

Probabilistische Verfahrensweise für die Dimensionierung von Fahrbahnbefestigungen – Teil: Betondecken

FA 4.218

Forschungsstelle: Villaret Ingenieurgesellschaft mbH, Hoppegarten

Bearbeiter: Kiehne, A./Riwe, A./Villaret, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Juli 2011

1 Aufgabenstellung

Im konstruktiven Straßen- und Verkehrswegebau ist es aufgrund der Vielzahl an Einflüssen und deren Verteilungen (z. B. Verkehrslast, Temperatur) kaum möglich, eine wirtschaftlich optimale, tabellarische Lösung für alle Dimensionierungsprobleme zu finden. Daher ist es notwendig, für jeden Fall eine eigene Dimensionierung durchzuführen. Diese muss aus wirtschaftlichen Gründen so erfolgen, dass der Anteil der im Nutzungszeitraum versagenden Platten auf ein akzeptables Maß (Ausfallrate) begrenzt wird. Die Berechnung der Ausfallrate ist nur mit probabilistischen Methoden möglich.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, probabilistische Methoden für die rechnerische Dimensionierung von Betonfahrbahnen zu entwickeln. Dazu sind die mathematischen Grundlagen zu klären und geeignete Methoden für die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit zu identifizieren. Für die maßgebenden Einflussfaktoren sind mathematische Verteilungsfunktionen zu definieren, welche die Streuung dieser Größen hinreichend genau beschreiben.

Die probabilistischen Methoden sind in ein Berechnungsmodell bzw. einen Dimensionierungsalgorithmus zu fassen. Dieser ist in ein internes, zunächst für Forschungszwecke gedachtes Programm auf Basis von AWDSTAKO [1] zu integrieren.

2 Untersuchungsmethodik

Die Versagenswahrscheinlichkeit als Dimensionierungskriterium wurde mathematisch beschrieben.

Ausgehend von den Ergebnissen der Zuverlässigkeitstheorie wurden drei wichtige Gruppen von Methoden zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit gefunden:

- Exaktes Verfahren (Integration über den Versagensbereich)
- Näherungsverfahren (FORM/SORM u. a.)
- Simulationsverfahren (Monte Carlo-Methode).

Es wurde festgestellt, dass die Methoden hinsichtlich ihrer Eignung für Dimensionierungsaufgaben im Straßenbau untersucht werden müssen. Einzig für die erste Methode (Integration über den Versagensbereich) steht die Eignung fest. Die Integrationsmethode wurde für eine Implementierung in das neue probabilistische Dimensionierungssystem ausgewählt.

Voraussetzung für die Anwendung probabilistischer Methoden ist die mathematische Beschreibung der Streuung der Einflussgrößen. Dies kann mit geeigneten Verteilungsfunktionen erfolgen.

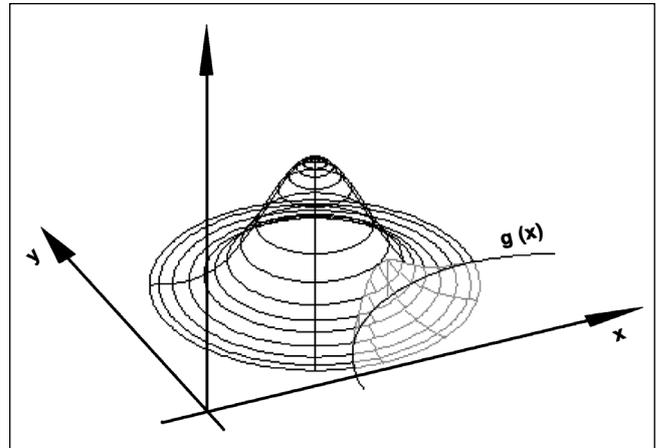


Bild 1: Ausfallwahrscheinlichkeit als Abschnitt eines Faltungsintegrals

Es wurden vier Einflussgrößen identifiziert, deren Streuung für die Ausfallwahrscheinlichkeit wesentlich ist:

- Deckendicke,
- Betonfestigkeit,
- Verkehrsbelastung,
- Temperaturbelastung (Gradient über die Deckendicke).

Um geeignete Verteilungsfunktionen zu finden, welche die Streuungen dieser Größen mathematisch beschreiben, wurden umfangreiche empirische und aus Simulationsrechnungen stammende Daten ausgewertet.

Die Belastungsgrößen (Verkehr, Temperatur) sind zeitabhängig. Es handelt sich um stochastische Prozesse.

