

# **Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 195**

**bast**

# Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2

von

Karsten Geißler  
Josef Karl Kraus

Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Stahlbau  
Technische Universität Berlin

Ursula Freundt  
Sebastian Böning

Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt  
Weimar

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 195**

**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 Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

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

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.  
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

## **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt 15.0629**  
Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle  
nach DIN EN 1991-2

**Fachbetreuung**  
Rolf Rabe

**Fachreferat**  
Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung

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

**Redaktion**  
Stabsstelle Presse und Kommunikation

**Druck und Verlag**  
Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-95606-747-1

Bergisch Gladbach, Juni 2023

## Kurzfassung – Abstract

### Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2

Der vorliegende Forschungsbericht behandelt die Zukunftssicherheit des aktuell normativ geregelten Nachweises schädigungsäquivalenter Spannungsschwingbreiten basierend auf dem Ermüdungslastmodell ELM 3 inklusive  $\lambda$ -Faktoren nach DIN EN 1991-2:2010-12 und DIN EN 1992-2:2010-12 in Verbindung mit DIN EN 1991-2/NA:2012-08 und DIN EN 1992-2/NA:2013-04.

Dazu werden Verkehrslastsimulationen an sowohl idealisierten als auch realistischen Beispielbrücken durchgeführt. Bei Ersteren liegt der Fokus auf einer systematischen Untersuchung an einem weiten Spektrum möglicher Brückensysteme. Bei Letzteren steht die wirklichkeitsnahe Erfassung der nicht-linearen  $M$ - $\sigma$ -Beziehung im Vordergrund, welche großen Einfluss auf die Ermüdungsnachweise hat. Weiterhin werden unterschiedliche Verkehrsszenarien untersucht, darunter Grundszenarien des aktuellen Verkehrs sowie Prognose-Szenarien eines möglichen zukünftigen Verkehrs.

Im Ergebnis wird aufgrund von Defiziten der aktuellen normativen Regelung, sowohl hinsichtlich der Grund- als auch Prognose-Szenarien, ein Vorschlag für eine zukunftssichere Anpassung der  $\lambda$ -Faktoren ausgearbeitet. Diesbezüglich wird auch ein Defizit der bisherigen Methode zur Ermittlung der  $\lambda$ -Faktoren in Bezug auf die Erfassung der  $M$ - $\sigma$ -Beziehung identifiziert und durch einen zusätzlichen Korrekturfaktor kompensiert.

### Long-term reliability of the fatigue load models according to DIN EN 1991-2

This research report deals with the long-term reliability of the current design concept regarding damage-equivalent stress ranges based on the fatigue load model FLM 3 including  $\lambda$ -factors according to DIN EN 1991 2:2010 12 and DIN EN 1992 2:2010 12 in conjunction with DIN EN 1991 2/NA:2012 08 and DIN EN 1992-2/NA:2013-04.

For this purpose, traffic load simulations are carried out on both idealized and realistic bridges. In the former, the focus is on a systematic study on a wide range of possible bridge systems. In the latter case, the realistic modeling of the nonlinear  $M$ - $\sigma$ -relationship is in the foreground, which has great influence on the fatigue design. Furthermore, dif-

ferent traffic scenarios are analyzed, including basic scenarios of current traffic and forecast scenarios of possible future traffic.

As a result, due to deficits of the current design regulation in terms of the basic and forecast scenarios, a future-proof modification of the  $\lambda$ -factors is proposed. Referring to this, a deficit in the common method for determining the  $\lambda$ -factors regarding the  $M$ - $\sigma$ -relationship is identified and compensated by an additional correction factor.

# Summary

## Long-term reliability of the fatigue load models according to DIN EN 1991-2

### 1 Introduction

A realistic assessment of the road traffic loads and their effects on bridges is the starting point for structural verifications that guarantee the structural safety of the infrastructure at economic perspective and is therefore of fundamental importance.

The overall objective of the research project is to verify the long-term reliability of existing fatigue load models for the construction of concrete bridges. The focus is on the concept of damage-equivalent stress ranges (FLM 3) according to [DIN EN 1991-2] and [DIN EN 1992-2] in conjunction with [DIN EN 1991-2/NA] and [DIN EN 1992-2/NA]. As a result, proposals for the modification of the fatigue load model for the normatively verification formats are developed.

The analysis is based on programs for traffic load simulation and an evaluation of the generated parameter-time-curves by Rainflow counting method (cycle counting) to the determination of the damage sums and damage equivalent factors.

Since the future development of transport can only be modeled to a limited extent in the required parameters, traffic scenarios are developed that are based on long-term traffic forecasts. Furthermore,

representative bridge systems and verification points are used for the analysis. In order to be able to assess the long-term reliability of the current fatigue load model, the basics of the currently normatively regulated concept of the damage-equivalent stress range must also be considered. In this context, the influence of the linearization of  $M$ - $\sigma$ -relationship and Wöhler (S-N) curve is investigated. Both points represent previously necessary simplifications for a general solution to the problem of fatigue in concrete constructions.

### 2 Structural systems and points of analysis

For a systematic analysis of the effects of various types of traffic different support systems have to be investigated. The scope of the research is split into the two categories of simplified and detailed systems, which are described below.

#### 2.1 Analysis of simplified structural systems

A consideration of simplified static systems allows a systematic analysis on a wide range of possible bridge systems. Varying effects of traffic on different static systems can thus be easily detected. As a result, directly generalizable statements can be derived for the assessment of the current fatigue load models. Relevant systems are exemplified in Fig. 2.1.

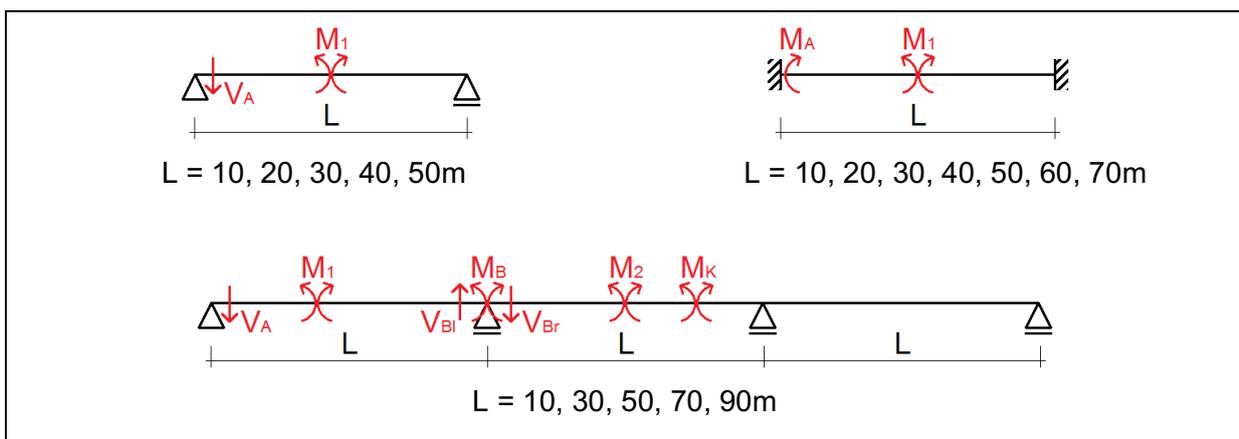


Fig. 2.1: Compilation of relevant structural systems and points of analysis in the longitudinal direction based on [Dani94]

#### 2.2 Analysis of detailed structural systems

In addition, realistic bridge examples are considered, which correspond, in particular regarding the

degree of reinforcement, to a state-of-the-art construction method. The focus is on a realistic modeling of the  $M$ - $\sigma$ -relationships to be able to depict reasonable stress ranges in the later simulations, depending on the magnitude of the basic stress.

Structures are used, some of which already have documents with production information or preliminary design. The basis for verification of all bridge examples are the currently valid Eurocodes, including [DIN EN 1991-2] and [DIN EN 1992-2] in conjunction with [DIN EN 1991-2/NA] and [DIN EN 1992-2/NA].

### 2.2.1 Bridge example B1

The first example is a two-span structure with spans of 2x22.50 m. In the transverse direction is a two-bar T-beam with a roadway width of 8.00 m (see Fig. 2.1). As prestressing were selected tendons with subsequent bond.

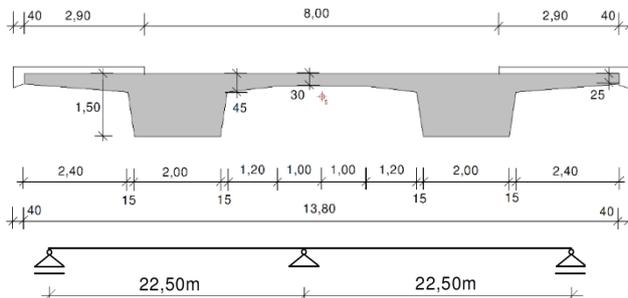


Fig. 2.1: Cross section and structural system – bridge example B1 [Gei&14]

### 2.2.2 Bridge example B2

Example bridge B2 is a three-span structure with the spans L1 = 20.00 m, L2 = 34.50 m and L3 = 20.00 m. In the transverse direction, it is a single-bar T-beam with a roadway width of 6.50 m (see Fig. 2.2). As prestressing, tendons with subsequent bond were also selected here.

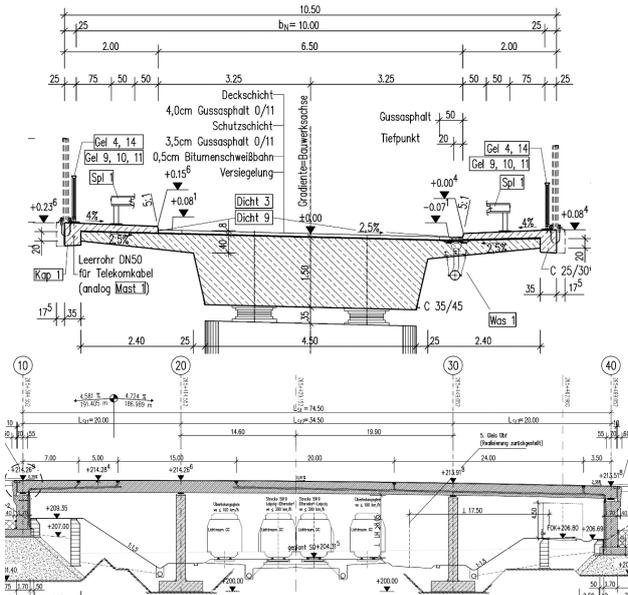


Fig. 2.2: Cross section and longitudinal section – bridge example B2

### 2.2.3 Bridge example B3

In order to be able to derive generalizable statements, a two-span structure with spans of 2x40 m and a T-beam as cross-section is required. Therefore, the bridge example B3 is designed and calculated with the purpose of comparative calculations. The cross-section is a two-bar T-beam with a roadway width of 7.00 m. The construction height is 1.80 m. The cross section is shown in Fig. 2.3. As prestressing tendons with subsequent bond were chosen here.

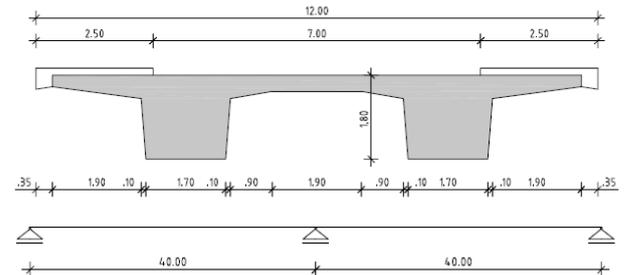


Fig. 2.3: Cross section and structural system – bridge example B3

### 2.2.4 Bridge example B4

To round off a single-span bridge in prestressed concrete construction is examined. The span is 24.60 m, the construction height 1.35 m. The cross-section is a two-bar T-beam with a roadway width of 7.00 m. The width between the railings is 12,30 m. Cross- and longitudinal section are shown in Fig. 2.4.

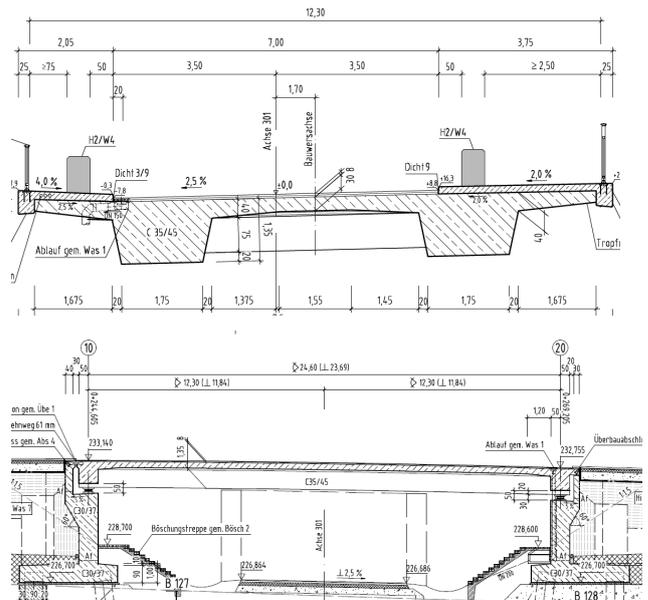


Fig. 2.4: Cross section and longitudinal section – bridge example B4

### 3 Traffic forecasts

To estimate the long-term development of road haulage in Germany, forecasts are used on behalf of the BMVBS or BMVI [InBv14] [Prog07]. The annual transport volume in road haulage is used as a parameter for future traffic development. According to this, there is an increase by +63.3% from 2004 to 2050 in the transport volume in Germany, which will be the basis for the following forecast scenarios.

#### 3.1 Basic scenarios

To derive suitable vehicle collectives of future traffic, basic scenarios are defined that represent the current traffic of different route or traffic types. The basic scenarios are divided into:

- Long-distance traffic 1 (normal-heavy)
- Long-distance traffic 2 (light)
- Local traffic 1 (normal-heavy)
- Local traffic 2 (light)

#### 3.2 Forecast scenarios

Based on the basic scenarios and traffic forecasts, different forecast scenarios can be derived. These are initially used to analyze possible changes to the current traffic separately. The magnitude of the change considered is chosen so that the predicted increase in road freight traffic or heavy traffic (which is subject to approval) is achieved solely by this change.

##### Forecast scenario A:

In a first scenario of future traffic, it will be examined how the increase in transport volume will affect solely based on an increased annual average daily traffic (AADT) regarding heavy goods vehicles (HGVs). The AADT regarding HGVs of the basic scenario "long-distance traffic 1" is increased, for example, from 10000 to 16000.

##### Forecast scenario B:

Furthermore, it will be investigated how the increase in transport volume will affect solely based on an increased admitted gross vehicle weight. It is supposed that the increase affects only five-axle vehicles. According to the traffic forecasts and the assumptions made for this scenario, the mean value for the loaded state of truck types 41 and 98 is 57.3 t.

##### Forecast scenario C:

As an independent scenario it will be investigated what effects are to be expected from an increase in the percentage of heavy traffic which is subject to

approval. According to the previous increase in the number of applications for heavy traffic (see [Kasc09]) and the resulting future increase, this scenario shows an increase in the percentage of heavy traffic which is subject to approval from 0.5% to 4.6%, in each case based on a constant annual average daily traffic (AADT regarding HGVs).

##### Forecast scenario D:

To assess the impact of future trends regarding truck-platooning due to networked and autonomous driving on fatigue loading, it is assumed in this scenario that in the future 50% of truck type 98 will use platooning. For this purpose, a fixed platoon geometry of 5 trucks of this type is defined as a separate vehicle type. According to the information provided by the vehicle manufacturers, the vehicle distance between the individual trucks is set at 15 m. The total length of the defined platoon is thus about 120 m.

The chosen implementation of truck-platooning involves several simplifications. On the one hand, these simplifications are based on the fact that truck-platooning has currently only been operated in test runs and therefore a detection by measurements or evaluation of WiM data is not possible. On the other hand, the scenario considered here should primarily provide a qualitative statement to be able to assess the effects of truck-platooning.

##### Forecast scenario E:

The previously considered forecasting scenarios A to D allow a separate analysis of the change of individual parameters, but they also represent extreme cases of future traffic. In a combined forecasting scenario, the increase in transport volume from +63.3% to 2050 by increasing AADT regarding HGVs and gross vehicle weight. The admitted gross vehicle weight of future five-axle trucks is assumed to be 52 tonnes, which would mean a +43% increase in transport volume. The remaining increase of +14% should be covered by an increase in the AADT regarding HGVs. In addition, the assumptions of the forecast scenario D are included to depict future truck-platooning.

## 4 Influence of the linearization of M- $\sigma$ -relationship and Wöhler (S-N) curve

The currently normatively regulated damage equivalent factor  $\lambda$  is based on a linearization of the M- $\sigma$ -relationship and the Wöhler (S-N) curve. The influence of these linearizations on the result will be demonstrated by means of examples. For this purpose, traffic simulations are carried out for realistic bridge examples (see section 2.2). For each simulation, different stages of linearization are analyzed.

A distinction is made between a detailed and simplified method. The detailed method (see Fig. 4.1) considers, on the one hand, the bi-linearity of the Wöhler curve. On the other hand, the nonlinearity of the M- $\sigma$ -relationship is taken into account as well, that's why the basic stress becomes an important influencing factor. The simplified method reduces the Wöhler curve to a linear form with slope  $m_2$ . Additionally, it uses a linearization of the M- $\sigma$ -relationship, whereby the basic stress loses its influence on the factor  $\lambda$  (see [Dani94]).

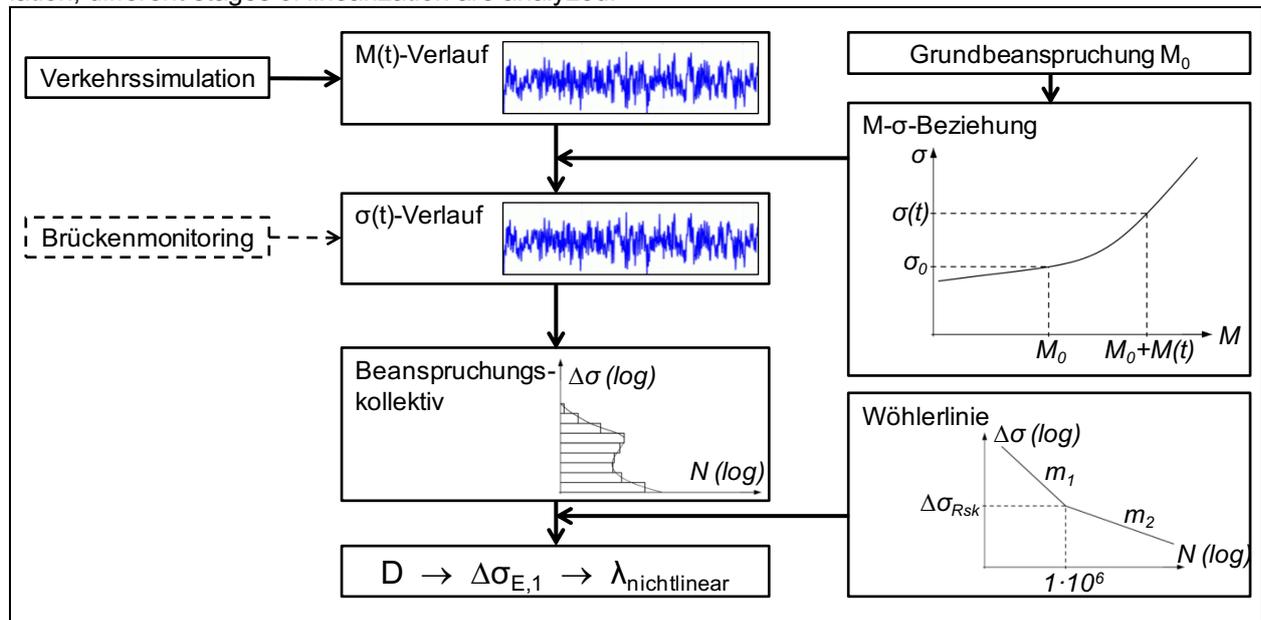


Fig. 4.1: Detailed method for determining the damage equivalent factor  $\lambda$

### 4.1 Results of the comparative calculations

In the result (see Fig. 4.2) the damage equivalent factors  $\lambda$  based on the simplified method are partly below those of the detailed method. The current normative regulation based on the simplified method thus underestimates the actual fatigue damage at this point.

### 4.2 Correction of the $\lambda$ -factors for nonlinear M- $\sigma$ -relationships

Due to the deficit of the  $\lambda$  factors according to the simplified method, a suitable correction factor  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  should be derived. This factor is intended to cover the maximum differences between the  $\lambda$  factors according to the simplified and detailed method, see Fig. 4.2.

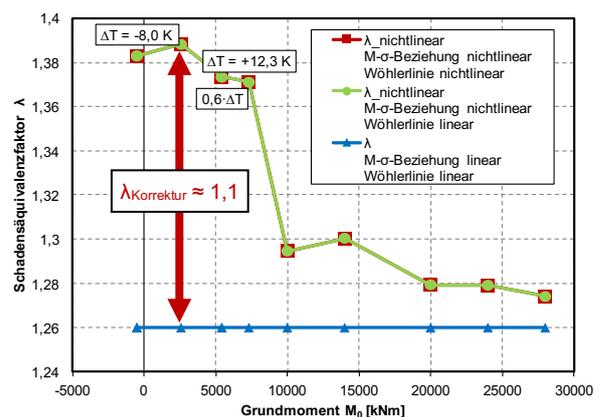


Fig. 4.2: Definition of the correction factor  $\lambda_{\text{Korrektur}}$

It can be seen that the correction factor for low basic stresses only reaches very high values for very small stress ranges based on the FLM 3 (see Fig. 4.3). As the stress range increases, the correction factor decreases. It can be assumed that the field of small stress ranges based on the FLM 3 is not relevant in practice. However, to be able to reliably

cover the field of increasing stress ranges, the value  $\lambda_{\text{Korrektur}} = 1.1$  is proposed.

The factor  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  must be taken into account in a calculation in addition to the previous  $\lambda$  factors if the stress ranges of the traffic take place in uncracked and cracked state (usually in prestressed concrete). It should be emphasized, however, that the factor  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  can be neglected if the stress ranges of the traffic take place almost exclusively in cracked state (usually in pure reinforced concrete without prestressing).

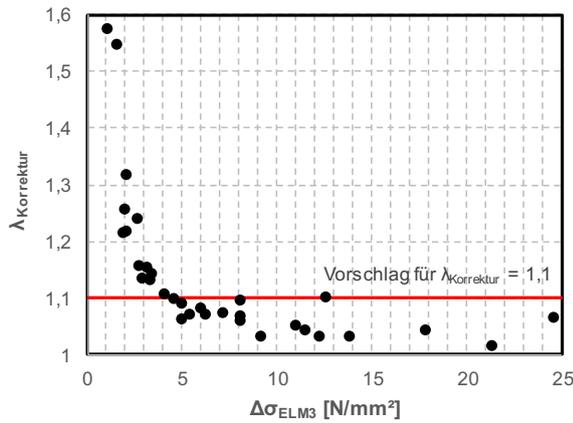


Fig. 4.3: Relationship between the correction factor and the stress range due to the FLM 3

## 5 Evaluation and modification of the FLM 3

The aim of the following chapter is first of all to assess the long-term reliability of the current design concept regarding damage equivalent stress ranges based on the FLM 3 including  $\lambda$  factors. For this purpose, a comparison of results from traffic simulations and the calculation according to Eurocode is carried out. Subsequently, a proposal for the modification of the  $\lambda$  factors will be developed to ensure their long-term reliability.

### 5.1 Results of the evaluation

Regarding the damage equivalent stress range, only relatively moderate differences can be detected (see Fig. 5.1, top). For a suitable assessment of the respective damage and the differences between the individual scenarios, a conversion into a damage sum  $D$  is performed (see Fig. 5.1, bottom), with:

$$D = \left( \frac{\Delta\sigma_{s,eqv}}{\Delta\sigma_{Rsk}} \right)^m$$

It turns out that the fatigue damage calculations based on the FLM 3 and its  $\lambda$  factors are in many cases already exceeded by the basic scenarios.

Accordingly, the results of the forecasting scenarios are even higher.

Overall, it should be noted that the bridge examples considered here at the analyzed points show no appreciable fatigue risk with respect to the forecast scenarios, i.e.  $D \ll 1$ . The dimensioning of the bridge examples was done for usual utilization rates. It is emphasized, however, that effects from varying degrees of utilization are not explicitly examined here.

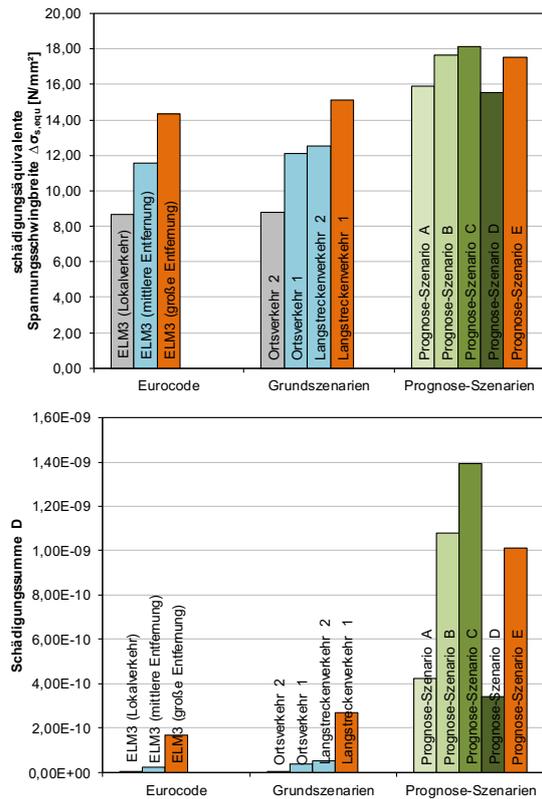


Fig. 5.1: Comparison of the results according to [DIN EN 1992-2/NA] and simulation – bridge example B2 ( $L = 20+34,5+20\text{m}$ ), bottom of support area  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

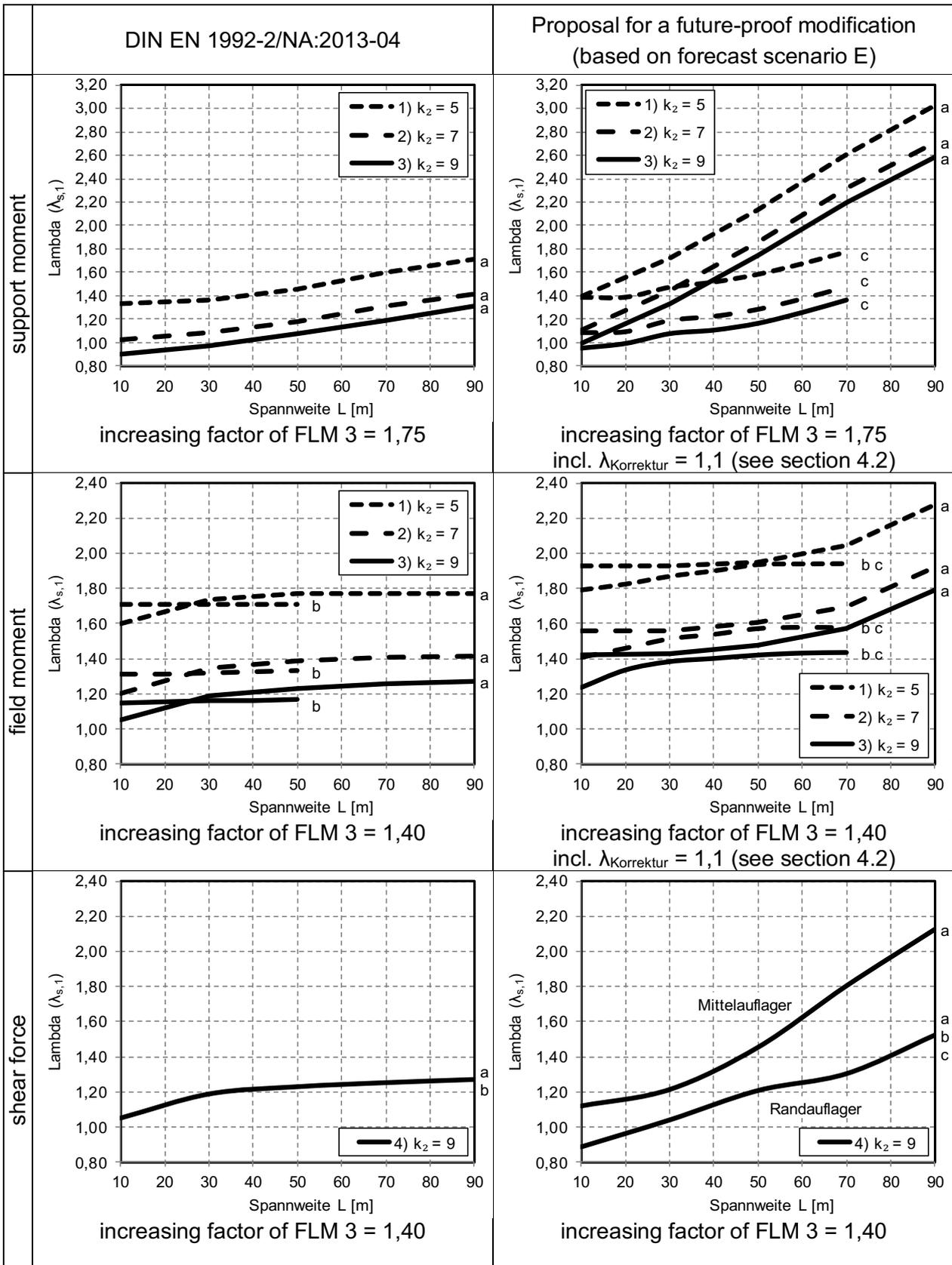
### 5.2 Determination of future-proof $\lambda$ -factors for structural design

To ensure the long-term reliability of a calculation based on the FLM 3 including  $\lambda$ -factors, a proposal for the modification of the current  $\lambda$ -factors according to [DIN EN 1992-2/NA] will be elaborated below. The basis for this is the forecast scenario E (as an extension of the basic scenario "long-distance traffic 1") from section 3.2 and the simplified structural systems from section 2.1. To assess the results, additional  $\lambda$  factors are determined for a scenario of current traffic. The underlying traffic corresponds to the basic scenario "long-distance traffic 1".

The results for the coefficient  $\lambda_{s,1}$  (influence of structural system and critical length of the influence line)

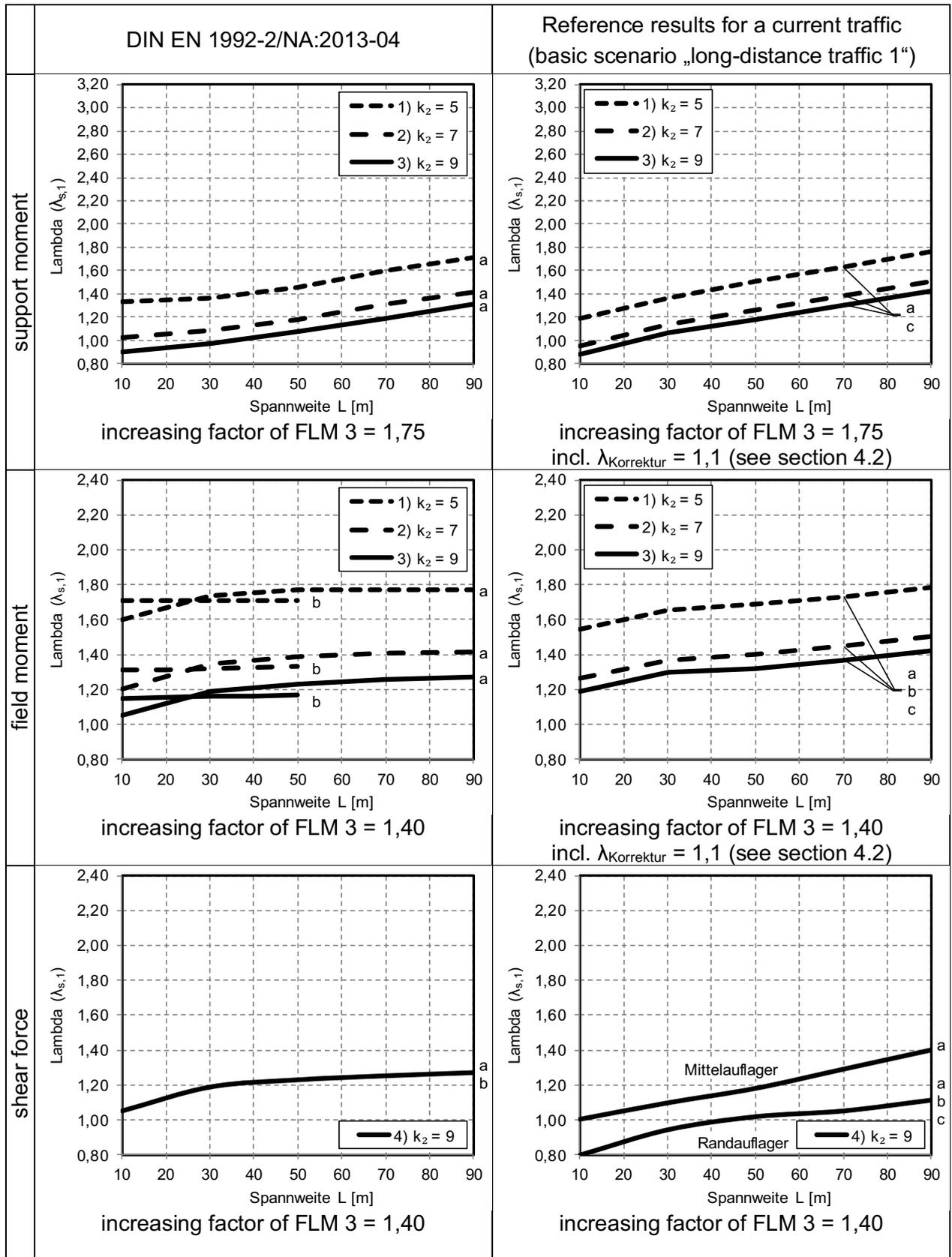
from the forecast scenario E are compared in Tab. 5.1 with the current normative regulation. As a reference, the coefficients  $\lambda_{S,1}$  from the basic scenario "long-distance traffic 1" are shown in Tab. 5.2. For the coefficient  $\lambda_{S,2}$  (influence of traffic volume and type of traffic) an increase of the traffic volume by the value  $N_{\text{obs}} = 3.0$  million trucks per year is proposed. According to the assumptions for forecast scenario E, this equates to an annual average daily traffic (AADT) regarding heavy goods vehicles (HGVs) of 12000. The proposed value refers to the typical traffic on busy roads ("long-distance" with  $\bar{Q} = 1,0$ ). An adaptation for different types of traffic, including the parameter  $\bar{Q}$ , was not investigated in the work described here. It should be noted that for the current traffic, represented by the basic scenario "long-distance traffic 1", a value of  $N_{\text{obs}} = 2.5$  million trucks per year would have to be used (AADT regarding HGVs = 10000). For the coefficient  $\lambda_{S,3}$  (influence of the service life) no adaptation is necessary. Similarly, for the coefficient  $\lambda_{S,4}$  (influence of other lanes) it is recommended to keep the current simplified regulation.

The coefficient  $\varphi_{\text{fat}}$  (influence of road surface roughness) has already been calibrated in [MeDa94] for concrete bridges. An increase in the traffic volume is not expected to result in a change in the influence of the road surface roughness. It is therefore proposed to keep the current regulation of  $\varphi_{\text{fat}} = 1.2$  for surfaces with low roughness or for good maintenance of the roadway.



**Legend:** a continuous beam  
 b single span beam  
 c rigid frame

Tab. 5.1: Factor  $\lambda_{s,1}$  for the influence of structural system and critical length of the influence line incl.  $\lambda_{Korrektur}$  to compensate the effects from nonlinear M- $\sigma$ -relationships (proposal based on forecast scenario E)



**Legend:** a continuous beam  
 b single span beam  
 c rigid frame

Tab. 5.2: Factor  $\lambda_{s,1}$  for the influence of structural system and critical length of the influence line incl.  $\lambda_{Korrektur}$  to compensate the effects from nonlinear M- $\sigma$ -relationships (reference results based on basic scenario „long-distance traffic 1“)

## 6 Summary

This research report deals with the long-term reliability of the current design concept regarding damage-equivalent stress ranges based on the fatigue load model FLM 3 including  $\lambda$ -factors according to [DIN EN 1991-2] and [DIN EN 1992-2] in conjunction with [DIN EN 1991-2/NA] and [DIN EN 1992-2/NA]

For this purpose, traffic load simulations are carried out on both idealized and realistic bridges. In the former, the focus is on a systematic study on a wide range of possible bridge systems. In the latter case, the realistic modeling of the nonlinear  $M$ - $\sigma$ -relationship is in the foreground. Furthermore, different traffic scenarios are analyzed, including basic scenarios of current traffic and forecast scenarios of possible future traffic.

As a result, due to deficits of the current normative regulation in terms of the basic and forecast scenarios, a future-proof modification of the  $\lambda$ -factors is proposed. Referring to this, a deficit in the common method for determining the  $\lambda$ -factors, which is caused by the linearization of the  $M$ - $\sigma$ -relationship, is also identified. To compensate this, a correction factor  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  is introduced.

The magnitude of the correction factor is determined here using the bridge examples B1 to B4. Further investigation on bridges of varying utilization levels could provide a way to further narrow this factor.

The forecast scenario underlying the proposal for a future-proof modification is, from today's perspective, rather conservative and is, of course, only one of many possibilities, since a realistic description of the future traffic is only possible to some extent. However, given the multitude of possibilities and the long service life of bridges, the approach of slightly conservative traffic scenarios guarantees the long-term economic viability of the bridge infrastructure. It should be noted that the reality is likely to lie between the results of the forecast scenarios and the current traffic. A further refinement of the underlying forecast scenario still has potential to make the estimation of the future fatigue load more suitable.

What remains unanswered in this work is the differentiated view on varying types of traffic or routes. For the future, it is especially important to consider the shape of the stress collective in the calculation concept.

## 7 References

- [DIN EN 1991-2] *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.* Beuth Verlag. 2010.
- [DIN EN 1991-2/NA] *Nationaler Anhang zu Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.* Beuth Verlag. 2012. [MeDa94]
- [DIN EN 1992-2] *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken.* Beuth Verlag. 2010.
- [DIN EN 1992-2/NA] *Nationaler Anhang zu Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken.* Beuth Verlag. 2013. [Prog07]
- [Dani94] Danielewicz, I.: *Zur Ermüdungsbemessung von Beton-Straßenbrücken.* Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt. 1994.
- [FrBö11] Freundt, U.; Böning, S.: *Anpassung des DIN-Fachberichts 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an Eurocodes - Zukunftsfähiges Lastmodell für Straßenverkehrslasten.* Schlussbericht FE 15.451/2007/ERB. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B77. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2011.
- [Geiß14] Geißler, K.: *Handbuch Brückenbau: Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung.* Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2014.
- [InBv14] Intraplan Consult GmbH; BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH: *Verkehrverflechtungsprognose 2030.* Schlussbericht FE 96.0981/2011. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. München, Freiburg. 2014.
- [Kasc09] Kaschner, R.: *Auswirkungen des zunehmenden Schwerverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen.* Schlussbericht FE 04243 des Arbeitsprogrammes der BAST. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B68. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2009.
- [MeDa94] Merzenich, G.; Danielewicz, I.: *Dynamische Simulation des Auxerre-Verkehrs für Stahlbetonbrücken zur Bestimmung des schädigungsäquivalenten Schwingbeiwertes.* RWTH Aachen, TH Darmstadt. unveröffentlicht. 1994.
- [Prog07] ProgTrans AG: *Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050.* Schlussbericht FE 26.0185/2006. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Basel. 2007.







## 1 Einleitung

Eine realitätsnahe Beurteilung der Straßenverkehrslasten und deren Auswirkungen auf Brücken ist Ausgangspunkt von Nachweisführungen, die die Standsicherheit der Infrastruktur bei wirtschaftlicher Vorgehensweise garantieren und ist somit von grundsätzlicher Bedeutung.

Gesamtziel des Forschungsprojektes ist es, die Zukunftssicherheit der bestehenden Ermüdungslastmodelle für den Neubau von Massivbrücken zu überprüfen. Im Fokus steht dabei das Konzept der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreiten (ELM 3) nach [DIN EN 1991-2] und [DIN EN 1992-2] in Verbindung mit [DIN EN 1991-2/NA] und [DIN EN 1992-2/NA]. Im Ergebnis werden Vorschläge zur Modifizierung des Ermüdungslastmodells für die normativ geregelten Nachweisformate erarbeitet.

Die Überprüfung basiert auf Programmen zur Verkehrslastsimulation und einer Auswertung der generierten Kennwert-Zeit-Verläufe mittels Rainflow-Zählverfahren (Zyklenzählverfahren) bis zur Ermittlung der Schädigungssummen und Schadensäquivalenzfaktoren.

Da die zukünftige Entwicklung des Verkehrs in den erforderlichen Parametern nur bedingt abbildbar ist, werden Verkehrsszenarien untersucht, die auf Grundlage langfristiger Verkehrsprognosen entwickelt werden. Weiterhin werden repräsentative Brückensysteme und Nachweisstellen zur Überprüfung herangezogen. Um die Zukunftssicherheit des aktuellen Ermüdungslastmodells bewerten zu können, sind zusätzlich die Grundlagen des aktuell normativ geregelten Konzepts der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite zu hinterfragen. In diesem Zusammenhang wird der Einfluss der Linearisierung von  $M$ - $\sigma$ -Beziehung und Wöhlerlinie untersucht. Beide Punkte stellen bisher notwendige Vereinfachungen für eine verallgemeinerbare Lösung der Ermüdungsproblematik im Massivbau dar.

Die Überprüfung des Lastmodells erfordert die Analyse vieler relevanter Parameter. Eine praxisgerechte Nachweisführung bedingt dagegen eine Minimierung der Parameter. Der relativ weit gefasste Bereich an Ergebnissen wird daher abschließend auf ein handhabbares Format reduziert.

## 2 Stand der Wissenschaft und Technik

### 2.1 Verkehrslastsimulation

Das an der TU Berlin entwickelte Simulationsprogramm „PATLoB“ (Probabilistic Analysis of Traffic Loads on Bridges) ermöglicht Verkehrslastsimulationen für Brücken durch Auswertung quasi unendlich langer stochastisch erzeugter Verkehrsströme. Die Überfahrt der Verkehrsströme wird als schrittweise Verschiebung entlang der Einflusslinien betrachtet. Aus jedem Schritt ergibt sich eine Beanspruchung infolge der aktuell vorhandenen Achslasten auf der Einflusslinie.

Das Ingenieurbüro Prof. Freundt verfügt ebenfalls über ein eigenentwickeltes Programmsystem zur Verkehrssimulation („VerkehrsSimulation“). Das System wurde im Rahmen von mehreren vorhergehenden Projekten eingesetzt, wobei der Schwerpunkt bei der Ermittlung charakteristischer Beanspruchungswerte zur Ableitung statischer Lastmodelle lag (vgl. u.a. [FrBö11a], [FrBö11b], [FrBö13]).

Beide Systeme nutzen in gewissem Bereich analoge Ansätze, verwenden aber an bestimmten Stellen abweichende Methoden.

In beiden Systemen können die resultierenden Kennwert-Zeit-Verläufe mithilfe des Rainflow-Zählverfahrens nach [ClSe86] in Histogramme der Spannungs- oder Momentenschwingbreiten überführt werden (Beanspruchungskollektiv). Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der einwirkungsseitigen Beanspruchungskollektive und widerstandsseitigen Wöhlerlinien. Die weitere Auswertung erlaubt, basierend auf der linearen Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner, eine Bestimmung der Schädigungssumme  $D$ , der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bzw.  $\Delta\sigma_{E,2}$  sowie des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$ . Letzteres wird durch einen Vergleich mit der Schwingbreite infolge des ELM 3 bestimmt und kann wahlweise anhand der einwirkenden

Spannungs- oder Momentenschwingbreiten ermittelt werden. Eine detaillierte Beschreibung der zugrundeliegenden Theorie erfolgt in Abschnitt 2.2.

Die Eingangsgrößen einer Verkehrslastsimulation werden in Abbildung 2.1 zusammengefasst. Ein Großteil der Eingangsgrößen ist stochastischer Art, wodurch auch eine stochastische Berechnung unumgänglich ist. In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Eingangsgrößen genauer betrachtet.

Im Allgemeinen werden stochastische Größen über Verteilungsfunktionen beschrieben. Die programmtechnische Umsetzung dieser Verteilungsfunktionen erfolgt über Zufallszahlengeneratoren. Diese Generatoren erzeugen Zufallszahlen, die in ihrer Gesamtheit der jeweiligen Verteilungsfunktion folgen. Bei der Erzeugung von Zufallszahlen entsprechend einer Verteilungsfunktion gibt es nahezu unendlich viele mögliche Zustände (begrenzt durch den Datentyp Double), die jeweils mit einer unterschiedlichen Wahrscheinlichkeit auftreten. Da ein Großteil der Eingangsgrößen stochastischer Art ist und die einzelnen Eingangsgrößen bei der Erzeugung von Verkehrsströmen miteinander kombiniert werden, wird die Anzahl der möglichen Zustände noch vervielfacht. Aus diesem Umstand wird ersichtlich, dass quasi unendlich lange Verkehrsströme aus Zufallszahlen generiert und ausgewertet werden müssen, bis eine ausreichende Sicherheit in den Ergebnissen vorhanden ist. In weiteren Arbeiten wird diese Strategie zur Problemlösung auch als Monte-Carlo-Algorithmus bezeichnet.

#### 2.1.1 Fahrzeugkollektiv

Das Verkehrsaufkommen setzt sich aus einer Vielzahl verschiedener Fahrzeugtypen zusammen, darunter beispielsweise Motorräder, PKW, Lieferwagen, LKW mit Anhänger, Sattelzüge, usw. Jeder Fahrzeugtyp wird durch eine Häufigkeit, Achsabstände, Achslastverteilung und Gesamtgewicht charakterisiert. Eine Sammlung dieser Informationen für alle Fahrzeugtypen im betrachteten Straßennetz wird hier als Fahrzeugkollektiv bezeichnet.



Abbildung 2.1: Eingangsgrößen einer Verkehrslastsimulation

Für jeden Fahrzeugtyp werden in [TLS 2012] Kennziffern vergeben, die auch in dieser Arbeit Verwendung finden. Ein überaus häufig vorkommendes Fahrzeug stellt beispielsweise der Typ 98 dar, ein Sattelzug mit zweiachsiger Zugmaschine und dreiachsiger Sattelaufleger.

- Fahrzeugtypenverteilung

Für die Simulation ist es zielführend, die Gesamtheit aller Fahrzeugtypen auf die häufigsten und maßgebendsten Typen zu reduzieren. Abbildung 2.2 zeigt dazu eine beispielhafte Fahrzeugtypenverteilung.

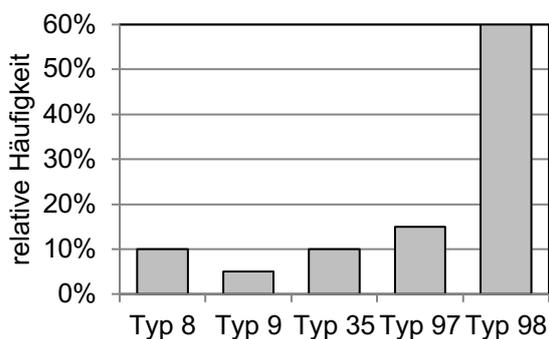


Abbildung 2.2: Beispielhafte Fahrzeugtypenverteilung

Die Fahrzeugtypenverteilung in der obigen Abbildung wurde bereits auf die häufigsten Typen reduziert. Außerdem beschränkt sich diese Auswahl auf Fahrzeuge des Schwerverkehrs, da diese zu den maßgebendsten Typen zählen. Eine grundlegende Annahme ist hier, dass leichte Fahrzeuge, wie etwa Motorräder und PKW, aufgrund ihrer verhältnismäßig geringen Gesamtmasse vernachlässigt werden können, ohne dass dadurch eine signifikante Änderung an den Ergebnissen entstehen würde.

- Achsabstände

Die Achsabstände eines Fahrzeugtyps werden üblicherweise über deren Mittelwerte deterministisch angegeben. Da die Achsabstände ebenfalls einer gewissen Streuung unterliegen, wäre es prinzipiell auch möglich, Verteilungsfunktionen der Achsabstände anzugeben. Da die Streuung der Achsabstände jedoch sehr moderat ausfällt, kann vereinfachend mit den Mittelwerten gerechnet werden. In Tabelle 2.1 werden die Achsabstände beispielhaft für den Fahrzeugtyp 98 gezeigt.

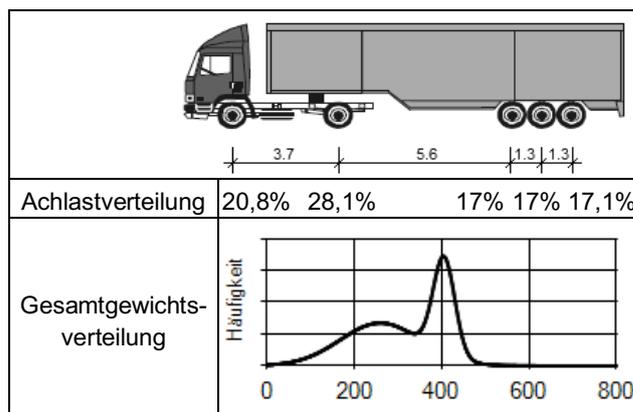


Tabelle 2.1: Achsabstände, Achslastverteilung und Gesamtgewichtsverteilung des Fahrzeugtyps 98

- Achslasten

Die Achslasten eines Fahrzeugtyps resultieren aus dem Fahrzeuggesamtgewicht und der Achslastverteilung. In der hier durchgeführten Untersuchung folgt das Gesamtgewicht einer Verteilungsfunktion, jede Achslast wird über einen prozentualen Anteil am Gesamtgewicht bestimmt. Leere und beladene Fahrzeuge desselben Typs werden gemeinsam behandelt. Tabelle 2.1 zeigt die Gesamtgewichts- und Achslastverteilung beispielhaft für den Fahrzeugtyp 98.

- Technische Umsetzung

Zur Generierung der Verkehrsströme werden verschiedenen Fahrzeuge zufällig erzeugt. In ihrer Gesamtheit spiegeln alle Fahrzeuge dieser Verkehrsströme ein ausgewähltes Fahrzeugkollektiv wider.

Der Algorithmus zur Generierung der Fahrzeuge folgt stets dem gleichen Schema. Zunächst wird eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 erzeugt. Über die relativen Häufigkeiten der Fahrzeugtypenverteilung kann damit ein bestimmter Fahrzeugtyp ausgewählt werden. Anschließend werden die zugehörigen Achsabstände und Achslastverteilungen dieses Fahrzeugtyps geladen. Im nächsten Schritt wird eine weitere Zufallszahl zwischen 0 und 1 generiert und entsprechend der Gewichtsverteilungsfunktion umgerechnet. Zur Umrechnung wird dabei die inverse Verteilungsfunktion  $F(q)^{-1}$  genutzt. Über die Gewichtsverteilungen des Fahrzeugtyps wird also ein zufälliges Fahrzeuggewicht bestimmt. Die Achslasten ergeben sich aus dem Fahrzeuggewicht und der Achslastverteilung.

Das so erzeugte Fahrzeug wird letztendlich an eine Liste von Fahrzeugen angehängt, die insgesamt den Verkehrsstrom einer Spur darstellt. Diese Liste wird im Rechenmodul schrittweise über die Einflusslinie einer Spur geschoben.

### 2.1.2 Verkehrszustände

Zur Simulation der Verkehrszustände wurden in der Vergangenheit je nach Anwendungsgebiet unterschiedliche Methoden entwickelt. Die verschiedenen Ansätze lassen sich einteilen in:

- Mikroskopische Simulation
- Makroskopische Simulation

In einer mikroskopischen Simulation werden die einzelnen Verkehrsteilnehmer als Individuen betrachtet, die ihrerseits selbstständige Entscheidungen treffen und auf die Entscheidungen anderer Verkehrsteilnehmer reagieren. Zu den wesentlichen Aspekten dieser Methode zählt die Motorisierung der Fahrzeuge sowie Reaktionszeit, Beschleunigungs-, Brems- und Spurwechselverhalten der Fahrer.

Eine makroskopische Simulation fasst die oben genannten Daten der Einzelfahrzeuge zu Zustandsgrößen zusammen. Die wesentlichen Größen sind danach Verkehrsstrom  $q$  [Kfz/h], Verkehrsdichte  $k$  [Kfz/km] und die mittlere Geschwindigkeit  $v$  [km/h]. Die Abhängigkeiten zwischen diesen Zustandsgrößen können einem Fundamentaldiagramm wie in Abbildung 2.3 entnommen werden.

Das Fundamentaldiagramm zeigt bereits, dass viele Vorgänge des Verkehrs einen stochastischen Charakter haben. Der Verkehrsstrom  $q$  ist dabei einer kontinuierlichen Änderung unterworfen. Je mehr Fahrzeuge auf einem Streckenabschnitt fahren, desto geringer werden die mittlere Geschwindigkeit und die Fahrzeugabstände. Die daraus resultierenden Verkehrszustände lassen sich in fließenden Verkehr, stockenden Verkehr und Stau untergliedern.

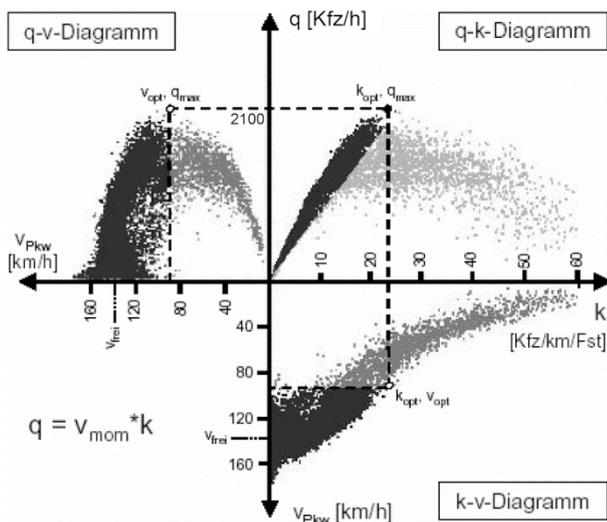


Abbildung 2.3: Fundamentaldiagramm [Kühn04]

Die eingesetzten Simulationsprogramme verwenden einen Ansatz, der tendenziell eher einer mikroskopischen Simulation zuzuordnen ist, wobei unwesentliche Prozesse stark vereinfacht abgebildet werden.

Im Gegensatz zu üblichen Verkehrssimulationen ist hier nur eine Teilstrecke (entsprechend der Brückenlänge) relevant. Da die Dauer einer Überfahrt relativ kurz ist, können sämtliche Vorgänge vernachlässigt werden, die zur Entstehung der unterschiedlichen Verkehrszustände führen. Wesentlich ist nur, welcher Verkehrszustand zum Zeitpunkt der Überfahrt tatsächlich vorhanden ist.

Dazu wird für jede Fahrspur ein Fahrzeugband generiert. Die einzelnen Fahrzeuge werden entsprechend dem Fahrzeugkollektiv (Abschnitt 2.1.1) zufällig erzeugt. Die Fahrzeugabstände werden nach den Gesetzmäßigkeiten der folgenden Abschnitte ebenfalls zufällig erzeugt. Vereinfachend werden die folgenden grundsätzlichen Annahmen getroffen:

- PKW werden in den Fahrzeugbändern im Allgemeinen nicht modelliert.  
Im Vergleich zu üblichen LKW haben PKW ein sehr geringes Gesamtgewicht und spielen daher eine eher untergeordnete Rolle.
- Die Geschwindigkeit der LKW wird auf allen Fahrspuren einer Richtungsfahrbahn als annähernd gleich angenommen.  
Im Gegensatz zu PKW fahren LKW im Allgemeinen mit einer annähernd gleichen Geschwindigkeit. LKW auf der Nebenspur fahren dabei mit einer geringfügig höheren Geschwindigkeit als auf der Hauptspur. In den Verkehrslastsimulationen ist allerdings nur eine kurze Teilstrecke des Verkehrs (Brückenlänge) relevant. Es kann also davon ausgegangen werden, dass bei einer vereinfachten Betrachtungsweise mit identischen Geschwindigkeiten der LKW keine relevanten Änderungen der Ergebnisse eintreten.
- Fahrzeugabstände ändern sich während der Überfahrt nicht.  
Wie bereits erwähnt, werden gleiche Geschwindigkeiten der LKW angenommen. Zusätzlich werden Beschleunigungs- und Bremsvorgänge ausgeschlossen. Die Fahrzeugabstände ändern sich also während einer Überfahrt nicht. Da eine Überfahrt relativ kurz ist, kann auch hier eine Beeinträchtigung der Ergebnisse ausgeschlossen werden.
- Spurwechselvorgänge werden nicht abgebildet.  
LKW werden entweder der Hauptspur oder einer Nebenspur zugeordnet. Zwischenzustände werden nicht modelliert. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Zustände nicht

maßgebend werden, da LKW während eines Spurwechsels nicht nebeneinander fahren können.

- Im System PATLoB werden LKW nur dann auf der Nebenspur angesetzt, wenn ein LKW auf der Hauptspur überholt wird. Diese Annahme stellt den Regelfall des Verkehrsgeschehens dar. In Ausnahmefällen mag es auch Abweichungen von diesem Regelfall geben. Da nebeneinander fahrende LKW allerdings eine ungünstigere Laststellung darstellen, werden die wenigen Ausnahmefälle nicht berücksichtigt.
- Im System „VerkehrSimulation“ wird der Verkehr auf mehreren Fahrstreifen unabhängig voneinander simuliert, lediglich bei der Abbildung von Stausituationen werden simulierte Verkehrsbänder in mehreren Spuren einer Richtung dahingehend synchronisiert, dass gleichzeitig Stau auf allen Spuren einer Richtung vorhanden ist.

### 2.1.3 DTV und DTV-SV

Der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) und der durchschnittliche tägliche Schwerverkehr (DTV-SV) stellen ein Maß für die Priorität des Streckenabschnitts dar. Zudem lässt das tägliche Verkehrsaufkommen in Kombination mit der Linienführung, der Streckenart und der Anzahl an Fahrstreifen näherungsweise Rückschlüsse auf die Verkehrsqualität des Streckenabschnitts zu.

Der DTV-SV gilt als wesentliche Eingangsgröße der Verkehrslastsimulation. Die Anzahl der simulierten LKW steht dabei in direktem Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeit, dass extreme Situationen der Verkehrslast auftreten. Je mehr LKW an einem Tag oder in einem Jahr fahren, desto wahrscheinlicher wird auch eine ungünstige Stellung besonders schwerer LKW in diesem Zeitabschnitt.

In den hier durchgeführten Simulationen wird das Verkehrsaufkommen eines jeden Tages dem DTV-SV entsprechend angenommen. Das heißt, die Anzahl der LKW in den Fahrzeugbändern eines Tages ist konstant.

### 2.1.4 Tagesganglinie

Im System PATLoB wird jedes Fahrzeugband in Zeitabschnitte von jeweils einer Stunde unterteilt. Die Anzahl an Fahrzeugen, die in dieser Stunde das Brückenbauwerk passieren, wird entsprechend einer Tagesganglinie bestimmt. Der Verkehrsstrom  $q$  [Fzg/h] beziehungsweise [LKW/h] ist damit stets bekannt.

Tagesganglinien werden nach [FiNo14] in die Typen A bis H unterteilt, wobei jeder Tagesganglinientyp eigene Besonderheiten aufweist. Eine beispielhafte Ganglinie des Gesamtverkehrs (PKW und LKW) mit Doppelspitze wird in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Verkehrsspitzen entsprechen hier den Hauptverkehrszeiten von 6 bis 9 Uhr und von 15 bis 19 Uhr.

In der Tagesganglinie des Schwerverkehrs sind keine Verkehrsspitzen zu erwarten. Dementsprechend wird auch von einer relativ ausgeglichenen Verkehrsverteilung ausgegangen. Das Verkehrsgeschehen findet hier hauptsächlich tagsüber statt, wobei nachts mit einer reduzierten Verkehrsmenge zu rechnen ist. Die in Abbildung 2.5 dargestellte Ganglinie wird den Simulationsrechnungen zugrunde gelegt.

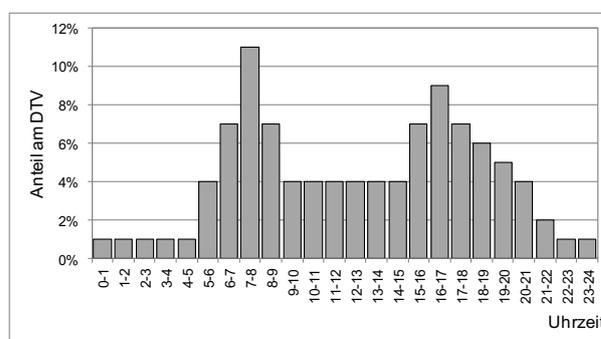


Abbildung 2.4: Tagesganglinie des Gesamtverkehrs

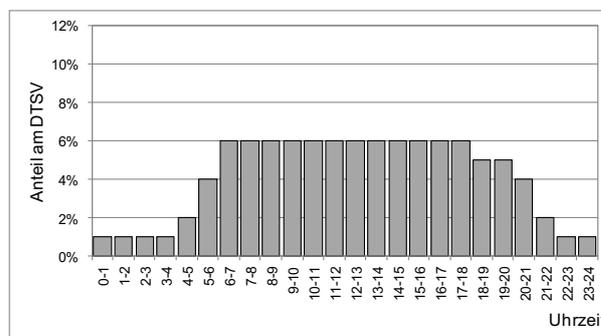


Abbildung 2.5: Tagesganglinie des Schwerverkehrs

Im System „VerkehrSimulation“ wird im Vergleich dazu der Tag in lediglich vier Abschnitte zu je sechs Stunden unterteilt. Aus den Unterschiedlichen Fahrzeugzahlen in den Tagesabschnitten wurden vordergründig Parameter für die Abbildung des Abstandsverhaltens der Fahrzeuge abgeleitet (vgl. folgender Absatz).

### 2.1.5 Fahrzeugabstände

Die Fahrzeugabstände stehen in direktem Zusammenhang mit den Verkehrszuständen. Es ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen den Abständen im fließenden Verkehr und im Stau.

Verkehrsmessungen haben gezeigt, dass die Abstände im fließenden Verkehr einer logarithmischen Normalverteilung folgen (vgl. Abbildung 2.6). Die Parameter der Verteilung werden in Abhängigkeit der Verkehrsstärke definiert. Grundlage hierfür waren Auswertungen von WIM-Daten, die zur Ableitung eines formelmäßigen Zusammenhangs zwischen Verkehrsstärke und Streuung der Log-Normalverteilung herangezogen wurden (vgl. [FrBö11a], [FrBö10]).

Die Fahrzeugabstände im Stau sind dadurch charakterisiert, dass viele kurze Abstände hintereinander folgen. In der Log-Normalverteilung des fließenden Verkehrs sind prinzipiell auch sehr geringe Abstände von wenigen Metern enthalten. Es ist allerdings unwahrscheinlich, dass mehrere kurze Abstände zufällig nacheinander erzeugt werden. Für die Fahrzeugabstände im Stau wird daher ein konstanter Wert von 5,0m angesetzt.

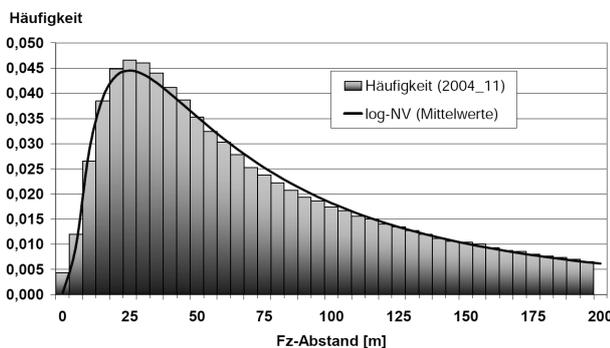


Abbildung 2.6: Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr [Kasc09]

### 2.1.6 Stauwahrscheinlichkeit

Zur Modellierung von Stauverkehr wurde in [Geiß95] ein Verfahren vorgestellt, das zufällig entstehende Abschnitte mit dichtem Verkehr in die Fahrzeugbänder integriert. Dazu werden die beiden Parameter  $p_{\text{Stau}}$  und  $p_{\text{Fließ}}$  mit Werten zwischen 0 und 1 eingeführt.

Der Wert  $p_{\text{Stau}}$  entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass auf ein Fahrzeug im Stau ein weiteres Fahrzeug im Stau folgt. Analog dazu entspricht  $p_{\text{Fließ}}$  der Wahrscheinlichkeit, dass einem Fahrzeug im fließenden Verkehr auch ein Fahrzeug im fließenden Verkehr folgt. Bei der Generierung eines neuen Fahrzeugs wird zunächst der aktuelle Verkehrszustand überprüft (fließender Verkehr oder Stau) und

anschließend eine Zufallszahl zwischen 0 und 1 erzeugt. Sobald eine Zufallszahl generiert wird, die höher liegt als der aktuelle Schwellenwert  $p_{\text{Stau}}$  oder  $p_{\text{Fließ}}$ , wird der Verkehrszustand gewechselt. Je höher diese Schwellenwerte gewählt werden, desto länger werden auch die zugehörigen Abschnitte des Staus oder des fließenden Verkehrs.

Für die Untersuchungen in dieser Arbeit mit Stauverkehr werden (falls nicht anders angegeben) die Parameter  $p_{\text{Stau}}=0.99$  und  $p_{\text{Fließ}}=0.999$  verwendet. Vergleichsrechnungen haben ergeben, dass mit diesen Parametern ein Stau-Anteil von ca. 10% und bei einem DTV-SV-Wert von 10.000 im Mittel zirka 9 Staus pro Tag erzeugt werden. Für niedrigere DTV-SV-Werte wird die mittlere Anzahl an Staus pro Tag entsprechend geringer.

### 2.1.7 LKW-Kolonnen

Die Modellierung von LKW-Kolonnen wird in zwei Arten untergliedert. Beide Modellierungsarten werden hier getrennt voneinander untersucht.

Die erste Modellierungsart bildet bereits im heutigen Verkehr enthaltene Kolonnen mit unterschiedlichen Längen (Anzahl an LKW und Fahrzeugabständen) ab. Dazu wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt, die Anzahl hintereinander fahrender LKW direkt zu steuern. Zur Definition von Kolonnen ist dabei eine Angabe erforderlich, bis zu welchem Fahrzeugabstand hintereinander fahrende LKW noch als Kolonne gelten (z.B. 100 Meter) und wie häufig bestimmte Kolonnenlängen auftreten (vgl. Abbildung 2.7). Bei der Umsetzung im Simulationsprogramm PATLoB wird also sichergestellt, dass Kolonnen einer bestimmten Länge nicht durch größere Fahrzeugabstände unterbrochen werden, als durch den definierten Maximalabstand festgelegt. Die hier verwendeten Parameter der LKW-Kolonnen (vgl. Abbildung 2.7) basieren auf einer Auswertung von WIM-Daten unterschiedlicher Zählstellen an Bundesautobahnen. Die Parameter bilden dabei einen Verkehr mit einer hohen Anzahl an LKW-Kolonnen ab.

Die zweite Modellierungsart bildet zukünftige Kolonnen infolge des vernetzten und autonomen Fahrens ab. Da die betrachteten Kolonnen bisher nur in Pilotprojekten getestet werden, ist davon auszugehen, dass die der ersten Modellierungsart zugrundeliegenden WIM-Daten noch keinerlei Aussagen diesbezüglich liefern. Die aktuelle Planung zum so genannten "Platooning" sieht weiterhin vor, dass Kolonnen dieses Typs näherungsweise konstante Fahrzeugabstände aufweisen. Die Fahrzeugabstände der ersten Modellierungsart werden hingegen als streuender Parameter betrachtet, weshalb

hier eine eigenständige Modellierungsart zu entwickeln ist. Die angewandte Methodik wird im Abschnitt 4.2 "Prognose-Szenarien" detailliert beschrieben.

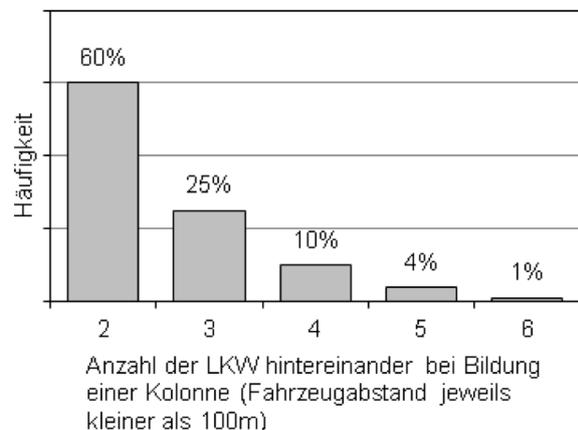


Abbildung 2.7: Verteilung der Kolonnenlänge

### 2.1.8 Mehrspuriger Verkehr

Die bisher erläuterten Methoden zur Modellierung der verschiedenen Verkehrszustände, wie Stau und fließender Verkehr, die zugehörigen Fahrzeugabstände und Tagesganglinien beschränken sich auf einen einspurigen Verkehr. Zur Erweiterung auf mehrspurigen Verkehr werden in den folgenden Abschnitten die dazu notwendigen Schritte erläutert.

- Begegnungsverkehr

Der Verkehrszustand einer Richtungsfahrbahn ist unabhängig vom Verkehrsgeschehen der Gegenrichtung. Bei der Generierung der Fahrzeugbänder wird daher auch jede Richtungsfahrbahn separat behandelt. Im System PATLoB wird der durchschnittliche tägliche Schwerverkehr (DTV-SV) einer Richtung entsprechend der Tagesganglinie in Stunden unterteilt. Das Fahrzeugband einer Stunde ist also Teil des Fahrzeugbandes eines ganzen Tages, das programmintern wiederum einer Richtungsfahrbahn zugeordnet ist. Jede Fahrspur enthält eine eigene Zustandsvariable, die angibt, ob aktuell Stau oder fließender Verkehr vorherrscht. Damit wird sichergestellt, dass sich die Richtungsfahrbahnen nicht gegenseitig beeinflussen.

Zur Simulation der Überfahrten werden die Fahrzeugbänder der beiden Richtungsfahrbahnen gleichzeitig (in entgegengesetzter Richtung) entlang der Einflusslinien verschoben. Alle Fahrzeugbänder haben dabei die Gemeinsamkeit, dass sie jeweils eine Stunde des Verkehrsgeschehens darstellen.

- Mehrspuriger Richtungsverkehr

Jede Richtungsfahrbahn kann in eine Hauptspur und mehrere Nebenspuren aufgeteilt werden. Die Hauptspur bedient im Regelfall den größten Anteil des Schwerverkehrs.

Im System PATLoB wird die Annahme getroffen, dass ein LKW nur dann auf der Nebenspur fährt, wenn er einen LKW auf der Hauptspur überholt. Der Algorithmus zur Generierung der Nebenspur orientiert sich also an der Hauptspur. Die Aufteilung des gesamten Schwerverkehrs einer Richtung in einzelne Fahrspuren erfolgt anhand einer konstanten Überholwahrscheinlichkeit (Spurbelegung). Eine Überholwahrscheinlichkeit von beispielsweise 25% entspricht der Aufteilung Haupt-/Nebenspur = 80%/20%. Abbildung 2.8 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt der Fahrzeugbänder eines Tages für eine Richtungsfahrbahn mit drei Fahrstreifen. Die Abbildung enthält 24x3 Fahrzeugbänder. Ein Fahrzeugband enthält die LKW einer Spur für eine Stunde (siehe Tagesganglinie).

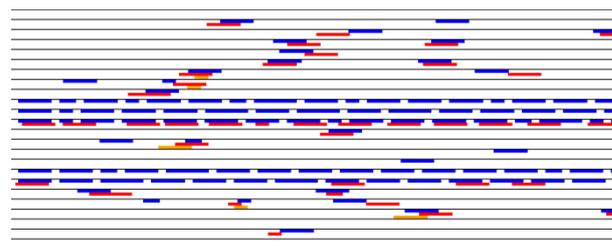


Abbildung 2.8: 24 Fahrzeugbänder einer Richtungsfahrbahn mit 3 Fahrstreifen (Blau = Hauptspur, Rot = Nebenspur 1, Orange = Nebenspur 2)

Die Geschwindigkeit der LKW kann auf allen Fahrspuren einer Richtungsfahrbahn als annähernd gleich angenommen werden. Um eine Synchronisierung der Fahrzeugbänder einer Richtungsfahrbahn zu gewährleisten, müssen alle Fahrzeugbänder einer Stunde eine gleiche Länge aufweisen. Bei unterschiedlichen Längen der Fahrzeugbänder einer Richtungsfahrbahn würden die Enden der Fahrzeugbänder nicht gleichzeitig erreicht werden, wodurch systematisch unsinnige Verkehrszustände generiert werden würden.

Die Erstellung der Fahrzeugbänder der Nebenspuren erfolgt in drei Schritten:

1. Erstelle ein Fahrzeugband für eine Stunde (analog zur Hauptspur).
2. Passe die Länge des erstellten Fahrzeugbandes an die Länge der Hauptspur an. (betrifft nur die Fahrzeugabstände)
3. Verschiebe die LKW, sodass LKW der Nebenspur und LKW der Hauptspur annähernd auf gleicher Höhe sind. In Abbildung 2.9 werden die

möglichen Zustände dieser Verschiebung dargestellt. Wo der überholende LKW zwischen vorderster oder hinterster Stellung steht, wird mit Hilfe einer Zufallszahl zwischen 0 und 1 ermittelt. (bei drei Fahrstreifen sind zusätzlich die LKW der Nebenspur 2 und LKW der Nebenspur 1 auf gleicher Höhe)

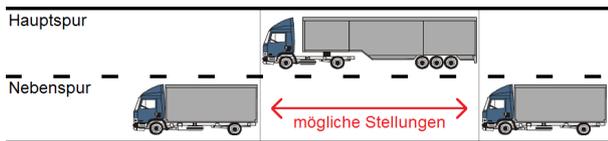


Abbildung 2.9: Mögliche Stellungen eines überholenden LKW

Im System „VerkehrSimulation“ erfolgt die Simulation der Fahrspuren, abgesehen von der Abbildung von Stauverkehr in mehr als einer Spur pro Richtung, getrennt voneinander. Die Aufteilung des Verkehrs auf mehrere Spuren einer Richtung erfolgt in der Definition der Eingangsvariablen für die Simulationsrechnungen (Verkehrszahlen pro Tag, Abstandsverhalten, ggf. Verkehrszusammensetzung). Mit diesem vereinfachten Ansatz treten demnach im simulierten fließenden Verkehr Situationen auf, in denen auf dem Überholfahrstreifen ein Fahrzeug vorhanden ist, während auf dem rechten Fahrstreifen kein Fahrzeug vorhanden ist.

Das System PATLoB bildet damit den Mehrspurverkehr aufgrund des erweiterten Ansatzes genauer ab.

### 2.1.9 Dynamischer (Schwing-) Beiwert

Die Eingangsdaten der Fahrzeuggesamtgewichte werden grundsätzlich als statische Lasten aufgefasst. Während einer Überfahrt erhält das Tragwerk eine dynamische Anregung infolge der Lasten, zusätzlich abhängig von Fahrbahnunebenheiten und den Eigenschaften der Fahrzeuge (vor allem Federung, Dämpfern und Bereifung). Die Höhe der dynamischen Anregung ist maßgeblich von der Geschwindigkeit der LKW abhängig. Je höher die Geschwindigkeit, desto höher ist auch die dynamische Anregung. Für den Verkehrszustand Stau muss keine dynamische Erhöhung berücksichtigt werden.

In den Verkehrslastsimulationen wird die komplexe Interaktion zwischen Fahrzeug und Tragwerk nicht modelliert. Stattdessen wird der Einfluss der dynamischen Anregung (wo angegeben) über einen schädigungsäquivalenten Schwingbeiwert  $\varphi_{\text{fat}}$  berücksichtigt, womit eine Erhöhung der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_E$  (bzw. der Schadenssumme  $D$ ) erfolgt. Hintergründe zur Ermittlung von  $\varphi_{\text{fat}}$  können [MeDa94] entnommen werden.

Aus Vergleichsgründen werden gesonderte Simulationsrechnungen mit einem weiteren Ersatzverfahren durchgeführt, das die ungünstige Erhöhung der statischen Radlasten über einen Schwingbeiwert berücksichtigt (z.B.  $\varphi_{\text{fließender Verkehr}}=1,1$  /  $\varphi_{\text{Stau}}=1,0$ ), vgl. [Geiß95] und [Geiß09]. Dieses Verfahren wird üblicherweise bei der Ermittlung charakteristischer Werte eingesetzt.

## 2.2 Grundlagen der Ermüdungsnachweise

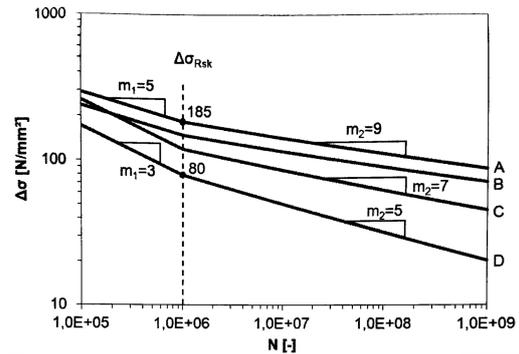
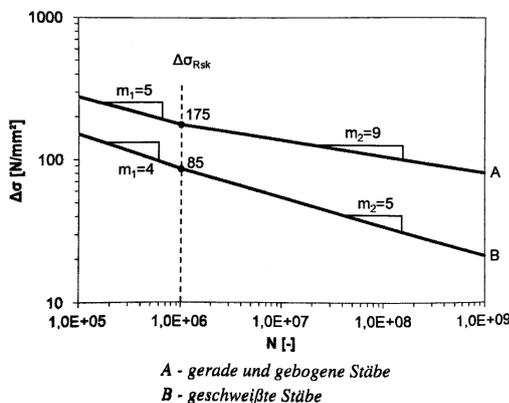
Ermüdungsversagen folgt einer Anzahl an Beanspruchungswechsel (Schwingspiele) und unterscheidet sich damit von einem Festigkeitsversagen infolge einer einzelnen extremalen Beanspruchung. Ein umfassender Beitrag zum aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik auf dem Gebiet der Ermüdungsnachweise für Brücken findet sich in [NuGü06] und [Kroh14]. Die wesentlichen Sachverhalte werden im Folgenden erläutert.

