

## Entwicklung probabilistischer Verfahrensweisen für die Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen – Teil: Asphaltdecken

FA 4.215

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau (Prof. Dr.-Ing. habil. F. Wellner)

Bearbeiter: Kiehne, A./ Kayser, S./ Kuhlisch, W.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Juli 2012

### 1 Einleitung

Mit den Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdeckschicht (RDO Asphalt 09) [1] ist im Verhältnis zur Dimensionierungsmethodik gemäß den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 01) [2] ein wesentlicher Schritt hin zu einer zuverlässigeren sowie ökonomisch und ökologisch nachhaltigeren Dimensionierung von Asphaltbefestigungen gemacht worden. Mit der den RDO Asphalt 09 zugrunde liegenden Verfahrensweise werden maßgebende, die Dauerhaftigkeit der gesamten Straßenbefestigung beeinflussende Faktoren berücksichtigt.

Eine der wesentlichen Einflussgrößen ist hierbei die Verkehrsbelastung, die im Gegensatz zu den RStO 01 nicht mehr nur empirisch auf eine äquivalente 10 t-Achse umgerechnet, sondern direkt in Form von Achslastverteilungen (Achslastkollektive) als Eingangsgröße dem Dimensionierungsverfahren zugrunde gelegt wird. Dadurch ist es möglich, achslastspezifische Spannungen und Dehnungen zu berechnen und im Rahmen der durchzuführenden Nachweise zu bewerten.

Die Asphaltsteifigkeit ist neben der Belastungsfrequenz hauptsächlich von der Temperatur des Asphalts abhängig. Während mit den RStO 01 die mechanischen Eigenschaften einschließlich deren Verhaltensweisen der einzelnen Straßenbaustoffe im Allgemeinen und der der Asphalte im Speziellen nur sehr bedingt Berücksichtigung finden, werden diese im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen durch materialspezifische Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen sowie Ermüdungsfunktionen erfasst und dem Rechenprozess zugeführt. Der Zusammenhang zwischen Asphalttemperatur und Asphaltsteifigkeit wird dabei durch spezielle Temperaturprofile realisiert.

Dem Straßenbauingenieur wird mit der RDO Asphalt 09 eine Verfahrensweise zur Verfügung gestellt, mit der er unterschiedliche Einflussgrößen auf die Belastungen und Beanspruchungen von Asphaltstraßenbefestigungen individuell berücksichtigt und somit die Dicken der einzelnen Konstruktionsschichten in Abhängigkeit der Belastungen und Beanspruchungen dimensionieren kann.

Es muss jedoch jedem Anwender klar sein, dass die Präzision des Rechenergebnisses von einer Vielzahl von Faktoren abhängig ist. Dazu gehören unter anderem:

- die zur Anwendung kommende Rechenmethode,

- die verwendeten rheologischen Modelle der Straßenbaumaterialien,
- die Qualität der versuchstechnischen Erfassung und Beschreibung der für die rheologischen Modelle erforderlichen Materialparameter,
- die Qualität der Beschreibung der Belastungsbedingungen einschließlich deren Prognose.

Berücksichtigt werden diese ungewissen Faktoren durch einen Sicherheitsbeiwert sowie einen Kalibrierfaktor, dem sogenannten Shiftfaktor. Während der Shiftfaktor alle unscharfen Belastungsfaktoren (z. B. Lastpausen, Geschwindigkeitseinfluss, Belastungsfunktion etc.) erfasst, werden mit dem Sicherheitsbeiwert die unpräzisen Annahmen der Materialeigenschaften (z. B. Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion, Ermüdungsfunktion, Dicke der Schichten, Tragfähigkeiten etc.) sowie die unpräzisen Ergebnisse infolge vereinfachter Modellannahmen und Rechenmethoden berücksichtigt.

### 2 Aufgabenstellung

Ziel des Forschungsprojekts ist es, die derzeit semiprobabilistische Verfahrensweise zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltbefestigungen in eine rein probabilistische Verfahrensweise zu überführen. Dadurch werden die Grundlagen für eine im ökonomischen und ökologischen Sinn effektive Dimensionierung von Asphaltbefestigungen gelegt.

