

Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 91

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a stylized, lowercase, green font with a white outline. The letters are bold and rounded, giving it a modern and professional appearance.

Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen

**Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr
unter besonderer Berücksichtigung
von Restnutzungsdauer
und Verkehrsentwicklung**

von

Ursula Freundt
Sebastian Böning

Fakultät Bauingenieurwesen
Bauhaus-Universität Weimar

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 91

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die Berichte der BASt zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de/benutzung.php?la=de>

Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt F1100.2207013
des Arbeitsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen:**
Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen, Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung

Projektbetreuung

Rolf Kaschner

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-86918-285-8

Bergisch Gladbach, Januar 2013

Kurzfassung – Abstract

Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung

In Anbetracht des stetigen Wachstums des Schwerverkehrsaufkommens auf dem deutschen und europäischen Straßennetz wurden durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in der jüngsten Vergangenheit mehrere Forschungsprojekte initiiert, um die Auswirkungen dieses wachsenden Verkehrsaufkommens auf die Brückenbauwerke, sowohl hinsichtlich des Brückenneubaus als auch hinsichtlich des Brückenbestandes, zu analysieren.

Vom Forschungsnehmer wurden hierzu in vorhergehenden Projekten auf der Grundlage von Verkehrssimulationsrechnungen verschiedene Lastmodelle identifiziert, die die Beanspruchungen infolge prognostizierten zukünftigen Verkehrs oder eines in gewissen Teilen bekannten objektspezifischen Verkehrs abdecken. Die Relevanz der identifizierten Lastmodelle in den Sicherheitskonzepten wurde bisher nicht untersucht. Dies steht im Schwerpunkt dieser Projektaufgabe.

Für ein ausgewähltes Tragsystem (2x40-m-Zweifeldsystem mit einem zweistufigen Plattenbalkenquerschnitt in Massivbauweise) wurden hierzu sicherheitstheoretische Untersuchungen durchgeführt. Grundlage solcher Untersuchungen ist die Berücksichtigung von streuenden (zufälligen) Kenngrößen zur Abbildung von inneren Widerständen diesen gegenüberstehenden Beanspruchungen. Für die stochastische Beschreibung der Beanspruchungen infolge des Straßenverkehrs wurden die Ergebnisse der in dem vorhergehenden Forschungsprojekt vorgenommenen Verkehrssimulationsrechnungen verwendet und eine Vorgehensweise zur Aufbereitung dieser Datenbestände entwickelt. Hierdurch ist es möglich, eine differenzierte stochastische Beschreibung der Beanspruchungen aus Verkehrseinwirkungen unter Kenntnis objektspezifischer Verkehrscharakteristiken zu erstellen.

Im Ergebnis der Untersuchungen zeigt sich, dass sich über verschiedene betrachtete Verkehrscharakteristiken und zugehörige Lastmodelle hin-

weg relativ homogene Sicherheitsindizes ergeben. Unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite liegen die Ergebnisse leicht über den „normativen Vorgaben“ des Sicherheitsindex.

Prioritising and recalculation of bridges in the vicinity of federal highways – influence asserted by the traffic-related effects with special focus being on the remaining useful life and the development of traffic

In consideration of the steady increase of the heavy load traffic on the German and European road network, the Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – BMVBS) and the Federal Highway Research Institute (Bundesanstalt für Straßenwesen – BASt) initiated several research projects in the recent past to analyse the effects of the growing traffic on new and existing road bridges.

In previous research projects of the contractor of this project load models for road bridges were identified which cover the effects of predicted future traffic and object-specific actual traffic which is known in some extent. The relevance of the identified load models in the safety concepts was not analysed yet. This is the focus of the actual research project.

For one selected bearing system (2x40m two-field system with twin-webbed T-beam cross-section, solid construction) probabilistic analyses were carried out. Base of such analyses is the consideration of scattering (random) values for the description of the inner resistances and the opposing stresses (outer effect). For the stochastic description of the effect from road traffic, results of the previous research project were used. These results are based on traffic simulations and a method for the treatment of these data was developed. This gives the possibility to develop a differentiated stochastic description of the effect of road traffic under the knowledge of object-specific characteristics of road traffic.

The results of the analyses show, that over different regarded traffic characteristic and corresponding load models the level of the calculated safety indices is relatively homogenous. Under additional consideration of model uncertainties on the side of effects and resistance the results are slightly above the “normative regulations” of the safety index.

Inhalt

| | | | | | |
|----------|---|----|---|--|----|
| 1 | Einleitung | 7 | 5.2.3 | Modellunsicherheiten | 27 |
| 2 | Grundlagen | 7 | 6 | Ergebnisse | 27 |
| 2.1 | Basisvariablen mit Zufallscharakter ... | 7 | 6.1 | Grundlagen | 27 |
| 2.2 | Lösungsverfahren | 8 | 6.2 | Vorbemessung | 28 |
| 3 | Vorgehensweise | 9 | 6.3 | Zusammenstellung aller verwendeten stochastischen Beschreibungen der Basisvariablen | 31 |
| 3.1 | Verwendetes Lösungsverfahren | 9 | 6.4 | Ergebniszusammenstellung | 32 |
| 3.2 | Grenzzustandsgleichung | 9 | 6.4.1 | Übersicht | 32 |
| 4 | Stochastische Beschreibung der Beanspruchungen infolge Verkehrs | 11 | 6.4.2 | Ergebnisse aus Analysen für das Stützmoment M_B | 34 |
| 4.1 | Verwendung der Simulations- ergebnisse | 11 | 6.4.3 | Ergebnisse aus Analysen für das Stützmoment M_B unter Annahme eines halbierten charakteristischen Wertes für das Eigengewicht | 42 |
| 4.2 | Kombination von Ergebnissen | 13 | 6.4.4 | Ergebnisse aus Analysen für das Stützmoment M_B unter Annahme einer Verteilung von 20-Jahres- Maximalwerten für die Beanspruchung infolge Verkehrs | 45 |
| 4.3 | Definition verschiedener Kombinationen | 18 | 6.4.5 | Ergebnisse aus Analysen für das Feldmoment M_F | 46 |
| 4.3.1 | Verwendete Datenbestände und Bezeichnungen | 18 | 7 | Zusammenfassung | 49 |
| 4.3.2 | Aktueller und zukünftiger Verkehr für den Neubau | 21 | 8 | Literatur | 50 |
| 4.3.3 | Kombinationen für den Brücken- bestand in Abhängigkeit der Verkehrscharakteristik | 22 | Anhang A: Ergebnisdarstellungen der zuver- lässigkeitstheoretischen Untersu- chungen | | |
| 4.4 | Zusammenstellung der verwendeten stochastischen Beschreibungen der Verkehrseinwirkung | 22 | A.1 | Stützmoment M_B | |
| 5 | Stochastische Beschreibung weiterer Basisvariablen | 24 | A.2 | Stützmoment M_B (halbiertes Gesamtgewicht) | |
| 5.1 | Widerstandsseite | 25 | A.3 | Stützmoment M_B (20 Jahre Referenzzeitraum für Beanspruchungen aus Verkehr) | |
| 5.1.1 | Betondruckfestigkeit | 25 | A.4 | Feldmoment M_F | |
| 5.1.2 | Streckgrenze des Bewehrungs- stahls | 26 | Der Anhang liegt dem Bericht auf CD bei. | | |
| 5.1.3 | Modellunsicherheiten | 26 | | | |
| 5.1.4 | Weitere Basisvariablen auf der Widerstandsseite | 26 | | | |
| 5.2 | Einwirkungsseite | 26 | | | |
| 5.2.1 | Eigengewicht | 26 | | | |
| 5.2.2 | Ausbaulast | 27 | | | |

1 Einleitung

In Anbetracht des stetigen Wachstums des Schwerverkehrsaufkommens auf dem deutschen und europäischen Straßennetz wurden durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) in der jüngsten Vergangenheit mehrere Forschungsprojekte initiiert, um die Auswirkungen dieses wachsenden Verkehrsaufkommens auf die Brückenbauwerke, sowohl hinsichtlich des Brückenneubaus als auch hinsichtlich des Brückenbestandes, zu analysieren. In [4] wurde vom Forschungsnehmer hierzu auf der Grundlage von vorhandenen Verkehrsdaten (Weigh-in-Motion-Daten) und Simulationsrechnungen ein zukunftsfähiges Lastmodell für den Brückenneubau identifiziert. Dieses Lastmodell, umgesetzt mittels Anpassungsfaktoren für das Lastmodell 1 des Eurocode 1 (DIN EN 1991-2 [18]), wird zukünftig im nationalen Anhang zum Eurocode 1 (DIN EN 1991-2/NA [19]) Anwendung finden.

In [5] und [6] wurden, aufbauend auf der in [4] entwickelten Methode, für den Brückenbestand in Abhängigkeit von objektbezogenen Verkehrsaufkommen (Schwerverkehrsstärke und Schwerverkehrszusammensetzung) und zusätzlichen Kompensationsmaßnahmen Lastmodelle identifiziert, welche die Einwirkungen des aktuellen objektbezogenen Verkehrsaufkommens abdecken. Die Ergebnisse finden in der kürzlich veröffentlichten Nachrechnungsrichtlinie (vgl. [21]) Anwendung.

In den o. g. Forschungsprojekten wurden auf Basis von Verkehrssimulationsrechnungen Kennwert-Zeit-Verläufe für ausgewählte Tragwerke und Kennwerte (Biegemomente, Querkräfte usw.) ermittelt und statistisch ausgewertet. Ziel der Auswertung war es dabei, durch Extrapolation den charakteristischen Wert der Verkehrseinwirkung zu bestimmen, der mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren definiert ist (vgl. [18]). Die Anwendung der hierbei ermittelten Lastmodelle erfolgt innerhalb eines semiprobabilistischen Nachweiskonzeptes. Die Relevanz der entwickelten Lastmodelle in den Sicherheitskonzepten wurde bisher nicht untersucht. Dies steht im Schwerpunkt dieser Projekt Aufgabe.

Im Rahmen des Entwurfes von Tragwerken müssen die Abmessungen und Materialien so festgelegt werden, dass während der vorgesehenen Nutzungsdauer mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit bzw.

ausreichender Zuverlässigkeit die inneren Widerstände (R) des Tragwerkes größer sind als die Beanspruchungen (E), die auf das Tragwerk einwirken. Ist dies nicht der Fall, so tritt ein Versagen ein. Für Anforderungen hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit gilt ebenfalls diese Grundanforderung. Widerstände und Beanspruchungen weisen dabei einen Zufallscharakter auf. In der praktischen Umsetzung der Bemessung von Tragwerken werden Nachweisverfahren eingesetzt, in denen die Parameter zur Abbildung der inneren Widerstände und der Beanspruchungen durch charakteristische Werte und entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte widergespiegelt werden. Es werden hier also deterministische Werte verwendet. Die normative Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte erfolgte größtenteils anhand probabilistischer Verfahren und wurde auf eine bestimmte Versagenswahrscheinlichkeit kalibriert (vgl. [3]). Daher wird hier von einem semiprobabilistischen Verfahren gesprochen. Ohne eine konkrete Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten soll hier also durch die Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte eine ausreichende Zuverlässigkeit (hinreichend kleine Versagenswahrscheinlichkeit) gewährleistet werden. Zuverlässigkeitstheoretische Analysen, in denen der Zufallscharakter der einzelnen Variablen detailliert berücksichtigt werden kann, sind für die praktische Anwendung aufgrund der Komplexität nur bedingt geeignet.

2 Grundlagen

2.1 Basisvariablen mit Zufallscharakter

Grundsätzlich werden für eine Nachweisführung innere Widerstände den Beanspruchungen aus Einwirkungen (direkter und/oder indirekte) gegenübergestellt. Sowohl die Widerstände als auch die Beanspruchungen und deren hervorrufoende Einwirkungen weisen eine Zufallscharakteristik auf. Die inneren Widerstände ergeben sich aus Materialeigenschaften und Abmessungen anhand eines Modells zur Berechnung der Widerstände (zum Beispiel aufnehmbares Biegemoment eines Stahlbetonquerschnittes). Materialeigenschaften und Abmessungen sind Zufallsvariablen, sie streuen also in gewisser Weise um einen Erwartungswert. Auch das Modell zur Berechnung der Widerstände weist eine gewisse zufällige Abweichung zum wirklichen Widerstand auf. Die Einwirkungen sind im Allgemeinen

eine Summe aus verschiedenen ständigen und veränderlichen Einwirkungen, die ebenfalls Funktionen von Zufallsvariablen sind. Die Subtraktion von Widerstand und Einwirkung bildet die Grenzzustandsfunktion. Ist die Grenzzustandsfunktion größer null, so ist der Widerstand größer als die Einwirkung, ist sie kleiner null, so sind die Einwirkungen größer als der Widerstand und die oben aufgeführte Anforderung ist nicht mehr erfüllt. Die Grenzzustandsfunktion ist also eine von streuenden Parametern abhängige Funktion und trennt den sicheren Bereich ($R > E$) vom Versagensbereich ($R < E$) ab. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Versagen eintritt, ergibt sich aus dem Integral einer mehrdimensionalen Verteilungsdichte (Verteilungsdichte einer aus den verschiedenen Basisvariablen – Materialeigenschaften, Abmessungen, Einwirkungen usw. – zusammengesetzten Zufallsgröße) über den durch die Grenzzustandsfunktion abgegrenzten Versagensbereich.

Für die Versagenswahrscheinlichkeit p_f liegen definierte Zielwerte vor, wobei bei diesen Vorgaben ein Sicherheitsindex β angegeben wird. Näherungsweise gilt hier der Zusammenhang nach Gleichung (2.1).

$$p_f = \Phi(-\beta) \quad (2.1)$$

mit: Φ als Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Je größer der Sicherheitsindex β , desto kleiner ist somit die Versagenswahrscheinlichkeit p_f . Die Bezeichnung Sicherheitsindex wird zum Beispiel von [11] verwendet und ist gleichbedeutend mit der Bezeichnung Zuverlässigkeitsindex. Nachfolgend wird die erste Bezeichnung verwendet.

Solche Zielwerte der Bauwerkszuverlässigkeit bzw. Sicherheit sind zum Beispiel in [16] oder [8] angegeben. In Tabelle 1 sind die Angaben aus [16] aufgeführt. Hierbei wird zwischen zwei Bezugszeiträumen und drei Zuverlässigkeitsklassen unterschieden. Die Zuverlässigkeitsklassen RC1 bis RC3 können dabei den in [16] definierten Schadensfolgeklassen CC1 bis CC3 zugeordnet werden. CC1 hat dabei als Merkmal, dass aus einem Schaden „niedrige Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen“ [16] entstehen.

Der Zusammenhang zwischen den Sicherheitsindizes verschiedener Bezugszeiträume n (β_n , n in Jahren) ergibt sich nach Gleichung (2.2).

| Zuverlässigkeits-Klasse | Mindestwert für β | |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | Bezugszeitraum 1 Jahr | Bezugszeitraum 50 Jahre |
| RC 3 | 5,2 $p_f \approx 1 \cdot 10^{-7}$ | 4,3 $p_f \approx 9 \cdot 10^{-6}$ |
| RC 2 | 4,7 $p_f \approx 1 \cdot 10^{-6}$ | 3,8 $p_f \approx 7 \cdot 10^{-5}$ |
| RC 1 | 4,2 $p_f \approx 1 \cdot 10^{-5}$ | 3,3 $p_f \approx 5 \cdot 10^{-4}$ |

Tab. 1: Empfehlungen für Mindestwerte des Sicherheitsindex β (Zuverlässigkeitsindex) nach [16], Tabelle B.2 mit zugehörigen Versagenswahrscheinlichkeiten

$$\beta_n = \Phi^{-1} \left[\Phi(\beta_1)^n \right] \quad (2.2)$$

mit: Φ als Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

mit: Φ^{-1} als Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung als inverse Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Für einen Bezugszeitraum von 100 Jahren (vorgesehene Gesamtnutzungsdauer eines Brückenbauwerkes) ergibt sich hieraus für die Zuverlässigkeitsklasse RC2 ein Sicherheitsindex von 3,65.

In Kapitel 2.2 werden vorhandene Lösungsverfahren zur Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten bzw. Sicherheitsindizes kurz vorgestellt.

2.2 Lösungsverfahren

Für die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit bzw. Sicherheitsindex stehen verschiedene Lösungsverfahren zur Verfügung, mit denen diese Werte entweder exakt oder in Näherung bestimmt werden können. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurde die Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung für die Untersuchungen eingesetzt. In diesem Näherungsverfahren für die Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten und Sicherheitsindizes, meist abgekürzt mit FORM (First Order Reliability Method), können beliebige Verteilungsfunktionen der Basisvariablen und nichtlineare Grenzzustandsfunktionen verarbeitet werden. Die Lösung beruht dabei im Wesentlichen darauf, den kürzesten Abstand zwischen Koordinatenursprung und Grenzzustandsgleichung im standardisierten Raum zu bestimmen. Dieser Abstand ist der Sicherheitsindex. Hierzu werden nicht normalverteilte und ggf. korrelierte Basisvariablen X_i in normalverteilte standardisierte und unkorrelierte Zufallsgrößen Y_i transformiert. Hieraus ergibt sich, dass auch die Grenzzustandsfunktion $g(x)$ in den

standardisierten Raum transformiert wird ($h(y)$). Diese transformierte Grenzzustandsgleichung wird in einem Bemessungspunkt y^* auf $h(y) = 0$ linearisiert. Der Abstand dieses Bemessungspunktes zum Koordinatenursprung ist der Sicherheitsindex β , für den der Zusammenhang zur Versagenswahrscheinlichkeit p_f nach Gleichung (2.1) gilt. Für den Originalversagensbereich (ohne Linearisierung der Grenzzustandsfunktion) gilt dieser Zusammenhang näherungsweise. Für die Bestimmung des Bemessungspunktes und der vorhergehenden Transformation der Basisvariablen kann der „Rackwitz-Fießler-Algorithmus“ eingesetzt werden. In [11] ist dieser Algorithmus für unkorrelierte Basisvariablen zusammengestellt. Voraussetzung für die Anwendung dieses Algorithmus ist die geschlossene Formulierung der Grenzzustandsgleichung sowie deren erste Ableitungen nach den einzelnen Basisvariablen.

3 Vorgehensweise

3.1 Verwendetes Lösungsverfahren

Für die Durchführung der zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchung, also der Ermittlung von Versagenswahrscheinlichkeiten sowie Bemessungswerten und Wichtungsfaktoren für streuende Basisvariablen, wurde der „Rackwitz-Fießler-Algorithmus“ (vgl. Kapitel 2.2) in ein Computerprogramm umgesetzt. Im entwickelten Programmsystem wurde die in Kapitel 3.2 aufgestellte Grenzzustandsgleichung für das Biegeversagen eines Massivbauquerschnittes implementiert. Alle Variablen in dieser Gleichung können als streuend angenommen werden. Zur Abbildung dieser Streuungen, also der stochastischen Modellierung, können verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen (z. B. Normalverteilung, logarithmische Normalverteilung, Extremwertverteilungen Typ 1, Typ 2, Typ 3 und an-

dere) verwendet werden. Berechnungsergebnisse sind der Sicherheitsindex, die daraus abgeleitete Versagenswahrscheinlichkeit, Wichtungsfaktoren für die einzelnen Basisvariablen und die Koordinaten des Punktes mit der höchsten Versagenswahrscheinlichkeit auf der Grenzzustandsfunktion (Bemessungswerte), wobei es sich bei all diesen Ergebnissen um Näherungslösungen handelt.

3.2 Grenzzustandsgleichung

Die zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen werden für den Grenzzustand des Versagens infolge reiner Biegung (ohne Normalkräfte) eines Massivbauquerschnittes durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit wird sich dabei auf die Betrachtung von Stahlbetonquerschnitten beschränkt. Für die Anwendung der im Kapitel 2 beschriebenen Methode ist es erforderlich, eine geschlossene Grenzzustandsgleichung $g(x) = R - E$ (mit R als aufnehmbares Biegemoment und E als einwirkendes Biegemoment) aufzustellen. Für die Formulierung der Grenzzustandsfunktion sind in Bild 1 Geometrie, Dehnungszustand (exemplarisch) und Kräfte an einem Massivbauquerschnitt dargestellt.

Generell ist die Ermittlung der aufnehmbaren Kräfte eines Massivbauquerschnittes ein iterativer Prozess, in dem der Dehnungszustand so lange verändert wird, bis die Summe der inneren Kräfte null ergeben.

Unter folgenden Bedingungen lässt sich dennoch eine geschlossene Formel definierten:

- Die Höhe der Betondruckzone ist kleiner als die Höhe der Platte in einem T-Querschnitt bzw. es handelt sich um einen Rechteckquerschnitt,
- für den Spannungsverlauf in der Betondruckzone wird das Parabel-Rechteck-Diagramm angesetzt,

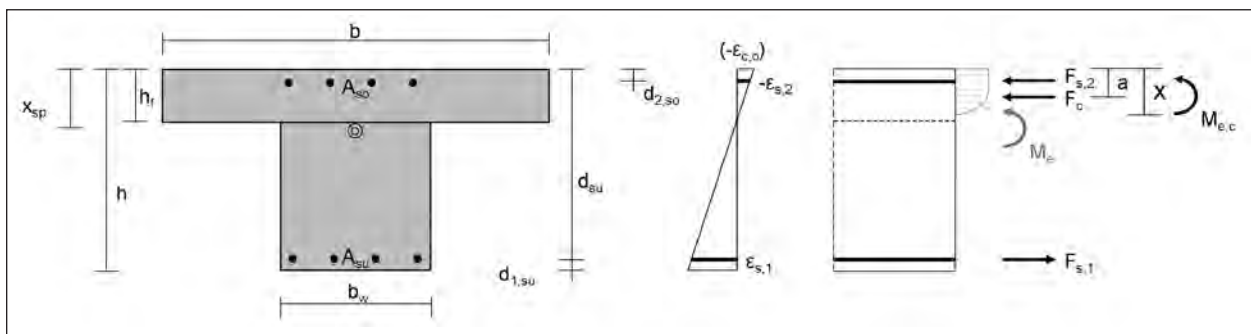


Bild 1: Massivbauquerschnitt – Geometrie, Dehnung, innere Kräfte, Einwirkungen

- die Betondehnung an der Oberkante des Querschnittes nimmt den Grenzwert von -3,5 ‰ ein, die Parabel-Rechteck-Form der Druckzone ist also vollständig ausgebildet,
- als Spannungs-Dehnungs-Verlauf für den Betonstahl wird eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Linie ohne Verfestigung im Fließbereich angesetzt,
- der Betonstahl befindet sich im Fließen.

Unter diesen Voraussetzungen ergibt sich die hergeleitete Grenzzustandsgleichung. In Gleichung (3.1) wird zunächst die Summe der Momente aus den inneren Kräften um den Angriffspunkt der Betondruckkraft gebildet. Die Hebelarme ergeben sich dabei aus der Lage der Bewehrung und dem noch unbekanntem Abstand a der Betondruckkraft zur Oberkante des Querschnittes (Gleichung (3.2) und Gleichung (3.3)). Die Summe der inneren Kräfte (jeweils betragsmäßiger Wert angesetzt) muss gleich 0 sein, da keine von außen einwirkenden Normalkräfte angesetzt werden (Gleichung (3.4)). Aus diesem Grund ist auch das aufnehmbare Moment um den Schwerpunkt des Querschnittes gleich dem aufnehmbaren Moment um den Angriffspunkt der Betondruckkraft (Gleichung (3.5)). Unter der oben

$$M_{R,c} = F_{s,1} \cdot z_{s,1} + F_{s,2} \cdot z_{s,2} \quad (3.1)$$

$$\text{mit: } z_{s,1} = d_{su} - a \quad (3.2)$$

$$\text{mit: } z_{s,2} = a - d_{2,so} \quad (3.3)$$

$$F_{s,1} - F_{s,2} - F_c = 0 \quad (3.4)$$

$$M_R = M_{R,c} \quad (3.5)$$

$$F_{s,1} = A_{su} \cdot f_{y,u} \quad (3.6)$$

$$F_{s,2} = A_{so} \cdot f_{y,o} \quad (3.7)$$

$$F_c = \alpha_r \cdot \alpha \cdot f_c \cdot b \cdot X \quad (3.8)$$

$$X = \frac{A_{su} \cdot f_{y,u} - A_{so} \cdot f_{y,o}}{\alpha_r \cdot \alpha \cdot f_c \cdot b} \quad (3.9)$$

$$a = k_a \cdot X \quad (3.10)$$

$$GZF = U_{R,M} \cdot M_R - U_{E,M} \cdot M_E \quad (3.11)$$

$$GZF = U_{R,M} \cdot \left[A_{su} \cdot f_{y,u} \cdot (h - d_{1,su}) \cdot \left(1 - \frac{k_a \cdot (A_{su} \cdot f_{y,u} - A_{so} \cdot f_{y,o})}{\alpha_r \cdot \alpha \cdot f_c \cdot b \cdot (h - d_{1,su})} \right) + A_{so} \cdot f_{y,o} \cdot \left(\frac{k_a \cdot (A_{su} \cdot f_{y,u} - A_{so} \cdot f_{y,o})}{\alpha_r \cdot \alpha \cdot f_c \cdot b} - d_{2,so} \right) \right] - U_{E,M} \cdot M_E \quad (3.12)$$

aufgeführten Voraussetzung, dass sich der Bewehrungsstahl im Fließen befindet, ergeben sich die Stahlkräfte $F_{s,1}$ und $F_{s,2}$ nach Gleichung (3.6) und Gleichung (3.7). Die Betondruckkraft für eine rechteckige Betondruckzone mit der Breite b ergibt sich zunächst allgemein nach Gleichung (3.8). X ist dabei die Druckzonenhöhe, α_r der Völligkeitsgrad der Betondruckspannungsverteilung und α ein Abminderungsfaktor der Betondruckfestigkeit f_c zur Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen.

Aus der Umstellung von Gleichung (3.4) nach X ergibt sich Gleichung (3.9). Der Abstand a der Betondruckkraft zur Oberkante des Querschnittes ergibt sich aus dem Produkt der Betondruckzonenhöhe X mit dem Wert k_a (Gleichung (3.10)). Mit einer zusätzlichen Berücksichtigung von Faktoren für die Abbildung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite ($U_{R,M}$ und $U_{E,M}$) ergibt sich die Grenzzustandsgleichung nach Gleichung (3.11). In Gleichung (3.12) ist diese weiter ausformuliert. Darin noch unbekannt sind die Variablen α_r und k_a . Für Dehnungszustände, in denen am oberen Querschnittsrand (Oberkante der Betondruckzone) die Dehnung den Grenzwert von -3,5 ‰ annimmt, hat der Völligkeitsgrad der Betondruckspannungsverteilung α_r den konstanten Wert von 0,8095 und die Variable k_a nimmt einen Wert von 0,416 an. Die Grenzzustandsfunktion nach Gleichung (3.12) ist damit geschlossen definiert und es kann die in Kapitel 3.1 beschriebene Methode zur zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchung verwendet werden. Die Einhaltung der oben aufgeführten Randbedingung, die diese geschlossene Formulierung erlaubt, wird innerhalb der durchzuführenden Berechnungen nicht überprüft.

Die Grenzzustandsgleichung nach Gleichung (3.12) wird in den hier aufgeführten Untersuchungen noch weiter differenziert. Das einwirkende Moment kann sich aus den in Gleichung (3.13) aufgeführten Einzelkomponenten zusammensetzen. Das Moment aus Verkehr (M_Q) erhält einen zusätzlichen Vorwert $U_{E,M,Q}$, dessen Anwendung in Kapitel 4.2 erläutert wird. Der Abstand der unteren- und oberen Bewehrung zum jeweiligen Querschnittsrand setzt sich aus der Betondeckung c ,

mit:

$$M_E = M_{G,1} + M_{G,2} + U_{E,M,Q} \cdot M_Q \quad (3.13)$$

$$d_{1,su} = c_u + d_{Bügel,u} + \frac{1}{2} d_{Stab,u} \quad (3.14)$$

$$d_{1,so} = c_o + d_{Bügel,o} + \frac{1}{2} d_{Stab,o} \quad (3.15)$$

dem Durchmesser der Bügelbewehrung $d_{Bügel}$ und dem halben Durchmesser der eigentlichen Bewehrung zusammen (Gleichung (3.14) und Gleichung (3.15)). Alle aufgeführten Variablen können in der zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchung unter Anwendung eines stochastischen Modells als streuend angenommen werden. Eine Annahme als deterministischer Wert ist ebenfalls möglich. In den nachfolgenden Untersuchungen ist der Umfang der untersuchten Basisvariablen, die als streuend angenommen werden, eingeschränkt.

4 Stochastische Beschreibung der Beanspruchungen infolge Verkehrs

4.1 Verwendung der Simulationsergebnisse

Zur stochastischen Beschreibung der Beanspruchungen infolge Verkehrs werden die Ergebnisse aus den in [4, 5] und [6] durchgeführten Simulationsrechnungen verwendet. Die Auswertung der aus simulierten Fahrzeugfolgen berechneten Kennwert-Zeit-Verläufe definierter Beanspruchungen (zum Beispiel das Stützmoment) erfolgte über die Anpassung von Rice-Funktionen an Histogramme von Klassengrenzendurchgangszählungen. Im Zuge dieser Anpassung werden die Parameter m_{opt} , q_{opt} und $v_{0,opt}$ identifiziert, mit denen sich jeweils ein Wert mit einer beliebigen mittleren Wiederkehrperiode m_{Tr} bestimmen lässt.

Für die durchzuführenden zuverlässigkeitstheoretischen Analysen ist es erforderlich, Verteilungs- und Dichtefunktionen des Maximalwertes (betragsmäßig) der Beanspruchungen infolge Verkehrs für einen definierten Referenzzeitraum (z. B. ein Jahr oder 100 Jahre) zu erhalten, um die eigentlich zeitveränderliche Beanspruchung durch eine zeitinvariante Basisvariable abzubilden. Diese Funktionen lassen sich aus den aufgeführten Parametern bestimmen. In [2] wird die Verteilungsfunktion der Maximalwerte der Beanspruchung für einen beliebigen

Referenzzeitraum nach Gleichung (4.1) näherungsweise abgebildet. Hierbei muss der Bezugszeitraum der zugrunde liegenden Simulationsrechnung t_0 nach Gleichung (4.2) berücksichtigt werden. Aus einem gewählten Referenzzeitraum T_{ref} ergibt sich hiernach der Zeitraum $T_{ref,Rt}$, der in Gleichung (4.1) eingesetzt wird. Die Dichtefunktion der Maximalwerte der Beanspruchung für den Referenzzeitraum ergibt sich durch Ableitung von Gleichung (4.1) nach x entsprechend Gleichung (4.3).

$$F_{max}(x) \approx \exp\left(-T_{ref,Rt} \cdot v_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{\sigma^2}\right)\right) \quad (4.1)$$

mit:

$$T_{ref,Rt} = \frac{T_{ref}}{t_0} \quad (4.2)$$

$$f_{max}(x) = \frac{T_{ref,Rt} \cdot v_0 \cdot (x-m)}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{\sigma^2}\right) \cdot \exp\left(-T_{ref,Rt} \cdot v_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x-m)^2}{\sigma^2}\right)\right) \quad (4.3)$$

In Bild 2 ist exemplarisch der Verlauf der Funktionen F_{max} und f_{max} für die Parameter $m_{opt} = 175$, $q_{opt} = 750$, $v_{0,opt} = 16.000$, $t_0 = 1$ d und $T_{ref} = 25.000$ (100 Jahre mit 250 Verkehrstagen pro Jahr) im Intervall -10.000 bis 10.000 dargestellt. Es wird deutlich, dass die Verteilungsfunktion nach Gleichung (4.4) im eigentlichen Sinne für den gesamten Wertebereich von x keine wirkliche Verteilungsfunktion ist. Sie ist nicht monoton steigend und außerdem symmetrisch zur Achse $x = m$. Für die Dichtefunktion, als Ableitung der Verteilungsfunktion, ergibt sich demnach ebenfalls ein Funktionsverlauf, der nicht einer wirklichen Dichtefunktion entspricht.