### 2.2.1 Wöhlerlinien

Wöhlerlinien beschreiben die Korrelation zwischen der ertragbaren Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  und der zugehörigen Schwingspielzahl  $N$  und werden mit stufenweise konstanter Spannungsschwingbreite (Einstufenkollektiv) experimentell ermittelt.

$$\log N = \log C - m \cdot \Delta\sigma$$

Je nach Höhe der einwirkenden Spannungsschwingbreite lässt sich die Wöhlerlinie in die Bereiche der Kurzzeit-, Zeit- und Dauerfestigkeit unterteilen. Im Unterschied zum Baustahl wurde für Beton- und Spannstahl kein Schwellenwert der Ermüdungsfestigkeit festgelegt [Kroh14]. Stattdessen läuft die Wöhlerlinie nach dem ersten Knickpunkt bei  $\Delta\sigma_{Rsk}$  und  $N^* = 10^6$  mit konstanter Neigung weiter, siehe Abbildung 2.10. Bei Wöhlerlinien des Spannstahls wird aufgrund der Reibermüdung zwischen Kunststoff- und Stahlhüllrohren unterschieden. In den geltenden Regelwerken wird der Mittelspannungseinfluss auf die Ermüdungsfestigkeit weder für Beton- noch für Spannstahl berücksichtigt. In aktueller Literatur (z.B. [MDMH10]) finden sich jedoch durchaus Ansätze zur Berücksichtigung des Ermüdungswiderstandes in Abhängigkeit der Unterspannung.



A - Einzellitzen in Kunststoffhüllrohren  
B - gerade und gekrümmte SpGl. in Kunststoffhüllrohren  
C - gekrümmte SpGl. in Stahlhüllrohren  
D - Kopplungen und Verankerungen, sofern nicht anders festgelegt

Abbildung 2.10: Bezugs-Wöhlerlinien des Beton- und Spannstahls [Kroh14]

### 2.2.2 Beanspruchungskollektiv

Beanspruchungskollektive werden als Häufigkeitsverteilung oder Histogramm der auftretenden Spannungsschwingbreiten in einem Bezugszeitraum dargestellt. Die einzelnen Spannungsschwingbereiten des Histogramms werden durch Auswertung eines Kennwert-Zeit-Verlaufes mithilfe eines Rainflow-Algorithmus (Zyklenzählverfahren) bestimmt.

Neben der Anzahl der Lastspiele lassen sich Beanspruchungskollektive insbesondere hinsichtlich ihrer Völligkeit unterscheiden (vgl. Abbildung 2.11). Eine große Völligkeit (A) bringt einen hohen Anteil an betragsmäßig großen Spannungsschwingbreiten mit sich.

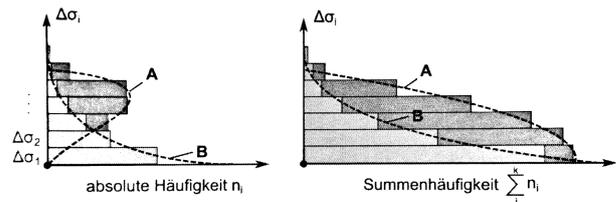


Abbildung 2.11: Beanspruchungskollektive unterschiedlicher Völligkeit [Kroh14]

Die gesamte durch ein Beanspruchungskollektiv hervorgerufene Schädigung wird als Schadenssumme  $D$  bezeichnet. Sie ergibt sich durch Gegenüberstellung von Einwirkung (Kollektiv) und Widerstand (Wöhlerlinie). Die Berechnungsart, nach der sich diese Summe ermitteln lässt, hängt von der verwendeten Schadensakkumulationshypothese ab. Es existieren lineare und nichtlineare Akkumulationshypothesen, wobei die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner in der Praxis am häufigsten Verwendung findet.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1,0$$

Die Schadenssumme eines mehrstufigen Beanspruchungskollektivs lässt sich auch mit Hilfe eines entsprechenden Einstufenkollektivs mit konstanter Spannungsschwingbreite und festgelegter Schwingspielzahl beschreiben. In diesem Zusammenhang wird auch von einem äquivalenten Einstufenkollektiv gesprochen. Die zugehörige schädigungsäquivalente Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bzw.  $\Delta\sigma_{E,2}$  wird mit einer Schwingspielzahl von  $n_E = 1 \cdot 10^6$  (bzw. für Stahlkonstruktionen  $n_E = 2 \cdot 10^6$ ) definiert und ergibt sich aus:

$$\Delta\sigma_{E,1} = \left[ \frac{1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta\sigma_i^m) \right]^{1/m}$$

Durch einen Vergleich mit der Spannungsschwingbreite infolge des ELM 3 lassen sich die hier relevanten Schadensäquivalenzfaktoren  $\lambda$  ableiten.

$$\lambda = \frac{1}{\Delta\sigma_{ELM3}} \cdot \left[ \frac{1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta\sigma_i^m) \right]^{1/m}$$

Die Anpassung an reale Mehrstufenkollektive wurde für die aktuellen Eurocodes [DIN EN 1992-2] und [DIN EN 1993-2] in [Dani94] und [MeSe95] erarbeitet. Für die aktuell gültigen Schadensäquivalenzfaktoren ist nur eine konstante Neigung  $m_2$  der Wöhlerlinie berücksichtigt, wodurch konservative Ergebnisse bei Ansatz des ELM 3 resultieren. Entsprechende Untersuchungen folgen in Kapitel 6. Andererseits entfällt jedoch auch die Abhängigkeit der  $\lambda$ -Werte vom untersuchten Kerbdetail, womit eine gute ingenieurmäßige Handhabung ermöglicht wird.

Eine detailliertere Betrachtung wäre dadurch möglich, die Form des Beanspruchungskollektivs (Völligkeit und maximale Spannungsschwingbreite) im Verhältnis zur Geometrie der Bezugs-Wöhlerlinie in die Ermüdungsnachweise zu integrieren.

Das ELM 4 führt durch Variation der Verkehrs zusammensetzung auch zu unterschiedlichen Völligkeiten der Beanspruchungskollektive. Diese Völligkeiten von Beanspruchungskollektiven in ein Nachweisformat einzubinden kann zur Beurteilung der Verkehre sinnvoll sein.

### 2.2.3 Spannungsermittlung / Grundbeanspruchung

Die Spannungsverteilung eines Stahl- oder Spannbetonquerschnitts hängt stark vom vorliegenden Risszustand ab. Ist der Querschnitt ungerissen (z.B. wenn er vollständig unter Druck steht), darf davon ausgegangen werden, dass die Betondehnungen  $\varepsilon_c$  den Stahldehnungen  $\varepsilon_s$  entsprechen. Reißt der Beton z.B. infolge von größeren Biegezugspannungen

auf, so steigen die Stahlspannungen  $\sigma_s$  bzw.  $\sigma_p$  vergleichsweise stark an, da im Riss die gesamte Zugkraft auf den Stahl übergeht. Mit dem Aufreißen des Querschnitts unter Biegung ist zusätzlich eine Reduktion der Betondruckzonenhöhe und somit auch ein Anstieg der Betondruckspannungen verbunden. Für die Höhe der im Ermüdungsnachweis relevanten Spannungsschwingbreiten ist es demnach entscheidend, ob sie sich im Zustand I oder im Zustand II befinden. Bei nicht vorgespannten Tragwerken muss i.d.R. von Rissen in der Biegezugzone ausgegangen werden. Bei vorgespannten Trägern können Risse, die z.B. infolge seltener Einwirkungen entstanden sind, in Abhängigkeit des einwirkenden Grundmomentes  $M_0$  und der Vorspannkraft  $P$  überdrückt sein und so trotz sichtbaren Risses im Zustand I verbleiben. Das Grundmoment entspricht der Summe der Momente aus ständigen Lasten zuzüglich des Momentes infolge des vertikalen Temperaturgradienten (vgl. [ZiZG06]).

$$M_0 = M_G + M_P + M_{Set} + M_{\Delta T}$$

Abbildung 2.12 veranschaulicht die  $M$ - $\sigma$ -Beziehung sowie die Wirkung eines veränderlichen Grundmomentes auf die Spannungsschwingbreite bei konstantem Lastwechsellmoment aus Verkehr  $\Delta M_Q$ .

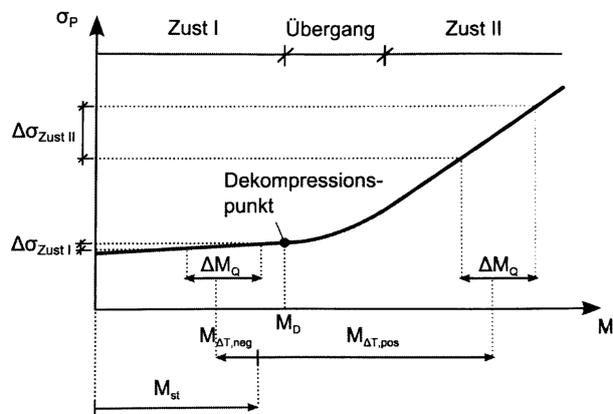


Abbildung 2.12:  $M$ - $\sigma$ -Diagramm für einen Spannbetonquerschnitt [Kroh14]

Das antizyklische Auftreten der Beanspruchungen aus Verkehr und Temperatur und deren Ermüdungsrelevanz wird hier im Zuge der Überprüfung des realitätsnahen Verkehrslastmodells nicht betrachtet.

Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Niveaus der Grundbeanspruchung werden je Simulation konstante vertikale Temperaturgradienten  $\Delta T$  betrachtet, die in unterschiedlichen Durchläufen variiert werden. Dieses Vorgehen erlaubt eine einfache Übertragung der Ergebnisse auf andere Temperaturgradienten. Weiterhin wird dadurch die Möglichkeit geschaffen, den Einfluss allein aus der Temperatur klar zu identifizieren.

Für die Spannungsermittlung im gerissenen Bereich ist zusätzlich eine Umlagerung der Spannungen vom Spannstahl hin zum Betonstahl zu berücksichtigen. Aufgrund ungleicher Verbundeigenschaften liegt im Riss ein innerlich statisch unbestimmtes System vor. Der im Regelfall gerippte Betonstahl übernimmt dabei mit seinem steiferen Verbund einen größeren Spannungsanteil als die Spannglieder (vgl. [Kroh14] [DIN EN 1992-2]).

Die M- $\sigma$ -Beziehungen der relevanten Komponenten werden in Abbildung 2.13 anhand eines beispielhaften Spannbetonquerschnittes dargestellt.

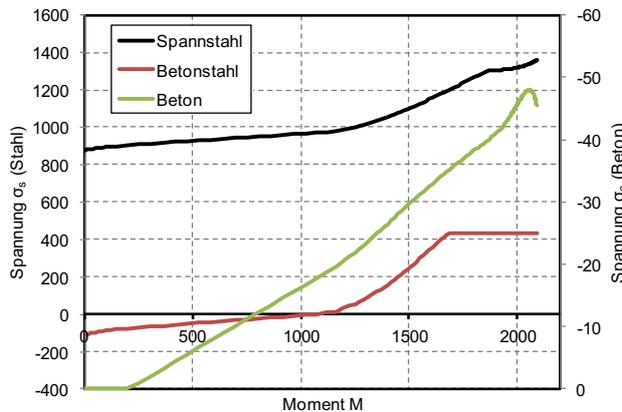


Abbildung 2.13: M- $\sigma$ -Beziehungen eines beispielhaften Spannbetonquerschnittes

Die aktuell gültigen Schadensäquivalenzfaktoren  $\lambda$  des Massivbrückenbaus [DIN EN 1992-2] wurden in der Arbeit von Danielewicz [Dani94] ermittelt. Dabei erfolgt eine Linearisierung der in der Realität nicht-linearen M- $\sigma$ -Beziehung. Der nichtlineare Einfluss der Grundbeanspruchung auf die  $\lambda$ -Werte (durch den Knick der M- $\sigma$ -Beziehung) braucht dadurch bei einer Bemessung nach den aktuell gültigen Eurocodes nicht berücksichtigt zu werden. D.h., die  $\lambda$ -Werte sind für sämtliche Niveaus der Grundbeanspruchung gültig und sollten nicht zu einer Überschätzung der Ermüdungssicherheit führen. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass die Linearisierung auf der sicheren Seite liegt, wenn die Momentenschwingbreite infolge des ELM 3 mindestens so groß ist wie die maximale Momentenschwingbreite aus der realen Verkehrsbeanspruchung. Zur Erfüllung dieser Bedingung wurden die Vergrößerungsfaktoren des ELM 3 für eine Bemessung im Massivbau eingeführt (1,75 für den Nachweis an Zwischenstützen, 1,4 in den übrigen Bereichen).

Bei der Ermittlung von Schadensäquivalenzfaktoren  $\lambda$  aus der Grundgleichung

$$\lambda = \frac{1}{\Delta\sigma_{ELM3}} \cdot \left[ \frac{1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta\sigma_i^m) \right]^{1/m}$$

ergibt sich mit der Linearisierung

$$\Delta\sigma = \Delta M \cdot u$$

der folgende Zusammenhang.

$$\lambda = \frac{1}{\Delta M_{ELM3}} \cdot \left[ \frac{1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta M_i^m) \right]^{1/m}$$

Schadensäquivalenzfaktoren können damit direkt auf Grundlage der Momentenschwingbreiten ermittelt werden.

## 2.2.4 Nachweis mit schädigungsäquivalenten Schwingbreiten (ELM 3)

Der Nachweis mit schädigungsäquivalenten Schwingbreiten stellt gewissermaßen das werkstoffübergreifende Standardnachweisverfahren dar. Die Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_E$  erfolgt über die Berechnung der Schwingbreite aus dem ELM 3 und den Schadensäquivalenzfaktoren  $\lambda_i$ . Der Schadensäquivalenzfaktor  $\lambda_S$  ergibt sich aktuell nach [DIN EN 1992-2] aus:

$$\lambda_S = \varphi_{fat} \cdot \lambda_{S,1} \cdot \lambda_{S,2} \cdot \lambda_{S,3} \cdot \lambda_{S,4}$$

Dabei ist der Faktor  $\varphi_{fat}$  (Oberflächenrauigkeit) auch bei einem zukünftigen Anstieg des Schwerverkehrsaufkommens keiner Änderung unterworfen. Der Fokus liegt daher im Folgenden auf den Faktoren  $\lambda_{S,1}$  bis  $\lambda_{S,4}$ , die hinsichtlich eines zukunftsfähigen Lastmodells zu überprüfen sind.

- $\lambda_{S,1}$ : Einfluss von Stützweite und System
- $\lambda_{S,2}$ : Verkehrsaufkommen und Verkehrsart

$$\lambda_{S,2} = \bar{Q} \cdot \sqrt[k_2]{\frac{N_{obs}}{2,0}}$$

- $\lambda_{S,3}$ : Nutzungsdauer

$$\lambda_{S,3} = \sqrt[k_2]{\frac{N_{years}}{100}}$$

- $\lambda_{S,4}$ : Einfluss weiterer Fahrstreifen

$$\lambda_{S,4} = \sqrt[k_2]{\frac{\sum N_{obs,i}}{N_{obs,1}}}$$

Die aktuelle Regelung zum Einfluss weiterer Fahrstreifen stellt bereits eine Vereinfachung der ursprünglichen Form von

$$\lambda_{S,4} = \sqrt[k_2]{1 + \frac{N_2}{N_1} \left( \frac{\eta_2 \cdot Q_{m2}}{\eta_1 \cdot Q_{m1}} \right)^{k_2} + \frac{N_3}{N_1} \left( \frac{\eta_3 \cdot Q_{m3}}{\eta_1 \cdot Q_{m1}} \right)^{k_2} + \dots + \frac{N_k}{N_1} \left( \frac{\eta_k \cdot Q_{mk}}{\eta_1 \cdot Q_{m1}} \right)^{k_2}}$$

dar. Dabei ist

- k die Anzahl der Schwerverkehrsstreifen;
- N<sub>j</sub> die Anzahl der Schwerlastfahrzeuge (Lkw) je Jahr für den Streifen j;
- Q<sub>mj</sub> das durchschnittliche Gesamtgewicht der Schwerlastfahrzeuge (Lkw) im Streifen j;
- η<sub>j</sub> der Wert der Einflusslinie in der Mitte des Streifens j.

Die Vereinfachung zur aktuellen Form war u.a. dadurch möglich, dass in Verkehrsmessungen kein signifikanter Unterschied des durchschnittlichen Gesamtgewichts der Lkw Q<sub>mj</sub> in unterschiedlichen Fahrstreifen erkennbar ist.

Schadensäquivalenzfaktoren λ<sub>c,i</sub> für Betonnachweise bei Straßenbrücken wurden zwar in [Dani94] erarbeitet, fanden jedoch keine Umsetzung in den aktuellen Regelwerken. Der Ermüdungsnachweis für Beton wird daher üblicherweise mit dem vereinfachten Nachweisformat geführt.

**2.2.5 Nachweis mit Berechnung der Schadenssumme (ELM 4)**

Als Alternative zum ELM 3 darf auf Basis von Beanspruchungskollektiven ein akkumulierter Schaden berechnet und mit einer Grenzschadenssumme (z.B. D<sub>lim</sub>=1,0) verglichen werden. Das ELM 4 stellt dabei die Grundlage zur Ermittlung von Beanspruchungskollektiven dar.

Das ELM 4 besteht aus einem Set von 5 Ersatzfahrzeugen, die jeweils einzeln auf dem Überbau anzusetzen sind. Durch Addition der 5 Schadensanteile aller Einzelfahrzeuge wird eine vereinfachte, aber direkte Schadensberechnung möglich. Zu jedem Fahrzeug sind Achsabstände und Achslasten sowie der nach der jeweiligen Verkehrsart abgestufte Anteil am Schwerverkehr angegeben, siehe Tabelle 2.2.

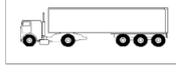
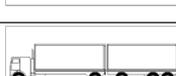
FAHRZEUGTYP	VERKEHRSART						
	1	2	3	4	5	6	7
				Große Entfernung	Mittlere Entfernung	Ortsverkehr	
SCHWERFAHRZEUG	Achsabstand (m)	Ersatzachslast (kN)	Schwerverkehrsanteil	Schwerverkehrsanteil	Schwerverkehrsanteil	Reifenart	
	4,5	70 130	20,0	40,0	80,0	A B	
	4,20 1,30	70 120 120	5,0	10,0	5,0	A B B	
	3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90	50,0	30,0	5,0	A B C C C	
	3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	15,0	15,0	5,0	A B B B	
	4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10,0	5,0	5,0	A B C C C	

Tabelle 2.2: Gruppe von Ersatzfahrzeugen des bisherigen ELM 4 [DIN EN 1991-2]

Tabelle 2.3 zeigt die Veränderungen des ELM 4 hinsichtlich der Verkehrszusammensetzung von seiner Einführung in die Europäischen Normen 1996 bis 2011. Daraus geht hervor, dass vor allem der Anteil des LKW-Typ 98 (Lkw 3) von 40% auf zuletzt 60% angehoben wurde. Diese Erhöhung folgt dem durch Messungen bzw. Zählungen belegbaren, tatsächlichen Anstieg des Anteils von Sattelzügen mit dreiaxsigem Auflieger.

Das ELM 4 wurde bisher für die Verwendung an Stahlbrücken unter Ansatz der in [DIN V ENV 1991-3] (1996) geltenden Verkehrszusammensetzung kalibriert [MeSe95]. Um zu untersuchen, wie gut das ELM 4 den Auxerre-Verkehr abbildet, wurden anhand des Terms

$$\sqrt{\frac{\sum D_{Sim}}{\sum D_{ELM4}}}$$

die Schadenssummen aus Simulation und ELM 4 miteinander verglichen. Im Ergebnis der damaligen Untersuchung zeigte sich, dass das ELM 4 den Auxerre-Verkehr (große Entfernung) adäquat abbildet, wobei eine dynamische Erhöhung um den Faktor φ<sub>fat</sub>=1,20 (gute Belagsqualität) bereits im Lastmodell enthalten ist. Für eine mittlere Belagsqualität wird in [MeSe95] ein zusätzlicher Erhöhungsfaktor φ<sub>fat,zus</sub>=1,20 vorgeschlagen. Er hat jedoch bisher keinen Eingang in die Normung gefunden.

Neben der Zusammensetzung des ELM 4 ist auch die anzusetzende Fahrzeuganzahl je Jahr N<sub>obs</sub> dem

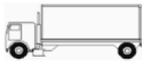
Fahrzeugtyp	Norm / Zeitraum	Verkehrsart und SV-Anteil in %		
		Große Entfernung	Mittlere Entfernung	Ortsverkehr
Lkw 1 	EC1-3 (1996)	20	50	80
	EC1-2 (2004)	20	40	80
	Nachrechnungrichtlinie (ab 2010)	10	40	80
Lkw 2 	EC1-3 (1996)	5	5	5
	EC1-2 (2004)	5	10	5
	Nachrechnungrichtlinie (ab 2010)	5	10	5
Lkw 3 	EC1-3 (1996)	40	20	5
	EC1-2 (2004)	50	30	5
	Nachrechnungrichtlinie (ab 2010)	60	30	5
Lkw 4 	EC1-3 (1996)	25	15	5
	EC1-2 (2004)	15	15	5
	Nachrechnungrichtlinie (ab 2010)	15	15	5
Lkw 5 	EC1-3 (1996)	10	10	5
	EC1-2 (2004)	10	5	5
	Nachrechnungrichtlinie (ab 2010)	10	5	5

Tabelle 2.3: Veränderung der Verkehrszusammensetzung im ELM 4 [Kroh14]

zukünftigen Verkehr anzupassen. In [NaRiLi11] wurde eine entsprechende Modifizierung für die vergangenen Jahrzehnte, basierend auf Verkehrszählungen der 1970er Jahre, bereits umgesetzt (vgl. [BGMM12]).

## 2.3 Analyse von Verkehrscharakteristiken

Im Rahmen von zahlreichen vorhergehenden Untersuchungen wurden Verkehrssimulationsrechnungen für ein breites Spektrum von Verkehrscharakteristiken durchgeführt. Schwerpunkt war dabei die Ableitung von charakteristischen Beanspruchungswerten zur Identifikation von statischen Lastmodellen.

Nachfolgend erfolgt eine Analyse, inwieweit die betrachteten Verkehrscharakteristiken das aktuelle Verkehrsgeschehen im deutschen Straßennetz abdecken. Die Beschreibung der Verkehrscharakteristiken erfolgt hierzu vereinfacht über die Schwerverkehrsstärke für den Gesamtquerschnitt eines Streckenabschnittes (Summe aus den Zahlen beider Fahrrichtungen) und den Anteil von drei Fahrzeugtypgruppen (Sattelzugfahrzeuge, LKW mit Anhänger, LKW ohne Anhänger). Für die Vergleiche werden folgende Daten herangezogen:

- Daten aus automatischen Dauerzählstellen aus dem Jahr 2015 an Bundesautobahnen und Bundesstraßen (Datenquelle: Homepage BASt)
- Daten aus Auswertungen von WIM-Daten an verschiedenen Autobahnabschnitten aus den Jahren 2004/2005 (Datenquelle: [Böni06])
- Daten aus Auswertungen von WIM-Daten an verschiedenen Autobahnabschnitten aus den Jahren 2007 bis 2015 (aktuelle Auswertungen durch TU-Berlin)
- Daten aus Auswertungen von BWIM-Daten an verschiedenen Strecken (Bundesstraßen, nachgeordnetes Straßennetz (Datenquelle: verschiedene Projekte des Ingenieurbüros Prof. Freundt, u.a. [FVBP14], [FrBH15], [FrBH16], [FBHS16])
- Detaildaten aus Dauerzählstellen oder manueller Zählung (Datenquelle: verschiedene Projekte des Ingenieurbüros Prof. Freundt)
- Betrachtete Verkehrscharakteristiken in mehreren Forschungsprojekten

In nachfolgender Abbildung 2.14 sind die Datenbestände hinsichtlich des Anteils von Sattelzugfahrzeugen in Bezug zur Schwerverkehrsstärke zusammengestellt. Die schwarzen Punkte im Diagramm zeigen die Werte aus den Dauerzählstellen im Jahr 2015. Hierbei sind die Daten von Autobahnen und Bundesstraßen zusammengefasst. Die roten Punkte repräsentieren Verkehrscharakteristiken, die in durchgeführten Simulationsrechnungen betrachtet wurden. Da hierbei auch

Prognoseszenarien für Verkehrsaufkommen in der Zukunft untersucht wurden, sind hier auch sehr große Schwerverkehrsstärken enthalten, die im aktuellen Verkehrsgeschehen nicht vorkommen. Die blauen und orangenen Kreise zeigen Ergebnisse aus Auswertungen von WIM-Daten an Autobahnen. Die grünen Kreise zeigen Ergebnisse von BWIM-Erfassungen an Bundesstraßen und im nachgeordneten Straßennetz und die lilafarbenen Kreise stammen aus Auswertungen von detaillierten Zählstellendaten bzw. manuellen Zählungen.

Die Darstellung zeigt zunächst auf, dass für Schwerverkehrsstärken unterhalb von etwa 3.000 (Gesamtquerschnitt) ein sehr breites Spektrum für den Anteil von Sattelzugfahrzeugen am Gesamtverkehr vorliegt. Die Daten stammen hier vordergründig aus Erfassungen an Bundesstraßen. Die Gegenüberstellung zu in Simulationsrechnungen verwendeten Verkehrscharakteristiken zeigt auf, dass für größere Werte des Anteils von Sattelzugfahrzeugen am Gesamtschwerverkehr (ab rund 50 %) ein sehr breites Spektrum des tatsächlichen Verkehrsaufkommens Berücksichtigung fand. Weniger bzw. nicht betrachtet wurde hier bisher der Bereich zwischen 10 % und 50 % bei Schwerverkehrsstärken unterhalb von 3.000. In diesem Bereich liegen auch die vorhandenen BWIM-Daten, da in den entsprechenden Untersuchungen gerade die Fragestellung der Auswirkung des Verkehrs im nachgeordneten Straßennetz relevant war. Die WIM-Daten ordnen sich erwartungsgemäß (WIM-Erfassungen an Autobahnabschnitten) im oberen Bereich des Anteils der Sattelzüge am Gesamtverkehr und der Schwerverkehrsstärke ein.

In analoger Weise sind in Abbildung 2.15 die Datenbestände hinsichtlich des Anteils von LKW mit Anhänger in Bezug zur Schwerverkehrsstärke aufgetragen. Im Gegensatz zum Anteil der Sattelzugfahrzeuge ergibt sich hier eine massiv kleinere Bandbreite der Anteilswerte.

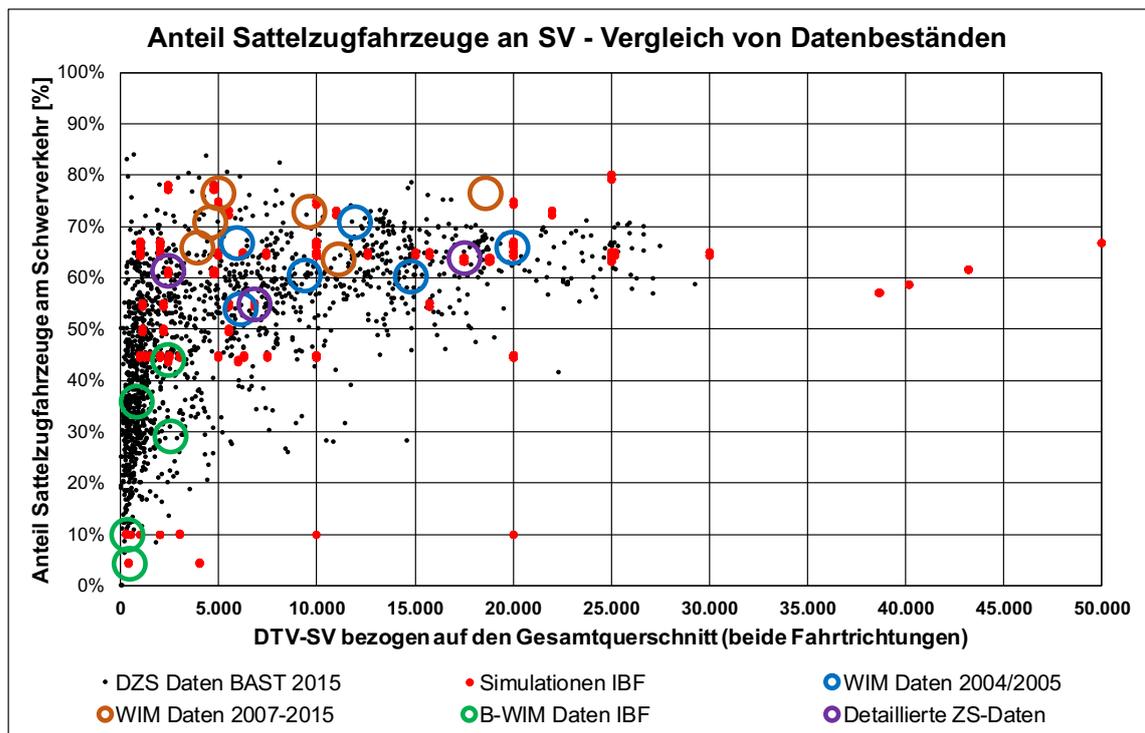


Abbildung 2.14: Vergleich von Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von Sattelzugfahrzeugen in Bezug zur Schwerverkehrsstärke

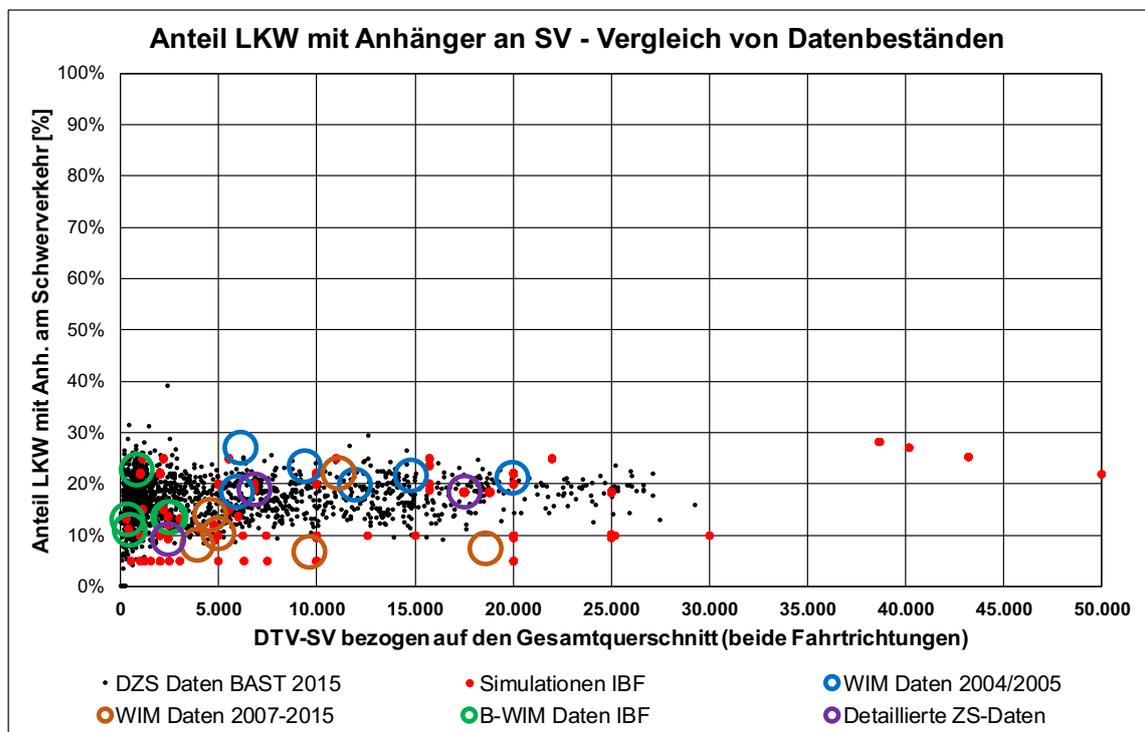


Abbildung 2.15: Vergleich von Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von LKW mit Anhänger in Bezug zur Schwerverkehrsstärke

In nachfolgender Abbildung 2.16 sind abschließend die Datenbestände hinsichtlich des Anteils von LKW ohne Anhänger in Bezug zur Schwerverkehrsstärke aufgetragen. Aufgrund der in den beiden vorhergehenden Abbildungen ersichtlichen großen Breite des Wertespektrums bei Sattelzugfahrzeugen und geringen Breite des Wertespektrums bei LKW mit Anhängern muss zwangsläufig für die Werte der

Anteile der LKW ohne Anhänger ein großes Wertespektrum vorliegen, das mehr oder weniger qualitativ umgekehrt zu den Anteilswerten der Sattelzugfahrzeuge ist. Die oben getroffenen Aussagen und qualitativen Ableitungen treffen damit hier analog zu.

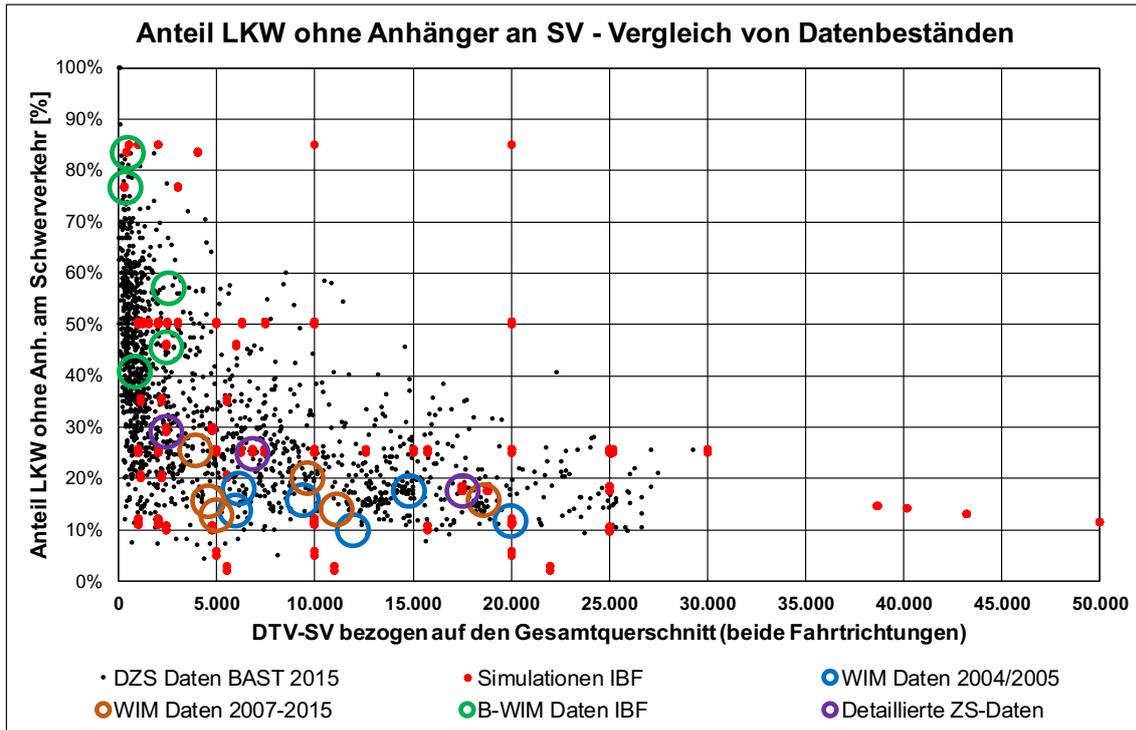


Abbildung 2.16: Vergleich von Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von LKW ohne Anhänger in Bezug zur Schwerverkehrsstärke

### 3 Tragsysteme und Nachweisstellen

Zur systematischen Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Verkehre sind verschiedene Tragsysteme zu untersuchen. Der Untersuchungsumfang spaltet sich dabei in die beiden Kategorien vereinfachter und detaillierter Systeme, die im Folgenden beschrieben werden.

#### 3.1 Analyse vereinfachter Tragsysteme

Eine Betrachtung vereinfachter bzw. schematisierter statischer Systeme erlaubt eine systematische Untersuchung an einem weiten Spektrum möglicher Brückensysteme. Variierende Auswirkungen der separat betrachteten Verkehre an unterschiedlichen statischen Systemen können damit gut erfasst werden. Im Ergebnis lassen sich dadurch direkt verallgemeinerbare Aussagen zur Beurteilung der aktuellen Ermüdungslastmodelle ableiten.

Relevante Systeme werden in Tabelle 3.1 beispielhaft dargestellt. Eine Kombination der abgebildeten Tragsysteme, Spannweiten und Nachweisstellen liefert insgesamt 59 Kenngrößen.

Die softwaretechnische Implementierung vereinfachter Systeme erfolgt je Kennwert über die entsprechende Längseinflusslinie. Die unterschiedliche Lage einzelner Fahrstreifen in Brückenquerrichtung wird über Vorfaktoren entsprechend einer in Querrichtung linear veränderlichen Quereinflusslinie abgebildet.

Die Verarbeitung der Beanspruchungskollektive basiert hier auf Momentenschwingbreiten. Analog zur Arbeit von Danielewicz [Dani94] liegt daher eine Linearisierung der Wöhlerlinie sowie der  $M$ - $\sigma$ -Beziehung zugrunde. Die damit einhergehenden Vereinfachungen wurden in Abschnitt 2.2.2 und 2.2.3 erläutert. Unterschiedliche Neigungen der Wöhlerlinie sind separat zu untersuchen.

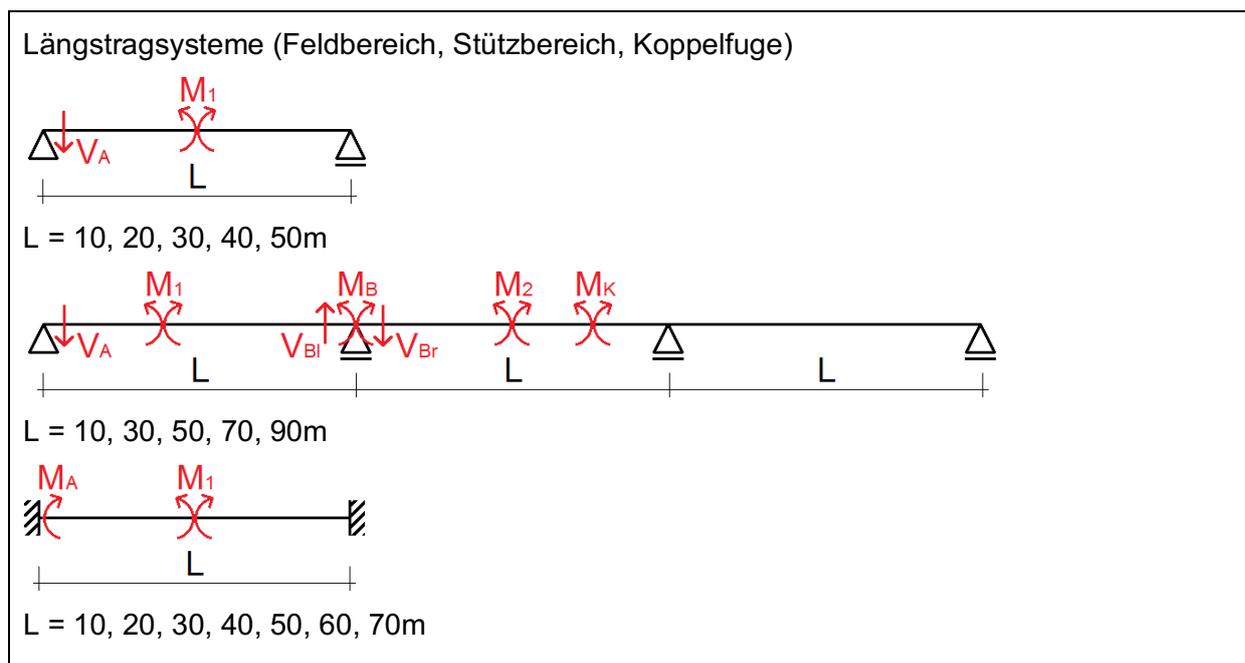


Tabelle 3.1: Zusammenstellung relevanter Tragsysteme und Nachweisstellen in Längsrichtung in Anlehnung an [Dani94]

#### 3.2 Analyse detaillierter Tragsysteme

Zusätzlich zu den Untersuchungen auf Grundlage von vereinfachten Tragsystemen und vereinfachten Ansätzen für die Schädigungsermittlung werden ergänzende Analysen durchgeführt, um die Auswirkungen der verwendeten Vereinfachungen auf die erzielten Ergebnisse beurteilen zu können. Hierzu werden realistische Beispielbrücken betrachtet, die insbesondere hinsichtlich des Bewehrungsgrads

einer nach heutigem Stand zukunftsfähigen Bauweise entsprechen. Hauptaugenmerk liegt dabei in einer wirklichkeitsnahen Erfassung der Momenten-Spannungs-Beziehungen, um in den späteren Simulationen je nach Größe der Grundbeanspruchung auch sinnvolle Werte der Spannungsschwingbreiten abbilden zu können.

Es werden Bauwerke verwendet, für die teilweise bereits Unterlagen einer Ausführungsplanung oder Vorbemessung vorliegen, um im Rahmen der

Projektbearbeitung den Aufwand für notwendige Bemessungen zu reduzieren. Bemessungsgrundlage aller Beispielbrücken sind die aktuell gültigen Eurocodes, sowohl hinsichtlich Einwirkung als auch Nachweisführung, darunter [DIN EN 1991-2] und [DIN EN 1992-2] in Verbindung mit [DIN EN 1991-2/NA] und [DIN EN 1992-2/NA]. Die einzelnen Bauwerke werden im Folgenden vorgestellt.

**3.2.1 Beispielbrücke B1**

Das erste Beispiel stellt ein in Längsrichtung zwei-feldriges Bauwerk mit Stützweiten von 2x22,50 m

dar. In Querrichtung handelt es sich um einen zwei-stegigen Plattenbalken mit einer Fahrbahnbreite von 8,00 m (vgl. Abbildung 3.1). Als Vorspannung wurden Spannglieder mit nachträglichem Verbund gewählt. Die Anordnung der Spannglieder sowie die Bewehrungsmenge im Feld- und Stützbereich können Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 entnommen werden. Im Rahmen der Untersuchung werden folgende Schnitte betrachtet:

- Feldbereich ( $x = 0,4 \cdot L$ )
- Momentennullpunkt ( $x = 0,75 \cdot L$ )
- Stützbereich

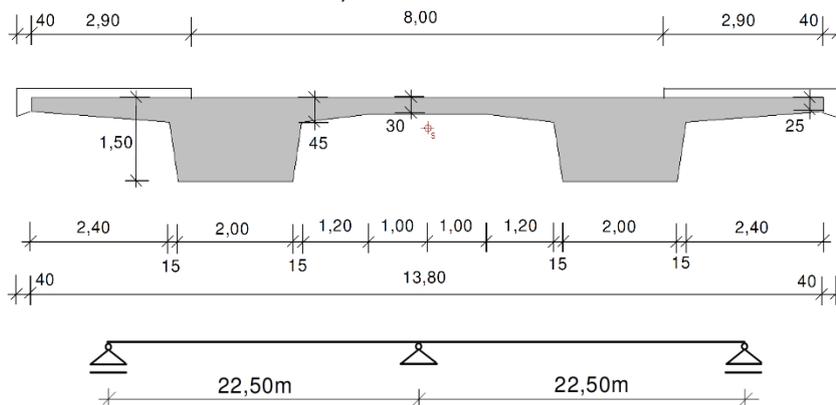


Abbildung 3.1: Querschnitt und Statisches System - Beispielbrücke B1 [Geiß14]

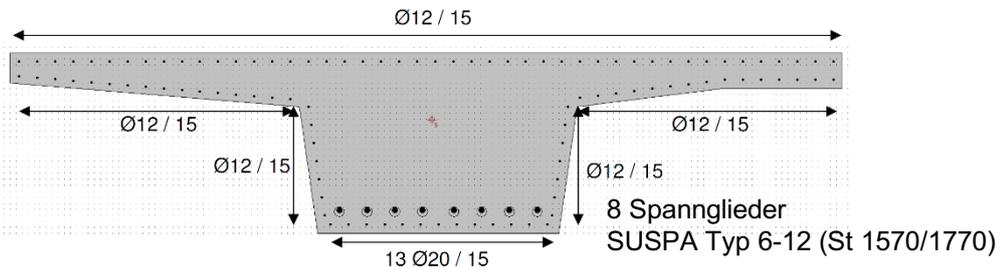


Abbildung 3.2: Feldquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B1 [Geiß14]

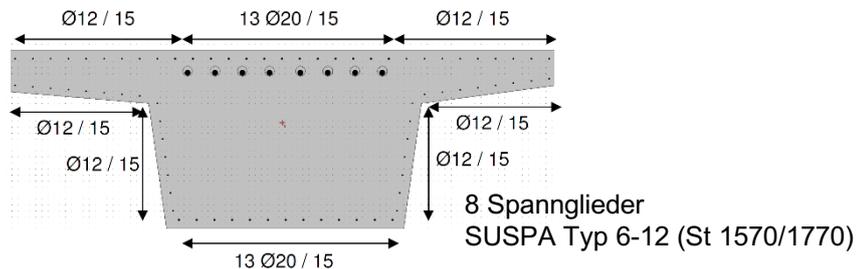


Abbildung 3.3: Stützquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B1 [Geiß14]

**3.2.2 Beispielbrücke B2**

Beispielbrücke B2 ist ein dreifeldriges Bauwerk mit den Stützweiten  $L_1 = 20,00$  m,  $L_2 = 34,50$  m und  $L_3 = 20,00$  m. In Querrichtung handelt es sich um einen einsteigigen Plattenbalken mit einer Fahrbahnbreite von 6,50 m (vgl. Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5). Als Vorspannung wurden auch hier Spannglieder mit nachträglichem Verbund gewählt. Die

Anordnung der Spannglieder sowie die Bewehrungsmenge im Feld- und Stützbereich können Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7 entnommen werden. Im Rahmen der Untersuchung werden folgende Schnitte betrachtet:

- Feldbereich ( $x = 0,5 \cdot L$  im Mittelfeld)
- Momentennullpunkt ( $x = 0,17 \cdot L$  im Mittelfeld)
- Stützbereich

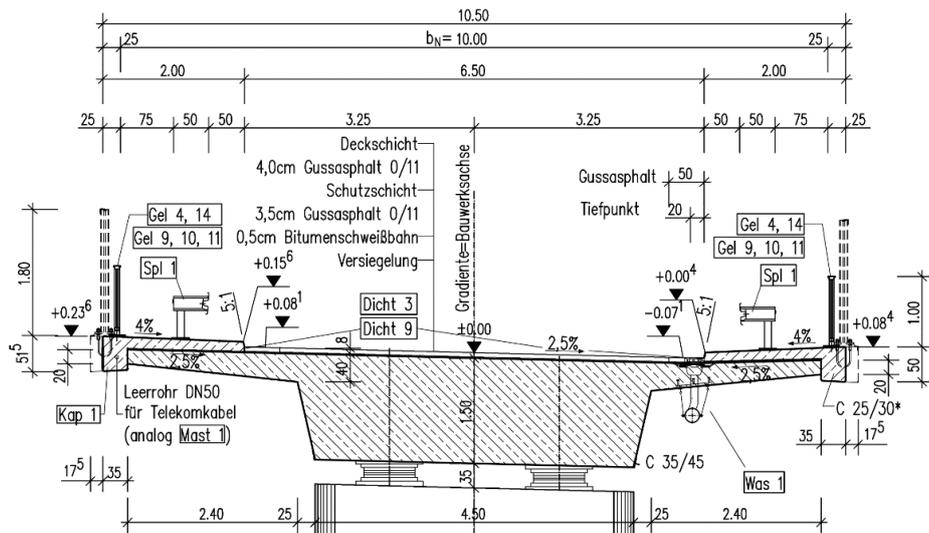


Abbildung 3.4: Regelquerschnitt - Beispielbrücke B2

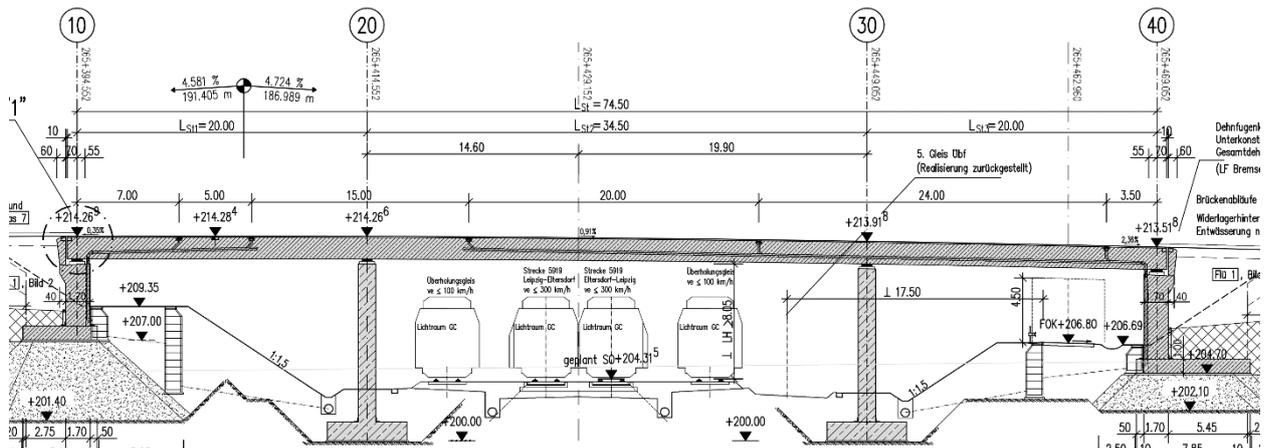


Abbildung 3.5: Längsschnitt - Beispielbrücke B2

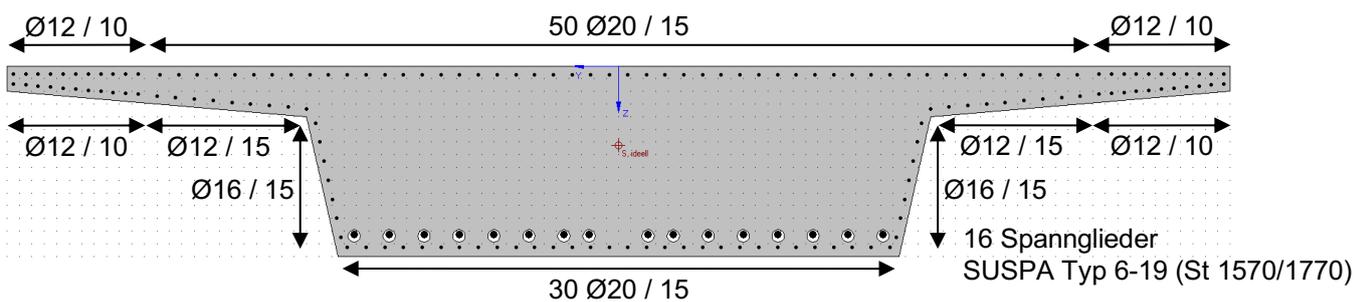


Abbildung 3.6: Feldquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B2

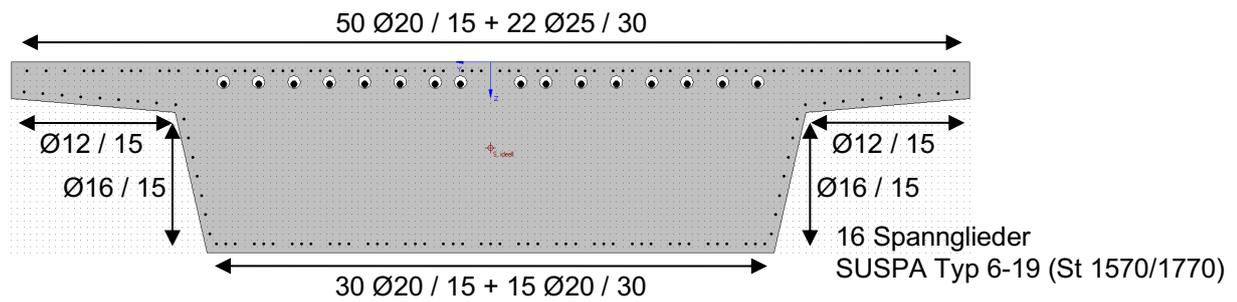


Abbildung 3.7: Stützquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B2

### 3.2.3 Beispielbrücke B3

Um verallgemeinerungsfähige Aussagen ableiten zu können wird ein in Längsrichtung zweifeldriges Bauwerk mit Stützweiten von 2x40 m und einem Plattenbalkenquerschnitt als Systemgrundlage erforderlich. Deshalb wird die Beispielbrücke B3 mit dem Zweck der Vergleichsrechnungen für das vorliegende Kapitel entworfen und berechnet. Der Querschnitt ist ein zweistufiger Plattenbalken mit einer Fahrbahnbreite von 7,00 m. Die Konstruktionshöhe wird mit 1,80 m verhältnismäßig schlank

ausgebildet. Der Querschnitt ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Als Vorspannung wurden auch hier Spannglieder mit nachträglichem Verbund gewählt. Der Querschnitt ist im Feld und über der Stütze mit je 2 Reihen und je 7 Strängen Spannstahl ausgelegt, siehe Abbildung 3.9 und Abbildung 3.10.

Analog zum vorgenannten Beispiel B1 werden folgende Schnitte betrachtet:

- Feldbereich ( $x = 0,4 \cdot L$ )
- Momentennullpunkt ( $x = 0,75 \cdot L$ )
- Stützbereich

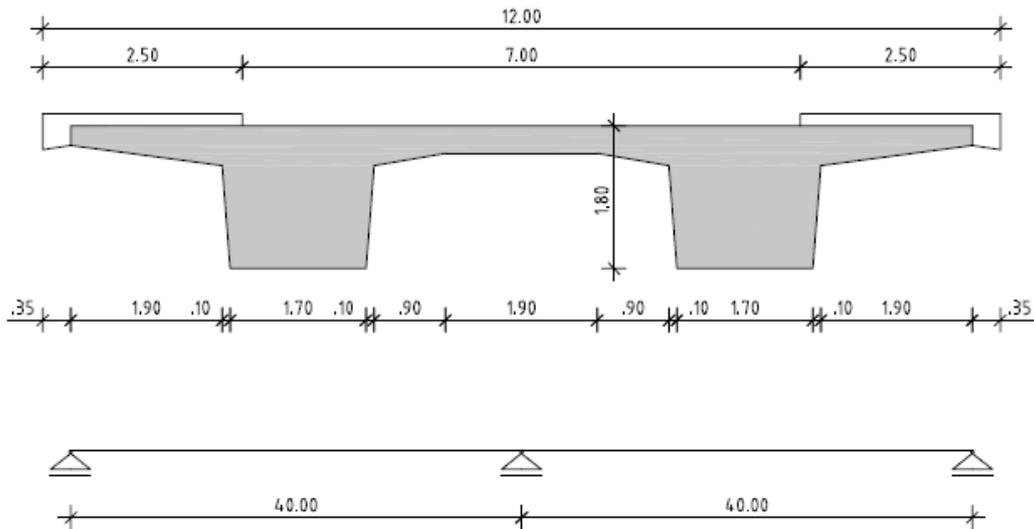


Abbildung 3.8: Querschnitt und statisches System - Beispielbrücke B3

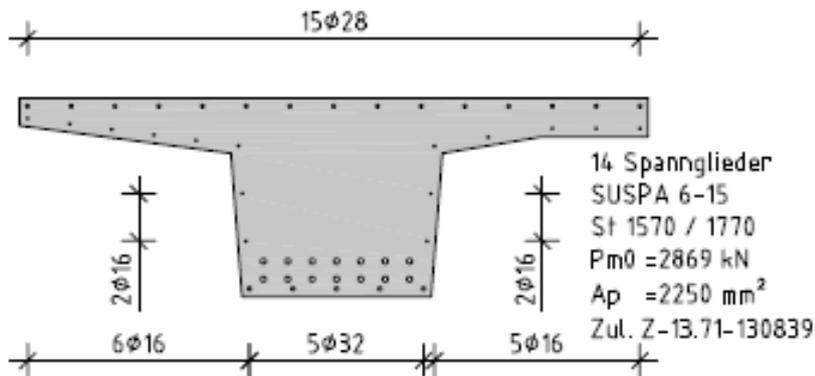


Abbildung 3.9: Feldquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B3

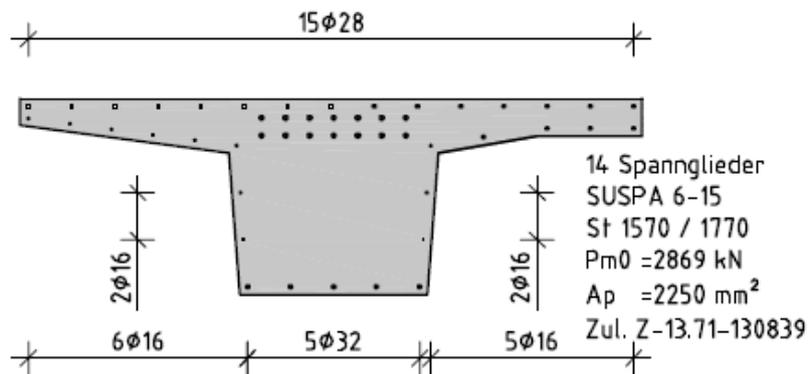


Abbildung 3.10: Stützquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B3

### 3.2.4 Beispielbrücke B4

Zur Abrundung wird noch ein einfeldriges Bauwerk untersucht. Es ist ebenfalls eine Brücke in Spannbetonbauweise. Die Stützweite beträgt 24,60 m, die Konstruktionshöhe ist 1,35 m. Der Überbauquerschnitt ist ein zweistegiger Plattenbalken mit einer Fahrbahnbreite von 7,00 m und die Breite zwischen den Geländern beträgt 12,30 m. Der Regelquerschnitt ist in Abbildung 3.11 und der Längsschnitt in Abbildung 3.12 dargestellt.

Die Vorspannung erfolgt mit Spanngliedern L22 gem. BBV Litzenspannverfahren mit den folgenden Parametern.

Spannstahlgüte: St 1570/1770

Spannstahlquerschnitt:  $A_p = 3300 \text{ mm}^2$

Je Hauptträger werden 5 Spannglieder angeordnet. In Abbildung 3.13 ist die schlaife Bewehrung für den Regelquerschnitt Überbau und in Abbildung 3.14 die Spannbewehrung dargestellt.

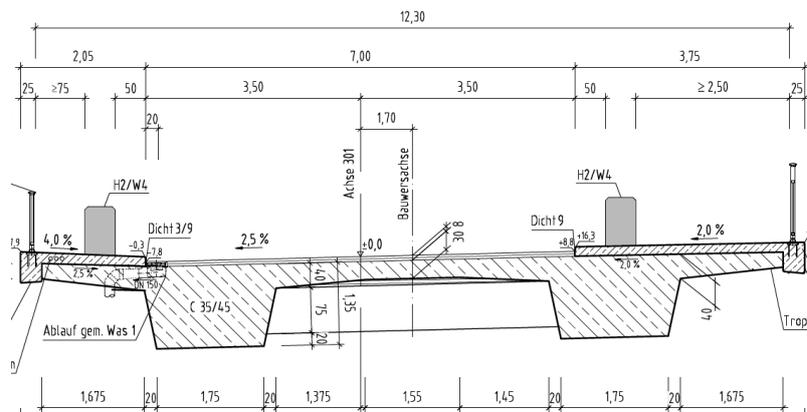


Abbildung 3.11: Regelquerschnitt – Beispielbrücke B4

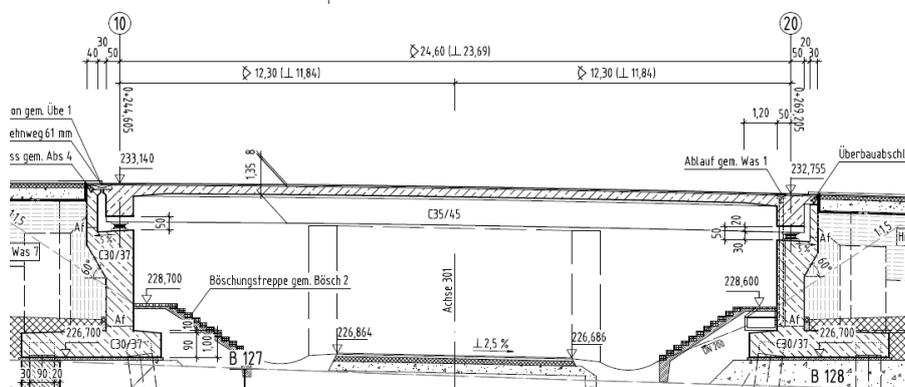


Abbildung 3.12: Längsschnitt – Beispielbrücke B4

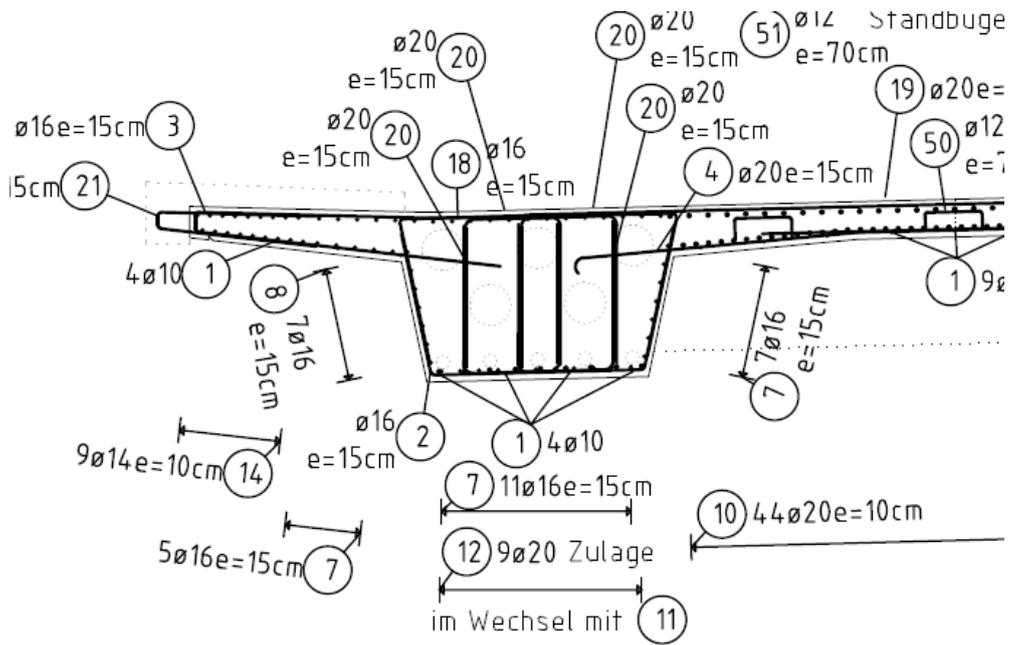


Abbildung 3.13: Bewehrung Regelquerschnitt Überbau

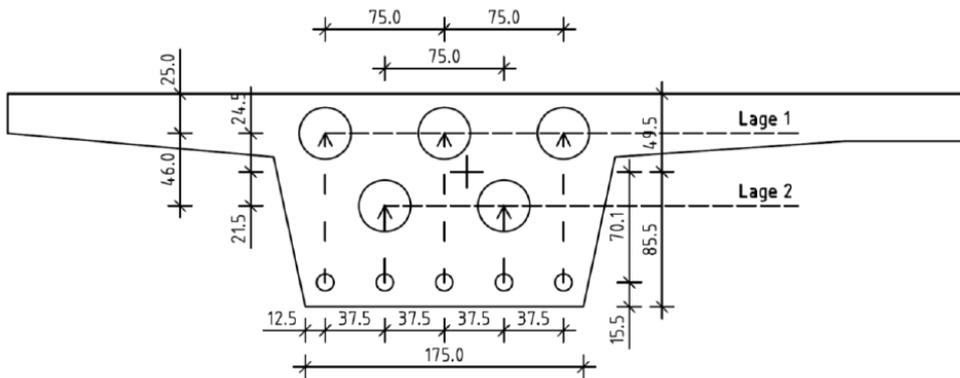


Abbildung 3.14: Spannbewehrung Regelquerschnitt Überbau

## 4 Verkehrsprognosen

Zur Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Straßengüterverkehrs in Deutschland werden Prognosen im Auftrag des BMVBS bzw. BMVI [InBv07] [InBv14] [Prog07] herangezogen. Abbildung 4.1 zeigt die Ergebnisse dieser Prognosen in Kombination mit der bisherigen Entwicklung des jährlichen Transportaufkommens. Bezüglich der langfristigen Abschätzung bis 2050 wurden zwei Szenarien betrachtet (Hauptszenario und Sensitivitätsbetrachtung, vgl. [Prog07]), die sich unter anderem im Anstieg des Bruttoinlandsprodukts (1,3% p.a. bzw. 1,6% p.a.) und des gesamten Güterverkehrsaufkommens (0,8% p.a. bzw. 1,1% p.a.) unterscheiden.

Das jährliche Transportaufkommen im Straßengüterverkehr wird im Folgenden als Kenngröße der zukünftigen Verkehrsentwicklung herangezogen. Dabei ergeben sich in den unterschiedlichen Szenarien, jeweils von 2004 bis 2050, folgende Zunahmen des Straßengüterverkehrs in Deutschland.

- Hauptszenario: +44,3%
- Sensitivitätsbetrachtung: +63,3%

Die bisherige Entwicklung zum genehmigungspflichtigen Schwerverkehr spiegelt sich in der Anzahl der Anträge für Schwervertransporte wider. In Abbildung 4.2 wird diese getrennt für die Zeiträume 1987-2004 und 2000-2015 dargestellt. Deutlich erkennbar ist der nahezu exponentielle Anstieg vor dem Jahr 2000. Der jährliche Anstieg der Anträge ist seither leicht zurückgegangen.

Zur Prognose der zukünftigen Anzahl an Schwervertransporten wäre ein möglicher Ansatz, dass die Anträge seit dem Jahr 2004 linear ansteigen und dieser Trend auch zur Extrapolation bis zum Jahr 2050 herangezogen werden kann. Zwischen 2004 und 2015 stieg die Anzahl der Anträge bei der Autobahndirektion Nordbayern von ~59.950 auf ~177.500. Entsprechend diesem jährlichen Anstieg um ~10.700 wäre im Jahr 2050 von ~552.000 Anträgen auszugehen. Zwischen 2004 und 2050 würde sich damit ein Anstieg um +820% ergeben. Eine Abschätzung auf Grundlage dieser Daten könnte jedoch zu überzogenen Prognosen führen, da die Daten einerseits Mehrfachanträge enthalten und auch lediglich die Anträge an sich, jedoch nicht die tatsächlich durchgeführten Schwervertransporte erfasst werden.

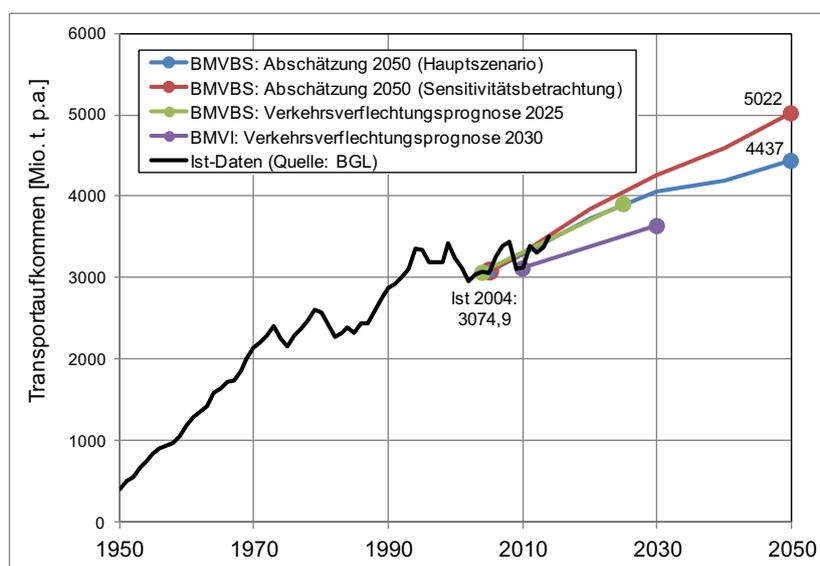


Abbildung 4.1: Entwicklung des Transportaufkommens in Deutschland [Mio. t. p.a.], [InBv07] [InBv14] [Prog07] [Bund16]

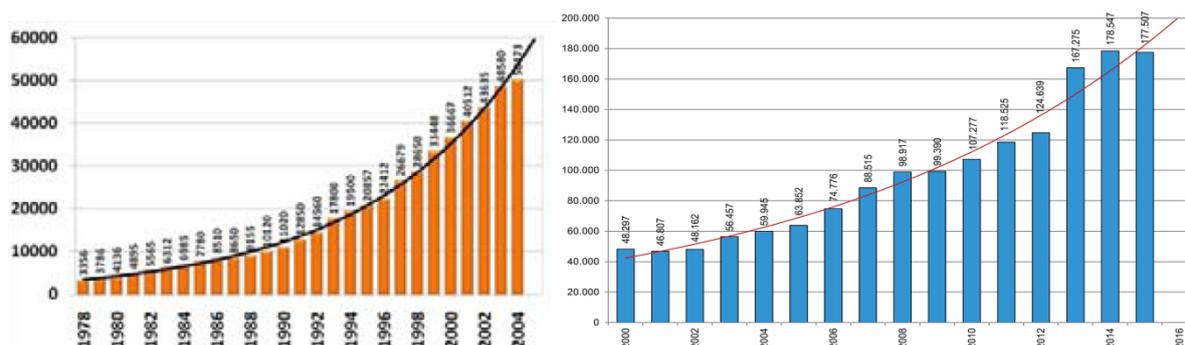


Abbildung 4.2: Anzahl der Anträge für Schwervertransporte bei der Autobahndirektion Nordbayern, Links: 1978-2004, Rechts: 2000-2015 [Kasc09] [Auto16]

## 4.1 Grundszenarien

Zur Ableitung geeigneter Fahrzeugkollektive des zukünftigen Verkehrs werden zunächst Grundszenarien definiert, die den aktuellen Verkehr unterschiedlicher Streckentypen bzw. Verkehrsarten darstellen. Die Grundszenarien orientieren sich an bisherigen Untersuchungen zum Lastmodell LM1 für den Brückenneubau [FrBö11a], Untersuchungen zu Lastmodellen der Brückennachrechnung [FrBö11b] sowie den aktuellen Festlegungen zum ELM 4 [NaRiLi11]. Zusätzlich werden neu gewonnene Informationen aus der Auswertung von WiM- und BWiM-Daten unterschiedlicher Streckentypen berücksichtigt, siehe Anhang A: Verkehrsdaten (WiM- und BWiM-Daten).

Eine vergleichende Auswertung der WiM- und BWiM-Daten der unterschiedlichen Streckentypen zeigt keine gravierenden Unterschiede hinsichtlich der Fahrzeuggesamtgewichte. Eine bisher vermutete Charakteristik, die in unterschiedlichen Streckentypen auf ein unterschiedliches Verhältnis zwischen beladenen und unbeladenen LKW oder einen allgemein niedrigeren Beladungsgrad der LKW hindeutet, kann daher nicht festgestellt werden. Eine Ausnahme hiervon könnten Straßen im untergeordneten Straßennetz ohne schweren Durchgangsverkehr darstellen. Da bisher jedoch lediglich die Daten einer Messstelle an derart schwach befahrenen Straßen vorliegen, wäre eine Verallgemeinerung aktuell noch zu unsicher.

Deutliche Unterschiede zeigen sich in der Schwerverkehrszusammensetzung (Häufigkeitsverteilung der einzelnen LKW-Typen) sowie in der Schwerverkehrsstärke DTSV. Beide Parameter können für den Neubau von Brücken gut abgeschätzt und auch für Brücken im Bestand relativ einfach erfasst werden. Weiterhin zeigen Voruntersuchungen einen maßgeblichen Einfluss dieser Parameter auf die Ermüdungsbeanspruchung, da entsprechend auch die Anzahl schwerer und beladener LKW in den unterschiedlichen Streckentypen schwankt, siehe Anhang B: Parameterstudie.

Für die Definition der Grundszenarien steht eine einfache Zuordnung im Fokus. Daher werden die beiden letztgenannten Parameter (Schwerverkehrszusammensetzung und DTSV) als Unterscheidungskriterium herangezogen. Die Grundszenarien gliedern sich dafür in:

- Langstreckenverkehr 1 (normal-schwer)  
z.B. Autobahnen oder schwer befahrene Bundesstraßen
- Langstreckenverkehr 2 (leicht)  
z.B. leicht befahrene Bundesstraßen oder Landstraßen

- Ortsverkehr 1 (normal-schwer)  
z.B. Kreisstraßen, Gemeindestraßen oder Stadtverkehr, jeweils mit schwerem Durchgangsverkehr etwa durch Fabriken, Betonwerke, Kiesgruben, Steinbrüche etc.
- Ortsverkehr 2 (leicht)  
z.B. Kreisstraßen, Gemeindestraßen oder Stadtverkehr, jeweils ohne schweren Durchgangsverkehr wie etwa in Wohngebieten

Genehmigungspflichtiger Schwerverkehr mit Dauergenehmigung ist grundsätzlich auf sämtlichen Streckentypen zu erwarten. Aufgrund der Vielzahl auftretender Fahrzeuggeometrien und Gesamtgewichte ist jedoch keine eindeutige Erfassung und Beschreibung durch eine beschränkte Anzahl an Sonderfahrzeugen möglich. Zur Abdeckung dieses weiten Spektrums wird, entsprechend den bisherigen Untersuchungen, ein relativ konservatives Ersatzfahrzeug in Form eines 72t-Autokrans und einem Anteil am Schwerverkehr von 0,5% gewählt. Im untergeordneten Straßennetz ohne schweren Durchgangsverkehr wird jedoch davon ausgegangen, dass der genehmigungspflichtige Schwerverkehr deutlich seltener auftritt. Entsprechend wird hier ein Anteil am Schwerverkehr von 0,1% gewählt.

Eine detaillierte Darstellung der Grundszenarien findet sich in Tabelle 4.1 bis Tabelle 4.4.