Hierzu werden die Eingangsgrößen und Materialkennwerte als Zufallsgrößen behandelt und durch Wahrscheinlichkeitsdichte- bzw. Verteilungsfunktionen modellhaft beschrieben. Überdies wird eine Vorgehensweise zur Klassifikation dieser Zufallsgrößen definiert.

Dadurch soll gewährleistet werden, dass aus ein und derselben Stichprobe stets die gleiche, der probabilistischen Verfahrensweise zugrunde gelegte Verteilung, resultiert.

Folgende Parameter werden hierbei als Zufallsgrößen behandelt:

- Schichtdicken,
- Steifigkeitsmoduln von Asphalt,
- zulässige Lastwechselzahlen der Ermüdungsfunktion,
- Schichtsteifigkeiten von ToB,
- Temperaturprofile,
- Oberflächentemperaturen,
- Achslasten,
- Schadenskriterium.

Mithilfe der probabilistischen Verfahrensweise ist es darüber hinaus möglich, Ausfallwahrscheinlichkeiten der Befestigung zu berechnen.

Unter der Ausfallwahrscheinlichkeit einer Asphaltstraßenbefestigung wird im Rahmen dieses FE-Projekts jener Anteil (Flächenanteil) der gesamten Konstruktion verstanden, der nach einer festgelegten Nutzungszeit versagt (ermüdet ist).

Die Ausfallwahrscheinlichkeit stellt im Zuge der rechnerischen Dimensionierung sowie der rechnerischen Prognose von Asphaltbefestigungen eine wesentliche Neuerung dar. Dadurch wird dem Anwender ein Instrument zur Verfügung gestellt, mit dem es möglich ist, individuelle Sicherheitsbedürfnisse zu berücksichtigen.

### 3 Untersuchungsmethodik

Das Prinzip der rechnerischen Dimensionierung basierend auf einer probabilistischen Verfahrensweise ist schematisch in Bild 1 dargestellt.

Wesentlich für diese probabilistische Verfahrensweise ist die Unterteilung der als Zufallsgrößen zu behandelnden Parameter in objektkonstante und objektvariable Zufallsgrößen.

Objektkonstante Zufallsgrößen sind dabei Zufallsgrößen, die sich bezogen auf eine Befestigung der Länge L örtlich nicht verändern. Dazu zählen:

- Temperaturprofile,
- Oberflächentemperaturen,
- Achslasten,
- Radposition (Rollspur),
- Schadenskriterium.

Im Gegensatz dazu sind unter objektvariablen Zufallsgrößen diejenigen zu verstehen, die bezogen auf die gleiche Befestigung der Länge L örtlich unterschiedliche Werte annehmen können. Dazu zählen:

- Schichtdicken,
- Steifigkeitsmodul von Asphalt,
- zulässige Lastwechselzahlen der Ermüdungsfunktion,
- Schichtsteifigkeiten von ToB.