Für die weitere Verwendung der Funktionen F_{max} und f_{max} wird nur der obere Bereich mit $x > m$ be-

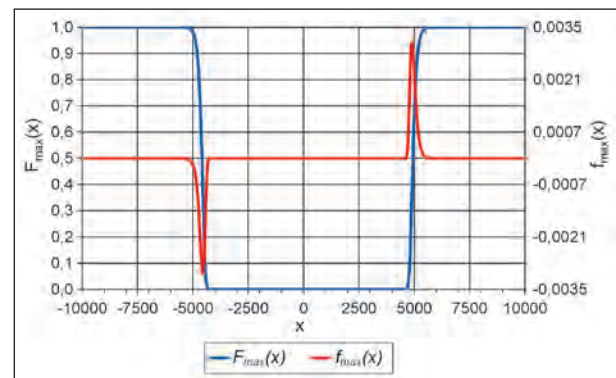


Bild 2: Beispielverlauf der Funktionen $F_{max}(x)$ und $f_{max}(x)$ für gewählte Parameter m_{opt} , q_{opt} , $v_{0,opt}$, t_0 und T_{ref}

trachtet. In diesem Bereich sind die Funktionsverläufe für die Abbildung einer Verteilungsfunktion und einer Dichtefunktion korrekt und bilden das Problem (Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximalwerte innerhalb eines Referenzzeitraumes) richtig ab. Der Erwartungswert m_x der Verteilung der Maximalwerte ergibt sich dann nach Gleichung (4.4) und die Standardabweichung σ_x nach Gleichung (4.5). Des Weiteren ergibt sich die Inverse der Verteilungsfunktion F_{\max} nach Gleichung (4.6).

$$m_x = E[X] = \int_m^\infty x \cdot f_{\max}(x) dx \quad (4.4)$$

$$\sigma_x = \sqrt{Var[X]} = \sqrt{\int_m^\infty (x - m_x)^2 \cdot f_{\max}(x) dx} \quad (4.5)$$

$$F_{\max}^{-1}(q) = m + \sigma \cdot \sqrt{-2 \ln\left(-\frac{\ln(q)}{T_{ref, R_t} v_0}\right)} \quad (4.6)$$

Mit den aufgeführten exemplarischen Parametern ergeben sich im vorliegenden Fall:

$$m_x = 4.961,46,$$

$$\sigma_x = 148,36.$$

Aus diesen Werten lassen sich auch die Parameter einer Extremwertverteilung Typ 1 bestimmen. In Bild 3 sind die Verteilungsfunktionen und die Dichtefunktionen der beiden Verteilungen gegenübergestellt. Optisch zeigt sich nahezu ein identischer Verlauf. Zur genaueren Gegenüberstellung wird in Bild 4 die relative Abweichung der Ausgangsverteilungsfunktion (nach Gleichung (4.1)) zur Verteilungsfunktion der Extremwertverteilung Typ 1 mit identischem Erwartungswert und Standardabweichung dargestellt. Für die zuverlässigkeitstheoretischen Analysen sind für Einwirkungen die oberen Bereiche der Verteilungsfunktion relevant. Hier zeigt sich in Bild 4, dass die relativen Abweichungen sehr gering sind und somit auch ein Ersatz der Funktionen nach Gleichung (4.1) und (4.3) durch eine Extremwertverteilung Typ 1 denkbar ist. Zur Bestimmung der Parameter ist es aber erforderlich, aus den Ausgangsdaten (Parameter m_{opt} , q_{opt} , $v_{0,opt}$ und t_0) zunächst mit Gleichung (4.4) und (4.5) Erwartungswert und Standardabweichung zu bestimmen.

Mit den in [4, 5] und [6] ermittelten Ergebnissen liegen für eine breite Variation von Verkehrscharakteristiken (Modelle des aktuellen und angenommenem zukünftigen Verkehrs) und Kennwerten die Parametersätze m_{opt} , q_{opt} und $v_{0,opt}$ der Rice-Funk-

tion sowie die jeweiligen Bezugszeiträume t_0 vor. Entsprechend den oben dargestellten Formeln können daraus jeweils Dichte- und Verteilungsfunktion des Maximalwertes für einen festzulegenden Referenzzeitraum erstellt und zur stochastischen Beschreibung der Basisvariable Verkehrslast, genauer des Biegemomentes (betrachtete Kennwerte M_B und M_F) infolge Verkehrseinwirkung, herangezogen werden. Als Referenzzeitraum werden nachfolgend zunächst 100 Jahre angesetzt, um die stochastische Beschreibung des Maximalwertes der Verkehrseinwirkung innerhalb der Gesamtnutzungsdauer eines Brückenbauwerkes abzubilden. In einer weiteren Betrachtung wird darüber hinaus ein Referenzzeitraum von 20 Jahren betrachtet.

Für jede dieser einzelnen Simulationsrechnungen würde sich hieraus zusammen mit den im Kapitel 5 dargestellten Beschreibungen weiterer herangezogener Basisvariablen eine zuverlässigkeitstheoretische Berechnung durchführen lassen. Das eingesetzte Programmsystem kann die in Gleichung (4.1) und (4.3) aufgeführte Verteilungs- und Dichtefunktion verarbeiten, ein Ersatz durch eine Extremwertverteilung Typ 1 ist also an dieser Stelle nicht zwingend notwendig. Jede Simulationsrechnung bildet hierbei aber nur eine explizite Verkehrs-

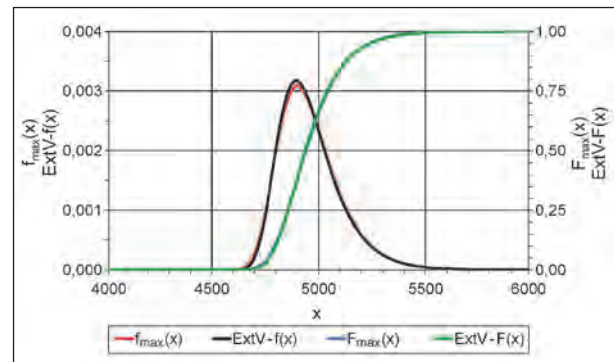


Bild 3: Vergleich der Ausgangsfunktionen (Verteilungs- und Dichtefunktion) mit der Extremwertverteilung Typ 1

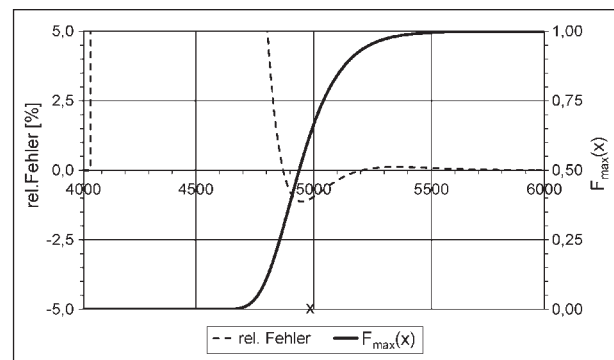


Bild 4: Relativer Fehler der Verteilungsfunktion der Extremwertverteilung Typ 1 zur Ausgangsverteilung

riante ab und die Simulation und deren statistische Auswertung (Ermittlung der Parameter der Rice-Funktion) ist gewissen Streuungen unterlegen. Für die Bestimmung der Zuverlässigkeit müssen aber sowohl die Streuung innerhalb der Simulation und Auswertung als auch Unsicherheiten hinsichtlich der Kenntnis der Verkehrscharakteristik berücksichtigt werden. Hierzu ist eine Kombination mehrerer Ergebnisse von Simulationsrechnungen mit verschiedenen Verkehrscharakteristiken erforderlich. In Kapitel 4.2 wird die hierzu eingesetzte Methode allgemein erläutert. Die weitere Konkretisierung und die Zusammenstellung und Aufbereitung der vorliegenden Daten aus den Simulationsrechnungen sind Inhalt von Kapitel 4.3.

4.2 Kombination von Ergebnissen

Die Darstellung der angewendeten Vorgehensweise zur Kombination mehrerer stochastischer Be-

schreibungen der Verkehrseinwirkung erfolgt anhand von Beispieldaten, die an dieser Stelle lediglich zur Verdeutlichung dienen. Hierauf aufbauend werden im Kapitel 4.3 konkrete Parameter für die stochastische Beschreibung der Verkehrseinwirkung zusammengestellt.

In Tabelle 2 ist ein Auszug aus den in [4, 5] und [6] ermittelten Ergebnissen (statistische Auswertung von Kennwert-Zeit-Verläufen aus den durchgeführten Simulationsrechnungen) für das Stützmoment des betrachteten 2x40-m-Zweifeldträgers zusammengestellt. In Spalte 1 ist hierbei eine fortlaufende Nummerierung angegeben. Die Gesamtzahl der vorliegenden Daten beläuft sich demnach auf 3.101 Datensätze. Insgesamt werden hier 312 verschiedene Verkehrsvarianten (Variation von Schwerverkehrszusammensetzung, Schwerverkehrsaufkommen, Spurbelegung, Stauabstand usw.) mit jeweils 10 Realisationen der in [4, 5] und [6] durchgeführten Simulationsrechnungen betrachtet. Die Ursache für

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------|------------------------|-----------|-----------|--------------------|-------|----------|----------|------------|---------|
| Nr. | Bezeichnung | m_{opt} | q_{opt} | $v_{0,opt}$ | t_0 | CW | m_x | σ_x | VarK |
| 1 | A-A61-VS1-BV-f-R01 | 1.334,24 | 419,56 | 215,28 | 20 | 3.617,29 | 3.477,67 | 102,930 | 2,960 % |
| 2 | A-A61-VS1-BV-f-R02 | 332,30 | 645,09 | 1.502,38 | 20 | 4.065,81 | 3.865,18 | 147,998 | 3,829 % |
| 3 | A-A61-VS1-BV-f-R03 | 1.147,94 | 448,63 | 393,30 | 20 | 3.638,39 | 3.492,34 | 107,692 | 3,084 % |
| 4 | A-A61-VS1-BV-f-R04 | 1.295,61 | 457,71 | 245,24 | 20 | 3.797,23 | 3.645,64 | 111,753 | 3,065 % |
| 5 | A-A61-VS1-BV-f-R05 | 688,95 | 620,32 | 604,44 | 20 | 4.180,19 | 3.981,28 | 146,691 | 3,685 % |
| 6 | A-A61-VS1-BV-f-R06 | 626,24 | 752,29 | 82,02 | 20 | 4.584,21 | 4.324,34 | 191,504 | 4,429 % |
| 7 | A-A61-VS1-BV-f-R07 | 2601,78 | 498,54 | 2,32 | 20 | 4.861,71 | 4.657,78 | 150,117 | 3,223 % |
| 8 | A-A61-VS1-BV-f-R08 | -1.613,24 | 906,29 | 121.996,96 | 20 | 4.280,45 | 4.031,90 | 183,560 | 4,553 % |
| 9 | A-A61-VS1-BV-f-R09 | 313,89 | 647,97 | 1.568,61 | 20 | 4.068,95 | 3.867,70 | 148,454 | 3,838 % |
| 10 | A-A61-VS1-BV-f-R10 | 217,30 | 689,29 | 1.537,93 | 20 | 4.209,46 | 3.995,24 | 158,021 | 3,955 % |
| 11 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R01 | -885,76 | 573,13 | $1,120 \cdot 10^6$ | 20 | 3.031,89 | 2.882,84 | 110,129 | 3,820 % |
| 12 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R02 | -2.086,23 | 630,69 | $2,513 \cdot 10^9$ | 20 | 2.886,11 | 2.744,99 | 104,408 | 3,804 % |
| 13 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R03 | -1.208,44 | 572,11 | $1,326 \cdot 10^7$ | 20 | 2.903,85 | 2.762,79 | 104,282 | 3,775 % |
| 14 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R04 | 720,24 | 337,02 | 2.624,42 | 20 | 2.703,03 | 2.600,06 | 75,972 | 2,922 % |
| 15 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R05 | 482,10 | 369,55 | 8.198,58 | 20 | 2.726,66 | 2.617,59 | 80,501 | 3,075 % |
| 16 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R06 | 1.209,98 | 228,83 | 318,94 | 20 | 2.471,61 | 2.396,55 | 55,346 | 2,309 % |
| 17 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R07 | 483,42 | 375,37 | 7.621,34 | 20 | 2.758,83 | 2.647,80 | 81,943 | 3,095 % |
| 18 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R08 | 999,46 | 255,85 | 1.332,28 | 20 | 2.474,90 | 2.395,01 | 58,932 | 2,461 % |
| 19 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R09 | 1.236,46 | 264,83 | 273,39 | 20 | 2.689,14 | 2.601,78 | 64,408 | 2,476 % |
| 20 | A-A61-VS1-BV-mAB-f-R10 | 728,02 | 319,23 | 3.461,55 | 20 | 2.621,09 | 2.524,40 | 71,350 | 2,826 % |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 3101 | P-TypGL-RV-s-5-5-R10 | 1.691,98 | 1.069,01 | 1.323,56 | 1 | 8.387,97 | 8.082,77 | 225,335 | 2,788 % |

Tab. 2: Beispieldaten aus Simulationsrechnungen

die Differenz zwischen $312 \cdot 10 = 3.120$ und 3.101 liegt in dem Umstand, dass für die Anpassung der Histogramme der Klassengrenzdurchgangszählung durch die Rice-Funktion in 19 Fällen keine Parameter m_{opt} , q_{opt} und $v_{0,\text{opt}}$ identifiziert werden konnten. In Spalte 2 ist eine eindeutige Bezeichnung der jeweiligen Simulationsrechnung angegeben, die aber zur Darstellung des Vorgehens ohne Bedeutung ist. Die Spalten 3 bis 5 enthalten die identifizierten Parameter der Rice-Funktion und in Spalte 6 ist der Bezugszeitraum der Simulationsrechnung in Tagen angegeben. Der charakteristische Wert der Verkehrseinwirkung, definiert als Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren, ist in Spalte 7 aufgeführt. Aus den Parametern der Rice-Funktion wurde die Dichtefunktion der 100-Jahres-Maximalwerte entsprechend Gleichung (4.3) bestimmt und hieraus der in Spalte 8 verzeichnete Erwartungswert nach Gleichung (4.4) und die in Spalte 9 verzeichnete Standardabweichung nach Gleichung (4.5) berechnet. Die Berechnung erfolgt dabei über eine numerische Integration mit der Simpson-Regel im Intervall $1 \cdot 10^{-7}$ bis $1 - 1 \cdot 10^{-7}$. Der Variationskoeffizient ist der Quotient aus Standardabweichung und Erwartungswert und ist in Spalte 10 aufgeführt. Es wird deutlich, dass die Variationskoeffizienten der Verteilungen der 100-Jahres-Maximalwerte sehr klein sind. In den Gesamtdaten, aus denen hier nur ein Auszug dargestellt ist, liegen diese zwischen 0,7 % und 7,9 %. Die deutliche Streuung der charakteristischen Werte zwischen den verschiedenen Realisationen der Simulation einer Verkehrscharakteristik („R01“ bis „R10“) wird ebenso deutlich wie die Unterschiede der Ergebnisse der Simulation verschiedener Verkehrscharakteristiken (in Tabelle 2 ist der Unterschied zwischen der Simulation von fließendem Verkehr mit und ohne Vorgabe eines Mindestabstandes aufgeführt (vgl. Erläuterungen hierzu in Kapitel 4.3.1). Für die zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen müssen diese Streuungen durch Überlagerung der Einzelfunktionen Berücksichtigung finden, um in der ermittelten Zuverlässigkeit Unsicherheiten hinsichtlich der Kenntnis der Verkehrscharakteristik abzubilden.

Nimmt man hierzu zunächst an, dass alle vorhandenen Daten, also alle Funktionen F_{max} und f_{max} (vgl. Gleichung (4.1) und (4.3)), mit einem gleichen Anteil auf das Gesamtproblem wirken, so ergibt sich die Verteilungsfunktion der Überlagerung aller Ausgansdaten zu:

$$F_{\text{max,gesamt}}(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} F_{\text{max},i}(x) \quad (4.7)$$

Die Dichtefunktion der Überlagerung ergibt sich zu:

$$f_{\text{max,gesamt}}(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} f_{\text{max},i}(x) \quad (4.8)$$

Die Verarbeitung dieser Funktionen innerhalb der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnungen gestaltet sich für große n schwierig. Alle Einzelfunktionen F_{max} und f_{max} müssten im Programm definiert werden und eine übersichtliche Darstellung für verschiedene Untermengen der Gesamtdaten ist nicht möglich. Daher wird nachfolgend eine Vorgehensweise dargestellt, in der die erläuterte Überlagerung vereinfacht abgebildet wird.

Zur grafischen Darstellung der Bandbreite der ermittelten Werte der einzelnen Funktionen (charakteristische Werte, Erwartungswerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten) werden diese in einem Diagramm aufgetragen. Hierzu werden diese Werte getrennt voneinander aufsteigend sortiert und jedem Wert i der n Werte in den sortierten Listen eine kumulierte relative Häufigkeit \hat{P}_i nach Gleichung (4.9) zugewiesen (vgl. Tabelle C2/6 in [10], „Mittelposition“ als „Plotting-Position“).

$$\hat{P}_i = \frac{i - 0,5}{n} \quad (4.9)$$

Es ergeben sich hieraus für die charakteristischen Werte, Erwartungswerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten aller berücksichtigten Daten (Ergebnisse von Simulationsrechnungen) entsprechende grafische Verläufe der kumulierten Häufigkeit. In Bild 5 ist hierzu als Beispiel der Verlauf der kumulierten Häufigkeit aller 3.101 ermittelten charakteristischen Werte dargestellt.

In der weiteren Auswertung der ermittelten kumulierten Häufigkeiten wird überprüft, ob der in Bild 5

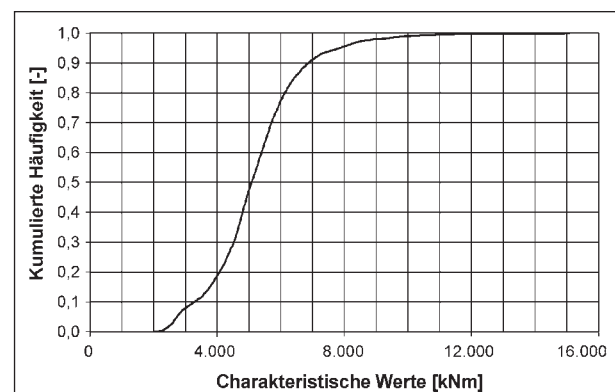


Bild 5: Kumulierte Häufigkeit der charakteristischen Werte (Stützmoment M_B)

exemplarisch dargestellte Verlauf der Häufigkeit durch eine Normalverteilung oder eine Extremwertverteilung Typ 1 dargestellt werden kann.

Hierzu wird die y-Achse des Diagramms in Bild 5 mit folgendem Hintergrund umgerechnet:

Ist eine Verteilungsfunktion $Y(x)$ einer Normalverteilung gegeben, so liegen die nach Gleichung (4.10) berechneten Werte $Y'(x)$ (Φ^{-1} ist hierbei die inverse Verteilungsfunktion der Normalverteilung) auf einer Geraden (vgl. Gleichung (4.11)).

$$Y'(x) = \Phi^{-1}(Y(x)) \quad (4.10)$$

$$Y'_{NV}(x) = \Phi^{-1}(Y_{NV}(x)) = a \cdot x + b \quad (4.11)$$

Aus den Parametern a und b dieser Geraden lassen sich die Parameter der Normalverteilung m und σ nach Gleichung (4.12) bzw. (4.13) berechnen.

$$m_{NV} = -\frac{b}{a} \quad (4.12)$$

$$\sigma_{NV} = \frac{1}{a} \quad (4.13)$$

Ist eine Verteilungsfunktion $Y(x)$ einer Extremwertverteilung Typ 1 der Größtwerte (vgl. [11]) gegeben, so liegen die nach Gleichung (4.14) berechneten Werte $Y'(x)$ auf einer Geraden (vgl. Gleichung (4.15)).

$$Y'(x) = -\ln(-\ln(Y(x))) \quad (4.14)$$

$$Y'_{ExV1}(x) = -\ln(-\ln(Y_{ExV1}(x))) = a \cdot x + b \quad (4.15)$$

Aus den Parametern a und b dieser Geraden lassen sich die Parameter der Extremwertverteilung Typ 1 u und a (vgl. Definition in [11]) nach Gleichung (4.16) bzw. (4.17) berechnen.

$$u_{ExV1} = -\frac{b}{a} \quad (4.16)$$

$$a_{ExV1} = a \quad (4.17)$$

Aufbauend auf diesen Zusammenhängen werden die diskreten kumulierten relativen Häufigkeiten \hat{P}_i unter Anwendung von Gleichung (4.10) (für Normalverteilung) bzw. (4.14) (für Extremwertverteilung Typ 1) umgerechnet und jeweils eine lineare Trendlinie der Form $y = a \cdot x + b$ ermittelt. Aus den Parametern der Trendlinien (a und b) lassen sich nach Gleichung (4.12) und (4.13) bzw. (4.16) und (4.17) die Parameter der Normalverteilung bzw. Extremwertverteilung Typ 1 ermitteln, die dieser Trendlinie entsprechen. In Bild 6 ist das Ergebnis

dieses Vorgehens für die in Bild 5 dargestellte kumulierte Häufigkeit der charakteristischen Werte (Stützmoment M_B) dargestellt. Es wird hier ersichtlich, dass im verwendeten Beispiel die Ausgangsdaten eher einer Extremwertverteilung Typ 1 als einer Normalverteilung folgen. Die zahlenmäßige Hinterlegung dieses zunächst nur optischen Eindruckes ergibt sich aus dem jeweiligen Bestimmtheitsmaß R^2 der beiden Trendlinien, welches für die Extremwertverteilung Typ 1 bei 0,981 und für die Normalverteilung bei 0,948 liegt. Die Parameter der angenäherten Extremwertverteilung Typ 1 und der Normalverteilung ergeben sich wie erläutert aus den Parametern der angenäherten Geraden.

In analoger Weise kann für den Erwartungswert, die Standardabweichung und den Variationskoeffizient die aufgezeigte Analyse durchgeführt werden und daraus Parameter von Extremwertverteilungen Typ 1 und Normalverteilungen bestimmt werden. Die hierbei berechneten Bestimmtheitsmaße R^2 geben einen Ansatz zur Beurteilung der Qualität der Annäherung. In Tabelle 3 sind für das hier verwendete Beispiel die Gesamtergebnisse dargestellt. Für die Anpassung durch eine Extremwertverteilung Typ 1 und eine Normalverteilung sind in der Tabelle die Parameter der Trendlinie sowie das jeweilige Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben. Die hieraus berechneten Parameter u und a der Extremwertverteilung Typ 1 sowie die Parameter $m_{res,NV}$ und $\sigma_{res,NV}$ (Erwartungswert und Standardabweichung der Normalverteilung) sind ebenfalls aufgeführt. Mit Gleichung (4.18) und (4.19) wurden der Erwartungswert und die Standardabweichung der Extremwertverteilung Typ 1 ($m_{res,ExV}$ und $\sigma_{res,ExV}$) bestimmt. Zusätzlich sind die Variationskoeffizienten $VarK_{res,ExV}$ und $VarK_{res,NV}$ als Quotient von Standardabweichung und Erwartungswert verzeichnet.

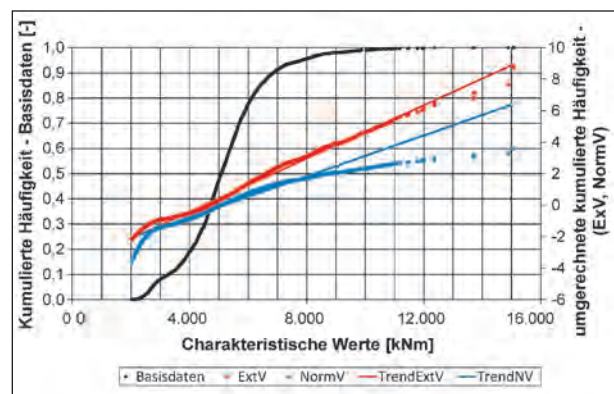


Bild 6: Kumulierte Häufigkeit der charakteristischen Werte mit umgerechneten kumulierten Häufigkeiten einschließlich Trendlinien (Stützmoment M_B)

$$m_{x,ExV-Typ1} = u + \frac{\gamma}{a} = m_{res,ExV} \quad (4.18)$$

mit: $\gamma \approx 0,577216$ (Euler-Mascheroni-Konstante)

$$\sigma_{x,ExV-Typ1} = \frac{\pi}{a \cdot \sqrt{6}} = \sigma_{res,ExV} \quad (4.19)$$

Die Streuungen, die in Tabelle 3 durch $\sigma_{res,ExV}$ bzw. $\sigma_{res,NV}$ ausgedrückt sind, ergeben sich vordergründig aus den unterschiedlichen Verkehrscharakteristiken, die in den Simulationsrechnungen verarbeitet wurden. Ist die Verkehrscharakteristik nicht oder nur unzureichend bekannt, muss dies in der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung Berücksichtigung finden. Die vorliegenden Ergebnisse für die Beispieldaten zeigen, dass hier der wesentliche Punkt der Unsicherheit zur Festlegung der Verkehrseinwirkung liegt. Liegen zumindest teilweise Kenntnisse über eine objektbezogene Verkehrscharakteristik vor, so kann man aus den vorhandenen Daten eine Untermenge bilden und analog zum oben erläuterten Vorgehen auswerten. Als Ergebnis erhält man dann eine Tabelle analog zu Tabelle 3 mit entsprechend anderen Ergebnissen und gegebenenfalls geringeren Streuungen. In Kapitel 4.3 wird hierauf genauer eingegangen.

Um die dargestellte Problematik der Überlagerung mehrerer Funktionen in der zuverlässigkeitstheoretischen Berechnung verarbeiten zu können, ohne Gleichung (4.7) und (4.8) anzuwenden, wird die Basisvariable der Verkehrseinwirkung (die in Kapitel

3.2 hergeleiteten Grenzzustandsgleichung das Biegemoment M_Q) durch das Produkt aus zwei Zufallsvariablen U_1 und U_2 abgebildet:

$$M_Q = U_1 \cdot U_2 \quad (4.20)$$

Durch die Zufallsvariable U_1 wird die Streuung der Maximalwerte der Verkehrseinwirkung (Biegemoment infolge Verkehrs) innerhalb eines festgelegten Referenzzeitraumes abgebildet. Die Variable U_2 bildet als ein Vorfaktor für U_1 die Unsicherheit hinsichtlich der objektbezogenen Verkehrscharakteristik ab. In der verwendeten Grenzzustandsfunktion (vgl. Gleichung (3.13)) ist dieser Faktor als $U_{E,M,Q}$ eingeführt.

Die Variable U_1 wird mit einer Extremwertverteilung Typ 1 abgebildet. Als Erwartungswert dieser Verteilung wird entweder der Wert $m_{res,ExV}$ von m_x oder der Wert $m_{res,NV}$ von m_x verwendet (vgl. Tabelle 3, beide Fälle werden zunächst untersucht und die Ergebnisse verglichen). Als Standardabweichung wird entweder der Wert $m_{res,ExV}$ von σ_x oder der Wert $m_{res,NV}$ von σ_x verwendet (vgl. auch hier Tabelle 3). Die Variable U_1 wird also durch einen Erwartungswert der Erwartungswerte und einen Erwartungswert der Standardabweichung aller betrachteten Daten, genauer derer über die Rice-Funktion bestimmten Verteilungsfunktionen der Maximalwerte im Bezugszeitraum (vgl. F_{max} aus Gleichung (4.1)), abgebildet.

Die Variable U_2 wird vergleichend zueinander als Extremwertverteilung Typ 1 und als Normalverteilung

| | | | CW | m_x | σ_x | VarK | | |
|----------------------------|-------------------|--------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|-------------|--------------|
| Extremwertverteilung Typ 1 | Lin. Reg. | A | 0,000845409 | 0,000885245 | 0,018709746 | 173,2579612 | | |
| | | B | -3,7966604 | -3,830158905 | -2,115353816 | -4,398764393 | | |
| | | R ² | 0,981113042 | 0,981146609 | 0,893602973 | 0,970888933 | | |
| | | u | 4490,914184 | 4326,666906 | 113,0616022 | 0,025388527 | | |
| | | a | 0,000845409 | 0,000885245 | 0,018709746 | 173,2579612 | | |
| | | $m_{res,ExV}$ | 5.173,68 | 4.978,71 | 143,91 | 2,87 % | | |
| | | $\sigma_{res,ExV}$ | 1.517,08 | 1.448,81 | 68,55 | 0,74 % | | |
| | | $VarK_{res,ExV}$ | 29,3 % | 29,1 % | 47,6 % | 25,8 % | | |
| | | Normalverteilung | Lin. Reg. | A | 0,000648298 | 0,000680778 | 0,013415391 | 128,1116999 |
| | | | | B | -3,354005991 | -3,389317547 | -1,9305725 | -3,679301939 |
| R ² | 0,948155144 | | | 0,953595047 | 0,755024649 | 0,872381325 | | |
| | $m_{res,NV}$ | 5.173,56 | 4.978,59 | 143,91 | 2,87 % | | | |
| | $\sigma_{res,NV}$ | 1.542,50 | 1.468,91 | 74,54 | 0,78 % | | | |
| | $VarK_{res,NV}$ | 29,8 % | 29,5 % | 51,8 % | 27,2 % | | | |

Tab. 3: Ergebnisse der Anpassung mit einer Trendlinie für die verschiedenen Kennwerte

lung abgebildet. In beiden Fällen wird der Erwartungswert zu 1 gesetzt. Die Standardabweichung ergibt sich aus dem Variationskoeffizienten $\text{Var}K_{\text{res,ExV}}$ von m_x für den ersten Fall bzw. $\text{Var}K_{\text{res,NV}}$ von m_x für den zweiten Fall (vgl. Tabelle 3). In Bild 7 sind für diese Varianten die Dichtefunktionen der Variablen U1 und U2 unter Verwendung der in Tabelle 3 aufgeführten Zahlenwerte dargestellt. Bereits in dieser Tabelle wird deutlich, dass die Abbildung der Variable U1 durch $m_{\text{res,ExV}}$ bzw. $m_{\text{res,NV}}$ von m_x und σ_x keinen wesentlichen Unterschied liefert. Auch die für die Abbildung der zweiten Variablen U2 verwendeten Werte $\text{Var}K_{\text{res,ExV}}$ bzw. $\text{Var}K_{\text{res,NV}}$ sind nahezu identisch. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass im ersten Fall (Bild 7a) U2 durch eine Extremwertverteilung Typ 1 und im zweiten Fall (Bild 7b) durch eine Normalverteilung dargestellt wird. Durch die Rechtschiefe der Extremwertverteilung Typ 1, die in Bild 7a ersichtlich wird, werden aber höhere Werte für das Produkt aus U1 und U2 wahrscheinlicher.