## Grundszenario "Langstreckenverkehr 1":

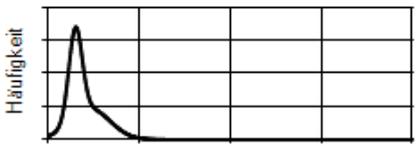
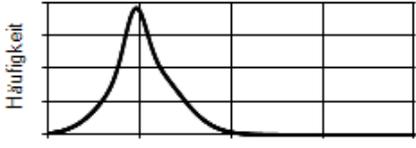
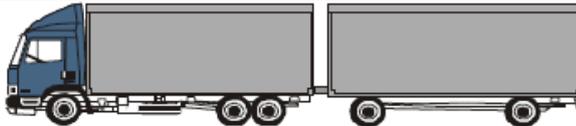
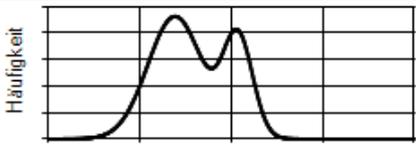
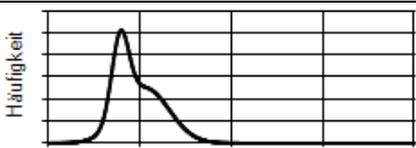
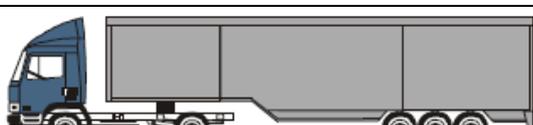
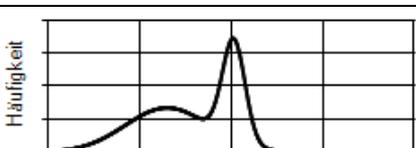
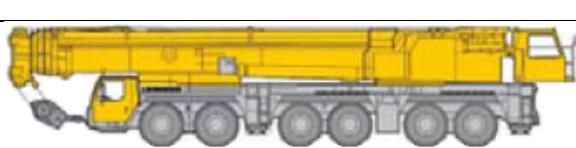
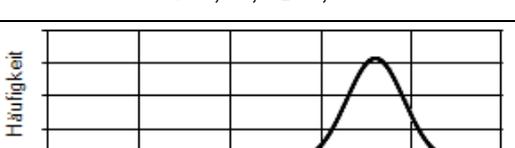
LKW-Typ und Häufigkeit	Geometrie und Achslastverteilung	Fahrzeuggesamtgewicht (doppelnormalverteilt)
<b>Typ 8</b>  10,9%	 <p style="text-align: center;">4.5</p> <p style="text-align: center;">0,449      0,551</p>	 <p style="text-align: center;"><math>\mu_1=59,6, \mu_2=91,7, \sigma_1=14,6, \sigma_2=44</math> [kN] <math>a_1=0,49, a_2=0,51</math></p>
<b>Typ 33</b>  4,9%	 <p style="text-align: center;">4.9      6.5      5.0</p> <p style="text-align: center;">0,258      0,372      0,189      0,181</p>	 <p style="text-align: center;"><math>\mu_1=190,3, \mu_2=208,4, \sigma_1=23,2, \sigma_2=73,9</math> [kN] <math>a_1=0,20, a_2=0,80</math></p>
<b>Typ 41</b>  16,9%	 <p style="text-align: center;">4.6      1.3      5.2      4.6</p> <p style="text-align: center;">0,209      0,258      0,161      0,195      0,177</p>	 <p style="text-align: center;"><math>\mu_1=276,8, \mu_2=414,5, \sigma_1=59,5, \sigma_2=32,5</math> [kN] <math>a_1=0,69, a_2=0,31</math></p>
<b>Typ 97</b>  7,9%	 <p style="text-align: center;">3.7      6.6      1.3</p> <p style="text-align: center;">0,306      0,309      0,191      0,194</p>	 <p style="text-align: center;"><math>\mu_1=156,7, \mu_2=211,4, \sigma_1=18,8, \sigma_2=52,8</math> [kN] <math>a_1=0,34, a_2=0,66</math></p>
<b>Typ 98</b>  58,9%	 <p style="text-align: center;">3.7      5.6      1.3      1.3</p> <p style="text-align: center;">0,208      0,281      0,17      0,17      0,171</p>	 <p style="text-align: center;"><math>\mu_1=259,6, \mu_2=405,3, \sigma_1=92, \sigma_2=24,8</math> [kN] <math>a_1=0,62, a_2=0,38</math></p>
<b>72t-Au- tokran</b>  0,5%	 <p style="text-align: center;">1.9      2.9      1.7      2.6      1.7</p> <p style="text-align: center;">0,166      0,166      0,166      0,166      0,168      0,168</p>	 <p style="text-align: center;"><math>\mu=720, \sigma=63,3</math> [kN]</p>

Tabelle 4.1: Grundszenario "Langstreckenverkehr 1". Daten in Anlehnung an A61 Bliesheim (2004) inkl. gen.pfl. SV (Dauergenehmigung). DTSV = 10.000 pro Richtung

Grundscenario "Langstreckenverkehr 2":

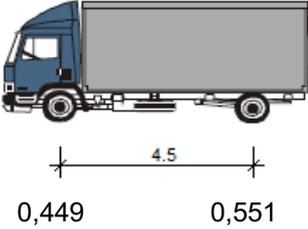
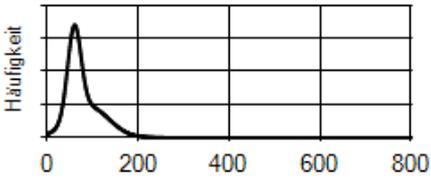
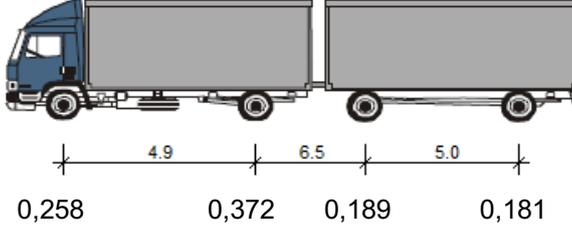
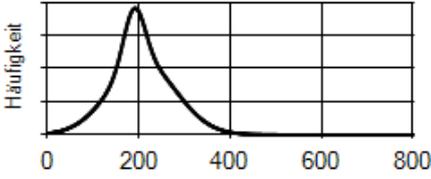
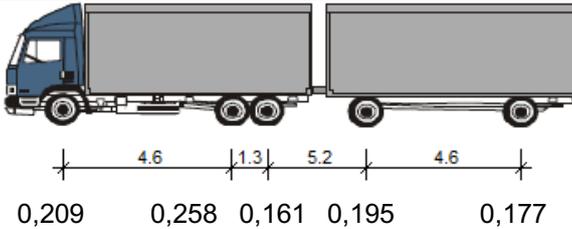
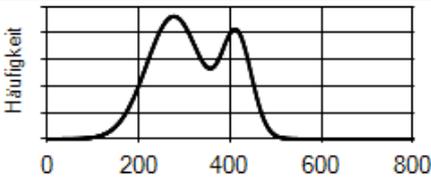
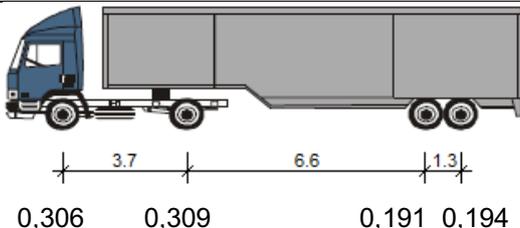
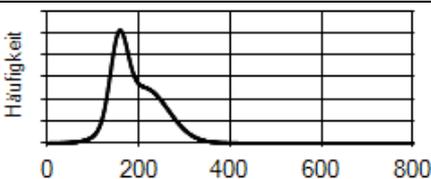
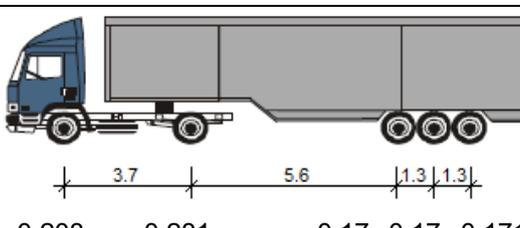
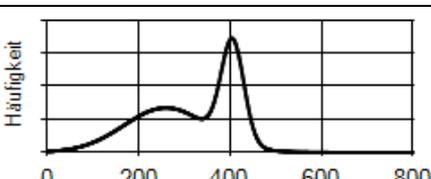
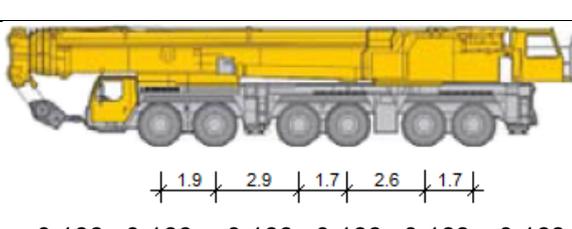
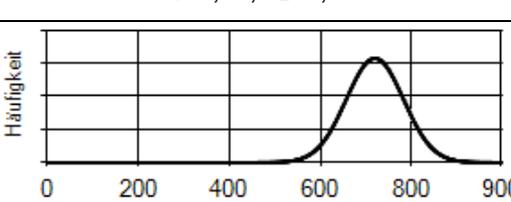
LKW-Typ und Häufigkeit	Geometrie und Achslastverteilung	Fahrzeuggesamtgewicht (doppelnormalverteilt)
<p><b>Typ 8</b></p> <p>39,9%</p>		 <p><math>\mu_1=59,6, \mu_2=91,7, \sigma_1=14,6, \sigma_2=44</math> [kN] <math>a_1=0,49, a_2=0,51</math></p>
<p><b>Typ 33</b></p> <p>4,9%</p>		 <p><math>\mu_1=190,3, \mu_2=208,4, \sigma_1=23,2, \sigma_2=73,9</math> [kN] <math>a_1=0,20, a_2=0,80</math></p>
<p><b>Typ 41</b></p> <p>9,9%</p>		 <p><math>\mu_1=276,8, \mu_2=414,5, \sigma_1=59,5, \sigma_2=32,5</math> [kN] <math>a_1=0,69, a_2=0,31</math></p>
<p><b>Typ 97</b></p> <p>14,9%</p>		 <p><math>\mu_1=156,7, \mu_2=211,4, \sigma_1=18,8, \sigma_2=52,8</math> [kN] <math>a_1=0,34, a_2=0,66</math></p>
<p><b>Typ 98</b></p> <p>29,9%</p>		 <p><math>\mu_1=259,6, \mu_2=405,3, \sigma_1=92, \sigma_2=24,8</math> [kN] <math>a_1=0,62, a_2=0,38</math></p>
<p><b>72t-Au- tokran</b></p> <p>0,5%</p>		 <p><math>\mu=720, \sigma=63,3</math> [kN]</p>

Tabelle 4.2: Grundscenario "Langstreckenverkehr 2". Daten in Anlehnung an "Mittlere Entfernung" in [NaRiLi11], sowie Ergebnissen der Verkehrsdatenbank (vgl. Anhang A) inkl. gen.pfl. SV (Dauergenehmigung). DTSV = 2.400 pro Richtung

## Grundszenario "Ortsverkehr 1":

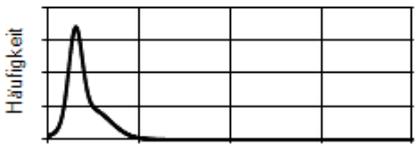
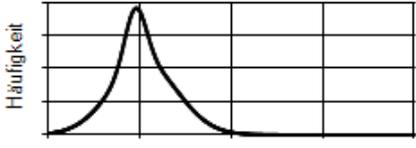
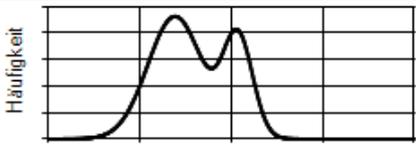
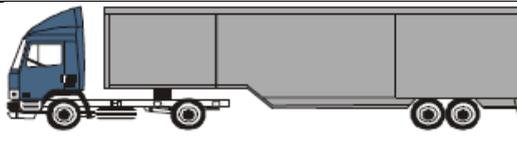
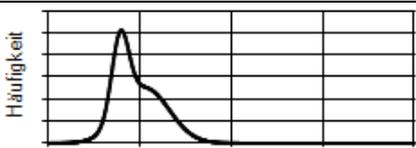
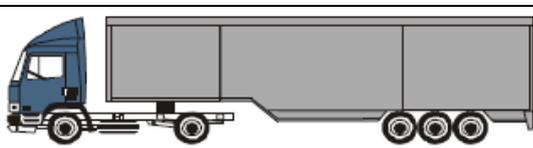
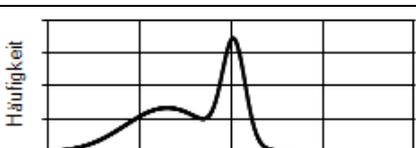
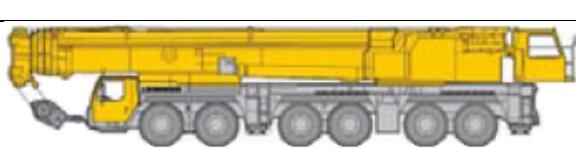
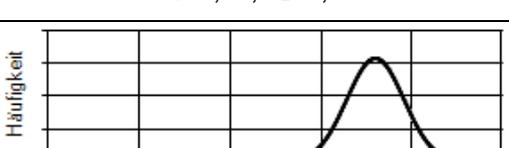
LKW-Typ und Häufigkeit	Geometrie und Achslastverteilung	Fahrzeuggesamtgewicht (doppelnormalverteilt)
<b>Typ 8</b>  <b>79,9%</b>	 <p>4.5</p> <p>0,449      0,551</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=59,6, \mu_2=91,7, \sigma_1=14,6, \sigma_2=44</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,49, a_2=0,51</math></p>
<b>Typ 33</b>  <b>4,9%</b>	 <p>4.9    6.5    5.0</p> <p>0,258      0,372    0,189    0,181</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=190,3, \mu_2=208,4, \sigma_1=23,2, \sigma_2=73,9</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,20, a_2=0,80</math></p>
<b>Typ 41</b>  <b>4,9%</b>	 <p>4.6    1.3    5.2    4.6</p> <p>0,209    0,258    0,161    0,195    0,177</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=276,8, \mu_2=414,5, \sigma_1=59,5, \sigma_2=32,5</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,69, a_2=0,31</math></p>
<b>Typ 97</b>  <b>4,9%</b>	 <p>3.7    6.6    1.3</p> <p>0,306    0,309      0,191    0,194</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=156,7, \mu_2=211,4, \sigma_1=18,8, \sigma_2=52,8</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,34, a_2=0,66</math></p>
<b>Typ 98</b>  <b>4,9%</b>	 <p>3.7    5.6    1.3    1.3</p> <p>0,208    0,281      0,17    0,17    0,171</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=259,6, \mu_2=405,3, \sigma_1=92, \sigma_2=24,8</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,62, a_2=0,38</math></p>
<b>72t-Au- tokran</b>  <b>0,5%</b>	 <p>1.9    2.9    1.7    2.6    1.7</p> <p>0,166    0,166    0,166    0,166    0,168    0,168</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800    900</p> <p><math>\mu=720, \sigma=63,3</math> [kN]</p>

Tabelle 4.3: Grundszenario "Ortsverkehr 1". Daten in Anlehnung an "Ortsverkehr" in [NaRiLi11], sowie Ergebnissen der Verkehrsdatenbank (vgl. Anhang A) inkl. gen.pfl. SV (Dauergenehmigung). DTSV = 2.400 pro Richtung

Grundszenario "Ortsverkehr 2":

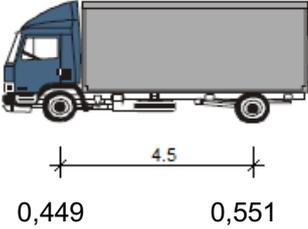
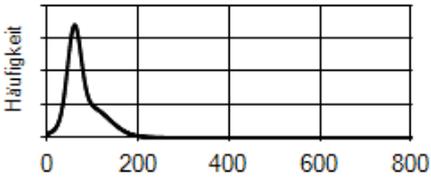
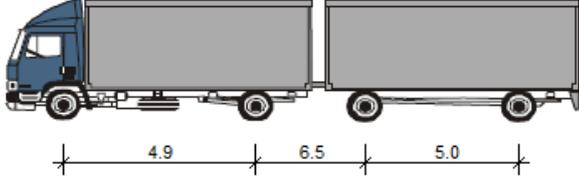
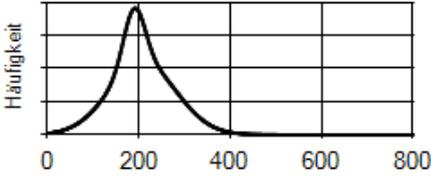
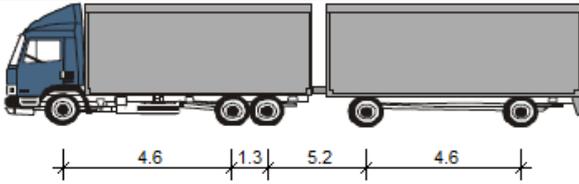
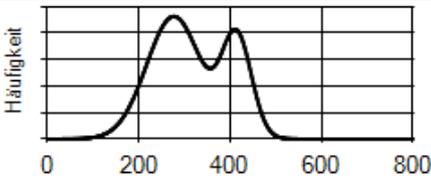
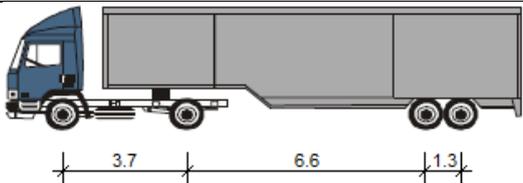
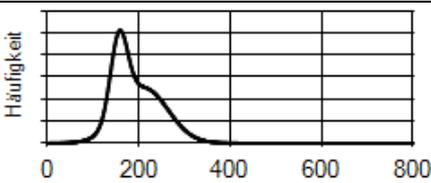
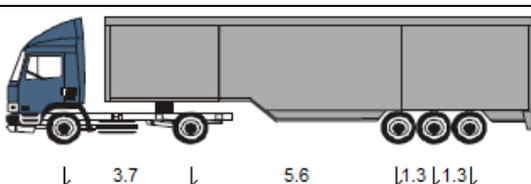
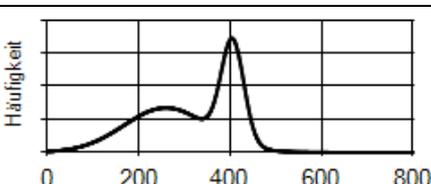
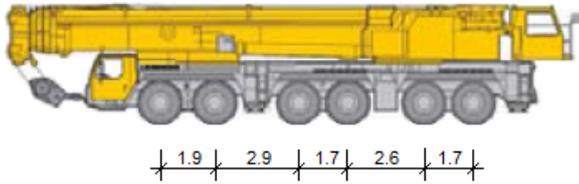
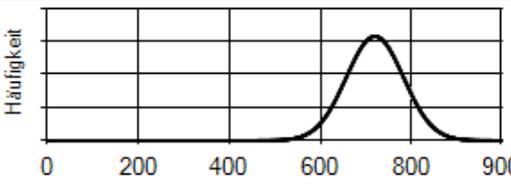
LKW-Typ und Häufigkeit	Geometrie und Achslastverteilung	Fahrzeuggesamtgewicht (doppelnormalverteilt)
<p><b>Typ 8</b></p> <p><b>79,98%</b></p>	 <p>4.5</p> <p>0,449      0,551</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=59,6, \mu_2=91,7, \sigma_1=14,6, \sigma_2=44</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,49, a_2=0,51</math></p>
<p><b>Typ 33</b></p> <p><b>4,98%</b></p>	 <p>4.9    6.5    5.0</p> <p>0,258      0,372    0,189      0,181</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=190,3, \mu_2=208,4, \sigma_1=23,2, \sigma_2=73,9</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,20, a_2=0,80</math></p>
<p><b>Typ 41</b></p> <p><b>4,98%</b></p>	 <p>4.6    1.3    5.2    4.6</p> <p>0,209    0,258    0,161    0,195      0,177</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=276,8, \mu_2=414,5, \sigma_1=59,5, \sigma_2=32,5</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,69, a_2=0,31</math></p>
<p><b>Typ 97</b></p> <p><b>4,98%</b></p>	 <p>3.7    6.6    1.3</p> <p>0,306    0,309      0,191    0,194</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=156,7, \mu_2=211,4, \sigma_1=18,8, \sigma_2=52,8</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,34, a_2=0,66</math></p>
<p><b>Typ 98</b></p> <p><b>4,98%</b></p>	 <p>3.7    5.6    1.3    1.3</p> <p>0,208    0,281      0,17    0,17    0,171</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800</p> <p><math>\mu_1=259,6, \mu_2=405,3, \sigma_1=92, \sigma_2=24,8</math> [kN]</p> <p><math>a_1=0,62, a_2=0,38</math></p>
<p><b>72t-Au- tokran</b></p> <p><b>0,1%</b></p>	 <p>1.9    2.9    1.7    2.6    1.7</p> <p>0,166    0,166    0,166    0,166    0,168    0,168</p>	 <p>Häufigkeit</p> <p>0    200    400    600    800    900</p> <p><math>\mu=720, \sigma=63,3</math> [kN]</p>

Tabelle 4.4: Grundszenario "Ortsverkehr 2". Daten in Anlehnung an "Ortsverkehr" in [NaRiLi11], sowie Ergebnissen der Verkehrsdatenbank (vgl. Anhang A) inkl. geringerem Anteil an gen.pfl. SV (Dauergenehmigung). DTSV = 500 pro Richtung

Zur qualitativen Einordnung der entwickelten Grundszenarien der Verkehrscharakteristik sind diese in Analogie zu der in Absatz 2.3 aufgeführten Analyse in den nachfolgenden Abbildungen

(Abbildung 4.3 bis Abbildung 4.5) den vorhandenen Datenbeständen von Verkehrscharakteristiken gegenübergestellt.

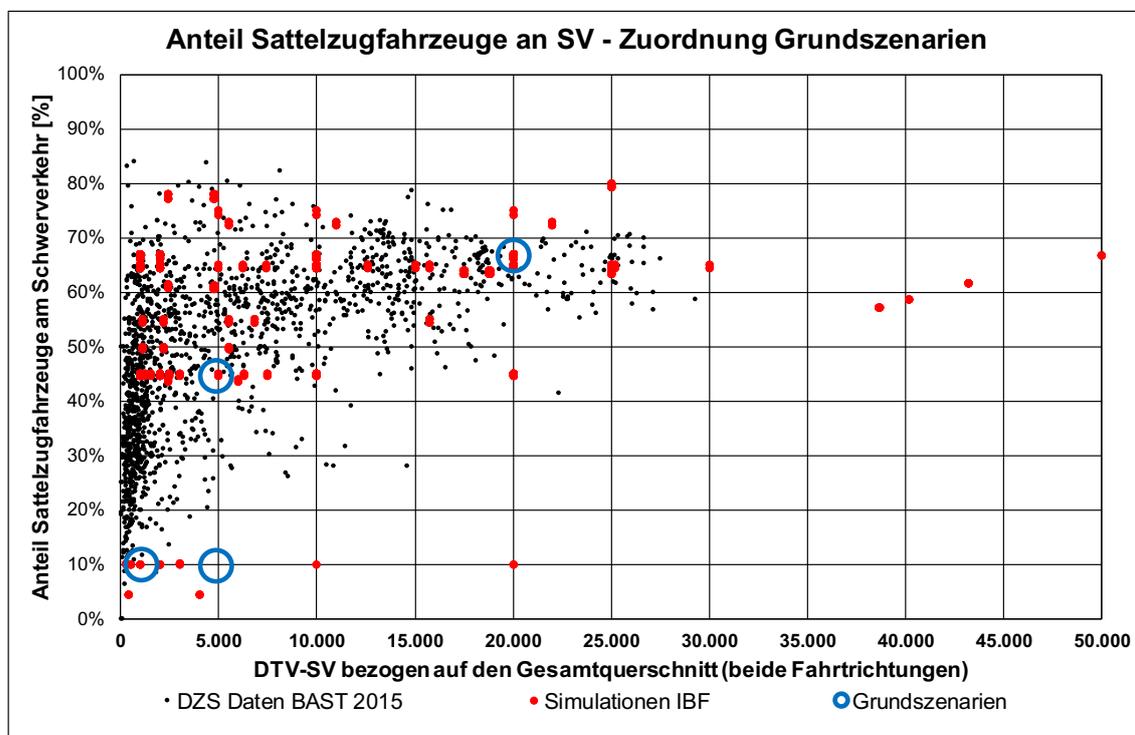


Abbildung 4.3: Einordnung der Grundszenarien zu vorliegenden Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von Sattelzugfahrzeugen in Bezug zur Schwerverkehrsstärke

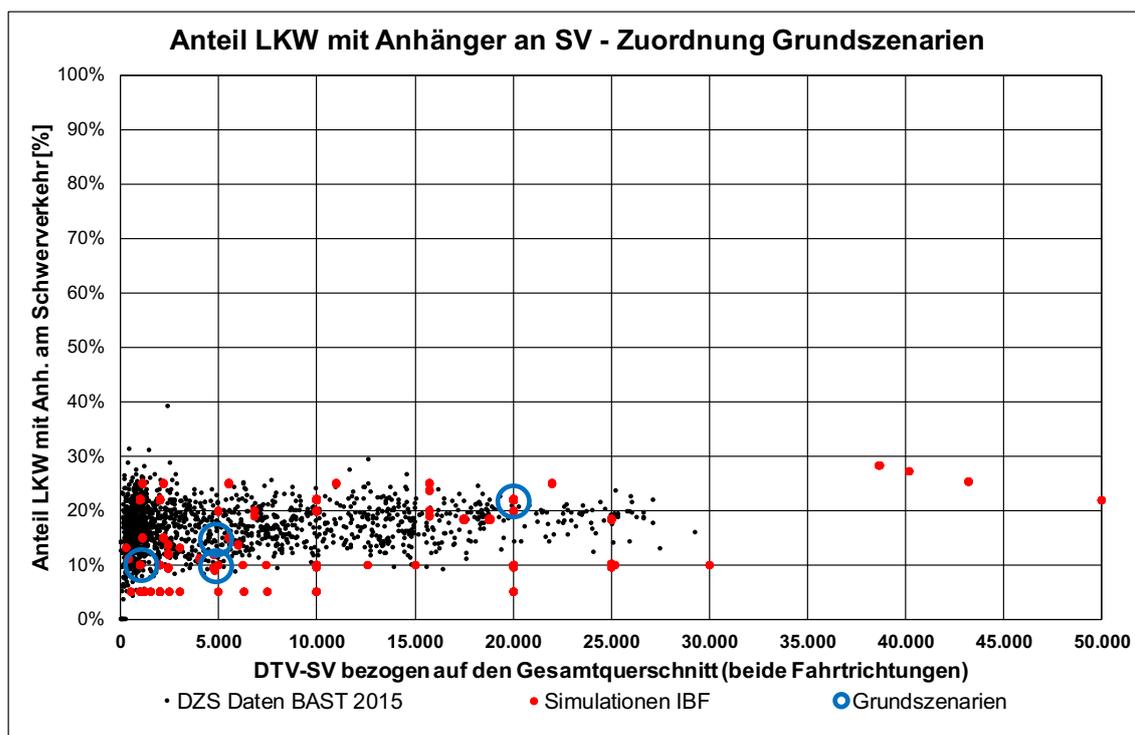


Abbildung 4.4: Einordnung der Grundszenarien zu vorliegenden Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von LKW mit Anhängern in Bezug zur Schwerverkehrsstärke

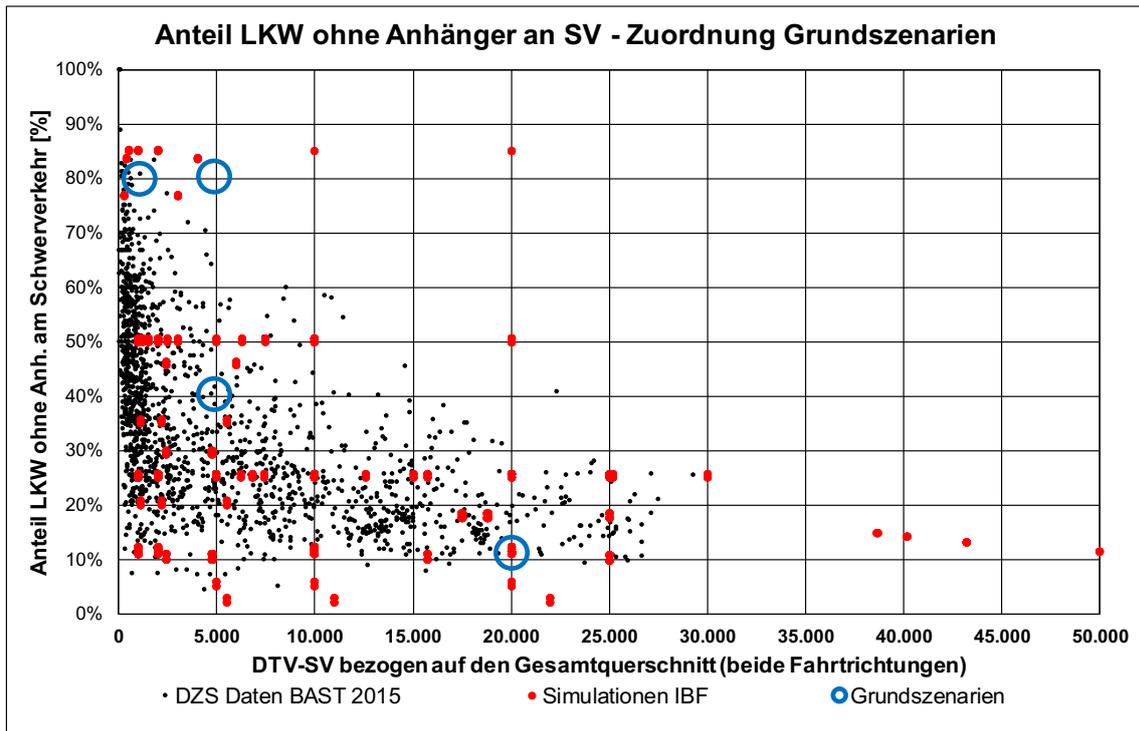


Abbildung 4.5: Einordnung der Grundszenarien zu vorliegenden Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von LKW ohne Anhänger in Bezug zur Schwerverkehrsstärke

## 4.2 Prognose-Szenarien

Basierend auf den einzelnen Grundszenarien und den oben beschriebenen Verkehrsprognosen lassen sich unterschiedliche Prognose-Szenarien ableiten. Diese sollen zunächst mögliche Änderungen des aktuellen Schwerverkehrs getrennt voneinander behandeln. Die Größenordnung der jeweils betrachteten Änderung wird so gewählt, dass die prognostizierte Zunahme des Straßengüterverkehrs oder des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs allein durch diese Änderung erreicht wird.

### Prognose-Szenario A:

In einem ersten Szenario des zukünftigen Verkehrs soll untersucht werden, wie sich der Anstieg des Transportaufkommens allein auf Basis eines gesteigerten DTSV auswirkt. In den einzelnen Grundszenarien ergeben sich damit die in Tabelle 4.5 ermittelten Schwerverkehrsstärken.

### Prognose-Szenario B:

Weiterhin soll untersucht werden, wie sich der Anstieg des Transportaufkommens allein auf Basis eines gesteigerten zulässigen Gesamtgewichtes auswirkt (vgl. Tabelle 4.6).

Als Referenz wird dafür die Messstelle "A61 Bliesheim (2004)" herangezogen. Es wird davon ausgegangen, dass die Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichtes ausschließlich fünffachsig

Fahrzeuge betrifft. Als Kenngröße für das aktuelle Transportaufkommen wird für die betrachtete Messstelle das gewichtete Mittel der Ladung aller LKW bestimmt. Zur Ermittlung der Ladung P der einzelnen LKW wird zunächst deren Leergewicht G mit typischerweise 40% des zulässigen Gesamtgewichtes abgeschätzt. Die Ladung ergibt sich dann aus der Differenz zwischen dem mittleren Gesamtgewicht beladener LKW  $\mu_2$  und deren Leergewicht. Aus der Ladung der einzelnen LKW wird anschließend, basierend auf der Häufigkeitsverteilung, das gewichtete Mittel der Ladung aller LKW bestimmt und in einem weiteren Schritt um den prognostizierten Anstieg des Transportaufkommens beaufschlagt. Abschließend wird ermittelt, durch welche Zunahme der Ladung der fünffachsigen LKW dieses prognostizierte und gewichtete Mittel der Ladungen erreicht wird und welches mittlere Gesamtgewicht beladener LKW  $\mu_2^*$  sich daraus ergibt.

Die Verteilungen des Fahrzeuggesamtgewichtes der LKW-Typen 41 und 98 werden demnach ausschließlich hinsichtlich des Parameters  $\mu_2$  angepasst. Die resultierenden Verteilungen werden in Tabelle 4.7 dargestellt.

2004		+44,3%		+63,3%		2050	
N <sub>obs</sub>	DTSV	N <sub>obs</sub>	DTSV	N <sub>obs</sub>	DTSV	N <sub>obs</sub>	DTSV
2,5·10 <sup>6</sup>	10.000	3,6·10 <sup>6</sup>	14.430	4,1·10 <sup>6</sup>	16.330	4,0·10 <sup>6</sup>	16.000
0,6·10 <sup>6</sup>	2.400	0,87·10 <sup>6</sup>	3.460	0,98·10 <sup>6</sup>	3.920	1,0·10 <sup>6</sup>	4.000
0,125·10 <sup>6</sup>	500	0,18·10 <sup>6</sup>	720	0,2·10 <sup>6</sup>	820	0,2·10 <sup>6</sup>	800

Tabelle 4.5: Prognose-Szenario A - Abschätzung der zukünftigen Schwerverkehrsstärke DTSV

LKW-Typ	Häufigkeit	zul. GG [t]	2004			2050			
			$\mu_2$	Leergewicht G ( $\approx 40\%$ zul. GG)	Ladung P ( $\mu_2 - G$ )	Leergewicht G*	Ladung P*		$\mu_2^*$ ( $G^* + P^*$ )
			[t]	[t]	[t]	[t]	[t]		[t]
8	11%	18	9,17	7,20	1,97	7,20	1,97	9,17	
33	5%	36	20,84	14,40	6,44	14,40	6,44	20,84	
41	17%	40	41,45	16,00	25,45	16,00	36,27   41,31	52,3   57,3	
97	8%	36	21,14	14,40	6,74	14,40	6,74	21,14	
98	59%	40	40,53	16,00	24,53	16,00	36,33   41,28	52,3   57,3	
gewichtetes Mittel:			19,88			28,68   32,46 (+44,3%) (+63,3%)			

Tabelle 4.6: Prognose-Szenario B - Abschätzung des zukünftigen Gesamtgewichtes beladener LKW  $\mu_2^*$

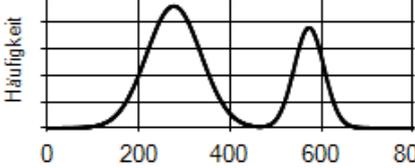
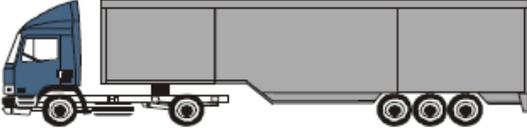
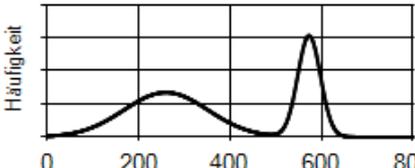
<p><b>Typ 41</b></p>		 <p><math>\mu_1=276,8, \mu_2=573, \sigma_1=59,5, \sigma_2=32,5</math> [kN]  <math>a_1=0,69, a_2=0,31</math></p>
<p><b>Typ 98</b></p>		 <p><math>\mu_1=259,6, \mu_2=573, \sigma_1=92, \sigma_2=24,8</math> [kN]  <math>a_1=0,62, a_2=0,38</math></p>

Tabelle 4.7: Prognose-Szenario B - Resultierende Verteilungen der zukünftigen Fahrzeuggesamtgewichte

**Prognose-Szenario C:**

Als eigenständiges Szenario soll untersucht werden, welche Auswirkungen durch eine Erhöhung der Anzahl des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs zu erwarten sind. Entsprechend der bisherigen Zunahme der Anträge für Schwertransporte und des davon abgeleiteten zukünftigen Anstiegs ergeben sich in diesem Szenario die in Tabelle 4.8 dargestellten Anteile am gesamten Schwerverkehr, jeweils bezogen auf eine konstant bleibende Schwerverkehrsstärke (DTSV).

**Prognose-Szenario D:**

Um die Auswirkung zukünftiger LKW-Kolonnen infolge des vernetzten und autonomen Fahrens auf die Ermüdungsbeanspruchung zu erfassen, wird angenommen, dass zukünftig 50% der LKW des Typs 98 in Kolonnen fahren. Dazu wird eine feste Kolonnengeometrie aus jeweils 5 LKW des Typs 98 als eigenständiger Fahrzeugtyp definiert. Nach Angaben der Fahrzeughersteller beträgt der Fahrzeugabstand innerhalb einer Kolonne im fließenden Verkehr ca. 10-15 m (je nach Hersteller). Der

mittlere Fahrzeugüberstand an der Vorder- und Hinterachse beträgt in Summe ca. 5 m. Für den neu definierten Fahrzeugtyp "LKW-Kolonne" wird daher ein Fahrzeugabstand von 15 m zwischen der jeweils letzten und ersten Achse festgelegt. Die Gesamtlänge der so definierten Kolonne beträgt damit ca. 120 m.

Die Gesamtgewichtsverteilung des neu definierten Typs entspricht der Summe aus 5 doppelnormalverteilten Gesamtgewichtsverteilungen. Mathematisch exakt würde dies einer Verteilung mit 32 Modalwerten entsprechen. Eine handhabbare Verteilung lässt sich jedoch unter der Voraussetzung ermitteln, dass sämtliche LKW der Kolonne gleich schwer, also entweder beladen oder unbeladen sind. Die entsprechende Gesamtgewichtsverteilung der LKW-Kolonne wird in Tabelle 4.9 dargestellt.

Die gewählte Implementierung von LKW-Kolonnen geht, wie oben beschrieben, mit einer Reihe von Vereinfachungen einher. Einerseits sind diese Vereinfachungen damit begründet, dass LKW-Kolonnen bisher nur in Testfahrten betrieben werden und

2004			2050		
DTSV	gen.pfl. SV	Anteil	DTSV	gen.pfl. SV	Anteil
10.000	50	0,5%	10.000	460 (+820%)	~4,6%
2.400	12	0,5%	2.400	110 (+820%)	~4,6%
500	2,5	0,5%	500	23 (+820%)	~4,6%

Tabelle 4.8: Prognose-Szenario C - Abschätzung des zukünftigen Anteils des genehmigungspflichtigen SV am gesamten SV

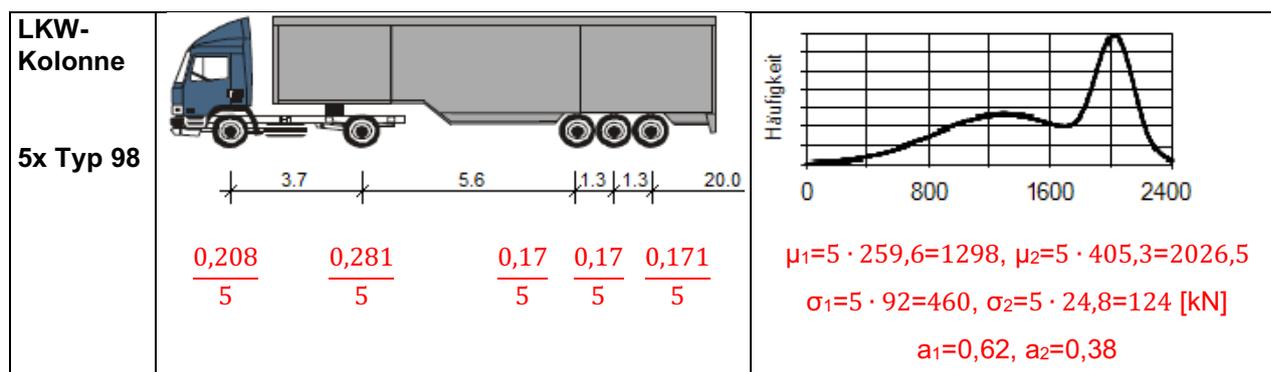


Tabelle 4.9: Prognose-Szenario D - Geometrie, Achslastverteilung und Gesamtgewichtsverteilung der LKW-Kolonne

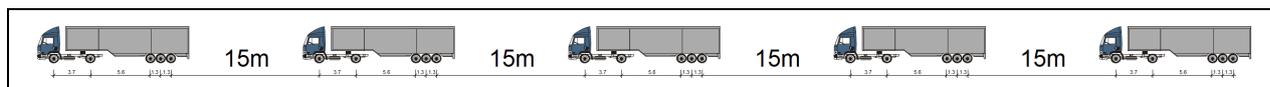


Abbildung 4.6: Prognose-Szenario D - Maßstäbliche Darstellung der betrachteten LKW-Kolonne

LKW-Typ		8	33	41	97	98	LKW-Kolonne 5x Typ 98	72t-Auto- kran
Häufigkeit	2004	10,9%	4,9%	16,9%	7,9%	58,9%	-	0,5%
	2050	14,5%	6,5%	22,5%	10,5%	39,3%	6,0%	0,7%

Tabelle 4.10: Prognose-Szenario D - Fahrzeugtypenverteilung mit 50% der LKW Typ 98 als LKW-Kolonnen

daher eine messtechnische Erfassung oder Auswertung z.B. durch WiM-Daten nicht möglich ist. Andererseits soll das hier betrachtete Szenario in erster Linie eine qualitative Aussage liefern, um die Auswirkungen von LKW-Kolonnen einschätzen zu können.

Insgesamt ist sicherzustellen, dass durch den neu definierten Fahrzeugtyp "LKW-Kolonne" keine unerwünschten Verzerrungen der Fahrzeugtypenverteilung entstehen (bezogen auf die in der Verkehrslastsimulation einzeln generierten LKW). Daher ist eine Korrektur der bisherigen Fahrzeugtypenverteilung vorzunehmen. Die Häufigkeit der LKW-Kolonne verringert sich dabei im Vergleich zur bisherigen Häufigkeit des LKW Typ 98 um die Anzahl der je Kolonne generierten LKW (Faktor 5). Die Häufigkeiten der restlichen LKW erhöhen sich entsprechend ihrer bisherigen Häufigkeit. Die resultierende Fahrzeugtypenverteilung, bezogen auf die Messstelle "A61 Bliesheim (2004)", wird in Tabelle 4.10 dargestellt.

### Prognose-Szenario E:

Die bisher betrachteten Prognose-Szenarien A bis D erlauben eine separate Untersuchung der Änderung einzelner Parameter, stellen dadurch jedoch auch Extremfälle des zukünftigen Verkehrs dar. In einem kombinierten Prognose-Szenario soll daher der Anstieg des Transportaufkommens von +63,3% bis zum Jahr 2050 durch eine Erhöhung von DTSV

und zulässigem Gesamtgewicht erreicht werden. Das zulässige Gesamtgewicht zukünftiger fünfschiger Fahrzeuge wird dazu mit 52 Tonnen angenommen, wodurch ein Anstieg des Transportaufkommens um +43% zu erreichen wäre. Die Berechnung der Parameter einer entsprechenden Gesamtgewichtsverteilung erfolgt analog zum Prognose-Szenario A (vgl. Tabelle 4.11). Der verbleibende Anstieg von +14% soll durch eine Erhöhung des DTSV abgedeckt werden, wodurch sich die in Tabelle 4.12 angegebenen Schwerverkehrsstärken ergeben.

Weiterhin sind für den genehmigungspflichtigen Schwerverkehr geeignete Annahmen zu treffen. Es ist anzunehmen, dass die aktuell verfügbaren Daten zur Entwicklung der Anträge für Schwervertransporte zu überzogenen Prognosen führen (vgl. Abbildung 4.2), da die Daten einerseits Mehrfachanträge enthalten und auch lediglich die Anträge an sich, jedoch nicht die tatsächlich durchgeführten Schwervertransporte erfasst werden. Anzumerken ist auch, dass der in den Grundscenarien enthaltene genehmigungspflichtige Schwerverkehr mit Dauergenehmigung mit einem Anteil von 0,5% und einem mittleren Gesamtgewicht von 72 Tonnen lediglich eine Näherung darstellt, da diesbezüglich bisher keine ausreichend umfangreichen Untersuchungen durchgeführt wurden. Es ist jedoch aus heutiger Sicht davon auszugehen, dass es sich bei dieser Näherung um eine obere Deckelung handelt. Im

kombinierten Prognose-Szenario wird daher der genehmigungspflichtige Schwerverkehr analog zu den Grundscenarien angesetzt.

Zur Abbildung zukünftiger LKW-Kolonnen werden hier zusätzlich die entsprechenden Annahmen des Prognose-Szenarios D ("Platooning") übernommen.

LKW-Typ	Häufigkeit	zul. GG [t]	2004			2050		
			$\mu_2$	Leergewicht G ( $\approx 40\%$ zul.GG)	Ladung P ( $\mu_2 - G$ )	Leergewicht G* (unverändert)	Ladung P*	$\mu_2^*$ ( $G^* + P^*$ )
			[t]	[t]	[t]	[t]	[t]	[t]
8	11%	18	9,17	7,20	1,97	7,20	1,97	9,17
33	5%	36	20,84	14,40	6,44	14,40	6,44	20,84
41	17%	40	41,45	16,00	25,45	16,00	36,01	52,0
97	8%	36	21,14	14,40	6,74	14,40	6,74	21,14
98	59%	40	40,53	16,00	24,53	16,00	36,01	52,0
gewichtetes Mittel:			19,88			28,45 (+43,1%)		

Tabelle 4.11: Prognose-Szenario E - Abschätzung des zukünftigen Gesamtgewichtes beladener LKW  $\mu_2^*$

2004		+14,1%		2050	
$N_{obs}$	DTSV	$N_{obs}$	DTSV	$N_{obs}$	DTSV
$2,5 \cdot 10^6$	10.000	$2,85 \cdot 10^6$	11.410	$3,0 \cdot 10^6$	12.000
$0,6 \cdot 10^6$	2.400	$0,68 \cdot 10^6$	2.740	$0,7 \cdot 10^6$	2.800
$0,125 \cdot 10^6$	500	$0,14 \cdot 10^6$	570	$0,15 \cdot 10^6$	600

Tabelle 4.12: Prognose-Szenario E - Abschätzung der zukünftigen Schwerverkehrsstärke DTSV

## 5 Exemplarische Schädigungsermittlung - Massivbrücke

Für die Analyse relevanter Einflussgrößen bei Schädigungsberechnungen werden nachfolgend Ergebnisse von Ermüdungsnachweisen mit unterschiedlichen Ansätzen (normativ und wissenschaftlich) an einem realen Beispielbauwerk aufgeführt.

Bei dem Beispielbauwerk handelt es sich um ein Spannbetonbauwerk mit 31 Feldern mit verschiedenen Querschnittskonstruktionen (zweistegiger Plattenbalken, mehrzelliger Hohlkasten, einzelliger Hohlkasten) und einer Gesamtlänge von 1.066 m. Aufgrund identifizierter Defizite in der durchgeführten Nachrechnung unter anderem hinsichtlich des Nachweises der hinreichenden Ermüdungssicherheit wurden hierzu umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Besonders betrachtet wird dabei die im konkreten Fall ermittelte Auswirkung der Grundbeanspruchung auf die ermittelten Schädigungssummen sowie Effekte aus der Berücksichtigung von streuenden Gesamtgewichten der Fahrzeuge.

Es wurden folgende Varianten und Ansätze untersucht:

- Untersuchungen von Spannstahl und Betonstahl (Biegebewehrung) in einem gewählten Abschnitt des Bauwerkes
- Wöhler-Linie mit Parametern für Spannstahl und Betonstahl nach Norm (bilinearer Verlauf)
- Exemplarische Variation der Wöhler-Linie in Form von Verläufen mit identischer Steigung
- Variation der angesetzten Grundbeanspruchung:
  - o Eigengewicht, Vorspannung, Kriechen und Schwinden, wahrscheinliche Stützensenkung, häufiger Anteil von Temperatur und quasi-ständiger Anteil der gleichmäßig verteilten Verkehrseinwirkung (UDL)
  - o Schrittweise Reduzierung der Grundbeanspruchung durch Vernachlässigung von Beanspruchungen aus Verkehr, Temperatur und Stützensenkung
- Vereinfachter Ermüdungsnachweis über schädigungsäquivalente Schwingbreiten:
  - o Ansatz von ELM 3 und Anpassungsfaktoren nach Norm
  - o Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite
- o Rechnerische Ermittlung der resultierenden Schädigungssumme bei  $1 \cdot 10^6$  Lastwechseln
- Schädigungsberechnung unter Ansatz von Ermüdungslastmodell 4 sowie Verkehrszahlen und Verkehrszusammensetzung nach Nachrechnungsrichtlinie:
  - o Ermittlung der Spannungsschwingbreiten aus den einzeln angesetzten Fahrzeugen aus ELM 4 mit den in ELM 4 definierten Achslasten
  - o Ansatz der Fahrzeuge getrennt voneinander
  - o Ansatz der Fahrzeuge in zwei Spuren
  - o Ermittlung der rechnerischen Einzelschädigung pro Fahrzeug
  - o Lineare Schadenakkumulation anhand der Fahrzeuganzahl im Betrachtungszeitraum (1972 bis 2030) auf Grundlage der Zahlenwerte in der Nachrechnungsrichtlinie

- Schädigungsberechnung unter Ansatz von Ermüdungslastmodell 4, jedoch mit zusätzlicher Berücksichtigung der objektspezifischen Verkehrszahlen und deren angenommenen Entwicklung in der Vergangenheit und der Zukunft
  - o Verarbeitung zunächst analog vorheriger Anstrich
  - o Lineare Schadenakkumulation anhand Fahrzeuganzahl im Betrachtungszeitraum (1972 bis 2030) auf Grundlage objektspezifischer Verkehrszahlen
- Schädigungsberechnung unter Ansatz der Fahrzeuge aus Ermüdungslastmodell 4, jedoch unter Verwendung von Gesamtgewichtsverteilungen für die Fahrzeuge anstelle der deterministischen Achslasten aus Ermüdungslastmodell 4
  - o Gesamtgewichtsverteilungen analog zu den Untersuchungen in [FrBö11b] für die Verkehrsart „Große Entfernung“, hierbei handelt es sich um Daten der A61 (vgl. auch [Kasc09])
  - o Ermittlung der Spannungsschwingbreiten zunächst mit den deterministischen Werten aus ELM 4
  - o Unter Annahme einer linearen Beziehung zwischen Gesamtgewicht und Spannungsschwingbreite erfolgt die Ermittlung von über die Gesamtgewichtsverteilungen gewichteten Einzelschädigungen pro Fahrzeug
  - o Lineare Schadenakkumulation anhand der Fahrzeuganzahl im Betrachtungszeitraum (1972 bis 2030) auf Grundlage objektspezifischer Verkehrszahlen
- Schädigungsberechnung unter Ansatz der Fahrzeuge aus Ermüdungslastmodell 4 jedoch unter Verwendung von einer zweiten Variante von Gesamtgewichtsverteilungen für die Fahrzeuge anstelle der deterministischen Achslasten aus Ermüdungslastmodell 4
  - o Gesamtgewichtsverteilungen analog zu den Untersuchungen in [FrBö11b] für die Verkehrsart „Mittlere Entfernung“, hierbei handelt es sich um Daten der A8

In den Analysen wurde ein Abschnitt des Bauwerkes betrachtet. Die nachfolgende Ergebnisaufbereitung erfolgt für eine Auswahl von Punkten im betrachteten Bauwerksabschnitt.

In nachfolgender Abbildung 5.1 sind Ergebnisse der ermittelten Schädigungssummen des Betonstahls für einen Punkt im betrachteten Bauwerksabschnitt dargestellt. Unterhalb des Diagrammes ist der Punkt grafisch markiert.

Die eingetragenen Balken im Diagramm zeigen den Wert der Grundbeanspruchung in vier betrachteten Varianten:

- G+P+KS+DS+T+UDL
  - o Ansatz der Grundbeanspruchung aus Eigengewicht, Vorspannung (0,9-fach), Kriechen und Schwinden, wahrscheinlicher Stützensenkung, häufigem Wert aus Temperatur und quasi-ständigem Wert aus UDL
- G+P+KS+DS+T
  - o Vernachlässigung des quasi-ständigen Wertes aus UDL
- G+P+KS+DS
  - o Weitere Vernachlässigung der häufigen Temperaturbeanspruchung
- G+P+KS
  - o Weitere Vernachlässigung der wahrscheinlichen Stützensenkung

Der erste Ansatz entspricht der Regelung in der Nachrechnungsrichtlinie für den Ermüdungsnachweis mit ELM 4. Der zweite Ansatz entspricht der Regelung im DIN-Fachbericht für den Ermüdungsnachweis mit ELM 3.

Der im Diagramm rot dargestellte Punkt verdeutlicht die ermittelte Schädigungssumme aus dem Ansatz des ELM 3 in Verbindung mit den normativen Regelungen für die Anpassungsfaktoren ( $\lambda_s$ ) inklusive der Vorgaben für die Erhöhung der Achslasten im Bereich von Zwischenstützen (Faktor 1,75) und den übrigen Bereichen (Faktor 1,40). Da Ermüdungsnachweise auf Grundlage des ELM 3 auf Spannungsebene geführt werden, wurde hier für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse eine Schädigungssumme  $D$  aus der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{s, equ}$  und der Spannungsschwingbreite der Wöhlerlinie  $\Delta\sigma_{Rsk}$  (beide bei  $1 \cdot 10^6$  Lastwechseln) berechnet. Ansatzgemäß ist damit eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander gegeben, da die ermittelte schädigungsäquivalente Schwingbreite gerade genau mit  $1 \cdot 10^6$  Lastwechseln die „tatsächliche“ Schädigung hervorrufen soll. Die Eintragung des Ergebnisses aus dem Ansatz von ELM 3 erfolgt im Diagramm bei der zweiten Variante der Grundbeanspruchung, da diese

entsprechend der oben aufgeführten Erläuterung normativ zueinander gehören.

Die weiteren eingetragenen Linien zeigen die ermittelten Schädigungssummen aus den beschriebenen Ansätzen der Fahrzeuge. Die Schädigungssummen sind für die ersten beiden Varianten der Grundbeanspruchung bei Ansatz von ELM 4 nach Norm über dem „Grenzwert“ von 1,0. Ersichtlich wird hier gleichzeitig die deutliche Auswirkung der Berücksichtigung von Gesamtgewichtsverteilungen für die Fahrzeuge anstelle der deterministischen Werte aus ELM 4. Der Ansatz der Gesamtgewichtsverteilungen entspricht stark vereinfacht

einer simulationsbasierten Untersuchung. Die Vereinfachung liegt hier im getrennten Ansatz der Fahrzeuge. In einer Simulationsrechnung werden zusätzliche Effekte aus gleichzeitiger Fahrzeugpräsenz hinter- und nebeneinander berücksichtigt. Im dargestellten Beispiel ergeben sich bei einer weiteren Reduzierung der Grundbeanspruchung rechnerisch praktisch keine relevanten Schädigungssummen. Für den betrachteten Punkt werden die Schwingspiele quasi überproportional kleiner und zusätzlich wirkt sich der nichtlineare Verlauf der Wöhler-Linie deutlich aus.

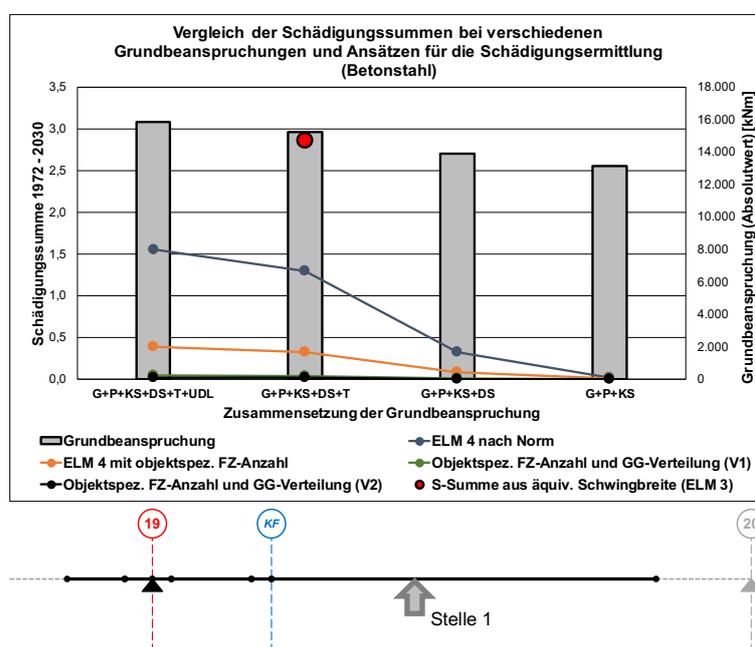


Abbildung 5.1: Ermittelte Schädigungssummen Betonstahl unter verschiedenen Grundbeanspruchungen und Ansätzen für die Schädigungsermittlung – Stelle 1

Anzumerken ist hier jedoch, dass bei dem betrachteten Bauwerk dem Errichtungszeitpunkt entsprechend nur sehr geringe Mengen an Betonstahl vorhanden sind. Dies führt schnell zu höheren Spannungswerten im Stahl und entsprechend zu hohen Schädigungswerten. Es wird ersichtlich, dass in diesem Fall der Ermüdungsnachweis mit ELM 3 und der „zugehörigen“ Grundbeanspruchung zu einer höheren Schädigungssumme führt als der normative Ansatz von ELM 4 mit der „zugehörigen“ Grundbeanspruchung.

In analoger Weise sind in nachfolgender Abbildung 5.2 die ermittelten Schädigungssummen für den Spannstahl an gleicher Stelle im betrachteten Abschnitt des Bauwerkes aufgeführt. Die Schädigungssummen sind hier größer als im Betonstahl. Die Unterschiede zwischen dem normativen Ansatz von ELM 4 und dem Ansatz unter Berücksichtigung von Gesamtgewichtsverteilungen sind hier qualitativ ähnlich zum Betonstahl. ELM 3 liefert in diesem Fall eine niedrigere Schädigungssumme.

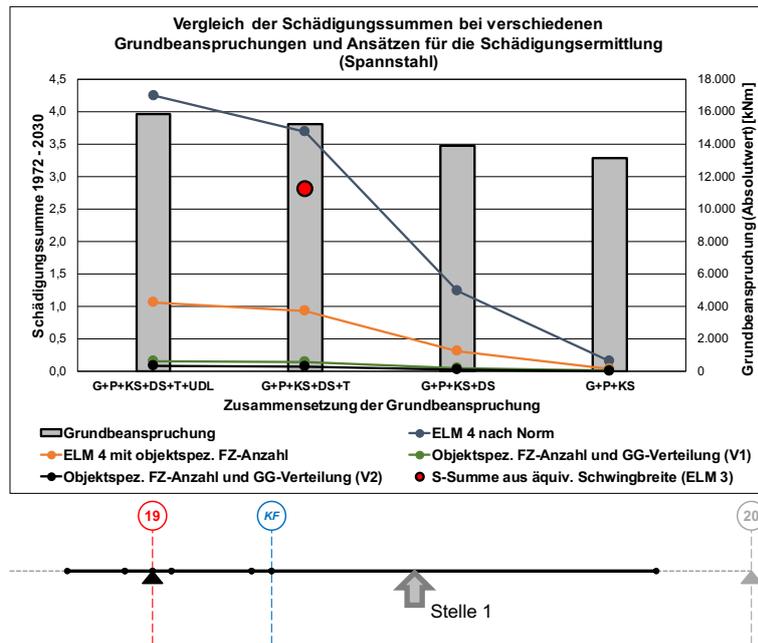


Abbildung 5.2: Ermittelte Schädigungssummen Spannstahl unter verschiedenen Grundbeanspruchungen und Ansätzen für die Schädigungsermittlung – Stelle 1

Für eine weitere Stelle im betrachteten Abschnitt sind in den beiden nachfolgenden Bildern (Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4) die Ergebnisse der Schädigungsberechnung für den Betonstahl und den Spannstahl dargestellt. Die Absolutwerte der Grundbeanspruchung sind im Vergleich zum vorher dargestellten Punkt ähnlich.

Die absoluten Werte der Schädigungssummen erhöhen sich deutlich. Qualitativ sind die Unterschiede infolge des Ansatzes der Fahrzeuge (Anzahl und Gewichtsverteilung anstatt deterministischer Wert) ähnlich.

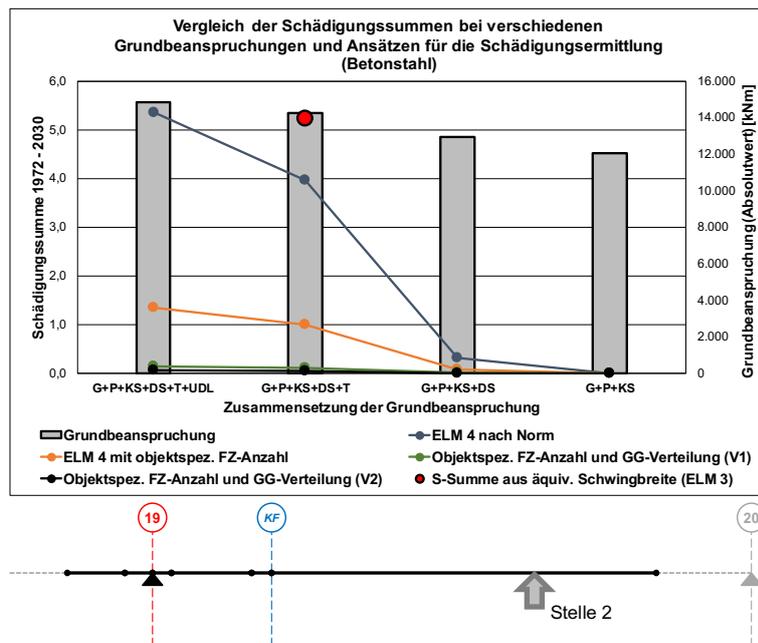


Abbildung 5.3: Ermittelte Schädigungssummen Betonstahl unter verschiedenen Grundbeanspruchungen und Ansätzen für die Schädigungsermittlung – Stelle 2

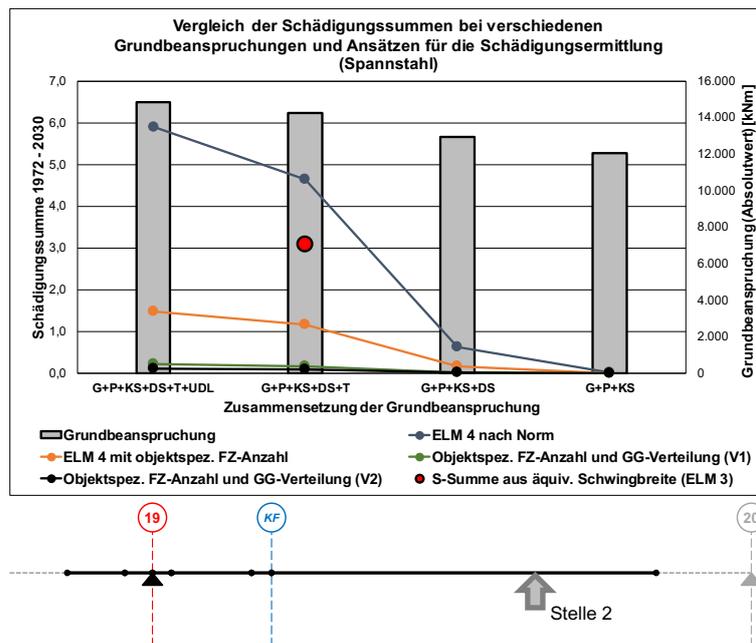


Abbildung 5.4: Ermittelte Schädigungssummen Spannstahl unter verschiedenen Grundbeanspruchungen und Ansätzen für die Schädigungsermittlung – Stelle 2

Für die Beurteilung des Anteils von einzelnen Fahrzeugen im Fahrzeugkollektiv an der Gesamtschädigung und damit die Einordnung der „Ermüdungswirksamkeit“ der Fahrzeuge ist in nachfolgender Abbildung 5.5 eine entsprechende Auswertung für die Schädigungssumme am Betonstahl an Stelle 1 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass das Fahrzeug 3 (Sattelzug mit 2-achsiger Zugmaschine und 3-achsigem Auflieger – Typ 98 nach TLS)

generell den deutlich höchsten Anteil an der Gesamtschädigung aufweist. Dieser Anteil ist nur geringfügig abhängig vom Ansatz eines deterministischen Gesamtgewichtes oder einer Gesamtgewichtsverteilung. Die analoge Darstellung für die Schädigungssumme am Spannstahl in Abbildung 5.6 zeigt qualitativ das gleiche Bild, die Anteile der übrigen Fahrzeuge nehmen leicht zu.

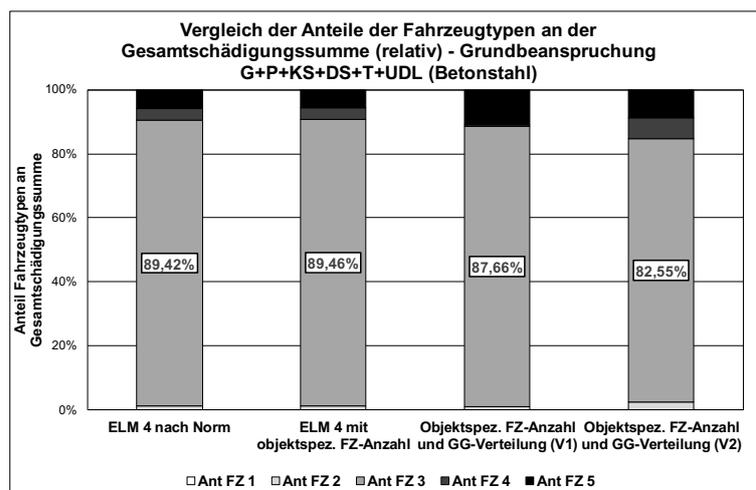


Abbildung 5.5: Anteil der einzelnen Fahrzeuge an der Schädigungssumme für den Betonstahl – Stelle 1

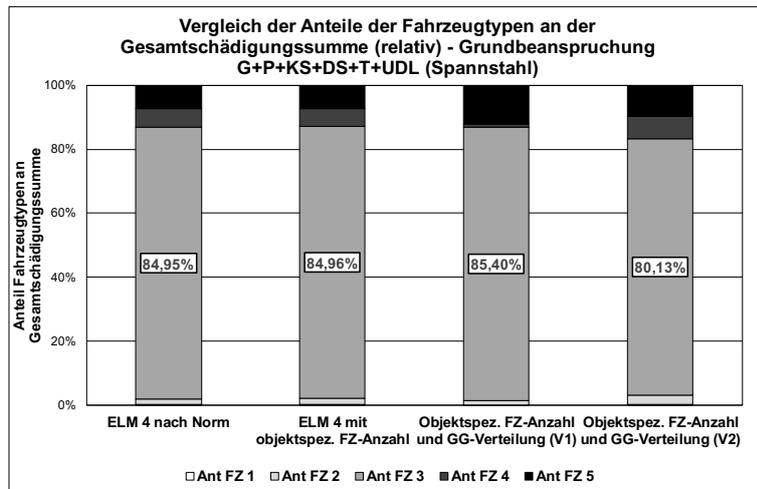


Abbildung 5.6: Anteil der einzelnen Fahrzeuge an der Schädigungssumme für den Spannstahl – Stelle 1

Ein zusätzlicher Einfluss auf die berechneten Schädigungssummen ergibt sich aus der Form der verwendeten Wöhler-Linie. Im Massivbau wird eine Linie mit zwei Neigungen (Wechsel bei  $N = 1 \cdot 10^6$ ) verwendet (vgl. Abs. 2.2.1). Im vereinfachten Ansatz wird die Wöhler-Linie mit einer konstanten Neigung ( $m_2$ ) angesetzt.

In den beiden nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 5.7 und Abbildung 5.8) sind die resultierenden Schädigungssummen für den Betonstahl unter Variation der Wöhler-Linie aufgeführt. Betrachtet wurde dabei der Verlauf der Wöhler-Linie nach Norm (Anstieg  $m_1$  bis  $N = 1 \cdot 10^6$  und Anstieg  $m_2$  ab  $N = 1 \cdot 10^6$ ), ein durchgehender Anstieg  $m_1$  sowie ein durchgehender Anstieg  $m_2$ . Die letzte Variante entspricht dabei dem Vereinfachungsansatz. Rechnerisch ergibt sich bei einem

durchgehenden Anstieg  $m_1$  eine Vergrößerung der Schädigungswerte für Schwingbreiten kleiner als  $\Delta\sigma_{Rsk}$  und im umgekehrten Fall (durchgehender Anstieg  $m_2$ ) eine Vergrößerung der Schädigungswerte für Schwingbreiten größer als  $\Delta\sigma_{Rsk}$ . Die Diagramme zeigen für die betrachtete Stelle tendenziell höhere Schädigungswerte bei Ansatz eines durchgehenden Anstieges  $m_1$ . Da hier hauptsächlich Schwingbreiten in Wertebereichen kleiner  $\Delta\sigma_{Rsk}$  auftreten, werden die Schädigungspotenziale aus diesen Beanspruchungen durch diese Vereinfachung deutlich überbewertet. Die in den laufenden Untersuchungen angewendete Vereinfachung (durchgehender Anstieg  $m_2$ ) liefert in den dargestellten Beispielen gleiche Ergebnisse wie der normative Ansatz der Wöhler-Linie. Die Vereinfachung der Wöhler-Linie in der genannten Form ist damit hier durchaus zweckmäßig.

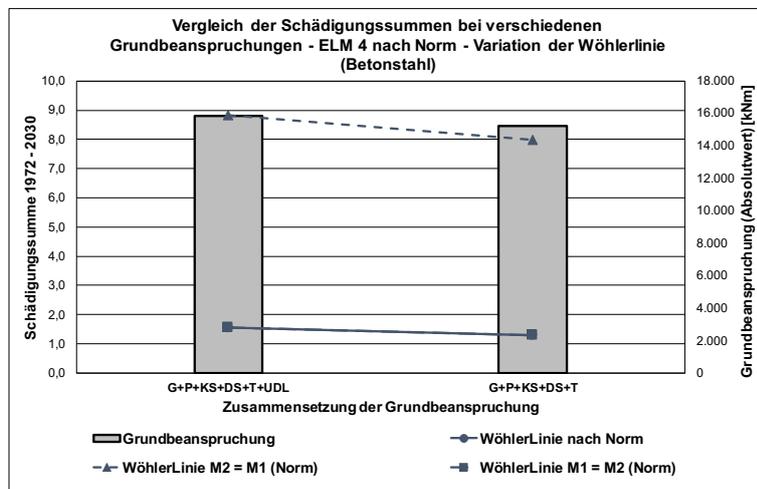


Abbildung 5.7: Schädigungssumme Betonstahl unter Ansatz von ELM 4 nach Norm bei Variation der Anstiege der Wöhler-Linie – Stelle 1

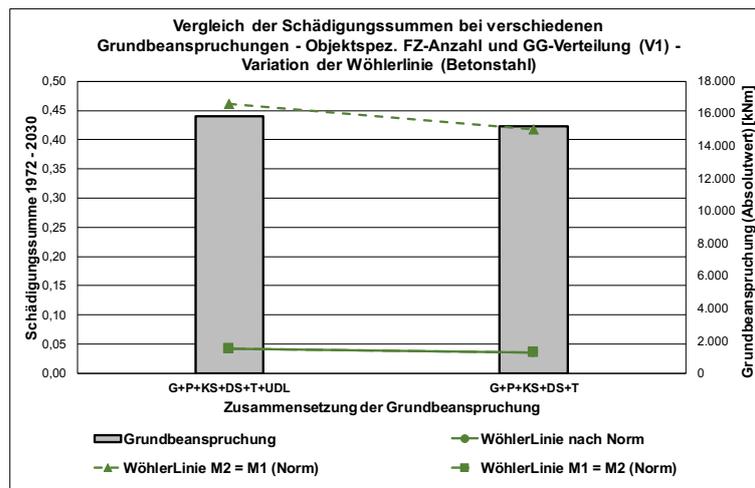


Abbildung 5.8: Schädigungssumme Betonstahl unter Ansatz von Gesamtgewichtsverteilungen für die Fahrzeuge und objektspezifischen Verkehrszahlen bei Variation der Anstiege der Wöhler-Linie – Stelle 1

Für den Spannstahl sind die Vergleichswerte aus der Variation der Wöhler-Linie in den beiden nachfolgenden Grafiken (Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10) dargestellt. Auch hier zeigt sich eindeutig, dass der vereinfachte Ansatz mit einem durchgehenden Anstieg  $m_2$  keine abweichenden

Schädigungssummen liefert. Für die übrigen Stellen des betrachteten Tragwerksbereiches sind diese Zusammenhänge und Ergebnisse analog. Auf eine weitere grafische Aufbereitung wird an dieser Stelle verzichtet.

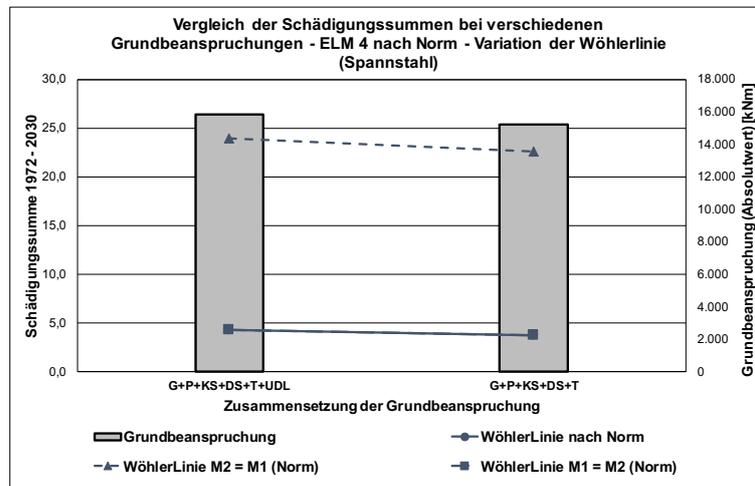


Abbildung 5.9: Schädigungssumme Spannstahl unter Ansatz von ELM 4 nach Norm bei Variation der Anstiege der Wöhler-Linie – Stelle 1

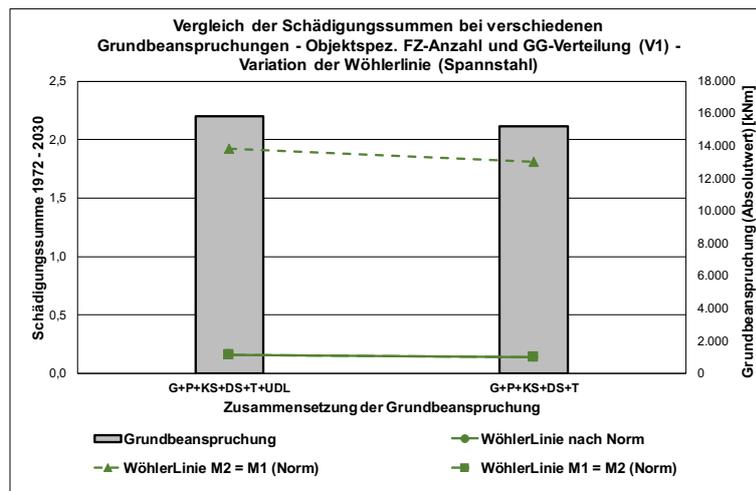


Abbildung 5.10: Schädigungssumme Spannstahl unter Ansatz von Gesamtgewichtsverteilungen für die Fahrzeuge und objektspezifischen Verkehrszahlen bei Variation der Anstiege der Wöhler-Linie – Stelle 1

## 6 Einfluss der Linearisierung von M- $\sigma$ -Beziehung und Wöhlerlinie

Den aktuell in [DIN EN 1992-2/NA] normativ geregelten Schadensäquivalenzfaktoren  $\lambda$  liegt eine Linearisierung der M- $\sigma$ -Beziehung und der Wöhlerlinie zugrunde. Welchen Einfluss diese Linearisierungen auf das spätere Bemessungsergebnis haben, soll im folgenden Kapitel anhand von Beispielen aufgezeigt werden. Dazu werden Verkehrssimulationen für realistische Beispielbrücken durchgeführt, denen jeweils eine Bemessung auf Grundlage der Eurocodes zugrunde liegt (vgl. Abschnitt 3.2). Je Simulation werden unterschiedliche Stufen der Linearisierung untersucht. Die wesentlichen Methoden beschreibt der folgende Abschnitt.

### 6.1 Methoden zur Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite $\Delta\sigma_E$ und des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$

Bei der Ermittlung von schädigungsäquivalenten Schwingbreiten  $\Delta\sigma_{E,1}$  und Schadensäquivalenzfaktoren  $\lambda$  wird zwischen einer detaillierten und vereinfachten Methode unterschieden.

#### 6.1.1 Detaillierte Methode

Die detaillierte Methode (vgl. Abbildung 6.1) berücksichtigt zum einen den bilinearen Verlauf der Bezugs-Wöhlerlinie. Zum anderen wird auch der nicht-lineare Verlauf der M- $\sigma$ -Beziehung berücksichtigt, wodurch die Grundbeanspruchung zu einem wesentlichen Einflussfaktor wird.

Die schädigungsäquivalente Schwingbreite  $\Delta\sigma_E$  ergibt sich für eine beliebig definierte Anzahl an Schwingspielen  $n_E$  je nach Höhe der Schadenssumme  $D$  aus dem Knick der Bezugs-Wöhlerlinie bei  $\Delta\sigma_D$  und  $N_D$ :

$$\Delta\sigma_E = \left(\frac{N_D}{n_E} \cdot D\right)^{1/m} \cdot \Delta\sigma_D \quad ; m = \begin{cases} m_1 \text{ für } D > \frac{n_E}{N_D} \\ m_2 \text{ für } D \leq \frac{n_E}{N_D} \end{cases}$$

Im Massivbau wird von einem Knick der Bezugs-Wöhlerlinie bei  $\Delta\sigma_D = \Delta\sigma_{Rsk}$  und  $N_D = 1 \cdot 10^6$  ausgegangen. Die schädigungsäquivalente Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  wird dementsprechend auch für eine Schwingspielanzahl von  $n_E = 1 \cdot 10^6$  bestimmt. Damit lässt sich wie folgt vereinfachen:

$$\Delta\sigma_{E,1} = (D)^{1/m} \cdot \Delta\sigma_{Rsk} \quad ; m = \begin{cases} m_1 \text{ für } D > 1 \\ m_2 \text{ für } D \leq 1 \end{cases}$$

Alternativ lässt sich  $\Delta\sigma_{E,1}$  auch direkt aus den Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma_i$  des Beanspruchungskollektivs ermitteln:

$$\Delta\sigma_{E,1} = \left[ \frac{1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta\sigma_i^m) \right]^{1/m}$$

Durch einen Vergleich mit der Spannungsschwingbreite infolge des ELM 3 lässt sich der hier relevante Schadensäquivalenzfaktor  $\lambda$  ableiten:

$$\lambda_{\text{nichtlinear}} = \frac{\Delta\sigma_{E,1}}{\Delta\sigma_{ELM3}}$$

bzw.

$$\lambda_{\text{nichtlinear}} = \frac{1}{\Delta\sigma_{ELM3}} \cdot \left[ \frac{1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta\sigma_i^m) \right]^{1/m}$$

#### 6.1.2 Vereinfachte Methode

Die vereinfachte Methode (vgl. Abbildung 6.2) reduziert die Bezugs-Wöhlerlinie auf eine lineare Form mit der Steigung  $m_2$ . Bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  erfolgt zusätzlich eine Linearisierung der M- $\sigma$ -Beziehung, wodurch die Grundbeanspruchung ihren Einfluss auf den Faktor  $\lambda$  verliert (vgl. [Dani94]).

Bei der Ermittlung von  $\lambda$  aus der Grundgleichung

$$\lambda = \frac{1}{\Delta\sigma_{ELM3}} \cdot \left[ \frac{1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta\sigma_i^m) \right]^{1/m}$$

ergibt sich durch die Linearisierung

$$\Delta\sigma = \Delta M \cdot u$$

der folgende Zusammenhang:

$$\lambda = \frac{1}{\Delta M_{ELM3}} \cdot \left[ \frac{1}{1 \cdot 10^6} \cdot \sum_i (n_i \cdot \Delta M_i^m) \right]^{1/m}$$

Der Schadensäquivalenzfaktor kann damit direkt auf Grundlage der Momentenschwingbreiten  $\Delta M_i$  ermittelt werden.

Man geht aktuell davon aus, dass die Linearisierung der M- $\sigma$ -Beziehung auf der sicheren Seite liegt, wenn die Momentenschwingbreite infolge des ELM 3 mindestens so groß ist, wie die maximale Momentenschwingbreite aus der realen Verkehrsbeanspruchung. Zur Erfüllung dieser Bedingung wurden die Vergrößerungsfaktoren des ELM 3 für eine Bemessung im Massivbau eingeführt (1,75 für den Nachweis an Zwischenstützen, 1,40 in den übrigen Bereichen). D.h., für die Ermittlung der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{ELM3}$  ist ein höheres

Gesamtgewicht des ELM 3 anzusetzen. Bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  wird dieser aus Konformitätsgründen wieder durch den Vergrößerungsfaktor geteilt.  $\lambda$  kann damit relativ einfach auf andere Vergrößerungsfaktoren umgerechnet werden.

Die schädigungsäquivalente Schwingbreiten  $\Delta\sigma_{E,1}$  lässt sich nach der vereinfachten Methode wie folgt bestimmen.

$$\Delta\sigma_{E,1} = \lambda \cdot \Delta\sigma_{ELM3}$$

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei der vereinfachten Methode die Vereinfachungen und das Vorgehen des aktuell normativ geregelten Verfahrens zur Anwendung kommen. Bei der Ermittlung der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma_{ELM3}$  aus  $\Delta M_{ELM3}$  wird dabei eine nichtlineare M- $\sigma$ -Beziehung berücksichtigt.  $\Delta M_{ELM3}$  wird dabei um den Vergrößerungsfaktor erhöht. Dem Faktor  $\lambda$  liegt hingegen eine Linearisierung der M- $\sigma$ -Beziehung zugrunde (sowie eine Linearisierung der Wöhlerlinie).  $\lambda$  wird dabei um den Vergrößerungsfaktor abgemindert.