Eine einfache Möglichkeit für die mathematische Behandlung der stochastischen Prozesse im Rahmen der Berechnung der Ausfallrate bietet die Turkstra-Regel. Diese besagt, dass die Ausfallwahrscheinlichkeit ein Maximum erreicht, wenn eine der Einwirkungen einen Extremwert annimmt. Damit wird es notwendig auch die Verteilungsfunktionen für die Extremwerte zu bestimmen. Die Parameter der Extremwertverteilung sind vom Betrachtungszeitraum abhängig. Damit werden die Ausfallraten auf zugeordnete Zeiträume bezogen. Diese können aus den Verteilungsfunktionen der Momentanwerte berechnet werden.

Im Ergebnis der Auswertung des Datenmaterials wurden die folgenden geeigneten Typen von Verteilungsfunktionen gefunden:

Tabelle 1: Geeignete Verteilungsfunktionen

Einflussgrößen	Verteilung der Momentanwerte	Verteilung der Extremwerte
Verkehrslasten	1 logarithmische Normalverteilung + 3 Normalverteilung	Gumbel (Typ I)
Temperaturgradienten	Logarithmische Normalverteilung	Gumbel (Typ I)
Deckendicke	Normalverteilung	
Betonfestigkeit	Normalverteilung	

Nach Festlegung der Funktionstypen wurden aus den empirischen Daten die Parameter der Verteilungsfunktionen bestimmt. Es war zu beachten, dass die Werte für den Straßentemperaturgradienten von der Deckendicke abhängen. Die Parameter der zugehörigen Verteilungsfunktion sind somit innerhalb des Programms immer wieder für den aktuellen Wert der Deckendicke zu bestimmen. Für die entsprechende Funktionsanpassung wird der Levenberg-Marquardt-Algorithmus benutzt.

Bei der Implementierung des Verfahrens in die neue Software STAKOPROB wurde versucht, das vorhandene Berechnungsmodell nach RDO Beton so wenig wie möglich zu verändern. Damit soll Kontinuität und Vergleichbarkeit für die verschiedenen Programmversionen gesichert werden.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die wesentlich im Zuge der Bearbeitung gewonnenen Erkenntnisse bzw. erzielten Ergebnisse werden wie folgt zusammengefasst:

1. Die rechnerische Dimensionierung erfordert die Anwendung probabilistischer Verfahren.

Eine wirtschaftliche Dimensionierung erfordert die Begrenzung des Anteils versagender Platten auf einen akzeptablen Wert. Die Berechnung dieser Ausfallrate ist nur mit probabilistischen Methoden möglich.

2. Die Anwendung probabilistischer Verfahren ist in vielfacher Hinsicht vorteilhaft.

- Die Ausfallrate kann hinreichend genau berechnet werden.
- Die geplante Nutzungsdauer kann auch bei den Einwirkungen berücksichtigt werden.
- Die Auswirkungen von Über- bzw. Unterdimensionierungen können durch entsprechende Änderungen der Ausfallrate quantifiziert werden. Damit wird es möglich, die Deckendicke zu optimieren, weil der entsprechende Mehr- bzw. Minderbedarf an Erhaltungsaufwendungen abgeschätzt werden kann. Ebenso ergibt sich eine Grundlage, um einen durch unplanmäßige Unterdimensionierung (z. B. zu geringe Deckendicke/Betonfestigkeit) entstandenen Schaden zu berechnen.
- Die zeitliche Entwicklung der Schadensrate lässt sich prognostizieren.
- Der Zusammenhang zwischen Ausführungsqualität, Ausfallrate und notwendigen Vorhaltemaßen wird transparent.

3. Voraussetzung für die Anwendung probabilistischer Verfahren ist die Beschreibung der Streuung der Einflussgrößen mit mathematischen Methoden.

Dies kann mit parametrischen Methoden (Verteilungsfunktionen) oder mit nichtparametrischen Methoden (Histogramme) erfolgen. Im Allgemeinen ist die Parametrisierung vorteilhaft.

4. Für die Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung.

Die Anwendbarkeit des Integrationsverfahrens für die probabilistische Dimensionierung von Betonfahrbahnen ist evident. Unter welchen Voraussetzungen die Anwendung der anderen beiden Verfahren möglich und sinnvoll ist, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojekts noch nicht untersucht.

5. Bei Anwendung des Integrationsverfahrens steigt der Rechenaufwand mit der Anzahl der Zufallsgrößen. Damit ist, bei Einhaltung praktikabler Rechenzeiten, die Anzahl der Zufallsgrößen bei diesem Verfahren auf 4 oder maximal 5 begrenzt. Aus diesem Grund ist die Prüfung der Anwendbarkeit anderer Verfahren sinnvoll.