Für die Gegenüberstellung der Ergebnisse einer direkten Verwendung der Ausgangsfunktionen $F_{\text{max},i}$ und $f_{\text{max},i}$ (vgl. Gleichung (4.7) und (4.8)) zum dargestellten vereinfachten Verfahren unter Anwendung eines Produktes aus zwei Zufallszahlen U1 und U2 wurden 100.000 Zufallszahlen generiert. Für die direkte Verwendung der Ausgangsfunktionen wurde hierbei bei jeder Generierung zunächst zufällig einer der oben erläuterten 3.101 Datensätze ausgewählt. Anschließend werden mit den dadurch festgelegten Parametern m_{opt} , q_{opt} , $v_{0,\text{opt}}$ und t_0 für einen Referenzzeitraum von 100 Jahren (100-Jahres-Extremwerte) zufällige Werte erzeugt. Diese Werte wurden klassiert (Klassenbreite 200) und die absoluten Häufigkeiten der Werte in Bild 8 in einem Diagramm aufgetragen (Bezeichnung „direkte Überlagerung“). Als Vergleich dazu wurden 100.000 Realisationen der Zufallszahlen U1 und U2

generiert, in denen im ersten Fall U1 und U2 jeweils als Extremwertverteilung Typ 1 und im zweiten Fall U2 als Normalverteilung abgebildet wurden (vgl. Erläuterungen oben). Die Ergebnisse wurden ebenfalls klassiert und im Diagramm in Bild 8 aufgetragen (Bezeichnung für den ersten Fall „U1-ExV + U2-ExV“ und für den zweiten Fall „U1-ExV + U2-NV“). Im Diagramm wird ersichtlich, dass die Ausgangsfunktion („direkte Überlagerung“) mehrere lokale Maximalwerte aufweist. Im verwendeten Ersatzverfahren tritt dies natürlich nicht auf, da das Produkt aus zwei Zufallszahlen, die jeweils einer einmodalen Dichtefunktion folgen, keine mehrmodale Dichtefunktion (auch wenn hier der Verlauf der absoluten Häufigkeiten dargestellt ist) als Ergebnis aufweisen kann. Die Unterschiede zwischen den drei verschiedenen Verläufen sind insbesondere im unteren und mittleren Bereich deutlich.

Für die zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen ist aber der obere Bereich der Funktionen von Bedeutung. Um hier zu einer Einschätzung der Abweichungen zu gelangen, werden in Bild 9 die Verläufe der kumulierten relativen Häufigkeiten im Bereich zwischen $y = 0,9$ und $y = 1$ dargestellt. Hier zeigt sich bei den verwendeten Beispieldaten, dass

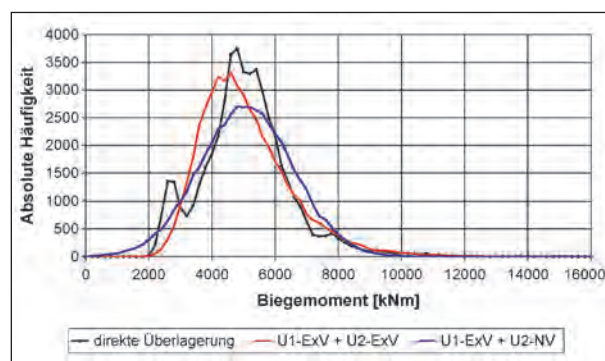


Bild 8: Vergleich zwischen Zufallszahlen aus direkter Überlagerung und Ersatzverfahren – absolute Häufigkeiten

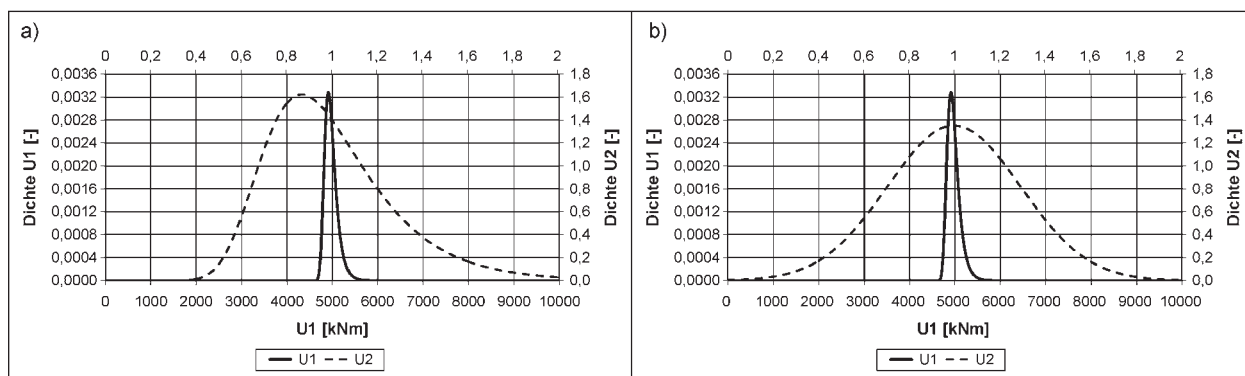


Bild 7: Darstellung der Dichtefunktionen von U1 und U2 (nach Tabelle 3) mit U2 als Extremwertverteilung Typ 1 (a) bzw. als Normalverteilung (b)

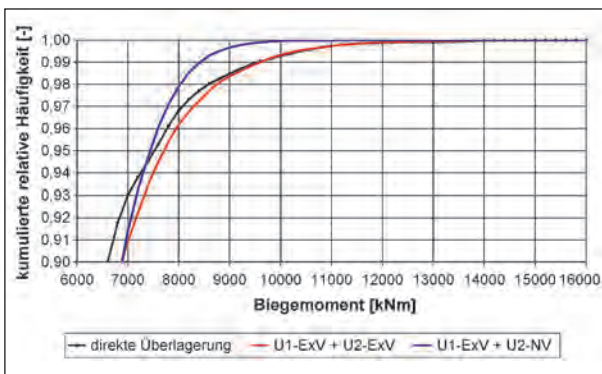


Bild 9: Vergleich zwischen Zufallszahlen aus direkter Überlagerung und Ersatzverfahren – kumulierte relative Häufigkeiten

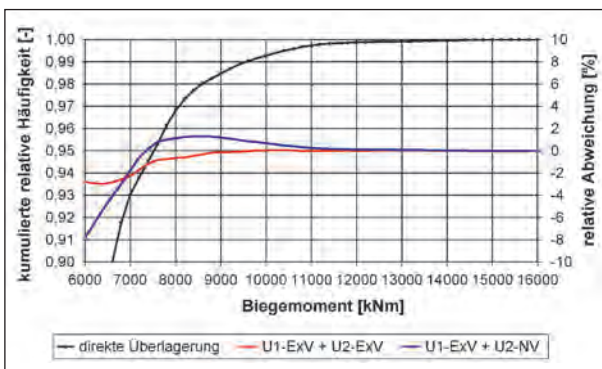


Bild 10: Vergleich zwischen Zufallszahlen aus direkter Überlagerung und Ersatzverfahren – relative Abweichungen

das Produkt aus zwei extremwertverteilten Zufallszahlen (U1 und U2) in diesem Bereich eine größere Annäherung zeigt als das Produkt aus einer extremwertverteilten und einer normalverteilten Zufallszahl. In Bild 10 ist hierzu zusätzlich der Verlauf der relativen Abweichungen zur Ausgangskurve („direkte Überlagerung“) dargestellt, in der dies nochmals zahlenmäßig hinterlegt ist.

Aus dieser Betrachtung heraus ergibt sich somit, dass die ersatzweise Abbildung der dargestellten Problematik durch ein Produkt aus zwei Zufallszahlen zwar von vornherein nicht den Ausgangsverlauf einer Überlagerung mehrerer Verteilungs- bzw. Dichtefunktionen abbilden kann, sich hier aber innerhalb des für eine zuverlässigkeitstheoretische Untersuchung relevanten oberen Bereiches der Funktionen recht gute Annäherungen ergeben. Durch die Beschränkung auf zwei Zufallsvariablen erleichtert sich auch der Vergleich zwischen verschiedenen Untermengen der Ausgangsdaten, auf die im Kapitel 4.3 genauer eingegangen wird.

4.3 Definition verschiedener Kombinationen

In Kapitel 4.2 wurde dargestellt, wie aus einer Kombination von vorliegenden Ergebnissen von statistischen Auswertungen von Verkehrssimulationsrechnungen die stochastische Beschreibung der Basisvariable Verkehrseinwirkungen in Form eines Produktes aus zwei Variablen U1 und U2 erfolgen kann. Zunächst wurden hier zur Darstellung alle vorliegenden Auswertungsdaten kombiniert. Nachfolgend werden definierte Kombinationen dieser Daten zusammengestellt, um für den Neubau eines Brückenbauwerkes und bestehende Brückenbauwerke, für die die objektbezogene Verkehrscharakteristik in gewissem Umfang bekannt ist, zu einer stochastischen Beschreibung der Verkehrseinwirkung für die nachfolgenden zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen zu gelangen.

4.3.1 Verwendete Datenbestände und Bezeichnungen

In den vom Forschungsnehmer bisher durchgeführten Forschungsprojekten (vgl. [4, 5, 6]) wurde eine Vielzahl von Simulationsrechnungen mit einer breiten Variation von Verkehrscharakteristiken (Verkehrszusammensetzung, Verkehrsstärke) durchgeführt. In Tabelle 4 sind die vorhandenen Datenbestände dargestellt. Hierin werden Kurzbezeichnungen verwendet, die nachfolgend erläutert werden. Im Vergleich zu [4, 5, 6] werden hier andere Bezeichnungen verwendet, die die konkreten Varianten klarer beschreiben (anstatt „Varianten A, B, ...“).

In den folgenden Erläuterungen werden Kurzbezeichnungen für die verschiedenen betrachteten Varianten des Verkehrs verwendet, die hinsichtlich der Verkehrszusammensetzung und der berücksichtigten Fahrzeugtypen mit zugehörigen Gesamtgewichtsverteilungen als „Modelle“ bezeichnet werden. Ausgangspunkt der vorgenommenen Variationen von Verkehrszusammensetzung, Verkehrsstärke usw. sind die an der A 61/A 1 erhobenen Daten der Verkehrszusammensetzung und der Gesamtgewichtsverteilung der einzelnen Fahrzeugtypen. Dieses Modell wird nachfolgend mit „A-A61“ bezeichnet. „A-“ bezeichnet darin den „aktuellen Verkehr“. Alle verwendeten Bezeichnungen der Modelle sind nachfolgend mit kurzen Erläuterungen und einem Verweis auf die Verwendung in den bisherigen Forschungsprojekten aufgelistet:

- A-A61:
Aktueller Verkehr aus Datenerhebungen an der A 61/A 1 – vgl. [4].
 - A-A61-SVg1:
Aktueller Verkehr aus Datenerhebungen an der A 61/A 1 mit zusätzlicher Berücksichtigung eines 48t-Mobilkranes (Darstellung von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr ohne Routenbeschränkung/mit Dauergenehmigung – Variante 1) – vgl. [5].
 - A-A61-SVg2:
Aktueller Verkehr aus Datenerhebungen an der A 61 mit zusätzlicher Berücksichtigung eines 72t-Mobilkranes (Darstellung von genehmigungspflichtigem Schwerverkehr ohne Routenbeschränkung/mit Dauergenehmigung – Variante 2) – vgl. [4],
 - A-GE:
Angenommener aktueller Verkehr mit Verkehrszusammensetzung entsprechend Lastmodell 4 für Ermüdungsberechnungen nach DIN EN 1991-2 ([18]), Spalte „Große Entfernung“ und Gesamtgewichtverteilungen entsprechend Datenerhebungen an der A 61/A 1 – vgl. [6].
 - A-ME:
Angenommener aktueller Verkehr mit Verkehrszusammensetzung entsprechend Lastmodell 4 für Ermüdungsberechnungen nach DIN EN 1991-2 ([18]), Spalte „Mittlere Entfernung“ und Gesamtgewichtverteilungen entsprechend Datenerhebungen an der A 8 (Talbrücke Denkendorf) – vgl. [6].
 - A-OV:
Angenommener aktueller Verkehr mit Verkehrszusammensetzung entsprechend Lastmodell 4 für Ermüdungsberechnungen nach DIN EN 1991-2 ([18]), Spalte „Orts-Verkehr“ und Gesamtgewichtverteilungen entsprechend Datenerhebungen an der A 66 (Miquelallee) – vgl. [6].
 - P-DTV-SV:
Angenommener zukünftiger (prognostizierter) Verkehr ausgehend von Modell A-A61-SVg2 mit stark erhöhtem DTV-SV-Wert – vgl. [4].
 - P-Typ98m:
Angenommener zukünftiger (prognostizierter) Verkehr ausgehend von Modell P-DTV-SV mit Austausch aller Fahrzeuge des Typs 98 (Sattelzugfahrzeuge) durch Fahrzeuge des Typ „98m“ mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 52 t – vgl. [4].
 - P-Typ106:
Angenommener zukünftiger (prognostizierter) Verkehr ausgehend von Modell P-DTV-SV mit Austausch aller Fahrzeuge des Typs 98 (Sattelzugfahrzeuge) durch Fahrzeuge des Typ „106“ mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 65 t – vgl. [4].
 - P-TypGL:
Angenommener zukünftiger (prognostizierter) Verkehr ausgehend von Modell P-DTV-SV mit Austausch aller Fahrzeuge des Typs 98 (Sattelzugfahrzeuge) durch kombinierte Nutzfahrzeuge (Bezeichnung GL für Gigaliner) mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 60 t.
- Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen wurden für den aktuellen Verkehr in den Modellen A-A61, A-A61-SVg1, A-GE, A-ME und A-OV die Verkehrsstärken 500, 1.000, 5.000 und 10.000 betrachtet. Diese Zahlenwerte spiegeln den angenommenen durchschnittlichen täglichen Schwerverkehr (DTV-SV) pro Fahrrichtung wider. In den folgenden Ausführungen werden zur Abgrenzung zwischen den verschiedenen Varianten der Verkehrsstärke die Kurzbezeichnungen „VS1“ (für DTV-SV 500) bis „VS4“ (für DTV-SV 10.000) verwendet.
- Der höchste betrachtete Wert von 10.000 entspricht näherungsweise der aus den Erfassungen an der A 61/A 1 ermittelten Verkehrsstärke für Montag bis Freitag. Bezogen auf diese Verkehrsstärke des aktuellen („extremen“) Schwerverkehrs wurde in [4] die Verkehrsstärke für das Prognosemodell P-DTV-SV ermittelt. Hierin wird der DTV-SV Wert um den Faktor 2,5 auf 25.000 vergrößert, um einen zukünftigen Anstieg des Verkehrsaufkommens darzustellen. Die Ermittlung der Verkehrsstärken für die Modelle P-Typ98m, P-Typ106 und P-TypGL beruhte auf der Verkehrsstärke für das Modell P-DTV-SV.
- In den bisherigen Untersuchungen wurden stets fließender Verkehr und Verkehr mit Stauabschnitten betrachtet. Die Abstände zwischen den Fahrzeugen ergeben sich für den fließenden Verkehr über eine logarithmische Normalverteilung mit Parametern in Abhängigkeit der Verkehrsstärke. Hinsichtlich des Stauabstandes wurden prinzipiell drei Varianten betrachtet. Diese wurden aber nicht für alle Modelle verwendet. In der ersten Variante wird

von einem konstanten Stauabstand von 5 m ausgegangen (zwischen letzter und erster Achse aufeinander folgender Fahrzeuge). In der zweiten und dritten Variante wird ein zwischen 5 m und 15 m bzw. zwischen 5 m und 25 m gleichverteilter Stauabstand angenommen. Zusammen mit dem fließenden Verkehr werden in den nachfolgenden Erläuterungen folgende Kurzbezeichnungen verwendet:

| | |
|--------|--|
| f | fließender Verkehr, |
| s-5-5 | Verkehr mit eingemischten Stauabschnitten, Stauabstand 5 m, |
| s-5-15 | Verkehr mit eingemischten Stauabschnitten, Stauabstand zufällig generiert, gleichverteilt zwischen 5 m und 15 m, |
| s-5-25 | Verkehr mit eingemischten Stauabschnitten, Stauabstand zufällig generiert, gleichverteilt zwischen 5 m und 25 m. |

Neben den verschiedenen Modellen des Verkehrs und der Varianten der Fahrzeugabstände im Stauverkehr wurden bisher verschiedene Spurbelegungen betrachtet. Für das hier untersuchte Tragsystem mit einem Querschnitt, auf dem eine Fahrbahn mit einer Gesamtbreite von 8,00 m angesetzt ist, ergeben sich zwei Fahrstreifen. Prinzipiell werden Begegnungsverkehr (Verkehr auf zwei Fahrstreifen in entgegengesetzter Fahrtrichtung) und Richtungsverkehr (Verkehr auf zwei Fahrstreifen in identischer Fahrtrichtung) betrachtet. Für den Begegnungsverkehr wird die Bezeichnung „BV“ eingesetzt. Der Richtungsverkehr „RV“ ist in 3 Untervarianten aufgeteilt. In der ersten Untervariante wird davon ausgegangen, dass ohne bestehende Überholverbote („oÜV“) die Schwerverkehrsaufteilung 80 zu 20 beträgt. Diese Untervariante wird mit „RV-oÜV“ bezeichnet. In der zweiten und dritten Untervariante wird eine Nutzungseinschränkung in Form eines Überholverbotes für Schwerverkehrsfahrzeuge in den Simulationsrechnungen umgesetzt. Mit der verwendeten Bezeichnung „RV-mÜV5“ wird hierbei angegeben, dass es sich um Schwerverkehr mit Überholverbot handelt, 5 % der Schwerverkehrsfahrzeuge aber dennoch die zweite Spur nutzen. In der dritten Untervariante handelt es sich ebenfalls um Schwerverkehr mit Überholverbot, es nutzen aber 0 % der Schwerverkehrsfahrzeuge die zweite Spur. Die Bezeichnung hierfür ist demnach „RV-mÜV0“.

Neben dieser Nutzungseinschränkung wurde auch eine Vorgabe eines Mindestabstandes im fließenden Verkehr betrachtet. Hierfür wird die Kurzbezeichnung „mAB“ für „mit Abstandsbeschränkung“ verwendet. Entsprechend wird für Simulationsrechnungen ohne diese Maßnahme zur Abgrenzung die Bezeichnung „oAB“ eingesetzt.

4.3.2 Aktueller und zukünftiger Verkehr für den Neubau

Für den Neubau wird angenommen, dass die zukünftige Entwicklung des Verkehrsaufkommens im Detail zwar unbekannt ist, jedoch im Rahmen der verschiedenen betrachteten Varianten des prognostizierten Verkehrs sowie eines aktuellen „extremen“ Verkehrs liegt.

Hierzu werden in der – in Kapitel 4.2 – vorgestellten Vorgehensweise folgende Modelle zu gleichen Anteilen überlagert:

- A-A61 (mit VS4 (DTV-SV 10.000)),
- A-A61-SVg2,
- P-DTV-SV,
- P-Typ98m,
- P-Typ106,
- P-TypGL.

Innerhalb der verschiedenen Modelle werden in der Überlagerung sowohl fließender Verkehr (f) als auch Verkehr mit Stauabschnitten (Stauabstand 5 m, s-5-5) zu gleichen Anteilen berücksichtigt. Richtungsverkehr (RV, oÜV) und Begegnungsverkehr (BV) werden getrennt voneinander betrachtet. Die resultierenden Parameter für U_1 und U_2 sind im Kapitel 4.4 in Tabelle 6 für das Stützmoment M_B und in Tabelle 7 für das Feldmoment M_F unter der Spaltenüberschrift „Aktuell + Prognose“ für einen Referenzzeitraum von 100 Jahren zusammengestellt. Des Weiteren enthält Tabelle 8 unter gleicher Spaltenüberschrift die Parameter für das Stützmoment M_B für einen Referenzzeitraum von 20 Jahren.

4.3.3 Kombinationen für den Brückenbestand in Abhängigkeit der Verkehrscharakteristik

In [6] wurde ermittelt, dass in Abhängigkeit einer objektbezogenen Verkehrscharakteristik in Form von Verkehrszusammensetzung (Häufigkeit einzelner Fahrzeugtypen am Gesamtverkehr) und Verkehrsstärke (DTV-SV) die ermittelten charakteristischen Werte deutlich unterschiedlich sind und verschiedene historische Lastmodelle zum Teil ausreichen, um diese Werte abzudecken. Für das hier betrachtete Tragsystem (2x40-m-Zweifeldsystem mit Plattenbalkenquerschnitt in Massivbauweise – 8 m Fahrbahnbreite) ist in Tabelle 5 eine Zusammenstellung gegeben, die diese Möglichkeit der Zuordnung von Lastmodellen zu Verkehrscharakteristiken aufzeigt.

Für die nachfolgenden zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen wird angenommen, dass die objektbezogene Verkehrscharakteristik im Wesentlichen bekannt ist. Hierzu wird, zwischen den durch die Verkehrszusammensetzung beschriebenen Modellen GE, ME und OV unterschieden, die Verkehrszusammensetzung also als bekannt angenommen. Des Weiteren werden die betrachteten Schwerverkehrsstärken VS1 und VS2 (DTV-SV 500 und 1.000) sowie VS3 und VS4 (DTV-SV 5.000 und 10.000) jeweils zusammengefasst (zu gleichen Anteilen) und somit die Schwerverkehrsstärke als teilweise bekannt angenommen. Richtungsverkehr und Begegnungsverkehr werden getrennt voneinander betrachtet. Die Ergebnisse für fließenden Verkehr (f) und Verkehr mit Stauabschnitten (s-5-25 für BV, s-5-5 für RV) werden zu gleichen Anteilen überlagert. Die resultierenden Parameter für U1 und U2 sind im Kapitel 4.4, Tabelle 6 für das Stütz-

| DTV-SV | Verkehrscharakteristik | | | | | |
|-----------------|------------------------|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | A-GE | | A-ME | | A-OV | |
| | BV | RV | BV | RV | BV | RV |
| 500 (VS1) | BK 60 | / | BK 30/30 | / | BK 30/30 | / |
| 1.000 (VS2) | BK 60 | LM1 | BK 30/30 | BK 60 | BK 30/30 | BK 30/30 |
| 5.000 (VS3) | LM1 | / | BK 60 | / | BK 30/30 | / |
| 10.000 (VS4) | LM1 | LM1 | BK 60 | BK 60/30 | BK 30/30 | BK 60 |

Tab. 5: Identifizierte Lastmodelle für verschiedene Verkehrscharakteristiken und Verkehrsstärken (Zusammenfassung für das betrachtete Tragsystem)

moment M_B und in Tabelle 7 für das Feldmoment M_F unter der Spaltenüberschrift „Aktuell“ zusammengestellt. Des Weiteren enthält Tabelle 8 unter gleicher Spaltenüberschrift die Parameter für das Stützmoment M_B für einen Referenzzeitraum von 20 Jahren.

4.4 Zusammenstellung der verwendeten stochastischen Beschreibungen der Verkehrseinwirkung

Die Zusammenstellung der verwendeten stochastischen Beschreibung der Beanspruchungen aus Verkehr in Tabelle 6 bis Tabelle 8 enthält für die Variable U1 den Erwartungswert („U1-m“) und die Standardabweichung („U1-s“) der für diese Variable angenommenen Extremwertverteilung Typ 1. Die Variable U2 wird zu Vergleichszwecken als Extremwertverteilung Typ 1 (Spaltenüberschriften „U2ExV“) bzw. als Normalverteilung (Spaltenüberschriften „U2NV“) angenommen. Hierfür sind in den Tabellen Prozentwerte angegeben, die den Variationskoeffizienten darstellen. Da der Erwartungswert der Variable U2 mit 1 angenommen wird, entspricht dieser Wert der Standardabweichung und ist mit „U2-s“ bezeichnet.

Zusätzlich sind in den Tabellen Werte für R^2 aufgeführt. Hierbei handelt es sich um das jeweilige Bestimmtheitsmaß für die lineare Annäherung an das umgerechnete Histogramm der Erwartungswerte der berücksichtigten Funktionen $F_{\max,i}$ (vgl. Kapitel 4.2 und Bild 5). Das Produkt aus U1 und U2 bildet die stochastische Beschreibung des Maximalwertes der Beanspruchung infolge Verkehrs (Feldmoment, Stützmoment) innerhalb einer angenommenen Gesamtnutzungsdauer von 100 Jahren bzw. als weitere Betrachtung innerhalb eines niedrigeren Referenzzeitraumes von 20 Jahren. Ergänzend sind in Tabelle 6 und Tabelle 7 jeweils die charakteristischen Werte (1.000 Jahre mittlere Wiederkehrperiode, abgekürzt mit „CW“) angegeben, die sich für das Produkt aus U1 und U2 ergeben. Dieser Wert entspricht dem 90,478%-Fraktilwert der 100-Jahres-Maximalwertverteilung.

Die Angaben in Tabelle 8 beziehen sich auf einen Referenzzeitraum von 20 Jahren. Analog zu den Betrachtungen der angenommenen Gesamtnutzungsdauer wurde hier ebenfalls ein „charakteristischer Wert“ bestimmt. Hierfür wurde aber zur Definition nicht die mittlere Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren verwendet, sondern stattdessen 200

| Aktuell + Prognose | | | | Aktuell | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------|-----------|-----------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | U2ExV | U2NV | | | A-GE | | A-ME | | A-OV | | | |
| | | U2ExV | U2NV | | | U2ExV | U2NV | U2ExV | U2NV | U2ExV | U2NV | | |
| RV | U1-m | 6.939,685 | 6.936,596 | DTV-SV 500/1.000 | RV | U1-m | 4.463,845 | 4.451,482 | 4.002,516 | 3.992,375 | 3.578,594 | 3.570,456 | |
| | U1-s | 194,448 | 194,296 | | | U1-s | 122,671 | 122,315 | 125,788 | 125,474 | 140,738 | 140,081 | |
| | U2-s | 22,904 % | 23,300 % | | | U2-s | 25,386 % | 24,237 % | 23,221 % | 22,479 % | 20,846 % | 19,390 % | |
| | R ² | 0,986 | 0,941 | | | R ² | 0,793 | 0,833 | 0,857 | 0,875 | 0,859 | 0,949 | |
| | CW | 9.121,1 9 | .065,3 | | | CW | 6.000,3 | 5.875,8 | 5.264,6 | 5.178,9 | 4.596,7 | 4.488,3 | |
| BV | U1-m | 7.454,216 | 7.451,285 | | DTV-SV 5.000/10.000 | BV | U1-m | 4.078,982 | 4.075,093 | 3.676,837 | 3.673,720 | 3.333,219 | 3.329,588 |
| | U1-s | 206,815 | 206,696 | | | | U1-s | 120,523 | 120,308 | 136,833 | 136,562 | 158,542 | 158,188 |
| | U2-s | 20,399 % | 20,352 % | | | | U2-s | 17,018 % | 16,884 % | 15,131 % | 15,295 % | 18,977 % | 18,503 % |
| | R ² | 0,973 | 0,965 | | | | R ² | 0,948 | 0,936 | 0,953 | 0,907 | 0,929 | 0,949 |
| | CW | 9.530, | 5 9.450,7 | | | | CW | 5.027,3 | 5.000,4 | 4.448,5 | 4.434,0 | 4.217,5 | 4.168,6 |
| | | | | DTV-SV 5.000/10.000 | | RV | U1-m | 5.263,793 | 5.252,717 | 4.507,821 | 4.498,103 | 4.047,510 | 4.039,373 |
| | | | | | | | U1-s | 136,323 | 135,783 | 115,566 | 115,401 | 130,006 | 129,570 |
| | | | | | | | U2-s | 19,286 % | 18,759 % | 19,761 % | 19,167 % | 18,427 % | 17,558 % |
| | | | | | | | R ² | 0,858 | 0,867 | 0,820 | 0,833 | 0,825 | 0,869 |
| | | | | | | | CW | 6.638,3 | 6.556,5 | 5.716,8 | 5.645,4 | 5.062,9 | 4.985,3 |
| | | | | | DTV-SV 5.000/10.000 | BV | U1-m | 5.133,602 | 5.130,293 | 4.477,646 | 4.475,176 | 4.005,920 | 4.003,588 |
| | | | | | | | U1-s | 147,505 | 147,361 | 139,251 | 139,059 | 158,900 | 158,670 |
| | | | | | | | U2-s | 11,504 % | 10,736 % | 9,844 % | 9,454 % | 10,390 % | 10,095 % |
| | | | | | | | R ² | 0,868 | 0,969 | 0,943 | 0,993 | 0,958 | 0,986 |
| | | | | | | | CW | 5.948,1 | 5.872,8 | 5.107,3 | 5.065,2 | 4.603,1 | 4.576,0 |

Tab. 6: Parameterzusammenstellung Stützmoment M_B

| Aktuell + Prognose | | | | Aktuell | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------|-----------|-----------|---------------------|---------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | U2ExV | U2NV | | | A-GE | | A-ME | | A-OV | | | |
| | | U2ExV | U2NV | | | U2ExV | U2NV | U2ExV | U2NV | U2ExV | U2NV | | |
| RV | U1-m | 6.861,684 | 6.858,995 | DTV-SV 500/1.000 | RV | U1-m | 4.468,178 | 4.462,113 | 3.825,361 | 3.819,702 | 2.852,782 | 2.851,240 | |
| | U1-s | 222,765 | 222,562 | | | U1-s | 192,628 | 191,916 | 167,313 | 166,472 | 66,189 | 66,067 | |
| | U2-s | 20,333 % | 20,010 % | | | U2-s | 12,442 % | 11,902 % | 13,559 % | 13,769 % | 4,956 % | 5,036 % | |
| | R ² | 0,967 | 0,986 | | | R ² | 0,925 | 0,965 | 0,963 | 0,891 | 0,874 | 0,807 | |
| | CW | 8.755,2 | 8.679,2 | | | CW | 5.253,4 | 5.201,5 | 4.563,9 | 4.545,8 | 3.063,8 | 3.057,5 | |
| BV | U1-m | 7.155,766 | 7.152,740 | | DTV-SV 5.000/10.000 | BV | U1-m | 4.144,484 | 4.143,061 | 4.012,282 | 4.010,470 | 3.200,893 | 3.198,429 |
| | U1-s | 215,811 | 215,592 | | | | U1-s | 128,685 | 128,468 | 181,595 | 181,291 | 101,560 | 101,248 |
| | U2-s | 21,765 % | 21,284 % | | | | U2-s | 6,129 % | 6,052 % | 8,060 % | 7,930 % | 13,742 % | 14,306 % |
| | R ² | 0,914 | 0,944 | | | | R ² | 0,975 | 0,971 | 0,971 | 0,974 | 0,962 | 0,862 |
| | CW | 9.273,9 | 9.193,2 | | | | CW | 4.526,7 | 4.515,7 | 4.511,9 | 4.491,5 | 3.808,9 | 3.809,1 |
| | | | | DTV-SV 5.000/10.000 | | RV | U1-m | 4.522,631 | 4.519,268 | 4.427,650 | 4.423,621 | 3.773,338 | 3.765,698 |
| | | | | | | | U1-s | 109,675 | 109,350 | 155,918 | 155,283 | 119,762 | 119,004 |
| | | | | | | | U2-s | 6,815 % | 6,879 % | 8,341 % | 8,099 % | 18,557 % | 18,728 % |
| | | | | | | | R ² | 0,977 | 0,914 | 0,926 | 0,937 | 0,956 | 0,898 |
| | | | | | | | CW | 4.965,7 | 4.950,6 | 4.971,1 | 4.936,0 | 4.732,7 | 4.697,7 |
| | | | | | DTV-SV 5.000/10.000 | BV | U1-m | 4.492,926 | 4.490,774 | 4.199,069 | 4.197,534 | 4.323,220 | 4.319,709 |
| | | | | | | | U1-s | 99,354 | 99,179 | 114,858 | 114,721 | 160,337 | 159,954 |
| | | | | | | | U2-s | 8,546 % | 9,004 % | 6,527 % | 6,470 % | 14,493 % | 15,023 % |
| | | | | | | | R ² | 0,930 | 0,814 | 0,957 | 0,946 | 0,968 | 0,875 |
| | | | | | | | CW | 5.025,4 | 5.037,4 | 4.599,9 | 4.584,1 | 5.200,6 | 5.203,1 |