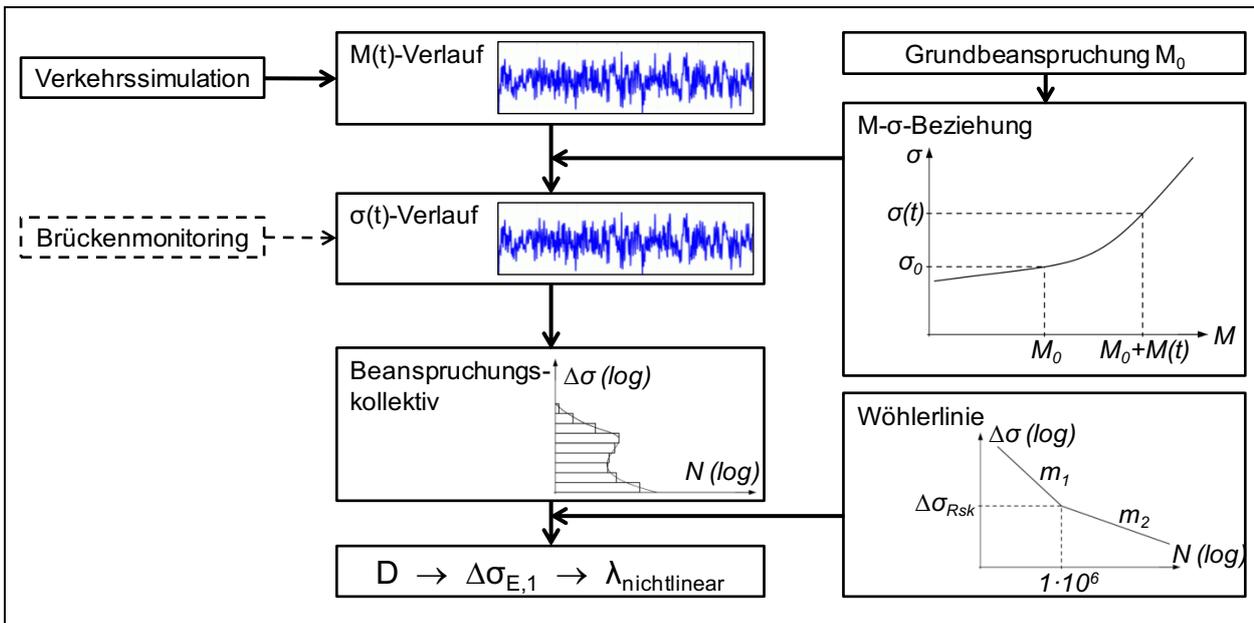


Abbildung 6.1: Detaillierte Methode zur Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$

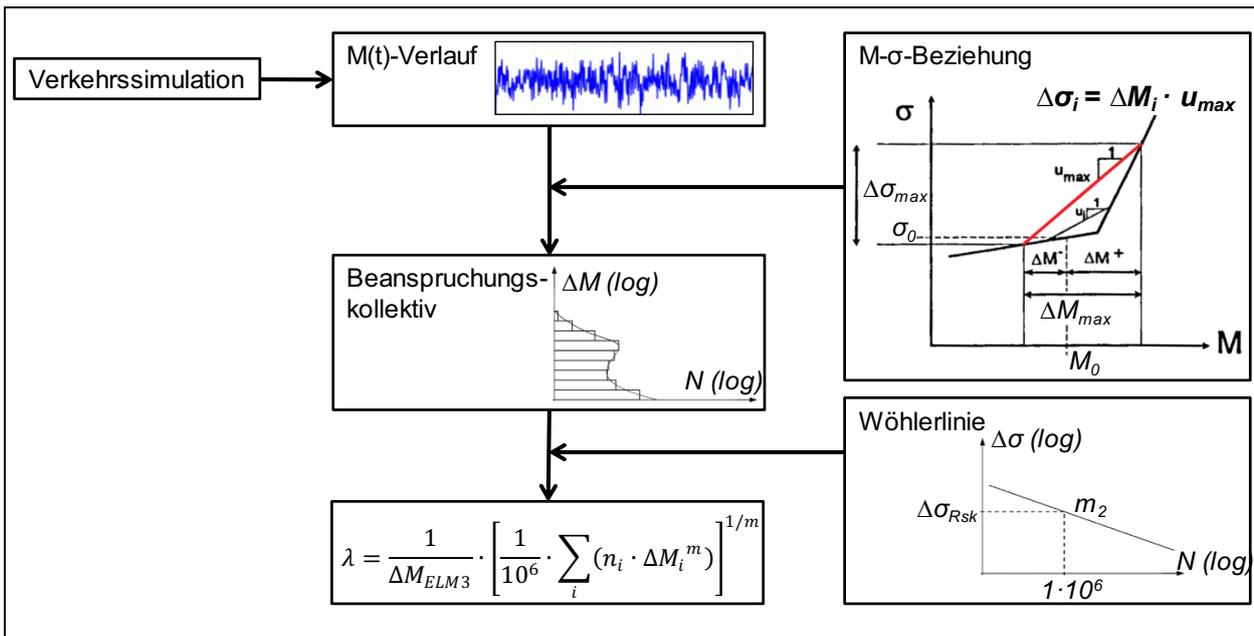


Abbildung 6.2: Vereinfachte Methode zur Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$

## 6.2 Grundlagen der Vergleichsrechnungen

Als Grundlage der Simulationen dienen die in Kapitel 3.2 beschriebenen Beispielbrücken 1 bis 4. Die den untersuchten Querschnitten bzw. Spannungspunkten zugrundeliegenden  $M$ - $\sigma$ -Beziehungen lassen sich Anhang C entnehmen. Diesen Verkehrssimulationen liegen weiterhin folgende Parameter zugrunde:

- Fahrzeugkollektiv:  
Grundszenario "Langstreckenverkehr 1"
- DTSV = 10.000
- Keine Staus ( $p_{\text{Stau}}=0$ ,  $p_{\text{fließ}}=1$ )
- Keine explizite Berücksichtigung von LKW-Kolonnen des aktuellen Verkehrs
- Kein Schwingbeiwert im fließenden Verkehr ( $\varphi=1,0$ )
- Simulationsdauer: 1 Jahr, Umrechnung auf 100 Jahre
- Einspuriger Verkehr

Die Simulationen wurden zunächst für die beiden oben genannten Methoden (detailliert und vereinfacht) durchgeführt. Als Ergänzung erfolgten zusätzliche Simulationen mit einer teilweisen Linearisierung. Insgesamt unterscheiden die Ergebnisse zwischen folgenden Stufen:

- $M$ - $\sigma$ -Beziehung nichtlinear  
Wöhlerlinie nichtlinear
- $M$ - $\sigma$ -Beziehung nichtlinear  
Wöhlerlinie linear
- $M$ - $\sigma$ -Beziehung linear  
Wöhlerlinie linear

Da von einem wesentlichen Einfluss der Grundbeanspruchung auf die Simulationsergebnisse auszugehen ist, wird dieser Parameter in möglichst aussagekräftigem Rahmen variiert. Die aus der Vorbemessung bekannte Grundbeanspruchung

$$M_0 = M_G + M_P + M_{\text{Set}} + M_{\Delta T}$$

dient dazu als Ausgangspunkt. Für unterschiedliche Niveaus von  $M_0$  wurde zunächst der lineare Temperaturgradient  $\Delta T$  wie folgt variiert:

- $0,6 \cdot \Delta T$
- $\Delta T = -8,0 \text{ K}$
- $\Delta T = +10,5 \text{ K}$  bzw.  $+12,3 \text{ K}$

**Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)**

Zusätzliche Niveaus der Grundbeanspruchung wurden so gewählt, dass Ergebnisse des betrachteten Querschnitts sowohl für den ungerissenen Zustand I als auch den gerissenen Zustand II vorliegen.

## 6.3 Ergebnisse der Vergleichsrechnungen

Die Ergebnisse werden im Folgenden anhand der Spannungspunkte Stützbereich UK  $\sigma_s$  und Feldbereich UK  $\sigma_p$  der Beispielbrücken 1 und 2 diskutiert. Weitere Ergebnisse lassen sich Anhang D und E entnehmen.

Im Allgemeinen zeigt sich hinsichtlich der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  eine relativ gute Übereinstimmung der unterschiedlichen Stufen der Linearisierung. Bei detaillierterer Betrachtung lassen sich jedoch Abweichungen im unteren Bereich der Grundbeanspruchung bzw. in der Nähe des Dekompressionspunktes der  $M$ - $\sigma$ -Beziehung erkennen (vgl. Abbildung 6.3, Abbildung 6.4, Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10). Die schädigungsäquivalente Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  auf Grundlage der vereinfachten Methode (linearisierte  $M$ - $\sigma$ -Beziehung) liegt hier teilweise unterhalb derjenigen der detaillierten Methode (nichtlineare  $M$ - $\sigma$ -Beziehung). Ein analoges Bild zeigt der Schadensäquivalenzfaktor  $\lambda$  (vgl. Abbildung 6.5, Abbildung 6.6, Abbildung 6.11 und Abbildung 6.12). Eine Bemessung auf Grundlage der vereinfachten Methode unterschätzt also an dieser Stelle den tatsächlichen Ermüdungsschaden.

Ähnliche Ergebnisse, die ein Defizit der vereinfachten Methode in der Nähe des Dekompressionspunktes ausweisen, lassen sich [ZiHB01] entnehmen. Die Defizite kommen den Autoren zufolge zustande, wenn die Grundbeanspruchung unterhalb des Dekompressionspunktes liegt, die Momentenschwingbreite infolge des simulierten Verkehrs jedoch höher als die des ELM 3 ist.

Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen keinen Einfluss einer Linearisierung der Wöhlerlinie. Dies liegt daran, dass die Beanspruchungskollektive unterhalb oder nur unwesentlich oberhalb des Knicks der Bezugs-Wöhlerlinie liegen (vgl. Abbildung 6.7, Abbildung 6.8, Abbildung 6.13 und Abbildung 6.14).

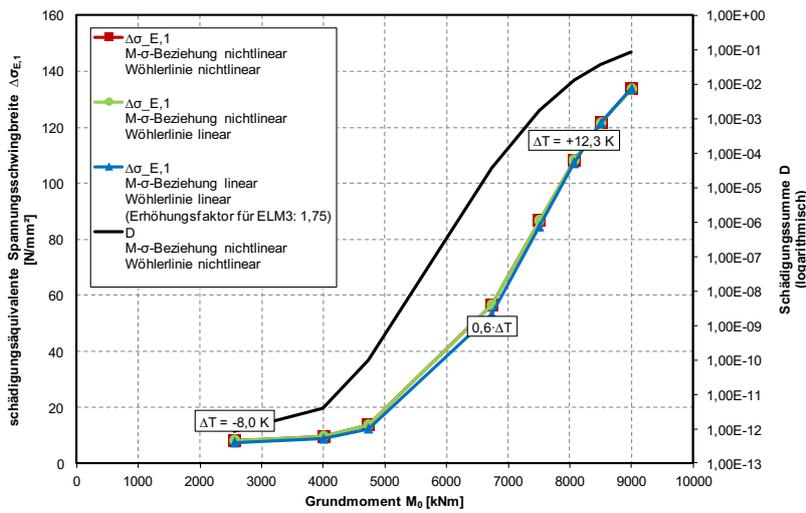


Abbildung 6.3: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

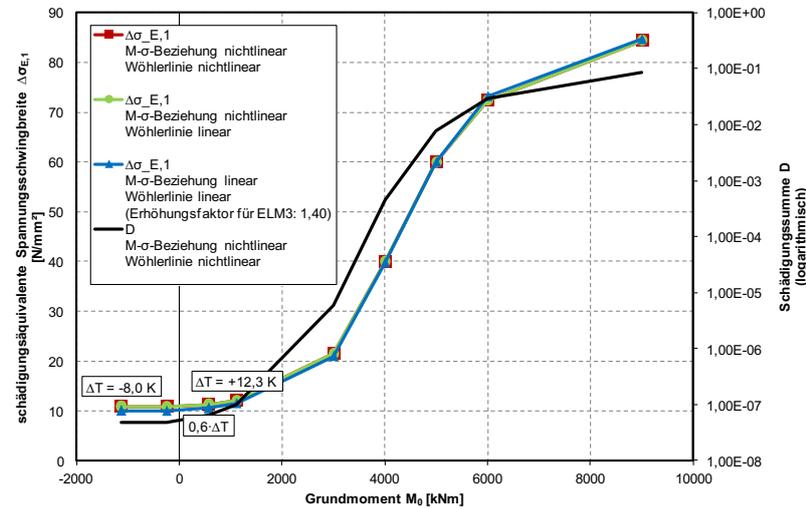


Abbildung 6.4: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

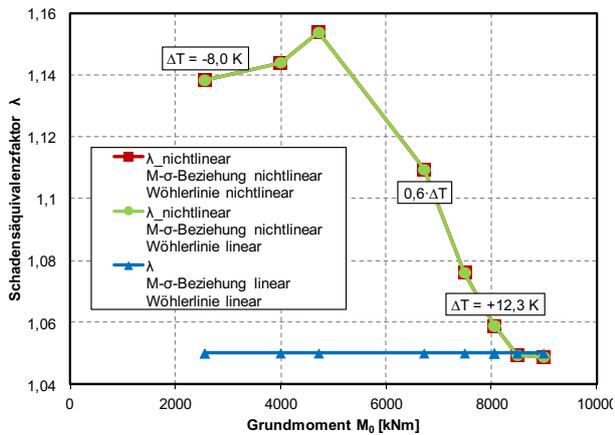


Abbildung 6.5: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ). Faktor  $\lambda$  bei allen Methoden jeweils bezogen auf das ELM3 mit Erhöhungsfaktor 1,75.

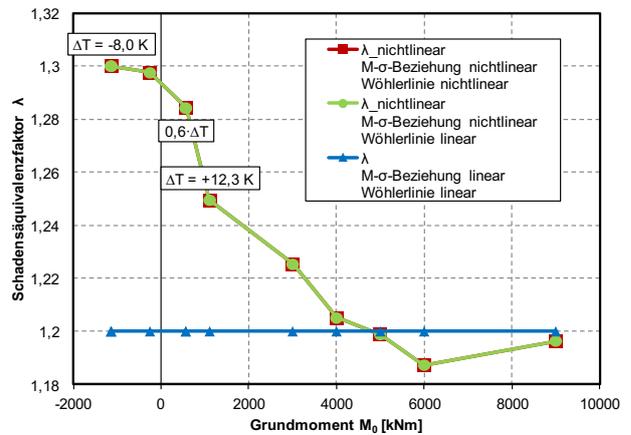


Abbildung 6.6: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ). Faktor  $\lambda$  bei allen Methoden jeweils bezogen auf das ELM3 mit Erhöhungsfaktor 1,40.

### Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)

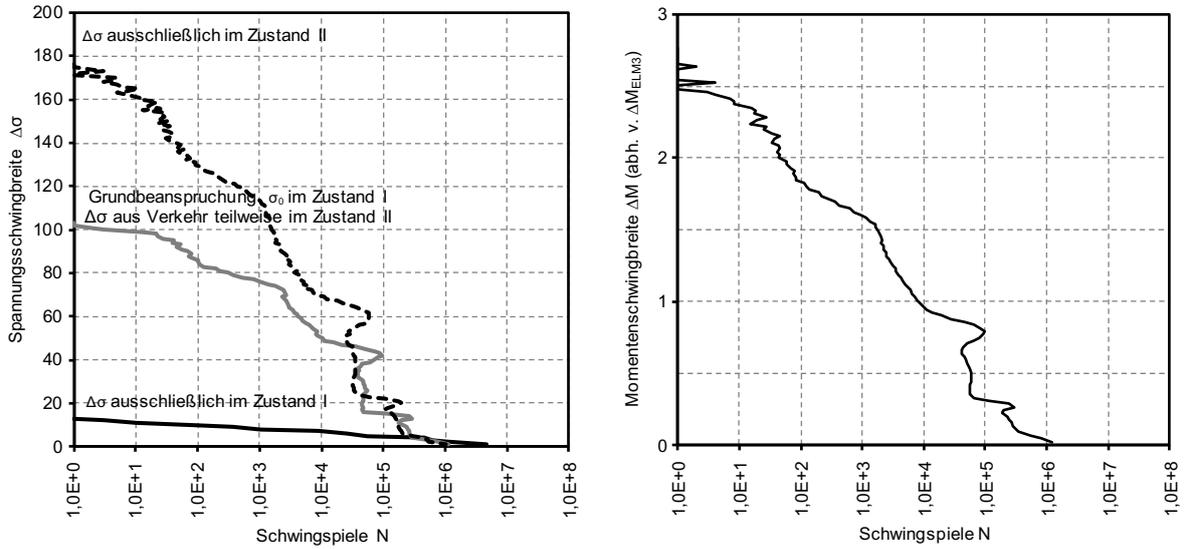


Abbildung 6.7: Beanspruchungskollektive der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung (links) und der Momentenschwingbreite  $\Delta M$  (rechts) - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

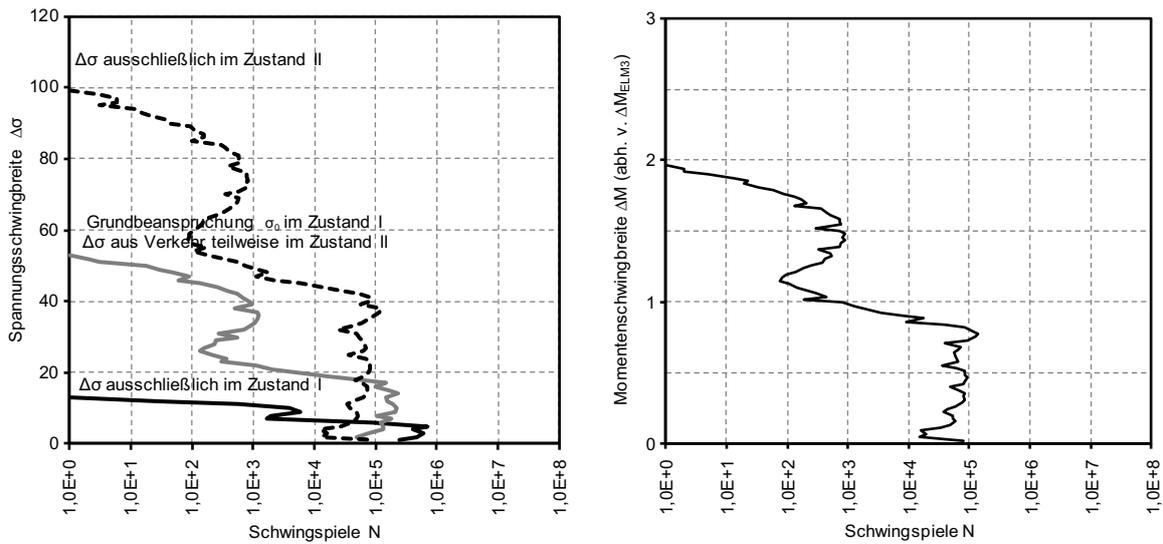


Abbildung 6.8: Beanspruchungskollektive der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung (links) und der Momentenschwingbreite  $\Delta M$  (rechts) - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)

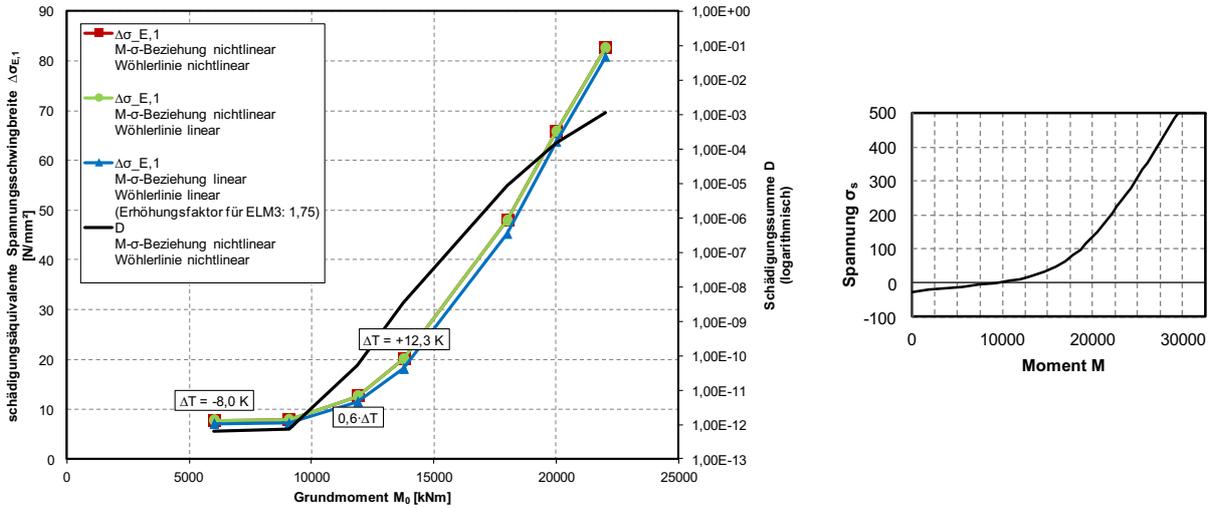


Abbildung 6.9: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

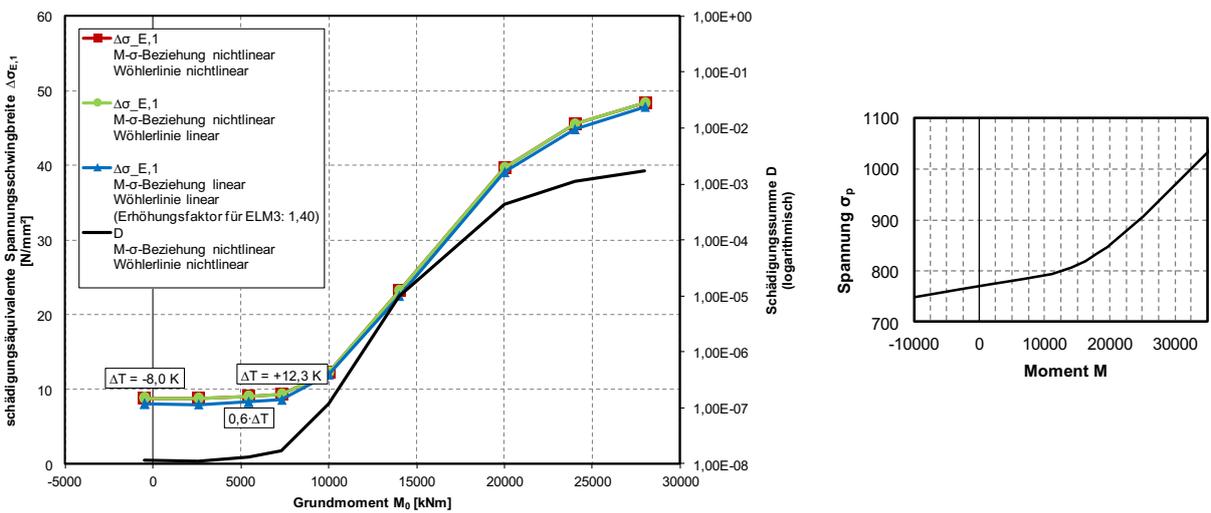


Abbildung 6.10: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

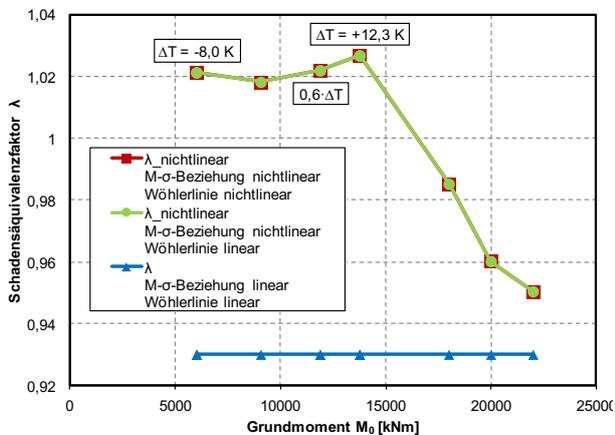


Abbildung 6.11: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ). Faktor  $\lambda$  bei allen Methoden jeweils bezogen auf das ELM3 mit Erhöhungsfaktor 1,75.

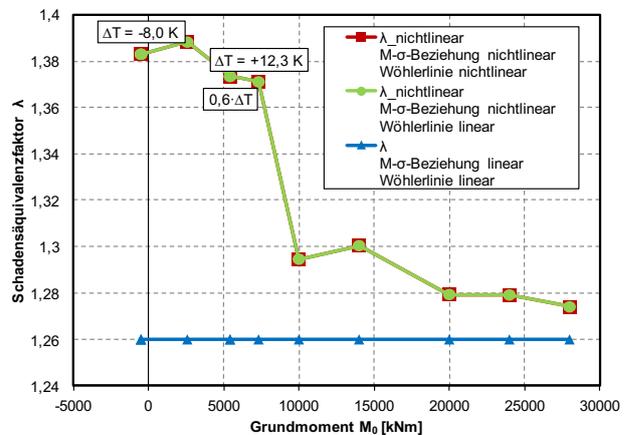


Abbildung 6.12: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ). Faktor  $\lambda$  bei allen Methoden jeweils bezogen auf das ELM3 mit Erhöhungsfaktor 1,40.

### Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)

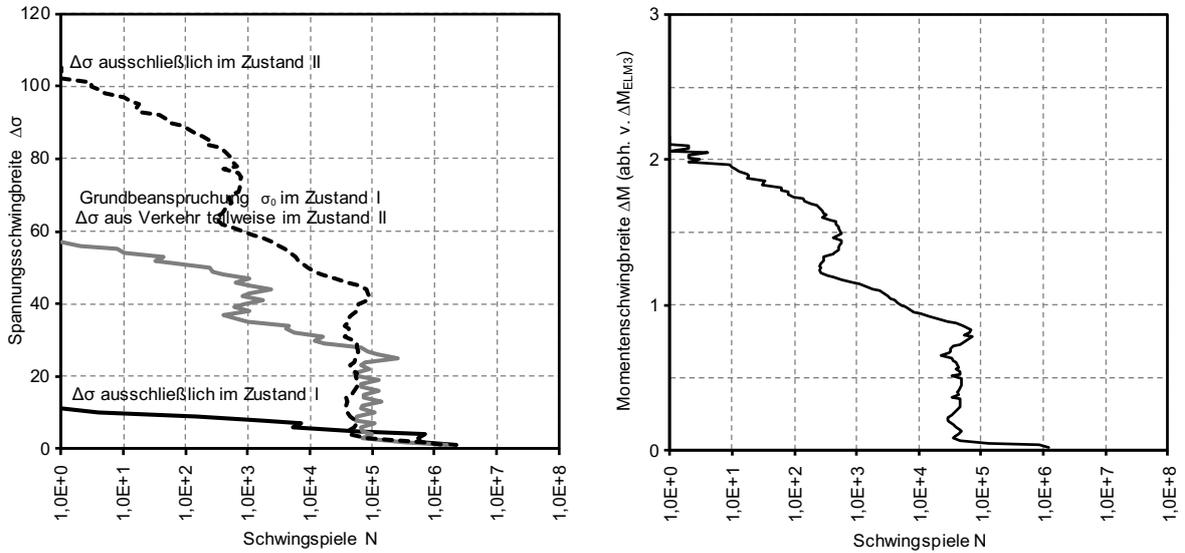


Abbildung 6.13: Beanspruchungskollektive der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung (links) und der Momentenschwingbreite  $\Delta M$  (rechts) - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

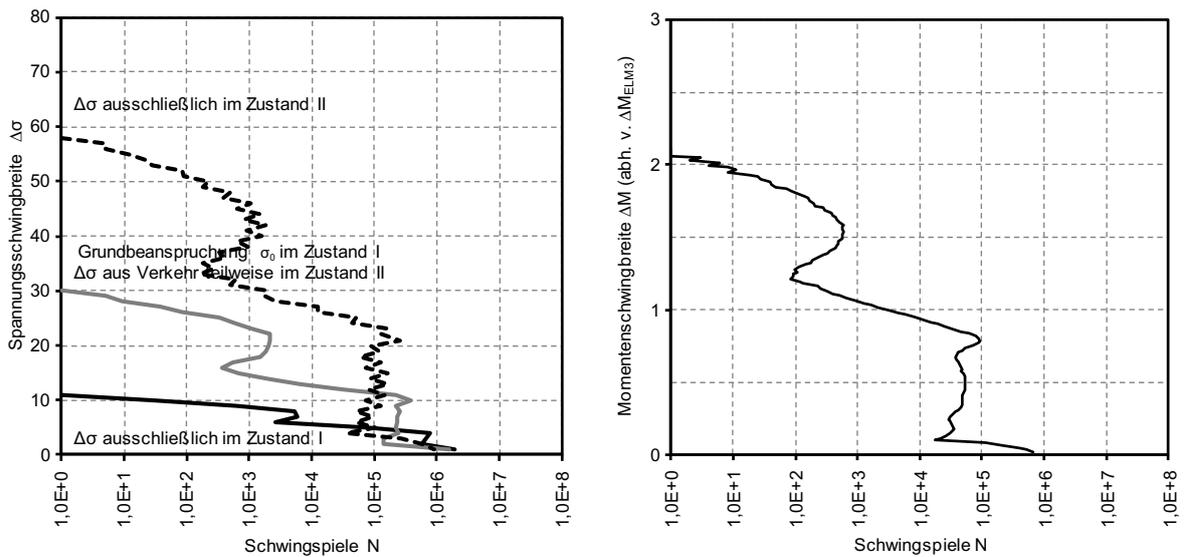


Abbildung 6.14: Beanspruchungskollektive der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung (links) und der Momentenschwingbreite  $\Delta M$  (rechts) - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

### 6.4 Korrektur der $\lambda$ -Faktoren für nichtlineare M- $\sigma$ -Beziehungen

Aufgrund des Defizits der  $\lambda$ -Faktoren nach der vereinfachten Methode bei nichtlinearen M- $\sigma$ -Beziehungen soll im Folgenden ein geeigneter Korrekturfaktor ( $\lambda_{\text{Korrektur}}$ ) abgeleitet werden. Der Korrekturfaktor soll die maximalen Unterschiede zwischen den  $\lambda$ -Faktoren nach der vereinfachten und detaillierten Methode abdecken, vgl. am Beispiel in Abbildung 6.15.

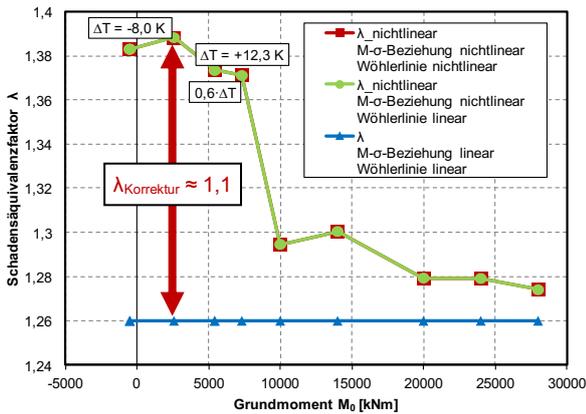


Abbildung 6.15: Definition des Korrekturfaktors  $\lambda_{\text{Korrektur}}$

Die weitergehende Auswertung in Anhang E zeigt, dass die  $\lambda$ -Faktoren der vereinfachten Methode bei niedriger Grundbeanspruchung stets unterhalb der detaillierten Methode liegen. Der Wert eines geeigneten Korrekturfaktors streut dabei in einem Bereich zwischen 1,0 und 1,6. Zur weiteren Eingrenzung werden die je Beispiel maximalen Korrekturfaktoren mit der zugehörigen Spannungsschwingbreite infolge des ELM 3 in Abbildung 6.16 aufgetragen.

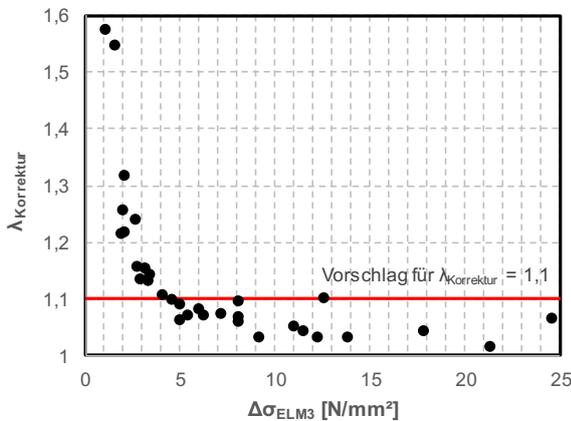


Abbildung 6.16: Zusammenhang zwischen Korrekturfaktor und der Spannungsschwingbreite infolge des ELM 3, vgl. Anhang E

Es zeigt sich, dass der Korrekturfaktor im Bereich niedriger Grundbeanspruchung nur bei sehr kleinen

Spannungsschwingbreiten infolge des ELM 3 sehr hohe Werte annimmt. Mit zunehmender Spannungsschwingbreite verringert sich die Höhe des Korrekturfaktors. Es ist davon auszugehen, dass der Bereich kleiner Spannungsschwingbreiten für die Praxis nicht relevant ist. Um jedoch den Bereich zunehmender Spannungsschwingbreiten sicher abdecken zu können, wird als Korrektur der Wert  $\lambda_{\text{Korrektur}} = 1,1$  vorgeschlagen.

Der Faktor  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  ist bei einer Nachweisführung zusätzlich zu den bisherigen  $\lambda$ -Faktoren zu berücksichtigen, wenn die Spannungsschwingbreiten des Verkehrs im Zustand I und II stattfinden (üblicherweise bei Spannbetonquerschnitten). Zu betonen ist jedoch, dass der Faktor  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  vernachlässigt werden kann, wenn die Spannungsschwingbreiten des Verkehrs fast ausschließlich im Zustand II stattfinden (üblicherweise bei reinen Stahlbetonquerschnitten).

Zusammenfassend zeigen die erzielten Ergebnisse einen klaren Einfluss der relativen Lage der Grundbeanspruchung in Bezug zum Knick der M- $\sigma$ -Beziehung. Diese relative Lage wird hier durch die Spannungsschwingbreite infolge des ELM 3 ausgedrückt. Festzuhalten ist jedoch, dass der Einfluss variierender Steifigkeiten im Zustand I und II (z.B. infolge unterschiedlicher Auslastungsgrade) nicht explizit untersucht wurde.

Anstelle einer Korrektur über einen  $\lambda$ -Faktor wurden im Vorfeld auch Untersuchungen durchgeführt, die eine Korrektur durch Erhöhung der Achslasten des ELM 3 vorsehen (analog zu [Dani94]). Dabei wurden die bisherigen Erhöhungsfaktoren des ELM 3 von 1,4 bzw. 1,75 schrittweise auf 3,0 angehoben und die Auswirkung auf Unterschiede zwischen der vereinfachten und detaillierten Methode untersucht. Im Ergebnis konnte damit lediglich im Bereich hoher Grundbeanspruchung eine Verbesserung erreicht werden. Im hier maßgebenden Bereich niedriger Grundbeanspruchung war keine Änderung feststellbar. Eine Anhebung des Erhöhungsfaktors über den Wert 3,0 hinaus wurde nicht weiterverfolgt, da damit eine Bemessung bei hoher Grundbeanspruchung zunehmend unwirtschaftlich wird. Darüber hinaus würden damit die Achslasten des ELM 3 unsinnige Werte annehmen. Im weiteren Vorgehen werden daher die bisherigen Erhöhungsfaktoren von 1,4 bzw. 1,75 nicht verändert.

## 7 Bewertung und Modifizierung des ELM 3

Ziel des folgenden Kapitels ist zunächst eine Bewertung der Zukunftsfähigkeit des aktuell normativ geregelten Nachweises schädigungsäquivalenter Spannungsschwingbreiten auf Grundlage des ELM 3 inklusive  $\lambda$ -Faktoren, nach [DIN EN 1991-2] und [DIN EN 1992-2] in Verbindung mit [DIN EN 1991-2/NA] und [DIN EN 1992-2/NA]. Dazu erfolgt eine Gegenüberstellung von Ergebnissen aus Verkehrssimulationen und der Berechnung nach Eurocode. Anschließend wird ein Vorschlag zur Modifizierung der  $\lambda$ -Faktoren ausgearbeitet, um deren Zukunftsfähigkeit zu gewährleisten.

### 7.1 Grundlagen der Bewertung

Analog zum vorherigen Kapitel dienen als Grundlage wieder die Beispielbrücken 1 bis 4. Die Auswertung der Simulationen wird jedoch ausschließlich mit der detaillierten Methode durchgeführt (d.h. M- $\sigma$ -Beziehung und Wöhlerlinie nichtlinear, vgl. Abschnitt 6.1.1 bzw. Abbildung 6.1). Als Beschreibung des aktuellen und zukünftigen Verkehrs werden die im Kapitel 4 vorgestellten Grund- und Prognose-Szenarien herangezogen. Die Prognose-Szenarien werden dabei als Erweiterung des Grund szenarios "Langstreckenverkehr 1" betrachtet.

Den Verkehrssimulationen liegen weiterhin folgende Parameter zugrunde:

- Keine Staus ( $p_{\text{Stau}}=0$ ,  $p_{\text{fließ}}=1$ )
- Keine explizite Berücksichtigung von LKW-Kolonnen des aktuellen Verkehrs
- Kein Schwingbeiwert im fließenden Verkehr ( $\varphi=1,0$ )
- Simulationsdauer: 1 Jahr, Umrechnung auf 100 Jahre
- Einspuriger Verkehr

Als Referenz dienen Berechnungen auf Grundlage des aktuellen ELM 3 inklusive der  $\lambda$ -Faktoren nach [DIN EN 1992-2/NA:2013-04]. Diese werden ausgewertet in den Kategorien:

- "große Entfernung"  
mit  $N_{\text{obs}} = 2 \cdot 10^6$  (DTSV = 8000)
- "mittlere Entfernung"  
mit  $N_{\text{obs}} = 0,5 \cdot 10^6$  (DTSV = 2000)
- "Lokalverkehr"  
mit  $N_{\text{obs}} = 0,125 \cdot 10^6$  (DTSV = 500)

Sowohl in den Simulationsergebnissen als auch in den Rechnungen nach EC wird jeweils ein Beiwert für den Einfluss der Fahrbahnoberflächenrauigkeit von  $\varphi_{\text{rat}} = 1,2$  eingerechnet. Da die Simulationen

keine dynamische Interaktion zwischen Fahrzeug und Tragwerk berücksichtigen, werden die Ergebnisse damit auf ein einheitliches Niveau gebracht (vgl. [MeDa94]).

Die Grundbeanspruchung wird jeweils analog zum Nachweis nach EC angesetzt (d.h. bei  $0,6 \cdot \Delta T$ , vgl. [DIN EN 1992-2/NA]).

### 7.2 Ergebnisse der Bewertung

Die Ergebnisse werden im Folgenden anhand der Spannungspunkte Stützbereich UK  $\sigma_s$  und Stützbereich OK  $\sigma_p$  der Beispielbrücken 1 und 2 diskutiert. Weitere Ergebnisse lassen sich Anhang F entnehmen.

Hinsichtlich der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite sind, analog zum vorherigen Kapitel, nur relativ moderate Unterschiede feststellbar (vgl. Abbildung 7.1 bis Abbildung 7.4, links). Für eine geeignete Einschätzung der jeweiligen Schädigung und der Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien erfolgt eine Umrechnung in eine Schädigungssumme D (vgl. Abbildung 7.1 bis Abbildung 7.4, rechts), mit:

$$D = \left( \frac{\Delta \sigma_{s, \text{equ}}}{\Delta \sigma_{Rsk}} \right)^m$$

Es zeigt sich, dass die Berechnungen des Ermüdungsschadens anhand des ELM 3 und dessen  $\lambda$ -Faktoren in vielen Fällen bereits durch die Grund szenarien überschritten werden, die aus WiM-Daten abgeleitet wurden und den aktuellen Verkehr widerspiegeln. Die Ergebnisse der Prognose-Szenarien liegen dementsprechend noch weiter oberhalb.

Die Zunahme des Ermüdungsschadens von Grund szenario "Langstreckenverkehr 1" zum Prognose-Szenario A (Erhöhung des DTSV) entspricht teilweise direkt dem Vergleich der DTSV-Werte. Stärkere Zunahmen liegen darin begründet, dass sich mit der Schwerverkehrsstärke auch die Fahrzeugabstände ändern. Erwartungsgemäß verursacht das Prognose-Szenario B (Erhöhung des zul. GG) einen gravierenden Anstieg der Schädigungssumme. Ein ähnlich starker Anstieg wird durch das Prognose-Szenario C (Erhöhung des Anteils des gen.pfl. SV) hervorgerufen. Prognose-Szenario D (Platooning) stellt an den hier untersuchten Beispielbrücken das günstigste Zukunftsszenario dar.

Insgesamt ist festzustellen, dass die hier betrachteten Beispielbrücken an den untersuchten Spannungspunkten bezüglich der Prognose-Szenarien keine nennenswerte Ermüdungsgefahr zeigen, d.h.  $D \ll 1$ . Die Bemessung der Beispielbrücken erfolgte für übliche Auslastungsgrade auf Grundlage der

aktuell gültigen Eurocodes, darunter [DIN EN 1991-2] und [DIN EN 1992-2] in Verbindung mit [DIN EN 1991-2/NA] und [DIN EN 1992-2/NA]. Es wird jedoch betont, dass Auswirkungen aus variierenden

Auslastungsgraden hier nicht explizit untersucht werden.

**Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)**

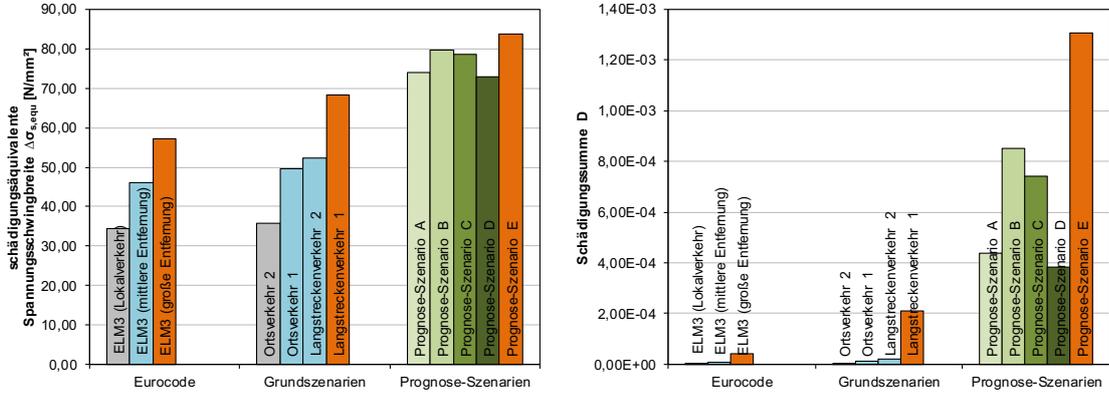


Abbildung 7.1: Vergleich der Ergebnisse nach [DIN EN 1992-2/NA] und Simulation - Stützbereich UK σ<sub>s</sub> (Δσ<sub>Rsk</sub> = 175 N/mm²)

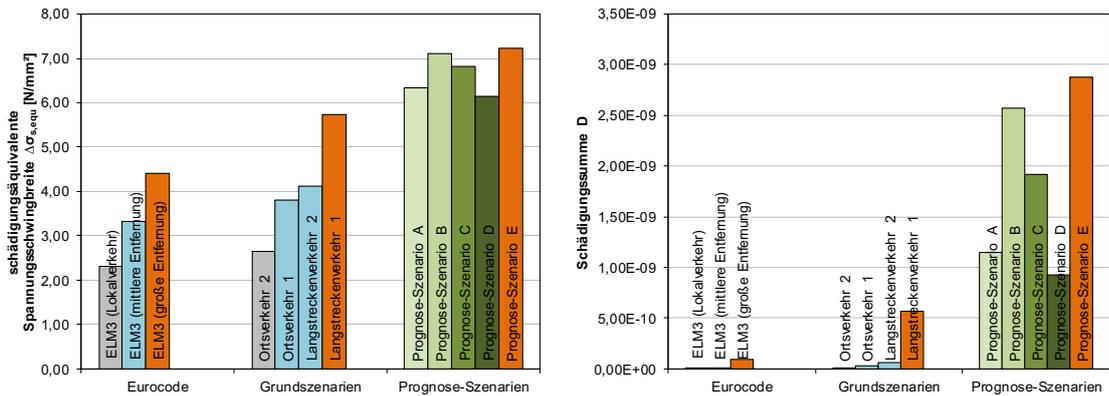


Abbildung 7.2: Vergleich der Ergebnisse nach [DIN EN 1992-2/NA] und Simulation - Stützbereich OK σ<sub>p</sub> (Δσ<sub>Rsk</sub> = 120 N/mm²)

**Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)**

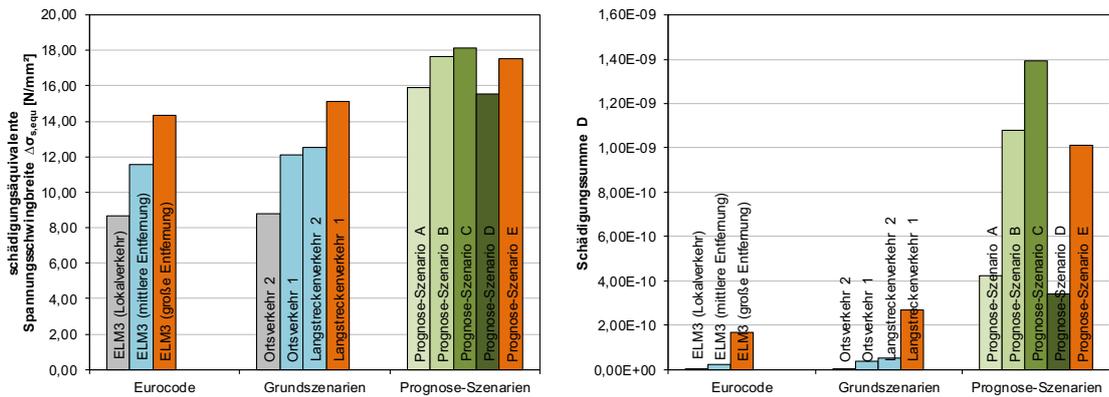


Abbildung 7.3: Vergleich der Ergebnisse nach [DIN EN 1992-2/NA] und Simulation - Stützbereich UK σ<sub>s</sub> (Δσ<sub>Rsk</sub> = 175 N/mm²)

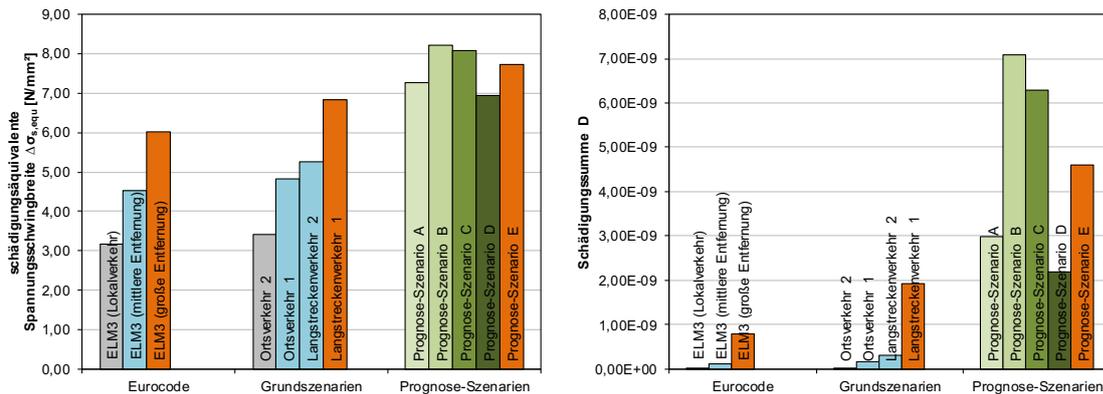


Abbildung 7.4: Vergleich der Ergebnisse nach [DIN EN 1992-2/NA] und Simulation - Stützbereich OK ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ )

### 7.3 Bestimmung zukunftsfähiger $\lambda$ -Faktoren zur Bemessung

Um die Zukunftsfähigkeit einer Bemessung auf Grundlage des ELM 3 inklusive  $\lambda$ -Faktoren gewährleisten zu können, wird im Folgenden ein Vorschlag zur Modifizierung der aktuellen  $\lambda$ -Faktoren nach [DIN EN 1992-2/NA] erarbeitet.

Als Grundlage der systematischen Ableitung von  $\lambda$ -Faktoren dient das Prognose-Szenario E (als Erweiterung des Grundszenarios "Langstreckenverkehr 1") sowie die vereinfachten Tragsysteme aus Abschnitt 3.1. Die Auswertung der Simulationen wird dementsprechend mit der vereinfachten Methode durchgeführt, d.h. die M- $\sigma$ -Beziehung und Wöhlerlinie werden linearisiert (vgl. Abschnitt 6.1.2). Weiterhin liegen den Verkehrssimulationen folgende Parameter zugrunde:

- DTSV = 8.000 ( $N_{obs} = 2,0 \text{ Mio. LKW je Jahr}$ )
- Keine Staus ( $p_{Stau}=0$ ,  $p_{fließ}=1$ )
- Keine explizite Berücksichtigung von LKW-Kolonnen des aktuellen Verkehrs
- Kein Schwingbeiwert im fließenden Verkehr ( $\varphi=1,0$ )
- Simulationsdauer: 1 Jahr, Umrechnung auf 100 Jahre
- Einspuriger Verkehr

Zur Beurteilung der Ergebnisse werden zusätzlich  $\lambda$ -Faktoren für ein Szenario des aktuellen Verkehrs ermittelt. Der dabei zugrundeliegende Verkehr entspricht dem Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“.

Die Ergebnisse für den Beiwert  $\lambda_{s,1}$  (Einfluss von Stützweite und System) aus dem Prognose-Szenario E werden in Tabelle 7.1 der bisherigen normativen Regelung gegenübergestellt. Der dargestellte Vorschlag enthält bereits (wo erforderlich) die Korrektur  $\lambda_{Korrektur} = 1,1$  für nichtlineare M- $\sigma$ -Beziehungen (d.h. für Spannbetonquerschnitte, vgl. Abschnitt 6.4). Ergänzend lassen sich Anhang G die zugehörigen Einzelergebnisse der Simulationen

entnehmen. Als Referenz werden in Tabelle 7.2 die Beiwerte  $\lambda_{s,1}$  aus dem Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“ dargestellt. Bemerkenswert ist, dass diese der bisherigen normativen Regelung relativ ähnlich sehen, trotz des Einflusses durch  $\lambda_{Korrektur}$  und unterschiedlicher Verkehrsparameter im Vergleich zu [Dani94] (vor allem bezüglich der mittleren Gesamtgewichte im damaligen Auxerre-Verkehr und dem Ansatz des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs mit Dauergenehmigung). Weiterhin werden in Tabelle 7.3 und Tabelle 7.4 die Beiwerte  $\lambda_{s,1}$  ohne  $\lambda_{Korrektur}$  für näherungsweise lineare M- $\sigma$ -Beziehungen dargestellt (d.h. für Stahlbetonquerschnitte bzw. bei Situationen, in denen die Spannungsschwingbreiten des Verkehrs fast ausschließlich im Zustand II stattfinden, vgl. Abschnitt 6.4).

Für den Beiwert  $\lambda_{s,2}$  (Einfluss von Verkehrsaufkommen und Verkehrsart) wird eine Erhöhung des Verkehrsaufkommens durch den Wert  $N_{obs} = 3,0 \text{ Mio. LKW je Jahr}$  vorgeschlagen. Entsprechend den Annahmen für Prognose-Szenario E ist dies gleichzusetzen mit einem durchschnittlichen täglichen Schwerverkehr von DTSV = 12.000. Der vorgeschlagene Wert bezieht sich auf den typischen Verkehr auf stark befahrenen Straßen (Verkehrsart "große Entfernung" mit  $\bar{Q} = 1,0$ ). Eine Anpassung für unterschiedliche Verkehrsarten, darunter auch durch den Parameter  $\bar{Q}$ , wurde hier nicht untersucht. Anzumerken ist, dass für den aktuellen Verkehr, abgebildet durch das Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“, ein Wert von  $N_{obs} = 2,5 \text{ Mio. LKW je Jahr}$  anzusetzen wäre (DTSV = 10.000).

$$\lambda_{s,2} = \bar{Q} \cdot \sqrt[k_2]{\frac{N_{obs}}{2,0}}$$

Beim Beiwert  $\lambda_{s,3}$  (Einfluss der Nutzungsdauer) ist keine Anpassung erforderlich.

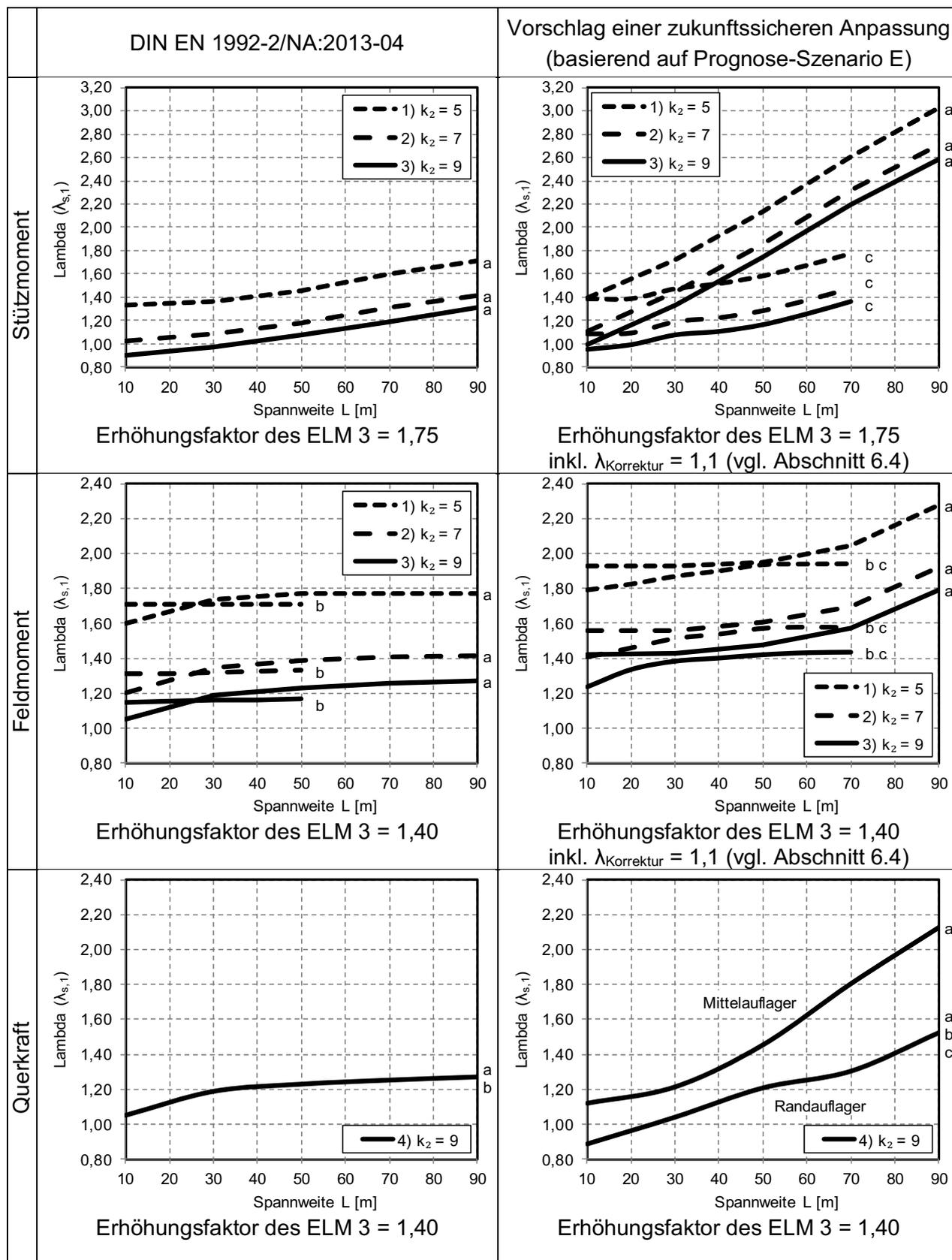
$$\lambda_{s,3} = \sqrt[k_2]{\frac{N_{years}}{100}}$$

Analog dazu wird auch für den Beiwert  $\lambda_{S,4}$  (Einfluss weiterer Fahrstreifen) empfohlen, die aktuelle vereinfachte normative Regelung beizubehalten. Je zusätzlichem Fahrstreifen sind dabei 10% von  $N_{obs}$  anzusetzen. Stichpunktartige Simulationen mit mehrspurigem Verkehr und einer Aufteilung von  $N_{obs}$  auf mehrere Fahrstreifen haben hier eine gute Übereinstimmung gezeigt. Die Zunahme der Schädigung durch Überholverkehr mit zusätzlichen hohen Spannungsschwingbreiten durch nebeneinander fahrende LKW konnte also mit der vereinfachten Regelung näherungsweise gut abgebildet werden.

$$\lambda_{S,4} = \sqrt[k_2]{\frac{\sum N_{obs,i}}{N_{obs,1}}}$$

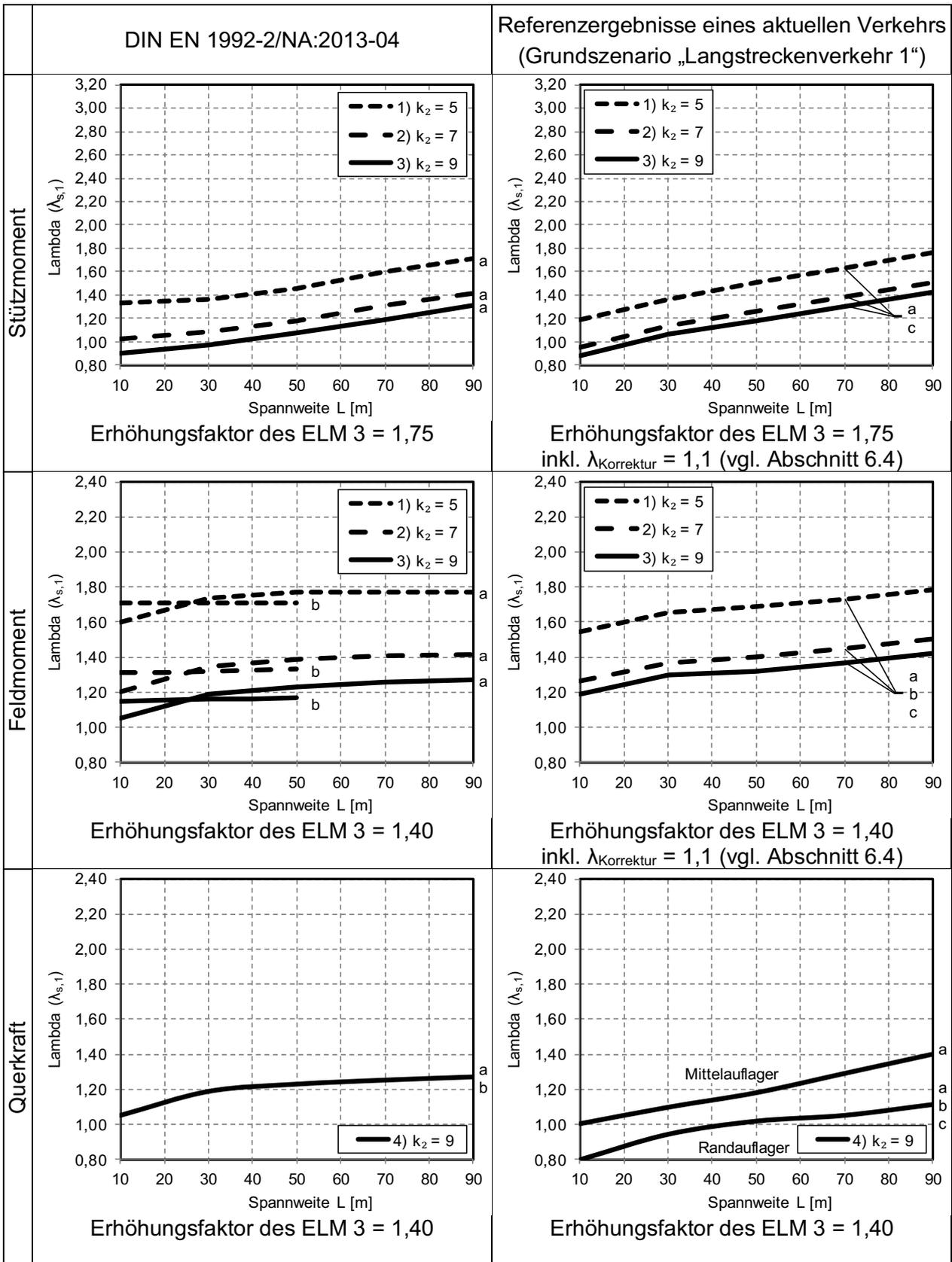
Der Beiwert  $\varphi_{fat}$  (Einfluss der Fahrbahnoberflächenrauigkeit) wurde in [MeDa94] für Massivbrücken kalibriert. Durch eine Zunahme des Verkehrsaufkommens ist nicht davon auszugehen, dass sich dadurch eine Änderung beim Einfluss der Fahrbahnoberflächenrauigkeit ergibt. Es wird daher vorgeschlagen, die bisherige normative Regelung von  $\varphi_{fat} = 1,2$  für Oberflächen mit geringer Rauigkeit bzw. für eine gute Instandhaltung der Fahrbahn beizubehalten.

Im Ergebnis liegen damit zukunftssichere  $\lambda$ -Faktoren für eine Bemessung auf Grundlage des ELM 3 vor, die strukturell der bisherigen normativen Regelung folgen.



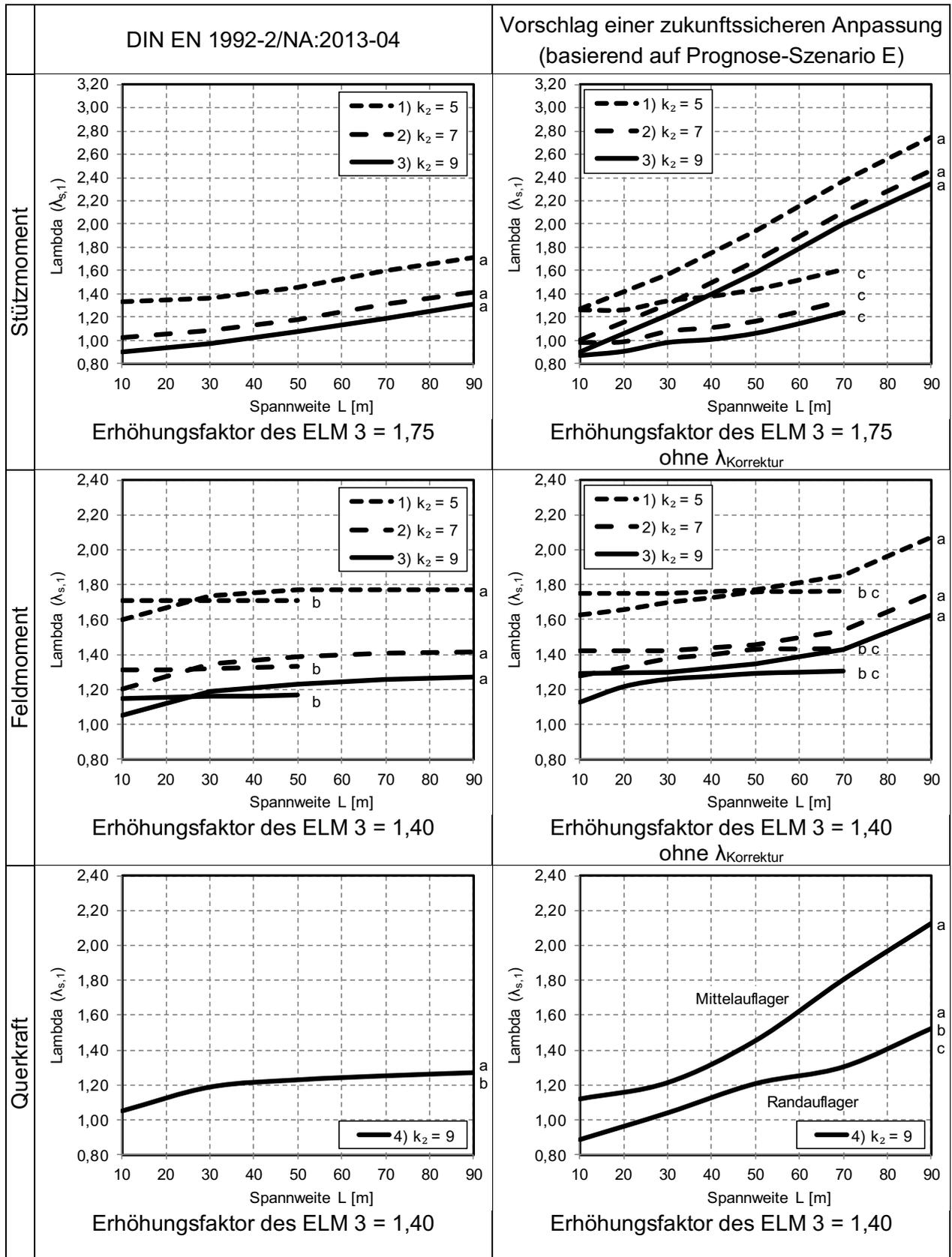
**Legende:** a Durchlaufträger b Einfeldträger c Rahmen

Tabelle 7.1: Beiwert  $\lambda_{s,1}$  für den Einfluss von Spannweite und System inkl.  $\lambda_{\text{Korrektur}}$ , sofern die Spannungsschwingspiele sowohl im Zustand I als auch Zustand II stattfinden (Vorschlag basierend auf Prognose-Szenario E)



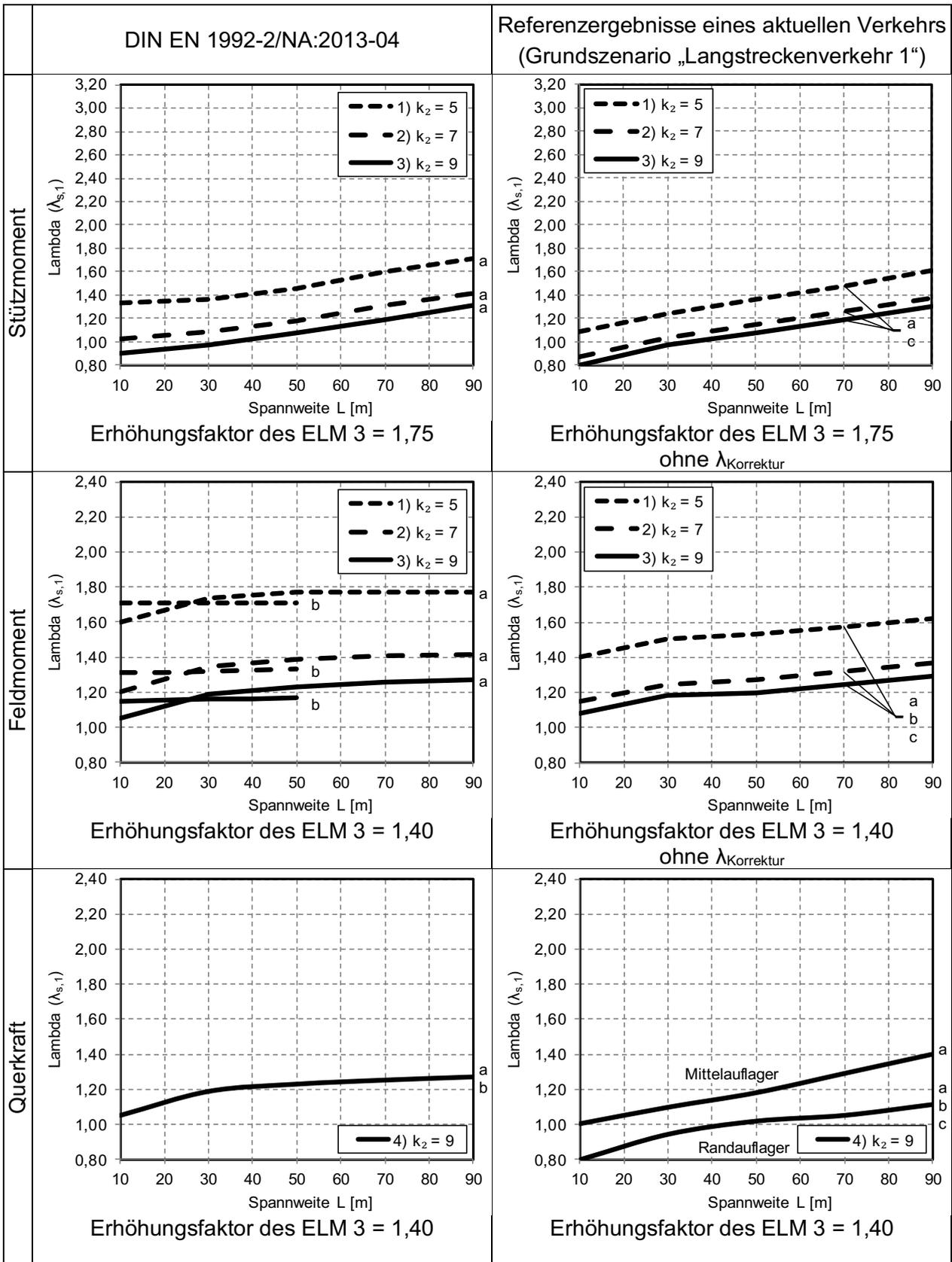
**Legende:** a Durchlaufträger    b Einfeldträger    c Rahmen

Tabelle 7.2: Beiwert  $\lambda_{s,1}$  für den Einfluss von Spannweite und System inkl.  $\lambda_{\text{Korrektur}}$ , sofern die Spannungsschwingspiele sowohl im Zustand I als auch Zustand II stattfinden (Referenzergebnisse basierend auf Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“)



**Legende:** a Durchlaufträger    b Einfeldträger    c Rahmen

Tabelle 7.3: Beiwert  $\lambda_{s,1}$  für den Einfluss von Spannweite und System ohne  $\lambda_{\text{Korrektur}}$ , sofern die Spannungsschwingspiele fast ausschließlich im Zustand II stattfinden (Vorschlag basierend auf Prognose-Szenario E)



**Legende:** a Durchlaufträger b Einfeldträger c Rahmen

Tabelle 7.4: Beiwert  $\lambda_{s,1}$  für den Einfluss von Spannweite und System ohne  $\lambda_{\text{Korrektur}}$ , sofern die Spannungsschwingspiele fast ausschließlich im Zustand II stattfinden (Referenzergebnisse basierend auf Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“)

## 8 Zusammenfassung

Der vorliegende Forschungsbericht behandelt die Zukunftssicherheit des aktuell normativ geregelten Nachweises schädigungsäquivalenter Spannungsschwingbreiten basierend auf dem Ermüdungslastmodell ELM 3 inkl.  $\lambda$ -Faktoren nach [DIN EN 1991-2] und [DIN EN 1992-2] in Verbindung mit [DIN EN 1991-2/NA] und [DIN EN 1992-2/NA].

Dazu werden Verkehrslastsimulationen an sowohl idealisierten als auch realistischen Beispielbrücken durchgeführt. Bei Ersteren liegt der Fokus auf einer systematischen Untersuchung an einem weiten Spektrum möglicher Brückensysteme. Bei Letzteren steht die wirklichkeitsnahe Erfassung der nicht-linearen  $M$ - $\sigma$ -Beziehung im Vordergrund. Weiterhin werden unterschiedliche Verkehrsszenarien untersucht, darunter Grundszenarien des aktuellen Verkehrs sowie Prognose-Szenarien eines möglichen zukünftigen Verkehrs.

Im Ergebnis wird aufgrund von Defiziten der aktuellen normativen Regelung, sowohl hinsichtlich der Grund- als auch Prognose-Szenarien, ein Vorschlag für eine zukunftssichere Anpassung der  $\lambda$ -Faktoren ausgearbeitet. Diesbezüglich wird auch ein Defizit der bisherigen Methode zur Ermittlung der  $\lambda$ -Faktoren identifiziert, das durch die Linearisierung der  $M$ - $\sigma$ -Beziehung hervorgerufen wird. Um dies zu kompensieren, wird der Korrekturfaktor  $\lambda_{\text{Kor}}$  eingeführt.

Die Größenordnung des Korrekturfaktors wird hier anhand der Beispielbrücken B1 bis B4 ermittelt. Eine weitergehende Untersuchung an Brücken unterschiedlicher Auslastungsgrade könnte eine Möglichkeit zur weiteren Eingrenzung dieses Faktors bieten.

Das dem Vorschlag einer zukunftssicheren Anpassung zugrundeliegende Prognose-Szenario ist aus heutiger Sicht wohlgeerntet eher als konservativ einzustufen und stellt weiterhin nur eine von vielen Möglichkeiten dar, da die zukünftige Entwicklung des Verkehrs nur bedingt realistisch abbildbar ist. Angesichts dieser Vielzahl an Möglichkeiten und der langen Nutzungsdauer von Brückenbauwerken garantiert jedoch der Ansatz etwas konservativer Verkehrsszenarien langfristig die Wirtschaftlichkeit der Brückeninfrastruktur. Es ist festzuhalten, dass die Realität wahrscheinlich zwischen den Ergebnissen der Prognose-Szenarien und des aktuellen Verkehrs liegen wird. Eine weiterführende Verfeinerung der zugrundeliegenden Prognose-Szenarien birgt durchaus noch Potenziale, die Einschätzung der zukünftigen Ermüdungsbeanspruchung zutreffender zu gestalten.

Unbeantwortet bleibt in der vorliegenden Arbeit die differenzierte Betrachtung unterschiedlicher Verkehrs- bzw. Streckenarten. Für die Zukunft bietet sich dazu vor allem an, die Form des Beanspruchungskollektivs im Nachweiskonzept zu berücksichtigen.

## 9 Literatur

- [DIN EN 1991-2] *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.* Beuth Verlag. 2010.
- [DIN EN 1991-2/NA] *Nationaler Anhang zu Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken.* Beuth Verlag. 2012.
- [DIN EN 1992-2] *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken.* Beuth Verlag. 2010.
- [DIN EN 1992-2/NA] *Nationaler Anhang zu Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken.* Beuth Verlag. 2013.
- [DIN EN 1993-2] *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 2: Stahlbrücken.* Beuth Verlag. 2010.
- [DIN V ENV 1991-3] *Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragbauwerke – Teil 3: Verkehrslasten auf Brücken.* Beuth Verlag. 1996.
- [NaRiLi11] *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie).* Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2011.
- [TLS 2012] *Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen (Ausgabe 2012).* Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. 2012.
- [BGMM12] Benning, H.; Goj, K.; Marzahn, G.; Mertzsch, O.: *Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand – Veranlassung und Grundsätze.* Bauingenieur. Springer-VDI-Verlag. Düsseldorf. 2012.
- [Böni06] Böning, S.: *Auswertung von Achslastdaten.* Abschlussbericht. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. 2006.
- [ClSe86] Clormann, U. H.; Seeger, T.: *Rainflow - HCM: Ein Zählverfahren für Betriebsfestigkeitsnachweise auf werkstoffmechanischer Grundlage.* Stahlbau. Band Heft 3. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 1986.
- [Dani94] Danielewicz, I.: *Zur Ermüdungsbemessung von Beton-Straßenbrücken.* Dissertation. Technische Hochschule Darmstadt. Darmstadt. 1994.
- [FBHS16] Freundt, U.; Böning, S.; Hölzer, D.; Stade, I.: *Bestimmung von Verkehrslastmodellen für statische Tragfähigkeit und Ermüdung an der Lingener Damm Brücke über den DEK.* unveröffentlichter Forschungsbericht. Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe. 2016.
- [FiNo14] Fitschen, A.; Nordmann, H.: *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2012.* Schlussbericht F1100.6290000. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft V236. Fachverlag NW. Bergisch Gladbach. 2014.
- [FrBH15] Freundt, U.; Böning, S.; Hölzer, D.: *Bestimmung von Verkehrslastmodellen für statische Tragfähigkeit und Ermüdung an der Dreierwalder Brücke.* unveröffentlichter Forschungsbericht. Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe. 2015.
- [FrBH16] Freundt, U.; Böning, S.; Hölzer, D.: *Bestimmung von Verkehrslastmodellen für statische Tragfähigkeit und Ermüdung an der Brücke im Zuge der Göxer Landstraße in Hannover Seelze.* unveröffentlichter Forschungsbericht. Bundesanstalt für Wasserbau. Karlsruhe. 2016.
- [FrBö10] Freundt, U.; Böning, S.: *Anpassung des DIN-Fachberichtes 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnung - Nachtrag.*

- [FrBö11a] Nachtrag FE 15.451/2007/ERB. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach. 2010. Freundt, U.; Böning, S.: *Anpassung des DIN-Fachberichts 101 „Einwirkungen auf Brücken“ an Eurocodes - Zukunftsfähiges Lastmodell für Straßenverkehrslasten.* Schlussbericht FE 15.451/2007/ERB. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B77. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2011. [Geiß95]
- [FrBö11b] Freundt, U.; Böning, S.: *Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand.* Schlussbericht FE 84.107/2009. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B82. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2011. [InBv07]
- [FrBö13] Freundt, U.; Böning, S.: *Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchung.* Schlussbericht FE 89.0267/2011. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B97. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2013. [InBv14]
- [FVBP14] Freundt, U. et al.: *Roadtraffic Management System (RTMS).* Schlussbericht FE 88.0106/2010. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B100. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2014. [Kasc09]
- [Geiß09] Geißler, K.: *Auswirkung der Zulassung von 60t-Lkw auf Brückenbauwerke im Zuge der Bundesfernstraßen.* Schlussbericht FE 15.409/2004/SRB. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B68. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2009. [KJPZ12]
- [Geiß14] Geißler, K.: *Handbuch Brückenbau: Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung.* Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2014. [Kroh14]
- Geißler, K.: *Beitrag zur probabilistischen Berechnung der Restnutzungsdauer stählerner Brücken.* Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Tragwerke und Baustoffe, Heft 2. Technische Universität Dresden. Dresden. 1995. Intraplan Consult GmbH; BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH: *Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025.* Schlussbericht FE 96.0857/2005. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. München, Freiburg. 2007. Intraplan Consult GmbH; BVU Beratergruppe Verkehr + Umwelt GmbH: *Verkehrsverflechtungsprognose 2030.* Schlussbericht FE 96.0981/2011. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. München, Freiburg. 2014. Kaschner, R.: *Auswirkungen des zunehmenden Schwerverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen.* Schlussbericht FE 04243 des Arbeitsprogrammes der BAST. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B68. Wirtschaftsverlag NW. Bergisch Gladbach. 2009. Köhler, M.; Jenne, S.; Pötter, K.; Zenner, H., Hrsg.: *Zählverfahren und Lastannahme in der Betriebsfestigkeit.* Springer-Verlag. Berlin. 2012. Krohn, S.: *Messwertgestützte Ermüdungsnachweise an bestehenden Straßenbrücken.* Dissertation. Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Berlin, Band 16. Technische Universität Berlin. Shaker Verlag. Aachen. 2014.

