

## Erarbeitung eines Prototypen eines technisch-wirtschaftlichen Kostenminimierungsmoduls für das Erhaltungsmanagement (PMS)

FA 9.141

Forschungsstelle: RS-Consult, Büro für Rationelle Straßen-  
erhaltung und Landschaftspflege, Berlin

Bearbeiter: Rübensam, J. / Maerschalk, G.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und  
Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: April 2009

- Langzeitbeobachtungen zur Nutzungsdauer und zu den Kosten der einzelnen Konstruktionsschichten sowie
- vorliegende Analysen zur Korrelation zwischen der Schwerverkehrsbelastung und den äquivalenten Achslastübergängen.

Das mit diesen Grundlagen entwickelte fachtechnische Konzept umfasst im Wesentlichen folgende methodische Schritte:

### 1 Aufgabenstellung

Das Pavement Management System (PMS) vergleicht die Effektivität der Erhaltungsstrategien am Objekt durch Gegenüberstellung ihrer Kosten und Nutzen. Der Nutzen wird derzeit nicht monetär, sondern in Form einer qualitativen Wirksamkeit ermittelt, die sich aus der Differenz der Flächen unter den Verhaltenskurven ohne und mit Maßnahmen ergibt ("Fläche unter der Kurve"-Prinzip). Aus Sicht der Straßenbauverwaltung wäre es sinnvoll, den Nutzen von Erhaltungsmaßnahmen auch in monetären Einheiten ausdrücken zu können. Dies würde es ermöglichen, das Straßenanlagepotenzial des betrachteten Netzes, also das auf der Basis technischer Kennwerte in Geldeinheiten beschriebene Potenzial der Befestigungen, monetär in jedem Jahr eines Bewertungszeitraums zu bewerten. Dafür ist nicht eine Abschreibungsrechnung im fiskalischen Sinne, sondern eine technische Bewertung erforderlich, die am Ende in Geld ausgedrückt wird. Alternativ zur qualitativen Bewertung sollte daher ein technisch-wirtschaftliches Kostenminimierungsmodul entwickelt und getestet werden, das eine monetäre Bewertung des Substanzpotenzials der Fahrbahnen für alternative Erhaltungsstrategien ermöglicht. Dieses Modul, das informationstechnisch in Form eines Prototypen aufzubereiten war, soll entweder als Ersatz oder als Alternative für das bisherige "Fläche unter der Kurve"-Prinzip dienen. Mit diesem Kostenminimierungsmodul wird es möglich, im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnungen im PMS konsequent in Geldeinheiten zu rechnen. Damit kann das Verwaltungshandeln bei der Erhaltung der Bundesfernstraßen besser nach dem Grundsatz der Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit ausgerichtet werden.

- Berechnung des Substanzpotenzials aufnehmbarer Bemessungsachsen für die Gesamtkonstruktion des Befestigungsaufbaus für den Gesamtquerschnitt sowie differenziert nach Richtungsfahrbahnen und Fahrstreifen,
- Berechnung des Substanzpotenzials für die einzelnen Aufbauschichten,
- Korrektur des schichtspezifischen Substanzpotenzials durch den Oberflächenzustand,
- Fortschreibung der Schichtdaten der homogenen Abschnitte über den Bewertungszeitraum inklusive Einarbeitung der vom PMS vorgeschlagenen Erhaltungsmaßnahmen,
- monetäre Bewertung des Substanzpotenzials sowie
- Ableitung eines Nutzen-Kosten-Verhältnisses für jede vom PMS generierte Erhaltungsstrategie.

### 2 Untersuchungsmethodik

Im Untersuchungsablauf wird nach der Analyse des vorliegenden Kenntnisstandes ein fachtechnisches Konzept entwickelt und in Algorithmen umgesetzt. Diese Algorithmen sind die Grundlage für die Erstellung einer Testsoftware, die in die PMS-Umgebung eingebunden und für Testrechnungen eingesetzt wird.