Tab. 7: Parameterzusammenstellung Stützmoment M_F

| Aktuell + Prognose | | | | Aktuell | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------|----------------|-----------|------------------|---------------------|----------------|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | U2ExV | U2NV | | | A-GE | | A-ME | | A-OV | | | |
| | | | | | | U2ExV | U2NV | U2ExV | U2NV | U2ExV | U2NV | | |
| RV | U1-m | 6.675,929 | 6.672,884 | DTV-SV 500/1.000 | RV | U1-m | 4.328,824 | 4.322,413 | 3.836,228 | 3.826,241 | 3.392,763 | 3.385,118 | |
| | U1-s | 203,316 | 203,159 | | | U1-s | 127,158 | 126,937 | 133,353 | 133,027 | 149,089 | 148,426 | |
| | U2-s | 23,475 % | 23,551 % | | | U2-s | 26,430 % | 25,702 % | 23,863 % | 23,047 % | 20,652 % | 19,281 % | |
| | R ² | 0,980 | 0,962 | | | R ² | 0,809 | 0,832 | 0,838 | 0,860 | 0,867 | 0,951 | |
| | CW | 8.792,0 | 8.738,1 | | | CW | 5.891,5 | 5.787,5 | 5.072,4 | 4.990,9 | 4.351,1 | 4.270,8 | |
| BV | U1-m | 7.147,137 | 7.144,217 | | DTV-SV 5.000/10.000 | BV | U1-m | 3.955,557 | 3.953,618 | 3.497,036 | 3.494,158 | 3.126,537 | 3.123,306 |
| | U1-s | 213,838 | 213,716 | | | | U1-s | 129,986 | 129,856 | 143,935 | 143,666 | 165,339 | 164,988 |
| | U2-s | 21,202 % | 20,911 % | | | | U2-s | 17,134 % | 17,055 % | 14,689 % | 14,738 % | 17,999 % | 17,572 % |
| | R ² | 0,964 | 0,978 | | | | R ² | 0,931 | 0,924 | 0,949 | 0,916 | 0,931 | 0,949 |
| | CW | 9.186,2 | 9.122,5 | | | | CW | 4.881,3 | 4.851,2 | 4.215,8 | 4.196,3 | 3.912,8 | 3.874,7 |
| | RV | U1-m | 5.172,382 | 5.166,604 | | 4.356,241 | 4.346,654 | 3.877,326 | 3.869,489 | | | | |
| | | U1-s | 146,388 | 146,126 | | 121,317 | 121,142 | 136,326 | 135,884 | | | | |
| | | U2-s | 19,937 % | 19,486 % | | 20,170 % | 19,542 % | 18,528 % | 17,671 % | | | | |
| | | R ² | 0,857 | 0,872 | | 0,809 | 0,825 | 0,810 | 0,851 | | | | |
| | | CW | 6.570,8 | 6.494,7 | | 5.541,8 | 5.463,9 | 4.854,2 | 4.784,4 | | | | |
| | BV | U1-m | 5.046,003 | 5.044,494 | 4.296,161 | 4.293,790 | 3.799,562 | 3.797,459 | | | | | |
| | | U1-s | 155,947 | 155,873 | 145,187 | 145,001 | 164,944 | 164,712 | | | | | |
| | | U2-s | 10,446 % | 9,656 % | 9,849 % | 9,455 % | 9,878 % | 9,598 % | | | | | |
| | | R ² | 0,835 | 0,960 | 0,939 | 0,990 | 0,957 | 0,985 | | | | | |
| | | CW | 5.786,2 | 5.715,8 | 4.894,5 | 4.859,5 | 4.356,0 | 4.319,1 | | | | | |

Tab. 8: Parameterzusammenstellung Stützmoment M_B (20-Jahres-Maximalwerte)

Jahre. Hieraus folgt ein nahezu identischer Fraktilewert von 90,461 %. Der „200-jährige Wert“ tritt also mit nahezu gleicher Wahrscheinlichkeit innerhalb von 20 Jahren auf wie der „1.000-jährige Wert“ innerhalb von 100 Jahren.

Rechnerisch kann die Dichtefunktion f_p eines Produktes aus zwei Zufallszahlen (U1 und U2), wovon für beide Zufallszahlen die einzelne Dichtefunktion f_{x1} und f_{x2} bekannt ist (Extremwertverteilung Typ 1 bzw. Normalverteilung), nach Gleichung (4.21) ermittelt werden (vgl. Tabelle B3/3 in [10]).

$$f_p(z) = f_{x_1 \cdot x_2}(z) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{x_1}(t) \cdot f_{x_2}\left(\frac{z}{t}\right) \cdot \frac{1}{|t|} dt \quad (4.21)$$

Durch Integration lässt sich daraus die Verteilungsfunktion F_p berechnen. Diese rechnerische Bestimmung der Dichte- bzw. Verteilungsfunktion eines Produktes aus zwei Zufallszahlen ist zum Teil sehr rechenintensiv. Ersatzweise wurden hier zur Ermittlung der charakteristischen Werte für jede der in Tabelle 6 bis Tabelle 8 aufgeführten Varianten von U1 und U2 100.000 Zufallszahlen U1 und U2 generiert (mit den jeweiligen Verteilungsfunktionen und deren Parametern) und das Produkt U1 · U2 gebil-

det. Die Ergebnisse wurden aufsteigend sortiert und in dieser sortierten Liste der Wert von U1 · U2 bei Listenindex 90.478 (Wiederkehrperiode 1.000 Jahre, Referenzzeitraum 100 Jahre) bzw. 90.461 (Wiederkehrperiode 200 Jahre, Referenzzeitraum 20 Jahre) ermittelt. Wenngleich der so bestimmte charakteristische Wert einen Zufallscharakter aufweist, so wird er dennoch, in Anbetracht der weiteren Verwendung für die Bestimmung von Teilsicherheitsbeiwerten, als ausreichend genau angesehen.

5 Stochastische Beschreibung weiterer Basisvariablen

Für die stochastischen Beschreibungen weiterer Basisvariablen wird auf Literaturangaben zurückgegriffen. Alle Parameter in der in Kapitel 3.2 aufgestellten Grenzzustandsgleichung können als streuend angenommen werden. In der vorliegenden Arbeit wird aber die Anzahl der streuenden Basisvariablen auf die nachfolgend aufgeführten eingeschränkt:

- Moment infolge Eigengewichts,

- Moment infolge Ausbaulast,
- Moment infolge Straßenverkehrs (vgl. Kapitel 4.4),
- Betondruckfestigkeit,
- Streckgrenze Bewehrungsstahl,
- Modellunsicherheit Widerstand (als Betrachtungsvariante),
- Modellunsicherheit Einwirkung (als Betrachtungsvariante),

Hierfür werden nachfolgend stochastische Beschreibungen zusammengestellt.

5.1 Widerstandsseite

Auf der Widerstandsseite werden aus der in Kapitel 3.2 aufgestellten Grenzzustandsgleichung die Betondruckfestigkeit (f_c), die Streckgrenze des Bewehrungsstahls (f_y) und als Betrachtungsvariante ein Faktor zur Abbildung von Modellunsicherheiten auf der Widerstandsseite ($U_{R,M}$) als streuend angenommen. Für die in der vorliegenden Arbeit als deterministisch angenommenen weiteren Variablen auf der Widerstandsseite werden in Kapitel 5.1.4 Hinweise zu möglichen stochastischen Beschreibungen in verkürzter Form gegeben.

5.1.1 Betondruckfestigkeit

Beton wird in Betonfestigkeitsklassen eingeteilt, deren Bezeichnungen (z. B. C45/55) die „charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Zylindern ($f_{ck,cyl}$)“ und die „charakteristische Mindestdruckfestigkeit von Würfeln ($f_{ck,cube}$)“ [15] widerspiegelt. Die Zylinderdruckfestigkeit wird nachfolgend betrachtet und mit f_{ck} (für den charakteristischen Wert dieser) abgekürzt. Der charakteristische Wert wird hierbei als 5%-Fraktilwert definiert (vgl. [16]). Unabhängig von der Festigkeitsklasse wird der Mittelwert der Betondruckfestigkeit f_{cm} nach Gleichung (5.1) ermittelt (vgl. z. B. [13, 20]). Nimmt man für die Verteilungsfunktion der Betondruckfestigkeit eine Normalverteilung an, so ergibt sich eine konstante Standardabweichung von rund 5 N/mm².

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \frac{N}{mm^2} \quad (5.1)$$

Aus einer Zusammenstellung in [1] geht hervor, dass in verschiedenen vorhergehenden Arbeiten

sowohl eine Normalverteilung als auch eine logarithmische Normalverteilung als Verteilungsfunktion der Betondruckfestigkeit verwendet wurden. Die logarithmische Normalverteilung hat dabei den Vorteil, dass über die Parameter ein unterer Grenzwert (x_0) definiert werden kann. Im einfachsten Fall ist dieser Grenzwert 0, sodass negative Druckfestigkeiten nicht möglich sind. Die Dichtefunktion der logarithmischen Normalverteilung ist in Gleichung (5.2) angegeben. Der Erwartungswert m_x und die Standardabweichung σ_x ergeben sich aus den Parametern m_u , σ_u und x_0 nach Gleichung (5.3) und (5.4).

$$f_{LNV}(x) = \frac{1}{\sigma_u \cdot (x - x_0)} \varphi\left(\frac{\ln(x - x_0) - m_u}{\sigma_u}\right) \quad (5.2)$$

mit: φ als Dichtefunktion der Standardnormalverteilung

$$m_x = x_0 + \exp\left(m_u + \frac{\sigma_u^2}{2}\right) \quad (5.3)$$

$$\sigma_x = \exp\left(m_u + \frac{\sigma_u^2}{2}\right) \cdot \sqrt{\exp(\sigma_u^2) - 1} \quad (5.4)$$

Greift man die oben gegebene Definition für f_{ck} (5%-Fraktilwert) und f_{cm} (nach Gleichung (5.1), entspricht Erwartungswert) auf, so ergeben sich für eine logarithmische Normalverteilung die in Tabelle 9 aufgeführten Parameter dieser Verteilungsfunktion in Abhängigkeit der Betonfestigkeitsklasse.

In den vorliegenden Untersuchungen erfolgt die stochastische Beschreibung der Basisvariable über eine logarithmische Normalverteilung mit Parametern entsprechend der angenommenen Betonfestigkeitsklasse nach Tabelle 9.

| Betonfestigkeitsklasse | Parameter | | | | |
|------------------------|-----------|----------------|------------|-------|----------------------|
| | f_{ck} | $f_{cm} = m_x$ | σ_x | x_0 | $v_x = \sigma_x/m_x$ |
| C20/25 | 20 | 28 | 5,46 | 0 | 19,5 % |
| C25/30 | 25 | 33 | 5,34 | 0 | 16,2 % |
| C30/37 | 30 | 38 | 5,27 | 0 | 13,9 % |
| C35/45 | 35 | 43 | 5,21 | 0 | 12,1 % |
| C40/50 | 40 | 48 | 5,17 | 0 | 10,8 % |
| C45/55 | 45 | 53 | 5,13 | 0 | 9,7 % |
| C50/60 | 50 | 58 | 5,11 | 0 | 8,8 % |

Tab. 9: Parameter der logarithmischen Normalverteilung zur Abbildung der Betondruckfestigkeit

5.1.2 Streckgrenze des Bewehrungsstahls

Der charakteristische Wert der Streckgrenze von Betonstahl (BSt 500) beträgt 500 N/mm^2 (f_{yk}). Hier handelt es sich, analog zur Betondruckfestigkeit, um einen 5%-Fraktilwert (vgl. [16]). In [7] wird der Erwartungswert der Stahlstreckgrenze f_{ym} aus dem charakteristischen Wert und einer konstanten Standardabweichung von 30 N/mm^2 nach Gleichung (5.5) definiert.

$$f_{ym} = f_{yk} + 2 \cdot \sigma_y = f_{yk} + 2 \cdot 30 \frac{n}{mm^2} \quad (5.5)$$

Dies entspricht einem Variationskoeffizienten von rund 5,4 %. In [1] wird empfohlen, diesen Variationskoeffizienten auf 6,0 % zu erhöhen, wenn Streuungen der Querschnittfläche der Bewehrung nicht explizit berücksichtigt werden. Unter Verwendung einer logarithmischen Normalverteilung, eines Variationskoeffizienten von 6 % und der charakteristischen Streckgrenze des Stahls werden in [1] die Parameter dieser Verteilung gerundet angegeben:

$$m_{x,[1]} = 550 \text{ N/mm}^2,$$

$$\sigma_{x,[1]} = 33 \text{ N/mm}^2.$$

Diese gerundeten Werte liefern einen 5%-Fraktilwert von $497,5 \text{ N/mm}^2$. In den vorliegenden Untersuchungen wird der in [1] ermittelte Erwartungswert beibehalten und die Standardabweichung leicht nach unten abgeändert:

$$m_x = 550 \text{ N/mm}^2,$$

$$\sigma_x = 32 \text{ N/mm}^2.$$

Hieraus ergibt sich ein 5%-Fraktilwert von 499 N/mm^2 , also annähernd der vorausgesetzte charakteristische Wert der Streckgrenze. Der Variationskoeffizient beträgt in diesem Fall 5,8 %. Wesentliche Änderungen der Ergebnisse infolge dieser Abweichung werden nicht erwartet.

5.1.3 Modellunsicherheiten

Die in Kapitel 3.2 aufgestellte Grenzzustandsgleichung für das Biegeversagen eines Stahlbetonquerschnittes enthält auf der Widerstandsseite das aufnehmbare Biegemoment M_R . Zwischen diesem über ein Modell berechneten rechnerisch aufnehmbaren Biegemoment und dem real aufnehmbaren Biegemoment gibt es Differenzen, da „gewisse Einflüsse bewusst oder unbewusst vernachlässigt werden“ [3].

In den vorliegenden Untersuchungen wird die Abbildung der Modellunsicherheit auf der Widerstandsseite (aufnehmbares Biegemoment) über die Variable $U_{R,M}$ (vgl. Grenzzustandsgleichung in Kapitel 3.2) realisiert. Diese Variable wird, analog zu [1], durch eine logarithmische Normalverteilung mit einem Erwartungswert von 1,025 und einer Standardabweichung von 0,07175 (entspricht einem Variationskoeffizienten von 0,07) abgebildet. Wie oben angemerkt, wird diese Modellunsicherheit als Variante für die Untersuchungen berücksichtigt (Rechnungen mit und ohne Modellunsicherheiten) und in Kapitel 6.4 an den entsprechenden Stellen der Unterschied zwischen den Ergebnissen aus den Varianten erläutert.

5.1.4 Weitere Basisvariablen auf der Widerstandsseite

Zu den weiteren Basisvariablen auf der Widerstandsseite zählen die Abmessung des Querschnittes, die Lager der Bewehrung, der Völligkeitsbeiwert α_r , der Lagebeiwert der Betondruckkraft k_a und die Querschnittsfläche der Bewehrung. Diese Werte werden in den vorliegenden Untersuchungen als konstant angenommen. Die Bewehrungsmenge ergibt sich aus Vorbemessungen (vgl. Kapitel 6.2) und α_r und k_a aus den in Kapitel 3.2 genannten Randbedingungen.

5.2 Einwirkungsseite

Auf der Einwirkungsseite werden in der in Kapitel 3.2 aufgestellten Grenzzustandsgleichung Momenteneinwirkungen infolge Eigengewichts, Ausbaulast und Verkehrslast sowie als Betrachtungsvariante ein Faktor zur Abbildung von Modellunsicherheiten auf der Einwirkungsseite ($U_{E,M}$) als streuend angenommen. Die stochastische Beschreibung der Verkehrseinwirkung, genauer des Momentes aus Verkehr, ist in Kapitel 4.4 gegeben. Auf die übrigen Basisvariablen wird nachfolgend eingegangen. Einwirkungen in Form von Normalkräften werden nicht berücksichtigt.

5.2.1 Eigengewicht

Das Moment infolge Eigengewichts ergibt sich prinzipiell aus der Dichte bzw. dem Raumgewicht (kN/m^3) des verwendeten Materials, dem Flächeninhalt des Querschnittes (über die Länge des Bauwerkes hinweg das Volumen) und dem statischen

System. Wie bereits bei den Erläuterungen zur Widerstandsseite erläutert, wird in der vorliegenden Arbeit von nicht streuenden Querschnittsabmessungen ausgegangen. Unsicherheiten aus dem statischen System für die Berechnung der Momente aus Eigengewicht werden an dieser Stelle ebenfalls nicht berücksichtigt, jedoch wird in Kapitel 5.2.3 bei den Modellunsicherheiten hierauf eingegangen. Die stochastische Beschreibung des Momentes infolge Eigengewichts beschränkt sich somit auf die Streuung des Raumgewichtes, das aber über das gesamte betrachtete Bauwerk hinweg als identisch angenommen wird. In [9] werden für Normalbeton ein Mittelwert von 24 kN/m^3 und ein Variationskoeffizient von 0,04 angegeben. Dies gilt für Beton ohne Bewehrung. Für Stahlbeton ist der Mittelwert um 1 kN/m^3 zu erhöhen ([1]). In den vorliegenden Untersuchungen wird, basierend auf den genannten Quellen, ein Mittelwert des Raumgewichtes des Betons von 25 kN/m^3 angenommen, dieser Wert als charakteristischer Wert verwendet und die Momente (Stütz- und Feldmoment) infolge Eigengewichts ermittelt (vgl. Kapitel 6.1). Als Variationskoeffizient wird ein Wert von 0,05 angenommen. Als Verteilungsfunktion wird eine Normalverteilung verwendet. Der Variationskoeffizient liegt zwar über den oben aufgeführten Werten, allerdings wurden in [1] auch zusätzliche Streuungen der Bauteilabmessungen berücksichtigt.

5.2.2 Ausbaulast

Hinsichtlich der Ausbaulasten werden Momente infolge des Eigengewichtes des Fahrbahnaufbaus, der Kappen und der Geländer berücksichtigt. Für den Fahrbahnbelag wird hierbei nach [12] der charakteristische Wert (entspricht Mittelwert bzw. Erwartungswert) des Raumgewichtes mit 24 kN/m^3 angenommen. Ergänzend wird ein Mehreinbau von Fahrbahnbelag ebenfalls nach [12] durch eine zusätzliche Flächenlast von $0,5 \text{ kN/m}^2$ berücksichtigt. Die Lasten aus dem Eigengewicht der Kappen ergeben sich aus deren Geometrie und einem Raumgewicht des Betons von 25 kN/m^3 (vgl. vorhergehendes Kapitel). Das Eigengewicht des Geländers wird mit $0,5 \text{ kN/m}$ angenommen. Aus diesen Zahlenwerten ergeben sich die charakteristischen Werte der Momente infolge Ausbaulast (Stütz- und Feldmoment). Für die Abbildung der Streuungen dieser Größe wird eine Normalverteilung mit einem Variationskoeffizienten analog zum Eigengewicht von 0,05 herangezogen.

5.2.3 Modellunsicherheiten

„Die Modellunsicherheiten bei der Berechnung der Schnittgrößenverläufe infolge von Einwirkungen resultieren zum einen aus den Vereinfachungen bei der Berechnung ... und zum anderen aus dem verwendeten Verfahren der Schnittgrößenermittlung selbst ...“ [1]. Eine Zusammenstellung von Kennwerten der Modellunsicherheiten der Einwirkungen ist in [1] enthalten. Für Biegung werden darin ein Mittelwert von 1,0 und ein Variationskoeffizient von 0,07 (für Stabtragwerke) bzw. 0,1 (für Flächentragwerke) angegeben. Als Verteilungsfunktionen werden Normalverteilungen oder logarithmische Normalverteilungen verwendet.

Die Abbildung der Modellunsicherheit auf der Einwirkungsseite (Summe der einwirkenden Biegemomente) wird über die Variable $U_{E,M}$ (vgl. Grenzzustandsgleichung in Kapitel 3.2) realisiert. Diese Variable wird, analog zu [1], durch eine logarithmische Normalverteilung mit einem Erwartungswert von 1,0 und einer Standardabweichung von 0,1 abgebildet. Wie oben angemerkt, wird diese Modellunsicherheit als Variante für die Untersuchungen berücksichtigt (Rechnungen mit und ohne Modellunsicherheiten) und in Kapitel 6.4 an den entsprechenden Stellen der Unterschied zwischen den Ergebnissen aus den Varianten erläutert.

6 Ergebnisse

6.1 Grundlagen

In Kapitel 4 wurde vorgestellt, wie aus den in den bisherigen Forschungsprojekten ([4, 5] und [6]) ermittelten Ergebnissen von Simulationsrechnungen des aktuellen und angenommenen zukünftigen Verkehrsaufkommens (Schwerverkehr) stochastische Beschreibungen der Beanspruchungen infolge Verkehrs ermittelt werden können. Hierbei wurde sich auf das Stützmoment und das Feldmoment des in den bisherigen Forschungsprojekten betrachteten $2 \times 40\text{-m}$ -Tragsystems mit Plattenbalkenquerschnitt in Massivbauweise (vgl. Bild 11) beschränkt. Mit den in Kapitel 4 für die Verkehrseinwirkung und in Kapitel 5 für übrige Basisvariablen zusammengestellten stochastischen Beschreibungen werden nachfolgend zuverlässigkeitstheoretische Berechnungen durchgeführt. Die übrigen Basisvariablen, die in der verwendeten Grenzzustandsgleichung (vgl. Gleichung 3.12) enthalten sind, werden mit

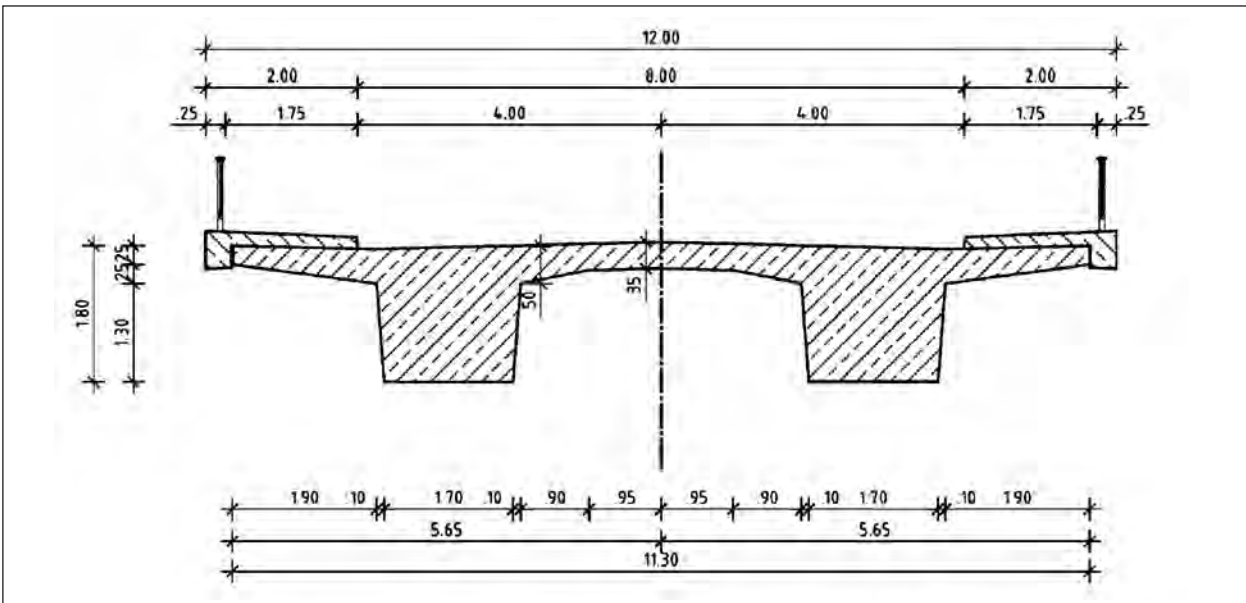


Bild 11: Skizze Plattenbalkenquerschnitt in Massivbauweise mit 8 m Fahrbahnbreite

einem deterministischen Wert belegt. In den Untersuchungen wird ein Steg des zweistegigen Plattenbalkenquerschnittes betrachtet. Zur Verarbeitung dieses Querschnittes in der Grenzzustandsgleichung wird die Geometrie wie folgt vereinfacht:

- Stützmoment M_B : Rechteckquerschnitt mit einer Breite von 175 cm und einer Höhe von 177,87 cm,
- Feldmoment M_F : Plattenbalkenquerschnitt mit einer Plattenbreite von 565 cm, einer Stegbreite von 175 cm, einer Plattendicke von 40 cm und einer Gesamthöhe von 177,89 cm.

Entsprechend den in Kapitel 3.2 aufgeführten Randbedingungen für die Bildung der geschlossenen Grenzzustandsgleichung wird davon ausgegangen, dass für das Feldmoment M_F die Höhe der Betondruckzone kleiner ist als die Plattendicke (40 cm). Die vollständige Geometrie des Plattenbalkenquerschnittes ist in der Grenzzustandsgleichung lediglich für die Bestimmung des Querschnittsschwerpunktes relevant, der als Punkt für die Einwirkung äußerer Normalkräfte verwendet wird. In der vorliegenden Beispielanwendung werden keine Normalkräfte berücksichtigt und somit kann die Geometrie für die Untersuchungen hinsichtlich des Feldmomentes auch als Rechteckquerschnitt mit 565 cm Breite und 177,89 cm Höhe abgebildet werden.

Neben der Vereinfachung der Geometrie sind weitere Annahmen erforderlich. Für den Beton wird die

Festigkeitsklasse C45/55 angenommen und der Abstand der Bewehrung (oben und unten im Querschnitt) zu 5 cm gesetzt. Für das Moment infolge Eigengewichts ergeben sich aus der Geometrie des Querschnittes und dem charakteristischen Wert des Raumgewichtes des Betons von 25 kN/m^3 für das Stützmoment ein charakteristischer Wert von $-22.809,16 \text{ kNm}$ und für das Feldmoment ein charakteristischer Wert von $12.915,73 \text{ kNm}$. Für die Ausbaulast (Fahrbahnbelag inkl. Mehreinbau, Kapfen, Geländer) ergibt sich ein Moment von $-4.577,95 \text{ kNm}$ bzw. $2.586,06 \text{ kNm}$ (jeweils charakteristische Werte).

Ergänzend werden zuverlässigkeitstheoretische Untersuchungen durchgeführt, in denen der Erwartungswert des Momentes infolge Eigengewichts (charakteristischer Wert) halbiert wird. Der Variationskoeffizient wird beibehalten. In den nachfolgenden Zusammenstellungen der Ergebnisse wird hierauf eingegangen und der Unterschied zwischen dieser Untersuchungsvariante und den Varianten mit „korrektem“ Erwartungswert aufgezeigt.