- [Kühn04] Kühne, R.: *FGSV Merkblatt (Entwurf): Das Fundamental-diagramm - Grundlagen und Anwendungen*. Berlin. 2004.
- [MDMH10] Maurer, R.; Dreier, F.; Machoczek, D.; Heeke, G.: *Bestimmung der Ermüdungsfestigkeit von einbetoniertem Betonstahl mit dem Interaktiven Verfahren*. Bauforschung T 3227. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart. 2010.
- [MeDa94] Merzenich, G.; Danielewicz, I.: *Dynamische Simulation des Auxerre-Verkehrs für Stahlbetonbrücken zur Bestimmung des schädigungs-äquivalenten Schwingbeiwertes*. RWTH Aachen, TH Darmstadt. unveröffentlicht. 1994.
- [MeSe95] Merzenich, G.; Sedlacek, G.: *Hintergrundbericht zum Eurocode 1 - Teil 3.2: „Verkehrslasten auf Straßenbrücken“*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 711. BMV. Bonn. 1995.
- [NuGü06] Nussbaumer, A.; Günther, H.-P.: *Grundlagen und Erläuterung der neuen Ermüdungsnachweise nach Eurocode 3*. Stahlbau-Kalender 2006. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2006.
- [Pfei11] Pfeiffer, U.: *INCA2 - Programm zur interaktiven Berechnung von Massivbau-Querschnitten*. Technische Universität Hamburg-Harburg. 2011.
- [Prog07] ProgTrans AG: *Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050*. Schlussbericht FE 26.0185/2006. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Basel. 2007.
- [RZM82] *Subroutine RZM*. Fachbereich Maschinenbau THD. Fachgebiet Fördertechnik. unveröffentlicht. 1982.
- [ZiHB01] Zilch, K.; Hennecke, M.; Buba, R.: *Kombinationsregeln für Ermüdung - Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise bei Spannbetonbrücken*. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Heft 824. BMV. Bonn. 2001.
- [ZiZG06] Zilch, K.; Zehetmaier, G.; Gläser, C.: *Ermüdungsnachweis bei Massivbrücken*. Beton-Kalender 2004. Ernst & Sohn Verlag. Berlin. 2006.

## Anhang

## Anhang A: Verkehrsdaten (WiM- und BWiM-Daten)

Parameter Achsabstand								
Fahrzeugtyp	A 1-2	A 2-3	A 3-4	A 4-5	A 5-6	A 6-7	A 7-8	Summe
PKW	2,50							2,50
8	4,50							4,50
9	4,40	1,30						5,70
32	3,80	5,30						9,10
33	4,90	6,50	5,00					16,40
34	4,90	7,40	1,30					13,60
35	4,60	4,70	4,50	1,30				15,10
41	4,60	1,30	5,20	4,60				15,70
42	4,80	1,30	6,60	1,40				14,10
96	3,70	6,60						10,30
97	3,70	6,60	1,30					11,60
98	3,70	5,60	1,30	1,30				11,90
99	3,80	5,80	1,80					11,40
100								
GL								
Bus	7,00							7,00
Kran A	1,90	2,90	1,70	2,60	1,70			10,80
Kran B								
Kran C								
genSV EFZ 1	3,00	4,00						7,00
genSV EFZ 2	1,50	4,00	1,50					7,00
genSV EFZ 3	2,60	1,60	2,00	1,60				7,80
SFZ 1								
SFZ 2	2,50	1,30	5,00	1,30	1,30	1,30	1,30	14,00

Tabelle A.1: Mittlere Achsabstände der Fahrzeugtypen

Parameter Achslastverteilung									
Fahrzeugtyp	A 1	A 2	A 3	A 4	A 5	A 6	A 7	A 8	Summe
PKW	50,00%	50,00%							100,00%
8	44,90%	55,10%							100,00%
9	34,00%	38,50%	27,50%						100,00%
32	30,30%	31,00%	38,70%						100,00%
33	25,80%	37,20%	18,90%	18,10%					100,00%
34	25,00%	34,20%	20,20%	20,60%					100,00%
35	21,20%	29,00%	19,10%	15,30%	15,40%				100,00%
41	20,90%	25,80%	16,10%	19,50%	17,70%				100,00%
42	20,20%	26,90%	16,60%	18,10%	18,20%				100,00%
96	31,80%	33,90%	34,30%						100,00%
97	30,60%	30,90%	19,10%	19,40%					100,00%
98	20,80%	28,10%	17,00%	17,00%	17,10%				100,00%
99	27,60%	33,00%	19,80%	19,60%					100,00%
100									
GL									
Bus	28,30%	71,70%							100,00%
Kran A	16,60%	16,60%	16,60%	16,60%	16,80%	16,80%			100,00%
Kran B									
Kran C									
genSV EFZ 1	30,00%	40,00%	30,00%						100,00%
genSV EFZ 2	25,00%	25,00%	25,00%	25,00%					100,00%
genSV EFZ 3	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%	20,00%				100,00%
SFZ 1									
SFZ 2	12,50%	12,50%	12,50%	12,50%	12,50%	12,50%	12,50%	12,50%	100,00%

Tabelle A.2: Mittlere Achslastverteilungen der Fahrzeugtypen

## WIMDaten\_A2\_BrandenB\_2005 (VC\_429)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	69,41	15,12	0,58	105,84	33,93	0,42						84,71	8	9,16%
9	42,01	8,69	0,066	157,58	23,27	0,343	212,96	40,51	0,591			182,68	9	0,83%
32													32	
33	132,09	22,34	0,087	214,8	35,04	0,459	245,49	52,92	0,454			221,54	33	2,74%
34	106,94	36,77	0,122	218,54	55,03	0,483	301,5	24,13	0,395			237,69	34	5,42%
35	85,38	20,96	0,089	278,74	100,72	0,73	418,23	27,33	0,181			286,78	35	1,01%
41	259,59	35,65	0,509	337,2	43,35	0,289	422,28	28,69	0,202			314,88	41	5,31%
42	258,19	43,39	0,332	318,76	56,65	0,388	396,31	36,58	0,28			320,36	42	4,60%
96	37,65	7,02	0,064	122,57	24,67	0,444	194,72	41,24	0,492			152,63	96	1,18%
97	62,55	18,53	0,153	179,7	56,49	0,691	270,25	49,06	0,156			175,90	97	8,90%
98	220,77	47,51	0,254	335,51	53,7	0,357	403,53	24,4	0,389			332,83	98	60,38%
99	70,67	41,02	0,197	200,86	47,22	0,65	316,18	65,2	0,153			192,86	99	0,47%
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.3: WIMDaten\_A2\_BrandenB\_2005, Richtung 1, DTSV=5877

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	58,96	20,68	0,791	108,25	24,4	0,209						69,26	8	11,98%
9	34,56	10,51	0,129	153,47	29,69	0,618	216,14	31,65	0,253			153,99	9	0,64%
32													32	
33	117,58	20,67	0,021	171,58	8,1	0,137	190,77	38,45	0,842			186,60	33	3,74%
34	109,83	17,86	0,171	179,17	25,22	0,523	254,81	35,48	0,306			190,46	34	7,00%
35	84,11	17,57	0,107	180,26	44,91	0,456	358,67	55,13	0,437			247,94	35	0,97%
41	227,07	40,74	0,548	310,58	47,66	0,221	395,39	27,7	0,231			284,41	41	4,73%
42	201,24	30,8	0,198	286,59	47,28	0,619	379,31	26,15	0,183			286,66	42	4,44%
96	31,07	6,26	0,071	131,76	36,72	0,601	148,42	47,87	0,328			130,08	96	1,16%
97	51,94	32,29	0,139	158,78	21,6	0,397	198,05	58,86	0,464			162,15	97	9,42%
98	178,34	36,93	0,272	297,46	62,98	0,398	379,1	23,68	0,33			292,00	98	55,52%
99	109,74	60,42	0,412	161,16	19,41	0,276	251,36	63,98	0,312			168,12	99	0,40%
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.4: WIMDaten\_A2\_BrandenB\_2005, Richtung 2, DTSV=6013

## WIMDaten\_A9\_Bayer\_FR\_Muenchen\_2005 (VC\_430)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	63,68	22,53	0,789	131,32	26,97	0,211						77,95	8	15,27%
9	167,69	31,05	0,692	245,94	24,68	0,308						191,79	9	2,44%
32													32	
33	63,07	38,91	0,137	211,77	59,78	0,785	318,6	13,03	0,078			199,73	33	5,72%
34	217,73	46,7	0,719	310,18	24,05	0,281						243,71	34	5,35%
35	206,88	41,44	0,26	321,53	61,59	0,44	416,69	21,36	0,3			320,27	35	1,46%
41	265,4	38,9	0,378	291,61	49,56	0,383	405,71	31,37	0,239			308,97	41	6,43%
42	296,82	69,17	0,848	397,98	25,34	0,152						312,20	42	3,02%
96	29,77	4,87	0,406	160,38	52,66	0,585	220,18	65,84	0,009			107,89	96	1,53%
97	157,43	19,28	0,201	203,78	38,8	0,51	272,33	45,27	0,289			214,27	97	4,28%
98	224,13	70,15	0,201	320,55	65,22	0,44	410,47	18,06	0,359			333,45	98	53,03%
99	36,96	13,01	0,302	119,35	99,41	0,698						94,47	99	1,47%
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.5: WIMDaten\_A9\_Bayer\_FR\_Muenchen\_2005, Richtung 1, DTSV=6461 (Hauptspur)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	33,31	3,9	0,671	59,31	24,59	0,329						41,86	8	34,73%
9	167,69	31,05	0,692	245,94	24,68	0,308						191,79	9	1,01%
32													32	
33	32,64	8,72	0,263	217,83	60,19	0,68	324,11	9,82	0,057			175,18	33	5,97%
34	220	46,11	0,727	317,16	23,58	0,273						246,52	34	5,48%
35	206,88	41,44	0,26	321,53	61,59	0,44	416,69	21,36	0,3			320,27	35	1,42%
41	265,4	38,9	0,378	291,61	49,56	0,383	405,71	31,37	0,239			308,97	41	5,96%
42	296,82	69,17	0,848	397,98	25,34	0,152						312,20	42	1,91%
96	29,77	4,87	0,406	160,38	52,66	0,585	220,18	65,84	0,009			107,89	96	1,07%
97	157,43	19,28	0,201	203,78	38,8	0,51	272,33	45,27	0,289			214,27	97	2,43%
98	233,68	62,08	0,415	366,5	40,2	0,281	409,93	16,14	0,304			324,58	98	38,71%
99	36,96	13,01	0,302	119,35	99,41	0,698						94,47	99	1,31%
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.6: WIMDaten\_A9\_Bayer\_FR\_Muenchen\_2005, Richtung 1, DTSV=905 (Nebenspur)

## WIMDaten\_A9\_SA\_FR\_Berlin\_2004 (VC\_431)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	62,46	21,06	0,63	109,62	31,72	0,37						79,91	8	14,50%
9	173,14	44,27	0,912	252,72	15,21	0,088						180,14	9	1,32%
32													32	
33	196,95	35,95	0,938	297,37	52,34	0,062						203,18	33	5,08%
34	197,51	56,91	0,703	287,38	23,76	0,297						224,20	34	5,80%
35	170,4	30,53	0,247	290,44	81,67	0,567	396,09	23	0,186			280,44	35	1,43%
41	239,11	38,21	0,458	305,8	50,53	0,352	396,61	25,19	0,19			292,51	41	8,42%
42	245,26	49,35	0,603	360,89	46,27	0,397						291,17	42	2,87%
96	35,76	8,09	0,129	130,12	33,13	0,71	230,7	26,82	0,161			134,14	96	1,14%
97	51,9	15,5	0,092	147,32	13,48	0,135	188,47	57,66	0,773			170,35	97	8,90%
98	196,92	51,87	0,316	325,31	53,97	0,361	391,01	19,88	0,323			305,96	98	49,88%
99	160,53	39,2	0,687	294,61	53,57	0,313						202,50	99	0,66%
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.7: WIMDaten\_A9\_SA\_FR\_Berlin\_2004, Richtung 1, DTSV=4675

## WIMDaten\_A24\_MV\_2004\_2005 (VC\_432)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	58,11	24,65	0,819	115,58	24,86	0,181						68,51	8	12,88%
9	38,2	8,73	0,147	171,91	52,27	0,853						152,25	9	1,03%
32													32	
33	29,06	8,17	0,042	181,56	10	0,149	194,99	43,77	0,809			186,02	33	5,60%
34	34,78	6,72	0,028	182,89	55,42	0,841	290,41	21,77	0,131			192,83	34	3,90%
35	162,08	12,24	0,097	222,52	76,11	0,499	396,46	43,94	0,404			286,93	35	1,50%
41	236,29	42,94	0,438	320,22	59,74	0,31	408,53	24,9	0,252			305,71	41	5,94%
42	202,71	46,83	0,224	306,22	59,29	0,66	398,04	28,27	0,116			293,68	42	2,20%
96	32,62	6,27	0,172	132,84	46,93	0,591	161,11	15,09	0,237			122,30	96	1,35%
97	79,52	64,68	0,19	168,85	17,12	0,41	203,91	55,67	0,4			165,90	97	14,70%
98	166,24	19,12	0,154	279,2	86,88	0,56	397,82	20,29	0,286			295,73	98	49,90%
99	158,91	50,07	0,5	176,31	44,07	0,294	290,57	90,13	0,206			191,15	99	1,00%
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.8: WIMDaten\_A24\_MV\_2004\_2005, Richtung 1, DTSV=2935

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	59,07	21,33	0,697	105,34	32,08	0,303						73,09	8	12,90%
9	39,75	6,67	0,121	183,54	45,54	0,879						166,14	9	1,13%
32													32	
33	26,29	11,75	0,036	186,47	55,74	0,412	214,79	36,38	0,552			196,34	33	4,00%
34	36,4	4,46	0,015	182,65	62,4	0,85	294,05	21,76	0,135			195,50	34	3,41%
35	198,28	32,84	0,29	295,06	83,14	0,445	409,9	23,46	0,265			297,43	35	1,38%
41	264,31	48,46	0,66	348,64	26,63	0,034	408,51	34,53	0,306			311,30	41	7,00%
42	167,28	27,27	0,062	284,67	58,69	0,744	398,84	32,44	0,194			299,54	42	2,38%
96	33,36	5,83	0,165	140,63	56,06	0,563	179,03	53,01	0,272			133,38	96	1,24%
97	47,56	14,83	0,067	163,25	18,2	0,294	199,3	71,37	0,639			178,53	97	12,57%
98	161,57	25,64	0,094	289,68	77,75	0,576	399,83	22,87	0,33			313,99	98	53,95%
99	119,78	77,71	0,247	170,43	26,89	0,429	293,08	80,99	0,324			197,66	99	0,85%
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.9: WIMDaten\_A24\_MV\_2004\_2005, Richtung 2, DTSV=2956

## WIMDaten\_A33\_NRW\_2004\_2005 (VC\_433)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	65,62	18,1	0,601	98,89	36,61	0,399						78,89	8	16,51%
9	41,11	7,38	0,081	181,46	50,43	0,919						170,09	9	1,68%
32													32	
33	44,64	33,18	0,039	204,29	47,39	0,942	294,53	32,29	0,019			199,78	33	6,88%
34	167,86	45,79	0,442	232,99	55,63	0,385	314,87	26,36	0,173			218,37	34	5,45%
35	146,41	13,44	0,186	221,75	71,55	0,526	410,57	42,89	0,288			262,12	35	2,40%
41	258,86	52,86	0,594	314,79	56,64	0,209	422,3	39,07	0,197			302,75	41	10,10%
42	214,99	55,97	0,181	282,29	48,28	0,648	416,12	32,59	0,171			292,99	42	3,00%
96	49,39	11,41	0,05	142,04	39,47	0,637	219,83	21,78	0,313			161,76	96	2,35%
97	53,37	17,78	0,03	138,74	24,4	0,398	200,22	66,79	0,572			171,35	97	11,90%
98	147,01	16,6	0,125	275,97	93,55	0,65	417,07	25,42	0,225			291,60	98	37,32%
99	35,39	9,95	0,238	172,17	68,59	0,627	320,34	57,26	0,135			159,62	99	2,41%
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.10: WIMDaten\_A33\_NRW\_2004\_2005, Richtung 1, DTSV=2974

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	64,08	13,42	0,462	91,13	40,53	0,538						78,63	8	15,20%
9	43,7	6,36	0,077	191,71	62,62	0,923						180,31	9	1,74%
32													32	
33	35,94	52,67	0,061	210,17	40,4	0,877	301,62	48,33	0,062			205,21	33	7,44%
34	152,59	48,6	0,302	214,47	35,58	0,447	312,94	33,46	0,251			220,50	34	4,53%
35	211,13	56,15	0,357	350,46	83,87	0,42	443,51	16,72	0,223			321,47	35	2,75%
41	264,27	47,44	0,493	328,98	50,14	0,274	437,05	35,89	0,233			322,26	41	8,98%
42	218,9	38,63	0,174	289,86	56,12	0,625	435,57	34,39	0,201			306,80	42	2,70%
96	56,71	31,97	0,133	139,8	8,08	0,237	142,81	38,47	0,63			130,65	96	2,52%
97	72,35	36,72	0,113	171,14	25,62	0,326	222,25	58,68	0,561			188,65	97	10,90%
98	231,32	71,92	0,507	409,11	40,13	0,322	445,73	11,63	0,171			325,23	98	40,70%
99	36,32	9,61	0,294	176,17	59,4	0,623	320,16	59,83	0,083			147,01	99	2,54%
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.11: WIMDaten\_A33\_NRW\_2004\_2005, Richtung 2, DTSV=3132

## WIMDaten\_A2\_Essehof\_2014 (VC\_448)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	29,8	6,1	0,4	83,8	35,2	0,6						62,20	8	15,10%
9													9	
32													32	
33	226,9	46,3	0,92	282,5	77,4	0,08						231,35	33	2,30%
34													34	
35													35	
41	279,4	51	0,72	396,4	51	0,28						312,16	41	5,30%
42													42	
96													96	
97	177,4	33,7	0,33	258,9	54,2	0,67						232,01	97	12,50%
98	274,1	69,6	0,5	408	40,7	0,5						341,05	98	64,00%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2	380	95	0,45	625	210	0,55						514,75	SFZ 2	0,30%

Tabelle A.12: WIMDaten\_A2\_Essehof\_2014, Richtung 1, DTSV= 9294

*Anmerkung:* Der Fahrzeugtyp "Kran A" wurde nicht direkt in den WiM-Daten identifiziert, sondern stellt ein Ersatzfahrzeug zur Abdeckung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs dar.

## WIMDaten\_ A3\_Aicha\_vorm\_Wald\_2014 (VC\_449)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	30,6	5,8	0,35	79,6	31,4	0,65						62,45	8	19,50%
9													9	
32													32	
33	199	39,3	1									199,00	33	2,80%
34													34	
35													35	
41	259,7	48	0,71	394,3	45,4	0,29						298,73	41	3,90%
42													42	
96													96	
97	186	36,5	0,49	247,4	47,8	0,51						217,31	97	13,70%
98	274,1	59,6	0,53	389,6	30,8	0,47						328,39	98	59,30%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2	570	215	1									570,00	SFZ 2	0,30%

Tabelle A.13: WIMDaten\_ A3\_Aicha\_vorm\_Wald\_2014, Richtung 1, DTSV=4639

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	30,9	5,3	0,26	74,9	34,6	0,74						63,46	8	17,60%
9													9	
32													32	
33	215,7	43,8	1									215,70	33	2,20%
34													34	
35													35	
41	264	44,9	0,72	390	44,9	0,28						299,28	41	4,80%
42													42	
96													96	
97	180,7	33,4	0,44	246,1	47,4	0,56						217,32	97	12,50%
98	242,3	55,5	0,5	378,9	37,1	0,5						310,60	98	62,20%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2	545	190	1									545,00	SFZ 2	0,20%

Tabelle A.14: WIMDaten\_ A3\_Aicha\_vorm\_Wald\_2014, Richtung 2, DTSV=4922

**Anmerkung:** Der Fahrzeugtyp "Kran A" wurde nicht direkt in den WiM-Daten identifiziert, sondern stellt ein Ersatzfahrzeug zur Abdeckung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs dar.

## WIMDaten\_A7\_Bottenweiler\_2015 (VC\_450)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	32	5,8	0,3	79	33,3	0,7						64,90	8	14,70%
9													9	
32													32	
33	198,6	37,3	0,94	248,2	65,4	0,06						201,58	33	5,40%
34													34	
35													35	
41	248,1	44,6	0,75	377,4	36,5	0,25						280,43	41	8,00%
42													42	
96													96	
97	153,1	24,6	0,37	230,4	52	0,63						201,80	97	18,40%
98	215	59	0,5	367,2	35,8	0,5						291,10	98	52,60%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2	310	75	0,4	650	235	0,6						514,00	SFZ 2	0,40%

Tabelle A.15: WIMDaten\_A7\_Bottenweiler\_2015, Richtung 1, DTSV=2312

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	32,4	6,4	0,39	82,1	35,4	0,61						62,72	8	16,70%
9													9	
32													32	
33	214,1	37,7	0,95	268,6	73	0,05						216,83	33	4,40%
34													34	
35													35	
41	260	38,6	0,65	379,1	48,3	0,35						301,69	41	10,50%
42													42	
96													96	
97	174,8	34,4	0,46	246,3	49,2	0,54						213,41	97	15,60%
98	238,5	63,9	0,5	386	28,5	0,5						312,25	98	52,00%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2	340	75	0,6	670	200	0,4						472,00	SFZ 2	0,30%

Tabelle A.16: WIMDaten\_A7\_Bottenweiler\_2015, Richtung 2, DTSV=2241

**Anmerkung:** Der Fahrzeugtyp "Kran A" wurde nicht direkt in den WiM-Daten identifiziert, sondern stellt ein Ersatzfahrzeug zur Abdeckung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs dar.

## WIMDaten\_A9\_Baarer\_Weiher\_2013 (VC\_451)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	53,1	19,2	0,76	91,9	32,7	0,24						62,41	8	13,50%
9													9	
32													32	
33	186,7	32,9	0,8	223,8	52	0,2						194,12	33	4,00%
34	184	34,6	0,74	279,8	34,6	0,26						208,91	34	11,00%
35													35	
41	248	45,7	0,83	377,5	29,1	0,17						270,02	41	7,30%
42													42	
96													96	
97	129,8	11,4	0,64	196,3	50,5	0,36						153,74	97	5,50%
98	235,3	71	0,64	370,9	20,6	0,36						284,12	98	58,20%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.17: WIMDaten\_A9\_Baarer\_Weiher\_2013, Richtung 1, DTSV=5522

*Anmerkung:* Der Fahrzeugtyp "Kran A" wurde nicht direkt in den WiM-Daten identifiziert, sondern stellt ein Ersatzfahrzeug zur Abdeckung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs dar.

## WIMDaten\_A24\_Neustadt\_Glewe\_2007 (VC\_452)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	59,3	18,4	0,64	102,3	35,4	0,36						74,78	8	12,40%
9													9	
32													32	
33	197	39,3	1									197,00	33	3,70%
34													34	
35													35	
41	243,8	40,6	0,5	375	51,5	0,5						309,40	41	6,80%
42													42	
96													96	
97	159,8	24,9	0,45	228	50	0,55						197,31	97	13,50%
98	252,9	71	0,58	383,2	26,8	0,42						307,63	98	63,10%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.18: WIMDaten\_A24\_Neustadt\_Glewe\_2007, Richtung 1, DTSV=2481

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	54	19,4	0,62	96,5	35,9	0,38						70,15	8	15,10%
9													9	
32													32	
33	195,9	36,7	1									195,90	33	4,80%
34													34	
35													35	
41	244,2	45,7	0,57	391,6	41,8	0,43						307,58	41	5,90%
42													42	
96													96	
97	165,7	18,4	0,57	211,1	55,4	0,43						185,22	97	18,60%
98	214,2	55,3	0,52	380,6	33,2	0,48						294,07	98	55,10%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.19: WIMDaten\_A24\_Neustadt\_Glewe\_2007, Richtung 2, DTSV=2454

**Anmerkung:** Der Fahrzeugtyp "Kran A" wurde nicht direkt in den WiM-Daten identifiziert, sondern stellt ein Ersatzfahrzeug zur Abdeckung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs dar.

## WIMDaten\_A31\_Reken\_2015 (VC\_453)

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	46,8	21,1	0,62	92,8	37,8	0,38						64,28	8	24,90%
9													9	
32													32	
33	200,5	25	0,64	218,8	61	0,36						207,09	33	3,50%
34													34	
35													35	
41	243,2	43,2	0,37	382,2	45	0,63						330,77	41	4,80%
42													42	
96													96	
97	160,7	24,3	0,54	238,9	54,5	0,46						196,67	97	16,00%
98	212,6	60,4	0,42	389,3	29,5	0,58						315,09	98	50,00%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2	312	75	0,45	620	175	0,55						481,40	SFZ 2	0,30%

Tabelle A.20: WIMDaten\_A31\_Reken\_2015, Richtung 1, DTSV=1961

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	27,9	8,8	0,37	73,6	36,3	0,63						56,69	8	29,30%
9													9	
32													32	
33	199,8	49,5	1									199,80	33	4,20%
34													34	
35													35	
41	245,3	52,4	0,48	388,6	57	0,52						319,82	41	4,10%
42													42	
96													96	
97	147,7	21,3	0,48	227	55,9	0,52						188,94	97	18,00%
98	174,3	43,4	0,4	367,6	56,4	0,6						290,28	98	43,50%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A	720	63,3	1									720,00	Kran A	0,50%
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2	445	205	1									445,00	SFZ 2	0,40%

Tabelle A.21: WIMDaten\_A31\_Reken\_2015, Richtung 2, DTSV=1935

**Anmerkung:** Der Fahrzeugtyp "Kran A" wurde nicht direkt in den WiM-Daten identifiziert, sondern stellt ein Ersatzfahrzeug zur Abdeckung des genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs dar.

BWIMDaten\_DreierwalderBrücke\_2014 (VC\_434) [FrBH15]

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	31,3	11,5	0,731	75,9	12,2	0,128	119,8	34,3	0,141			49,49	8	71,80%
9	94,1	36,9	0,39	170,3	10,2	0,15	230,5	73,3	0,46			168,27	9	4,90%
32	47,3	15,9	0,34	82,7	32,9	0,307	188,8	33,9	0,353			108,12	32	2,80%
33													33	
34	84,8	37,3	0,52	177,2	20	0,14	216,8	88,5	0,34			142,62	34	8,60%
35													35	
41	140,2	33,8	0,27	329,3	61	0,432	360,3	93,6	0,298			287,48	41	1,80%
42													42	
96													96	
97	80,8	21,8	0,383	176,5	94,5	0,508	201,7	15	0,109			142,59	97	2,50%
98	96,5	19	0,148	218,4	58	0,594	435,7	45	0,258			256,42	98	7,60%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.22: BWIMDaten\_DreierwalderBrücke\_2014, Richtung 1, DTSV=150

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	31,3	11,5	0,731	75,9	12,2	0,128	119,8	34,3	0,141			49,49	8	71,80%
9	94,1	36,9	0,39	170,3	10,2	0,15	230,5	73,3	0,46			168,27	9	4,90%
32	47,3	15,9	0,34	82,7	32,9	0,307	188,8	33,9	0,353			108,12	32	2,80%
33													33	
34	84,8	37,3	0,52	177,2	20	0,14	216,8	88,5	0,34			142,62	34	8,60%
35													35	
41	140,2	33,8	0,27	329,3	61	0,432	360,3	93,6	0,298			287,48	41	1,80%
42													42	
96													96	
97	80,8	21,8	0,383	176,5	94,5	0,508	201,7	15	0,109			142,59	97	2,50%
98	96,5	19	0,148	218,4	58	0,594	435,7	45	0,258			256,42	98	7,60%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.23: BWIMDaten\_DreierwalderBrücke\_2014, Richtung 2, DTSV=150

## BWIMDaten\_GöxerLandstraße\_2014\_2015 (VC\_435) [FrBH16]

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	60,55	15,86	0,455	110,63	6,58	0,214	113,14	35,13	0,331			88,67	8	52,20%
9	144,67	8,76	0,143	178,01	61,2	0,857						173,24	9	5,40%
32	107,84	45,03	0,264	146,39	12,43	0,505	165,22	58,44	0,231			140,56	32	7,90%
33													33	
34	147,7	6,81	0,212	158,87	31,11	0,472	314,34	46,87	0,316			205,63	34	4,20%
35													35	
41													41	
42													42	
96													96	
97	149,66	5,63	0,181	215,53	65,6	0,597	406,12	21,78	0,222			245,92	97	2,50%
98	268,43	92,54	0,237	383,63	14,81	0,136	406,46	14,03	0,627			370,64	98	1,90%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus	108,74	6,31	0,144	118,52	6,17	0,595	120,04	32,1	0,261			117,51	Bus	20,10%
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.24: BWIMDaten\_GöxerLandstraße\_2014\_2015, Richtung 1, DTSV=200

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	34,82	2,03	0,168	78,3	36,1	0,551	109,67	6,34	0,281			79,81	8	69,90%
9	138,07	11,52	0,201	193,55	44,28	0,747	244,96	0,3	0,052			185,07	9	6,00%
32	41,99	9,6	0,367	68,86	6,62	0,043	125,38	42,9	0,59			92,35	32	4,80%
33													33	
34	216,62	65,82	0,521	313,02	28,96	0,418	322,36	4,82	0,061			263,37	34	5,50%
35													35	
41													41	
42													42	
96													96	
97	140,8	20,53	0,487	232,56	43,8	0,233	284,32	71,16	0,28			202,37	97	1,00%
98	323,21	61,45	0,255	390,01	25,44	0,745						372,98	98	2,60%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus	69,96	39,53	0,011	74,12	14,61	0,536	107,81	24,69	0,453			89,34	Bus	3,30%
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.25: BWIMDaten\_GöxerLandstraße\_2014\_2015, Richtung 2, DTSV=200

**Anmerkung:** Der geringe Anteil unbeladener LKW-Typ 98 ist ein Hinweis darauf, dass teilweise besonders leichte Einzelachsen nicht erkannt wurden. Entsprechend ist der Anteil an LKW-Typ 97 eventuell überschätzt.

BWIMDaten\_LingenerDamm\_B70\_2015\_2016 (VC\_436) [FBHS16]

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	34,82	0,42	0,09	76,54	25,68	0,58	120,83	22,08	0,33			87,40	8	28,60%
9	125,01	0,01	0,014	155,11	31,73	0,546	193,6	51,85	0,44			171,62	9	6,80%
32	59,87	31,84	0,17	159,33	34,02	0,809	167,21	26,11	0,021			142,59	32	3,20%
33													33	
34	144,23	15,5	0,401	114,76	81,24	0,413	257,7	103,62	0,186			153,16	34	3,70%
35													35	
41	305,61	75,46	0,482	413,26	59,8	0	412,86	28,98	0,518			361,17	41	3,40%
42													42	
96													96	
97	136,43	20,72	0,358	173,72	31,35	0,322	240,5	48,51	0,32			181,74	97	15,10%
98	307,27	89,59	0,374	388,23	30,71	0,609	438,27	16,8	0,017			358,80	98	28,90%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.26: BWIMDaten\_LingenerDamm\_B70\_2015\_2016, Richtung 1, DTSV=1200

Parameter GG-Verteilung - Angaben in kN													Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	$\mu_1$	$\sigma_1$	$\xi_1$	$\mu_2$	$\sigma_2$	$\xi_2$	$\mu_3$	$\sigma_3$	$\xi_3$	Kapp. U	Kapp. O	MIWe GG	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW													PKW	
8	34,92	0,26	0,19	62,36	15,98	0,426	108,24	30,17	0,384			74,76	8	21,90%
9	156,84	34,89	0,435	227,65	47,58	0,01	237,92	56,04	0,555			202,55	9	5,80%
32													32	
33	182,87	47,34	0,726	214,38	14,21	0,164	328,37	82,98	0,11			204,04	33	2,00%
34	185,24	62,62	0,332	344,38	39,25	0,648	402,89	98,38	0,02			292,72	34	9,70%
35													35	
41	252,09	52,89	0,297	395,7	41,26	0,703						353,05	41	5,30%
42													42	
96													96	
97	135,15	14,63	0,322	152,87	23,22	0,249	227,83	64,86	0,429			179,32	97	19,10%
98	151,57	20,4	0,091	290,12	83,31	0,303	400,64	30,03	0,606			344,49	98	32,70%
99													99	
100													100	
GL													GL	
Bus													Bus	
Kran A													Kran A	
Kran B													Kran B	
Kran C													Kran C	
genSV EFZ 1													genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2													genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3													genSV EFZ 3	
SFZ 1													SFZ 1	
SFZ 2													SFZ 2	

Tabelle A.27: BWIMDaten\_LingenerDamm\_B70\_2015\_2016, Richtung 2, DTSV=1200

## ZSDaten\_Wetzlar\_2015 (VC\_437)

Parameter Zusammensetzung		Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	Anteil	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW	64,20%	PKW	96,60%
8	8,36%	8	0,79%
9	2,09%	9	0,20%
32		32	
33		33	
34		34	
35		35	
41	3,38%	41	0,32%
42		42	
96		96	
97	5,07%	97	0,48%
98	16,90%	98	1,61%
99		99	
100		100	
GL		GL	
Bus		Bus	
Kran A		Kran A	
Kran B		Kran B	
Kran C		Kran C	
genSV EFZ 1		genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2		genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3		genSV EFZ 3	
SFZ 1		SFZ 1	
SFZ 2		SFZ 2	

Tabelle A.28: ZSDaten\_Wetzlar\_2015, Richtung 1

Links: DTSV=962, DTV=2688 (Hauptspur), Rechts: DTSV=243, DTV=7146 (Nebenspur)

Parameter Zusammensetzung		Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	Anteil	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW	64,20%	PKW	96,60%
8	8,36%	8	0,79%
9	2,09%	9	0,20%
32		32	
33		33	
34		34	
35		35	
41	3,38%	41	0,32%
42		42	
96		96	
97	5,07%	97	0,48%
98	16,90%	98	1,61%
99		99	
100		100	
GL		GL	
Bus		Bus	
Kran A		Kran A	
Kran B		Kran B	
Kran C		Kran C	
genSV EFZ 1		genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2		genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3		genSV EFZ 3	
SFZ 1		SFZ 1	
SFZ 2		SFZ 2	

Tabelle A.29: ZSDaten\_Wetzlar\_2015, Richtung 2

Links: DTSV=962, DTV=2688 (Hauptspur), Rechts: DTSV=243, DTV=7146 (Nebenspur)

## ZSDaten\_FuldaBr\_2015 (VC\_441)

Parameter Zusammensetzung		Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	Anteil	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW	32,50%	PKW	88,50%
8	9,50%	8	1,62%
9	2,38%	9	0,40%
32		32	
33		33	
34		34	
35		35	
41	12,49%	41	2,13%
42		42	
96		96	
97	9,96%	97	1,70%
98	33,17%	98	5,65%
99		99	
100		100	
GL		GL	
Bus		Bus	
Kran A		Kran A	
Kran B		Kran B	
Kran C		Kran C	
genSV EFZ 1		genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2		genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3		genSV EFZ 3	
SFZ 1		SFZ 1	
SFZ 2		SFZ 2	

Tabelle A.30: ZSDaten\_FuldaBr\_2015, Richtung 1

Links: DTSV=7000, DTV=10370 (Hauptspur), Rechts: DTSV=1751, DTV=15230 (Nebenspur)

## ZSDaten\_EselsWiese\_2017 (VC\_445)

Parameter Zusammensetzung		Parameter Zusammensetzung	
Fahrzeugtyp	Anteil	Fahrzeugtyp	Anteil
PKW	82,31%	PKW	95,67%
8	3,54%	8	2,94%
9	0,88%	9	0,74%
32		32	
33		33	
34		34	
35		35	
41	3,54%	41	
42		42	
96		96	
97	2,30%	97	
98	7,43%	98	0,65%
99		99	
100		100	
GL		GL	
Bus		Bus	
Kran A		Kran A	
Kran B		Kran B	
Kran C		Kran C	
genSV EFZ 1		genSV EFZ 1	
genSV EFZ 2		genSV EFZ 2	
genSV EFZ 3		genSV EFZ 3	
SFZ 1		SFZ 1	
SFZ 2		SFZ 2	

Tabelle A.31: ZSDaten\_EselsWiese\_2017, Richtung 1

Links: DTSV=3232, DTV=18270 (Hauptspur), Rechts: DTSV=170, DTV=3930 (Nebenspur)

## Anhang B: Parameterstudie

Im Folgenden werden Parameterstudien zum Einfluss unterschiedlicher Verkehrskennwerte auf die Ermüdungsbeanspruchung durchgeführt. Die Ergebnisse werden dabei einerseits hinsichtlich der Lambda-Werte ( $\lambda_{S,1}$ ,  $\lambda_{S,2}$ ) und andererseits hinsichtlich der Beanspruchungskollektive, bezogen auf die Momentenschwingbreite, dargestellt. Zu Vergleichszwecken wird bei der Änderung eines Kennwertes stets auch das Ausgangsszenario (Grundszenario "Langstreckenverkehr 1", DTSV=8000) als durchgezogene Linie mit dargestellt. Dem Ausgangsszenario liegen folgende Parameter zugrunde:

- Fahrzeugkollektiv:  
Grundszenario "Langstreckenverkehr 1"
- DTSV = 8000
- Stauwahrscheinlichkeit ~10%, tägliche Anzahl an Staus: ~7 ( $p_{\text{Stau}}=0,99$ ,  $p_{\text{fließ}}=0,999$ )
- Keine explizite Berücksichtigung von LKW-Kolonnen des aktuellen Verkehrs
- Schwingbeiwert im fließenden Verkehr:  $\varphi=1,1$
- Simulationsdauer: 1 Jahr, Umrechnung auf 100 Jahre ( $\lambda_{S,3}=1,0$ )
- Einspuriger Verkehr ( $\lambda_{S,4}=1,0$ )

Die Ermittlung der  $\lambda$ -Werte basiert auf dem Verfahren nach Danielewicz [Dani94]. Dabei erfolgt eine Linearisierung der in der Realität nichtlinearen M- $\sigma$ -Beziehung. Der nichtlineare Einfluss der

Grundbeanspruchung auf die  $\lambda$ -Werte (durch den Knick der M- $\sigma$ -Beziehung) braucht dadurch bei einer Bemessung nach den aktuell gültigen Eurocodes nicht berücksichtigt zu werden. Wesentlich ist, dass diese Linearisierung nur dann auf der sicheren Seite liegt, wenn die Momentenschwingbreite infolge des ELM 3 mindestens so groß ist, wie die maximale Momentenschwingbreite aus der realen Verkehrsbeanspruchung. Zur Erfüllung dieser Bedingung wurden die Vergrößerungsfaktoren des ELM 3 für eine Bemessung im Massivbau eingeführt (1,75 für den Nachweis an Zwischenstützen, 1,4 in den übrigen Bereichen).

Ebenfalls analog zur Arbeit von Danielewicz, erfolgt eine Linearisierung der Wöhlerlinie mit der Steigung  $k_2$ . Vergleichbar mit Ermüdungsnachweisen im Stahlbau wird dadurch die Unabhängigkeit der Lambda-Werte vom nachzuweisenden Element (Kerbdetail) erreicht. Der Einfluss der Bezugs-Wöhlerlinie auf die Lambda-Werte reduziert sich dadurch auf die Steigung  $k_2$  des nachzuweisenden Elements. Bei einer Bemessung nach den aktuell gültigen Eurocodes entfällt dadurch eine Berücksichtigung der Dauerfestigkeitsgrenze ( $\Delta\sigma_{Rsk}$ ) im Bezug zum realen Beanspruchungskollektiv.

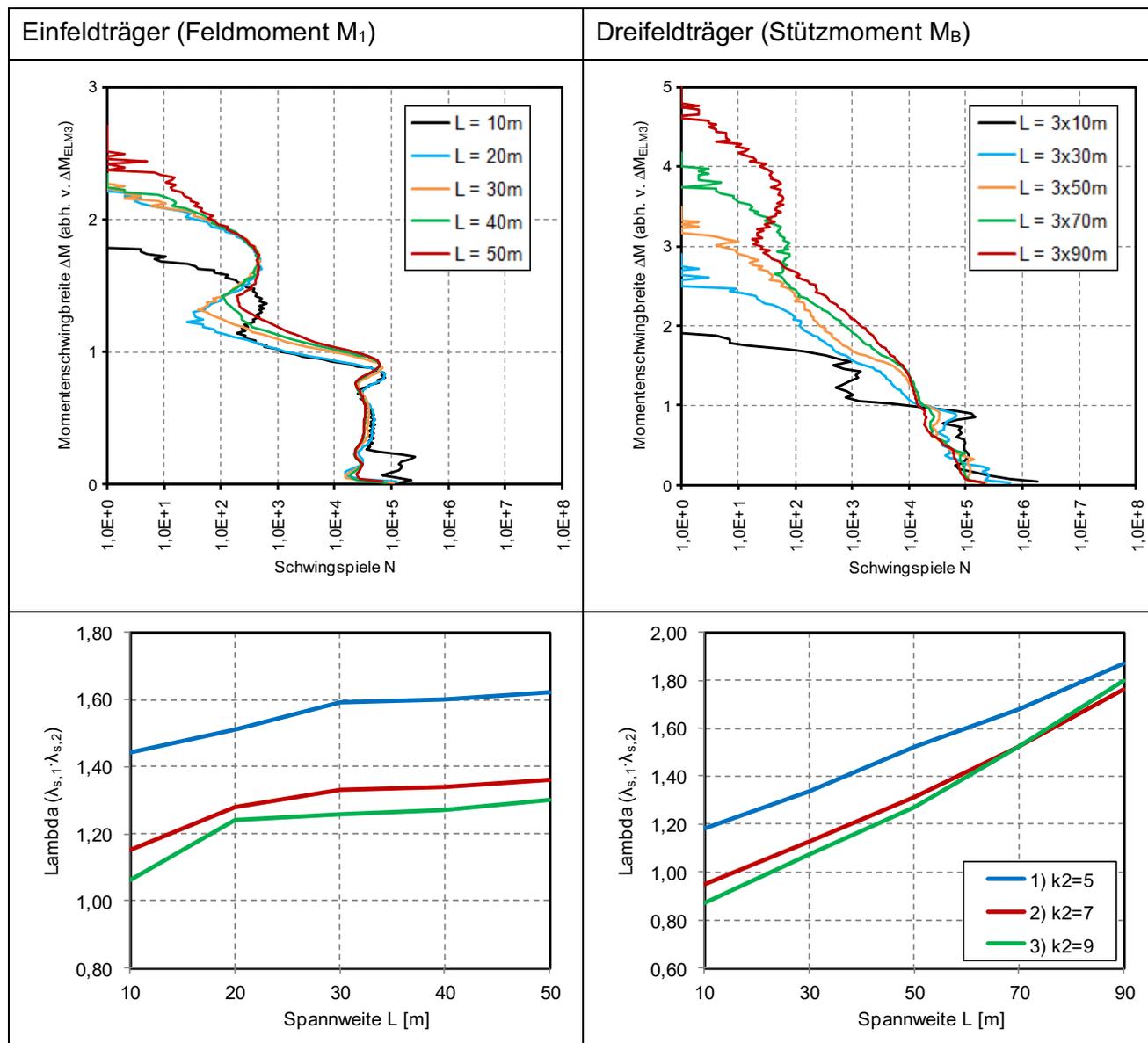


Tabelle B.1: Grundszenario "Langstreckenverkehr 1", DTSV=8000

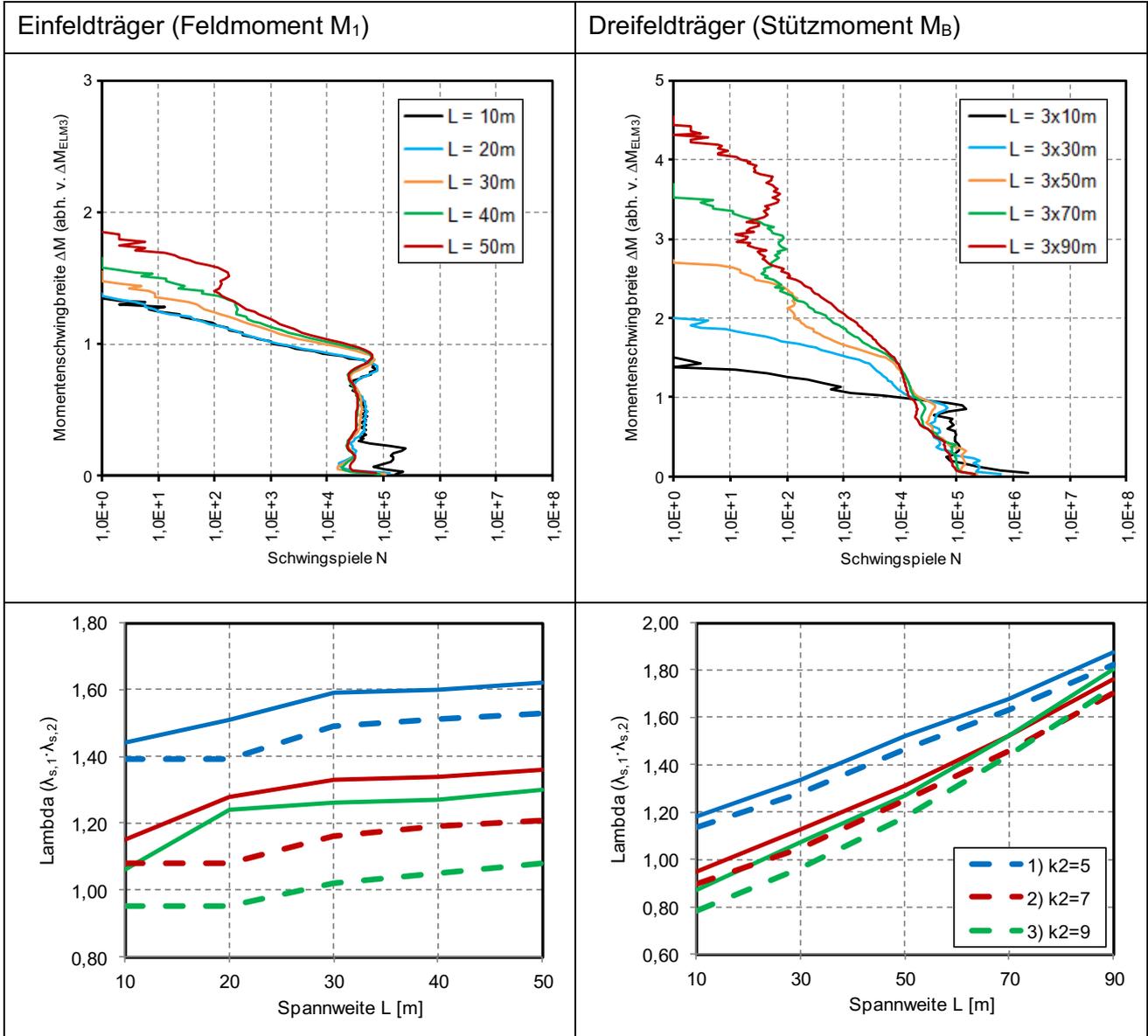


Tabelle B.2: Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" ohne 72t-Mobilkran, DTSV=8000

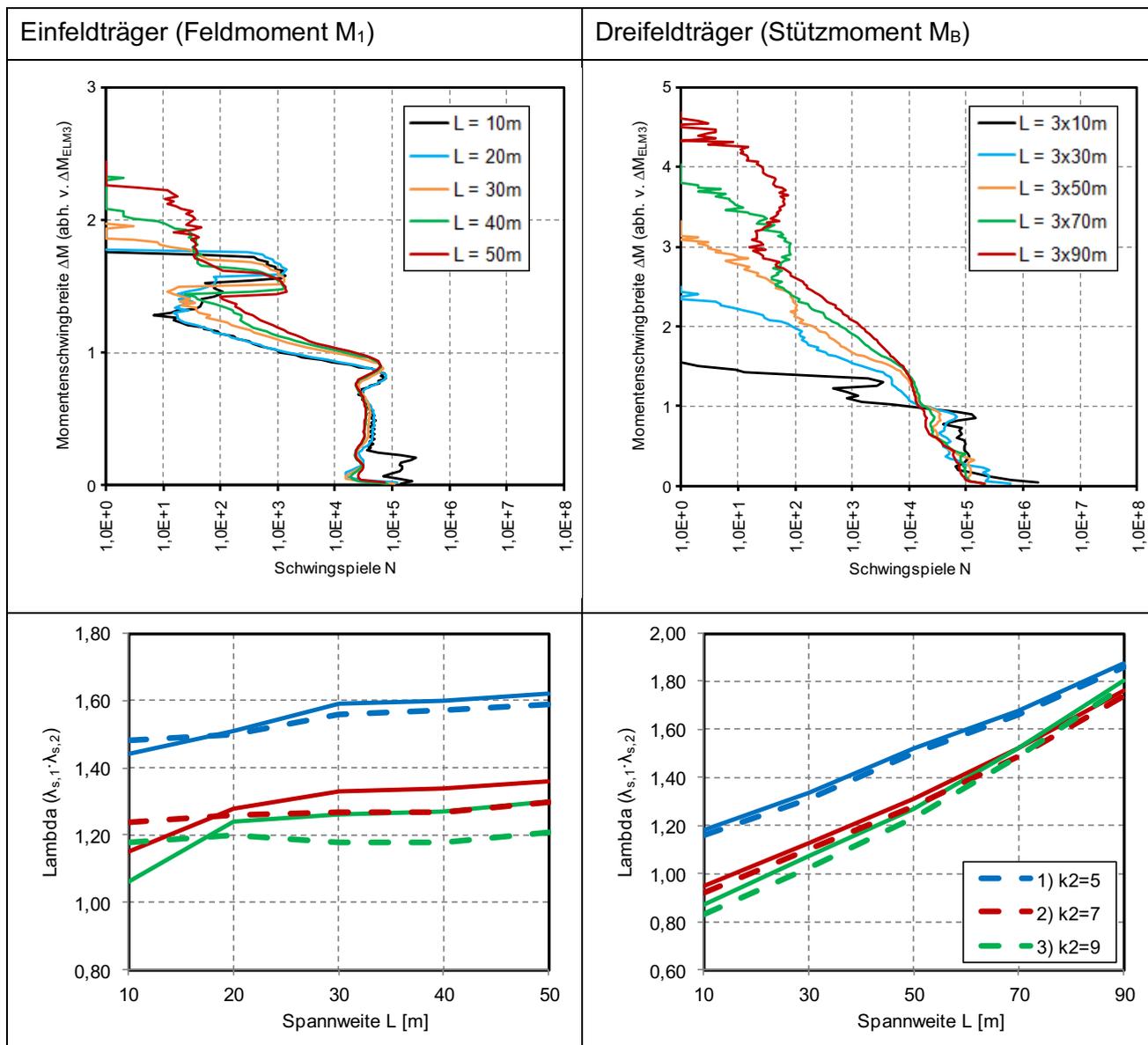


Tabelle B.3: Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" mit 60t-Mobilkran ( $59,1t \leq G \leq 66,0t$ ) anstatt 72t-Mobilkran, DTSV=8000

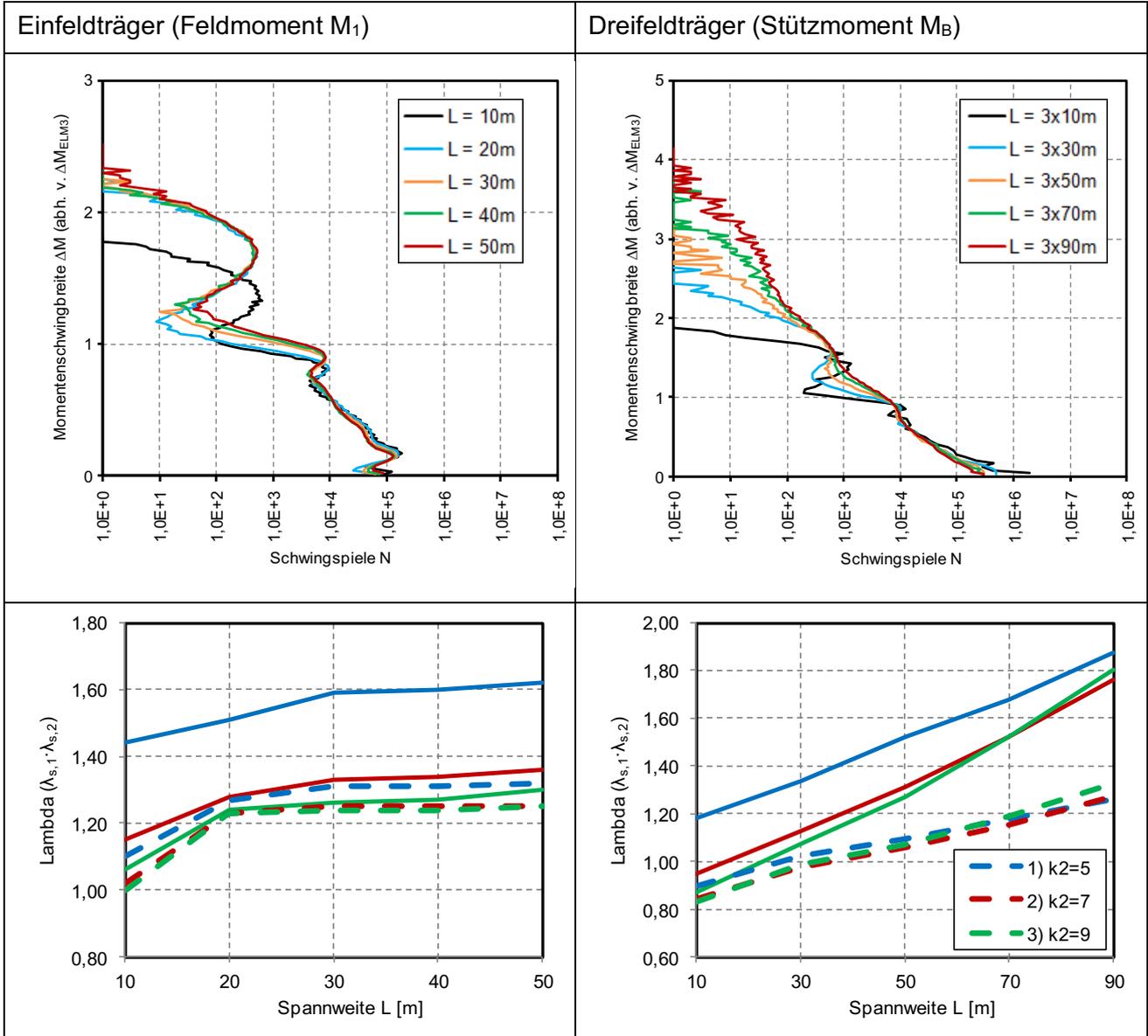


Tabelle B.4: Grundszenario "Ortsverkehr 1", DTSV=8000

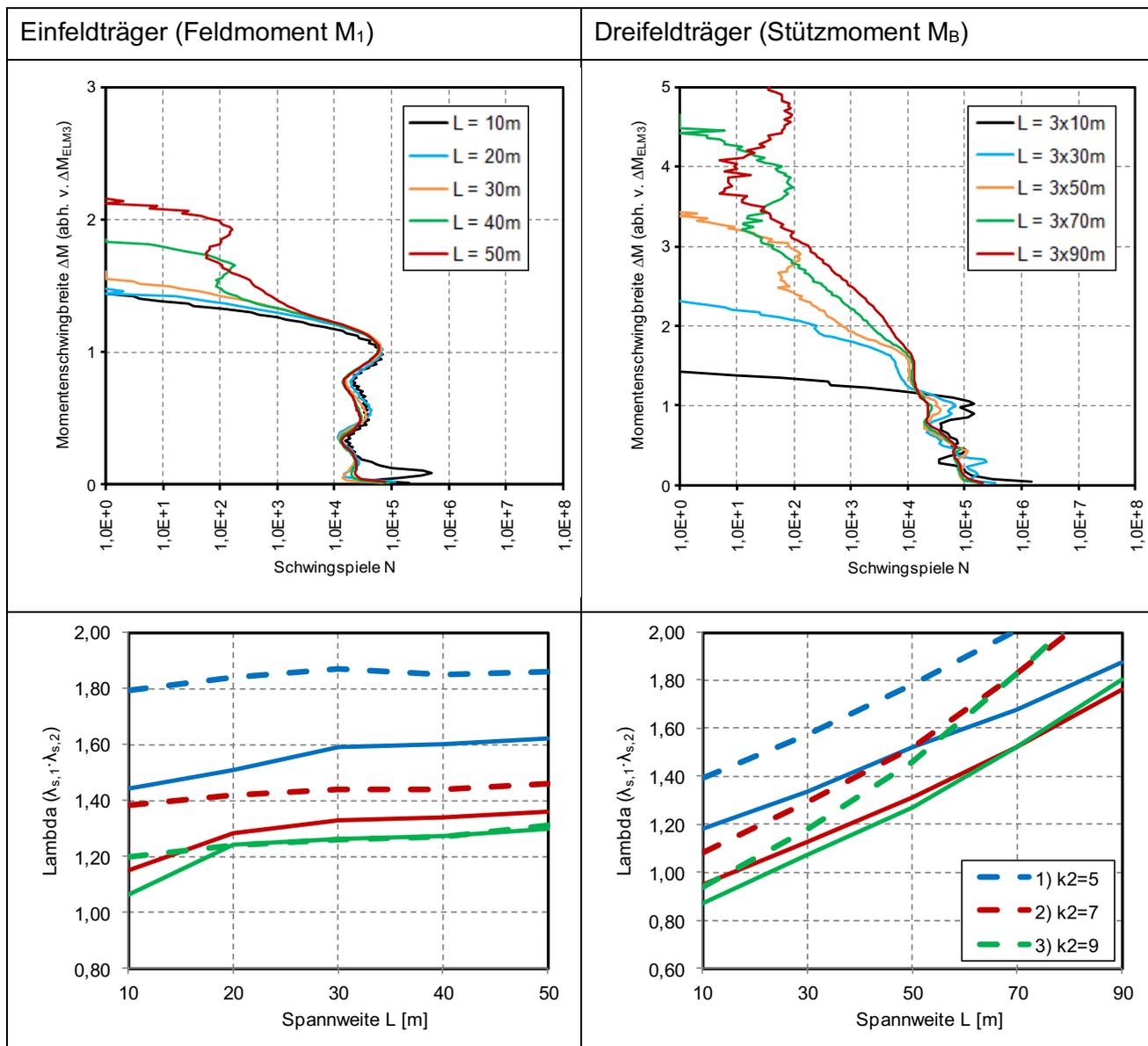


Tabelle B.5: Auxerre-Verkehr

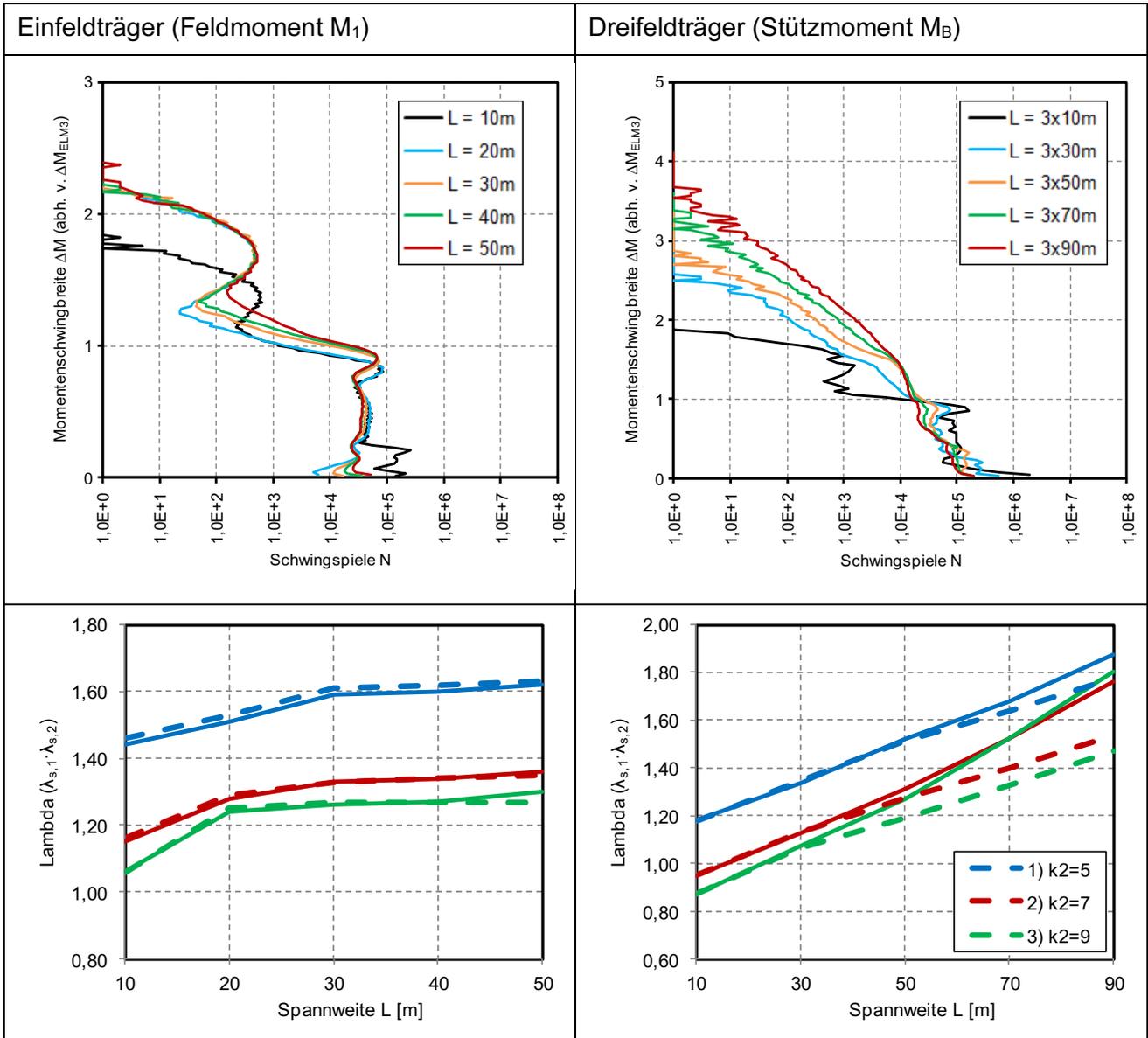


Tabelle B.6: Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" ohne Stau, DTSV=8000

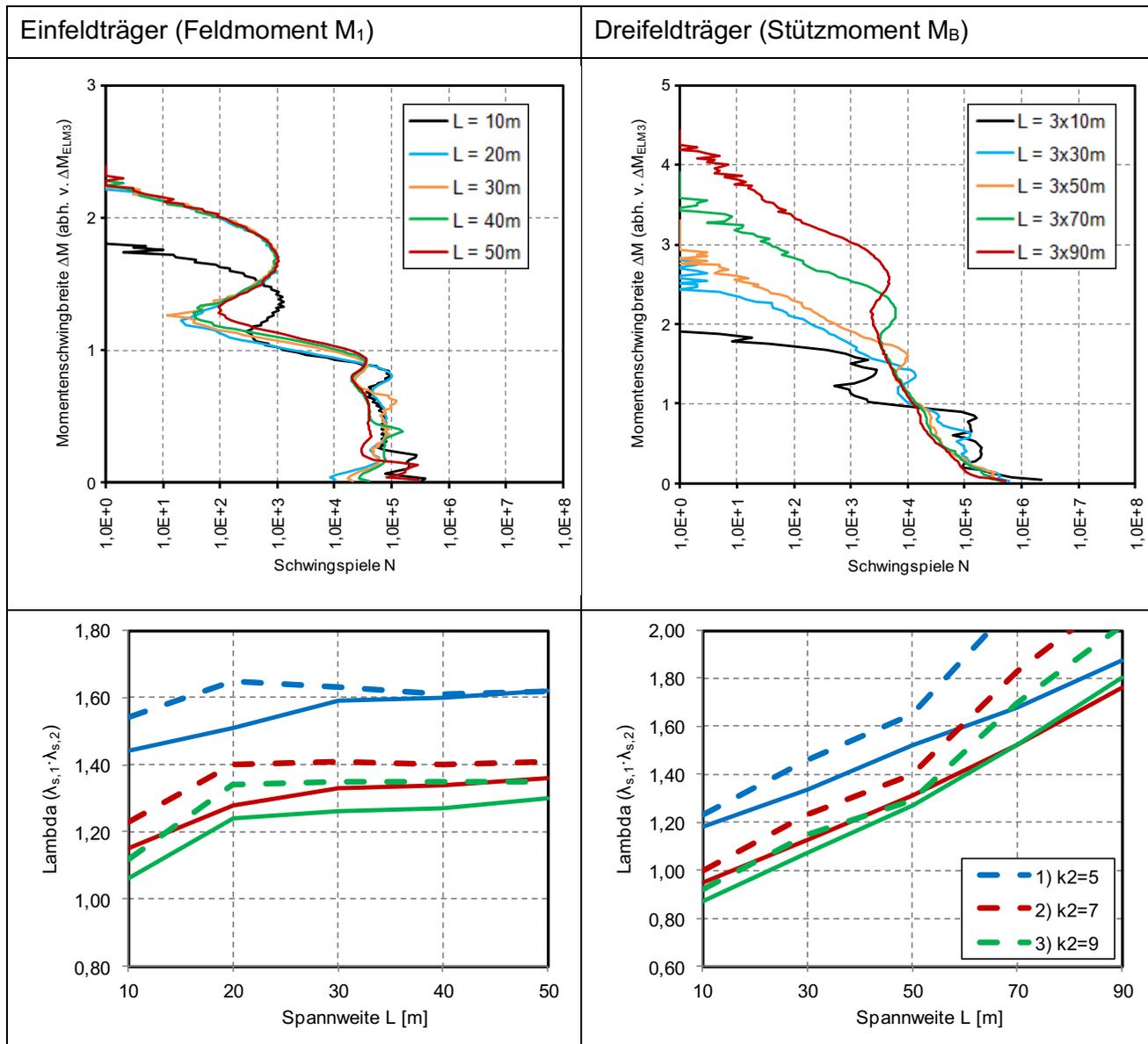


Tabelle B.7: Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" ohne Stau, mit Kolonne von 5x LKW Typ 98 als ein Fahrzeug (anstatt LKW Typ 98), DTSV=8000

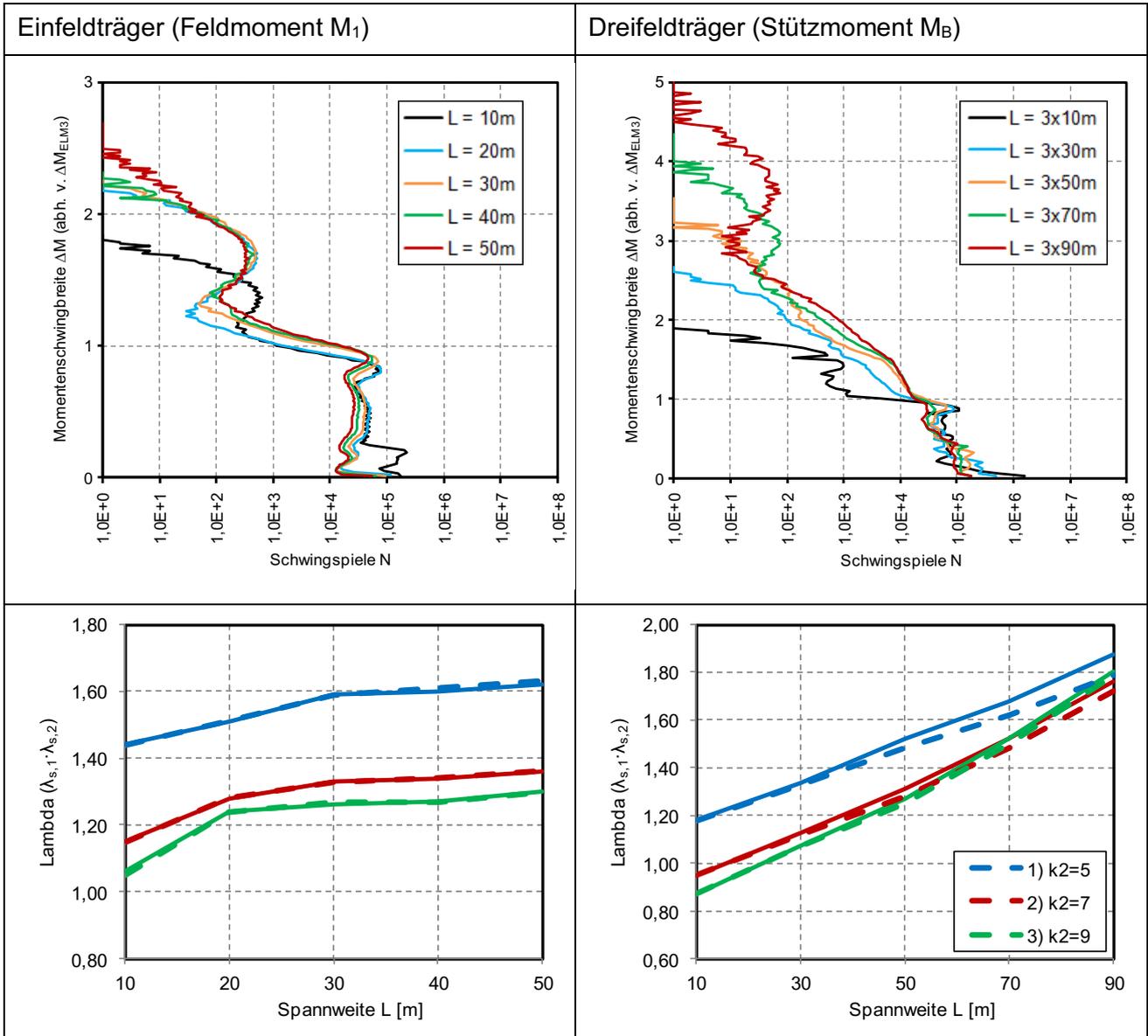


Tabelle B.8: Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" mit Berücksichtigung schon heute auftretender Kolonnen (max. Kolonnenabstand=100m), DTSV=8000

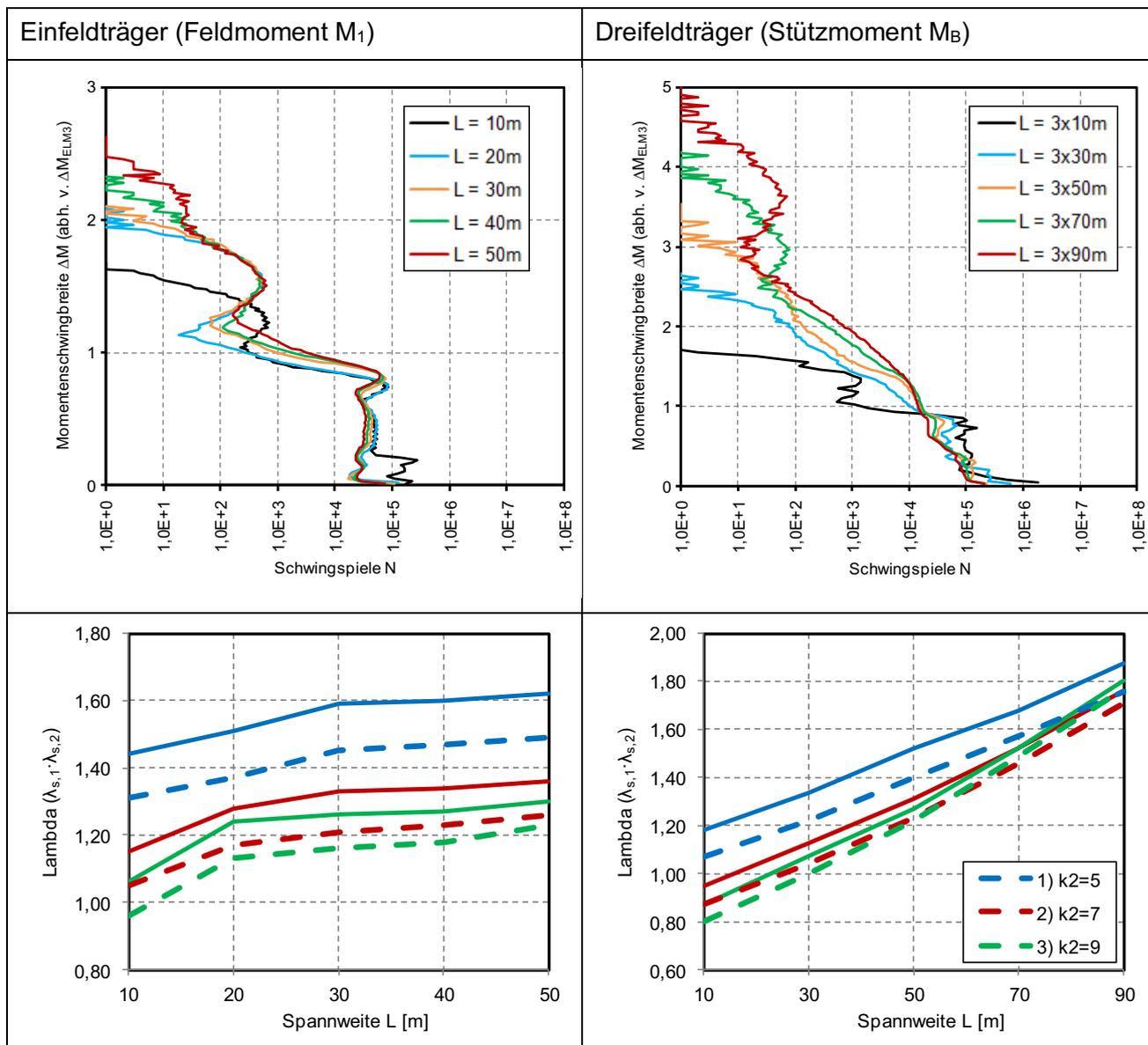


Tabelle B.9: Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" ohne Schwingbeiwert im fließenden Verkehr (d.h.  $\varphi=1,0$  anstatt  $\varphi=1,1$ ), DTSV=8000

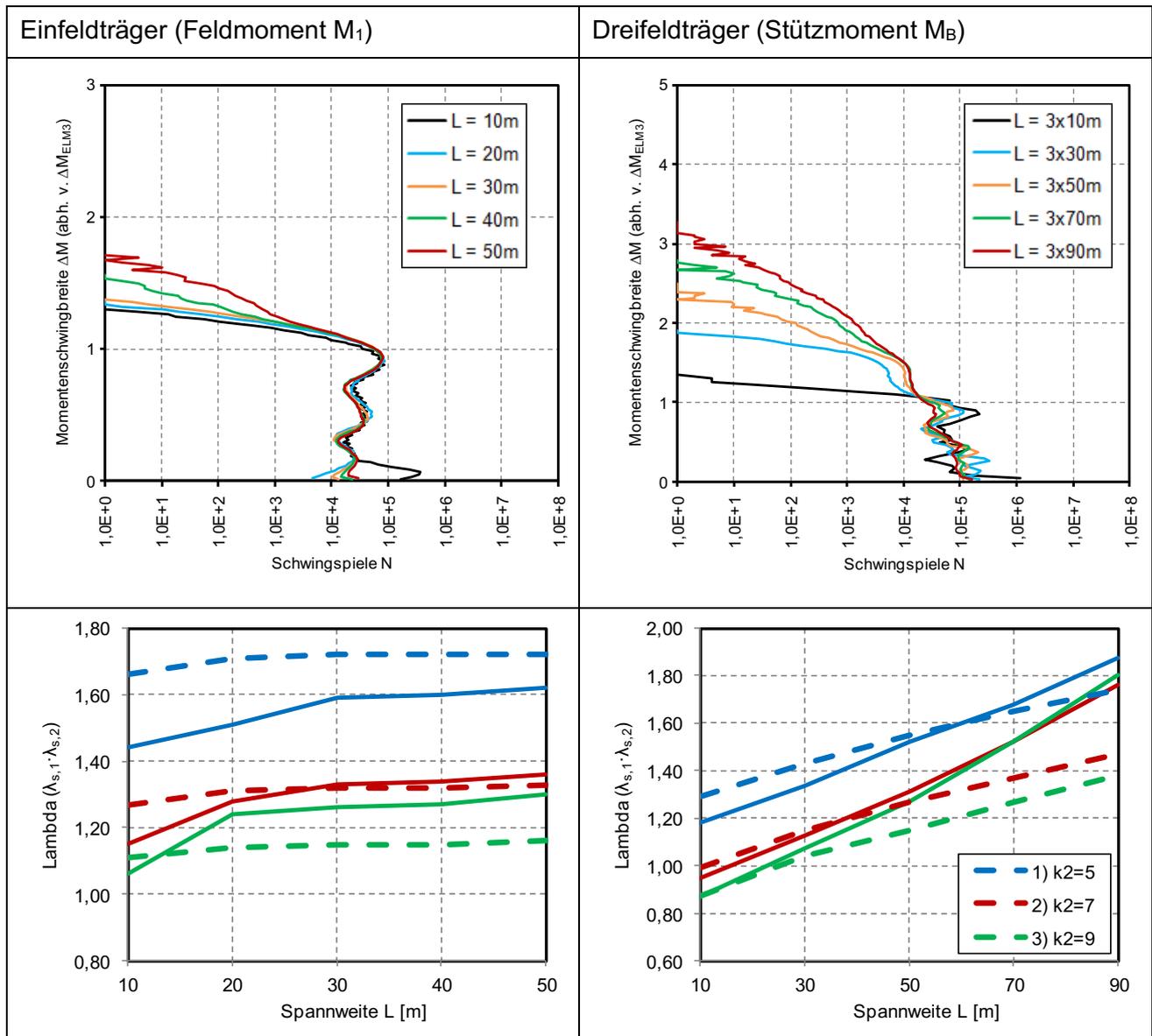


Tabelle B.10: Simulationsparameter nach Danielewicz: Auxerre-Verkehr, kein Stau, kein Schwingbeiwert, max. Kolonnenabstand=100m, DTSV=8000

## Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Parameterstudie zeigen zum einen das Potenzial einer sinnvollen Abstufung hinsichtlich unterschiedlicher Verkehrsarten (Fahrzeugkollektive).

So hat vor allem die Schwerverkehrszusammensetzung ("Langstreckenverkehr" / "Ortsverkehr") einen großen Einfluss auf die Lambda-Werte und damit auch auf das spätere Bemessungsergebnis. Bemerkenswert ist daran, dass sich dieser Einfluss bereits ohne eine Änderung der Gesamtgewichtsverteilung einstellt.