Für die Entwicklung eines fachtechnischen Konzepts sind nach Analyse des vorhandenen Kenntnisstandes diverse Grundlagen verfügbar. Dazu gehören insbesondere:

- das Dickenäquivalenzprinzip bei der Bewertung der schichtenbezogenen Substanz der Fahrbahnkonstruktionen,
- die bemessungstechnischen Grundansätze der RStO 01,
- die Nutzung der ZEB-Daten für die Korrektur der Substanzbewertung,

### 3 Untersuchungsergebnisse

Bei der Bewertung abschnittsbezogener Erhaltungsstrategien durch Einsatz des technisch-wirtschaftlichen Kostenminimierungsmoduls wird für die verschiedenen Flächen eines Erhaltungsabschnitts aus den Materialdaten, d. h. der Schichtart, der Schichtdicke und dem Schichtalter, das Potenzial der rechnerisch noch aufnehmbaren äquivalenten Bemessungsachslastübergänge bestimmt, eine Korrektur dieser rechnerisch aufnehmbaren Bemessungsachslastübergänge nach der tatsächlichen Zustandsentwicklung vorgenommen und diesem material- und zustandsbezogenen Potenzial an aufnehmbaren äquivalenten Achslastübergängen ein monetärer Wert zugeordnet.

Für die Bestimmung des Substanzpotenzials aufnehmbarer äquivalenter Bemessungsachslastübergänge wird die äquivalente Dicke der Aufbaukonstruktion eines homogenen Abschnitts  $j$  für einen Zeitpunkt  $t$  benötigt, die auf der Grundlage des FGSV-Arbeitspapiers Nr. 9/S zur Erhaltungsplanung, Reihe S – "Substanzwert (Bestand)" ermittelt werden kann:

$$D_j(t) = \sum D_{j,i}(t) \text{ [mm]}$$

mit  
 $D_j(t)$       gesamte äquivalente Dicke aller Aufbauschichten eines homogenen Abschnitts  $j$  zu einem Zeitpunkt  $t$   
 $D_{j,i}(t)$     äquivalente Dicke der einzelnen Aufbauschichten eines homogenen Abschnitts  $j$  zu einem Zeitpunkt  $t$

Für Neubaukonstruktionen gemäß den RStO 01 sind für die verschiedenen Konstruktionsvarianten Mindestanforderungen

## Querschnittsaufgaben

zu den aufnehmbaren Bemessungsachsen festgelegt. Aus einem nachweisbaren Zusammenhang zwischen der äquivalenten Gesamtdicke der Konstruktion und den Mindestanforderungen an die aufnehmbaren Bemessungsachsen lässt sich ein konstruktiv bedingtes Substanzpotenzial SAB noch aufnehmbarer äquivalenter Bemessungsachslastübergänge wie folgt definieren:

$$SAB_j(t) = 3 \cdot 10^{-15} \cdot D_j(t)^{6,19} \cdot 0,5 \quad [\text{Mio. aufnehmbare Äquivalenzachsen}]$$

mit  
SAB<sub>j</sub>(t) Substanzpotenzial noch aufnehmbarer äquivalenter Bemessungsachsen der Richtungsfahrbahn eines homogenen Abschnitts j zum Zeitpunkt t.

Für die Aufspaltung des SAB<sub>j</sub>(t)-Werts der Richtungsfahrbahn auf die Fahrstreifen gilt:

$$SAB_{j,i}(t) = SAB_j(t) \cdot f_1 \quad [\text{Mio. aufnehmbare Äquivalenzachsen}]$$

mit  
f<sub>1</sub> Fahrstreifenfaktor für äquivalente Bemessungsachsen.