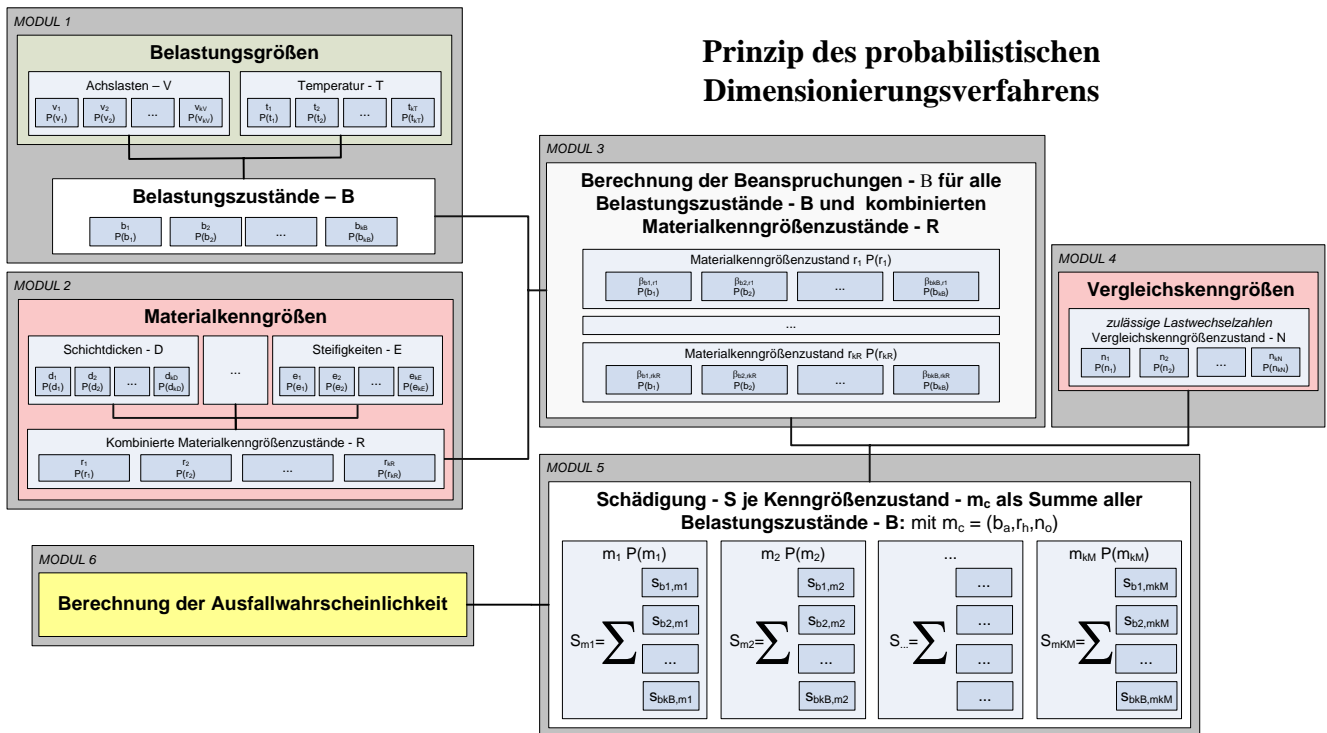
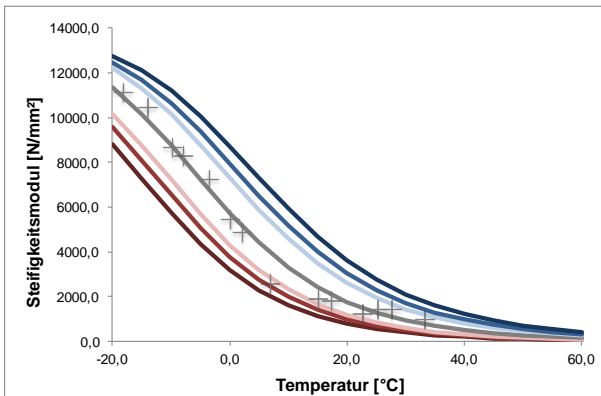


Bild 1: Schematische Darstellung der probabilistischen Verfahrensweise im Rahmen der rechnerischen Dimensionierung

Zu den objektvariablen Zufallsgrößen gehören ausschließlich die Materialeigenschaften. Diese werden darüber hinaus in Materialkenngrößen und Vergleichskenngrößen unterteilt. Während die Materialkenngrößen alle Materialeigenschaften beinhalten, die direkt für die Berechnung der Spannungen und Dehnungen in der Befestigung erforderlich sind (Schichtdicken, Steifigkeitsmoduln, Tragfähigkeiten), sind unter den Vergleichskenngrößen die Materialeigenschaften zu verstehen, die ausschließlich der Nachweisführung dienen (Ermüdungsfunktionen). Die probabilistische Verfahrensweise zur Dimensionierung von Asphaltbefestigungen ist modular aufgebaut.