Einen deutlichen Einfluss hat weiterhin der Anteil an genehmigungspflichtigem Schwerverkehr (z.B. 72t-Mobilkran). Dieser ist prinzipiell auf sämtlichen Strecken zu erwarten, wobei der Anteil am gesamten Schwerverkehr im Ortsverkehr tendenziell deutlich geringer ist als im Langstreckenverkehr. Der Ansatz eines alternativen 60t-Mobilkrans (mit 5 Achsen und einer abgeschnittenen Gesamtgewichtsverteilung) anstelle eines 72t-Mobilkrans (mit 6 Achsen und einer nach oben offenen Gesamtgewichtsverteilung) zeigt eine eher geringe Auswirkung. Aus Konformitätsgründen zwischen den zu untersuchenden Szenarien und auch zum Lastmodell LM1 wird für die weiteren Untersuchungen empfohlen, weiterhin

einen 72t-Mobilkran als Ersatzfahrzeug zur Abbildung des in der Realität weit gefächerten genehmigungspflichtigen Schwerverkehrs anzusetzen.

Die Parameterstudie zeigt weiterhin die starke Sensibilität der Ergebnisse in Abhängigkeit der gewählten Parameter zur Abbildung unterschiedlicher Verkehrszustände (Verkehrsdynamik).

Einen starken Einfluss auf die Ermüdungsbeanspruchung hat hier der Ansatz regelmäßiger Staus. Dieser macht sich bei mehrfeldrigen Systemen ab einer Spannweite von ca. 30m bemerkbar. Der Ansatz regelmäßiger Staus auf sämtlichen Strecken ist jedoch als sehr konservativ einzustufen. In der Realität kann zwar das Auftreten von Staus nie ausgeschlossen werden, allerdings sind regelmäßige Staus über die gesamte Lebensdauer eines Brückenbauwerks eher unwahrscheinlich.

Die Ergebnisse unter Berücksichtigung eines LKW-Platoonings durch eine Kolonne von 5 LKW Typ 98 als ein Fahrzeug anstelle einzelner LKW Typ 98 (vgl. Abschnitt 4.2) zeigen, dass der Einfluss grundsätzlich nicht vernachlässigbar ist. Deutliche Auswirkungen in Form eines Anstiegs der Lambda-Werte sind ab einer Spannweite von ca. 50m erkennbar.

Die Berücksichtigung schon heute auftretender Kolonnen durch den in Abschnitt 2.1.7 beschriebenen Ansatz mit einer maximalen Kolonnenlänge von 100m zeigt einen eher geringen Einfluss, der jedoch tendenziell als günstig einzustufen ist. Da die Ausprägung von Kolonnen des heutigen Verkehrs auf verschiedenen Strecken sehr unterschiedlich ausfallen kann, wird deren günstiger Einfluss in weiteren Untersuchungen dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

Der Ansatz eines konstanten Schwingbeiwertes  $\varphi$ , in Analogie zu Untersuchungen hinsichtlich charakteristischer Werte, hat erwartungsgemäß einen hohen Einfluss auf die Ermüdungsbeanspruchung. Durch den betrachteten Ansatz konstanter Schwingbeiwerte werden jedoch lediglich die Fahrzeugesamtwerte und Achslasten im fließenden Verkehr mit einem konstanten Faktor erhöht. Eine Simulation unter Berücksichtigung dynamischer Effekte (schwingende Fahrzeugesamtwerte) wird damit nicht ersetzt. Um die dynamischen von den statischen Effekten des Verkehrs getrennt betrachten zu können, wurden in [MeDa94] spezielle Simulationen an dynamischen Systemen durchgeführt und mit den Ergebnissen an statischen Systemen

verglichen. Aus den Ergebnissen wurde der schädigungsäquivalente Schwingbeiwert  $\varphi_{fat}$  abgeleitet. Bei einer Bemessung nach den aktuell gültigen Eurocodes kann damit der dynamische Anteil der Ermüdungsbeanspruchung durch einen konstanten Vergrößerungsfaktor erfasst werden. In den weiteren Untersuchungen dieser Arbeit erfolgt daher eine Trennung der dynamischen von den statischen Effekten, die statischen Simulationen werden also ohne Schwingbeiwert durchgeführt.

Die Ergebnisse der Simulationen mit Simulationsparametern identisch zur Arbeit von Danielewicz [Dani94] können einerseits zur Kontrolle der zugrundeliegenden Methodik herangezogen werden. Andererseits zeigen die Ergebnisse auch die Auswirkung einer Kombination der zuvor separat betrachteten Simulationsparameter.

Die mit dem Simulationsprogramm PATLoB unter Zugrundelegung der Simulationsparameter nach Danielewicz ermittelten Lambda-Werte werden in Abbildung B.1 und Abbildung B.2 den Ergebnissen in [Dani94], d.h. der Regelung nach [DIN EN 1992-2] gegenübergestellt. Zusätzlich werden die Ergebnisse mit den Simulationsparametern entsprechend Tabelle B.9 mit dargestellt (Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" ohne Schwingbeiwert, mit Stau, ohne LKW-Kolonnen und DTSV=8000). Die in [Dani94] ermittelten Lambda-Werte konnten für die Einfeldträger (Feldmoment  $M_1$ ) mit hier nahezu identischen Ergebnissen verifiziert werden. Bei den Dreifeldträgern (Stützmoment  $M_B$ ) liegen die Ergebnisse auf einem sehr ähnlichen Niveau, zeigen jedoch geringe Abweichungen. Da die Simulationen auf identischen Eingangsparametern beruhen, kann die Ursache dieser Abweichungen nur in unterschiedlich langen Simulationszeiträumen oder in unterschiedlichen Auswertungsmethoden liegen (eventuelle Fehler in der Programmierung werden bei dieser Annahme ausgeschlossen). Unterschiede liegen hier in der Implementierung des Rainflowzählverfahrens, das in [Dani94] auf [RZM82] beruht, im hier verwendeten Simulationsprogramm auf [CISe86]. Wie in [KJPZ12] beschrieben, liefern unterschiedliche Implementierungen auch teilweise unterschiedliche Beanspruchungskollektive, eine Quantifizierung der Unterschiede wird jedoch nicht vorgenommen. Da die Unterschiede hinsichtlich der hier ermittelten Lambda-Werte relativ gering sind, wird eine weitere Begründung der Unterschiede nicht weiterverfolgt.

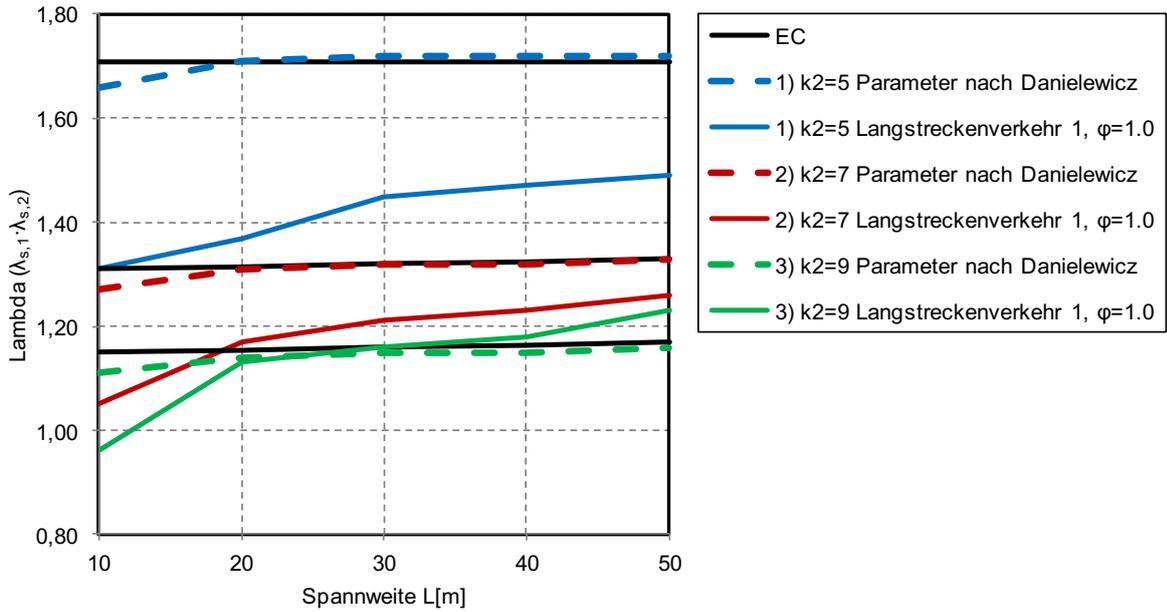


Abbildung B.1: Vergleich zwischen Regelung nach [DIN EN 1992-2/NA], Ergebnissen mit Eingangsparametern nach Danielewicz (vgl. Tabelle B.10) und Ergebnissen mit Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" ohne Schwingbeiwert im fließenden Verkehr (vgl. Tabelle B.9) - Einfeldträger (Feldmoment  $M_1$ )

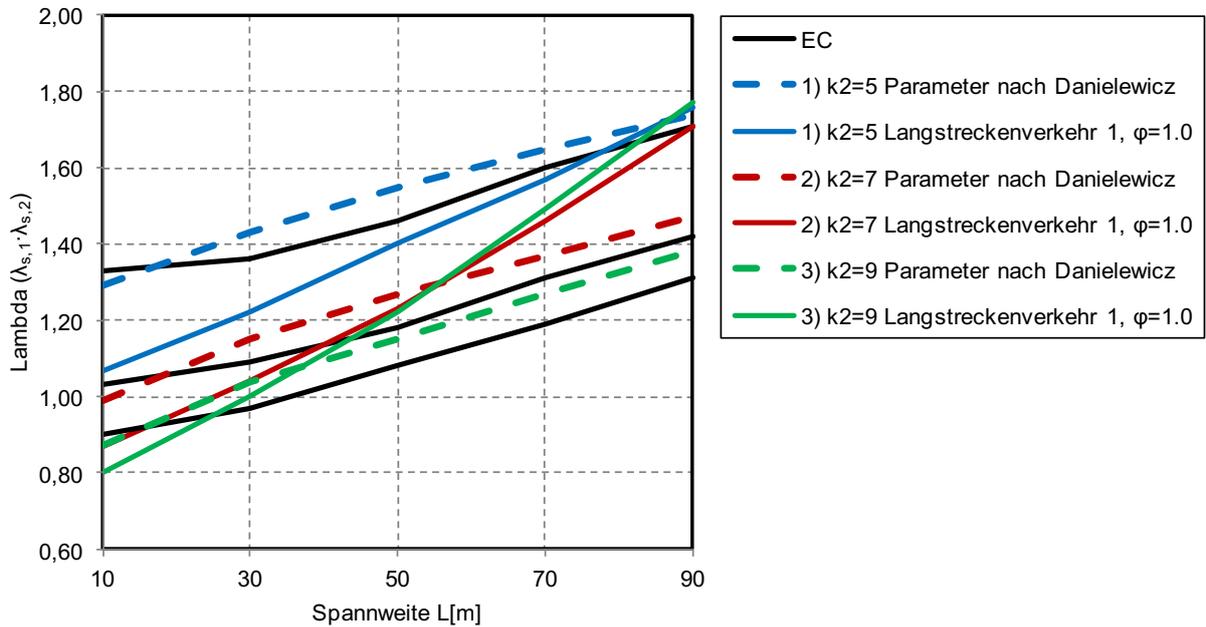


Abbildung B.2: Vergleich zwischen Regelung nach [DIN EN 1992-2/NA], Ergebnissen mit Eingangsparametern nach Danielewicz (vgl. Tabelle B.10) und Ergebnissen mit Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" ohne Schwingbeiwert im fließenden Verkehr (vgl. Tabelle B.9) - Dreifeldträger (Stützmoment  $M_B$ )

## Anhang C: M- $\sigma$ -Beziehungen

Im folgenden Anhang werden die M- $\sigma$ -Beziehungen ausgewählter Spannungspunkte der detailliert betrachteten Beispielbrücken B1 und B2 dargestellt.

Die M- $\sigma$ -Beziehungen werden mit dem Programm INCA2 erstellt [Pfei11]. Das Programm ermöglicht die Bestimmung des Spannungs- und Dehnungszustandes für beliebige Querschnitte unter Biegung mit Längskraft und unter Berücksichtigung nichtlinearen Materialverhaltens (wie z.B. nichtlineare  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen und gerissene Querschnittsteile). Die Dehnungsebene des Querschnitts wird dabei iterativ ermittelt, bis ein Gleichgewichtszustand zwischen den Spannungen des Querschnitts und den äußeren Schnittgrößen ( $N$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) herrscht.

Den hier durchgeführten Berechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass sämtliche Einwirkungen

vor dem Verpressen der Hüllrohre auf den Netto-Querschnitt wirken ( $P_{m,0}$ ,  $M_{p,dir,0}$ ,  $M_{p,indir,0}$ ,  $M_{g1}$ ), alle übrigen Einwirkungen auf den ideellen Querschnitt ( $M_{g2}$ ,  $M_{\Delta S}$ ,  $M_{\Delta T}$ ,  $M_{LM1}$ ,  $M_{ELM3}$  bzw.  $M_{ELM4}$ , sowie die Spannkraftverluste  $\Delta P_{m,\infty}$ ,  $\Delta M_{p,dir,\infty}$ ,  $\Delta M_{p,indir,\infty}$ ). Die Spannungen am Netto-Querschnitt werden für die weiteren Berechnungen am ideellen Querschnitt als Vordehnung von Beton, Bewehrung und Spannstahl angesetzt.

Die vom Programm automatisch erstellten M- $\kappa$ -Beziehungen werden in einem anschließenden Rechenschritt in M- $\sigma$ -Beziehungen umgerechnet. Das unterschiedliche Verbundverhalten von Bewehrung und Spannstahl wird dabei durch eine Erhöhung der Betonstahlspannung nach [DIN EN 1992-2] berücksichtigt.

**Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)**

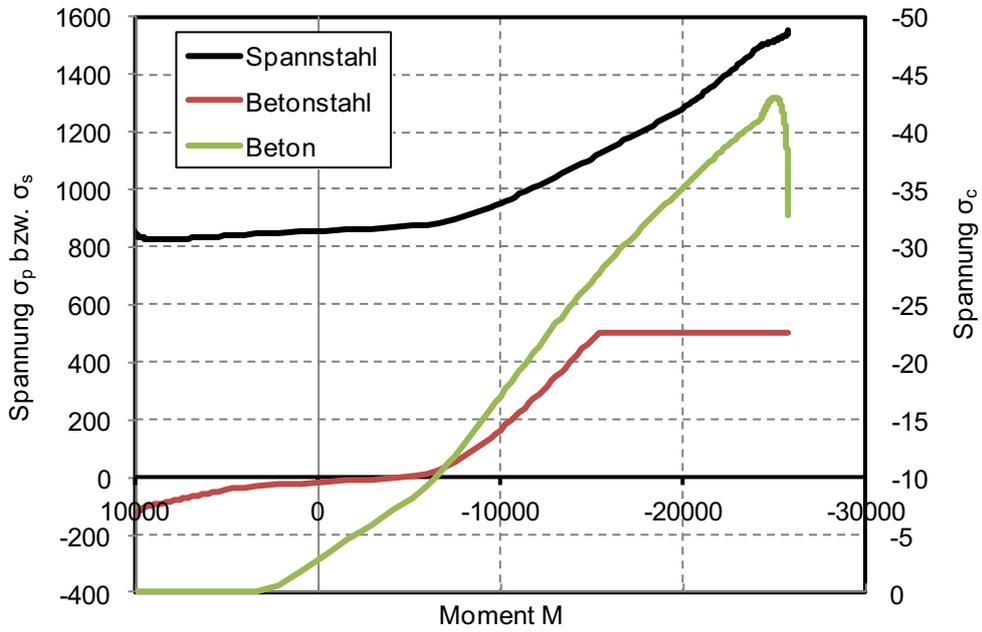


Abbildung C.1: M- $\sigma$ -Beziehungen im Stützbereich für Spannstahl  $\sigma_p$  und Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $0,9 \cdot M_{p,indir}$ )

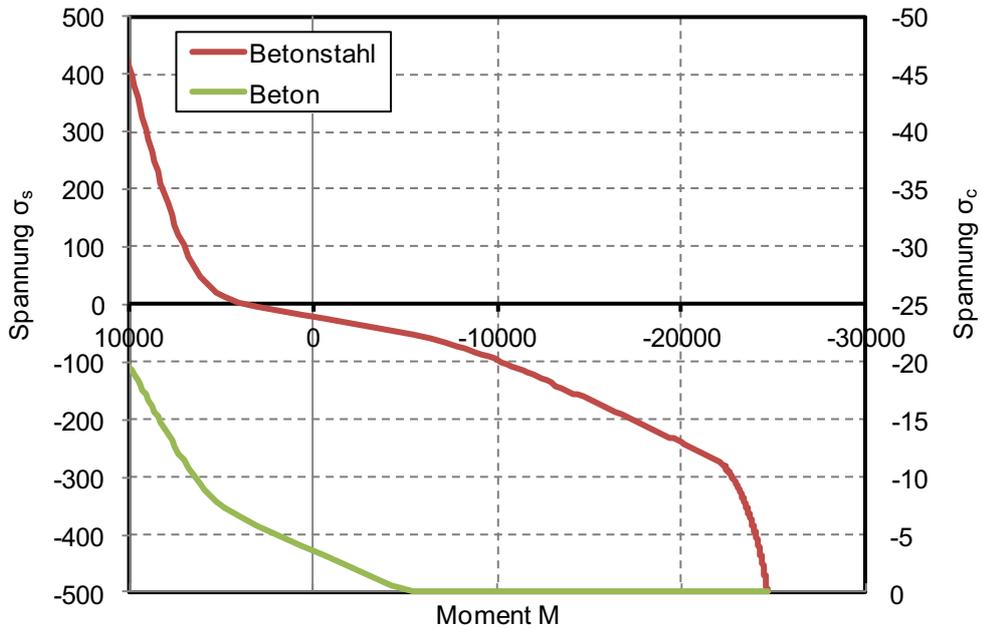


Abbildung C.2: M- $\sigma$ -Beziehungen im Stützbereich für Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $1,1 \cdot M_{p,indir}$ )

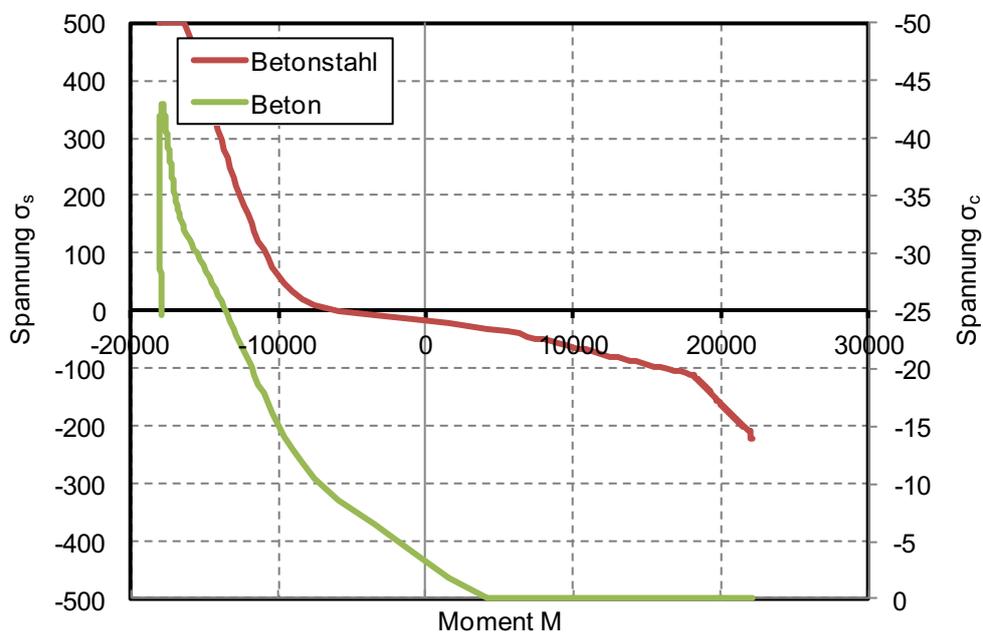


Abbildung C.3: M- $\sigma$ -Beziehungen im Feldbereich für Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $0,9 \cdot M_{p,indir}$ )

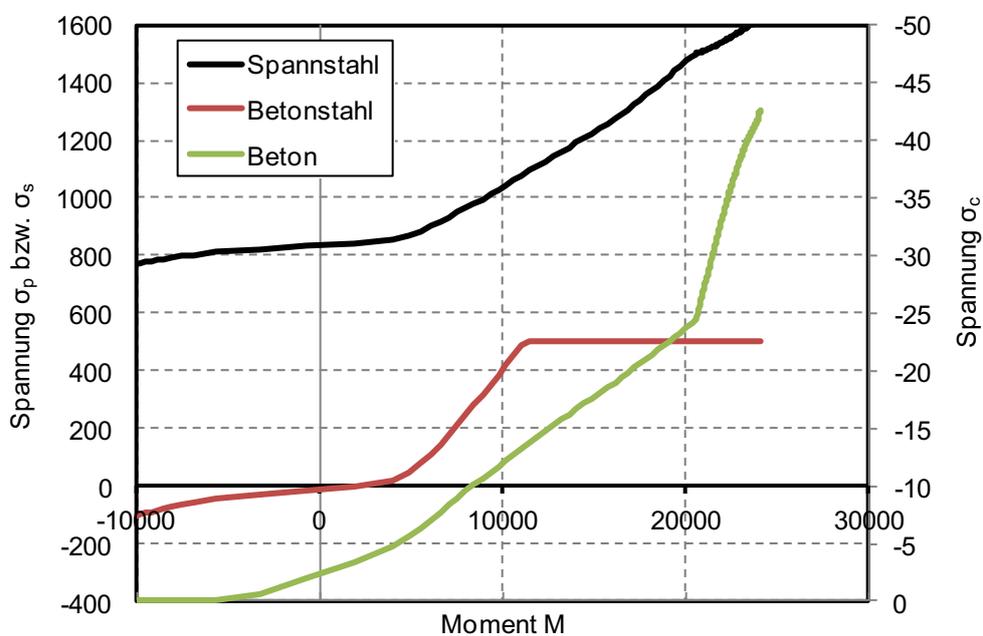


Abbildung C.4: M- $\sigma$ -Beziehungen im Feldbereich für Spannstahl  $\sigma_p$  und Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $1,1 \cdot M_{p,indir}$ )

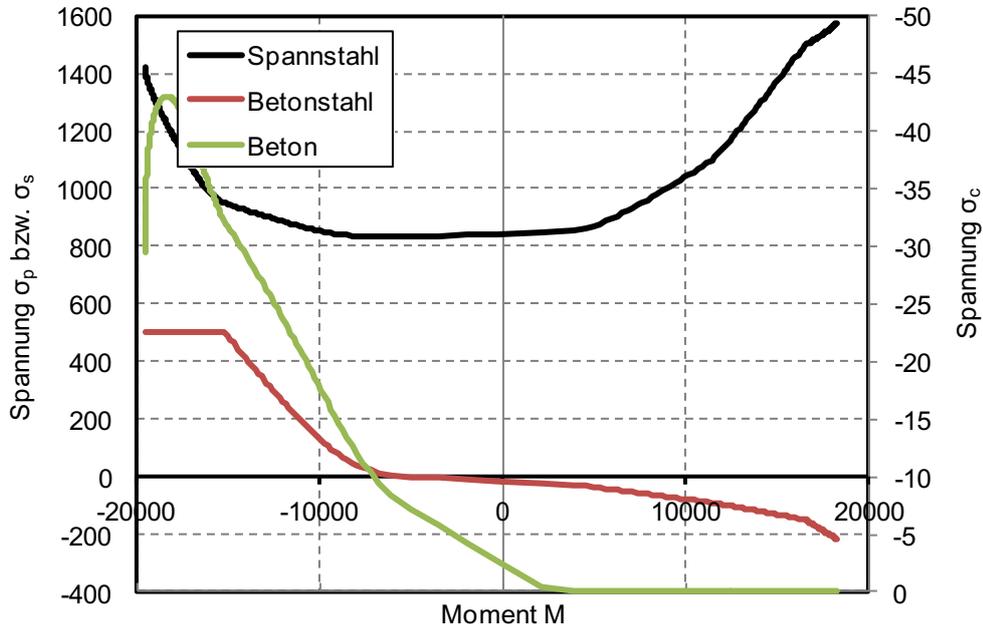


Abbildung C.5: M- $\sigma$ -Beziehungen am Momentennullpunkt für Spannstahl  $\sigma_p$ , Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $0,9 \cdot M_{p,indir}$ )

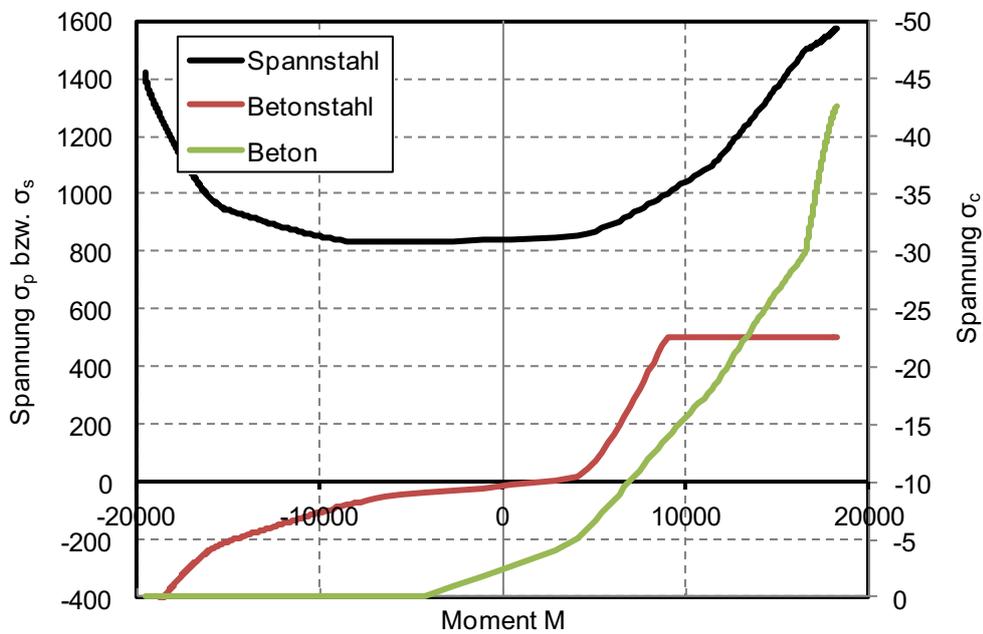


Abbildung C.6: M- $\sigma$ -Beziehungen am Momentennullpunkt für Spannstahl  $\sigma_p$ , Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $1,1 \cdot M_{p,indir}$ )

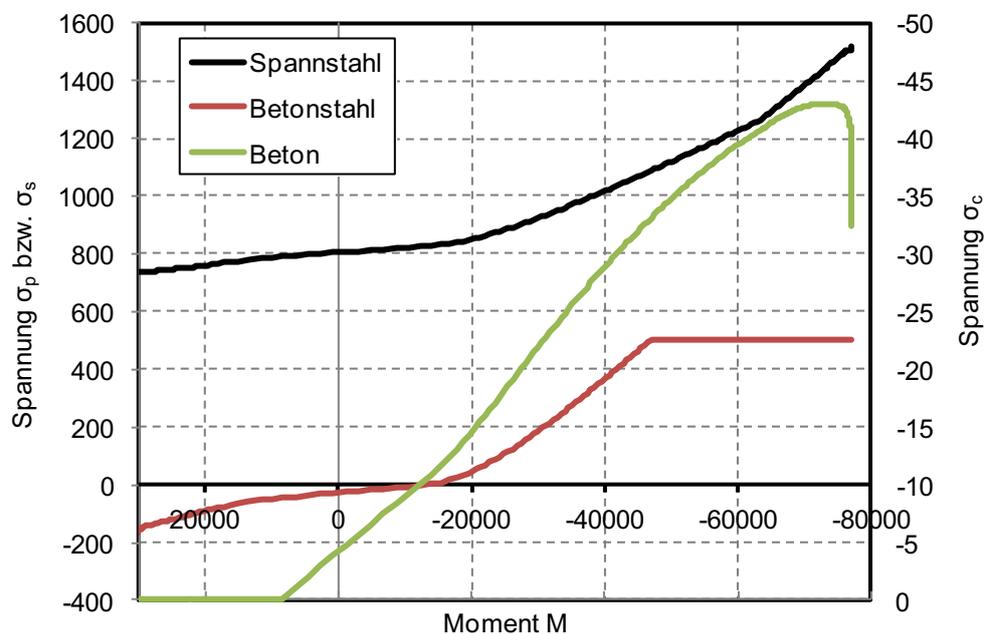
**Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)**


Abbildung C.7: M- $\sigma$ -Beziehungen im Stützbereich für Spannstahl  $\sigma_p$  und Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $0,9 \cdot M_{p,indir}$ )

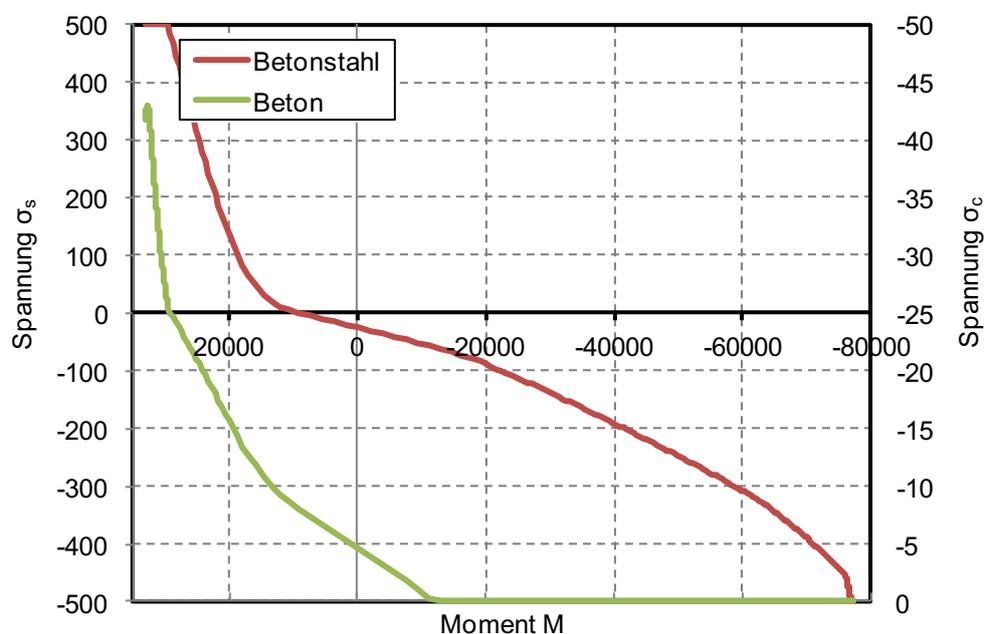


Abbildung C.8: M- $\sigma$ -Beziehungen im Stützbereich für Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $1,1 \cdot M_{p,indir}$ )

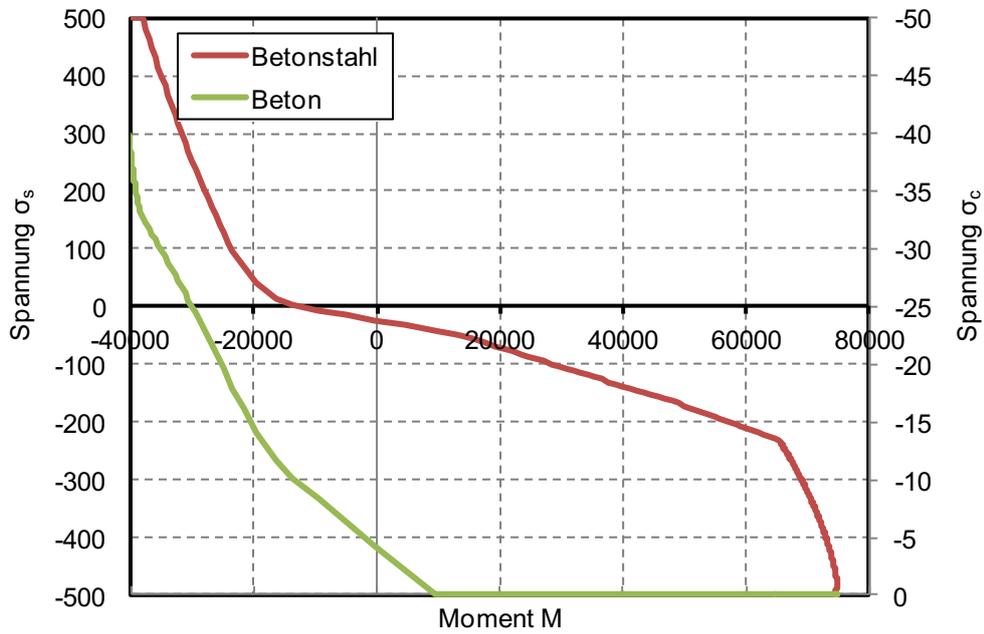


Abbildung C.9: M- $\sigma$ -Beziehungen im Feldbereich für Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $0,9 \cdot M_{p,indir}$ )

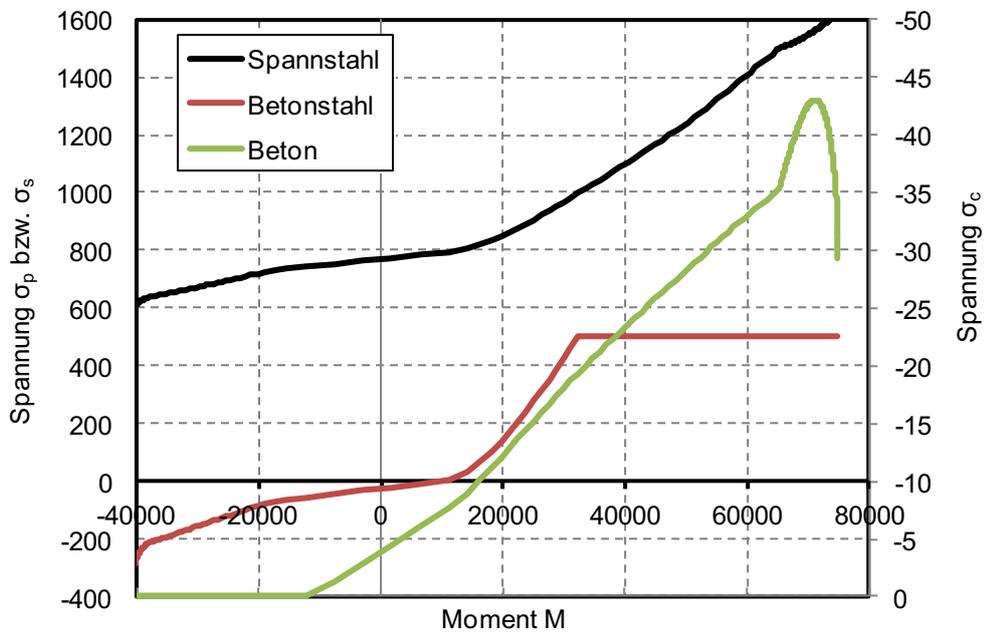


Abbildung C.10: M- $\sigma$ -Beziehungen im Feldbereich für Spannstahl  $\sigma_p$  und Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $1,1 \cdot M_{p,indir}$ )

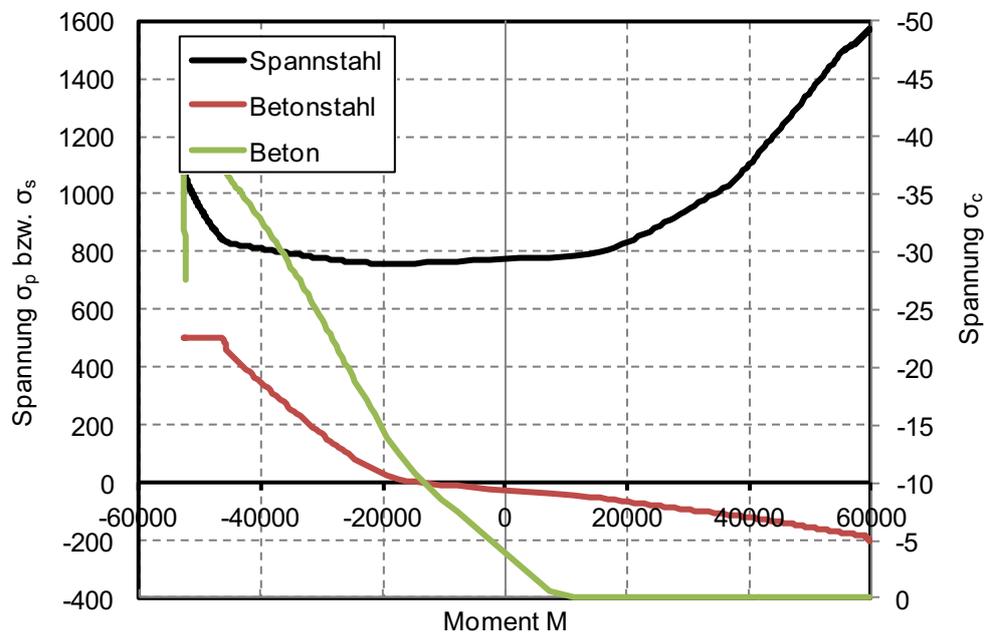


Abbildung C.11: M- $\sigma$ -Beziehungen am Momentennullpunkt für Spann Stahl  $\sigma_p$ , Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $0,9 \cdot M_{p,indir}$ )

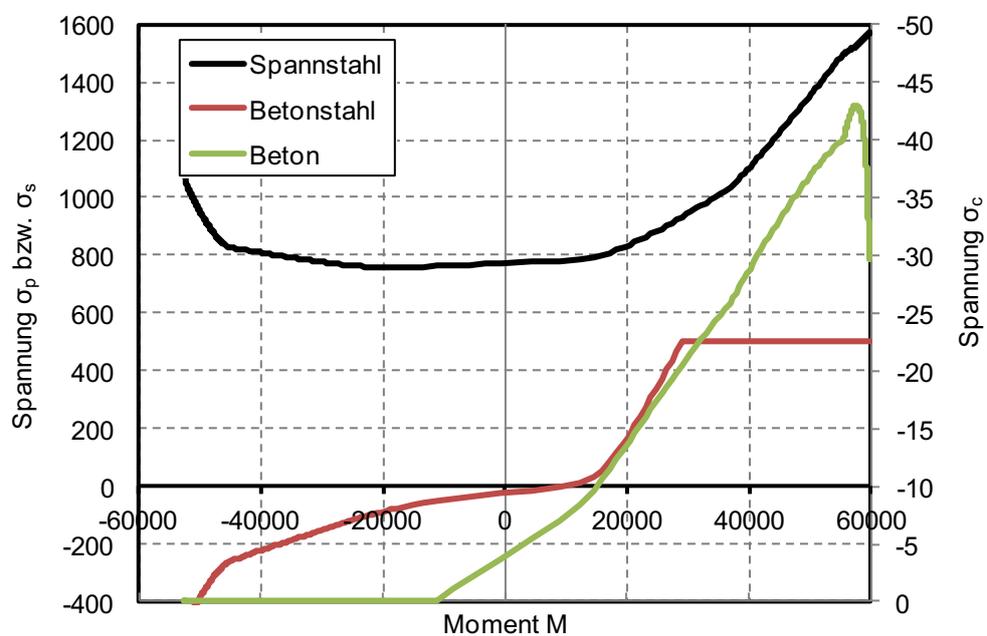


Abbildung C.12: M- $\sigma$ -Beziehungen am Momentennullpunkt für Spann Stahl  $\sigma_p$ , Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_{p,dir}$ ,  $1,1 \cdot M_{p,indir}$ )

## Anhang D: Einfluss der Linearisierung von M- $\sigma$ -Beziehung und Wöhlerlinie auf $\Delta\sigma_{E,1}$

Die folgende Zusammenstellung dient zur Ergänzung der in Kapitel 6 vorgestellten Ergebnisse zur Bewertung des Einflusses einer Linearisierung der M- $\sigma$ -Beziehung und Wöhlerlinie. Der Umfang der untersuchten Spannungspunkte gliedert sich wie folgt:

### Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)

- Stützbereich OK  $\sigma_p$
- Feldbereich UK  $\sigma_p$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$
- Stützbereich OK  $\sigma_s$
- Stützbereich UK  $\sigma_s$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$

### Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)

- Stützbereich OK  $\sigma_p$
- Feldbereich UK  $\sigma_p$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$
- Stützbereich OK  $\sigma_s$

- Stützbereich UK  $\sigma_s$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$

### Beispielbrücke B3 (L = 40m+40m)

- Stützbereich OK  $\sigma_{p1}$
- Stützbereich OK  $\sigma_{p2}$
- Feldbereich UK  $\sigma_{p1}$
- Feldbereich UK  $\sigma_{p2}$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_{p2}$
- Stützbereich OK  $\sigma_s$
- Stützbereich UK  $\sigma_s$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$

### Beispielbrücke B4 (L $\approx$ 25m)

- Feldbereich UK  $\sigma_p$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$

### Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)

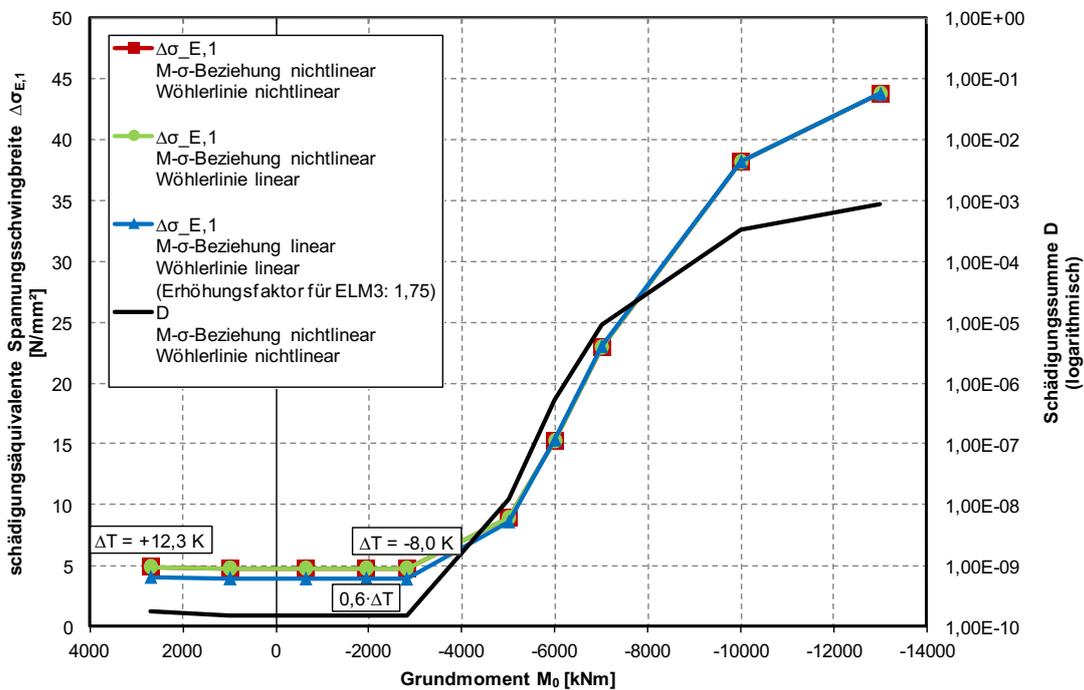


Abbildung D.1: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

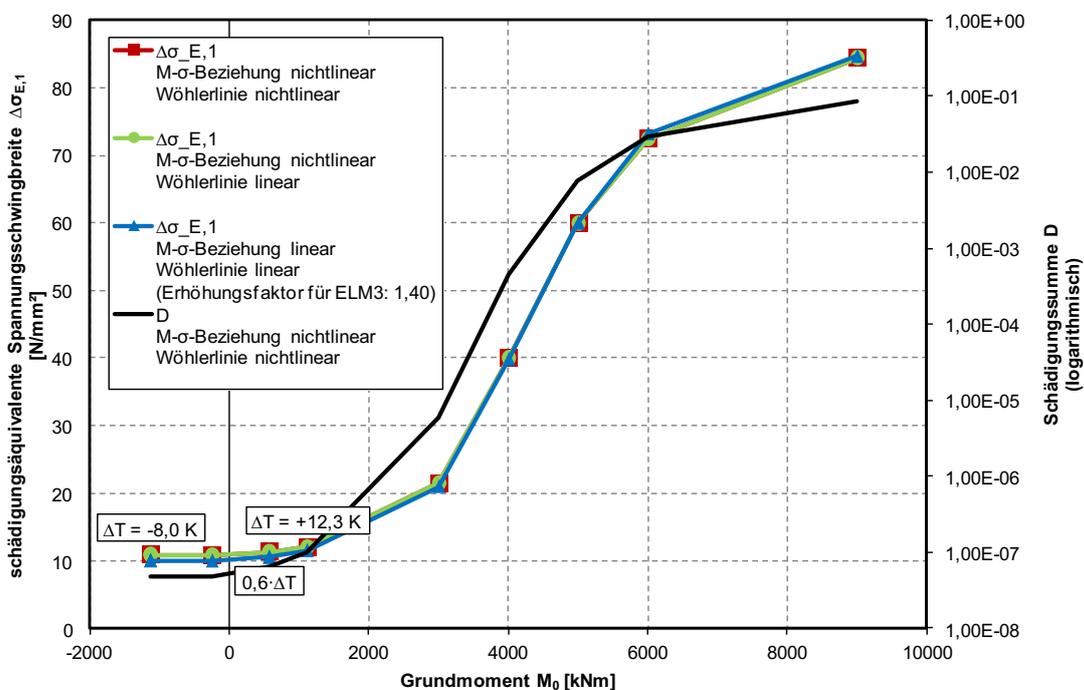


Abbildung D.2: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

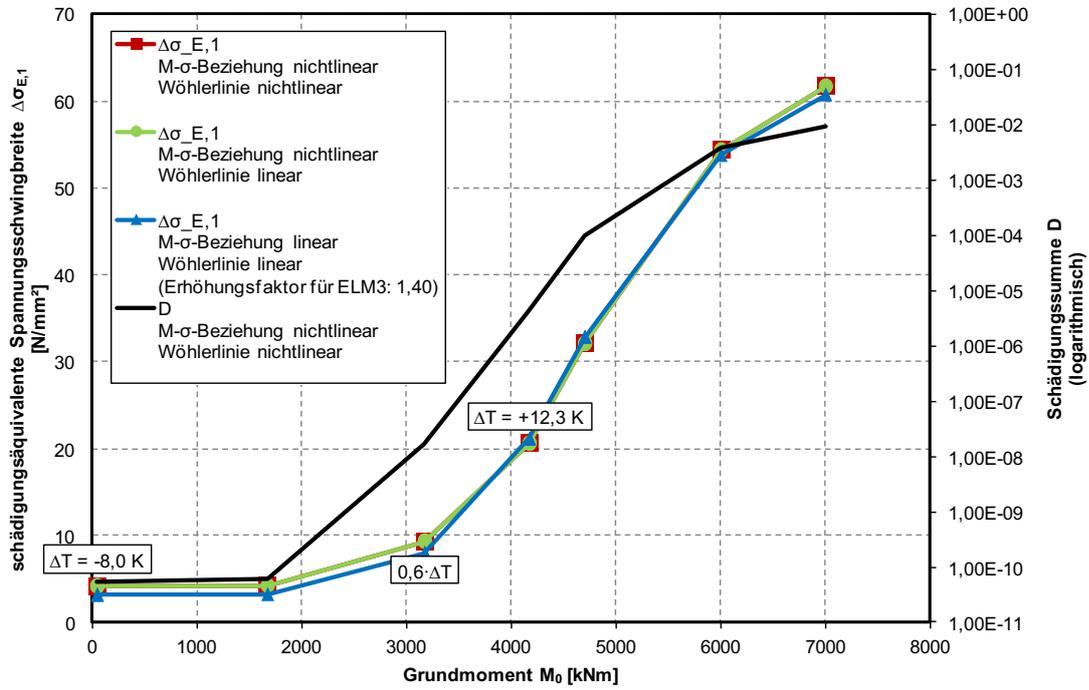


Abbildung D.3: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

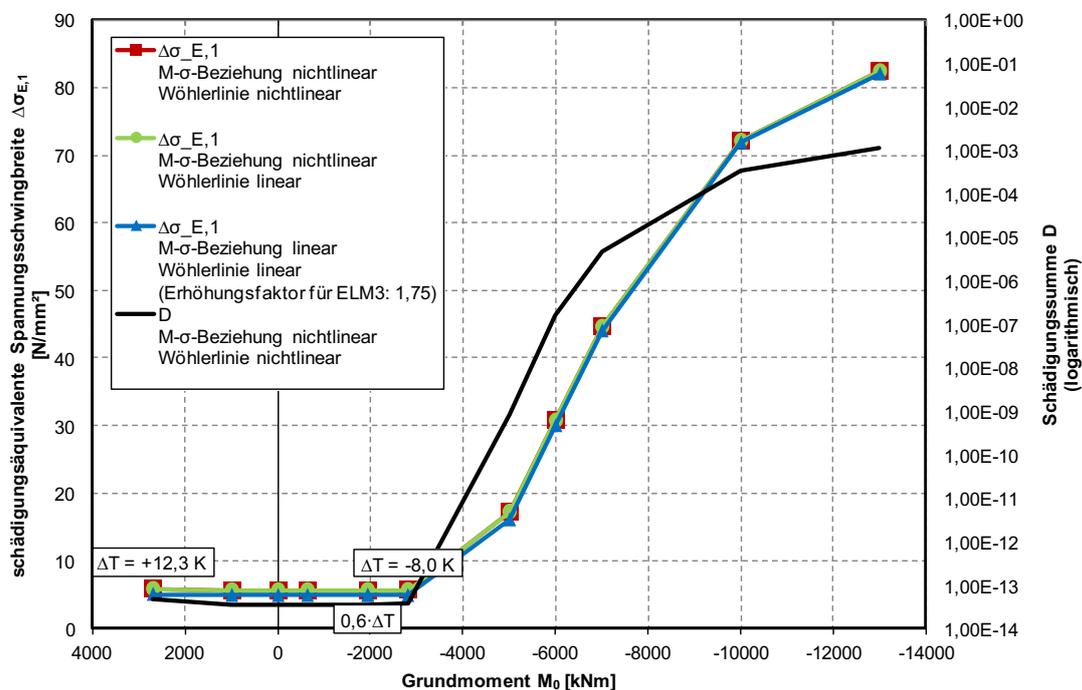


Abbildung D.4: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK ( $\sigma_s$ ) ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

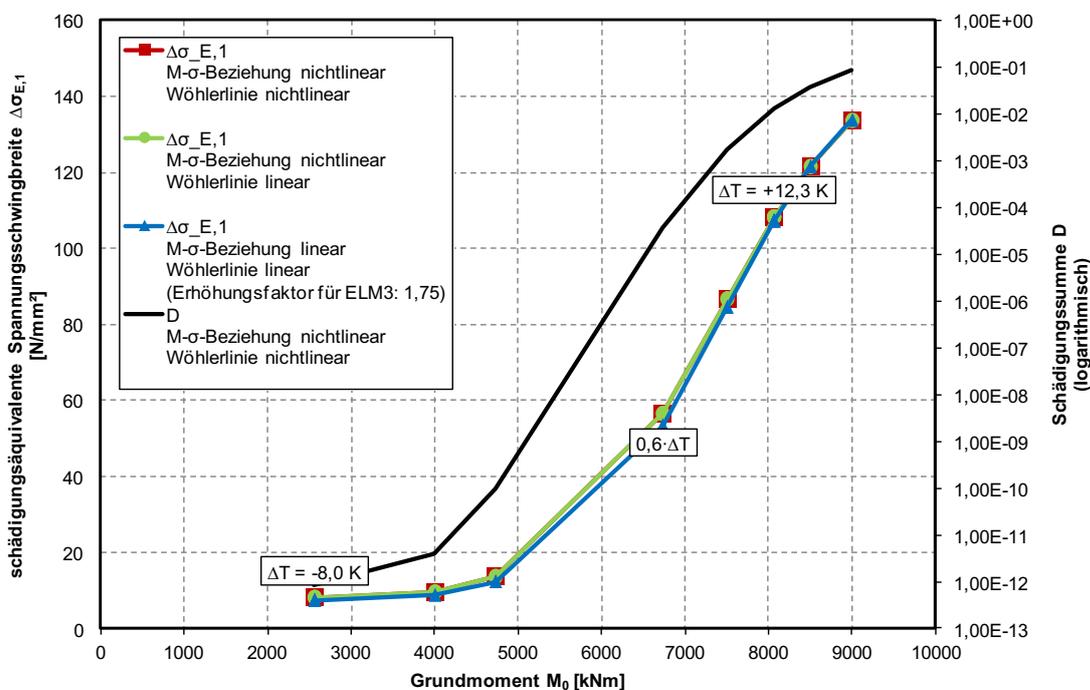


Abbildung D.5: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK ( $\sigma_s$ ) ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

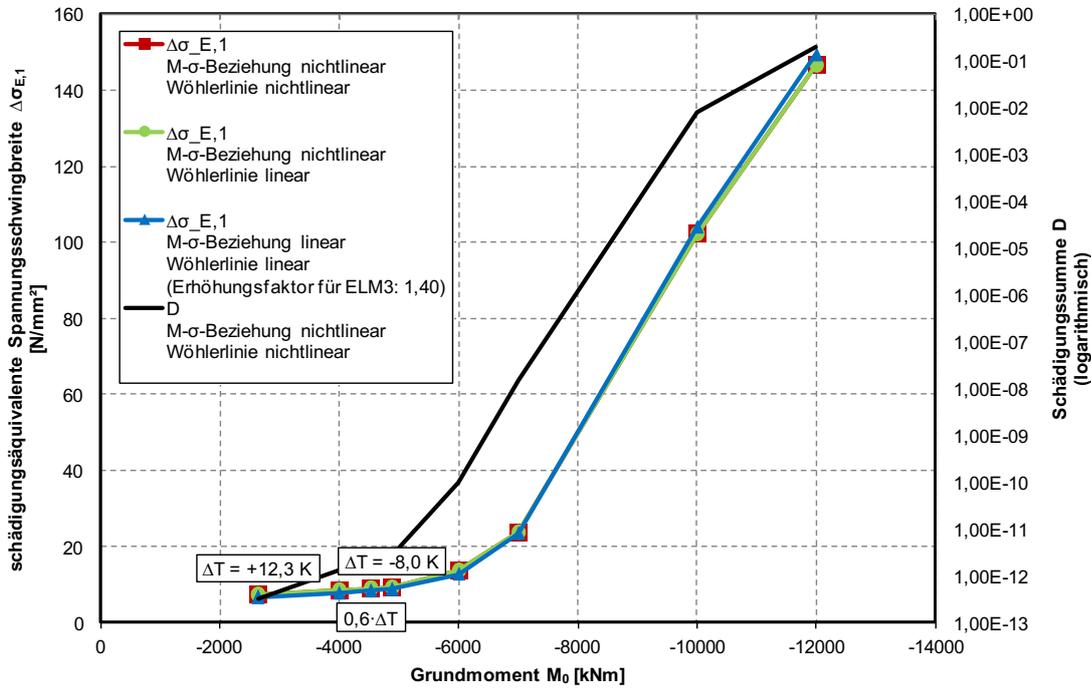


Abbildung D.6: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

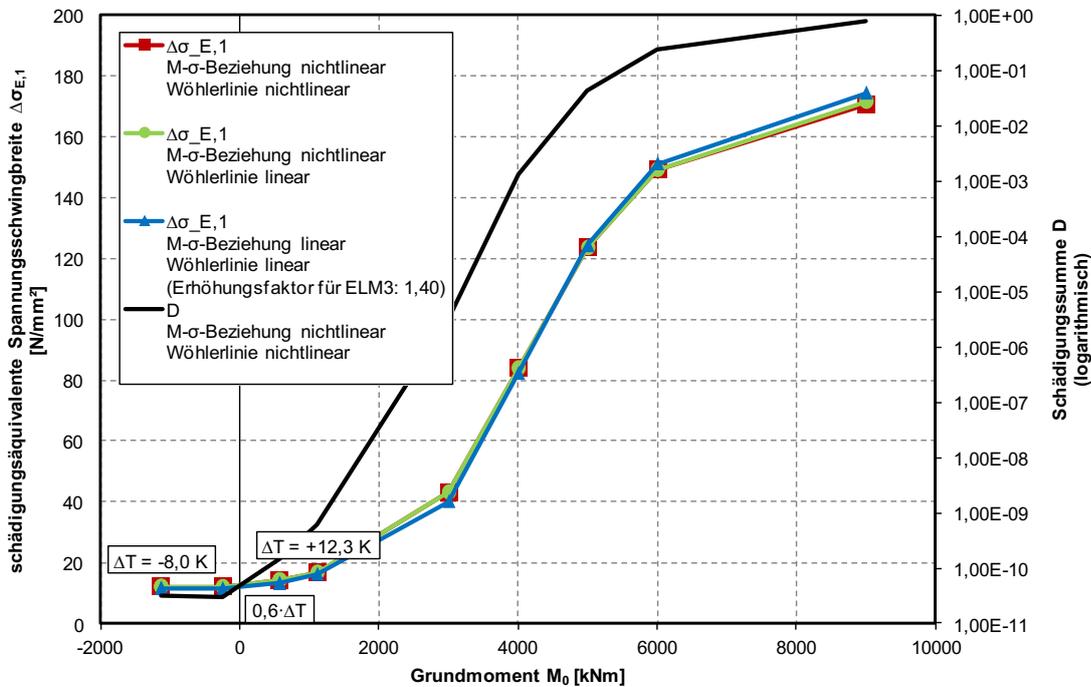


Abbildung D.7: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

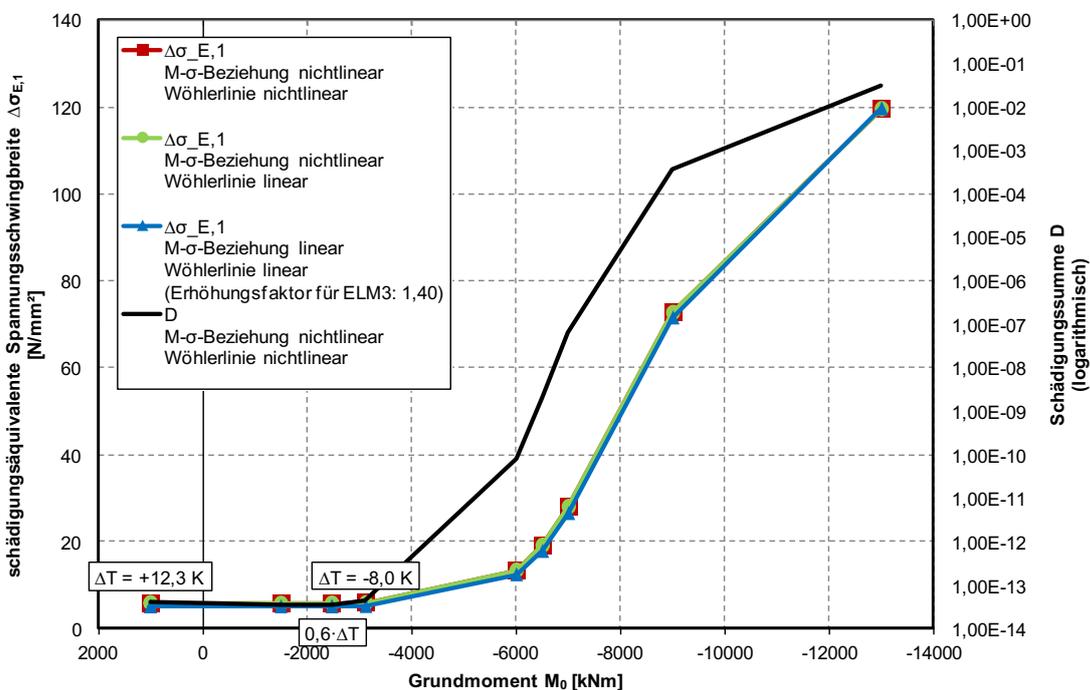


Abbildung D.8: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

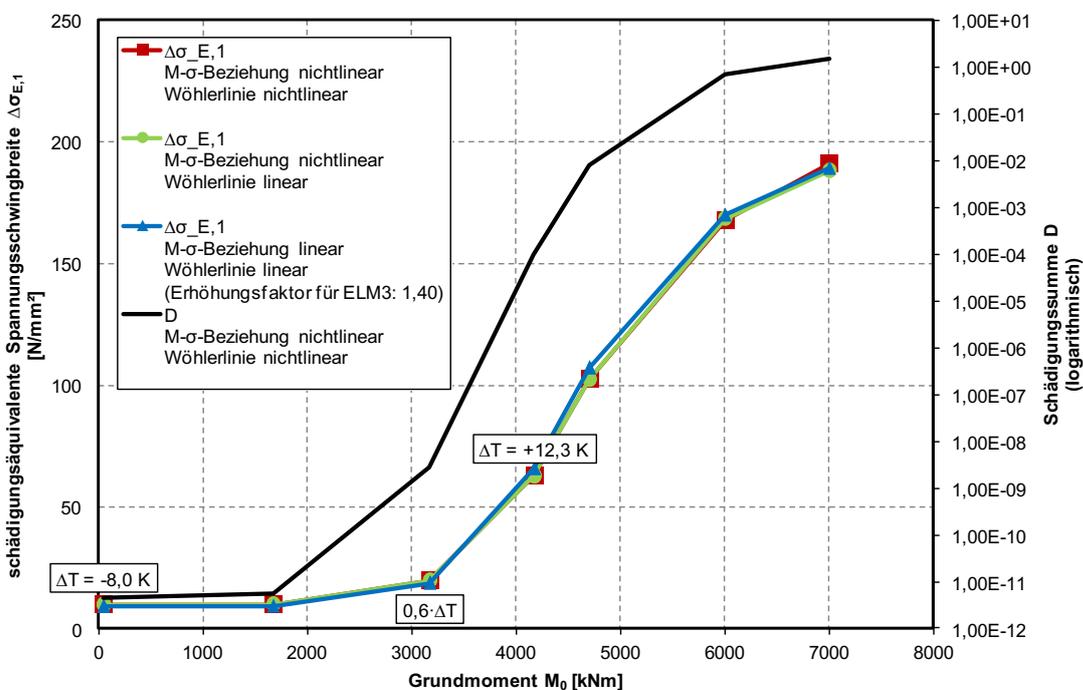


Abbildung D.9: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)