Das danach ermittelte fahrstreifenbezogene Substanzpotenzial betrifft die Gesamtkonstruktion des Oberbaus in Analogie zur RStO 01. Für eine schichtbezogene Reduzierung des SAB-Werts können Faktoren herangezogen werden, die aus beobachteten mittleren Nutzungsdauern abgeleitet wurden. Für die Berechnung des SAB-Werts der Schicht i gilt:

$$SAB_{j,i,i}(t) = SAB_{j,i}(t) \cdot f_1 \cdot r_i \quad [\text{Mio. aufnehmbare Äquivalenzachsen}]$$

mit  
r<sub>i</sub> Faktor für Schicht i.

Das mit dem SAB-Wert ermittelte Substanzpotenzial bezieht sich ausschließlich auf Materialkenngrößen. Der SAB-Wert stellt eine Analogie bestehender, bereits länger unter Verkehr stehender Straßenkonstruktionen zu den Neubaukonstruktionen der RStO 01 her. Bestehende Straßenkonstruktionen weisen jedoch in der Regel einen schlechteren baulichen Zustand als nach dem Neubau auf. Das Substanzpotenzial aufnehmbarer Achsen aus konstruktiver Sicht wird daher durch den aktuell vorliegenden Oberflächenzustand, der im 4-Jahres-Turnus im Rahmen der ZEB erfasst wird, korrigiert. Als maßgebend für eine zustandsbezogene Abminderung werden die im PMS jährlich fortgeschriebenen Zustandswerte der Längsebenheit (ZW\_AUN), der Querebenheit (ZW\_SPT), der Griffigkeit (ZW\_GRI) und der kombinierten Risse/Oberflächenschäden (ZW\_RIO) angesehen. Die zustandsbezogene Abminderung nach Schichtart und Zustandsbild erfolgt mithilfe eines prozentualen Reduzierungsfaktors r<sub>i,k</sub>. Ein Faktor r<sub>i,k</sub> = 0 % führt zu keiner Reduzierung, ein Faktor r<sub>i,k</sub> = 100 % sagt aus, dass das Potenzial dieser Schicht i vollständig verbraucht ist. Es gilt:

$$r_{j,i,k}(t) = [\text{Min}(0; \text{Max}(R_{S,i,k}; ((ZW_k(t) - 1,5) \cdot R_{S,i,k} / 3)))] / 100$$

mit  
r<sub>i,k</sub>(t) zustandsspezifischer Reduzierungsfaktor [-] für Abschnitt j, Fahrstreifen f, Schicht i und den Zustandswert k zum Zeitpunkt t,

ZW<sub>j,i,k</sub>(t) Ausprägung des Zustandswerts für Merkmal k zum Zeitpunkt t (Abschnitts j, Fstr. f),

R<sub>S,i,k</sub> Schwellenwert der Reduzierung in % für den Zustandswert der Schicht i und des Merkmals k.

Für das zustandsbezogene reduzierte Substanzpotenzial gilt damit:

$$SAB_{j,i,k}(t) = SAB_{j,i,i}(t) \cdot r_{i,k}(t) \quad [\text{Mio. aufnehmbare Äquivalenzachsen}]$$

Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass eine größere zustandsbezogene Reduzierung angebracht ist, wenn mehrere Schäden gleichzeitig auftreten ("Synergie-Effekt" zwischen verschiedenen Zustandsmerkmalen). Für die Erfassung derartiger Synergien wird der Wert für R<sub>S,i,k</sub> um einen bestimmten Differenzbetrag Δ<sub>S,i,k</sub> erhöht:

$$R_{S,i,k} = R_{S,i,k} + \Delta_{S,i,k} \quad [\%]$$

Mit einem angenommenen Maximalwert S<sub>S,i,k</sub> für die Reduzierung von R<sub>S,i,k</sub> gilt:

$$\Delta_{S,i,k}(t) = [(S_{S,i,k} - R_{S,i,k}) \cdot (ZW_{S,i,k}(t) - 2,5)] / 2,5 \quad [\%]$$

mit  
Δ<sub>S,i,k</sub>(t) zusätzliche Reduzierung (%-additiv) von R<sub>S,i,k</sub> für Schicht i und Merkmal k bei "Synergie-Effekt" zum Zeitpunkt t,

S<sub>S,i,k</sub> angenommener Maximalwert in % für die Reduzierung,

ZW<sub>S,i,k</sub>(t) Zustandswert, für den zum Zeitpunkt t Synergie besteht.