Im Modul 1 werden die Belastungsgrößen (objektkonstante Zufallsgrößen) miteinander kombiniert und in Belastungszustände überführt. Jeder Belastungszustand besitzt eine Eintrittswahrscheinlichkeit die aus den jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten der Belastungsgrößen resultiert.

Im Modul 2 werden die zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen in der Asphaltbefestigung erforderlich Materialkenngrößen stochastisch modelliert und für die weiteren Berechnungen entsprechend aufbereitet. Das Ergebnis dieser Modellierung und Aufbereitung ist beispielhaft anhand der aus Versuchsergebnissen eines Asphalts resultierenden Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen dargestellt (Bild 2).

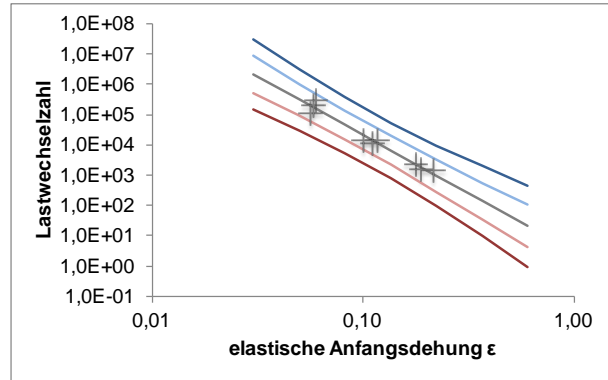


**Bild 2:** Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen / Klassenmittenfunktionen einer mit 7 Klassen diskretisierten Verteilung der Variabilität der Steifigkeitsmoduln

In Modul 3 werden äquivalent zum bisherigen semiprobabilistischen Dimensionierungsverfahren für alle Belastungszustände die Beanspruchungsgrößen (Spannung und Dehnung) in den für die einzelnen Nachweise erforderlichen Nachweispunkten ermittelt. Während dies im semiprobabilistischen Verfahren ausschließlich für einen kombinierten Materialkenngrößenzustand erfolgte, müssen im rein probabilistischen Verfahren die Beanspruchungen für alle Kombinationen der Materialkenngrößen berechnet werden.

Für ein und denselben Belastungszustand wird bezogen auf einen definierten Punkt innerhalb der Konstruktion eine Menge von Beanspruchungszuständen berechnet. Jeder dieser Beanspruchungszustände wird durch eine Eintrittswahrscheinlichkeit charakterisiert, die ihrerseits aus den Eintrittswahrscheinlichkeiten der den Berechnungen zugrunde gelegten Materialkenngrößen resultiert.

Die Bewertung der Beanspruchungszustände erfolgt mithilfe von Vergleichskenngrößen. Diese werden im Modul 4 entsprechend stochastisch modelliert und aufbereitet (beispielhaft siehe Bild 3), um dann innerhalb des Moduls 5 zur Berechnung der Teilschädigungen jedes Beanspruchungszustands herangezogen zu werden.



**Bild 3:** Ermüdungsfunktionen / Klassenmittenfunktionen einer mit 5 Klassen diskretisierten Verteilung der Variabilität der Ermüdungslastwechselzahlen

Durch die stochastische Betrachtung der Vergleichskenngrößen ergeben sich für jeden Beanspruchungszustand wiederum eine Menge an Vergleichskenngrößen und somit im Ergebnis eine Menge an Teilschädigungen. Alle Teilschädigungen werden ebenfalls durch individuelle Eintrittswahrscheinlichkeiten charakterisiert.

Im Modul 6 wird letztlich die Ausfallwahrscheinlichkeit der Konstruktion berechnet. Dabei wird in der probabilistischen Verfahrensweise die Gesamtschädigung für alle kombinierten Material- und Vergleichskenngrößenzustände (objektvariable Zufallsgrößen) getrennt als Summe der Einzelschädigungen aller Belastungszustände (objektkonstante Zufallsgrößen) ermittelt.