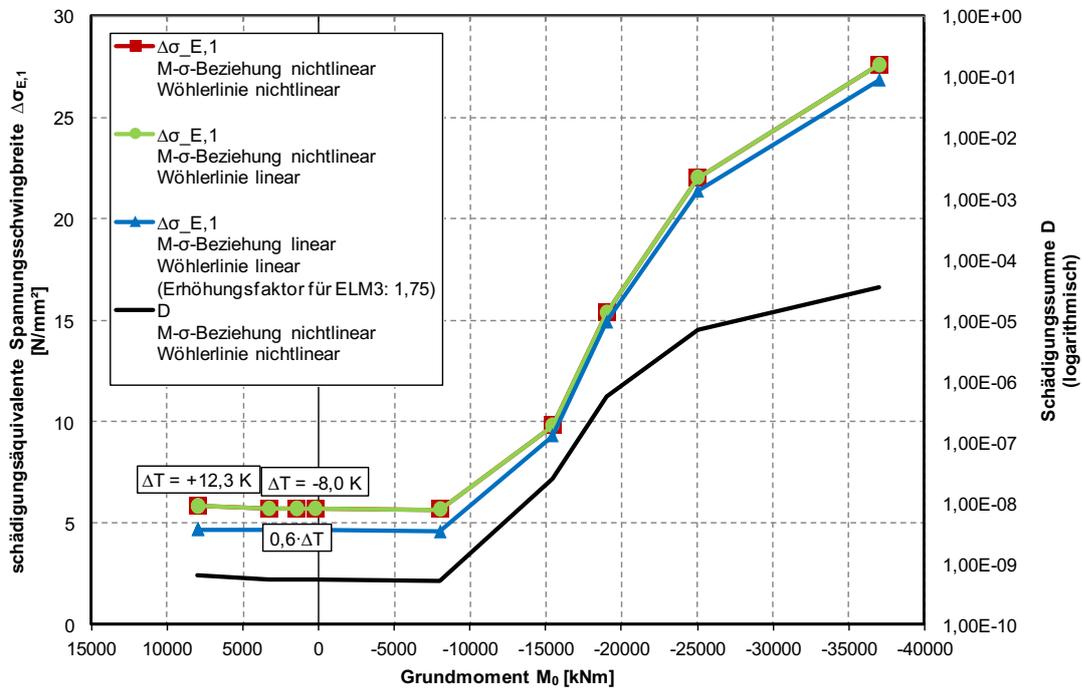


Abbildung D.10: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

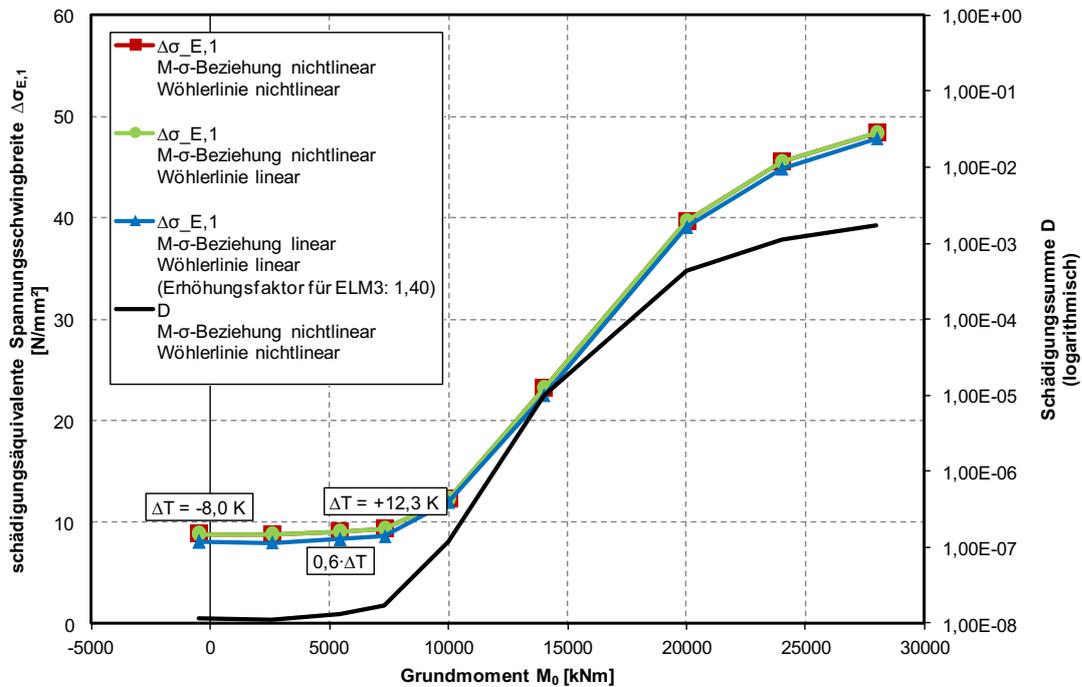


Abbildung D.11: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

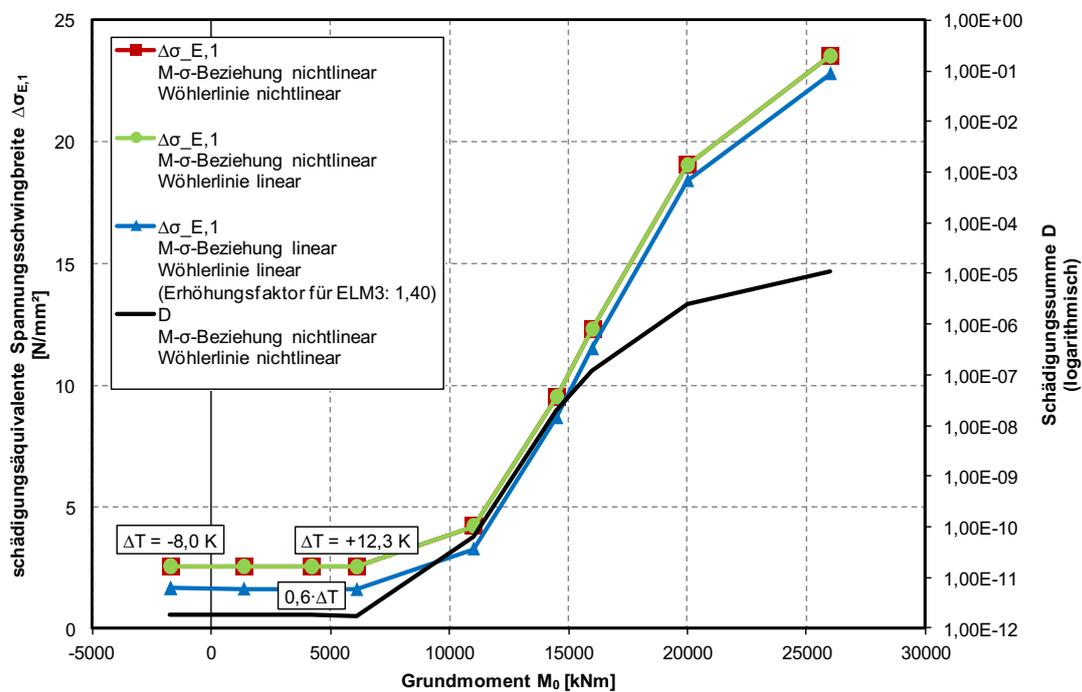


Abbildung D.12: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

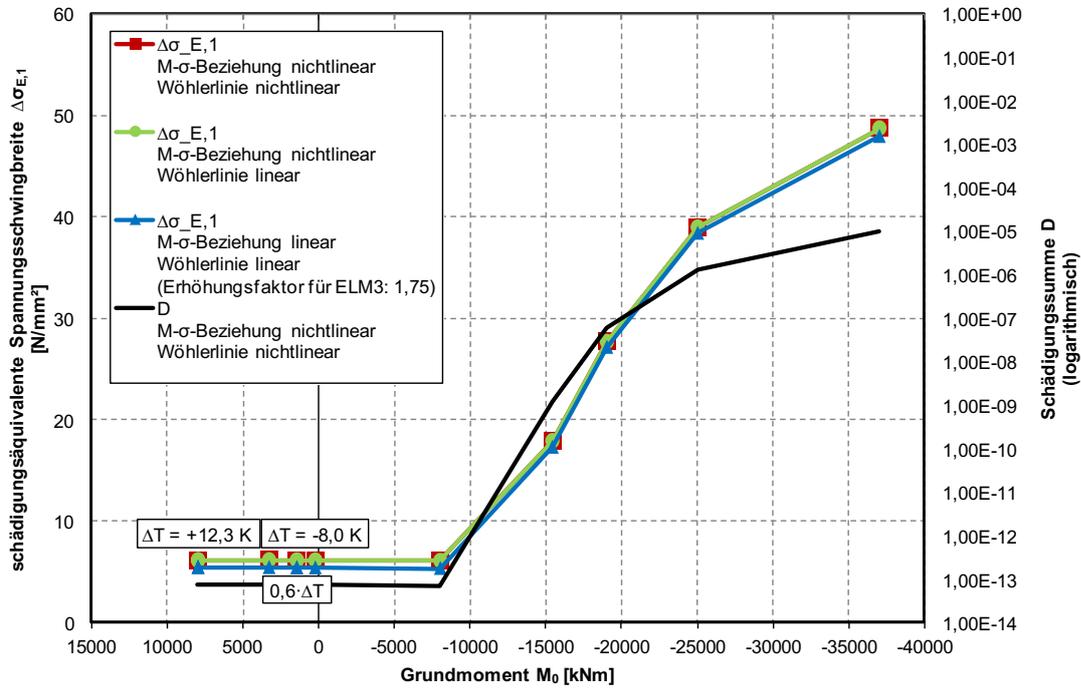


Abbildung D.13: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

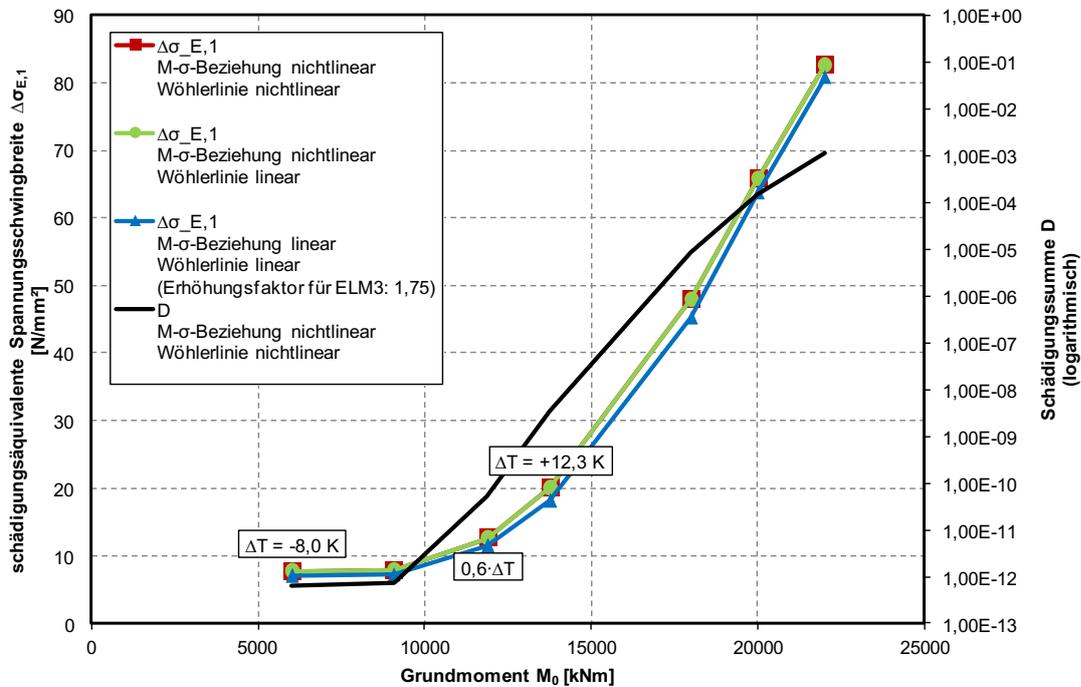


Abbildung D.14: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

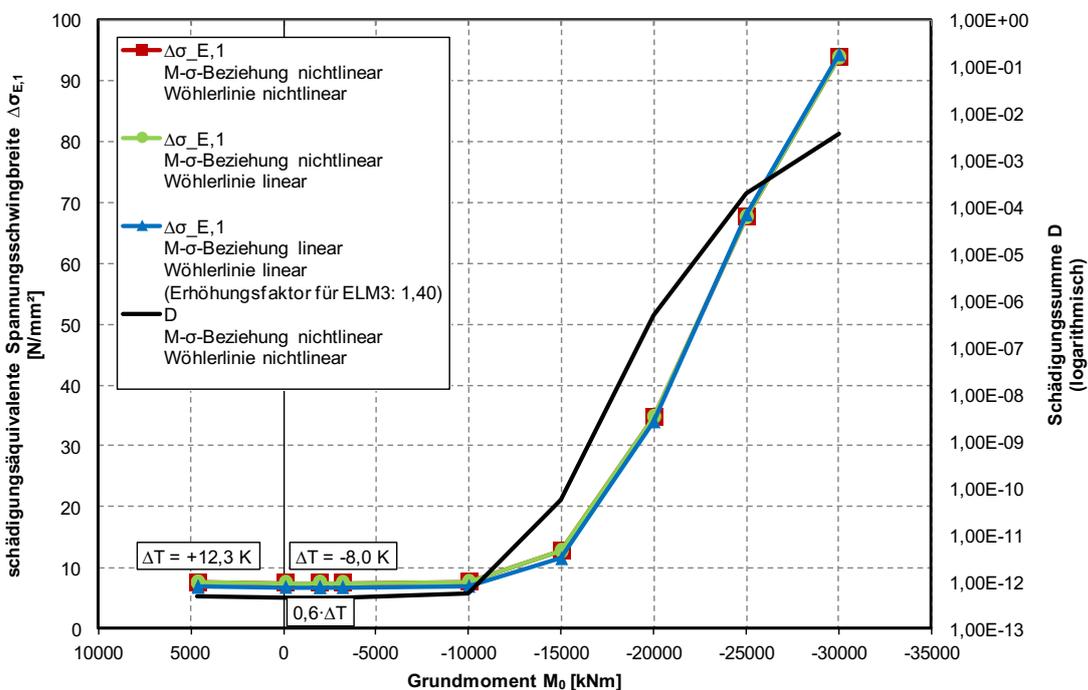


Abbildung D.15: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

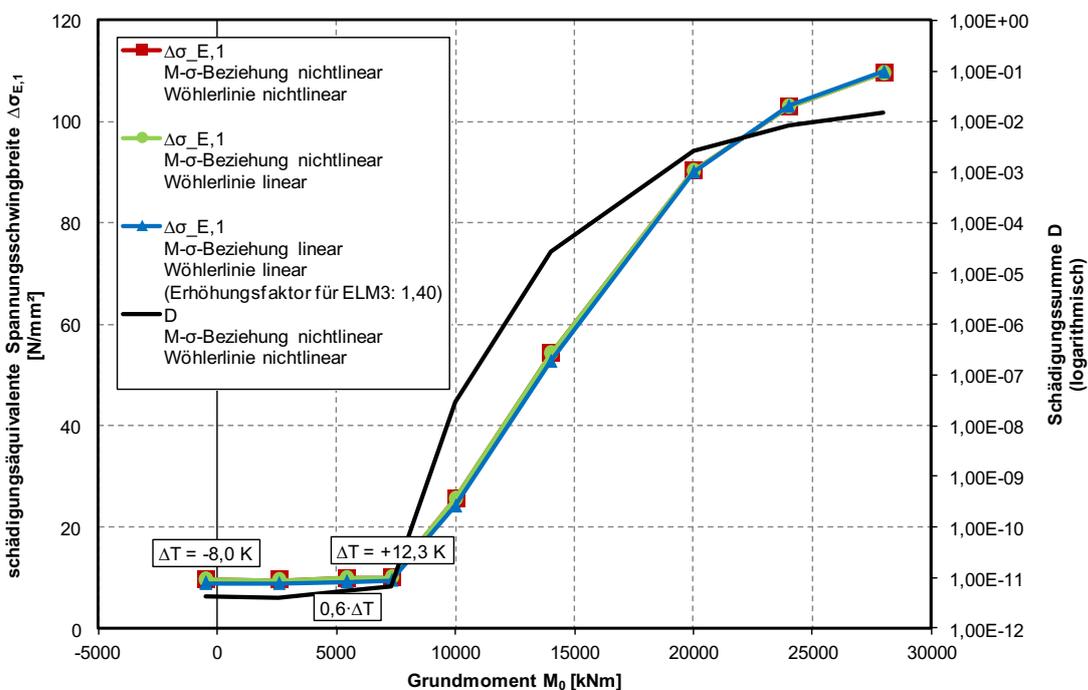


Abbildung D.16: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

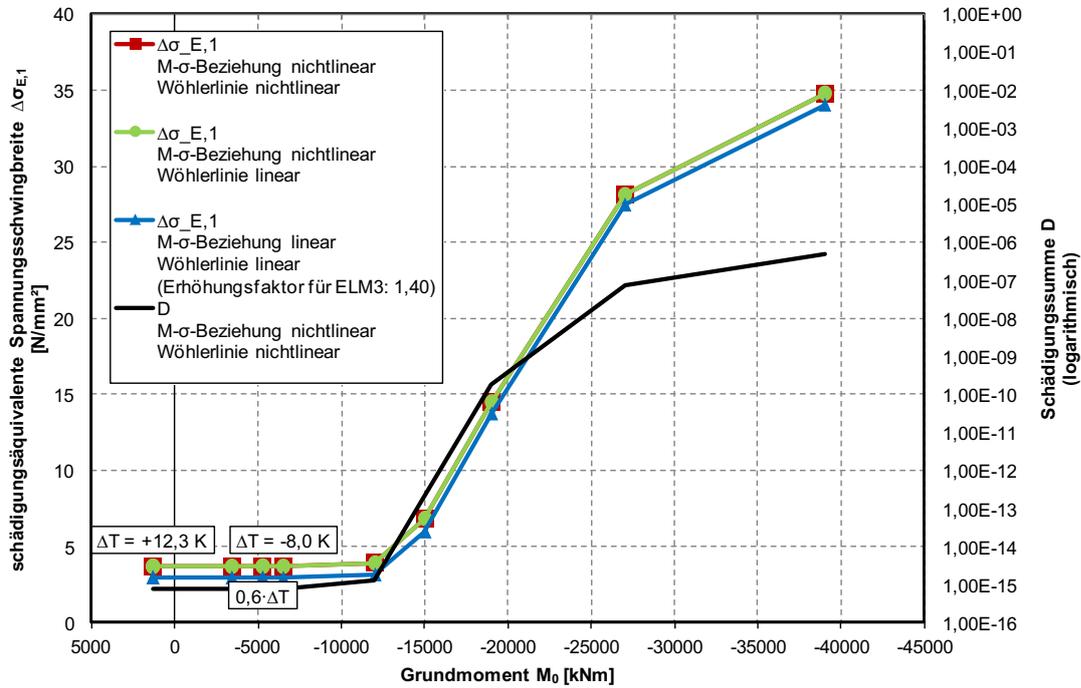


Abbildung D.17: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

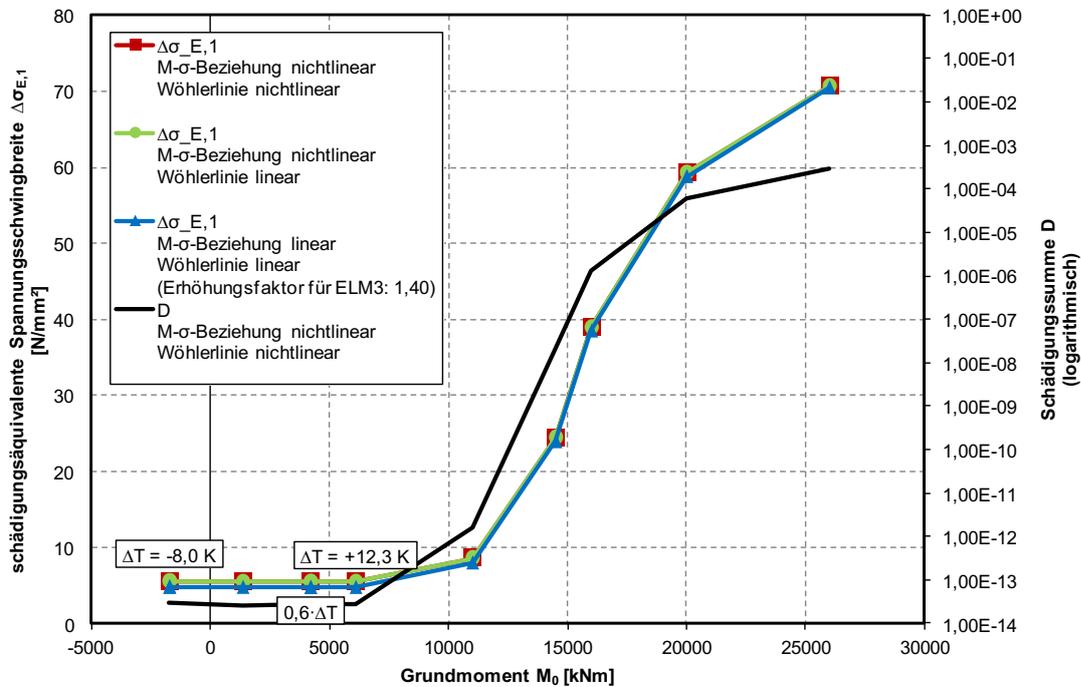


Abbildung D.18: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

### Beispielbrücke B3 (L = 40m+40m)

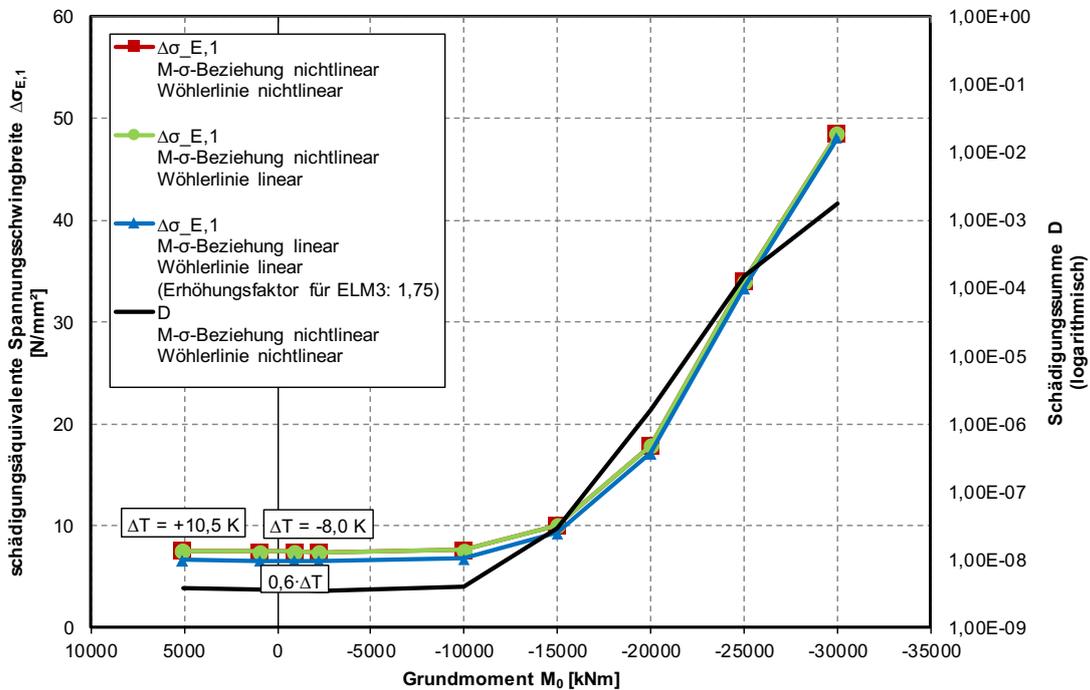


Abbildung D.19: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

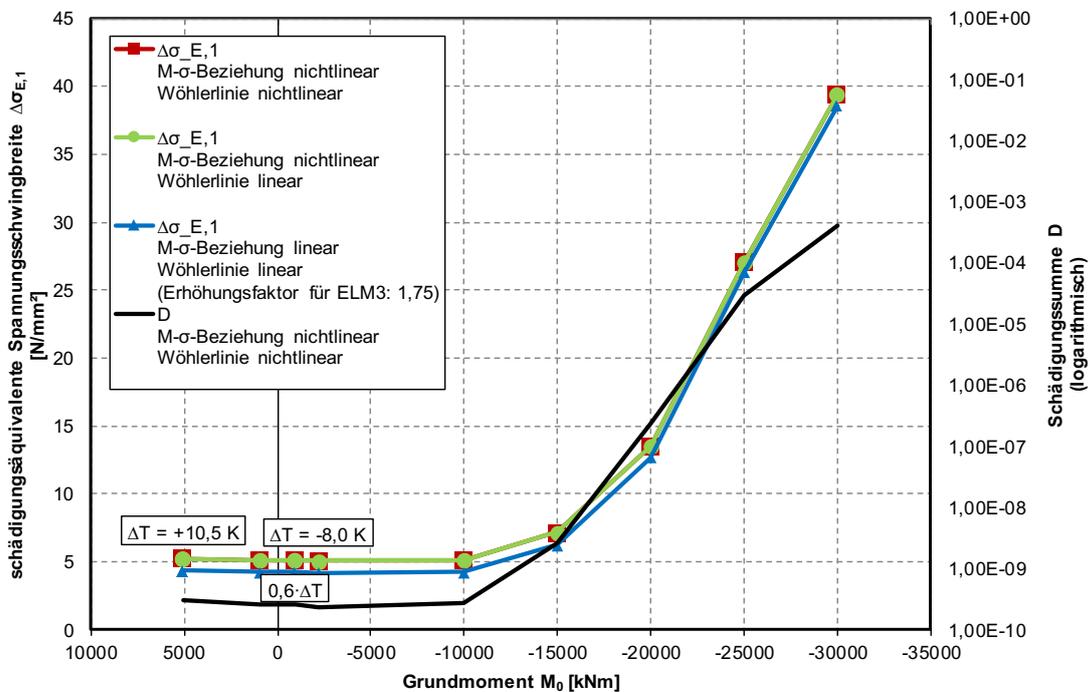


Abbildung D.20: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

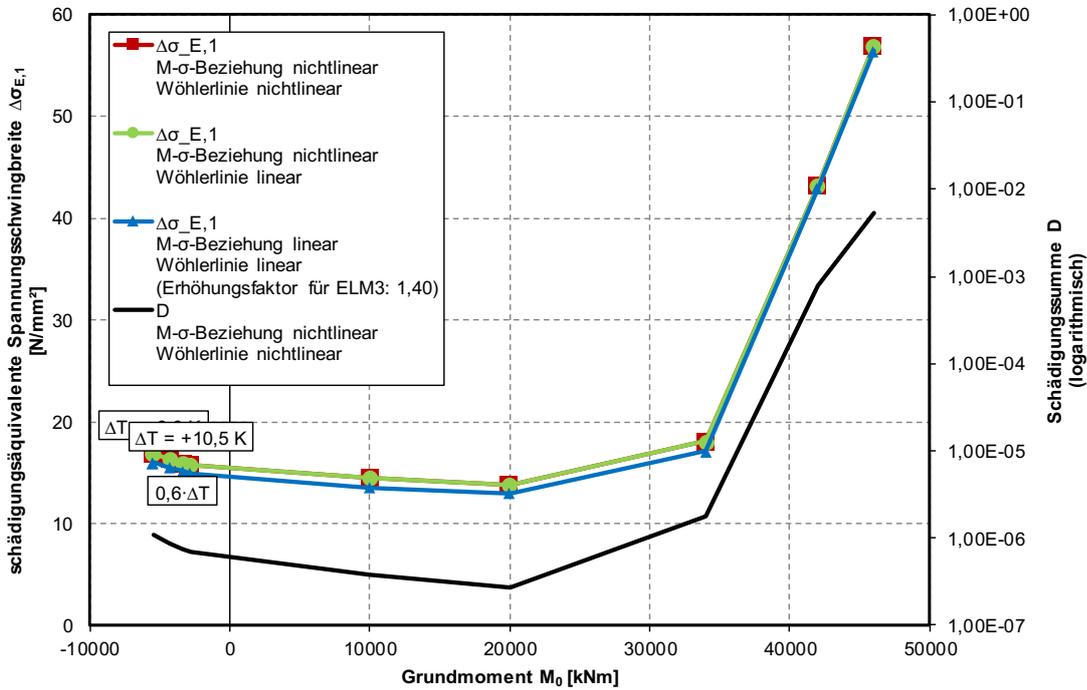


Abbildung D.21: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

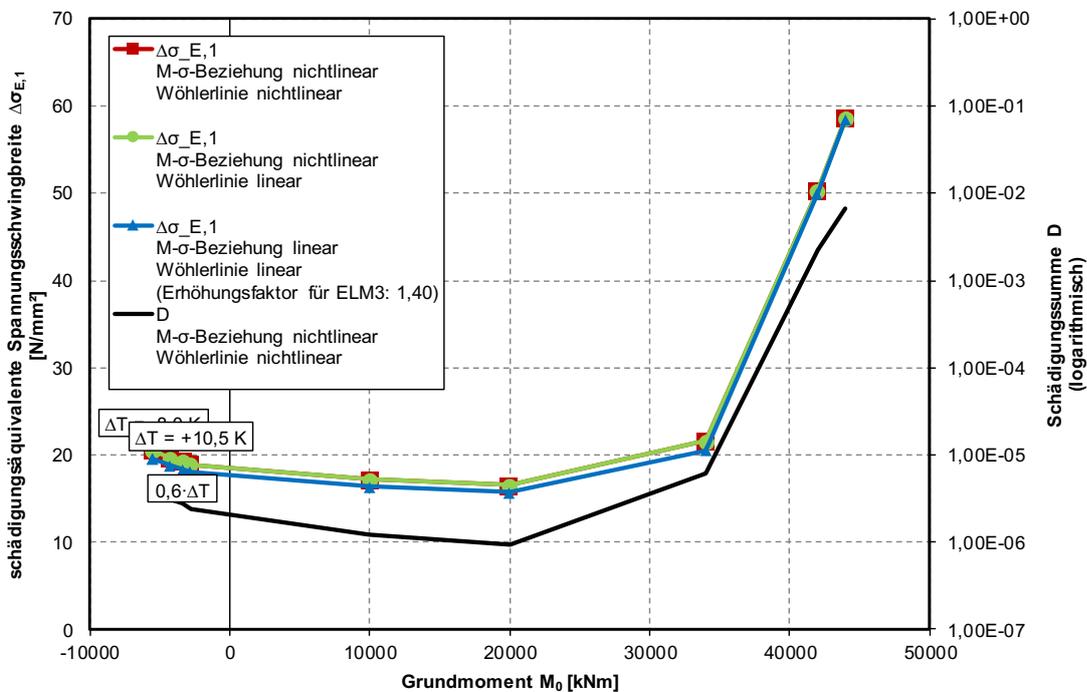


Abbildung D.22: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

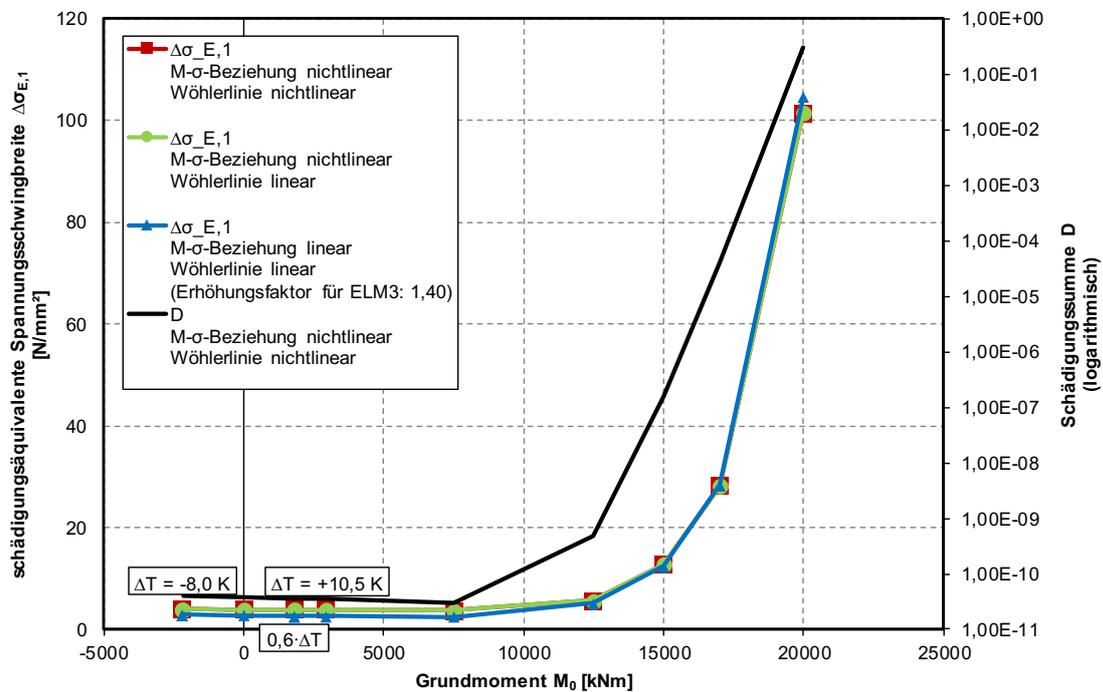


Abbildung D.23: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

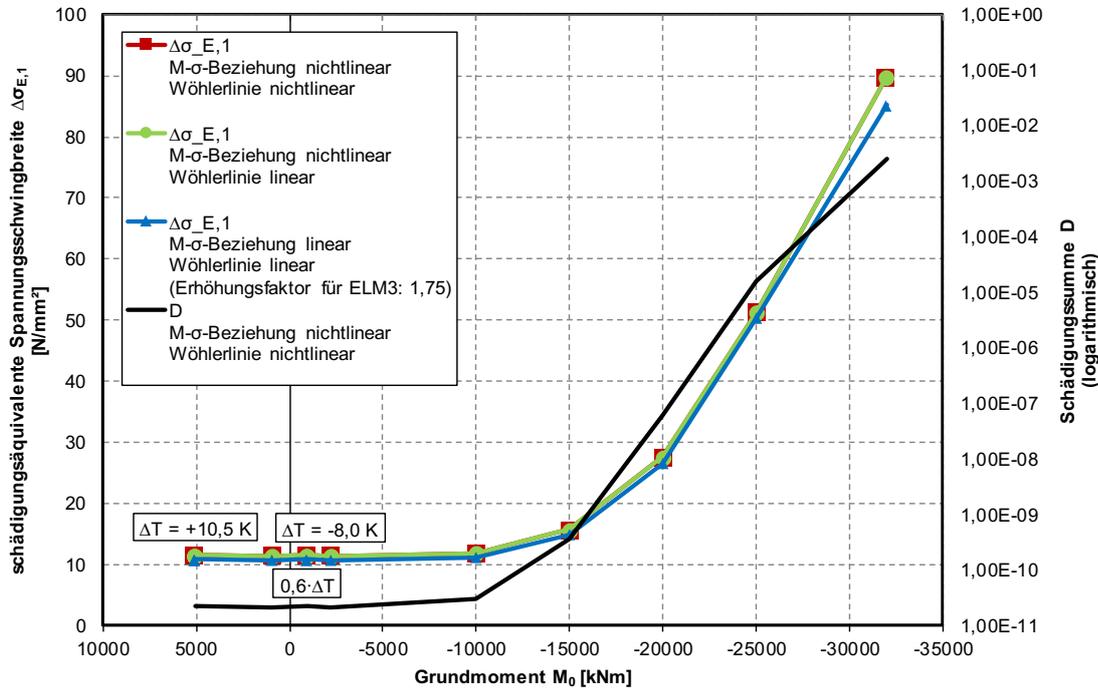


Abbildung D.24: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

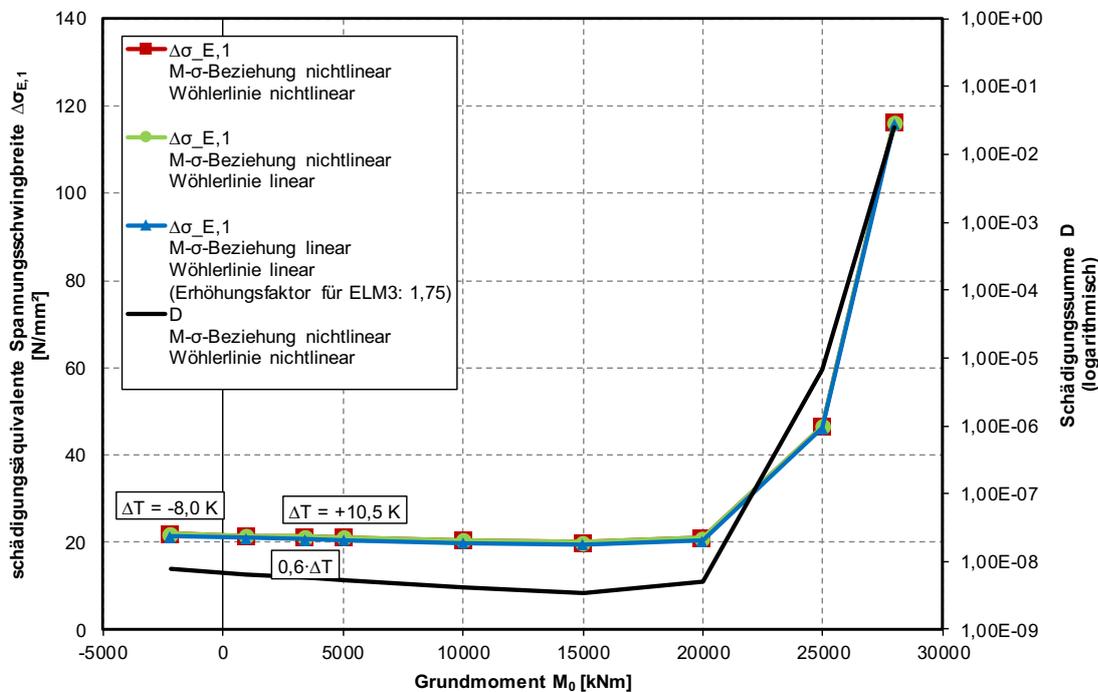


Abbildung D.25: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

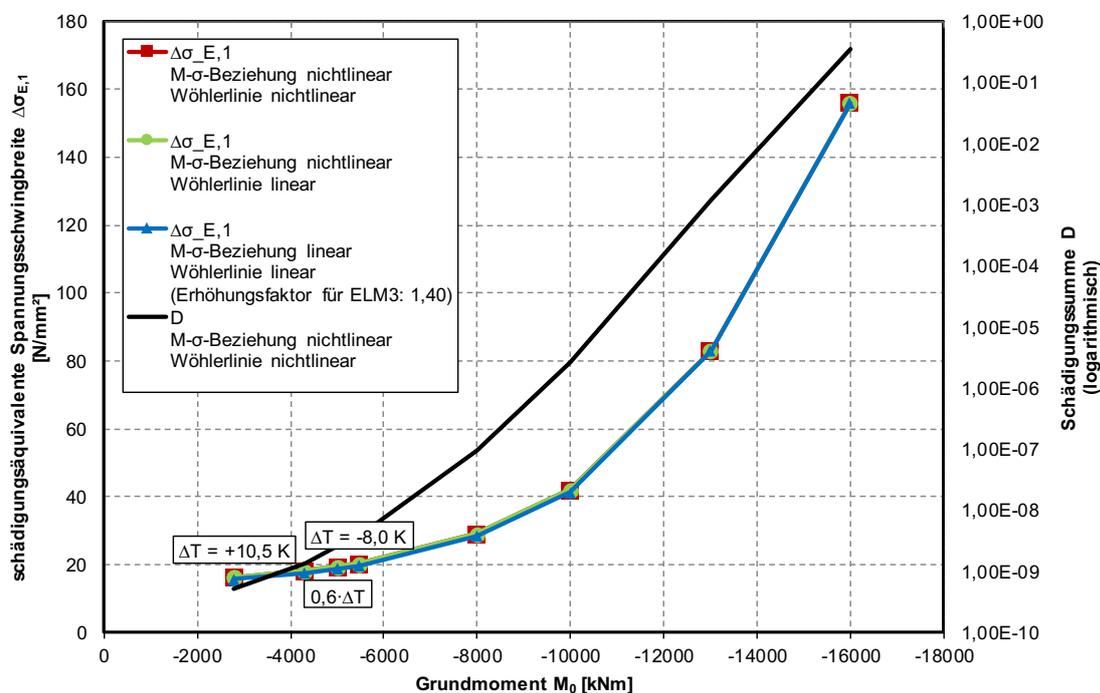


Abbildung D.26: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

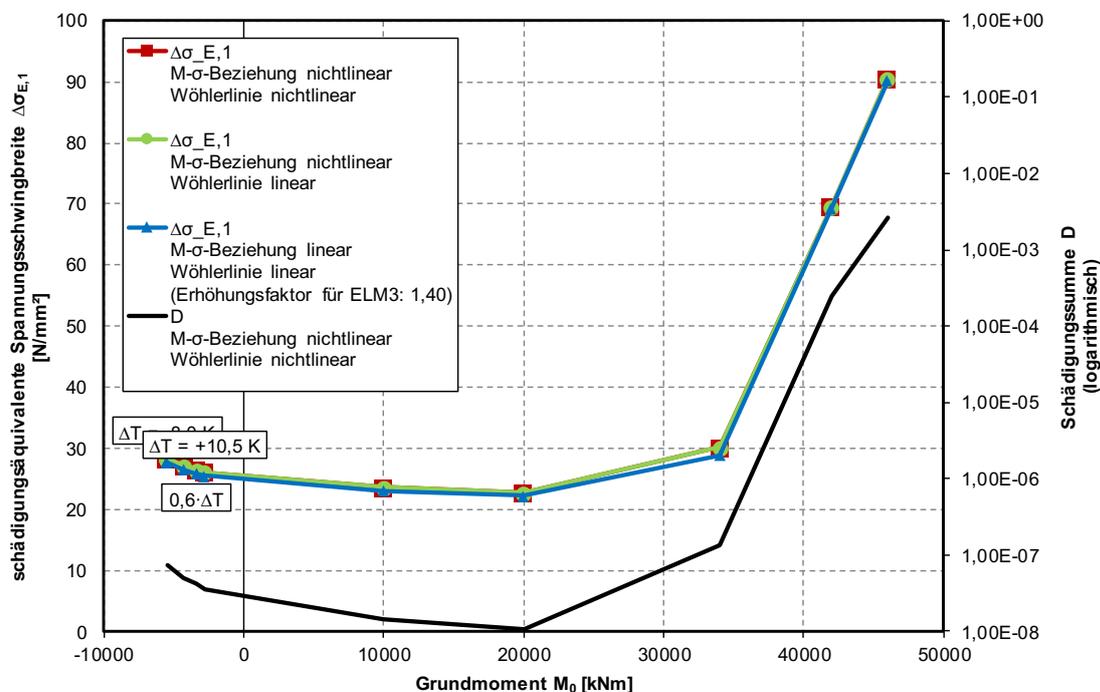


Abbildung D.27: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

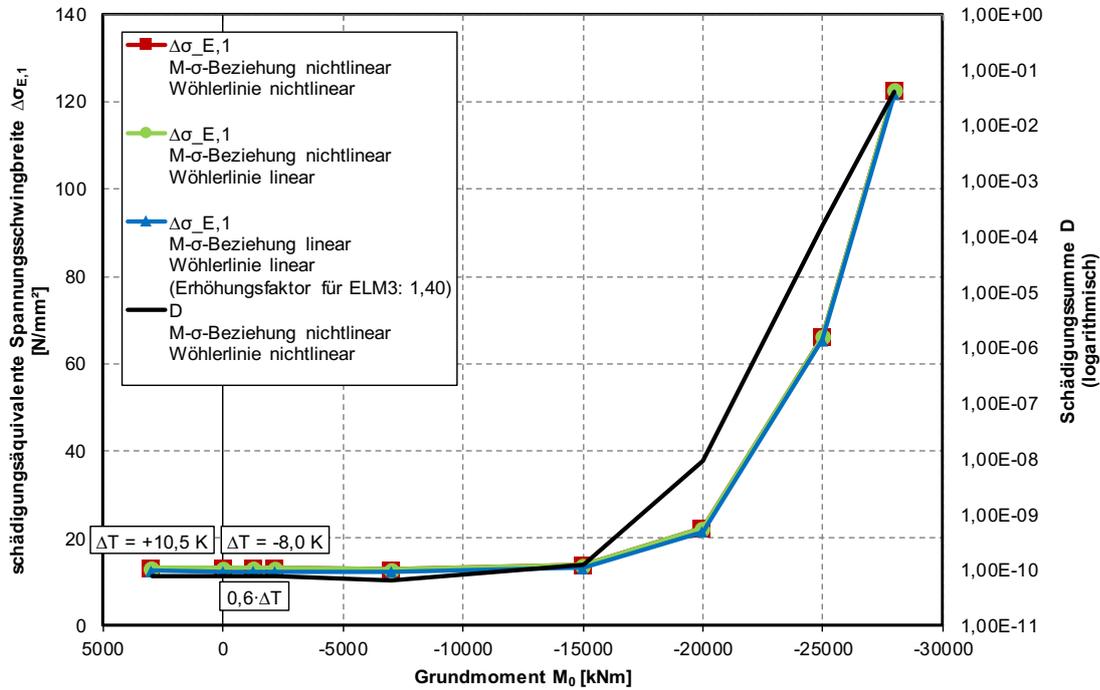


Abbildung D.28: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

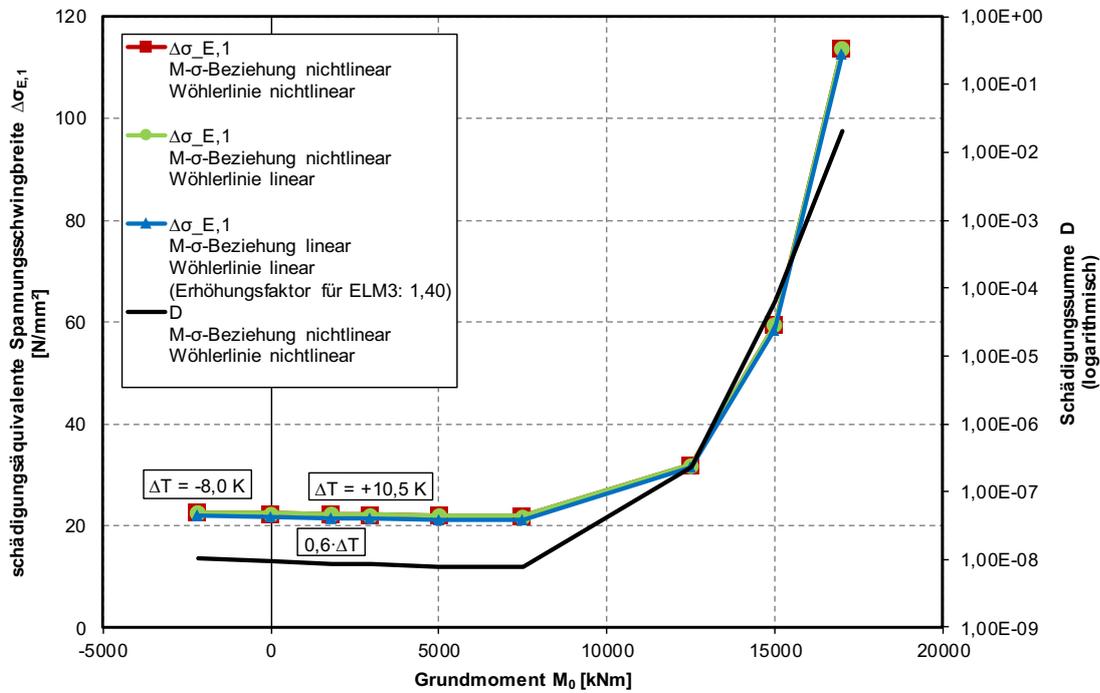


Abbildung D.29: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

### Beispielbrücke B4 (L ≈ 25)

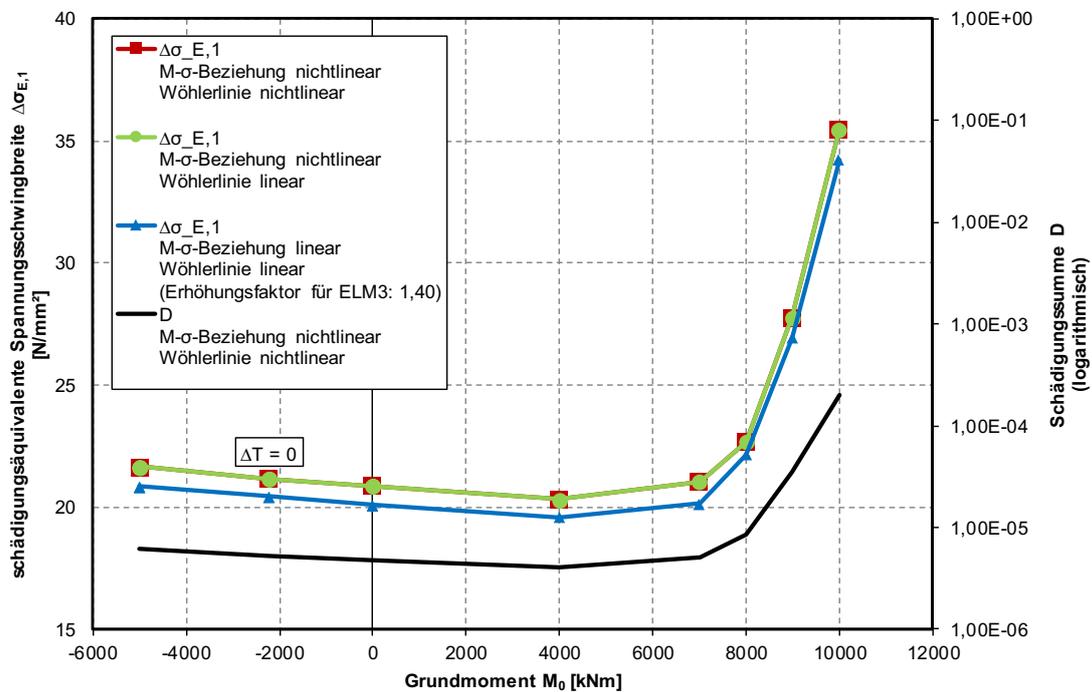


Abbildung D.30: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

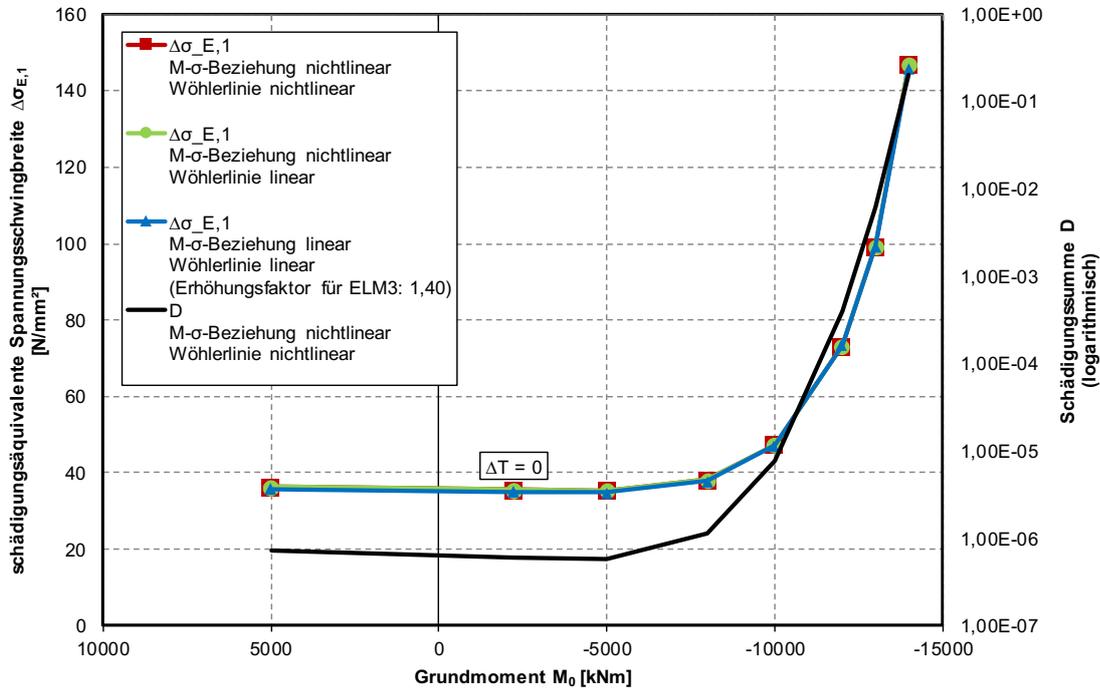


Abbildung D.31: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

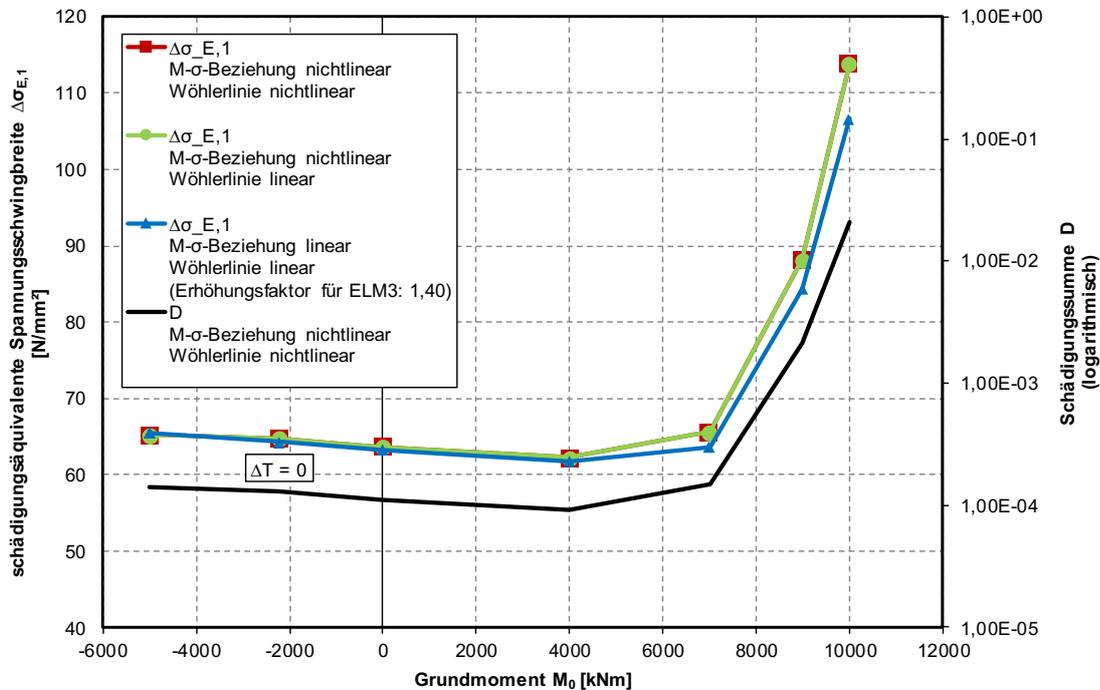


Abbildung D.32: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_{E,1}$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

## Anhang E: Einfluss der Linearisierung von M- $\sigma$ -Beziehung und Wöhlerlinie auf $\lambda$

Die folgende Zusammenstellung dient zur Ergänzung der in Kapitel 6 vorgestellten Ergebnisse zur Bewertung des Einflusses einer Linearisierung der M- $\sigma$ -Beziehung und Wöhlerlinie. Der Umfang der untersuchten Spannungspunkte gliedert sich wie folgt:

Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)

- Stützbereich OK  $\sigma_p$
- Feldbereich UK  $\sigma_p$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$
- Stützbereich OK  $\sigma_s$
- Stützbereich UK  $\sigma_s$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$

Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)

- Stützbereich OK  $\sigma_p$
- Feldbereich UK  $\sigma_p$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$
- Stützbereich OK  $\sigma_s$

Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)

- Stützbereich UK  $\sigma_s$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$

Beispielbrücke B3 (L = 40m+40m)

- Stützbereich OK  $\sigma_{p1}$
- Stützbereich OK  $\sigma_{p2}$
- Feldbereich UK  $\sigma_{p1}$
- Feldbereich UK  $\sigma_{p2}$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_{p2}$
- Stützbereich OK  $\sigma_s$
- Stützbereich UK  $\sigma_s$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$

Beispielbrücke B4 (L  $\approx$  25m)

- Feldbereich UK  $\sigma_p$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$

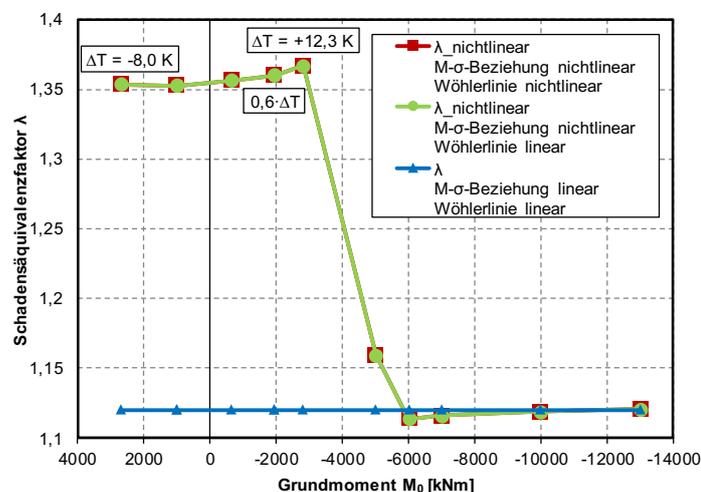


Abbildung E.1: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

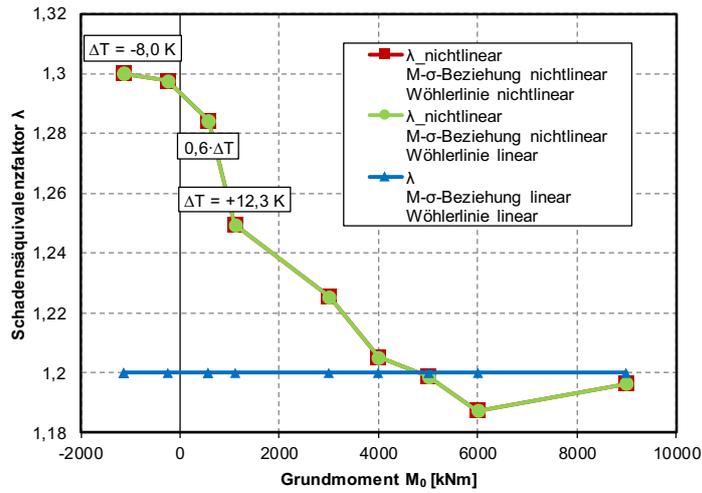


Abbildung E.2: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich  $UK \sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

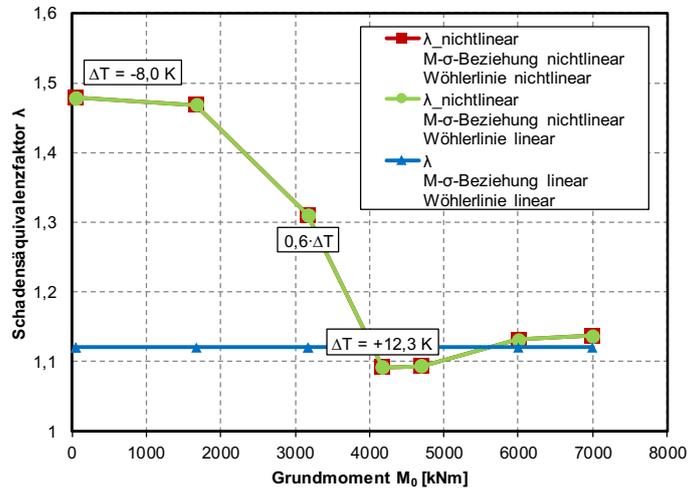


Abbildung E.3: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt  $UK \sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

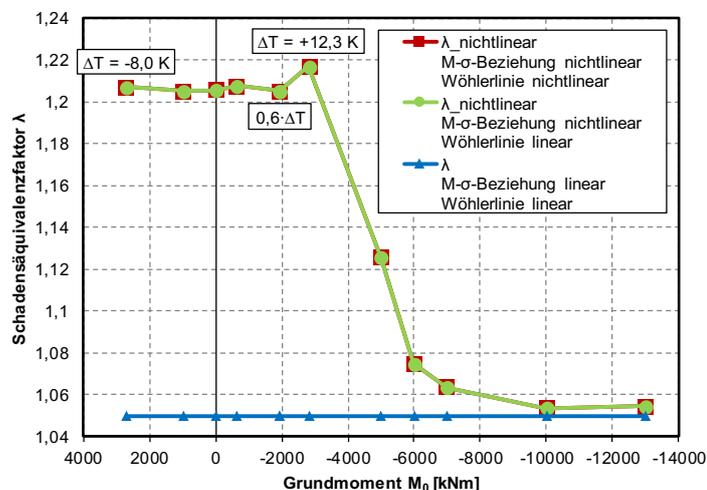


Abbildung E.4: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

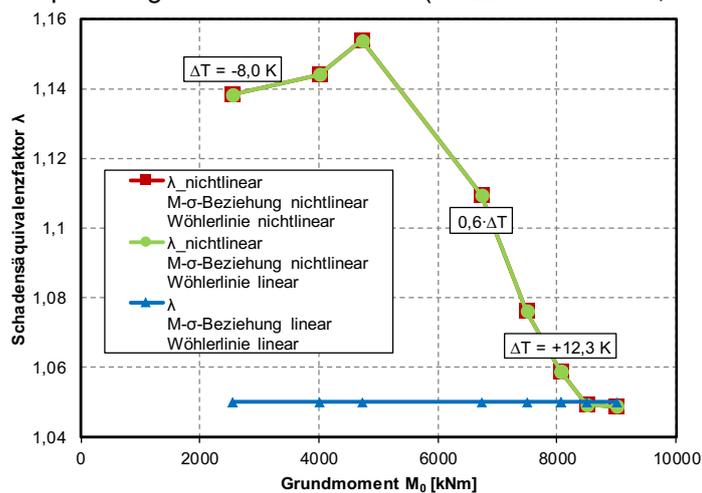


Abbildung E.5: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

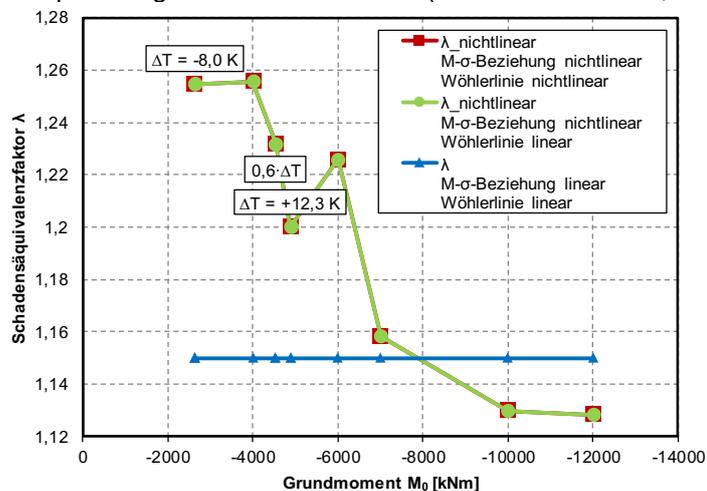


Abbildung E.6: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

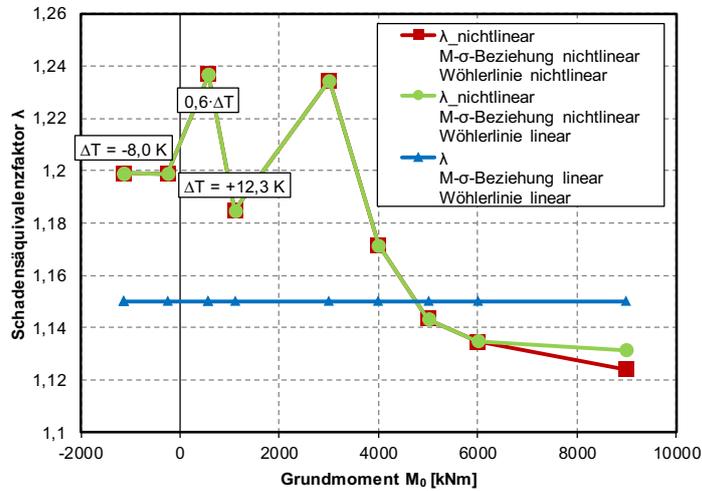


Abbildung E.7: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

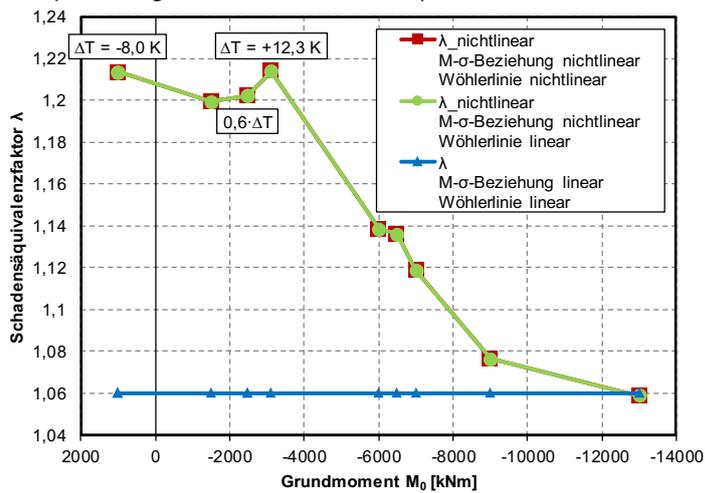


Abbildung E.8: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

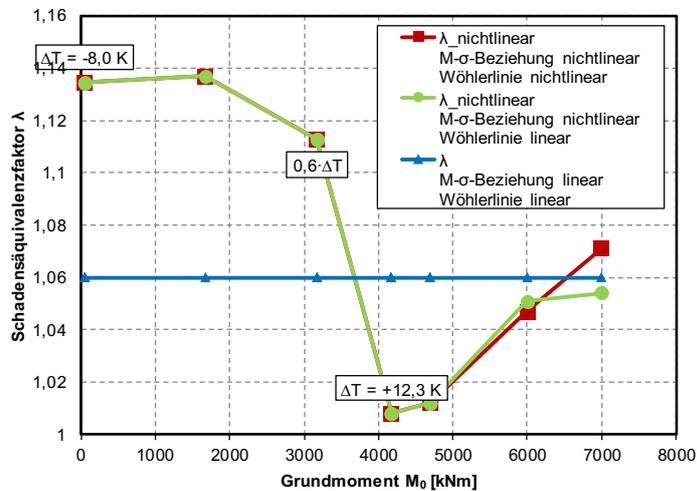


Abbildung E.9: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

### Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)

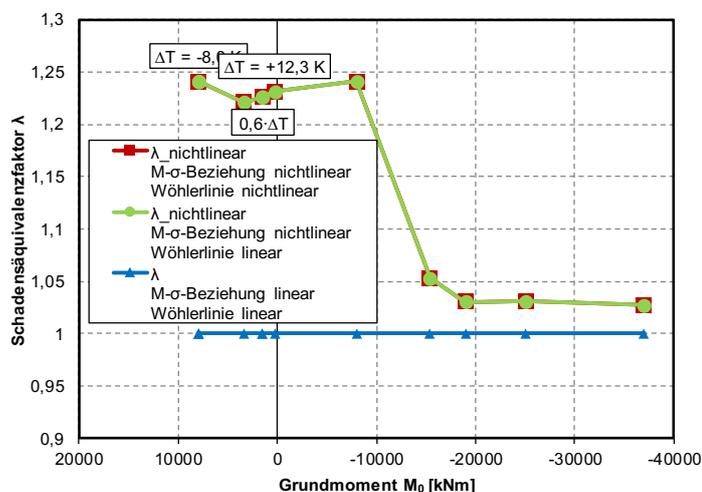


Abbildung E.10: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

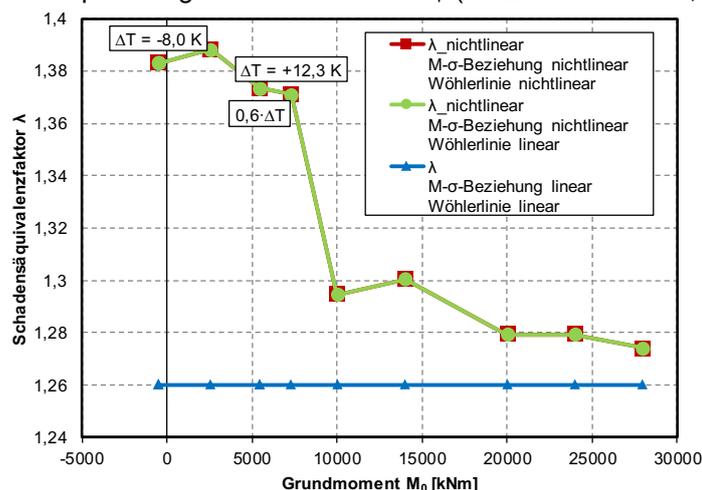


Abbildung E.11: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

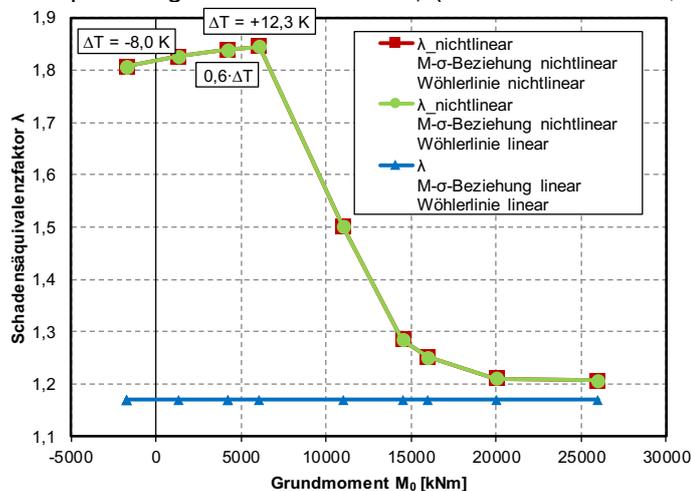


Abbildung E.12: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

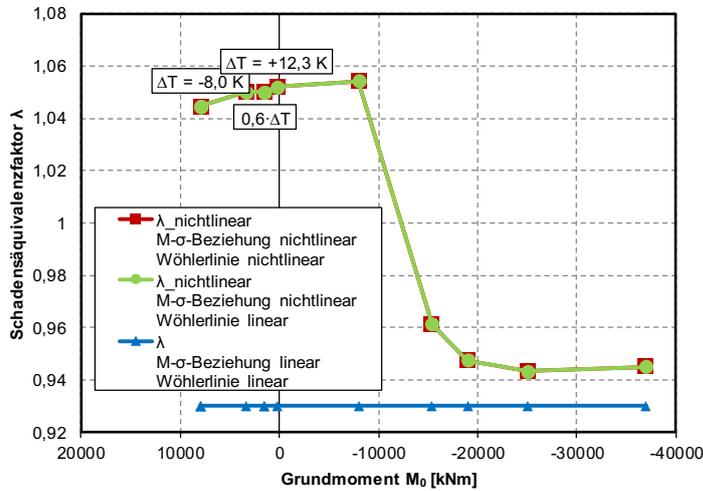


Abbildung E.13: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

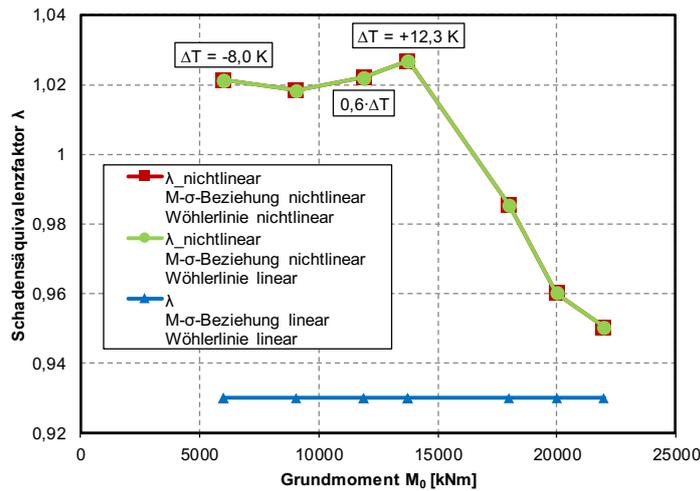


Abbildung E.14: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

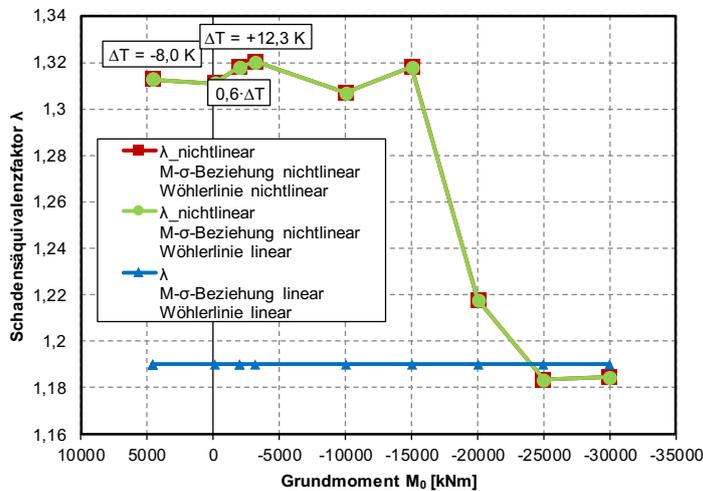


Abbildung E.15: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

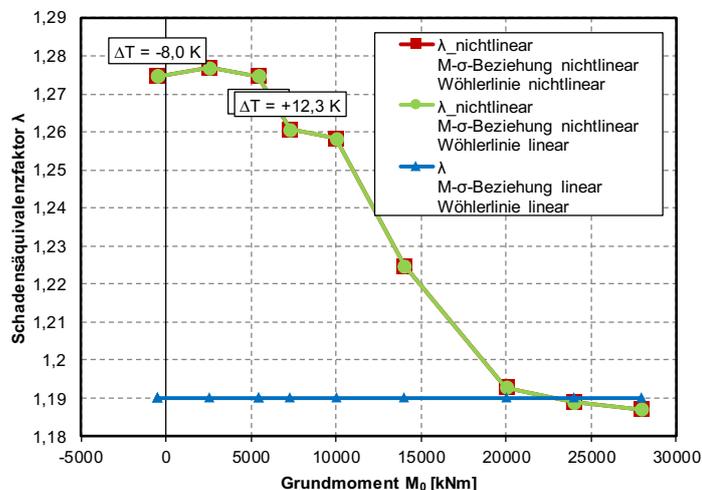


Abbildung E.16: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

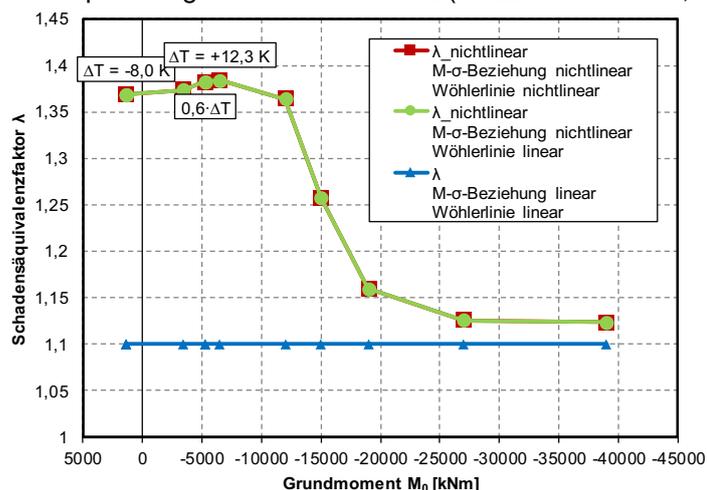


Abbildung E.17: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

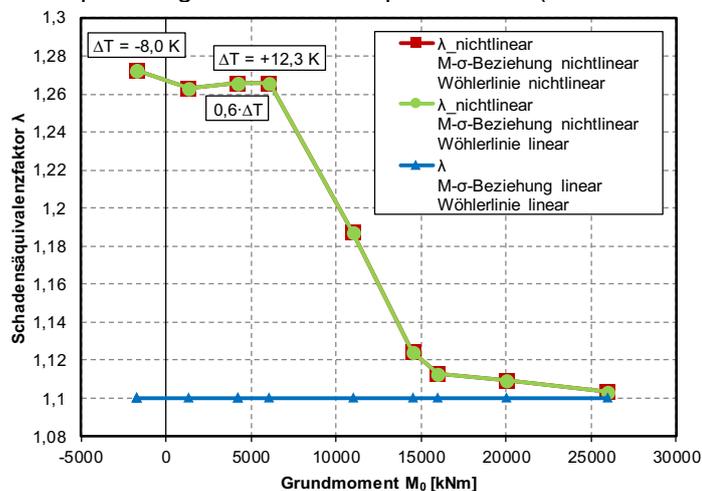


Abbildung E.18: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

Beispielbrücke B3 (L = 40m+40m)

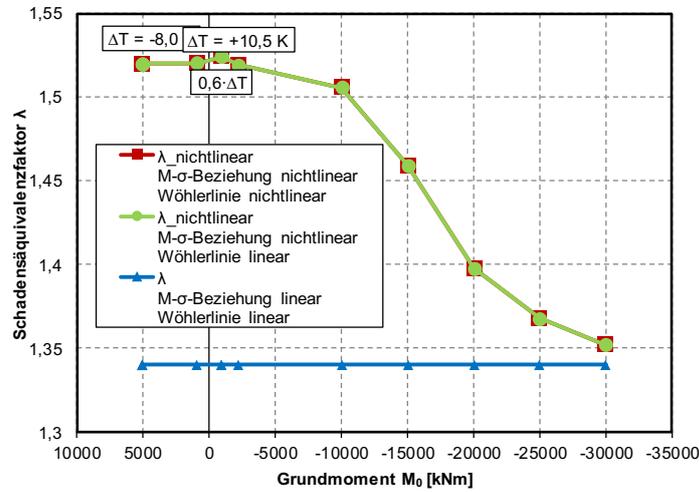


Abbildung E.19: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

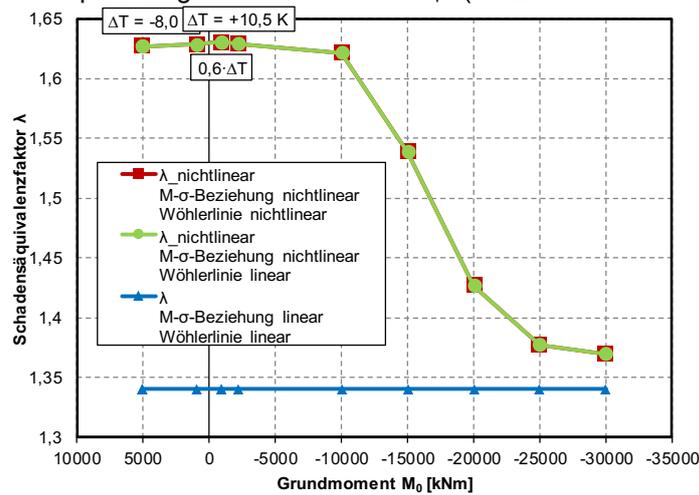


Abbildung E.20: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

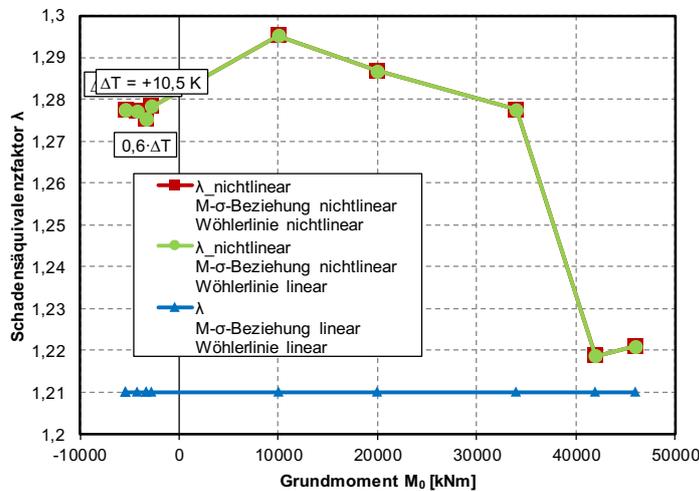


Abbildung E.21: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

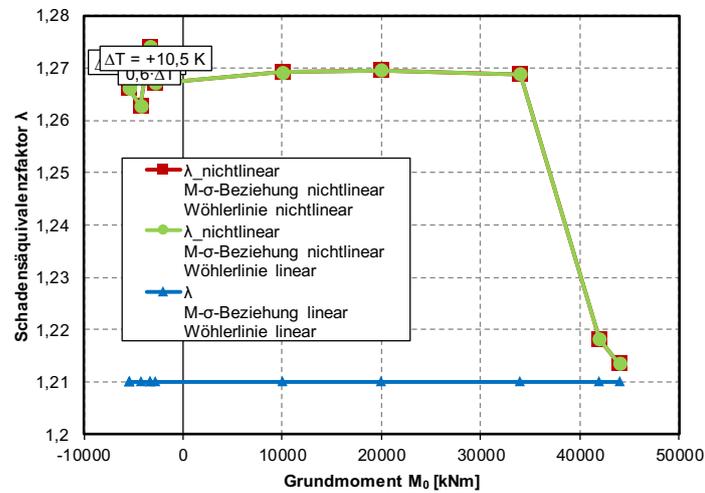


Abbildung E.22: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

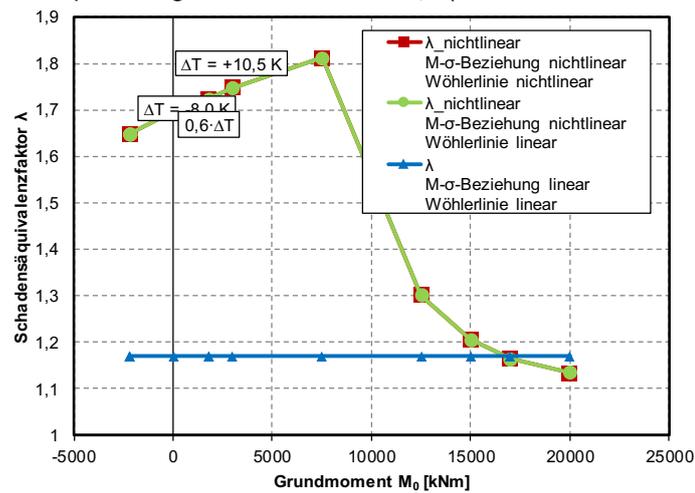


Abbildung E.23: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120$  N/mm<sup>2</sup>,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

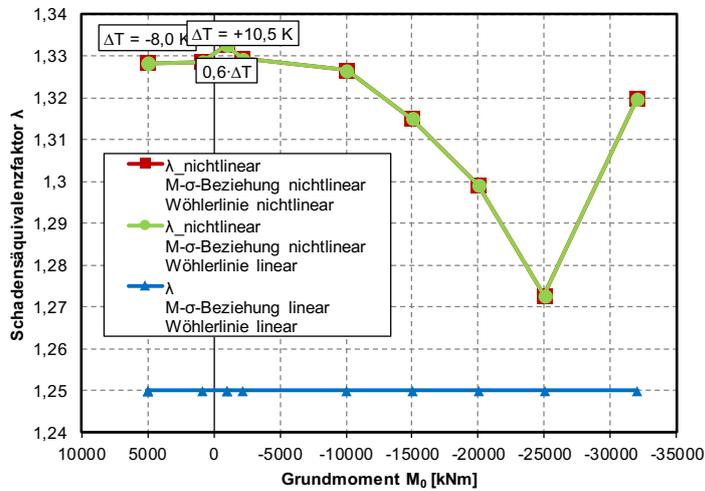


Abbildung E.24: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

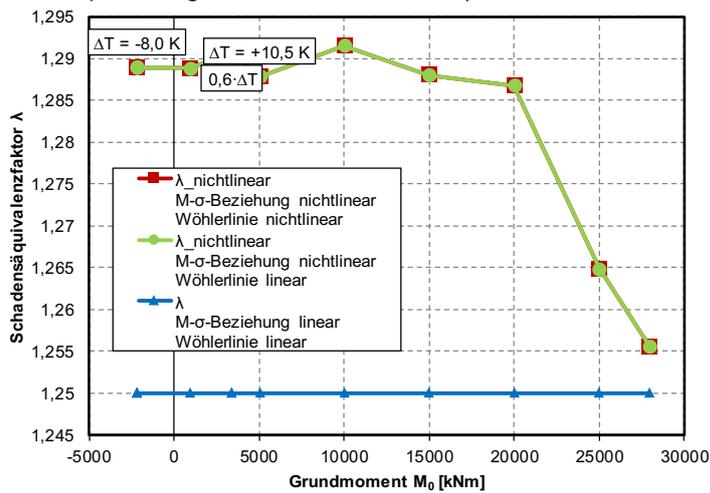


Abbildung E.25: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

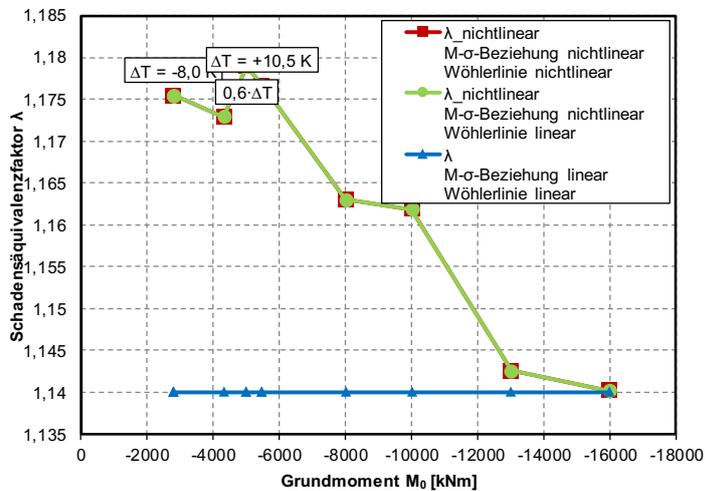


Abbildung E.26: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

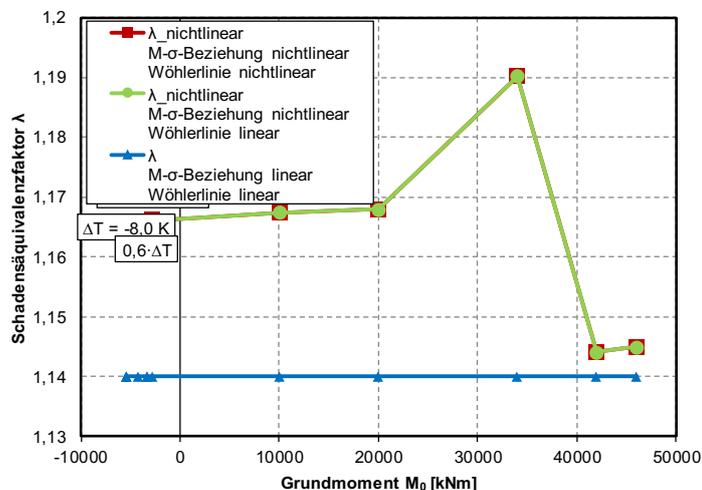


Abbildung E.27: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

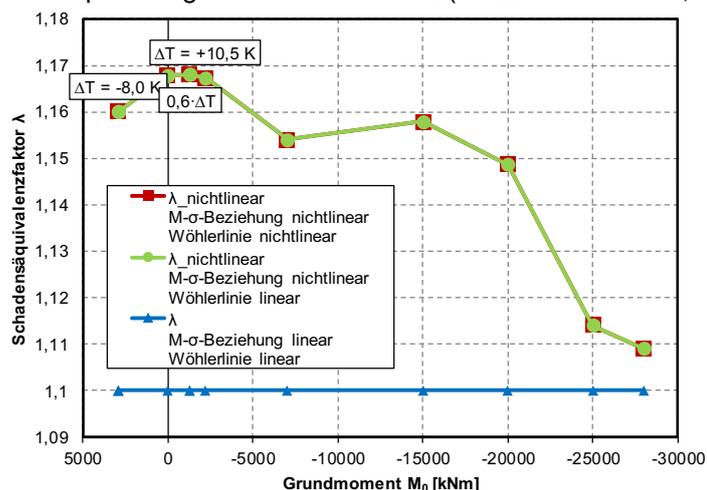


Abbildung E.28: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

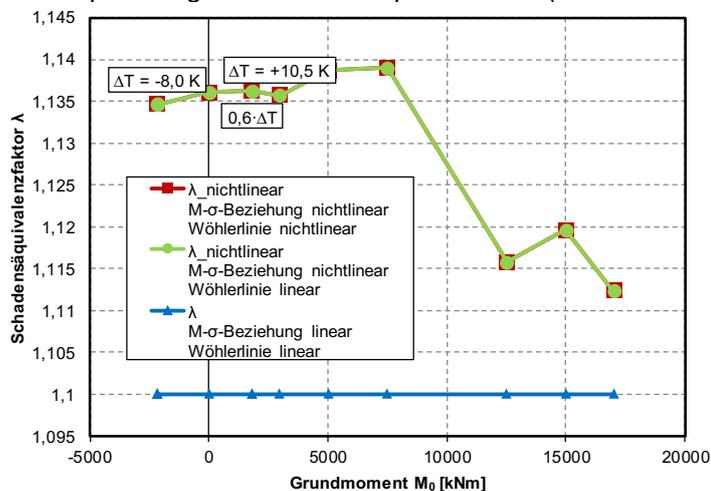


Abbildung E.29: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

Beispielbrücke B4 (L ≈ 25)

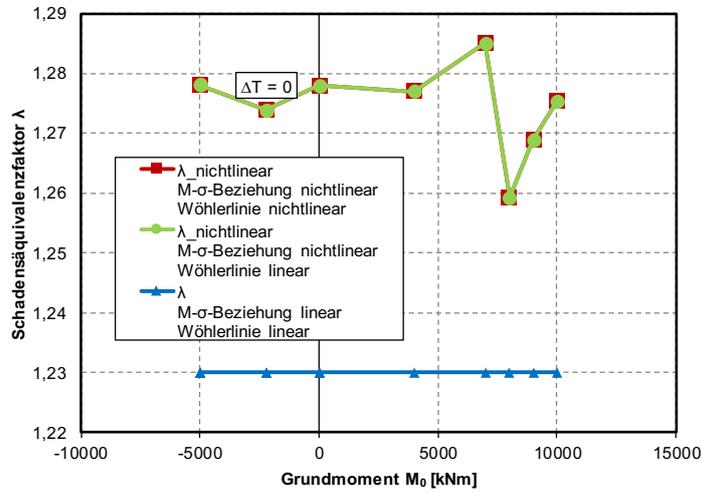


Abbildung E.30: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

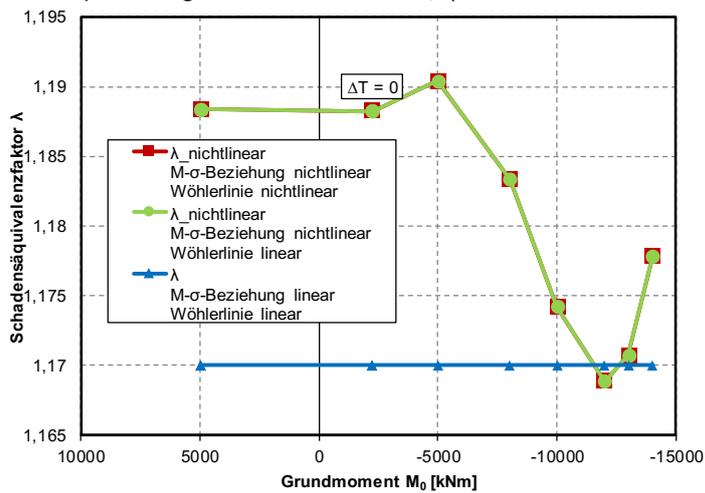


Abbildung E.31: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

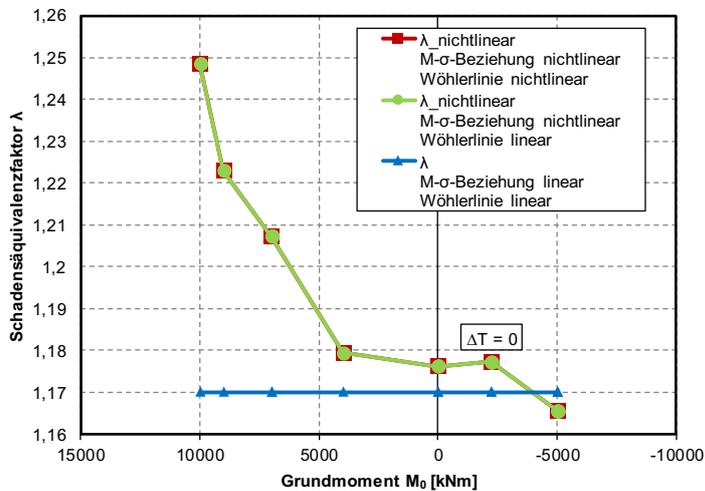


Abbildung E.32: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

## Anhang F: Bewertung des ELM 3

Die folgende Zusammenstellung dient zur Ergänzung der in Kapitel 7 beispielhaft vorgestellten Ergebnisse zur Bewertung der Zukunftsfähigkeit des aktuell normativ geregelten Nachweises schädigungsäquivalenter Spannungsschwingbreiten auf Grundlage des ELM 3 inklusive  $\lambda$ -Faktoren, nach [DIN EN 1991-2] und [DIN EN 1992-2] in Verbindung mit [DIN EN 1991-2/NA] und [DIN EN 1992-2/NA]. Der Umfang der untersuchten Spannungspunkte gliedert sich wie folgt:

Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)

- Stützbereich OK  $\sigma_p$
- Feldbereich UK  $\sigma_p$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$
- Stützbereich OK  $\sigma_s$
- Stützbereich UK  $\sigma_s$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$

Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)

- Stützbereich OK  $\sigma_p$
- Feldbereich UK  $\sigma_p$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$
- Stützbereich OK  $\sigma_s$

- Stützbereich UK  $\sigma_s$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$

Beispielbrücke B3 (L = 40m+40m)

- Stützbereich OK  $\sigma_{p1}$
- Stützbereich OK  $\sigma_{p2}$
- Feldbereich UK  $\sigma_{p1}$
- Feldbereich UK  $\sigma_{p2}$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_{p2}$
- Stützbereich OK  $\sigma_s$
- Stützbereich UK  $\sigma_s$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$

Beispielbrücke B4 (L  $\approx$  25m)