6.2 Vorbemessung

Zur Festlegung der Bewehrungsmenge wird eine Vorbemessung durchgeführt. Hierzu werden die genannten charakteristischen Werte aus Eigengewicht und Ausbaulast verwendet. Für die charakteristischen Werte aus Verkehr werden die Lastmodelle LMM, LM1, BK60/30, BK60 und BK30/30 he-

rangezogen und auf den kompletten Querschnitt angesetzt. Zusätzlich werden in der Vorbemessung verschiedene Varianten von Teilsicherheitsbeiwerten herangezogen. Diese sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Die aufgeführte Variante A entspricht dabei den aktuell festgelegten Teilsicherheitsbeiwerten nach DIN-Fachberichten ([12, 13]). In Variante B ist der Teilsicherheitsbeiwert für die Verkehrseinwirkungen (Y_Q) mit 1,35 angenommen. Dieser Teilsicherheitsbeiwert wird in [17] angegeben. In den übrigen Varianten C bis F wurden die Teilsicherheitsbeiwerte ohne normativen Hintergrund weiter variiert. Unter Verwendung dieser Varianten von Teilsicherheitsbeiwerten wurden erforderliche Bewehrungsmengen unter Annahme eines Betons der Festigkeitsklasse C45/55 ermittelt.

| Variante | Einwirkung | | Widerstand | |
|----------|------------|-------|------------|-------|
| | Y_G | Y_Q | Y_c | Y_s |
| A | 1,35 | 1,5 | 1,5 | 1,15 |
| B | 1,35 | 1,35 | 1,5 | 1,15 |
| C | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,15 |
| D | 1,35 | 1,5 | 1,0 | 1,0 |
| E | 1,35 | 1,35 | 1,0 | 1,0 |
| F | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

Tab. 10: Varianten der Teilsicherheitsbeiwerte für die Vorbemessung

In Tabelle 11 sind diese für das Stützmoment M_B zusammengestellt. Für die verschiedenen betrachteten Lastmodelle (erste Spalte in Tabelle) ergeben sich für die Varianten der Vorbemessung (A bis F mit verschiedenen Teilsicherheitsbeiwerten) Bemessungswerte des einwirkenden Momentes $M_{B,d}$ (enthalten sind Momente aus Eigengewicht, Ausbaulast und Verkehrslast nach Lastmodell). Diese sind in der Tabelle betragsmäßig aufgeführt, da der Querschnitt gedacht umgedreht betrachtet wird. Aus diesem Grund sind die aufgeführten Angaben zu $A_{s,u}$ die Bewehrungsmenge der unteren Lage des gedreht gedachten Querschnittes, welche in der Realität also der oberen Bewehrungslage im Querschnitt entspricht. Für die Angaben $A_{s,o}$ ist es entsprechend umgekehrt. Die Druckbewehrung $A_{s,o}$ ergibt sich aus einer Begrenzung der Druckzonenhöhe auf $0,45 \cdot d_{s,u}$. In analoger Weise sind in Tabelle 12 die Bewehrungsmengen für die Betrachtung des Feldmomentes M_F zusammengestellt. Für die Betrachtungen mit einem halbierten charakteristischen Wert für das Eigengewicht wurden ebenfalls Bewehrungsmengen ermittelt. Diese sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Zusammengefasst ergibt sich hieraus eine breite Palette von Querschnitten, die sich in den Bewehrungsmengen unterscheiden. Diese Palette wird einer zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchung unterzogen, in der die in Kapitel 6.1 aufgeführten Basisvariablen als streuend angenommen werden.

| Lastmodell | Kennwert | Variante Vorbemessung | | | | | |
|------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | A | B | C | D | E | F |
| LMM | $M_{B,d}$ | 53.843,25 | 52.156,18 | 38.634,21 | 53.843,25 | 52.156,18 | 38.634,21 |
| | $A_{s,u}$ | 843,05 | 819,93 | 628,37 | 746,74 | 717,82 | 503,19 |
| | $A_{s,o}$ | 196,70 | 173,58 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| LM1 | $M_{B,d}$ | 49.194,15 | 47.971,99 | 35.534,81 | 49.194,15 | 47.971,99 | 35.534,81 |
| | $A_{s,u}$ | 779,35 | 762,61 | 565,34 | 668,31 | 648,33 | 457,61 |
| | $A_{s,o}$ | 133,00 | 116,26 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| BK60/30 | $M_{B,d}$ | 47.195,85 | 46.173,52 | 34.202,61 | 47.195,85 | 46.173,52 | 34.202,61 |
| | $A_{s,u}$ | 751,97 | 737,97 | 539,28 | 635,77 | 619,38 | 438,37 |
| | $A_{s,o}$ | 105,62 | 91,62 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| BK60 | $M_{B,d}$ | 46.538,25 | 45.581,68 | 33.764,21 | 46.538,25 | 45.581,68 | 33.764,21 |
| | $A_{s,u}$ | 742,96 | 729,86 | 530,83 | 625,21 | 609,96 | 432,08 |
| | $A_{s,o}$ | 96,61 | 83,51 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| BK30/30 | $M_{B,d}$ | 45.684,45 | 44.813,26 | 33.195,01 | 45.684,45 | 44.813,26 | 33.195,01 |
| | $A_{s,u}$ | 731,27 | 719,33 | 519,94 | 611,59 | 597,81 | 423,95 |
| | $A_{s,o}$ | 84,92 | 72,98 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tab. 11: Bewehrungsmenge aus Vorbemessungen – Stützmoment M_B

| Lastmodell | Kennwert | Variante Vorbemessung | | | | | |
|------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | A | B | C | D | E | F |
| LMM | $M_{B,d}$ | 37.157,27 | 35.534,28 | 26.321,69 | 37.157,27 | 35.534,28 | 26.321,69 |
| | $A_{s,u}$ | 518,65 | 494,97 | 362,52 | 444,21 | 424,28 | 312,20 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| LM1 | $M_{B,d}$ | 32.953,67 | 31.751,04 | 23.519,29 | 32.953,67 | 31.751,04 | 23.519,29 |
| | $A_{s,u}$ | 457,53 | 440,18 | 322,88 | 392,70 | 378,04 | 278,42 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| BK60/30 | $M_{B,d}$ | 31.797,32 | 30.710,33 | 22.748,39 | 31.797,32 | 30.710,33 | 22.748,39 |
| | $A_{s,u}$ | 440,84 | 425,20 | 312,02 | 378,60 | 365,37 | 269,15 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| BK60 | $M_{B,d}$ | 30.412,97 | 29.464,41 | 21.825,49 | 30.412,97 | 29.464,41 | 21.825,49 |
| | $A_{s,u}$ | 420,93 | 407,33 | 299,06 | 361,76 | 350,24 | 258,07 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| BK30/30 | $M_{B,d}$ | 29.150,27 | 28.327,98 | 20.983,69 | 29.150,27 | 28.327,98 | 20.983,69 |
| | $A_{s,u}$ | 402,84 | 391,09 | 287,26 | 346,43 | 336,46 | 247,98 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tab. 12: Bewehrungsmenge aus Vorbemessungen – Feldmoment M_F

| Lastmodell | Kennwert | Variante Vorbemessung | | | | | |
|------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | A | B | C | D | E | F |
| LMM | $M_{B,d}$ | 38.447,07 | 36.760,00 | 27.229,63 | 38.447,07 | 36.760,00 | 27.229,63 |
| | $A_{s,u}$ | 624,46 | 589,84 | 411,27 | 500,41 | 475,49 | 340,82 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| LM1 | $M_{B,d}$ | 33.797,97 | 32.575,81 | 24.130,23 | 33.797,97 | 32.575,81 | 24.130,23 |
| | $A_{s,u}$ | 531,48 | 508,21 | 358,21 | 432,57 | 415,15 | 299,02 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| BK60/30 | $M_{B,d}$ | 31.799,67 | 30.777,34 | 22.798,03 | 31.799,67 | 30.777,34 | 22.798,03 |
| | $A_{s,u}$ | 493,67 | 474,76 | 336,02 | 404,17 | 389,81 | 281,33 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| BK60 | $M_{B,d}$ | 31.142,07 | 30.185,50 | 22.359,63 | 31.142,07 | 30.185,50 | 22.359,63 |
| | $A_{s,u}$ | 481,47 | 463,95 | 328,80 | 394,92 | 381,55 | 275,54 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| BK30/30 | $M_{B,d}$ | 30.288,27 | 29.417,08 | 21.790,43 | 30.288,27 | 29.417,08 | 21.790,43 |
| | $A_{s,u}$ | 465,82 | 450,04 | 319,48 | 382,98 | 370,88 | 268,06 |
| | $A_{s,o}$ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Tab. 13: Bewehrungsmenge aus Vorbemessungen – Stützmoment $M_B - 0,5 G$

6.3 Zusammenstellung aller verwendeten stochastischen Beschreibungen der Basisvariablen

Eine Zusammenstellung aller verwendeten stochastischen Beschreibungen der Basisvariablen ist in Tabelle 14 für die Betrachtung des Stützmomentes M_B und in Tabelle 15 für die Betrachtung des Feldmomentes M_F enthalten. Zusätzlich sind dort die deterministisch festgelegten Werte aufgeführt. Für die Variation der Bewehrungsmenge wird in Tabelle 14 und Tabelle 15 auf Tabelle 11 bzw. Tabelle 12 und für die stochastischen Beschreibungen der Verkehrseinwirkung auf Tabelle 6 bzw. Tabelle 7 verwiesen. Für die Basisvariablen Eigengewicht ($M_{G,1}$) und Ausbaulast ($M_{G,2}$) werden Normalverteilungen mit einem Erwartungswert entsprechend der in Kapitel 6.1 aufgeführten charakteristischen Werte dieser Größen und einem Variationskoeffizienten von 5 % verwendet (vgl. Kapitel 5.2.1 und 5.2.2). Entsprechend ergeben sich die in Tabelle 14 und Tabelle 15 aufgeführten Standardabweichungen. Für die Betondruckfestigkeit wird eine logarithmische Normalverteilung mit einem Erwartungswert

entsprechend der mittleren Betondruckfestigkeit eines C45/55 (f_{cm}) verwendet. Die Standardabweichung wurde so festgelegt, dass der 5%-Fraktilwert der Verteilung dem charakteristischen Wert der Betondruckfestigkeit (f_{ck}) entspricht (vgl. Kapitel 5.1.1). Entsprechend den in Kapitel 5.1.2 gegebenen Erläuterungen wurde für die Streckgrenze des Betonstahls eine logarithmische Normalverteilung verwendet, deren 5%-Fraktilwert dem charakteristischen Wert der Streckgrenze des Betonstahls (500 N/mm²) entspricht.

Die Faktoren zur Abbildung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite ($U_{R,M}$ und $U_{E,M}$) werden in nachfolgender Ergebniszusammenstellung nicht generell verwendet. Hierauf wird an entsprechender Stelle genauer eingegangen. Die Festlegung der Parameter für diese Basisvariablen in Tabelle 14 und Tabelle 15 ergibt sich aus den Erläuterungen in Kapitel 5.1.3 bzw. 5.2.3.

Für die weiterführenden Betrachtungen mit Annahme eines halbierten charakteristischen Wertes für das Moment infolge Eigengewichts und der Abbil-

| Variable | Funktionstyp | V1 | V2 | V3 | Einheit | Erläuterung |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|---------|-------------------|------------------------------------|
| $M_{G,1}$ | NV | 22.809,16 | 1.140 | / | kNm | V1 = m, V2 = σ |
| $M_{G,2}$ | NV | 4.577,95 | 229 | / | kNm | V1 = m, V2 = σ |
| $M_Q = U_1$ | ExV Typ 1 | Tabelle 6 | Tabelle 6 | / | kNm | V1 = m, V2 = σ |
| h | Det. | 177,87 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| b | Det. | 175 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| h_f | Det. | 177,87 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| b_w | Det. | 175 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| A_{su} | Det. | Tabelle 11 | / | / | cm ² | V1 = det. Wert |
| A_{so} | Det. | Tabelle 11 | / | / | cm ² | V1 = det. Wert |
| c_u | Det. | 5 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| c_o | Det. | 5 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| f_c | LogNV | 0 | 53 | 5 | N/mm ² | V1 = x_0 , V2 = m, V3 = σ |
| a | Det. | 0,85 | / | / | -- | V1 = det. Wert |
| f_{yU}/f_{y0} | LogNV. | 0 | 550 | 32 | N/mm ² | V1 = x_0 , V2 = m, V3 = σ |
| k_a | Det. | 0,416 | / | / | -- | V1 = det. Wert |
| α_R | Det. | 0,8095 | / | / | -- | V1 = det. Wert |
| $U_{R,M}^*$ | LogNV. | 0 | 1,025 | 0,07175 | -- | V1 = x_0 , V2 = m, V3 = σ |
| $U_{E,M}^*$ | LogNV. | 0 | 1,0 | 0,1 | -- | V1 = x_0 , V2 = m, V3 = σ |
| $U_{E,M,Q} = U_2$ | Tabelle 6 | Tabelle 6 | Tabelle 6 | / | -- | V1 = m, V2 = σ |

* Hinweis: $U_{R,M}$ und $U_{E,M}$ werden nicht in allen Fällen als streuend angenommen, sondern zum Teil deterministische zu 1 gesetzt

Tab. 14: Stochastische Beschreibung der Basisvariablen – Stützmoment M_B

| Variable | Funktionstyp | V1 | V2 | V3 | Einheit | Erläuterung |
|-------------------|------------------|-------------------|------------------|---------|-------------------|------------------------------------|
| $M_{G,1}$ | NV | 12.915,73 | 646 | / | kNm | V1 = m, V2 = σ |
| $M_{G,2}$ | NV | 2.586,06 | 129 | / | kNm | V1 = m, V2 = σ |
| $M_Q = U_1$ | ExV Typ 1 | Tabelle 7 | Tabelle 7 | / | kNm | V1 = m, V2 = σ |
| h | Det. | 177,87 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| b | Det. | 565 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| h_f | Det. | 40 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| b_w | Det. | 175 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| A_{su} | Det. | Tabelle 12 | / | / | cm ² | V1 = det. Wert |
| A_{so} | Det. | Tabelle 12 | / | / | cm ² | V1 = det. Wert |
| c_u | Det. | 5 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| c_o | Det. | 5 | / | / | cm | V1 = det. Wert |
| f_c | LogNV | 0 | 53 | 5 | N/mm ² | V1 = x_0 , V2 = m, V3 = σ |
| a | Det. | 0,85 | / | / | -- | V1 = det. Wert |
| f_{yu}/f_{yo} | LogNV. | 0 | 550 | 32 | N/mm ² | V1 = x_0 , V2 = m, V3 = σ |
| k_a | Det. | 0,416 | / | / | -- | V1 = det. Wert |
| α_R | Det. | 0,8095 | / | / | -- | V1 = det. Wert |
| $U_{R,M}^*$ | LogNV. | 0 | 1,025 | 0,07175 | -- | V1 = x_0 , V2 = m, V3 = σ |
| $U_{E,M}^*$ | LogNV. | 0 | 1,0 | 0,1 | -- | V1 = x_0 , V2 = m, V3 = σ |
| $U_{E,M,Q} = U_2$ | Tabelle 7 | Tabelle 7 | Tabelle 7 | / | -- | V1 = m, V2 = σ |

* Hinweis: $U_{R,M}$ und $U_{E,M}$ werden nicht in allen Fällen als streuend angenommen, sondern zum Teil deterministische zu 1 gesetzt

Tab. 15: Stochastische Beschreibung der Basisvariablen – Stützmoment M_F

derung der Beanspruchungen infolge Verkehrs für einen Bezugszeitraum von 20 Jahren ergeben sich die verwendeten Parameter entsprechend. Diese weiterführenden Betrachtungen werden nur für das Stützmoment M_B durchgeführt. Für das halbierte Eigenwicht ändern sich in Tabelle 14 die Parameter für $M_{G,1}$ und die Werte der Bewehrungsmenge (vgl. Tabelle 13). Für die Betrachtung eines Referenzzeitraumes von 20 Jahren ändern sich in Tabelle 14 die Parameter für M_Q und $U_{E,M,Q}$ entsprechend Tabelle 8.

6.4 Ergebniszusammenstellung

6.4.1 Übersicht

Unter Verwendung der in Tabelle 14 und Tabelle 15 zusammengestellten stochastischen Beschreibungen der Basisvariablen wurden unter Anwendung des Rackwitz-Fießler-Algorithmus (vgl. Kapitel 2.2 und 3.1) für die in Kapitel 3.2 hergeleitete Grenzzustandsgleichung des Biegeversagens zuverlässigkeitstheoretische Untersuchungen durchgeführt. Ergebnisse dieser Untersuchungen sind zunächst

Sicherheitsindizes, Wichtungsfaktoren für die als streuend angenommenen Basisvariablen und Bemessungswerte, genauer Koordinaten eines Punktes im n-dimensionalen Raum auf der Grenzzustandsfunktion mit einem Maximalwert der Verteilungsdichte, für diese Basisvariablen. Aus den Bemessungswerten der Basisvariablen lassen sich unter Definition von charakteristischen Werten (Mittelwert für Eigengewicht und Ausbaulast, 5%-Fraktile für Stahlstreckgrenze und Betondruckfestigkeit, Wert mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren für Beanspruchungen infolge Verkehrs bei einem Referenzzeitraum von 100 Jahren) Teilsicherheitsbeiwerte ermitteln. Für die Basisvariablen auf der Widerstandsseite Y_R (Stahlstreckgrenze und Betondruckfestigkeit) ergeben sich diese Teilsicherheitsbeiwerte nach Gleichung (6.1) aus dem charakteristischen Wert R_C und dem Bemessungswert R_D . Für die Basisvariablen auf der Einwirkungsseite (Eigengewicht, Ausbaulast, Verkehrseinwirkung) ergeben sich die Teilsicherheitsbeiwerte Y_E nach Gleichung (6.2) aus dem charakteristischen Wert E_C und dem Bemessungswert E_D .

$$\gamma_R = \frac{R_C}{R_D} \quad (6.1)$$

$$\gamma_E = \frac{E_D}{E_C} \quad (6.2)$$

In Bild 12 sind für den Richtungsverkehr (RV) ermittelte Sicherheitsindizes für die Untersuchungen hinsichtlich des Stützmomentes M_B in einer Übersicht zusammengestellt. Hierbei wurde die Variable U_2 , die der Variablen $U_{E,M,Q}$ in der verwendeten Grenzzustandsfunktion entspricht (vgl. Gleichung (3.13)), hier als Extremwertverteilung Typ 1 abgebildet (vgl. Kapitel 4.4). Für die Abbildung von U_2 als Normalverteilung sind in analoger Weise die ermittelten Sicherheitsindizes im Anhang A.1 in Bild A.2 aufgeführt. Bild A.3 und Bild A.4 enthalten die Ergebnisse für den Begegnungsverkehr (BV) und Bild A.67 bis Bild A.70 im Anhang A.4 die Ergebnisse für die Untersuchungen hinsichtlich des Feldmomentes M_F . Für die Ermittlung der vorliegenden Ergebnisse wurde für jede der in Tabelle 6 (für M_B) bzw. Tabelle 7 (für M_F) aufgeführten stochastischen Beschreibungen der Verkehrseinwirkung und jede Vorbemessung nach Tabelle 11 bzw. Tabelle 12 eine sicherheitstheoretische Untersuchung durchgeführt. Die Ergebnisse infolge der verschiedenen betrachteten Varianten von Teilsicherheitsbeiwerten für die Vorbemessung nach Tabelle 10 (A bis F) sind in Bild 12 und nachfolgenden Darstellungen als einzelne Linienzüge dargestellt. Die Identifikation der für die Vorbemessung verwendeten Ver-

kehrslastmodelle erfolgt in den Bezeichnungen auf der x-Achse durch „VB-LMM...“ für das neue Verkehrslastmodell 1 nach [18] und [19], „VB-LM1“ für das Lastmodell 1 nach [12], „VB-6030“ für das Lastmodell BK60/30 nach [14] usw. Die verwendeten stochastischen Beschreibungen der Verkehrseinwirkung sind durch „Prog“ für den aktuellen und zukünftigen Verkehr für den Neubau (vgl. Kapitel 4.3.2) sowie durch die Abkürzungen „GE“, „ME“ und „OV“ für objektspezifischen aktuellen Verkehr verschiedener Zusammensetzung gekennzeichnet. Hier wird zusätzlich zwischen den Verkehrsstärken (DTV-SV) 500 und 1.000 (Abkürzung „VS1-2“) bzw. 5.000 und 10.000 (Abkürzung „VS3-4“) differenziert (vgl. Kapitel 4.3.3). In Bild 12 wird ersichtlich, dass die ermittelten Sicherheitsindizes für eine Vorbemessung mit aktuellen bzw. zukünftigen normativen Teilsicherheitsbeiwerten (Variante A und B) im Vergleich zu einem gegebenen Mindestwert von 3,65 (vgl. Kapitel 2.1) sehr hoch sind. Auch für die übrigen betrachteten Varianten, abgesehen von F, ergeben sich sehr hohe Werte. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass für die dargestellten Ergebnisse nur 5 streuende Basisvariablen angesetzt und unter anderem Modellunsicherheiten nicht berücksichtigt wurden. Auf die Berücksichtigung solcher Modellunsicherheiten wird nachfolgend eingegangen. In der Darstellung werden aber die Unterschiede der Ergebnisse für die Vorbemessung mit den unterschiedlichen Lastmodellen deutlich. Hinsichtlich der Qualität nehmen die Sicherheitsindizes mit „geringerem“ Lastmodell erwartungsgerecht ab. Die Ver-

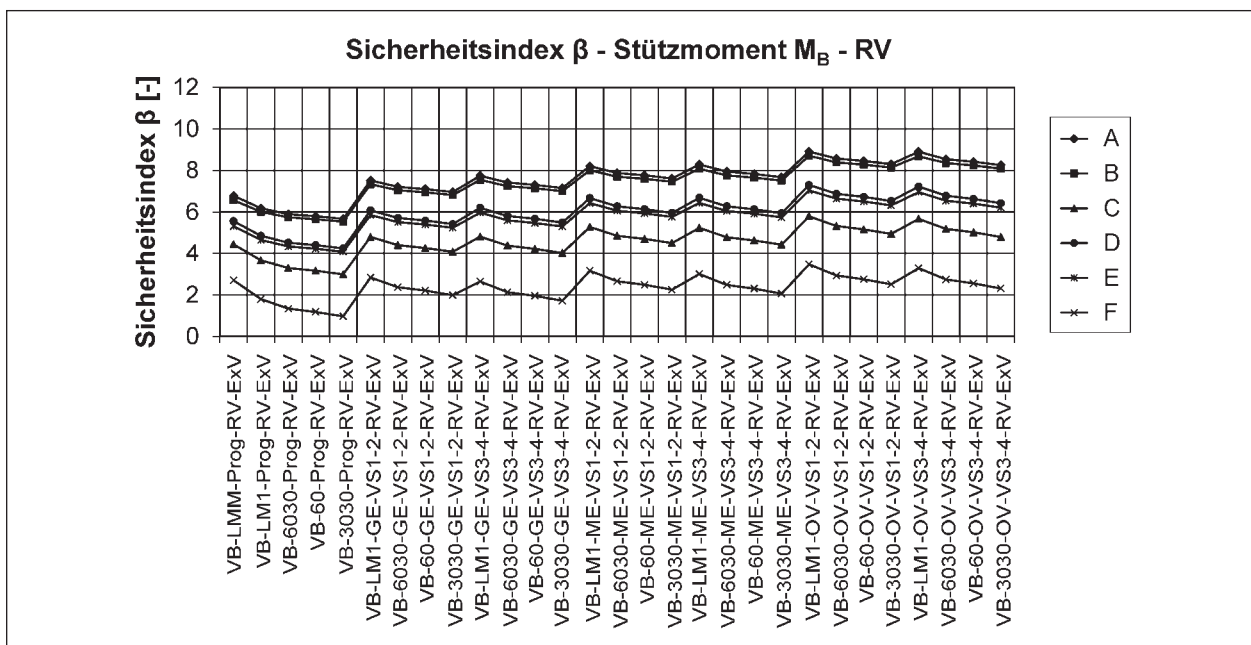


Bild 12: Übersicht berechneter β -Werte (Richtungsverkehr, U_2 als Extremwertverteilung Typ1)

wendung eine Normalverteilung zur stochastischen Beschreibung von U2 (vgl. Bild A.2 in Anhang A.1) führt zu noch höheren Sicherheitsindizes bei einem prinzipiell ähnlichen Ergebnisverlauf über die verschiedenen Varianten hinweg.

In [4] wurde eine Abdeckung der Beanspruchungen aus aktuellem und angenommenem zukünftigem Schwerverkehr hinsichtlich der charakteristischen Werte durch das Lastmodell „LMM“ bestätigt. Für den Neubau von Straßenbrückenbauwerken nach [18] und [19] wird dieses Lastmodell zukünftig eingesetzt. In [6] wurden Lastmodelle (aktuelle Lastmodelle und historische Lastmodelle) in Abhängigkeit der durch Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung beschriebenen Verkehrscharakteristik identifiziert, die einen entsprechenden objektspezifischen Verkehr abdecken. Für das hier betrachtete Tragsystem (2x40-m-Zweifeldsystem mit Platenbalkenquerschnitt in Massivbauweise – vgl. Bild 11) ist diese Zuordnung in Tabelle 5 (Kapitel 4.3.3) aufgeführt.

Unter Verwendung dieser Zuordnungen werden aus den Ergebnissen diejenigen betrachtet, für die dieser Zusammenhang zwischen verwendetem Lastmodell für die Vorbemessung und stochastischer Beschreibung der Verkehrseinwirkungen gegeben ist. In Kapitel 6.4.2 werden zunächst die Ergebnisse für die Untersuchungen hinsichtlich des Stützmomentes M_B zusammengestellt. In Kapitel 6.4.3 werden die Ergebnisse der zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen unter Annahme eines halbierten charakteristischen Wertes (Erwartungswert) für die Basisvariable Eigengewicht dar-

gestellt und den Ergebnissen aus dem Ansatz des vollen Eigengewichtes gegenübergestellt. Analog dazu werden in Kapitel 6.4.4 die Ergebnisse der zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen unter Ansatz von Verteilungsfunktionen der 20-Jahres-Maximalwerte den Ursprungsergebnissen (100-Jahres-Maximalwerte) gegenübergestellt.

Abschließend wird in Kapitel 6.4.5 auf die Untersuchungen hinsichtlich des Feldmomentes M_F eingegangen.

6.4.2 Ergebnisse aus Analysen für das Stützmoment M_B

In Bild 13 und Bild 14 sind die Sicherheitsindizes für den Richtungsverkehr (RV) und den Begegnungsverkehr (BV) dargestellt. Für den Richtungsverkehr (Bild 13) wird dabei deutlich, dass sich relativ homogene Sicherheitsindizes für die Varianten des aktuellen Verkehrs verschiedener Verkehrscharakteristik ergeben. Für den aktuellen und zukünftigen Verkehr („Prog“) zeigt sich ein im Vergleich dazu etwas niedrigerer Sicherheitsindex. Des Weiteren wird deutlich, dass die Unterschiede in den ermittelten Sicherheitsindizes für die Varianten A und B der verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte nahezu deckungsgleich sind. Für den Begegnungsverkehr (Bild 14) sind die Sicherheitsindizes im Vergleich zum Richtungsverkehr etwas höher, aber untereinander weniger homogen.

Neben dem Sicherheitsindex ergibt sich aus der zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchung für jede

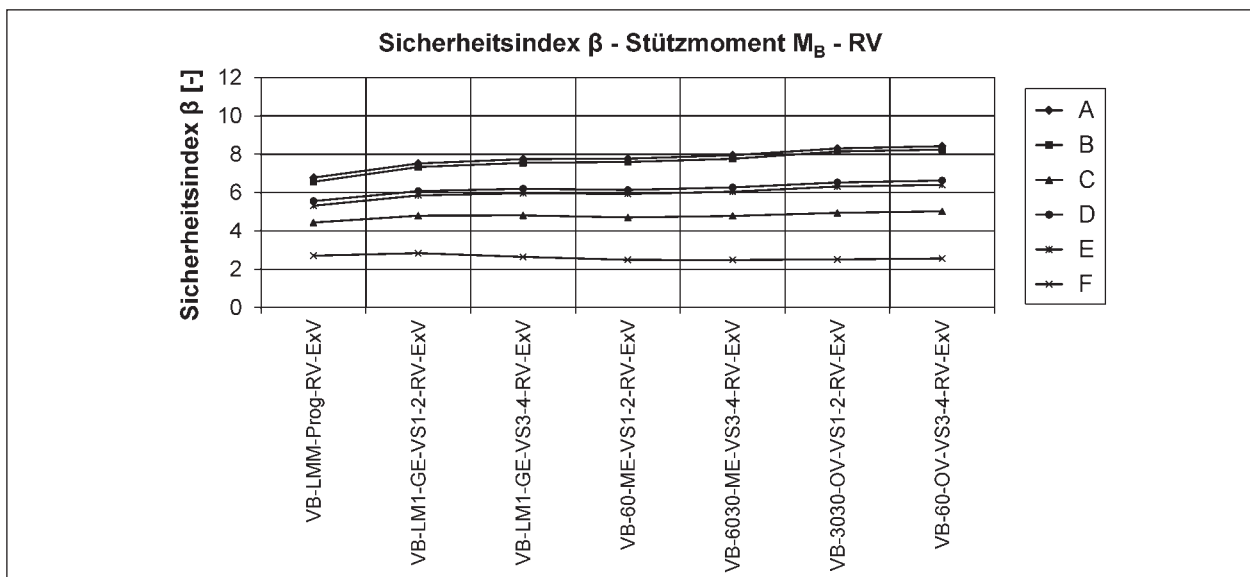


Bild 13: β -Werte für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr)

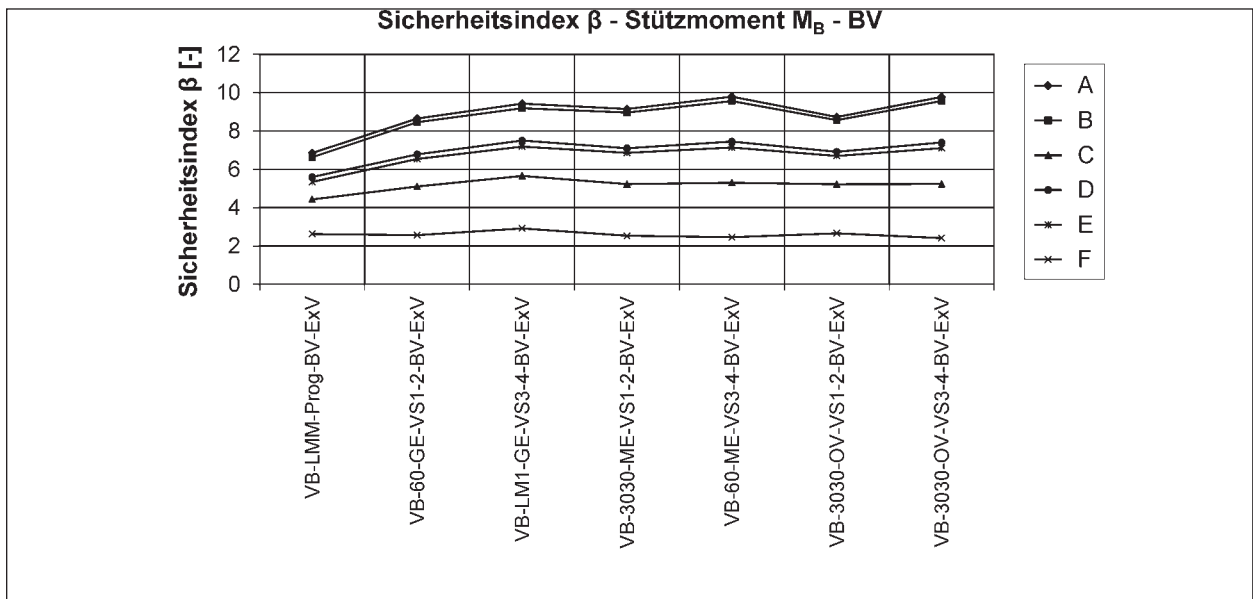


Bild 14: β -Werte für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Begegnungsverkehr)

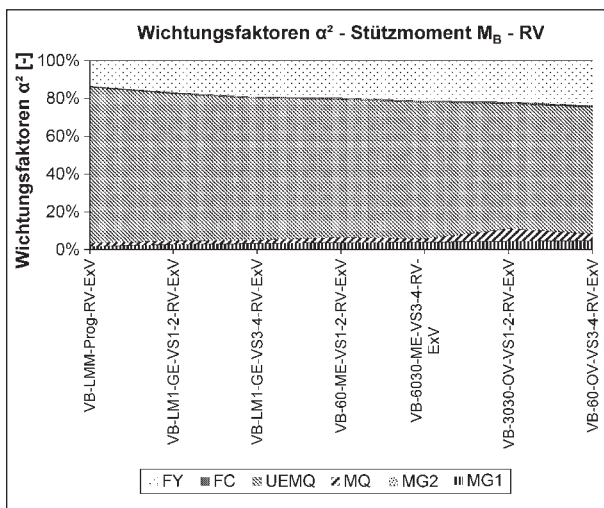


Bild 15: Wichtungsfaktoren α^2 für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr)

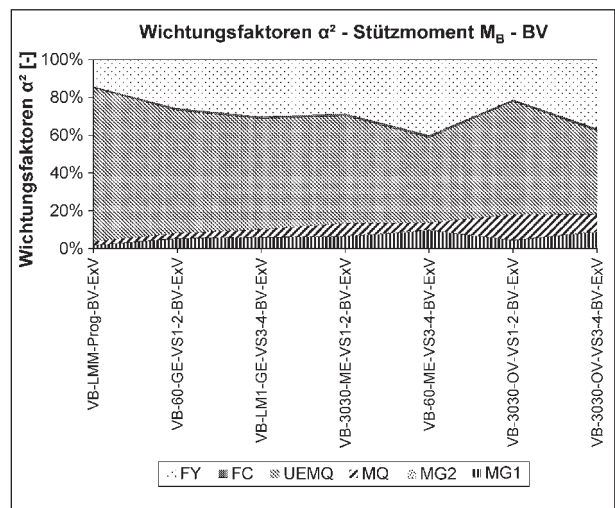


Bild 16: Wichtungsfaktoren α^2 für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Begegnungsverkehr)

als streuend angenommene Basisvariable ein Wichtungsfaktor α , der den Anteil der einzelnen Basisvariablen, genauer deren Streuungen, am „Gesamtpblem“ beschreibt. In Bild 15 und Bild 16 sind die Quadrate dieser Wichtungsfaktoren (α^2), deren Summe 1 ergibt, für die Variante A der für die Vorbemessung verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte grafisch dargestellt. Für den Richtungsverkehr (Bild 15) zeigt sich auch hier ein relativ homogenes Bild. Von den insgesamt 6 betrachteten Basisvariablen, von denen durch das Produkt der Variablen M_Q und $U_{E,M,Q}$ die stochastische Beschreibung der Verkehrseinwirkung realisiert wird, haben die Variable $U_{E,M,Q}$ und die Variable f_y zur stochastischen Beschreibung der Stahlstreckgrenze einen wesent-

lichen Anteil am Gesamtproblem. Der Anteil der Variablen M_Q und M_{G1} (Eigengewicht) ist gering und die angenommene Streuung der Betondruckfestigkeit und der Ausbaulast ist im betrachteten Beispiel ohne Bedeutung für das Gesamtproblem. Die Ursache für die nicht vorhandene Bedeutung der Streuung der Betondruckfestigkeit liegt vorwiegend darin, dass Druckbewehrung (zur Begrenzung der Druckzonenhöhe) angesetzt ist, die einen wesentlichen Teil der Druckkräfte abträgt, und sich damit die Bedeutung der Streuung der Stahlstreckgrenze erhöht.