Für den Reduktionsfaktor r<sub>i,k</sub><sup>\*</sup>(t) unter Berücksichtigung der "Synergie-Effekte" gilt:

$$r_{i,k}^*(t) = [\text{Min}(0; \text{Max}(R_{S,i,k}; ((ZW_{S,i,k}(t) - 1,5) \cdot R_{S,i,k}^* / 3)))] / 100$$

mit  
r<sub>i,k</sub><sup>\*</sup>(t) zustandsspezifischer Reduzierungsfaktor [-] für die Schicht i und den Zustandswert k zum Zeitpunkt t unter Berücksichtigung von "Synergie-Effekten",

Der zustandsspezifische Reduzierungsfaktor r<sub>i,k</sub><sup>\*</sup>(t) mit "Synergie-Effekten" wird für jedes Zustandsmerkmal k berechnet. Für den SAB-Wert ist der maximale Faktor zu berücksichtigen:

$$r_{i,k,\text{max}}^*(t) = \text{Max}(r_{i,k}) \quad [-]$$

Somit gilt für das reduzierte Substanzpotenzial SAB<sub>j,i,k</sub>(t) eines Abschnitts j zum Zeitpunkt t:

$$SAB_{j,i,k}(t) = SAB_{j,i,i}(t) \cdot r_{i,k,\text{max}}^*(t) \quad [\text{Mio. aufnehmbare Äquivalenzachsen}]$$

Im Ergebnis entsteht für jeden homogenen Abschnitt ein durch den Oberflächenzustand und Synergien korrigiertes Substanzpotenzial noch aufnehmbarer Äquivalenzachsen in der zeitlichen Entwicklung über den gesamten Bewertungszeitraum, das sich zwischen den übereinander liegenden Schichten unterscheidet.

Bei der monetären Bewertung des zustandsabhängig korrigierten Substanzpotenzials wird vom Geldwert K<sub>B</sub> eines äquivalenten Achsübergangs B ausgegangen. Auf der Grundlage einer zur Absicherung der Mautkalkulationen erstellten Wegekostenrechnung ergibt sich:

$$K_B = 6,82 \cdot 10^{-4} \quad [\text{Cent} / B \cdot \text{m}^2]$$

Für den Bezug zum fachtechnischen Konzept müssen die monetären Anteile der einzelnen Schichten an einem äquivalenten Achslastübergang quantifiziert werden. Auf der Grundlage der prozentualen Anteile der jeweiligen Schichten  $A_i$  an den mittleren Erneuerungskosten ergibt sich ihr monetärer Anteil an einem äquivalenten Achslastübergang  $K_{B,i}$  wie folgt:

$$K_{B,i} = K_B \cdot A_i / 100 \quad [\text{Cent} / \text{B} \cdot \text{m}^2]$$

Der monetäre Beitrag der Schicht  $i$  zum Gesamtpotenzial aufnehmbarer Achsübergänge  $MSAB_{j,f,i}(t)$  ergibt sich durch Multiplikation von  $K_{B,i}$  mit der Fläche des Abschnitts EFL und der Anzahl der von der Schicht  $i$  aufnehmbaren Achslastübergänge  $SAB_{j,f,i}(t)$ :

$$MSAB_{j,f,i}(t) = SAB_{j,f,i}(t) \cdot K_{B,i} \cdot EFL \quad [10^4 \text{ €}]$$

Bei eventuell vorhandenen "oberen" Deckschichten (OB, Dünn-schichtbeläge) werden die monetären Beiträge der Schichten zum Gesamtpotenzial aufnehmbarer Achsübergänge  $MSAB_{j,f,i}(t)$  noch modifiziert.

