pfeilern entnommen. Von besonderem Interesse war dabei die örtliche Verteilung von Werkstoffkenngrößen, die für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken bedeutend sind. Deshalb wurden mehrere Bohrkerne in einer Höhe von 50 cm, 100 cm und 200 cm, gemessen von der Oberkante Boden, entnommen. An diesen Bohrkernen wurde die Chloridbelastung mit Hilfe von Tiefenprofilen ermittelt. An einzelnen Bauwerken betrug bei einer Bewehrungsüberdeckung von 50 mm die korrosionsrelevante Chlorideindringtiefe bereits nach 10 Jahren ca. 30 mm. Bei diesen Bauwerken ist in wenigen Jahren bereits eine substantielle Instandsetzung zu erwarten.

Worin sind die Ursachen für dieses unbefriedigende Werkstoffverhalten begründet? Hier ist in erster Linie die Durchlässigkeit der Betonrandzone zu nennen, welche die darunterliegende Bewehrung vor Korrosion als Folge der Wirkung von Tausalzen bzw. Chloriden schützen soll. Die direkte Ermittlung der Permeabilität ist mit einem gewissen technischen Aufwand verbunden, ein alternativer Kennwert stellt in diesem Zusammenhang die Gesamtporosität und Porengrößenverteilung, ermittelt mit der Quecksilberdruckporosimetrie, dar. Die Werte lagen im untersuchten Bereich (50 bis 200 cm) zwischen 11 Vol.-% und 17 Vol.-%. Die Werte

findet man üblicherweise für Betone mit W/Z-Werten zwischen 0,45 (11 Vol.-%) und 0,65 (17 Vol.-%). Überträgt man diese Werte näherungsweise auf die Durchlässigkeit der Randzone ist bei der höheren Porosität die Durchlässigkeit um ca. das 6 bis 9-fache höher als bei dem Werkstoff, der durch die geringere Porosität gekennzeichnet ist. Es ist leicht nachvollziehbar, dass gerade bei den höheren Werten innerhalb weniger Jahre hohe Chlorideindringtiefen zu erwarten sind.

Ein anderer Schluss, der aus diesen Werten gezogen werden kann, ist, dass diese Methoden zur Messung der Permeabilität – mittlerweile stehen auch Geräte zur zerstörungsfreien Messung der Betonpermeabilität am Objekt zur Verfügung – oder Gesamtporosität unbedingt als Teil einer umfassenden Qualitätskontrolle direkt nach der Fertigstellung zur Anwendung kommen sollten. Bei Vorliegen unbefriedigender Werte können dann weitere technische Maßnahmen ausgelöst werden, um den Eindringwiderstand des Betons deutlich zu verbessern. Auf eine dieser präventiven Maßnahmen, die Tiefenhydrophobierung, soll im Weiteren eingegangen werden [10, 11].

Bereits im römischen Reich wurden besonders exponierte Bauteile der Infrastrukturbauwerke vor der Einwirkung von Wasser geschützt. Dazu wurden entweder Öle direkt dem Frischmörtel zugeben oder die Werkstoffoberfläche wurde mit Fett abgerieben. Die damit erzielte hydrophobe Wirkung führte letztendlich zu einer drastischen Reduzierung der Wasseraufnahme und damit zu einer verbesserten Beständigkeit der Bauwerke wie eindrucksvolle Beispiele heute noch zeigen. Auch gegenwärtig stehen solche bauchemischen Systeme zur Verfügung, die aber auf siliziumorganischen Verbindungen (Silanen) basieren. Auch diese Systeme werden bereits seit Jahrzehnten in der Praxis angewendet. Fehlapplikationen führten bei dieser Technologie aber zu einem Vertrauensverlust. Deshalb wurden in den vergangenen Jahren Forschungsanstrengungen unternommen, um die Wechselwirkung zwischen den mineralischen Werkstoffen und den Silanen aufzuklären, was wiederum die Voraussetzung für eine hohe Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit dieser präventiven Oberflächenschutzmaßnahmen ist.