Für den Begegnungsverkehr (Bild 16) sind die prinzipiellen Aussagen analog zum Richtungsverkehr,

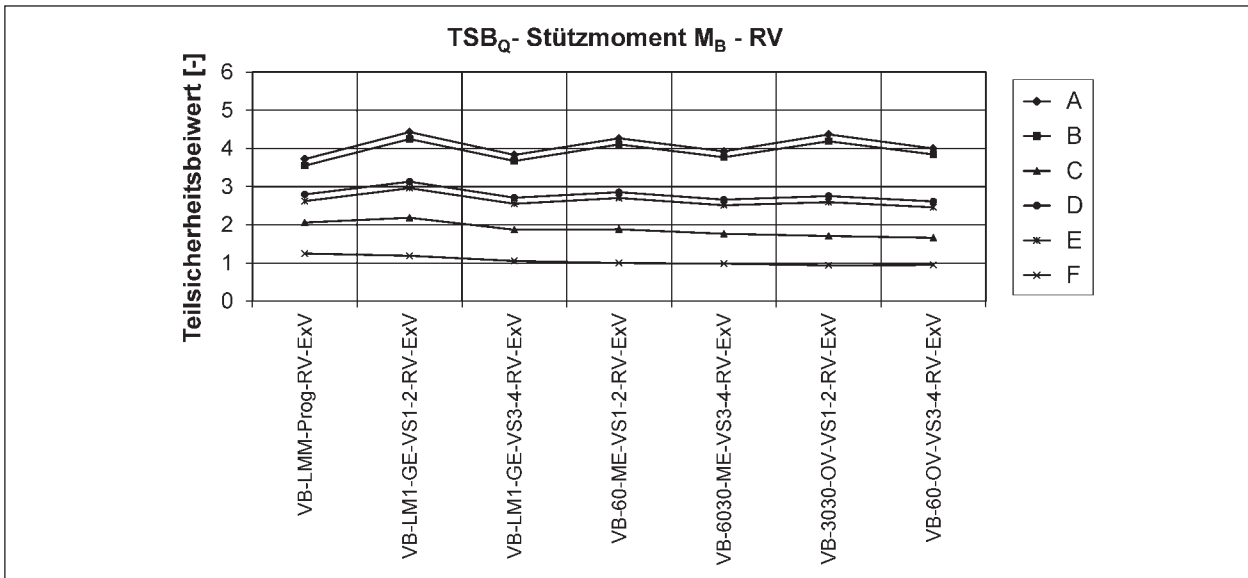


Bild 17: Teilsicherheitsbeiwerte Verkehrslast für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr)

wobei das Gesamtbild weniger homogen ist. Insbesondere für die Modelle ME und OV ergeben sich für die höhere Verkehrsstärke (VS3-4) ein geringerer Wichtungsfaktor für $U_{E,M,Q}$ und ein nahezu entsprechend höherer Wichtungsfaktor für f_y . Betrachtet man die in Tabelle 6 aufgeführten Standardabweichungen für U_2 (entspricht $U_{E,M,Q}$), so zeigt sich, dass diese für den Begegnungsverkehr mit höheren Verkehrsstärken für die Modelle GE, ME und OV deutlich geringer sind als für die geringeren Verkehrsstärken oder den Richtungsverkehr. Für die Modelle ME und OV bewirkt dies eine deutliche Abnahme des Wichtungsfaktors von $U_{E,M,Q}$, während es für das Modell GE keine deutliche Auswirkung aufweist.

Nach den oben aufgeführten Darstellungen von Sicherheitsindizes und Wichtungsfaktoren wird nun auf die ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte für die Verkehrslast eingegangen. Die Verkehrseinwirkung wird über das Produkt aus den Basisvariablen M_Q (U_1) und $U_{E,M,Q}$ (U_2) beschrieben. Für beide Basisvariablen erhält man aus den Untersuchungen Bemessungswerte. Das Produkt dieser Bemessungswerte ist der Bemessungswert für die Verkehrseinwirkung, genauer der Bemessungswert für das Stützmoment infolge Verkehrs. Dem gegenüber steht der definierte charakteristische Wert (mittlere Wiederkehrperiode 1.000 Jahre), der für die einzelnen betrachteten Varianten des aktuellen und zukünftigen bzw. des aktuellen objektspezifischen Verkehrs in Tabelle 6 für das Stützmoment M_B zusammengestellt ist. Die mit Gleichung (6.2) ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte (nachfolgend mit TSB_Q be-

zeichnet) sind in Bild 17 und Bild 18 für den betrachteten Richtungsverkehr und Begegnungsverkehr zusammengestellt. Für den Richtungsverkehr (Bild 17) ergibt sich, wie bei den Sicherheitsindizes und Wichtungsfaktoren, wieder ein relativ homogenes Bild zwischen den verschiedenen Verkehrsvarianten. Für die Vorbemessungen mit Teilsicherheitsbeiwerten nach Variante A und B ergibt sich im Mittel ein Teilsicherheitsbeiwert von ca. 4. Die Ergebnisse liegen damit deutlich über den normativ festgelegten Teilsicherheitsbeiwerten für Verkehrseinwirkungen (1,5 bzw. 1,35). Zu berücksichtigen ist hierbei aber, dass die zugehörigen Sicherheitsindizes ebenfalls deutlich über dem „normativen Grenzwert“ von 3,65 (vgl. Kapitel 2.1) liegen. Für den Begegnungsverkehr (Bild 18) sind die ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte in ähnlicher Größenordnung, allerdings untereinander weniger homogen.

Der Bemessungswert einer normalverteilten Basisvariablen ergibt sich nach Gleichung (6.3) und für eine Basisvariable, die einer Extremwertverteilung Typ 1 folgt, ergibt sich der Bemessungswert nach Gleichung (6.4).

$$x_{D,NV} = m_{x,NV} + \alpha_x \cdot \beta \cdot \sigma_{x,NV} \quad (6.3)$$

$$x_{D,ExV} = u_{x,ExV} - \frac{1}{\alpha_{x,ExV}} (\ln(-\ln(\Phi(\alpha_x \cdot \beta)))) \quad (6.4)$$

mit: Φ als Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Für einen hohen Sicherheitsindex ergibt sich somit bei einer Normalverteilung für einen gegebenen Er-

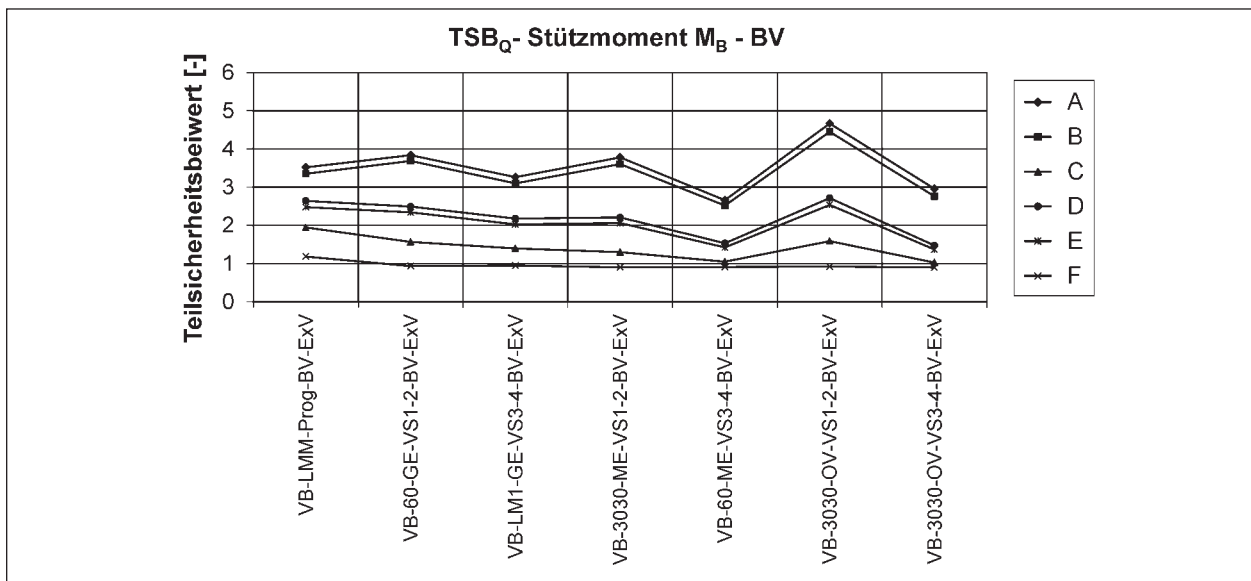


Bild 18: Teilsicherheitsbeiwerte Verkehrslast für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Begegnungsverkehr)

wartungswert m_x , eine gegebene Standardabweichung σ_x und einen gegebenen Wichtungsfaktor α_x ein entsprechend hoher Bemessungswert, aus dem für einen definierten charakteristischen Wert ein Teilsicherheitsbeiwert folgt. Für die Extremwertverteilung Typ 1 sind die Zusammenhänge analog. Setzt man für die Basisvariablen M_Q (U1) und $U_{E,M,Q}$ (U2) in Gleichung (6.4) den „normativen Grenzwert“ für β von 3,65 ein, behält die stochastische Beschreibung der Basisvariablen bei und nimmt an, dass die ermittelten Wichtungsfaktoren konstant bleiben, so erhält man über die berechneten Bemessungswerte die in Bild 19 und Bild 20 dargestellten Teilsicherheitsbeiwerte. Im Vergleich zu den direkt ermittelten Werten sind diese erwartungsgemäß deutlich kleiner, für den Richtungsverkehr (Bild 19) im Bereich von 2 und für den Begegnungsverkehr (Bild 20) im Bereich von 1,5 (für Variante A und B der Teilsicherheitsbeiwerte für die Vorbemessung). Die absoluten Unterschiede zwischen den weiteren Varianten der Teilsicherheitsbeiwerte für die Vorbemessung werden hier ebenfalls deutlich kleiner.

Diese Betrachtungsweise, in der lediglich der direkt aus zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen bestimmte Sicherheitsindex durch einen davon abweichenden Wert ersetzt und die übrigen Parameter beibehalten werden, ist nicht korrekt. Für die gegebenen Randbedingungen, bestehend aus deterministisch angenommenen Größen, die zum Teil einer „normativen“ Vorbemessung entstammen, und einer eingeschränkten Anzahl von als streuend angenommenen Basisvariablen mit jeweils festge-

legter stochastischer Beschreibung dieser, ergeben sich die oben aufgeführten Sicherheitsindizes. Niedrigere Sicherheitsindizes können sich nur unter Änderung dieser Randbedingungen ergeben, zum Beispiel durch veränderte Bewehrungsmengen (abweichend von Vorbemessung), größere Streuungen der betrachteten Basisvariablen oder zusätzliche streuende Basisvariablen. Damit einher geht aber auch eine Änderung der Wichtungsfaktoren, die ohne entsprechende zuverlässigkeitstheoretische Untersuchung nicht ermittelt werden kann.

Für eine Betrachtung hinsichtlich der Auswirkungen zusätzlicher streuender Basisvariablen werden nachfolgend die in Kapitel 3.2 aufgestellten Grenzzustandsgleichung enthaltenen Faktoren $U_{R,M}$ und $U_{E,M}$ zur Abbildung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite als streuend angenommen. In den oben aufgeführten Ergebnissen waren diese Faktoren deterministisch mit 1,0 belegt. In Bild 21 sind die resultierenden Sicherheitsindizes für den Richtungsverkehr aufgeführt, die sich bei Ansatz der Modellunsicherheiten nach Kapitel 5.1.3 und 5.2.3 auf der Widerstands- und Einwirkungsseite ergeben. In Bild 22 und Bild 23 sind die ermittelten Sicherheitsindizes für den Ansatz der Modellunsicherheiten nur auf der Widerstands- bzw. nur auf der Einwirkungsseite dargestellt.

In Bild 21 zeigen sich im Vergleich zu Bild 13 (ohne Modellunsicherheiten) deutlich kleinere Sicherheitsindizes. Ohne Berücksichtigung von Modellunsicherheiten lagen die Ergebnisse relativ homogen

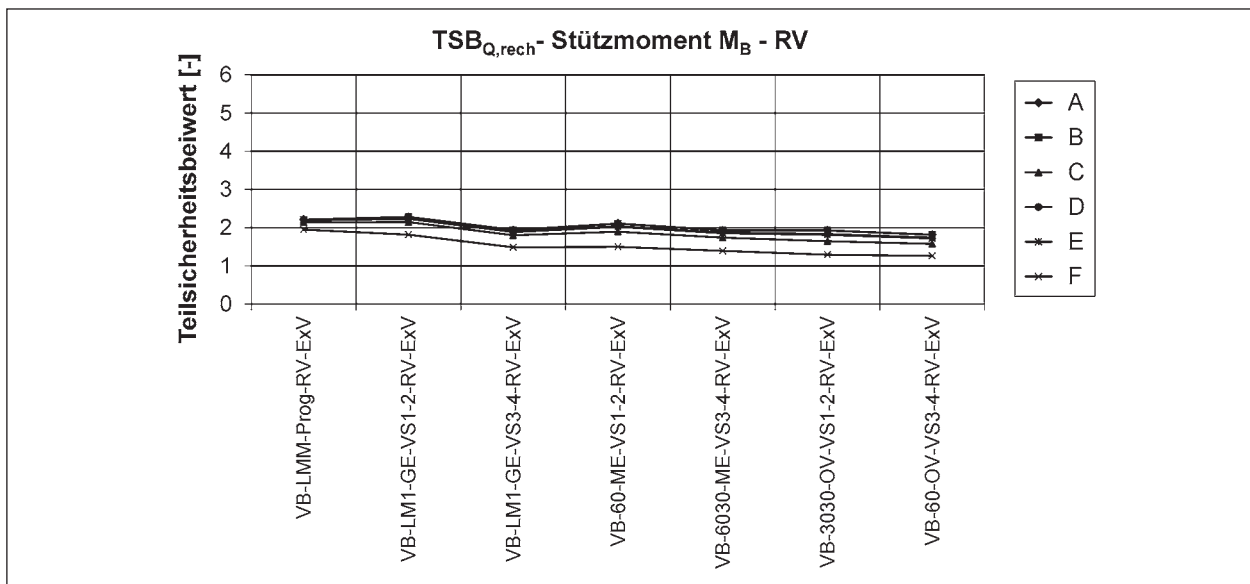


Bild 19: Rechnerische Teilsicherheitsbeiwerte Verkehrslast (für $\beta = 3,65$) für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr)

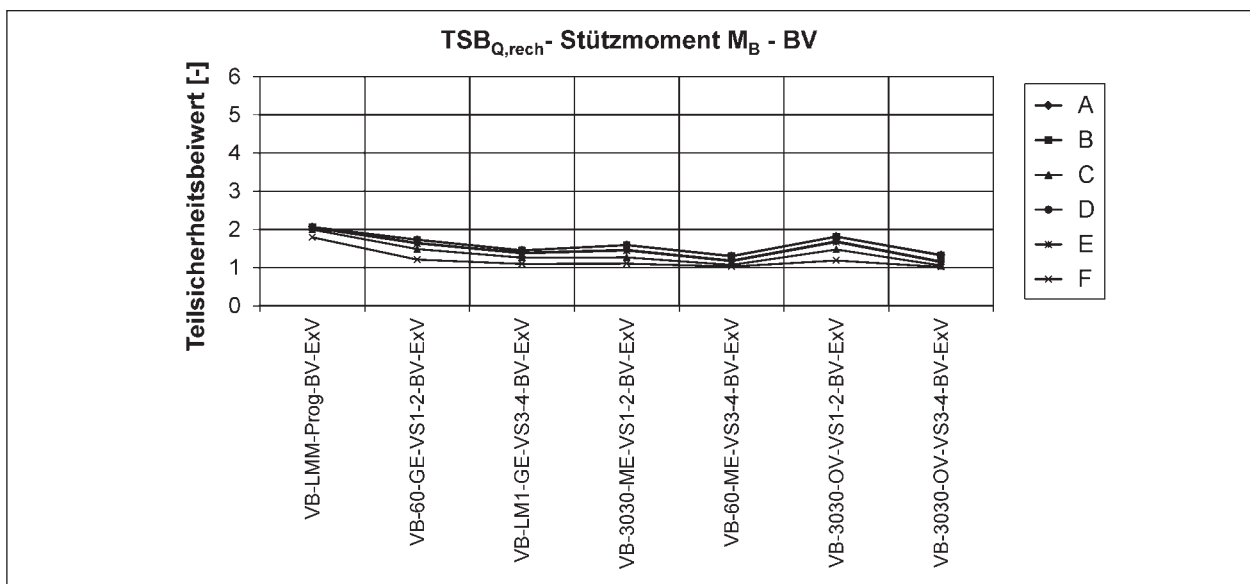


Bild 20: Rechnerische Teilsicherheitsbeiwerte Verkehrslast (für $\beta = 3,65$) für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Begegnungsverkehr)

bei 8 (für Varianten A und B) und unter Ansatz von Modellunsicherheiten bei den identischen Varianten der Teilsicherheitsbeiwerte für die Vorbemessung (A und B) ebenso homogen bei 5. Werden Modellunsicherheiten nur auf der Widerstandsseite in dieser Form angesetzt, liegen die resultierenden Sicherheitsindizes im Mittel knapp unter 7 (vgl. Bild 22) und für Modellunsicherheiten nur auf der Einwirkungsseite knapp unter 6 (vgl. Bild 23).

Für den Begegnungsverkehr sind die Darstellungen der Sicherheitsindizes unter Ansatz von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und/oder Einwirkungsseite im Anhang A1 in Bild A.10 bis Bild A.12

aufgeführt. Die Verringerung der Werte ist hierbei prinzipiell analog zum Richtungsverkehr aber, wie bei den Ergebnissen ohne Ansatz von Modellunsicherheiten, weniger homogen zueinander als beim Richtungsverkehr.

Die Darstellung der Wichtungsfaktoren für den Richtungsverkehr (für Variante A der Teilsicherheitsbeiwerte für die Vorbemessung) in Bild 24 wird durch die Berücksichtigung der Modellunsicherheiten durch diese zusätzlichen Basisvariablen im Vergleich zu Bild 15 erweitert. Es wird deutlich, dass die Modellunsicherheiten auf der Widerstandsseite ($U_{R,M}$) unabhängig von der stochastischen Be-

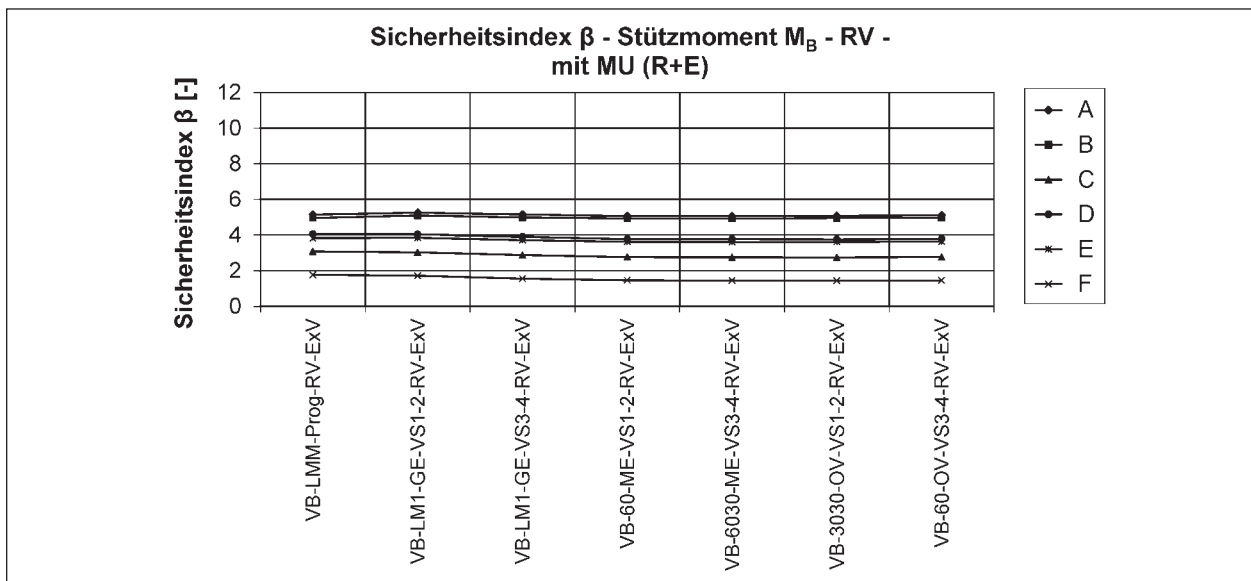


Bild 21: β -Werte für Zuordnung Vorbemessung — Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite)

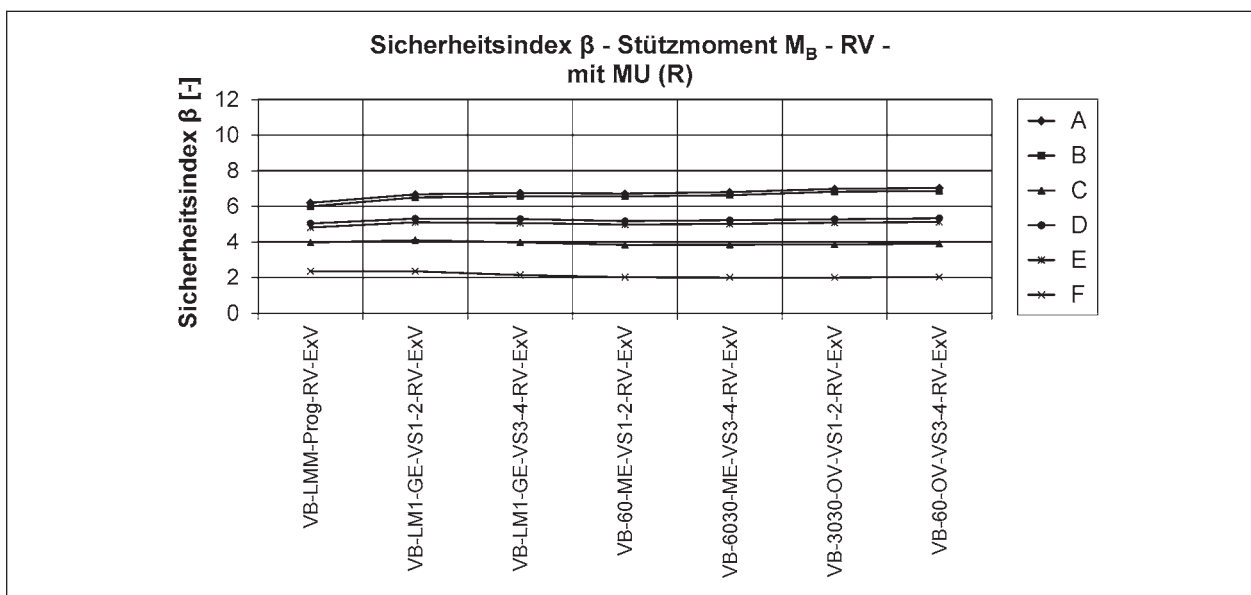


Bild 22: β -Werte für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstandsseite)

schreibung der Verkehrseinwirkung (x-Achse im Diagramm) einen annähernd gleichen Wichtungsfaktor (dargestellt ist das Quadrat dieser Faktoren) von $\alpha^2 \approx 0,25$ aufweisen. Für die Modellunsicherheiten auf der Einwirkungsseite ($U_{E,M}$) ist die Größe dieses Faktors aber abhängig von der Beschreibung der Verkehrseinwirkung und liegt zwischen $\alpha^2 \approx 0,26$ und $\alpha^2 \approx 0,49$. Die Wichtungsfaktoren für die Streckgrenze des Bewehrungsstahls (f_y) werden etwas und die für die Basisvariable $U_{E,M,Q}$ deutlich kleiner. Die Summe der Faktoren α^2 aus allen Basisvariablen ohne $U_{R,M}$ und $U_{E,M}$ liegt zwischen 0,54 und 0,25.

Für den Ansatz von Modellunsicherheiten nur auf der Widerstandsseite sind die Wichtungsfaktoren in Bild 25 aufgeführt. Für $U_{R,M}$ liegt der Wert für α^2 zwischen 0,21 und 0,39 und die Summe der Faktoren der übrigen Basisvariablen entsprechend zwischen 0,79 und 0,61. Hier hat wieder $U_{E,M,Q}$ einen großen Anteil am „Gesamtproblem“. Die Darstellung der Wichtungsfaktoren für den Ansatz von Modellunsicherheiten nur auf der Einwirkungsseite ist in Bild 26 gegeben. Für $U_{E,M}$ liegt der Wert für α^2 hier zwischen 0,24 und 0,64 und die Summe der Faktoren der übrigen Basisvariablen entsprechend zwischen 0,76 und 0,36.

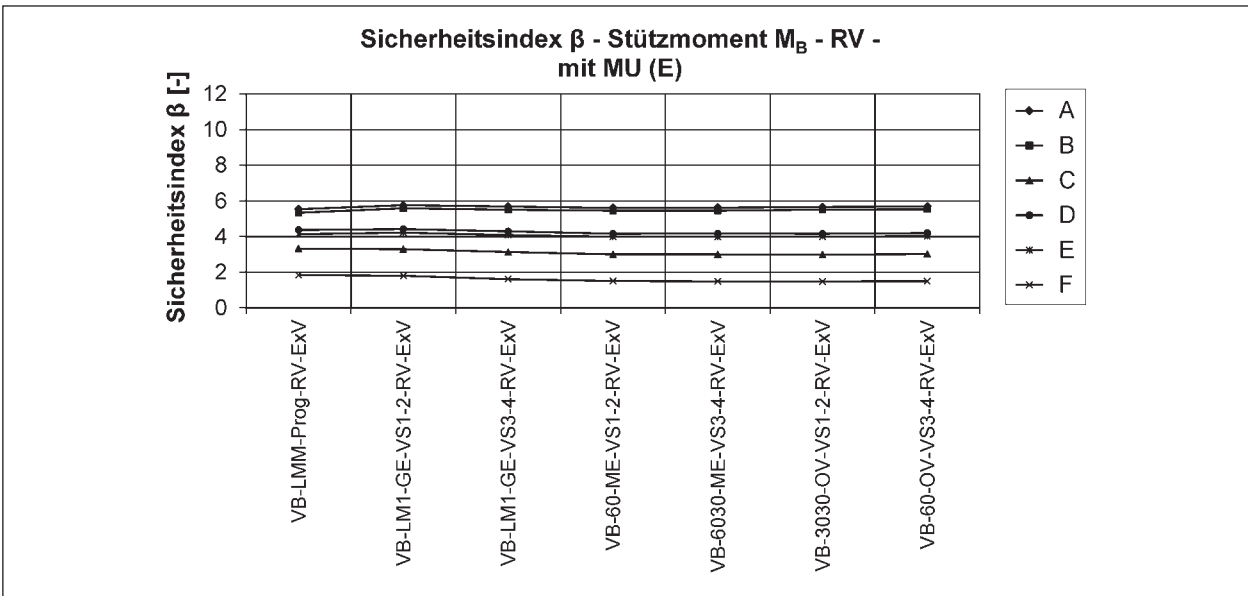


Bild 23: β -Werte für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Einwirkungsseite)

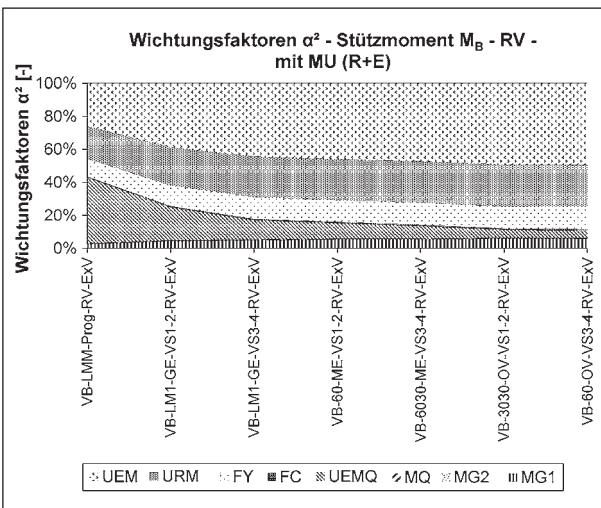


Bild 24: Wichtungsfaktoren α^2 für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite)

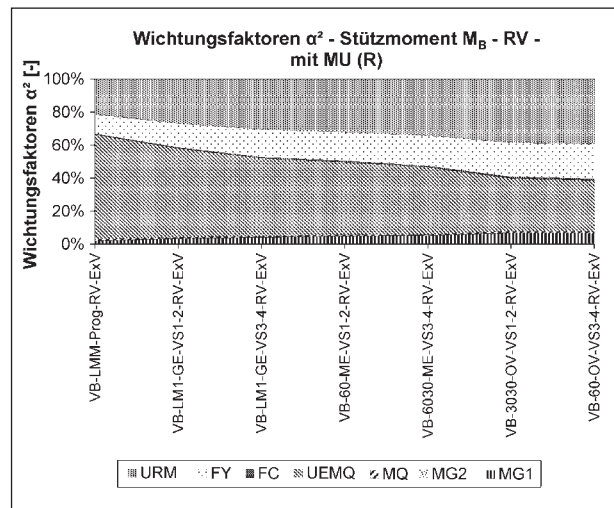


Bild 25: Wichtungsfaktoren α^2 für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstandsseite)

Die Darstellungen für den Begegnungsverkehr sind im Anhang A.1, Bild A.28 bis Bild A.30 zusammengefasst.