Für jeden der kombinierten Material- und Vergleichskenngrößenzustände erhält man folglich einen Wert der Gesamtschädigung der entweder kleiner 1 (Nachweis erfüllt) oder größer gleich 1 (Nachweis nicht erfüllt) ist.

Zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit wird nun die Menge der Gesamtschädigungen  $S$  (Gleichung(1)) durch einen Indikator  $I_{\{S(m_c)\}}$  beschrieben.

$$I_{\{S(m_c)\}} = \begin{cases} 1 & \text{für } S(m_c) \geq 1 \\ 0 & \text{für } S(m_c) < 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$I_{\{S(m_c)\}} = \begin{bmatrix} I_{\{S(m_1)\}} & \cdots & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & I_{\{S(m_{k_M})\}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Anschließend wird für jeden kombinierten Material- und Vergleichskenngrößenzustand das Produkt aus der Wahrscheinlichkeit  $P(m_c)$  und dem zugehörigen Indikator  $I_{\{S(m_c)\}}$  gebildet.

Aufsummiert über alle kombinierten Material- und Vergleichskenngrößenzustände ergibt sich so die Ausfallwahrscheinlichkeit PD der Befestigung.

$$PD = \sum_c [I_{\{S(m_c)\}} \cdot P(m_c)] \quad (3)$$

## 4 Softwareseitige Umsetzung

Für die Berechnung durch eine Dimensionierungssoftware kann nur zum Teil auf vorhandene Software wie z. B. das Programm PaDesTo [3], welches den derzeitigen Stand der RDO Asphalt widerspiegelt, zurückgegriffen werden.

Um dennoch mit vertretbarem Aufwand die Stufen der Weiterentwicklung auch rechnerisch absichern zu können, wurde im Rahmen dieses Projekts ein Programm zur externen Steuerung des vorhandenen Programms PaDesTo entwickelt. Voraussetzung für den Einsatz des Steuerungsprogramms ist eine modifizierte Fassung des Programms PaDesTo, welches Schnittstellen zur Steuerung bereitstellt.

Primäres Ziel der Entwicklung des externen Steuerprogramms war, die gewünschten Berechnungsvarianten abbilden und mit dem bisherigen System in angemessener Zeit berechnen zu können.

Entsprechend den Eingabeparametern, die im probabilistischen Verfahren berücksichtigt werden sollen, setzt die externe Steuerung an den Schnittstellen zur Festlegung der Schichtdicken, sowie an der Modellierung der Materialeigenschaften an.

Nach der Eingabe der Materialkennwerte und der möglichen Deckendickenabweichungen werden diese Eingangsparameter durch das Steuerprogramm aufbereitet und Klassen mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten abgeleitet.

Durch die Vorgabe von Klassen für die Materialparameter ergeben sich Kombinationen, die durch automatisierte Rechenläufe abgearbeitet werden. Die Ergebnisse für die einzelnen Berechnungskombinationen werden in einer Datenbank abgelegt.

Die Berechnung erfolgt derzeit wie in den RDO Asphalt 09 beschrieben. Die einzelnen Rechenkombinationen setzen sich jedoch aus den Werten der ermittelten Klassen der Verteilungsfunktionen zusammen. Die Anzahl der Rechenkombinationen steigt gegenüber der RDO Asphalt 09 deutlich an.

Für jede Rechenkombination ergeben sich ein Ermüdungsstatus und eine Wahrscheinlichkeit für diesen Wert.

Diese Ergebniswerte werden für jede Kombination zur Analyse und Auswertung der Berechnung in einer Datenbank abgelegt. Ein Beispiel für den Inhalt der Ergebnistabelle kann Abbildung 4 entnommen werden.

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde eine Verfahrensweise zur rechnerischen Dimensionierung von Asphaltstraßenbefestigungen entwickelt, mit der die Variabilität der dimensionierungsrelevanten Material-, Schicht- und Befestigungsei-

genschaften (Eingangsgrößen) innerhalb des Dimensionierungsprozesses berücksichtigt werden kann.