Diese Ergebnisse aus der Grundlagenforschung wurden in weiteren Projekten im Bereich der Angewandten Forschung und dem Technologietransfer in für die Praxis umsetzfähige Konzepte umgesetzt. Im Folgenden sollen die wesentlichen Schritte kurz vorgestellt werden, wobei auf die Behandlung bestehender, bereits chloridkontaminierter Bauwerke eingegangen wird.

Nach der Auswahl der Bauwerke werden im ersten Schritt die zu behandelnden Bauteile beprobt und in Hinsicht auf die Chloridprofile bauchemisch untersucht. Mit diesen Daten und weiteren Ergebnissen der Zustandsanalyse (z. B. Bewehrungsüberdeckung) ist zu entscheiden, ob eine Tiefenhydrophobierung noch Sinn macht, da bei hohen Chloridgehalten hinter der Bewehrung das Korrosionsrisiko nicht nachhaltig herabgesetzt werden kann. Liegt die Chloridfront noch vor der Bewehrung kann die Tiefenhydrophobierung ein weiteres Eindringen der Chloride und damit die nachfolgende Bewehrungskorrosion nachhaltig verhindern.

Auch eine Maßnahme wie die Tiefenhydrophobierung muss trotz der einfachen und schnellen Ausführung ingenieurmäßig geplant werden. Viele der Misserfolge in den vergangenen Jahren sind auf eine fehlende Planung zurückzuführen. Werte für die Eindringtiefe des wasserabweisenden Wirkstoffes und der Gehalt in der Werkstoffrandzone müssen als Basis der abschließenden Qualitätskontrolle Bestandteil der Ausschreibung sein. Forschungsergebnisse und bisherige Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass bei stark Tausalzen ausgesetzten Bauteilen die Eindringtiefe des Hydrophobierungsmittels ca. 6 mm betragen soll, der Wirkstoffgehalt soll in dieser Tiefe mindestens 0,3 bis 0,4 Massen-% betragen. Praxisgerechte Verfahren zur Überprüfung dieser Vorgaben stehen mittlerweile zur Verfügung. Ein großer Vorteil der Tiefenhydrophobierung ist, dass unter Verkehr diese Maßnahme in wenigen Stunden in die Realität umgesetzt werden kann. Eine temporäre Verkehrslenkung ist ausreichend. Das Bauteil sollte mit Folie eingehaust werden, damit bei der späteren Spritzapplikation das Hydrophobierungsmittel nicht unkontrolliert auf die Fahrbahn gerät. Bei den bisherigen praktischen Anwendungen konnte dies aber mit einem sehr geringen Aufwand sichergestellt werden [12].

Bei den heute zur Verfügung stehenden Systemen lässt sich zwischen hochviskosen (Gel, Creme, Paste) und niedrigviskosen Systemen (100 % Silan) unterscheiden. Mit allen Systemen lassen sich die Anforderungen erfüllen, je nach System muss aber gegebenenfalls mehrfach appliziert werden. Daher erfolgt die Produktauswahl auch unter dem Aspekt der Zugänglichkeit des Objekts. Die hydrophobe Wirkung entwickelt sich bereits nach 24 Stunden, für die Entwicklung der vollumfänglichen Wirksamkeit der Applikation muss dem Silan aber ca. 14 bis 21 Tage Zeit gegeben werden. Die Qualitätskontrolle wird daher in der Regel nach 28 Tagen durchgeführt. Ein Vergleich mit den ausgeschriebenen Werten zeigt dann deutlich, ob die Applikation erfolgreich war. Für den Fall, dass die Werte nicht erreicht wurden, ist eine Nachapplikation problemlos möglich. Im Gegensatz zu Deutschland wird dieses Verfahren bereits seit 20 Jahren in Schweden eingesetzt. Die Untersuchung an ca. 30 Brückenbauwerke in der Region Stockholm zeigte, dass die Chloridaufnahme komplett unterbunden wurde. Weiterhin kann man nach diesen Daten von einer Lebensdauer von mindestens 20 Jahren ausgehen. Von der Wirtschaftlichkeit her haben Berechnungen gezeigt, dass die Tiefenhydrophobierung ca. 10 % der Kosten verursacht, die mit einer Betoninstandsetzung verbunden sind. Auch die ökologischen Belastungen sind in einer ähnlichen Größenordnung.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass heute analytische Verfahren zur Verfügung stehen mit deren Hilfe ohne großen Aufwand die Widerstandsfähigkeit von Beton gegen das Eindringen werkstoffaggressiver Verbindungen abgeschätzt werden kann. Für den Fall einer unbefriedigenden Qualität stehen präventive Verfahren zur Verfügung, die geeignet sind das Eindringen von wässrigen Salzlösungen praktisch zu unterbinden. Integriert in ein Lebenszyklus-Management-Konzept lässt sich so die instandsetzungsfreie Nutzungsdauer der Ingenieurbauwerke als Teil der Verkehrsinfrastruktur deutlich verlängern [13].