In Bild 27 sind die ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte für die Verkehrseinwirkungen unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite für den Richtungsverkehr dargestellt. Während sich ohne Modellunsicherheiten der Bemessungswert der Verkehrseinwirkung aus dem Produkt der einzelnen Bemessungswerte von M_Q (U_1) und $U_{E,M,Q}$ (U_2) ergibt, ist es im vorliegenden Fall das Produkt aus

den Bemessungswerten von M_Q , $U_{E,M,Q}$ und $U_{E,M}$. Da die Modellunsicherheit auf der Einwirkungsseite entsprechend Gleichung (3.13) als Vorfaktor für die Summe aus den Momenten aller Einwirkungen (M_E) verwendet wird, werden somit auch alle Basisvariablen zur Abbildung dieser Einwirkungen in gleichem Maß vergrößert. In Bild 27 wird ersichtlich, dass für die stochastischen Beschreibungen der Verkehrseinwirkungen eines aktuellen objekt-spezifischen Verkehrs (GE, ME, OV) die ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte relativ homogen bei knapp unter 1,5 liegen. Nur für den aktuellen und prognostizierten Verkehr („Prog“) ergibt sich ein

etwas höherer Wert von knapp über 2,0 (jeweils für die Varianten A und B der verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte für die Vorbemessung). Aus den oben dargestellten Wichtungsfaktoren wird deutlich, dass die Modellunsicherheit auf der Einwirkungsseite ($U_{E,M}$) einen wesentlichen Anteil am „Gesamtproblem“ und damit auch an den ermittelten Teilsicherheitsbeiwerten hat. Zur Darstellung dieses Anteils sind in Bild 28 die Bemessungswerte

te dieser Basisvariablen dargestellt. Diese liegen, abgesehen vom aktuellen und prognostizierten Verkehr („Prog“), bei rund 1,4. Es zeigt sich also, dass der ermittelte Teilsicherheitsbeiwert im Wesentlichen durch diese Basisvariable bestimmt wird. Das Produkt aus M_Q und $U_{E,M,Q}$ liegt hier in einigen Fällen unter 1,0, der ermittelte Bemessungswert für diese beiden Variablen ist also zum Teil kleiner als der charakteristische Wert (mittlere Wiederkehrperiode von 1.000 Jahren). Für den Ansatz von Modellunsicherheiten nur auf der Widerstands- bzw. nur auf der Einwirkungsseite sind die ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte für den Richtungsverkehr im Anhang A.1 in Bild A.15 und Bild A.16 aufgeführt.

Für den Begegnungsverkehr sind die ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte unter Ansatz von Modellunsicherheiten im Anhang A.1 in Bild A.18 bis Bild A.20 zusammengestellt. In Bild A.31 bis Bild A.38 sind des Weiteren sowohl für den Richtungsverkehr als auch für den Begegnungsverkehr die Bemessungswerte für die Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite ($U_{R,M}$ und $U_{E,M}$) zusammengefasst.

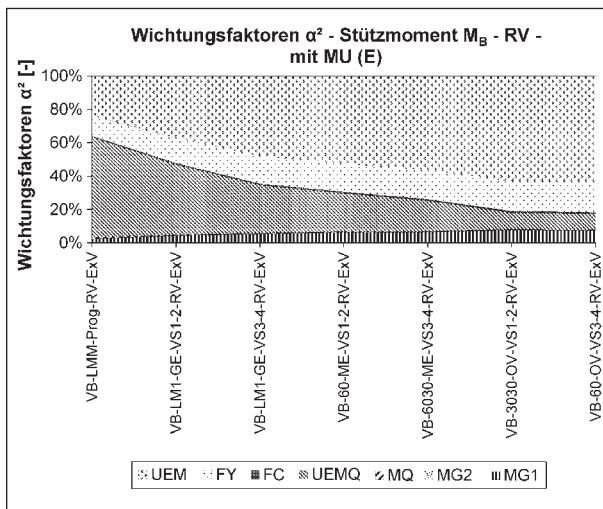


Bild 26: Wichtungsfaktoren α^2 für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Einwirkungsseite)

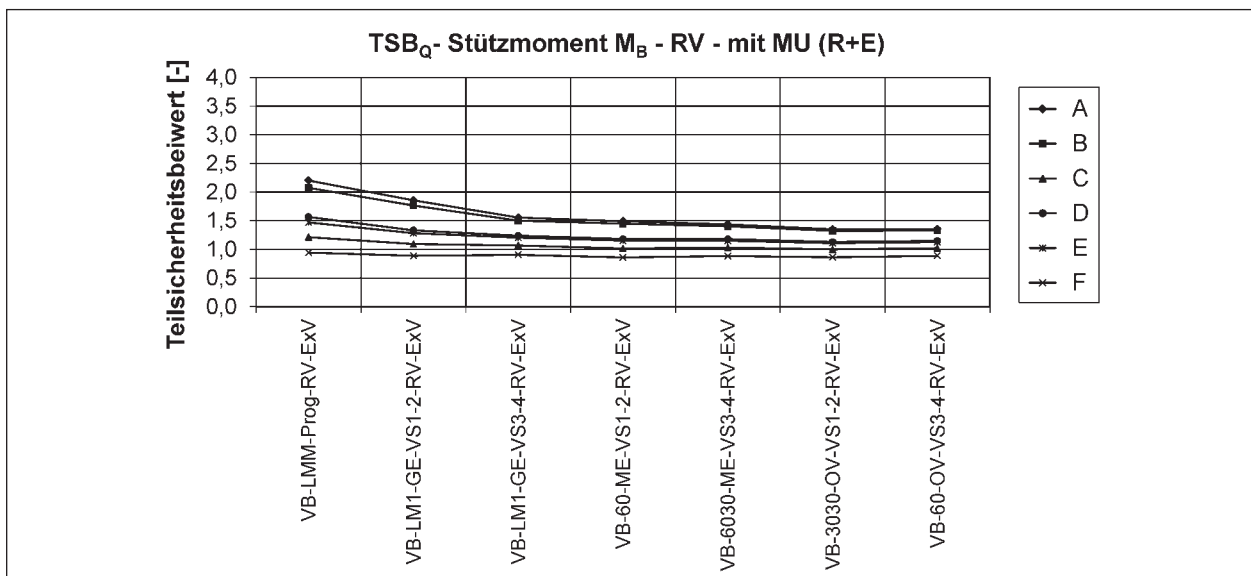


Bild 27: Teilsicherheitsbeiwerte Verkehrslast für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite)

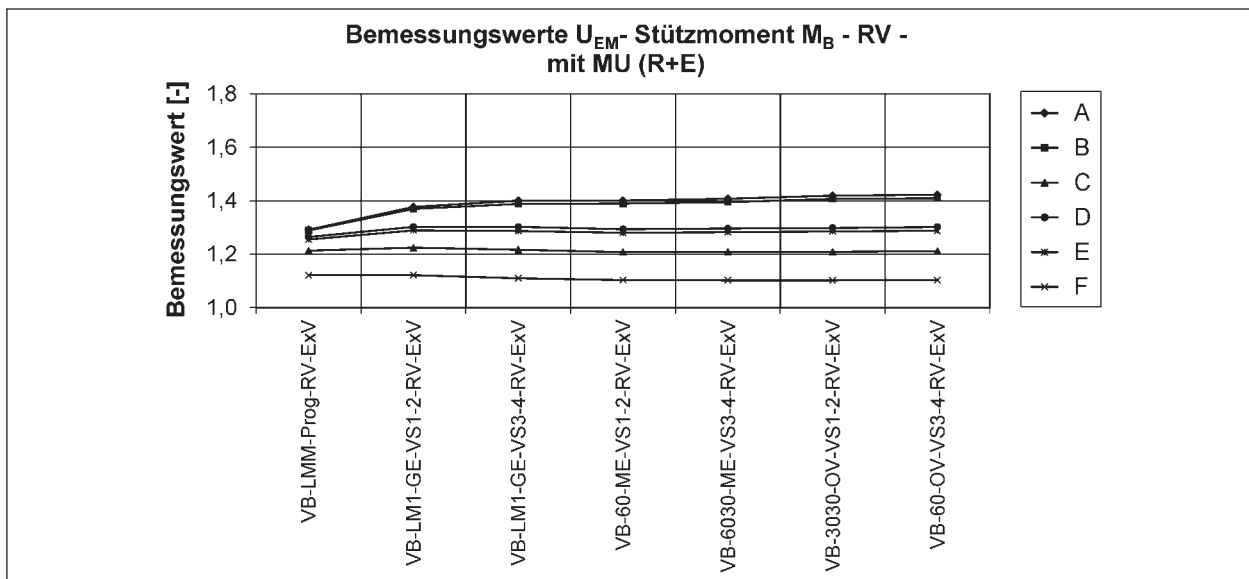


Bild 28: Bemessungswerte U_{EM} für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite)

6.4.3 Ergebnisse aus Analysen für das Stützmoment M_B unter Annahme eines halbierten charakteristischen Wertes für das Eigengewicht

Nachfolgend wird auf die Ergebnisse der zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen eingegangen, in denen ein halbiertes charakteristisches Wert für das Stützmoment M_B infolge Eigengewichts angenommen wurde. Der Erwartungswert in der stochastischen Beschreibung der Basisvariable $M_{G,1}$ beträgt statt $-22.809,16$ kNm (vgl. Kapitel 6.1) hier $-11.404,58$ kNm. Der Variationskoeffizient wurde beibehalten, sodass sich hier auch die Standardabweichung der für die stochastische Beschreibung verwendeten Normalverteilung halbiert. Diese Annahme zum Moment infolge Eigengewichts stellt lediglich eine Analyse zur Auswirkung einer solchen Veränderung, also einem deutlich kleineren Anteil des Momentes aus Eigengewicht am Gesamtmoment, auf die Ergebnisse der zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen dar und hat keinen Bezug zu dem hier eigentlich betrachteten Tragssystem und Querschnitt.

Mit dem veränderten charakteristischen Wert für das Moment infolge Eigengewichts ergeben sich neben der veränderten stochastischen Beschreibung der Basisvariablen auch veränderte Bewehrungsmengen aus der Vorbemessung (vgl. Kapitel 6.2, Tabelle 13).

Die aus diesen Untersuchungen ermittelten Sicherheitsindizes für den Richtungsverkehr sind in Bild

29 dargestellt (ohne Ansatz von Modellunsicherheiten). Für einen direkten Vergleich mit den ermittelten Sicherheitsindizes aus den Betrachtungen mit vollem Gesamtgewicht sind in Bild 30 die Verhältnisse zwischen den in Bild 29 und den in Bild 13 (Seite 34) aufgeführten Werten dargestellt. Ist das Verhältnis kleiner als 1,0 so sind demnach die Sicherheitsindizes unter Ansatz des halben Eigengewichtes kleiner als die aus dem Ansatz mit vollem Eigengewicht ermittelten. Abgesehen von der Variante F der verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte (vgl. Tabelle 10) für die Vorbemessung zur Ermittlung der Bewehrungsmenge ergibt sich über die verschiedenen betrachteten Verkehrscharakteristiken hinweg relativ homogen ein Verhältnis von ca. 0,87. Die Halbierung des Erwartungswertes in der stochastischen Beschreibung der Basisvariablen $M_{G,1}$ führt also unabhängig von der Vorbemessung zu einer Verringerung des Sicherheitsindex um ca. 13 %.

Werden zusätzlich Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite berücksichtigt, so ergeben sich Sicherheitsindizes, die in Form des Verhältnisses zu den Ausgangswerten (vgl. Bild 21) in Bild 31 dargestellt sind. Die Darstellung der ermittelten Sicherheitsindizes selbst findet sich im Anhang A.2 in Bild A.40. Es wird deutlich, dass die Verhältniswerte hier, abgesehen von Variante F der verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte für die Vorbemessung, sehr nahe bei 1,0 liegen (im Mittel bei ca. 1,02). Mit Ansatz der Modellunsicherheiten hat somit eine Veränderung des Erwartungswertes für

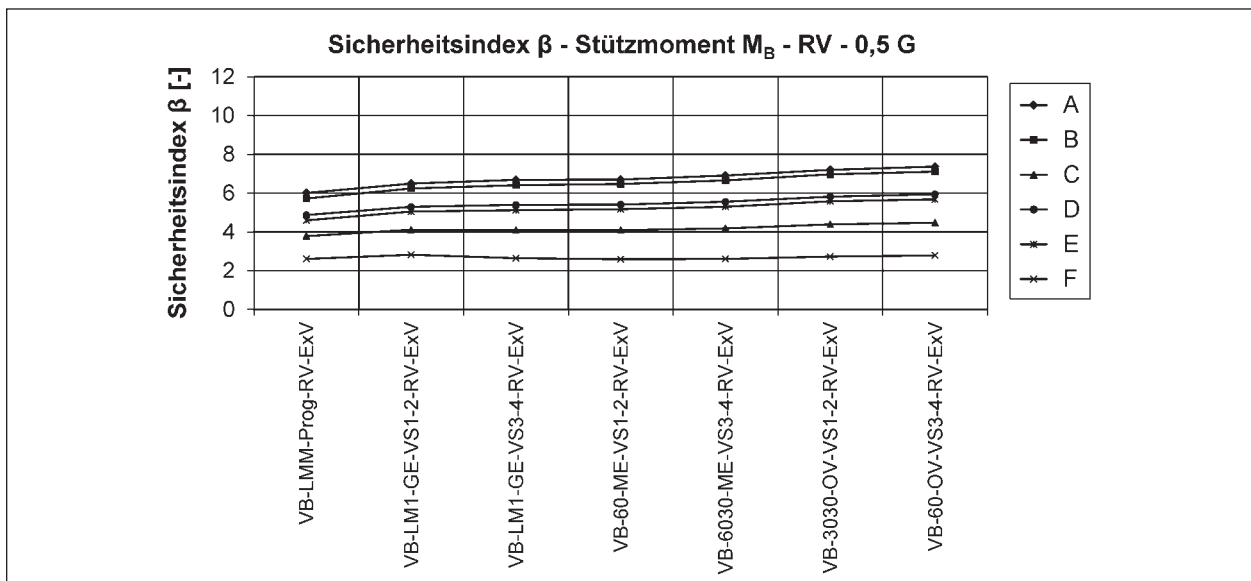


Bild 29: β -Werte für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr) – 0,5 G

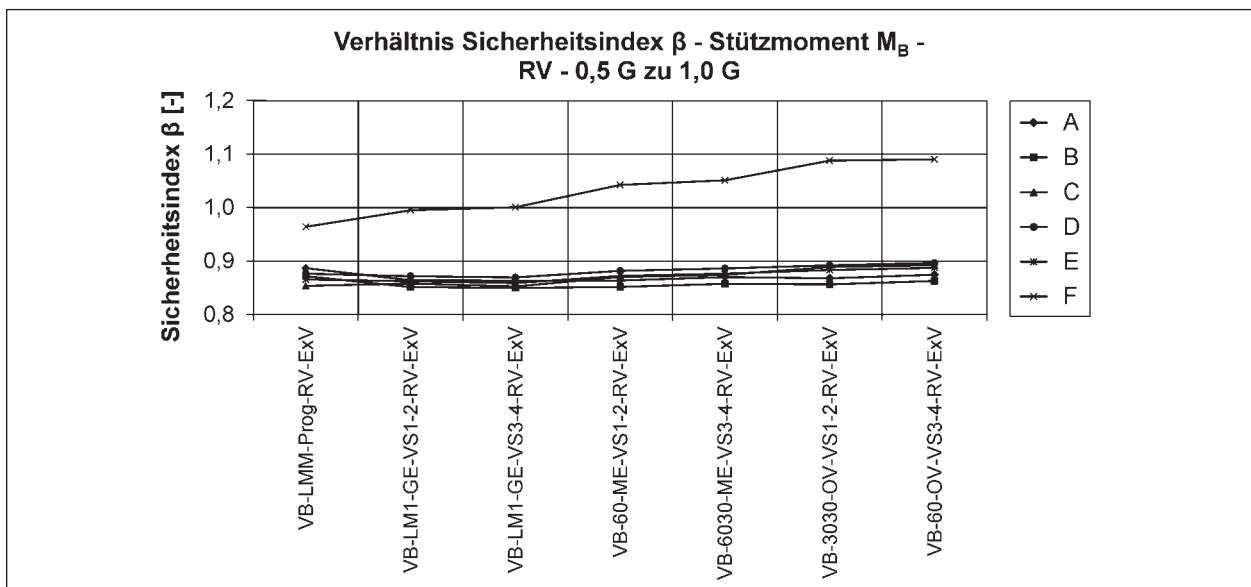


Bild 30: Verhältnis β -Werte 0,5 G zu 1,0 G für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr)

das Moment infolge Eigengewichts (bei gleichzeitiger Änderung der Bewehrungsmenge aus der Vorbemessung) keinen wesentlichen Einfluss auf die ermittelten Sicherheitsindizes. Die Darstellungen (Sicherheitsindex und Verhältnisse zu den Ausgangswerten) für den Begegnungsverkehr sind dem Anhang A.2 in Bild A.41 und Bild A.42 bzw. Bild A.45 und Bild A.46 zu entnehmen.

Aus der Darstellung der ermittelten Wichtungsfaktoren in Bild 32 wird im Vergleich zur Ausgangsvariante (vgl. Bild 15, Seite 35) deutlich, dass der ohnehin bereits sehr geringe Anteil der Basisvariable $M_{G,1}$ am Gesamtproblem hier nahezu nicht vorhanden ist. Parallel dazu nimmt aber auch der Wich-

tungsfaktor für die Stahlstreckgrenze f_y leicht ab. Der Wichtungsfaktor für die Basisvariable $U_{E,M,Q}$ vergrößert sich. Diese Verschiebungen zwischen den Basisvariablen auf der Einwirkungsseite sind erwartungsgerecht.

In Bild 33 sind die Wichtungsfaktoren aus dem Ansatz des halben charakteristischen Wertes für das Eigengewicht mit zusätzlicher Berücksichtigung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite dargestellt. In Gegenüberstellung zu Bild 24 (siehe Seite 40) zeigt sich, dass die Summe der Faktoren α^2 aus allen Basisvariablen ohne $U_{R,M}$ und $U_{E,M}$ zwischen 0,75 und 0,42 liegt. In Bild 24 lagen diese Werte zwischen 0,54 und

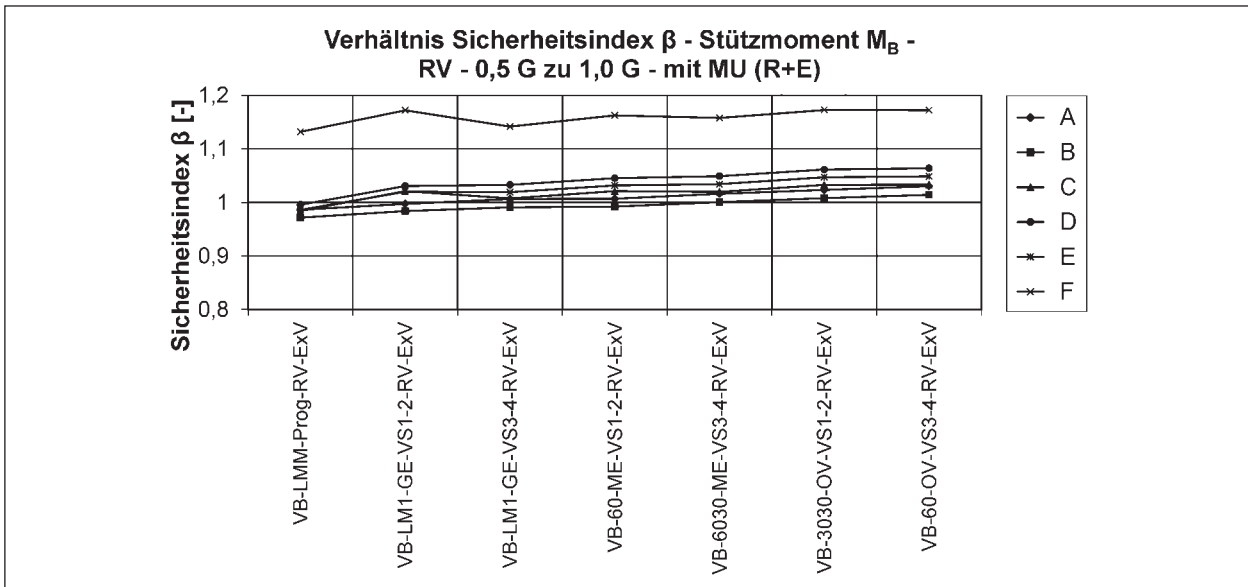


Bild 31: Verhältnis β -Werte 0,5 G zu 1,0 G für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite)

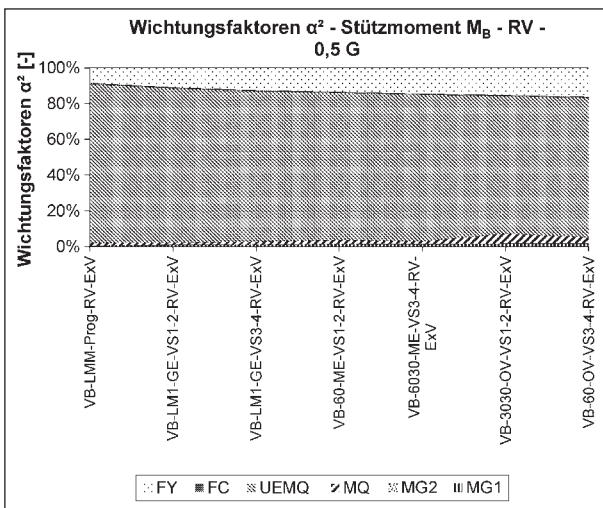


Bild 32: Wichtungsfaktoren α^2 für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr) – 0,5 G

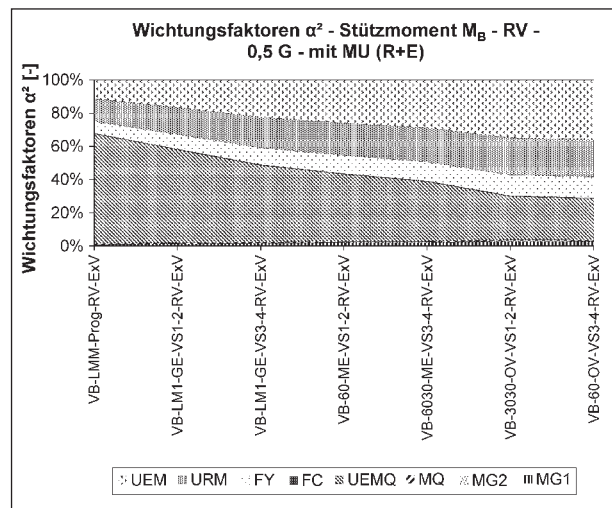


Bild 33: Wichtungsfaktoren α^2 für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite) – 0,5 G

0,25. Die Bedeutung der Modellunsicherheiten nimmt hier also ab. Vor allem der Wichtungsfaktor für $U_{E,M}$ verringert sich, da die Reduzierung des Erwartungswertes für das Eigengewicht hier deutlich zum Tragen kommt. Für den Begegnungsverkehr sind die analogen Darstellungen im Anhang A.2 in Bild A.53 und Bild A.54 gegeben.

In Bild 35 sind die resultierenden Teilsicherheitsbeiwerte für die Beanspruchung infolge Straßenverkehrs dargestellt. Der Vergleich zu Bild 17 (Seite 36) zeigt für alle betrachteten Fälle eine leichte Reduzierung des Teilsicherheitsbeiwertes. Da der definierte charakteristische Wert identisch ist, ist der

Grund für diese Veränderung ein verringerter Bemessungswert für das Produkt aus den Basisvariablen M_Q und $U_{E,M,Q}$. Die Verringerung der Sicherheitsindizes und die leichte Vergrößerung der Wichtungsfaktoren für $U_{E,M,Q}$ ergeben demnach zusammen in dem in Gleichung (6.3) und (6.4) prinzipiellen Zusammenhang zur Ermittlung der Bemessungswerte einen kleineren Bemessungswert für die Beanspruchung infolge Straßenverkehrs als in den Betrachtungen mit vollem charakteristischem Wert für das Eigengewicht.

Unter Berücksichtigung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite erge-

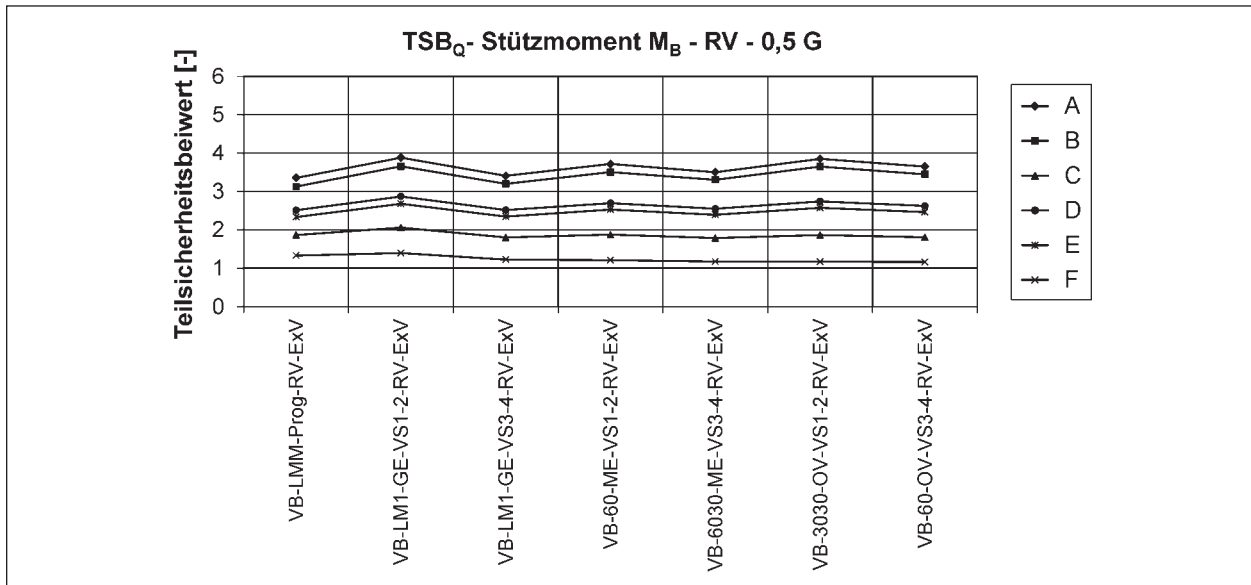


Bild 34: Teilsicherheitsbeiwerte Verkehrslast für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr) – 0,5 G

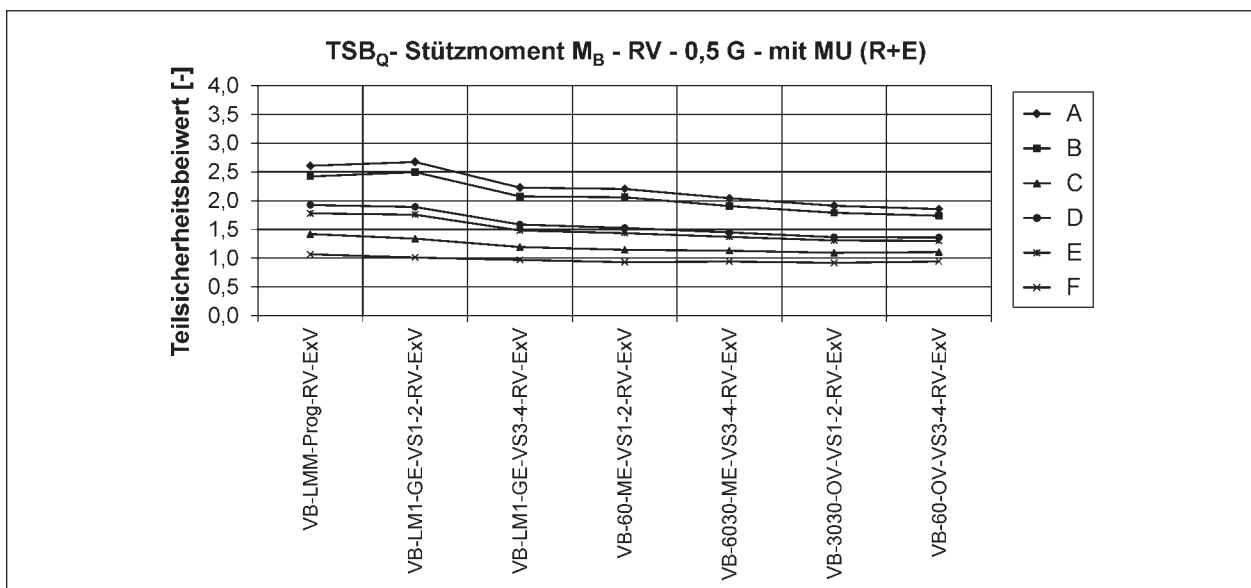


Bild 35: Teilsicherheitsbeiwerte Verkehrslast für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite) – 0,5 G

ben sich hingegen in Bild 35 im Vergleich zu Bild 27 höhere Teilsicherheitsbeiwerte, der Bemessungswert für das Produkt aus M_Q , $U_{E,M,Q}$ und $U_{E,M}$ wird also größer. Die Ursache hierfür ist die deutliche Vergrößerung des Wichtungsfaktors für die Basisvariable $U_{E,M,Q}$.

Für den Begegnungsverkehr sind die prinzipiellen Auswirkungen auf die ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte vergleichbar. Die entsprechenden Darstellungen sind im Anhang A.2 in Bild A.49 und Bild A.49 enthalten.