6. Der FORM-Algorithmus ist für das Berechnungsmodell nach RDO Beton nicht anwendbar, weil die Grenzzustandsfunktion im relevanten Bereich nicht stetig ist.

7. Bei Anwendung der Monte Carlo-Methode in ihrer einfachen Form ist für die Erzielung hinreichend genauer Ergebnisse ein sehr hoher Rechenaufwand notwendig. Hier kann die Anwendung höher entwickelter Varianten der Monte Carlo-Methode (Latin Hypercube Sampling, Importance Sampling) zu besseren Ergebnissen führen.

8. Für die probabilistischen Berechnungen sind die Einwirkungen (Verkehr, Straßentemperaturgradient) als stochastische Prozesse zu betrachten. Die Turkstra-Regel bietet eine einfache Möglichkeit die stochastischen Prozesse in den Berechnungen zu berücksichtigen.

9. Bei Verwendung der Turkstra-Regel sind die Verteilungsfunktionen für die im Betrachtungszeitraum auftretenden Extremwerte der stochastischen Prozesse zu verwenden. Diese Extremwertverteilungen sind leicht zu definieren, erzeugen bei der praktischen Anwendung aber numerische Probleme. In sehr guter Näherung ist für die Verteilung der Extremwerte die Gumbelverteilung anwendbar.

10. Grundsätzlich können verschiedene Verteilungsfunktionen hinreichend gut geeignet sein, um die Streuung der Werte eines natürlich vorkommenden Phänomens zu beschreiben.

11. Für die Beschreibung der Streuung der Deckendicke ist die Normalverteilung geeignet.

12. Für die Beschreibung der Streuung der Betonfestigkeit ist die Normalverteilung geeignet.

13. Für die Beschreibung der Streuung der Momentanwerte der Temperaturbelastung (Straßentemperaturgradient) ist die logarithmische Normalverteilung geeignet. Die Streuung der Extremwerte wird mit der Gumbelverteilung beschrieben.

14. Für die Beschreibung der Streuung der Momentanwerte der Verkehrsbelastung ist eine Sequenz aus einer logarithmischen Normalverteilung und drei Normalverteilungen geeignet. Die Streuung der Extremwerte wird mit der Gumbelverteilung beschrieben.

15. Es wurde ein Berechnungssystem (STAKOPROB) für die probabilistische Dimensionierung von Betondecken entwickelt.

Dieses beinhaltet die folgenden Grundprinzipien:

- Verwendung des Berechnungsmodells der RDO Beton [2],
- Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit durch Integration über den Versagensbereich,
- Herstellung des zeitlichen Bezugs der Ausfallrate durch Verwendung der Turkstra-Regel,
- Berücksichtigung von vier maßgeblichen Parametern als Zufallsgrößen (Dicke, Festigkeit, Verkehrsbelastung, Temperaturbelastung).

16. Eine Kalibrierung des Systems ist zwingend notwendig.

17. Testrechnungen zeigen, dass das Maß der Streuungen einen relevanten Einfluss auf die Ausfallrate hat.

18. Bei probabilistischer Dimensionierung hat die Betonklasse einen etwas geringeren Einfluss als bei herkömmlicher Dimensionierung.

Der weitere Forschungsbedarf betrifft zwei grundsätzliche Aufgabengebiete:

- Verbesserung des Berechnungsmodells,
- Verbesserung der probabilistischen Methoden.

Besonderes Potenzial zur Verbesserung des Berechnungsmodells wird in den folgenden Forschungsschwerpunkten gesehen:

- Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Lagerungsbedingungen (Lagerungsfaktor),
- Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der dynamischen Wirkung der Verkehrslast (Stoßfaktor),
- Verbesserung der Beschreibung der zeitlichen Entwicklung der Betoneigenschaften (Ermüdung, Nacherhärtung),
- Überprüfung der Berechnungsformeln mit FEM-Modellen.

Die probabilistische Methodik betreffend werden die folgenden Forschungsschwerpunkte gesehen:

- Überprüfung der Anwendbarkeit des FORM-Algorithmus, um eine größere Anzahl an Zufallsgrößen berücksichtigen zu können,

- Entwicklung eines praxistauglichen Verfahrens nach der Monte Carlo-Methode,
- Überprüfung der Relevanz weiterer Zufallsgrößen,
- Identifikation geeigneter Verteilungsfunktionen für weitere Zufallsgrößen.

4 Literaturverzeichnis

[1] AWDSTAKO, Vers. 1.7, System und Programm zur Berechnung der Konstruktionsdicke unbewehrter Betondecken von Verkehrsflächen

[2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) (2009): Richtlinien für die rechnerische Dimensionierung von Betondecken im Oberbau von Verkehrsflächen (RDO Beton 09), Köln