Bild 6: Durchführung einer Tiefenhydrophobierung

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Beitrag wurde aufgezeigt, wie erweiterte Lebensdaueranalysen die gegenwärtigen Management-Systeme beim Auffinden besserer strategischer Entscheidungen unterstützen können. Betrachtet man den enormen Vermögenswert der Verkehrsinfrastruktur, sind erweiterter Methoden und Betrachtungsweisen notwendig, um zu bestmöglichen Ergebnissen zu kommen. Dazu bedarf es erweiterter und fachübergreifender Überlegungen. So sollte künftig insbesondere das Materialverhalten besser als bisher abgebildet und modelliert werden. Die Arbeiten werden sich daher auf die Felder veränderte Bewertungsmodelle, ein verbessertes Verständnis zur Zustandsentwicklung und ein verbessertes Verständnis des Materialverhaltens konzentrieren.

Literaturverzeichnis

- 1 Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE Stra 01) Ausgabe 2001, Köln, FGSV 488
- 2 Maerschalk, G., et al. Daten und Methoden für ein innerörtliche Erhaltungsmanagement, München : Forschungsbericht, Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, FE 77.482/2006 (2011)
- 3 Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt 09), Ausgabe 2009, Köln, FGSV 498
- 4 Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen (RDO Beton 09), Ausgabe 2009, Köln , FGSV 497
- 5 Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortsstraßen (E EMI 2012), Ausgabe 2012, Köln, FGSV 487
- 6 Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung, Reihe K: Kommunale Belange, Stand: September 2012, Köln, FGSV 490 AP 9 K
- 7 Stöckner, M.: Köln: FGSV, 2009
- 8 Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: Systematik der Straßenerhaltung Reihe S: Substanzwert (Bestand), Ausgabe 2003, Köln, FGSV 490 AP 9
- 9 Stöckner, M.; Renata, C.; Hardt, R.: FE Risikoanalyse von Verfahren der, s.l.: Abschlussbericht im Auftrag des BMVBS, (2012)
- 10 Gerdes, A.: Tiefenhydrophobierung von Beton in: S. Gieler-Breßmer (Hrsg.), Verkehrsbauten – Schwerpunkt Parkhäuser/Brücken, Technische Akademie Esslingen, 259–266 (2008)
- 11 Gerdes, A.: Bauchemie im 21. Jahrhundert – Neue Strategien für die Entwicklung präventiver Oberflächenschutzmaßnahmen in: H. Garrecht (Hrsg.), Erhalten und Instandsetzen, 31. Darmstädter Massivbauseminar, Darmstadt, 26. Februar 2008, 153–171 (2008)
- 12 Gerdes, A.; Wittmann, F. H.: Hydrophobieren von Stahlbeton – Teil 1: Transport und chemische Reaktionen siliciumorganischer Verbindungen in der Betonrandzone, Int. Z. Bauinstandsetzen, 9, 41–64 (2003)
- 13 Gerdes, A.; Wittmann, F. H.: Hydrophobieren von Stahlbeton – Teil 2: Ausführung einer Hydrophobierung – Voruntersuchung, Durchführung und Qualitätssicherung, Int. Z. Bauinstandsetzen, 9, 117–138 (2003)