6.4.4 Ergebnisse aus Analysen für das Stützmoment M_B unter Annahme einer Verteilung von 20-Jahres-Maximalwerten für die Beanspruchung infolge Verkehrs

Eine weitere ergänzende Betrachtung bestand darin, die Beanspruchungen infolge Straßenverkehrs nicht durch eine stochastische Beschreibung der 100-Jahres-Maximalwerte abzubilden, sondern 20-Jahres-Maximalwerte darzustellen. Parallel dazu wurde der charakteristische Wert über eine mittlere Wiederkehrperiode von 200 Jahren statt 1.000 Jahren definiert. Die Vorbemessung, genauer die daraus ermittelte Bewehrungsmenge, wurde

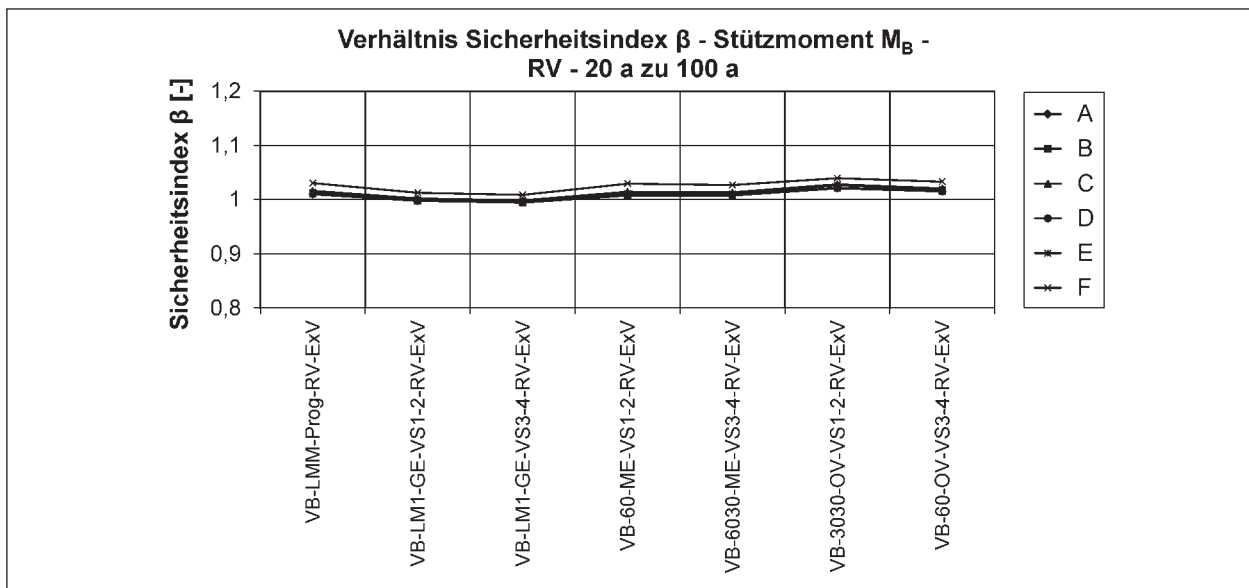


Bild 36: Verhältnis β -Werte 20 a zu 100 a für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr)

nicht verändert. In Bild 36 sind die Verhältnisse zwischen den hier ermittelten Sicherheitsindizes für den Richtungsverkehr und den Ergebnissen der Ausgangssituation (vgl. Bild 13, Seite 34) dargestellt. Es zeigt sich, dass diese Verhältnisse für alle betrachteten Varianten der Verkehrscharakteristik und auch alle Varianten der für die Vorbemessung verwendeten Teilsicherheitsbeiwerte sehr nahe bei 1,0 liegen, somit also keine wesentlichen Änderungen der Sicherheitsindizes auftreten. Im Anhang A.3 sind in Bild A.59 bis A.66 sowohl für den Richtungsverkehr als auch für den Begegnungsverkehr die ermittelten Sicherheitsindizes, Wichtungsfaktoren und Teilsicherheitsbeiwerte für Beanspruchung infolge des Straßenverkehrs dargestellt. Im Vergleich zur Ausgangssituation zeigt sich keine wesentliche Änderung der Ergebnisse.

6.4.5 Ergebnisse aus Analysen für das Feldmoment M_F

Die Ergebnisse für die Analysen hinsichtlich des Feldmomentes M_F sind im Anhang A.4 in Bild A.67 bis Bild A.102 analog zu den oben beschriebenen Ergebnissen für das Stützmoment M_B zusammengestellt. Nachfolgend wird hieraus auf einige ausgewählte Punkte eingegangen. In Bild 37 ist aus den Gesamtergebnissen das Verhältnis zwischen den Sicherheitsindizes aus den Betrachtungen des Stützmomentes M_B und des Feldmomentes M_F für den Richtungsverkehr dargestellt ($v = \beta_{M_B}/\beta_{M_F}$). In der Darstellung zeigt sich, dass in den meisten Fällen dieses Verhältnis kleiner als 1 ist, der Sicher-

heitsindex für das Feldmoment also größer ist als für das Stützmoment. Aus den in Bild 38 dargestellten Verhältnissen für den Begegnungsverkehr zeigt sich wiederum ein weniger homogenes Ergebnis.

Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und/oder Einwirkungsseite ergeben sich ähnliche Ergebnisse für diese Verhältnisse der Sicherheitsindizes. Im Anhang A.4 sind die entsprechenden Darstellungen in Bild A.96 bis Bild A.98 für den Richtungsverkehr und in Bild A.100 bis Bild A.102 für den Begegnungsverkehr hinterlegt. In Bild A.71 bis Bild A.78 sind die originalen Werte für die Sicherheitsindizes für die Betrachtung des Feldmomentes für den Richtungsverkehr und den Begegnungsverkehr ohne und mit Berücksichtigung von Modellunsicherheiten dargestellt.

Eine Auswahl ermittelter Wichtungsfaktoren (α^2) ist für den Richtungsverkehr in Bild 39 und Bild 40 (ohne Modellunsicherheiten und mit Modellunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite, Variante A der Teilsicherheitsbeiwerte für die Vorbemessung) dargestellt. Während die Ergebnisse aus der Betrachtung des Stützmomentes (vgl. Bild 15 und Bild 24) zwischen den verschiedenen Varianten des aktuellen objektspezifischen Verkehrs sehr homogen waren, zeigen sich hier deutliche Unterschiede. Vor allem für die Variante OV mit geringer Verkehrsstärke ergeben sich Abweichungen der Wichtungsfaktoren für die Basisvariablen $U_{E,M,Q}$ und f_y . Aus der Zusammenstellung der stochastischen Beschreibung der Beanspruchungen infolge

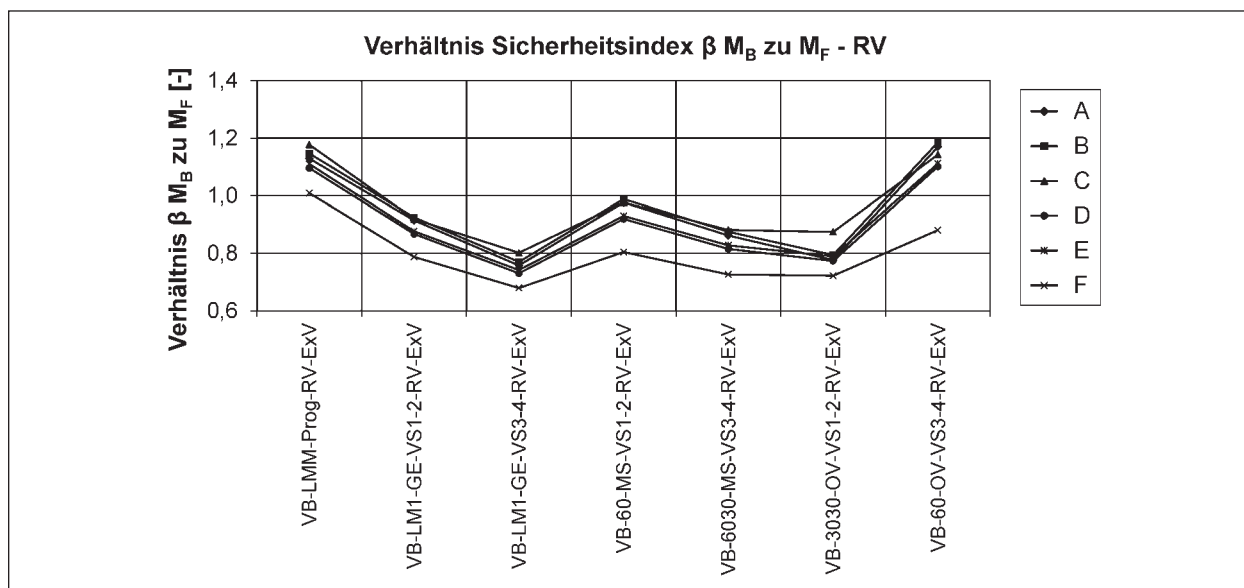


Bild 37: Verhältnis der Sicherheitsindizes für M_B und M_F zueinander für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr)

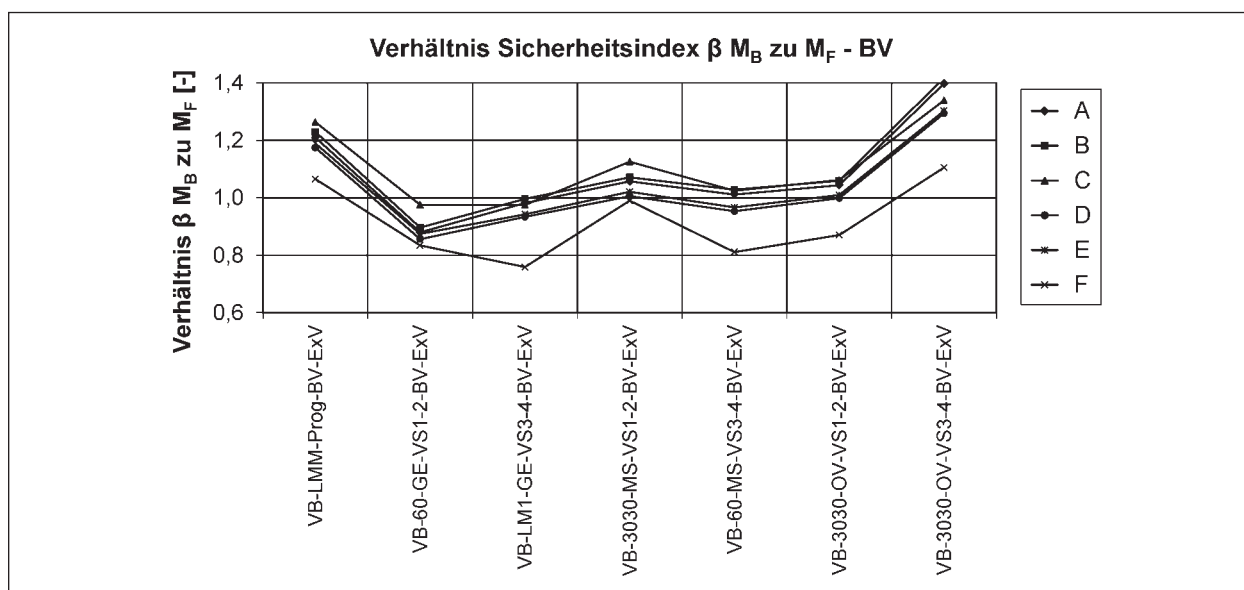


Bild 38: Verhältnis der Sicherheitsindizes für M_B und M_F zueinander für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Begegnungsverkehr)

Verkehrs in Tabelle 7 zeigt sich, dass sich hier aus der Kombination der Simulationsergebnisse eine Standardabweichung für $U_{E,M,Q}$ (U_2) von ca. 0,05 ergibt, während für die Varianten GE und ME (bei gleicher betrachteter Verkehrsstärke – 500/1.000) dieser Wert bei ca. 0,13 liegt. Die zusätzliche Berücksichtigung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite (Bild 40) verringert diese Unterschiede erheblich, da die Bedeutung aller übrigen Basisvariablen durch den Ansatz von $U_{R,M}$ und $U_{E,M}$, analog zu den oben aufgeführten Ergebnissen, abnimmt. Im Anhang A.4 sind die Darstellungen der Wichtungsfaktoren für den Rich-

tungsverkehr und den Begegnungsverkehr mit und ohne Ansatz von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und/oder Einwirkungsseite in Bild A.87 bis Bild A.94 zusammengestellt.

Abschließend werden in Bild 41 und Bild 42 die ermittelten Teilsicherheitsbeiwerte für die Verkehrseinwirkung (TSB_Q) für den Richtungverkehr ohne und mit Berücksichtigung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und Einwirkungsseite dargestellt. Insgesamt sind ohne Berücksichtigung von Modellunsicherheiten (Bild 41) die Teilsicherheitsbeiwerte hier etwas kleiner (um ca. 3,0) und weni-

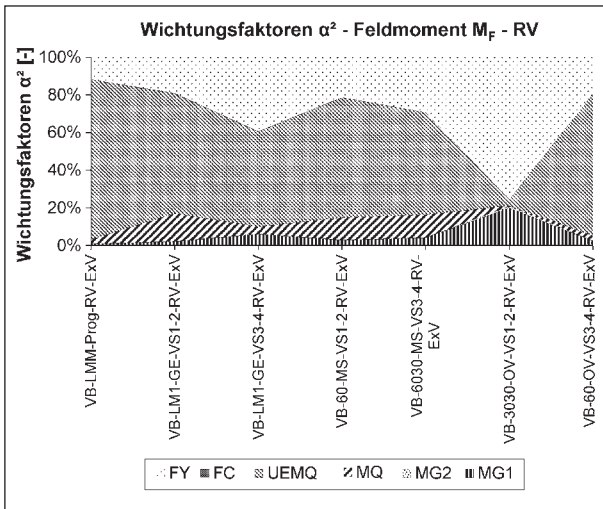


Bild 39: Wichtungsfaktoren α^2 für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr)

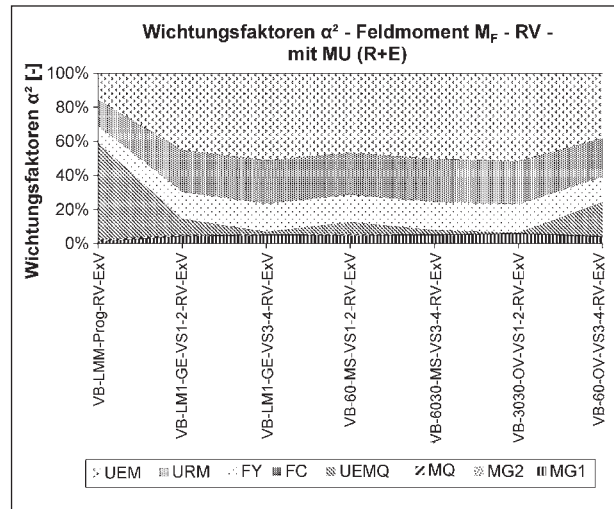


Bild 40: Wichtungsfaktoren α^2 für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modelunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite)

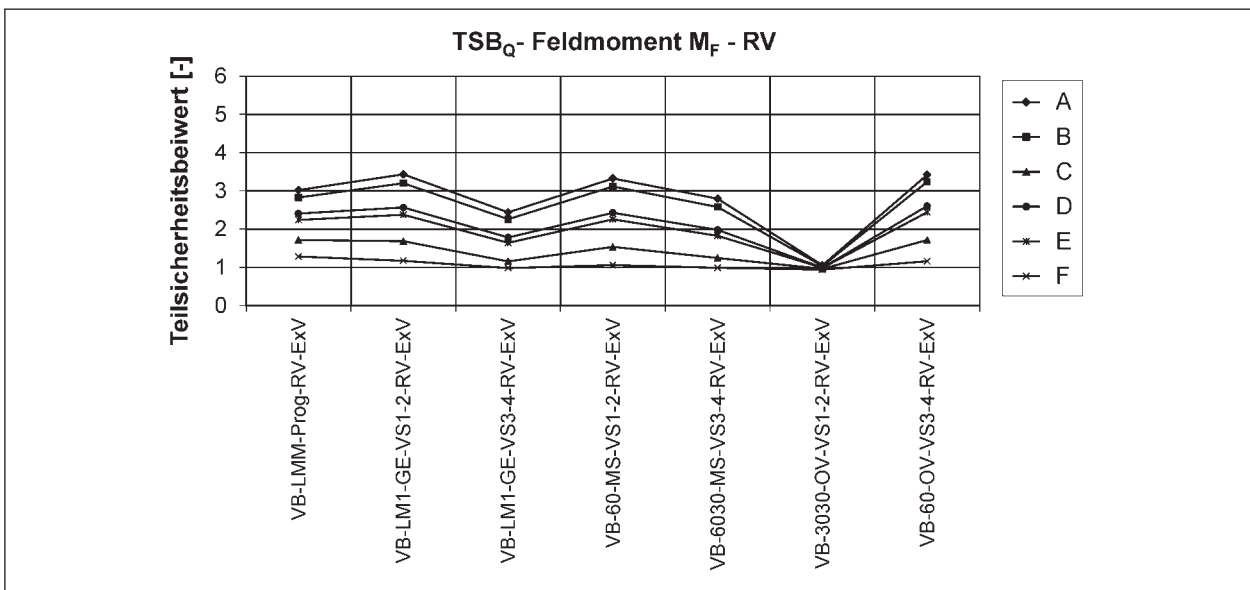


Bild 41: Teilsicherheitsbeiwerte Verkehrslast für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr)

ger homogen untereinander als bei den Betrachtungen des Stützmomentes (vgl. Bild 17). Während die Sicherheitsindizes für die Betrachtung des Feldmomentes im Wesentlichen höher sind als für die Betrachtung des Stützmomentes (vgl. Bild 37), ergeben sich im Verhältnis zum charakteristischen Wert niedrigere Bemessungswerte (und damit niedrigere Teilsicherheitsbeiwerte), weil die Streuungen der Variable $U_{E,M,Q}$ (U_2) im Vergleich zum Stützmoment wesentlich kleiner sind (vgl. Tabelle 6 mit Tabelle 7).

Unter Ansatz von Modellunsicherheiten (Bild 42) ergeben sich hingegen Teilsicherheitsbeiwerte, die nahezu identisch mit denen aus der Betrachtung des Stützmomentes ermittelten sind (vgl. Bild 27, Seite 41). Die Ursache hierfür liegt in den hohen Wichtungsfaktoren für die Basisvariable $U_{E,M}$. Das den Bemessungswert der Verkehrseinwirkung bildende Produkt aus M_Q , $U_{E,M,Q}$ und $U_{E,M}$ ist sowohl beim Stützmoment als auch beim Feldmoment von der identisch verwendeten Streuung von $U_{E,M}$ geprägt und liefert daher ähnliche Ergebnisse.

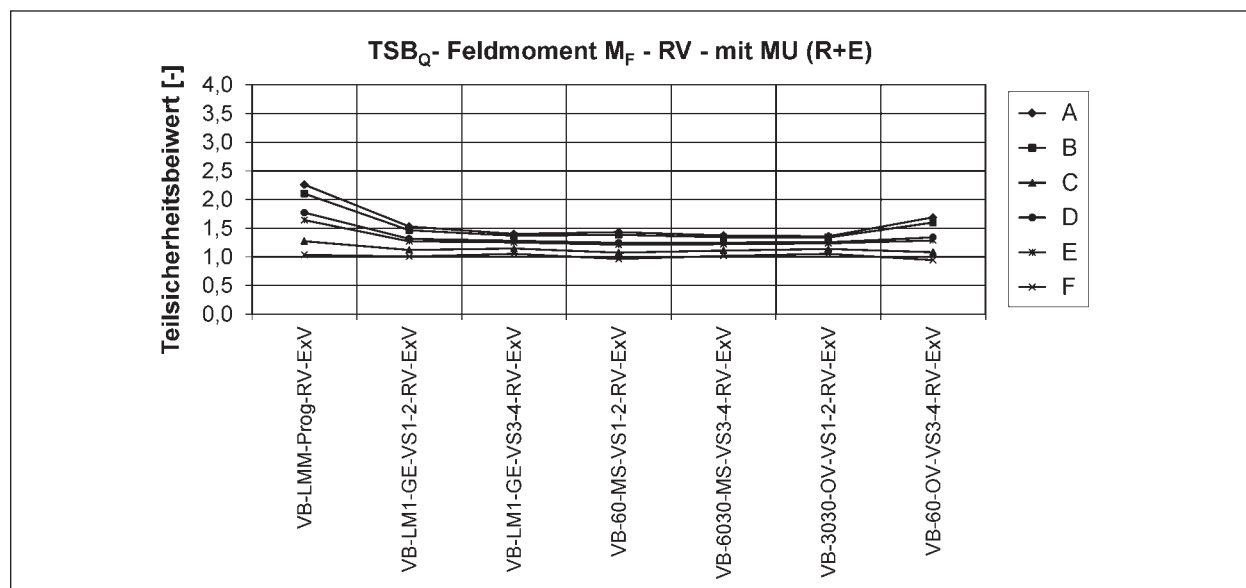


Bild 42: Teilsicherheitsbeiwerte Verkehrslast für Zuordnung Vorbemessung – Verkehrseinwirkung (Richtungsverkehr, Modellunsicherheiten auf Widerstands- und Einwirkungsseite)

7 Zusammenfassung

Im Rahmen der durchgeführten zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen wurde ein breites Spektrum von Stahlbetonquerschnitten untersucht, die sich hinsichtlich der Bewehrungsmenge unterscheiden. Die Bewehrungsmengen wurden hierbei durch Vorbemessungen unter Verwendung verschiedener Lastmodelle (zukünftig, aktuell und historisch) und variabler Teilsicherheitsbeiwerte (normative und gewählte) auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite ermittelt. Aus den in [4, 5] und [6] ermittelten Ergebnissen ergeben sich für Tragwerksreaktionen infolge von Straßenverkehr in Abhängigkeit der Verkehrscharakteristik (Verkehrsstärke und Verkehrszusammensetzung) verschiedene Lastmodelle, die diese Tragwerksreaktion hinsichtlich des charakteristischen Wertes abdecken.

Die für die zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen erforderlichen stochastischen Beschreibungen von Basisvariablen auf der Widerstands- und Einwirkungsseite erfolgten, abgesehen von den Beanspruchungen infolge des Straßenverkehrs, anhand von Literaturangaben. Für die stochastische Beschreibung der Beanspruchungen infolge des Straßenverkehrs wurde auf die Ergebnisse der in [4, 5] und [6] durchgeführten Simulationsrechnungen zurückgegriffen, in denen verschiedene Verkehrscharakteristiken untersucht wurden. Die Ergebnisse dieser Simulationsrechnungen liegen in Form von Parametern der Rice-Funktion vor, die aus der Anpassung an Histogramme von Klas-

sengrenzenüberschreitungshäufigkeiten ermittelt wurden. Aus diesen Parametern lässt sich direkt eine Verteilungsfunktion der Maximalwerte für einen beliebigen Referenzzeitraum bilden (z. B. Verteilungsfunktion der 100-Jahres-Maximalwerte). Eine getrennte Betrachtung der hiermit vorliegenden Einzelergebnisse aus den durchgeführten Simulationsrechnungen ist nicht sinnvoll. Eine geeignete Mischung der vorliegenden Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen und eine daraus abzuleitende stochastische Modellierung der Basisvariable Verkehrslast innerhalb von zuverlässigkeitstheoretischen Analysen sind erforderlich. Durch die Ausgestaltung dieser Mischungen können gegebenenfalls vorhandene Vorinformationen über ein objektbezogenes Verkehrsaufkommen (Verkehrsmenge, Verkehrszusammensetzung) verarbeitet werden. Hierzu wurde vom Forschernehmer eine Vorgehensweise entwickelt, dargestellt und in den Untersuchungen angewendet.

Aus den vorgestellten Ergebnissen der zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchungen zeigt sich, dass bei einer stochastischen Beschreibung der Beanspruchung infolge Straßenverkehrs für eine in gewissem Umfang bekannte Verkehrscharakteristik und einer Vorbemessung mit einem Lastmodell, für das eine Abdeckung der charakteristischen Werte identifiziert wurde (vgl. auch Ziellastniveau in der Nachrechnungsrichtlinie [21]) das Sicherheitsniveau annähernd gleich ist. Die ermittelten Absolutwerte der Sicherheitsindizes sind hierbei aber deutlich höher als der „normative Mindestwert“ von

3,65 (bezogen auf 100 Jahre). Für den Begegnungsverkehr (2 Spuren, 2 Fahrtrichtungen) ergeben sich höhere Sicherheitsindizes als für den Richtungsverkehr (2 Spuren, 1 Fahrtrichtung), die außerdem für das Feldmoment M_F weniger homogen untereinander sind als für das Stützmoment M_B . Eine zusätzliche Berücksichtigung von Modellunsicherheiten auf der Widerstands- und/oder Einwirkungsseite ergibt eine deutliche Verringerung der Sicherheitsindizes. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Vorbemessungen mit den zugehörigen Verkehrseinwirkungen werden dabei sehr klein, da die Modellunsicherheiten einen wesentlichen Anteil am „Gesamtproblem“ erhalten. Die Verwendung eines Teilsicherheitsbeiwertes für die Vorbemessung von 1,35 anstatt 1,5 für die Verkehrslast ergibt im vorliegenden Fall keine wesentlich anderen Ergebnisse hinsichtlich der Sicherheitsindizes. Darüber hinaus zeigen sich für die übrigen betrachteten Varianten von Teilsicherheitsbeiwerten hier wesentliche Unterschiede.

Bildet man die Beanspruchungen infolge des Straßenverkehrs mit einer Verteilungsfunktion der 20-Jahres-Maximalwerte (statt 100 Jahre) ab und definiert parallel dazu den charakteristischen Wert dieser Beanspruchung über eine mittlere Wiederkehrperiode von 200 Jahren (statt 1.000), so sind die ermittelten Ergebnisse (Sicherheitsindizes, Wichtungsfaktoren, Teilsicherheitsbeiwerte) annähernd unverändert.

Eine Verringerung des Eigengewichtes auf 50 % des Ausgangswertes bewirkt ohne Ansatz von Modellunsicherheiten eine leichte Verringerung des Sicherheitsindex und gleichzeitig ergibt sich eine leichte Vergrößerung der Wichtungsfaktoren für die Beanspruchung infolge des Straßenverkehrs. Der Bemessungswert der Beanspruchung ergibt sich prinzipiell aus den Parametern der für die stochastische Beschreibung verwendeten Funktion sowie dem Sicherheitsindex und dem Wichtungsfaktor. Verringert sich nur der Sicherheitsindex, so verringert sich der Bemessungswert. Erhöht sich nur der Wichtungsfaktor, so erhöht sich der Bemessungswert. Aus der in den Untersuchungen festgestellten Veränderung beider Kenngrößen ergeben sich zusammengefasst eine Verringerung des Bemessungswertes und damit auch eine Verringerung des Teilsicherheitsbeiwertes. Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Modellunsicherheiten ergibt sich gegenüber der Ausgangssituation nur eine sehr geringe Änderung der Sicherheitsindizes, aber durch Änderung der Wichtungsfaktoren eine

leichte Vergrößerung des Bemessungswertes für die Beanspruchung aus Straßenverkehr. Hieraus folgt eine leichte Vergrößerung der Teilsicherheitsbeiwerte.

Bei allen vorliegenden Ergebnissen muss beachtet werden, dass nur eine eingeschränkte Anzahl von streuenden Basisvariablen betrachtet wurde. Die ermittelten Absolutwerte der Sicherheitsindizes und der berechneten Teilsicherheitsbeiwerte können daher nicht direkt mit normativen Festlegungen verglichen werden. Die Vergleichbarkeit untereinander wird aber als gegeben angesehen und hieraus die aufgeführten Aussagen abgeleitet.

8 Literatur

- [1] BRAML, T.: Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk. München: Universität der Bundeswehr München, Dissertation, 2010
- [2] CREMONA, C.: Optimal extrapolation of traffic load effects. In: Structural Safety 23 (2001), Heft 1, S. 31-46
- [3] EICHINGER, E. M.: Beurteilung der Zuverlässigkeit bestehender Massivbrücken mit Hilfe probabilistischer Methoden. Wien: Technische Universität Wien, Dissertation, 2003
- [4] FREUNDT, U.; BÖNING, S.: Anpassung des DIN-Fachberichtes 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnung (Schlussbericht FE 15.451/2007/FRB) (Forschungsbericht). Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2009
- [5] FREUNDT, U.; BÖNING, S.: Anpassung des DIN-Fachberichtes 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnung – Nachtrag (Schlussbericht FE 15.451/2007/FRB (Nachtrag)) (Forschungsbericht). Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2010
- [6] FREUNDT, U.; BÖNING, S.: Anpassung des DIN-Fachberichtes 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnung – Brückenbestand (Schlussbericht FE 84.107/

- 2009) (Forschungsbericht). Bergisch Gladbach, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2011
- [7] JCSS: Probabilistic Model Code – Part 3 – Material Properties, 2000
- [8] JCSS: Probabilistic Model Code – Part 1 – Basis of Design, 2001
- [9] JCSS: Probabilistic Model Code – Part 2 – Load Models, 2001
- [10] RINNE, H.: Taschenbuch der Statistik. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch, 2003
- [11] SPAETHE, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Wien; New York: Springer, 1992
- meine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Beuth Verlag, Fassung 01/2011
- [21] Nachrechnungsrichtlinie – Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Ausgabe 05/2011). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung – Abteilung Straßenbau, 2011

Normen und Richtlinien

- [12] NORM DIN-Fachbericht 101: Einwirkungen auf Brücken. Beuth Verlag, Fassung 03/2009
- [13] NORM DIN-Fachbericht 102: Betonbrücken. Beuth Verlag, Fassung 03/2009
- [14] NORM DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen. Beuth Verlag, Fassung 12/1985
- [15] NORM DIN EN 206-1: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Beuth Verlag, Fassung 06/2001
- [16] NORM DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag, Fassung 12/2010
- [17] NORM DIN EN 1990/NA/A1: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Änderung A1. Beuth Verlag, Fassung 07/2011
- [18] NORM DIN EN 1991-2: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Beuth Verlag, Fassung 12/2010
- [19] NORM DIN EN 1991-2/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken. Beuth Verlag, Fassung 07/2011
- [20] NORM DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allge-

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2002

- B 35: Bewährung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Talbrücke Haiger
Krause, Wiggemhauser, Krieger € 17,00
- B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

- B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti von Weschpfennig € 11,50
- B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahn- tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Kühler, Quaas € 12,50
- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Städig, Krocker € 12,00
- B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50
- B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmer-Halswick, Ullrich € 12,50

2004

- B 45: Erfahrungssammlungen:
Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brück- kenseilen und -kabeln
Hemmer-Halswick € 13,00
- B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

- B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

- B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardej, Kohl, Wöstmann, Wiggemhauser € 15,00 -
- B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf- tung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50
- B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50

- B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50
- B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staack € 14,50
- B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50
- B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kosten- pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähner € 12,50

2007

- B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kosten- pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50
- B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expo- sitionsklasse XF2
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50
- B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50
- B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel
Sistenich € 14,50

2008

- B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme
Schröder € 12,50
- B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teiler- neuerung - Bewährung
Schröder € 13,50
- B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutz- plankenpfosten
Schröder, Staack € 13,00
- B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unter- füllstoff
Eilers € 12,00
- B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50
- B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4
Bramshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

- B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50
- B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln
Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00
- B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straß- entunneln
Blosfeld € 17,50

B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. -
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 29,50 -

B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln

Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50

B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Tauscher € 14,50

2010**B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau**

Kuhlmann, Euler € 22,50

B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen

Weschpfennig, Kropf, von Witzzenhausen € 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk

Müller € 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand

Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

2011**B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems**

Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00 -

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten "Brücken" an Eurocodes

Teil 1: DIN-FB 101 "Einwirkung auf Brücken" →

Teil 2: DIN-FB 102 "Betonbrücken" →

Teil 3: DIN-FB 103 "Stahlbrücken" →

Teil 4: DIN-FB 104 "Verbundbrücken" →

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. -

Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, - Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier, Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann € 29,50 -

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Kuhlmann, Günther, Krauss € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spannliedführung

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik (in Vorbereitung)

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln

Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse

Müller, Vogel, Neumann € 14,50

B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand

Freundt, Böning € 16,00

B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken

Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00

B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung

Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50

B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton

Nguyen, Freitag € 13,50

2012**B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie**

Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte "Stahlbrücken" und "Verbundbrücken" an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen

Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke

Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard

Eilers, Quaas, Staeck € 14,00

2013**B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung**

Freundt, Böning € 15,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.