Zur Umsetzung des probabilistischen Dimensionierungskonzepts sind entsprechende stochastische Modelle der Variabilität der jeweiligen Eingangsgröße erforderlich. Anhand von Messwerten zu den jeweiligen Eingangsgrößen können die jeweils erforderlichen Modellparameter bestimmt werden.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Dimensionierungskonzepts ist die Unterteilung aller Eingangsgrößen in objektvariable und objektkonstante Größen. Diese Betrachtungsform der Eingangsgrößen ermöglicht die Berechnung von Ausfallwahrscheinlichkeiten, welche den flächenmäßigen Anteil der Asphaltbefestigung beschreibt, die am Ende einer vorgegebenen Nutzungszeit gemäß der zu führenden Nachweise als "versagt" gilt.

Dieser "neue" Parameter führt sowohl zu einer sicherheitskonzeptionellen und somit genaueren Bewertung, als auch zu besser vergleichbaren Dimensionierungsergebnissen. Damit wird gleichzeitig eine objektivere ökonomische Beurteilung der dimensionierten Befestigungen, insbesondere durch die Einbeziehung der Variabilität der Materialeigenschaften (Materialgüte) möglich.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung des Oberbaus von Verkehrsflächen mit Asphaltdecke. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2009
- [2] Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2001
- [3] Kiehne, A.: Rechnerische Dimensionierung von Verkehrsflächen in Asphaltbauweise – Entwicklung und Umsetzung eines Verfahrens. Manuskript zur Dissertation, Technische Universität Dresden (in Bearbeitung)

localhost / localhost / padestoprob / oresults | phpMyAdmin 3.1.1 - Mozilla Firefox

Datei Bearbeiten Ansicht Chronik Lesezeichen Extras Hilfe

http://localhost/phpmyadmin/index.php?db=padestoprob&token=3a0d24283f46591bc76b473ef69d6t

localhost / localhost / padestoprob / ...

**phpMyAdmin**

Datenbank  
padestoprob (6)

padestoprob (6)

- imaterial
- itemp
- itraficbase
- oreults**
- serienrechnung
- setup

Anzeigen Struktur SQL Suche Einfügen Exportieren Importieren Operationen Leeren

**Löschen**

Zeige Datensätze 0 - 4 (1,900 insgesamt, die Abfrage dauerte 0.0051 sek.)

```
SELECT *
FROM `oreults`
LIMIT 0 , 5
```

Messen [ Bearbeiten ] [ SQL erklären ] [ PHP-Code erzeugen ] [ Aktualisieren ]

Zeige: 5 Datensätze, beginnend ab 5

untereinander angeordnet und wiederhole die Kopfzeilen nach 100 Datensätzen.

Nach Schlüssel sortieren: keine

+ Optionen

	id	ser_id	ermuedstatus	wahrscheinl
<input type="checkbox"/>	1	1	46.3363	1.51315e-006
<input type="checkbox"/>	2	1	26.1903	8.75881e-006
<input type="checkbox"/>	3	1	18.3374	2.62273e-005
<input type="checkbox"/>	4	1	6.32918	3.77982e-005
<input type="checkbox"/>	5	1	5.49565	2.62273e-005

Alle auswählen / Auswahl entfernen markierte:

Zeige: 5 Datensätze, beginnend ab 5

untereinander angeordnet und wiederhole die Kopfzeilen nach 100 Datensätzen.

Operationen für das Abfrageergebnis

Druckansicht Druckansicht (vollständige Textfelder) Exportieren CREATE VIEW

SQL-Abfrage speichern

Titel:   Diese gespeicherte SQL-Abfrage für jeden Benutzer verfügbar machen

SQL-Abfrage speichern

Fertig 0 Fehler / 0 Warnungen

**Bild 4:** Ergebnistabelle mit Ermüdungsstatus und zugehöriger Wahrscheinlichkeit