Für das monetär bewertete Substanzpotenzial aller Schichten  $i$  der Gesamtkonstruktion gilt:

$$MSAB_{j,f}(t) = \sum_i MSAB_{j,f,i}(t) \quad [10^4 \text{ €}]$$

Die in einen Software-Prototypen "SUPORT" umgesetzten Algorithmen wurden an Teilnetzen der Bundesautobahnen (ca. 2 703 km-Richtungsfahrbahnen, ZEB 2005) und der Bundesstraßen (ca. 5 248 km-Richtungsfahrbahnen, ZEB 2003) getestet. Die Berechnungen für die den realen Verhältnissen entsprechenden Szenarien ("realA") und für die jeweiligen Nichts-Tun-Szenarien ("Do-Nothing") bestätigen die Umsetzbarkeit des Gesamtkonzepts. Die grafischen Aufbereitungen veranschaulichen plausible Ergebnisse. Die Auswertung des "realA"-Szenarios zeigt, dass mit den dabei angenommenen Finanzmitteln längerfristig eine Verbesserung der Befestigungssubstanz, insbesondere in Bezug auf die Deck- und Binderschichten, erreicht wird.

Die Nutzen-Kosten-Verhältnisse der einzelnen Erhaltungsstrategien, berechnet nach dem monetär ausgewiesenen Substanzpotenzial, weisen eine Spannweite von 0 bis 20 auf, wobei sich die deutlich größten Häufigkeiten im Bereich zwischen 0 und 2 ergeben. Die mit dem Kostenminimierungsmodul ermittelten Nutzen-Kosten-Verhältnisse können dem PMS als Grundlage für eine netzweite Optimierung unter Budgetrestriktionen übergeben werden.

Die Untersuchungsergebnisse liefern die Basis für den Entwurf eines FGSV-Arbeitspapiers, das die derzeit verfügbaren Alternativen der Maßnahmenbewertung beschreibt.

#### 4 Folgerungen für die Praxis

Die Bewertung abschnittsbezogener Erhaltungsstrategien durch Einsatz des technisch-wirtschaftlichen Kostenminimierungsmoduls betont sehr stark die Sicht des Baulasträgers bzw. Betreibers. Sie kann alternativ zur Bewertung auf der Grundlage der qualitativen Wirksamkeit nach dem "Fläche unter der Kurve"-Prinzip angewendet werden.

Als Grundlage für die praktische Umsetzung kann der erstellte Entwurf eines Arbeitspapiers zur "Bewertung von abschnittsbezogenen Erhaltungsstrategien" dienen. Darin sind in nachvollziehbarer Weise die Bewertungsverfahren nach dem

- "Fläche unter der Kurve"-Prinzip und dem
- Kostenminimierungsmodul

dargestellt. Im Entwurf des Arbeitspapiers fehlt das Verfahren der Nutzerkostenbewertung, da derzeit zwar die zusätzlichen

Nutzerkosten infolge von Baustellen, nicht aber die zusätzlichen Nutzerkosten infolge von Zustandsverschlechterungen in befriedigender Weise bestimmt werden können.

Der Entwurf des Arbeitspapiers wäre in die Reihe "R: Arbeitspapiere zur Erhaltungsplanung" als Nummer "R 4: Bewertung abschnittsbezogener Erhaltungsstrategien" einzuordnen.

Für eine durchgängige Darstellung des Gesamtkonzepts eines technisch-wirtschaftlichen Kostenminimierungsmoduls für das Erhaltungsmanagement und den Nachweis der Umsetzbarkeit dieses Konzepts mussten einige der verwendeten Parameter im Sinne einer Erstversorgung pragmatisch festgelegt werden. Diese Parameter, die problemlos verändert und ausgetauscht werden können, bedürfen der weiteren Diskussion und Verfeinerung.