- Feldbereich UK  $\sigma_p$
- Feldbereich OK  $\sigma_s$
- Feldbereich UK  $\sigma_s$

Beispielbrücke B1 (L = 22,5m+22,5m)

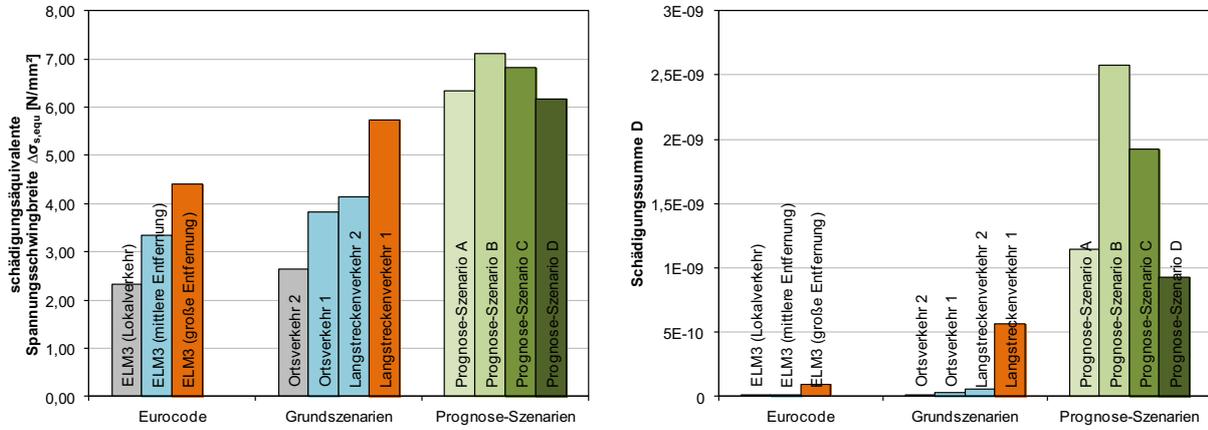


Abbildung F.1: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 N/mm^2, k_1 = 3, k_2 = 7$ )

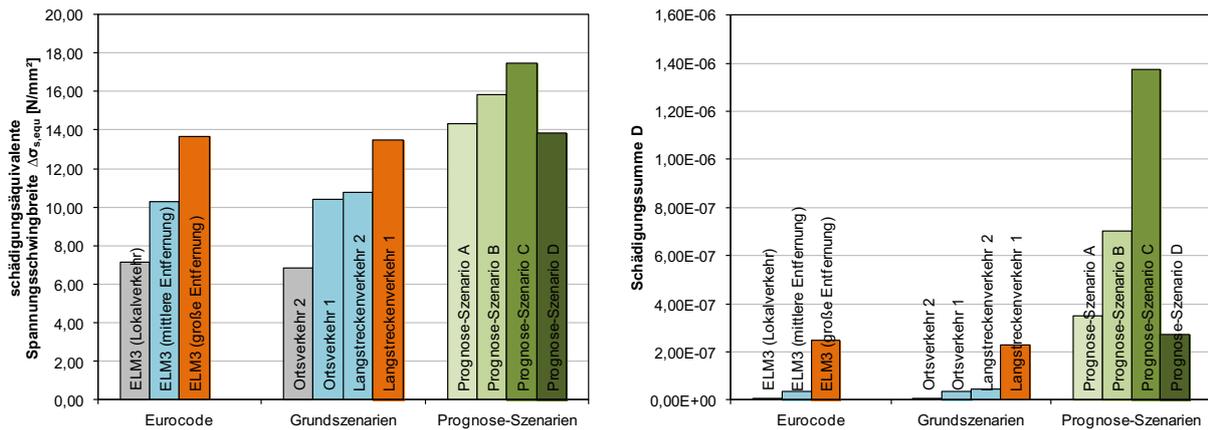


Abbildung F.2: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 N/mm^2, k_1 = 3, k_2 = 7$ )

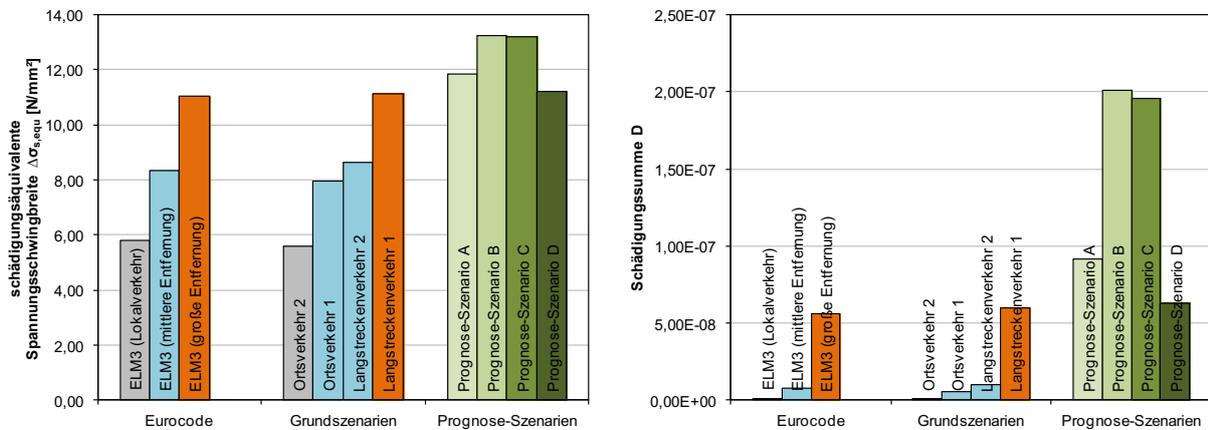


Abbildung F.3: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 N/mm^2, k_1 = 3, k_2 = 7$ )

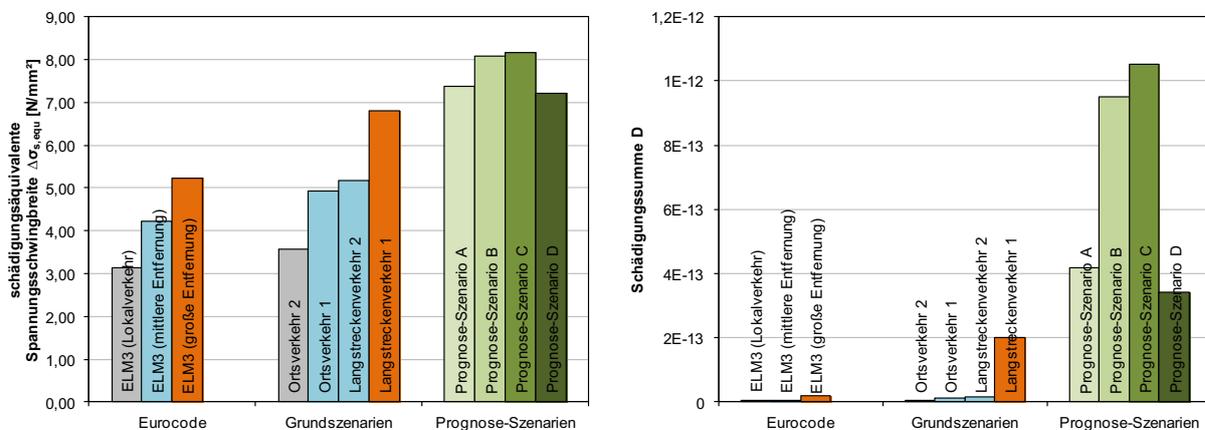


Abbildung F.4: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2, k_1 = 5, k_2 = 9$ )

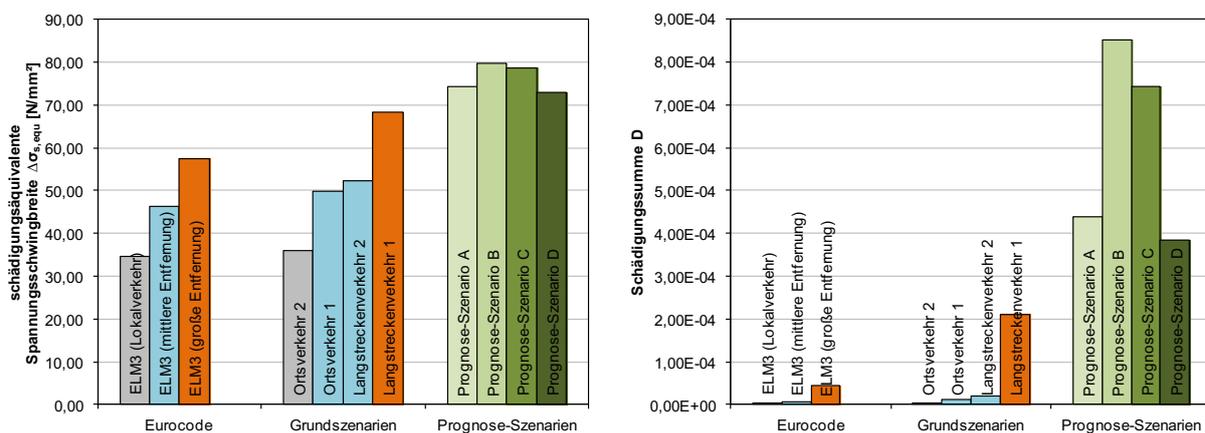


Abbildung F.5: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2, k_1 = 5, k_2 = 9$ )

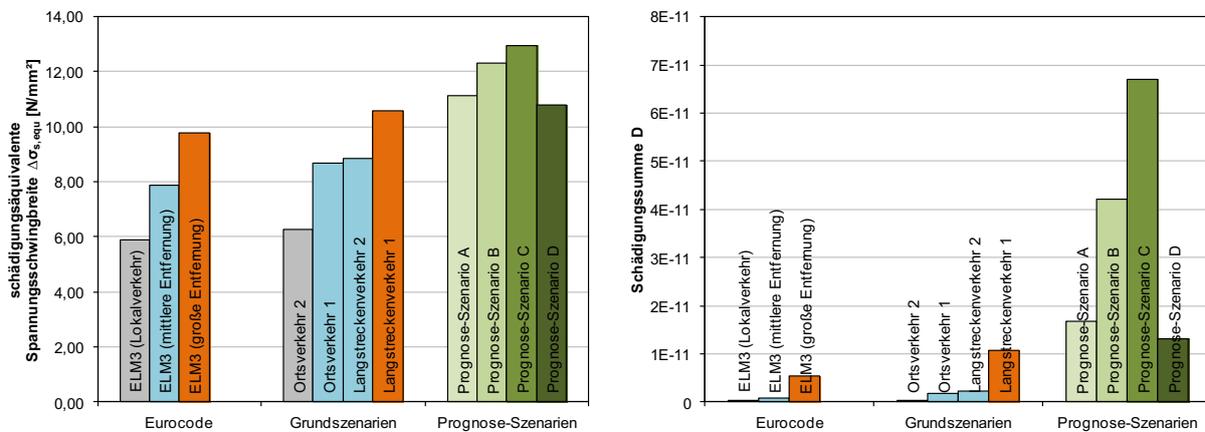


Abbildung F.6: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2, k_1 = 5, k_2 = 9$ )

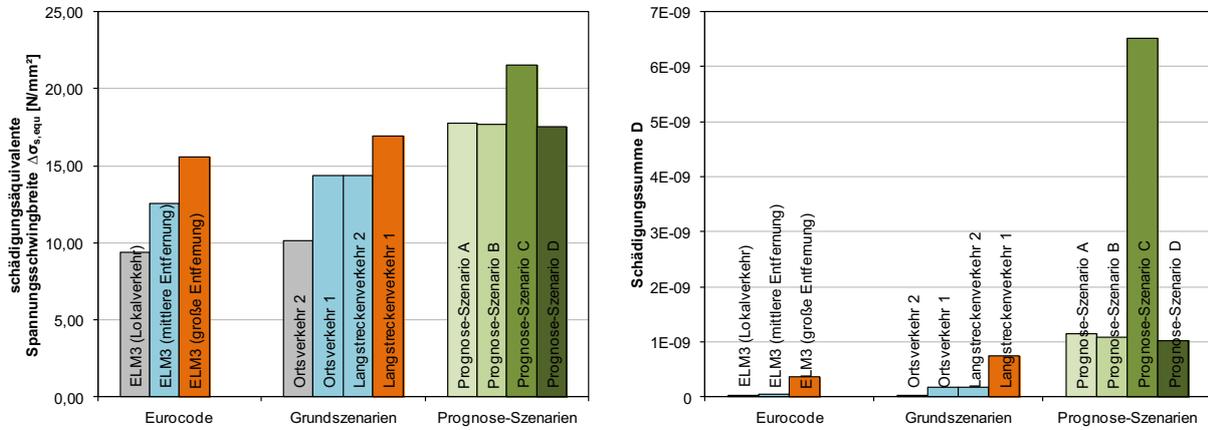


Abbildung F.7: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

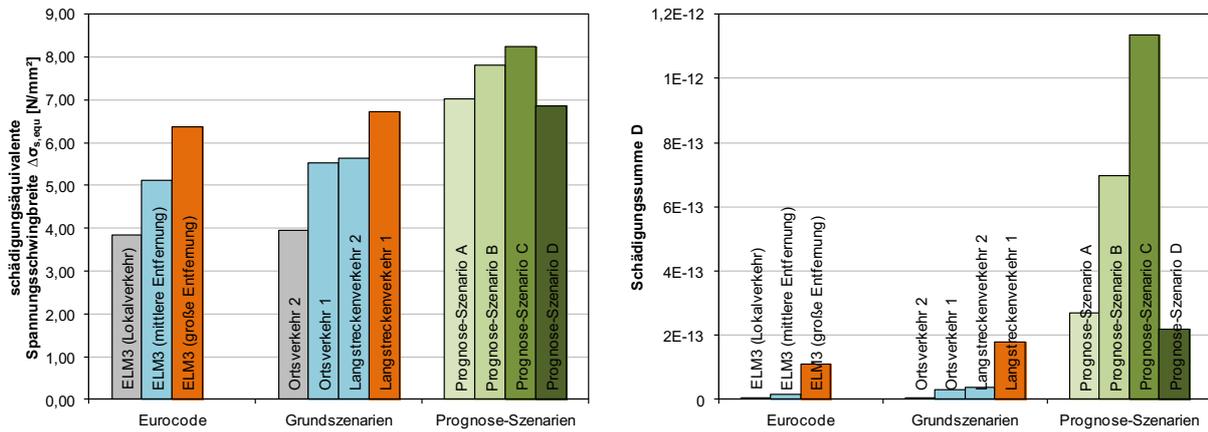


Abbildung F.8: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

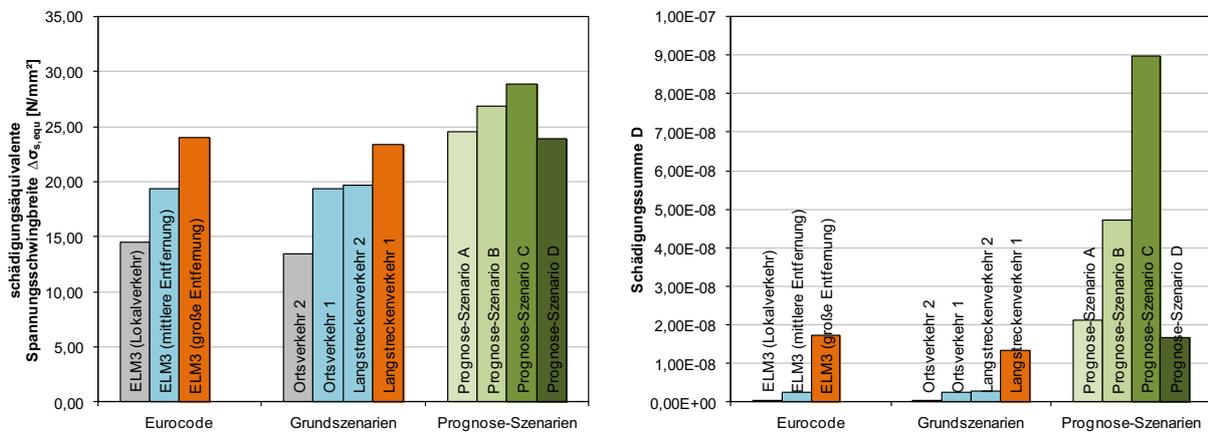


Abbildung F.9: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

Beispielbrücke B2 (L = 20m+34,5m+20m)

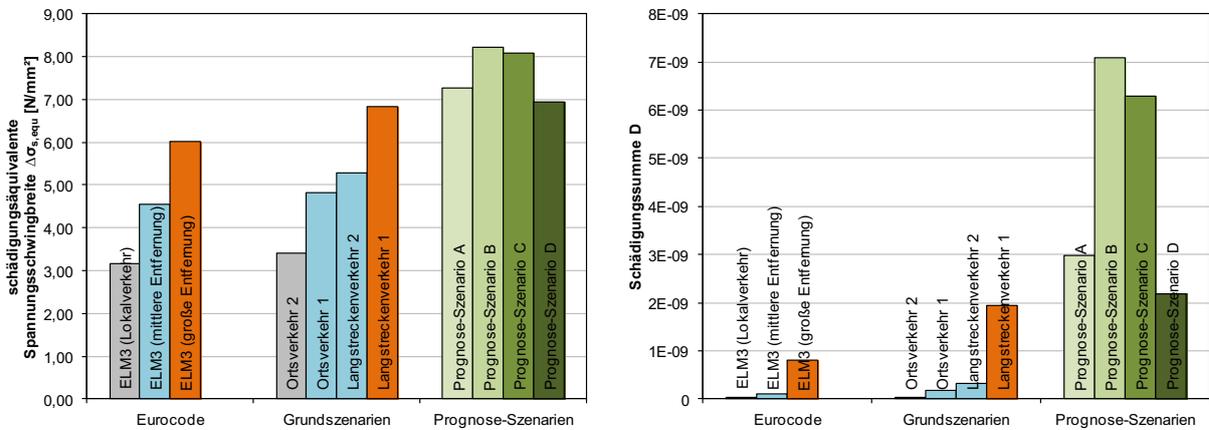


Abbildung F.10: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2, k_1 = 3, k_2 = 7$ )

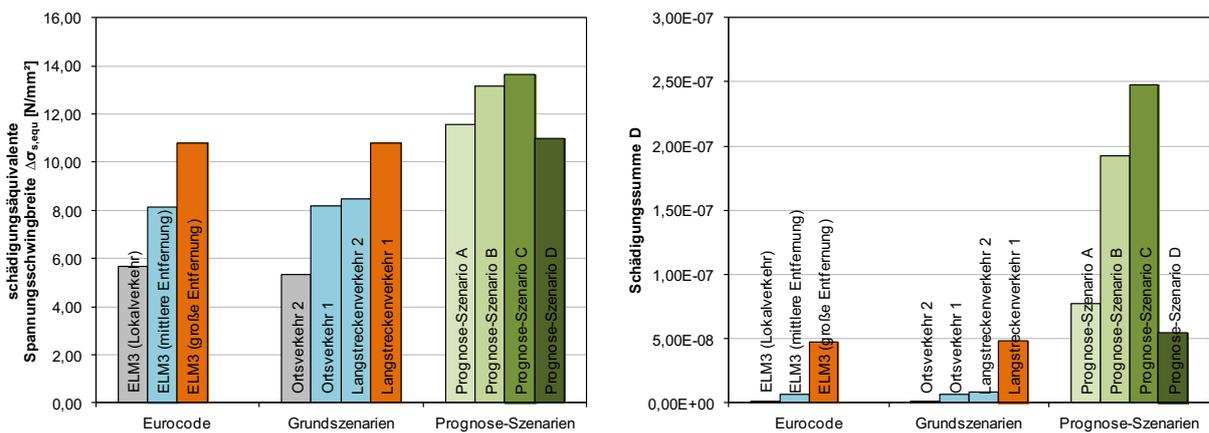


Abbildung F.11: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2, k_1 = 3, k_2 = 7$ )

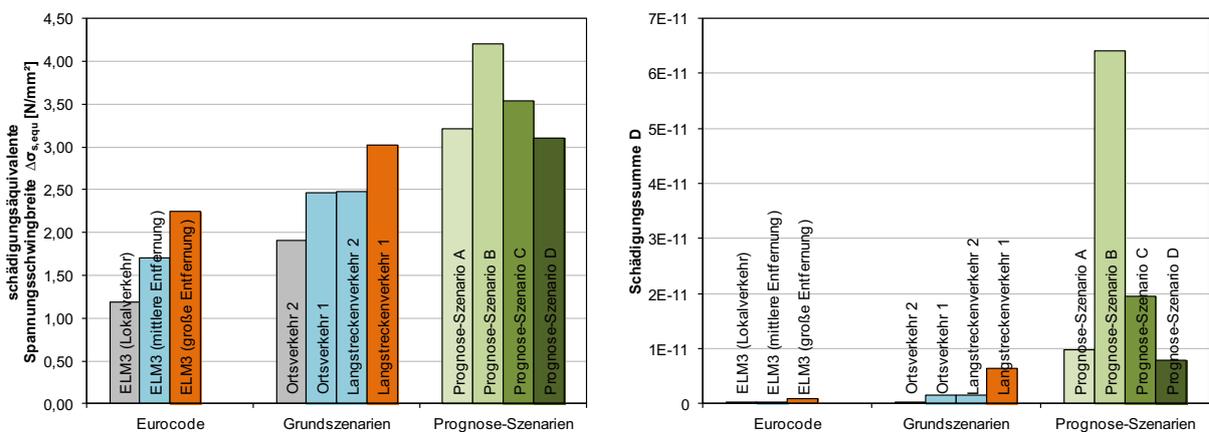


Abbildung F.12: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentenullpunkt UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2, k_1 = 3, k_2 = 7$ )

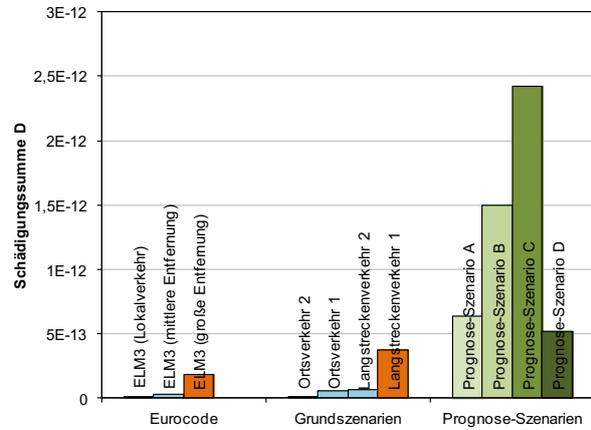
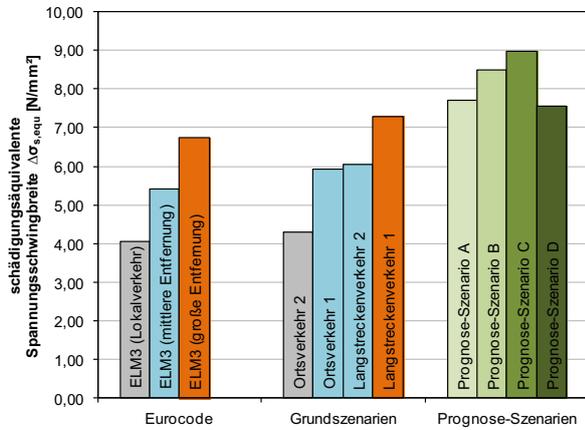


Abbildung F.13: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

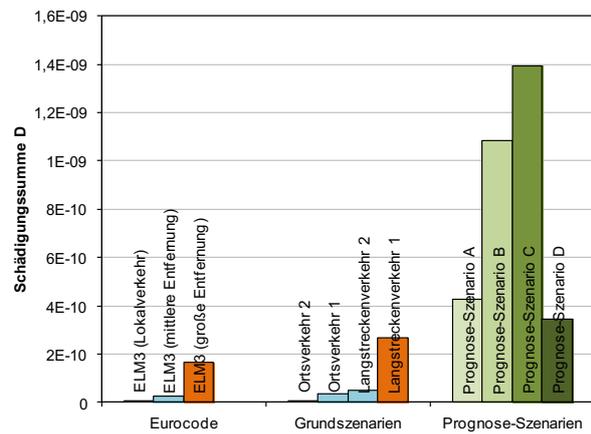
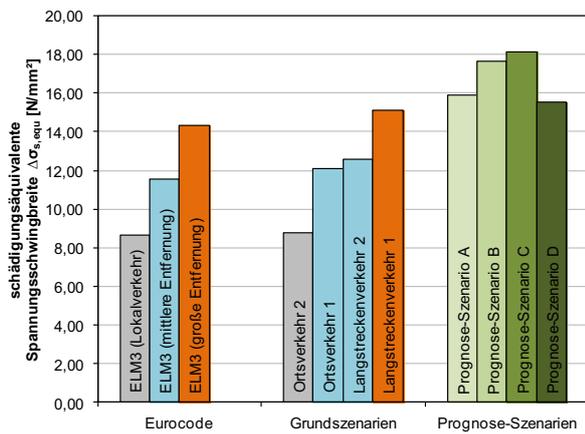


Abbildung F.14: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

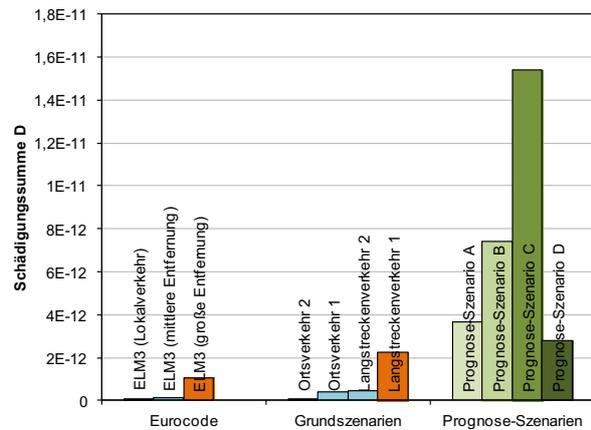
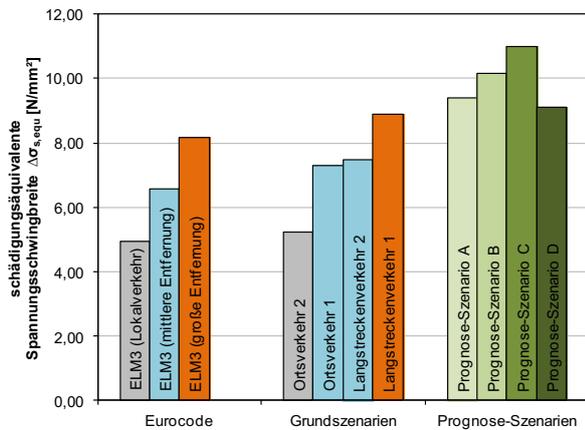


Abbildung F.15: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

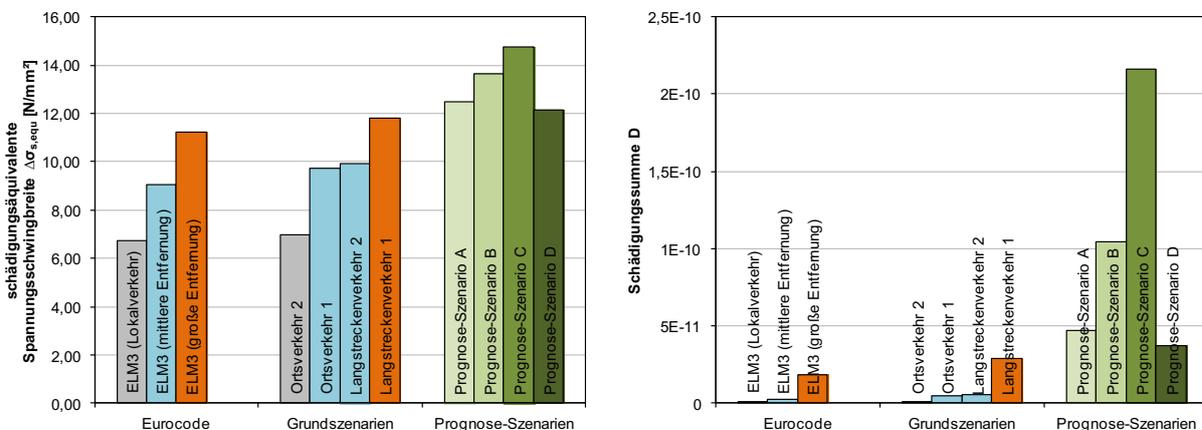


Abbildung F.16: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

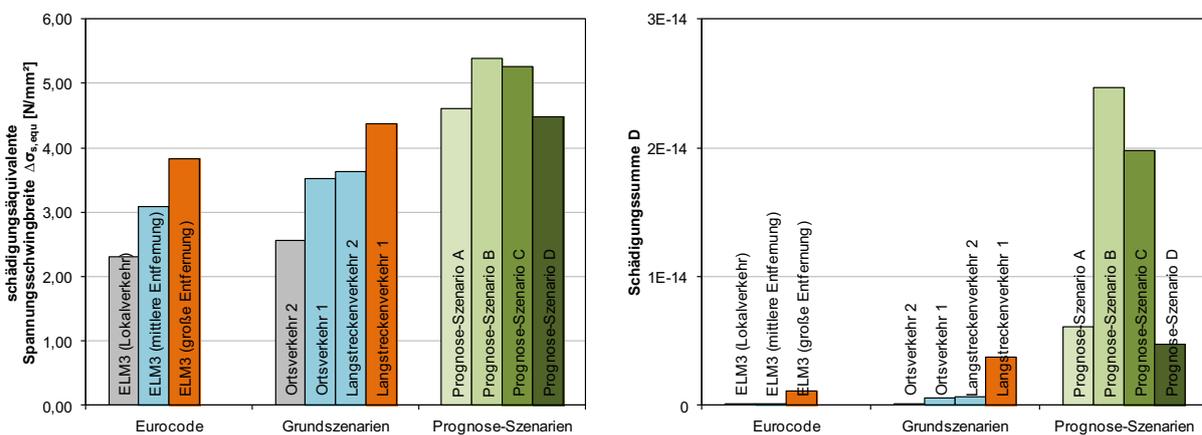


Abbildung F.17: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

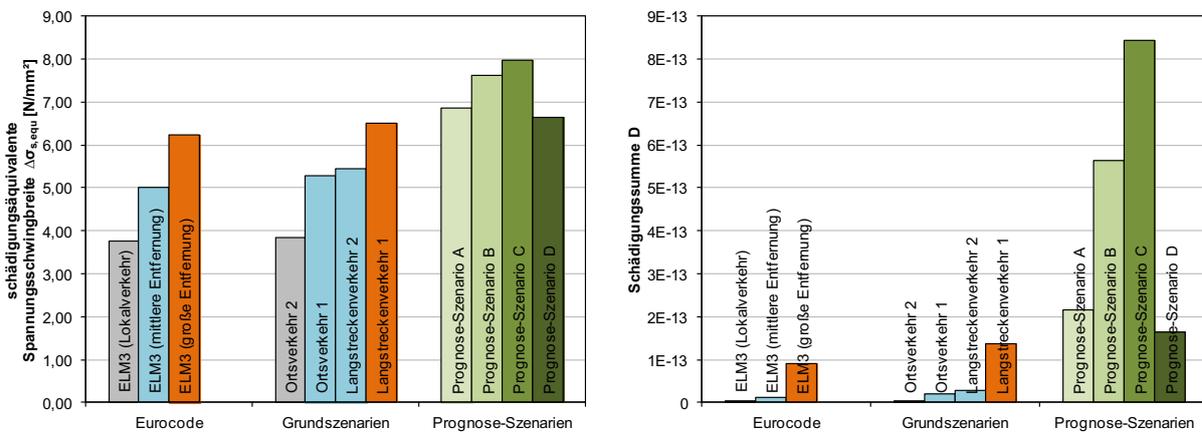


Abbildung F.18: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

Beispielbrücke B3 (L = 40m+40m)

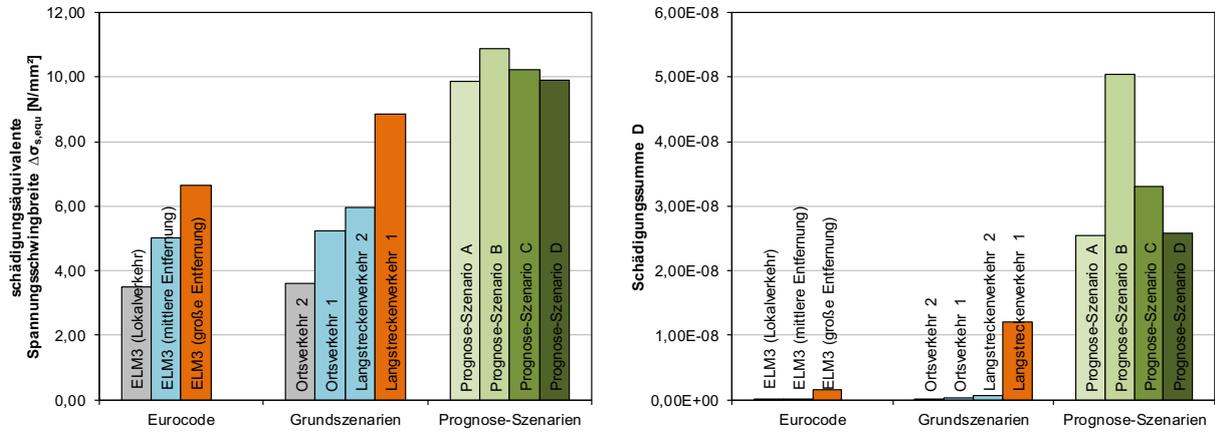


Abbildung F.19: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

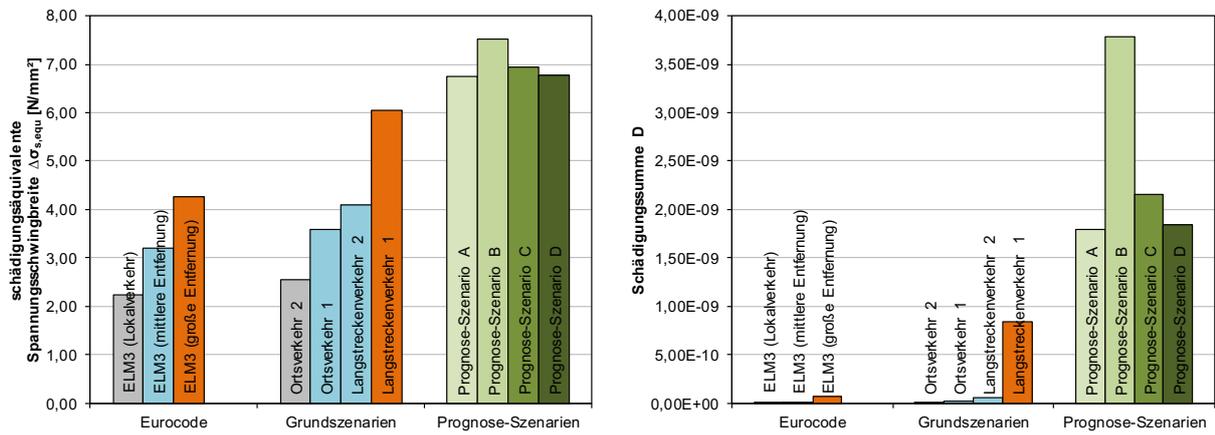


Abbildung F.20: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

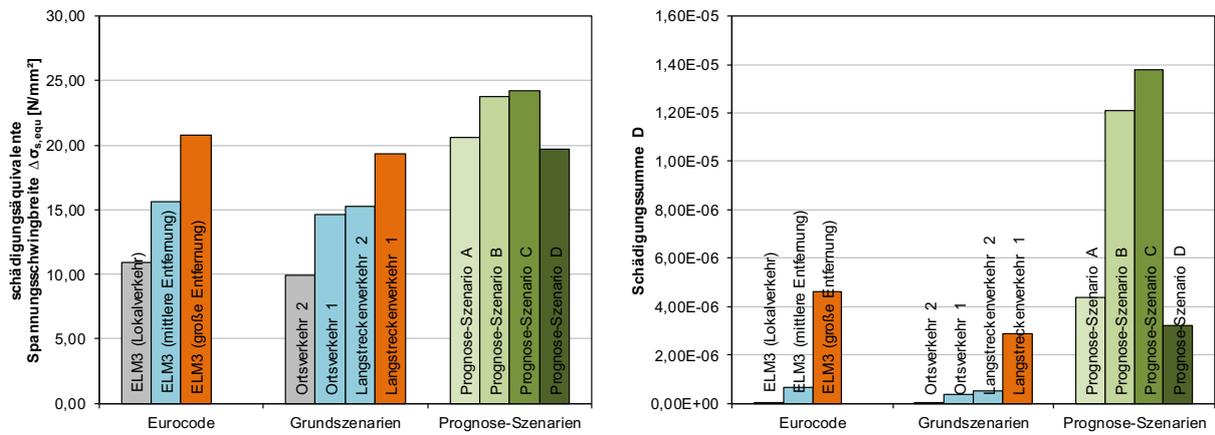


Abbildung F.21: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

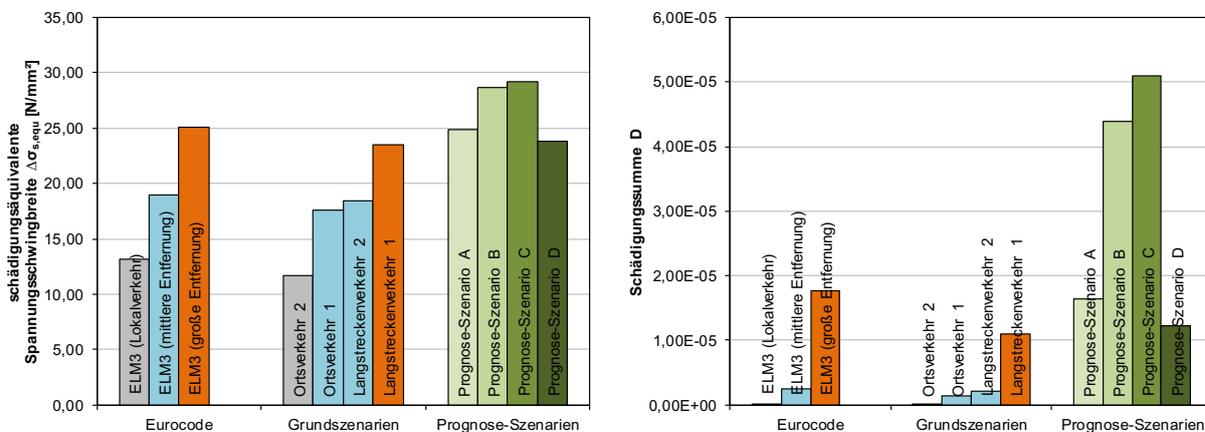


Abbildung F.22: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2, k_1 = 3, k_2 = 7$ )

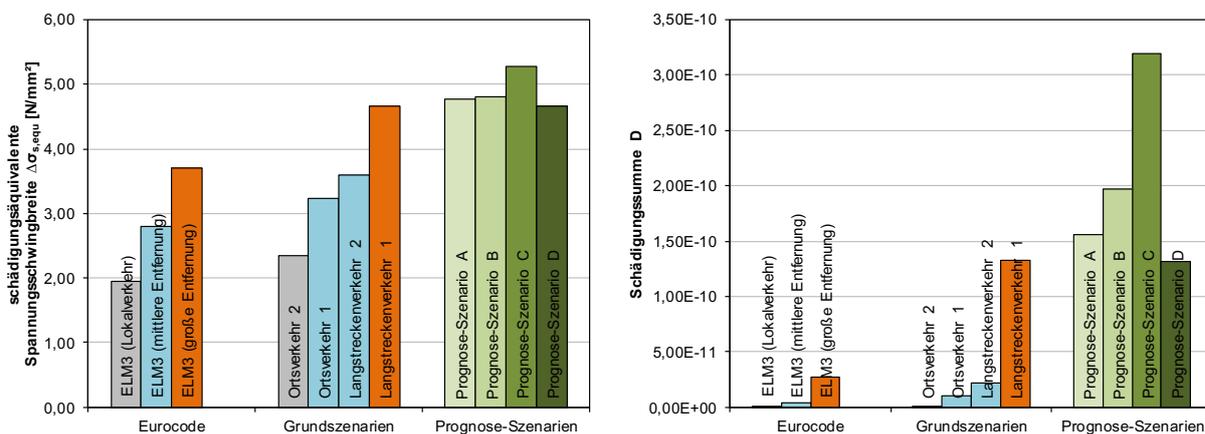


Abbildung F.23: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentenullpunkt UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2, k_1 = 3, k_2 = 7$ )

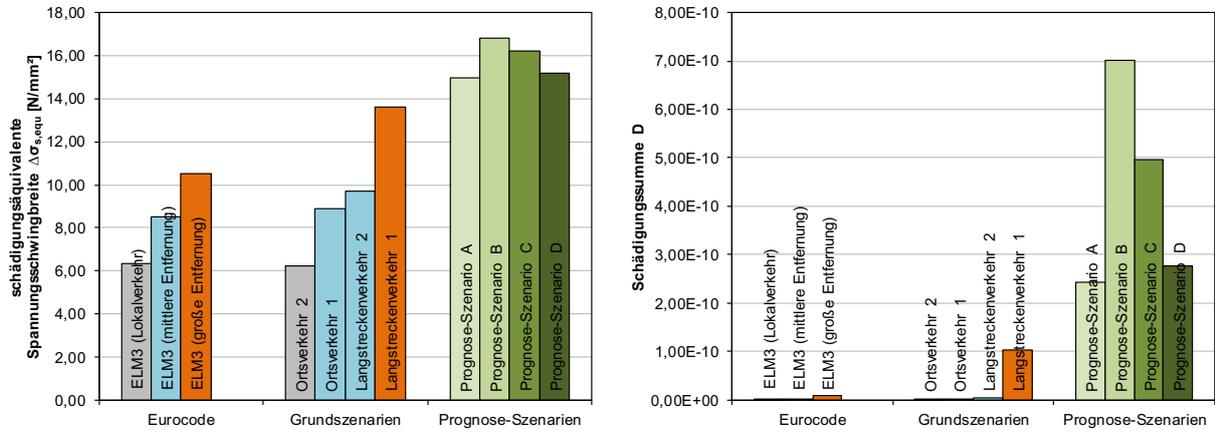


Abbildung F.24: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 N/mm^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

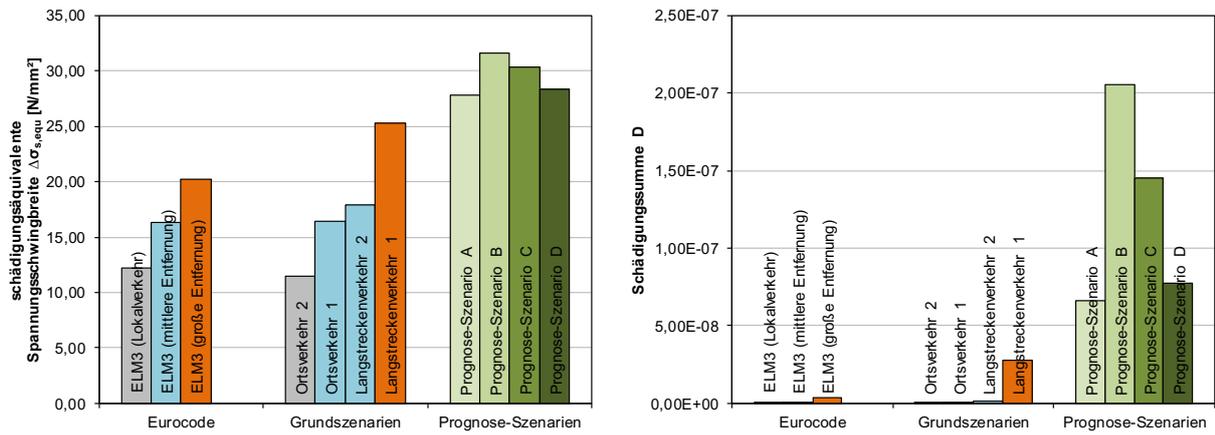


Abbildung F.25: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 N/mm^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

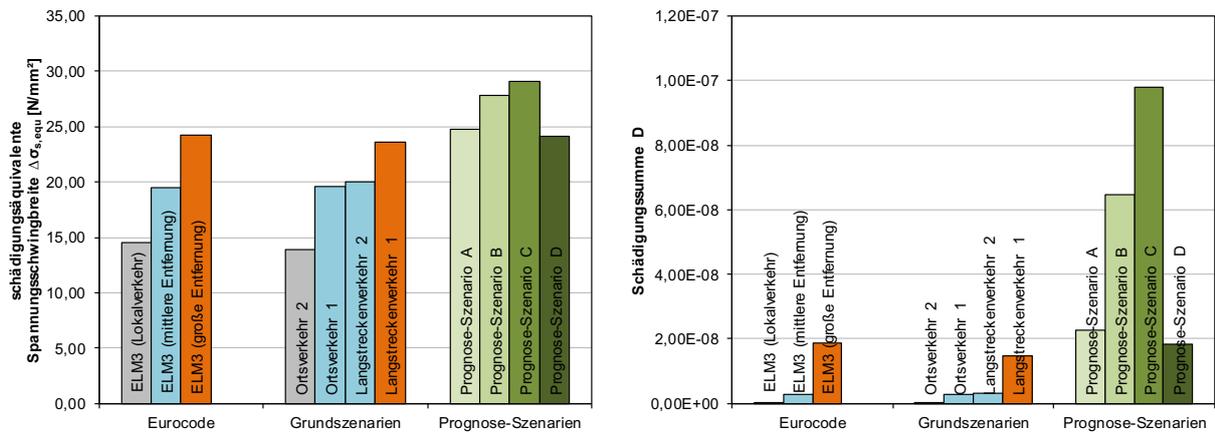


Abbildung F.26: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 N/mm^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

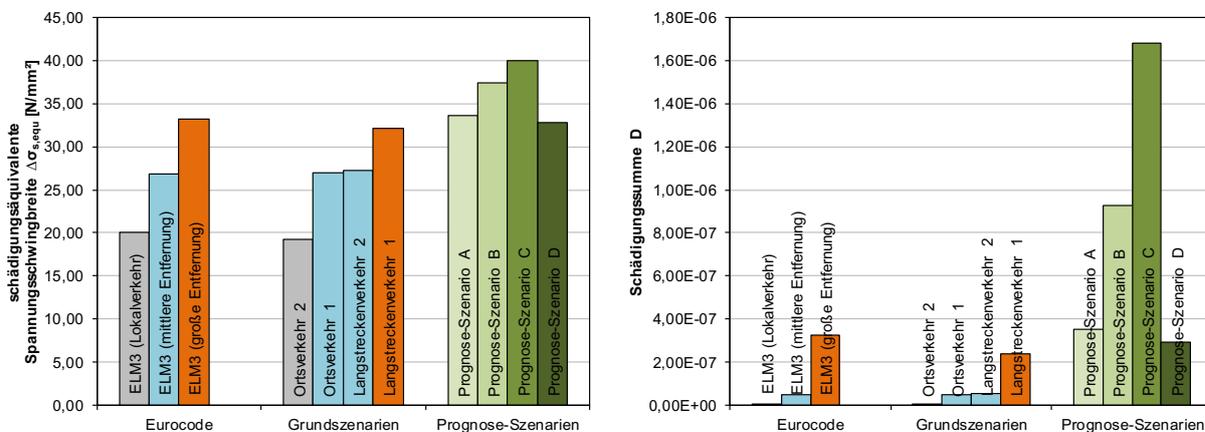


Abbildung F.27: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 N/mm^2, k_1 = 5, k_2 = 9$ )

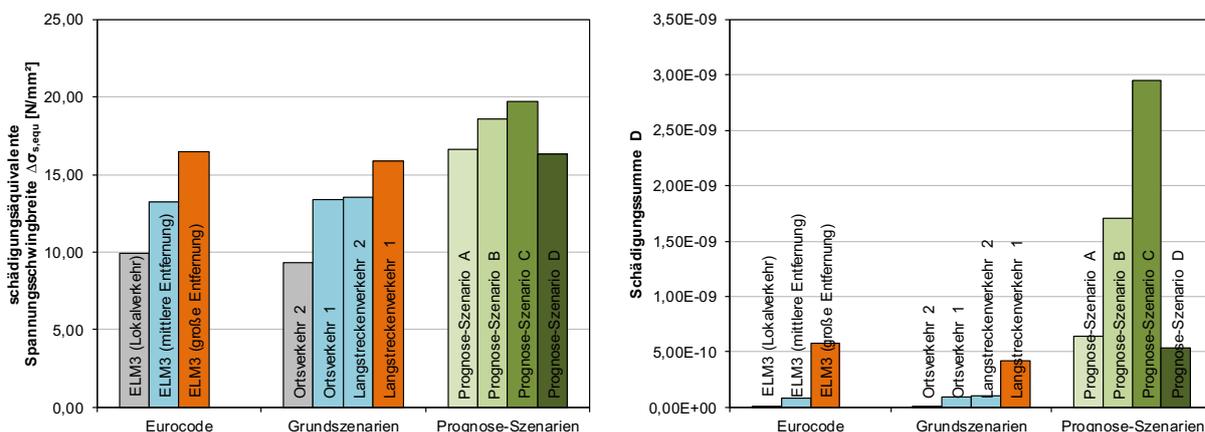


Abbildung F.28: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentenullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 N/mm^2, k_1 = 5, k_2 = 9$ )

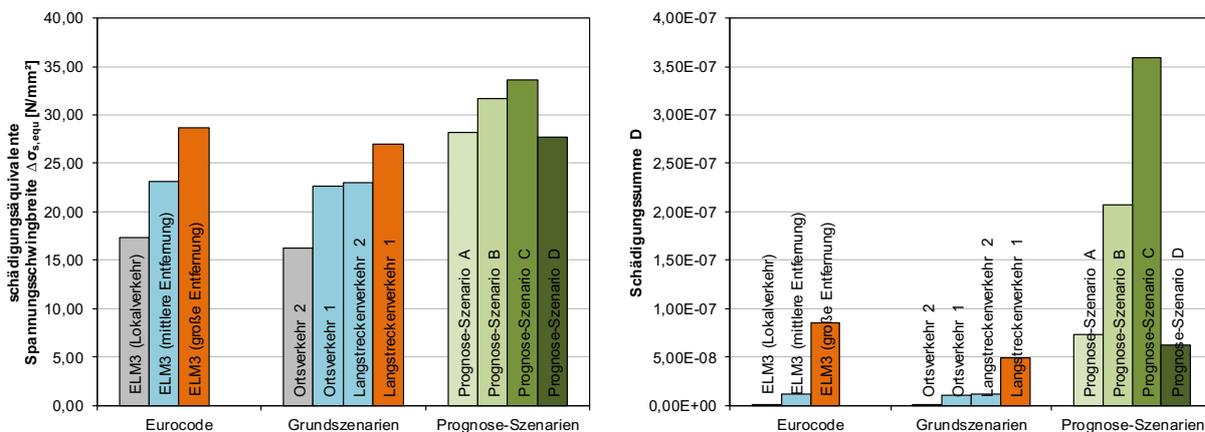


Abbildung F.29: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentenullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 N/mm^2, k_1 = 5, k_2 = 9$ )

Beispielbrücke B4 (L ≈ 25m)

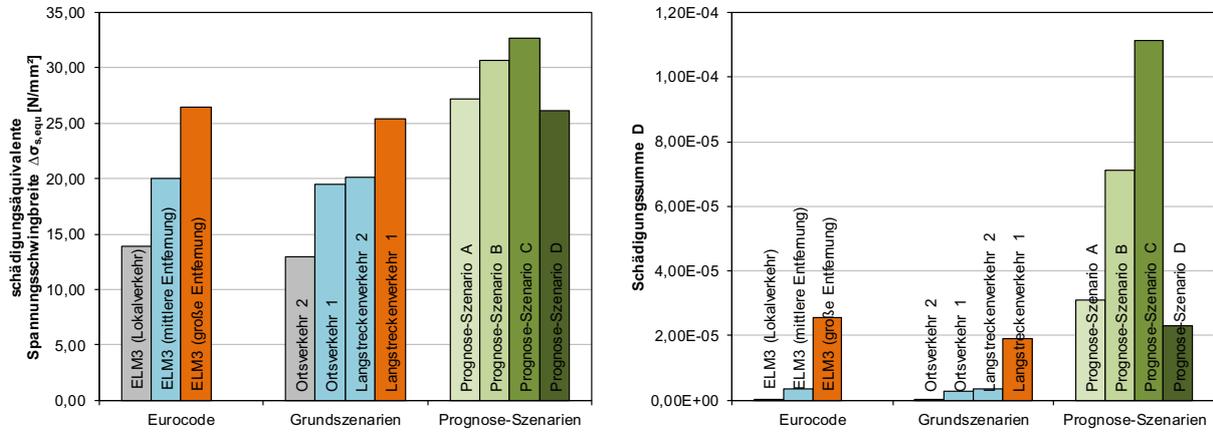


Abbildung F.30: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )

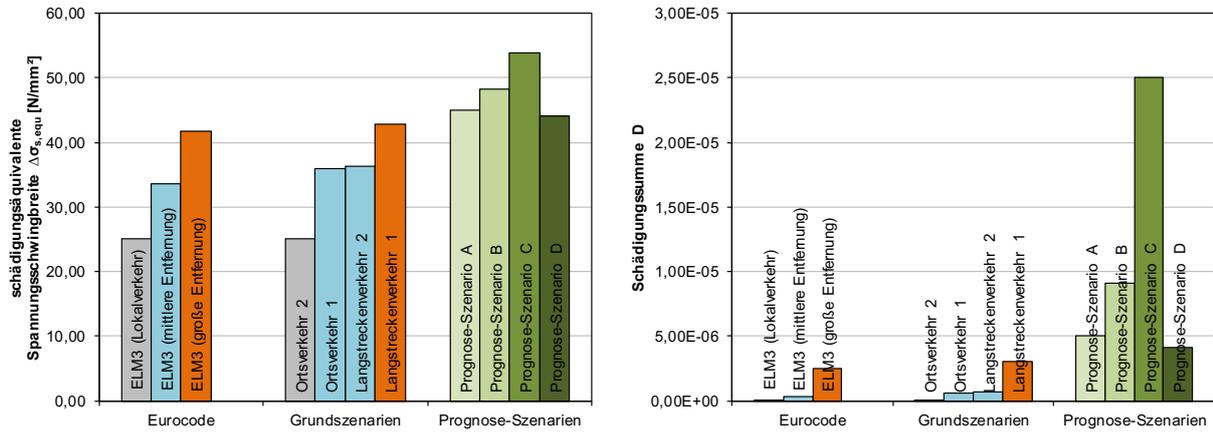


Abbildung F.31: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

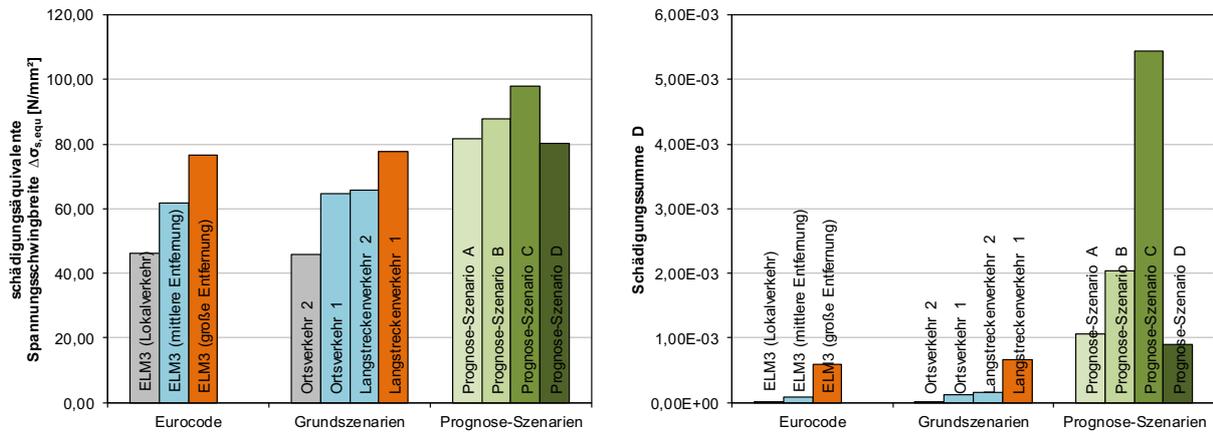


Abbildung F.32: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )

## Anhang G: Zusammenstellung der $\lambda$ -Faktoren zur Bemessung

Die folgende Zusammenstellung dient zur Ergänzung der in Kapitel 7 zusammengefasst dargestellten Ergebnisse zukunftsicherer  $\lambda$ -Faktoren des ELM 3 basierend auf dem Prognose-Szenario E. Der Umfang der untersuchten Schnittgrößen gliedert sich analog zu Abschnitt 3.1 wie folgt:

Durchlaufträger (L = 10, 30, 50, 70, 90m)

- Stützmoment
- Feldmoment (Mittelfeld)
- Feldmoment (Randfeld)
- Feldmoment (Koppelfuge)

- Querkraft (Mittelaufleger links)
- Querkraft (Mittelaufleger rechts)
- Querkraft (Randaufleger)

Rahmen (L = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70m)

- Rahmen Stützmoment
- Rahmen Feldmoment

Einfeldträger (L = 10, 20, 30, 40, 50m)

- Feldmoment
- Querkraft (Randaufleger)

**Durchlaufträger Stützmoment**

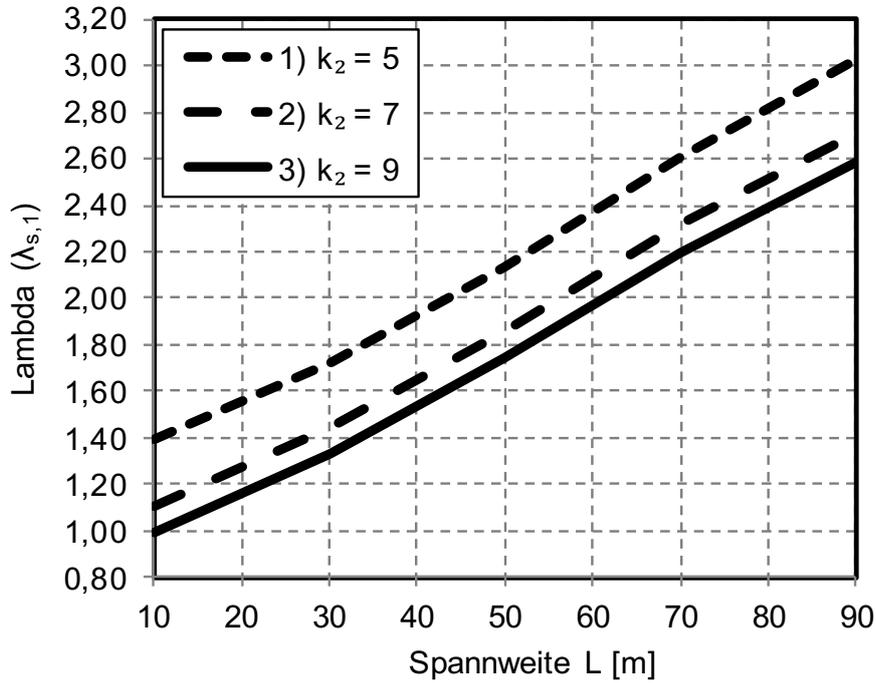


Abbildung G.1: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Durchlaufträger Stützmoment, Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,75 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda_{\text{Korrektur}} = 1,1$ , vgl. Abschnitt 6.4)

**Durchlaufträger Feldmoment (Mittelfeld)**

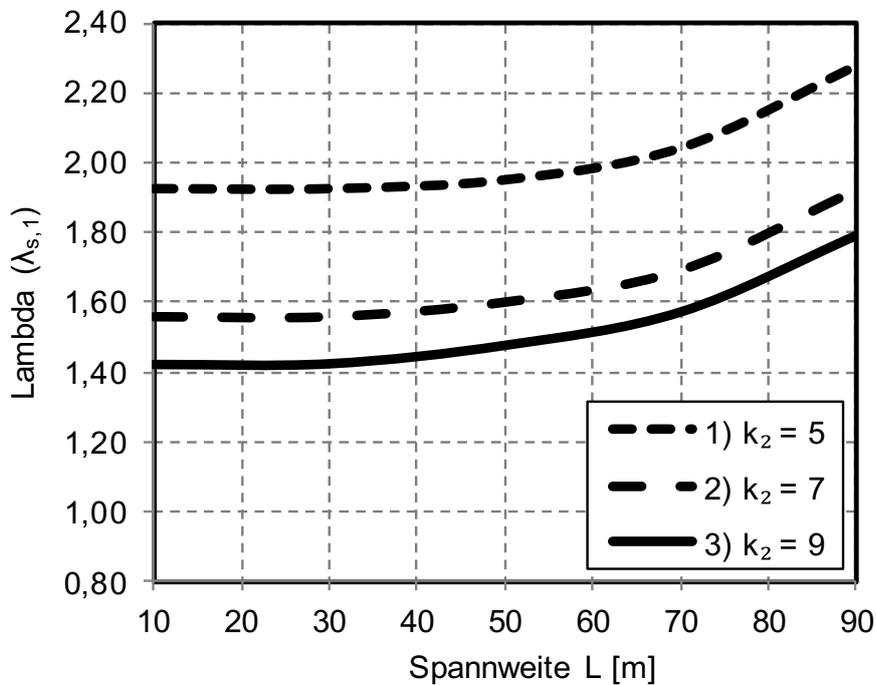


Abbildung G.2: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Durchlaufträger Feldmoment (Mittelfeld), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda_{\text{Korrektur}} = 1,1$ , vgl. Abschnitt 6.4)

### Durchlaufräger Feldmoment (Randfeld)

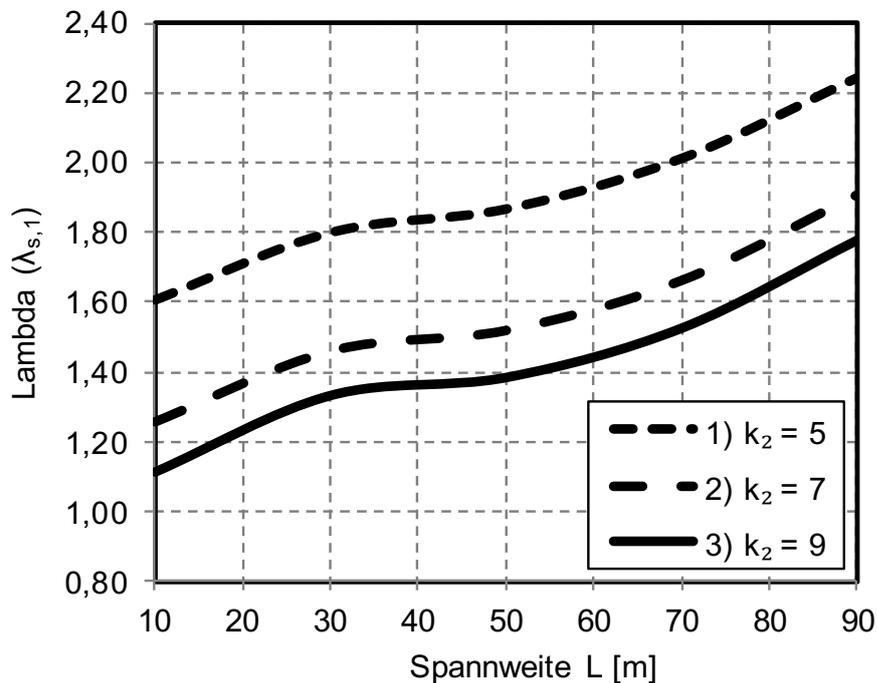


Abbildung G.3: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Durchlaufräger Feldmoment (Randfeld), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda_{\text{Korrektur}} = 1,1$ , vgl. Abschnitt 6.4)

### Durchlaufräger Feldmoment (Koppelfuge)

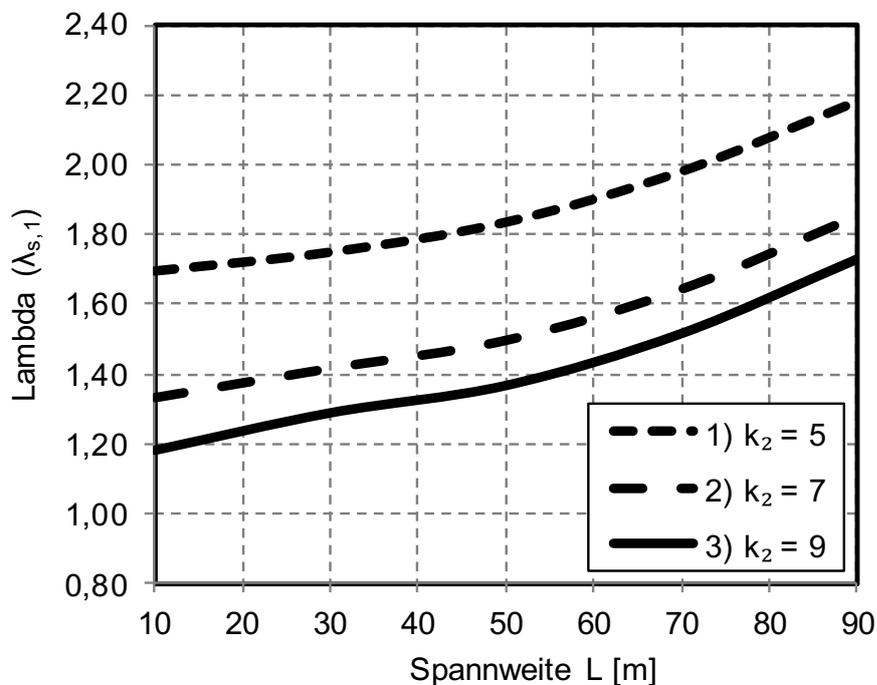


Abbildung G.4: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Durchlaufräger Feldmoment (Koppelfuge), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda_{\text{Korrektur}} = 1,1$ , vgl. Abschnitt 6.4)

**Rahmen Stützmoment**

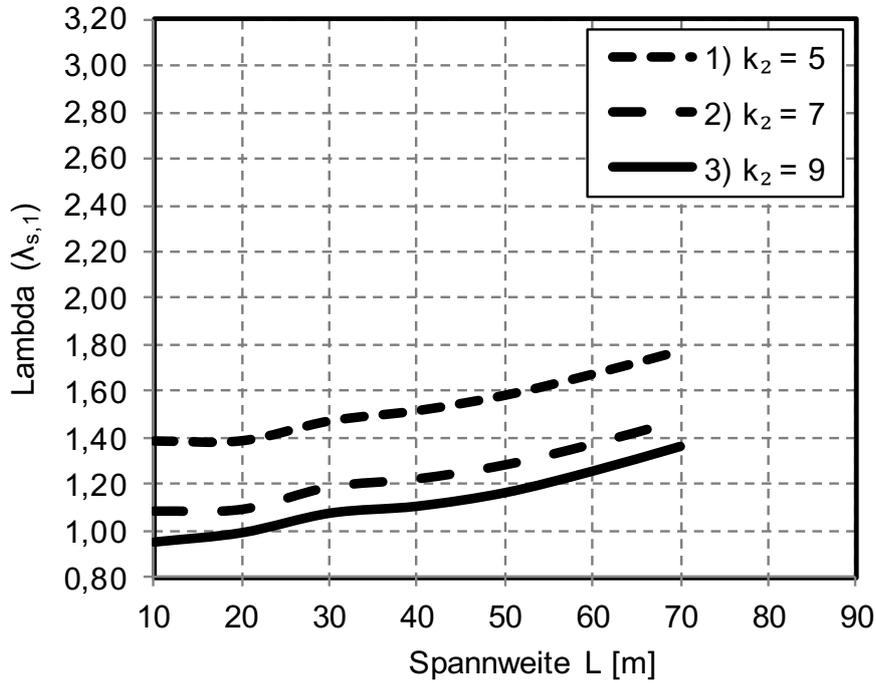


Abbildung G.5: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Rahmen Stützmoment, Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,75 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda_{Korrektur} = 1,1$ , vgl. Abschnitt 6.4)

**Rahmen Feldmoment**

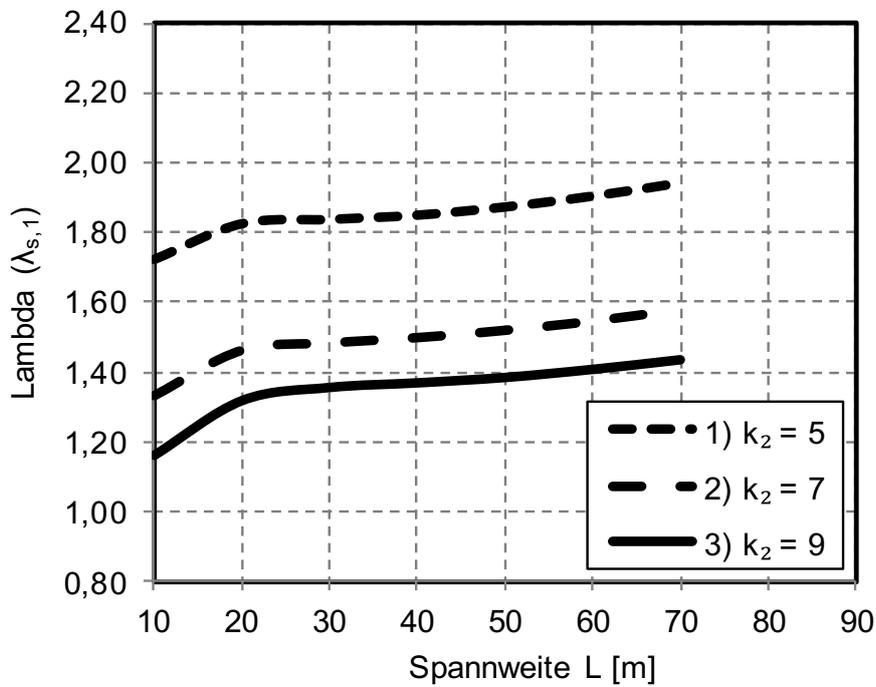


Abbildung G.6: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Rahmen Feldmoment, Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda_{Korrektur} = 1,1$ , vgl. Abschnitt 6.4)

## Einfeldträger Feldmoment

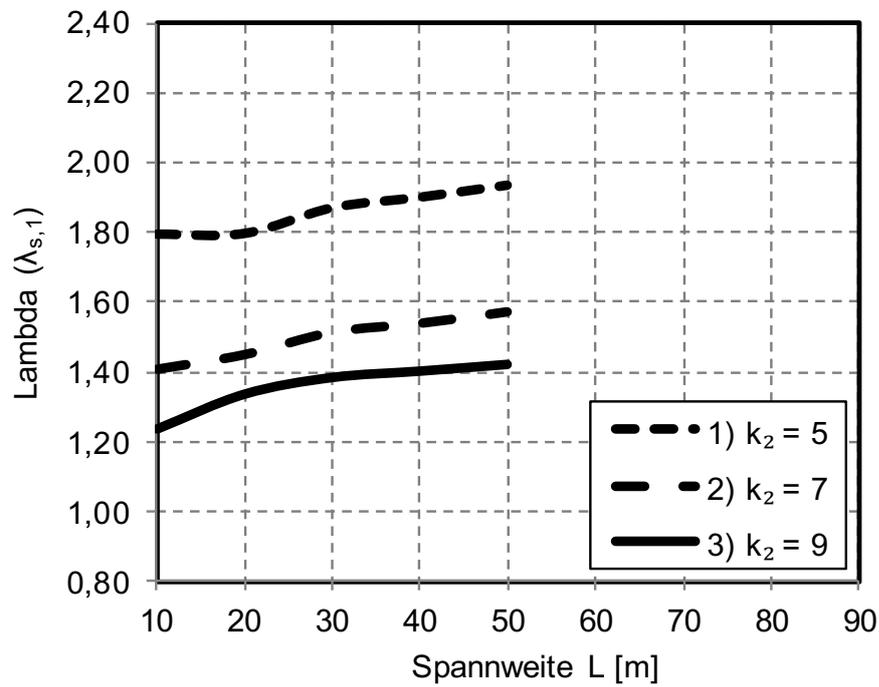


Abbildung G.7: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Einfeldträger Feldmoment, Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda_{\text{Korrektur}} = 1,1$ , vgl. Abschnitt 6.4)

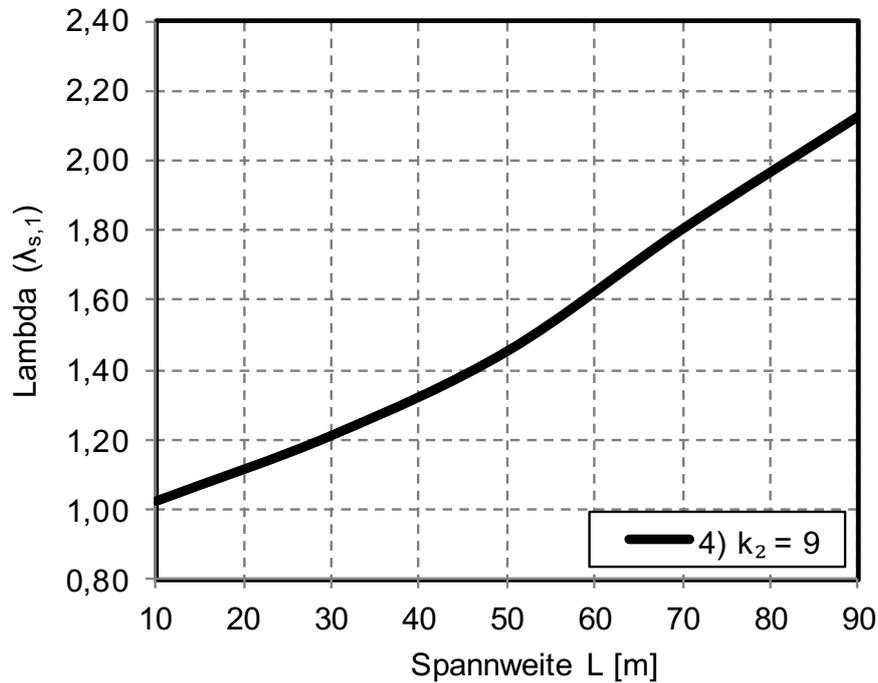
**Durchlaufträger Querkraft (Mittelaufleger links)**

Abbildung G.8: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Durchlaufträger Querkraft (Mittelaufl. links), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, Anpassung durch  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  nicht erforderlich)

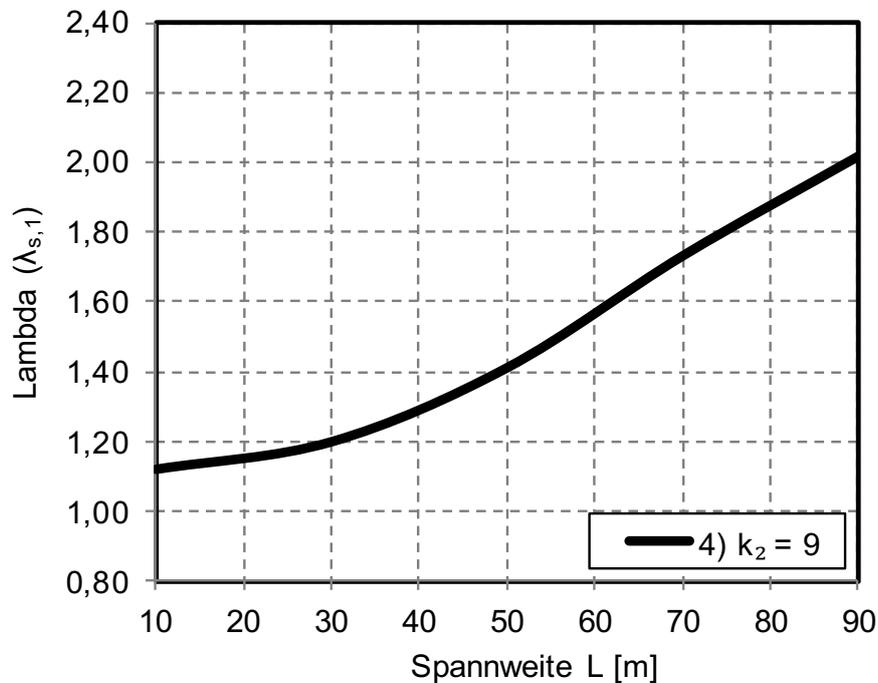
**Durchlaufträger Querkraft (Mittelaufleger rechts)**

Abbildung G.9: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Durchlaufträger Querkraft (Mittelaufl. rechts), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, Anpassung durch  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  nicht erforderlich)

### Durchlaufträger Querkraft (Randaufleger)

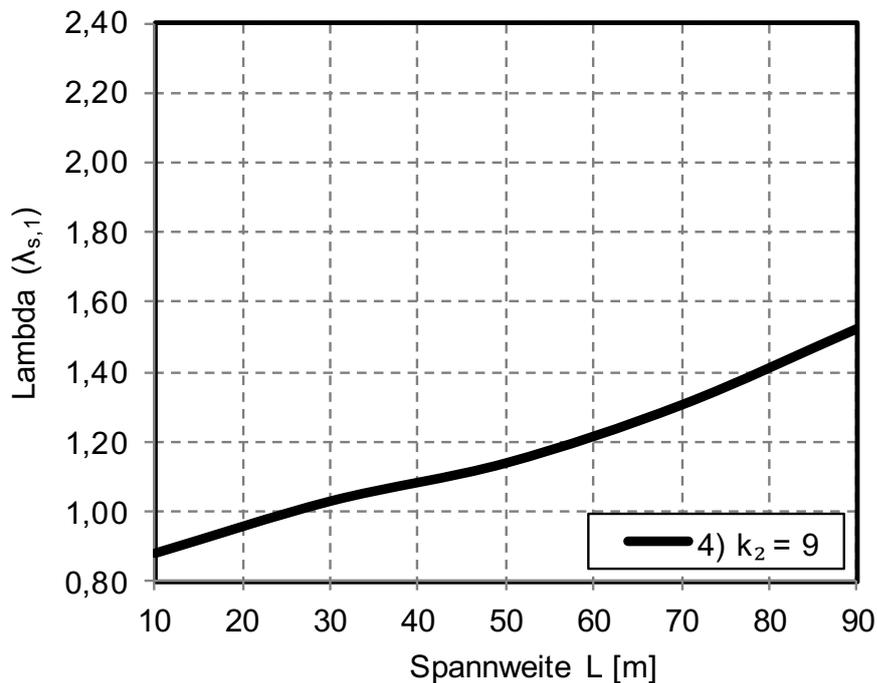


Abbildung G.10: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Durchlaufträger Querkraft (Randaufleger), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, Anpassung durch  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  nicht erforderlich)

### Einfeldträger Querkraft (Randaufleger)

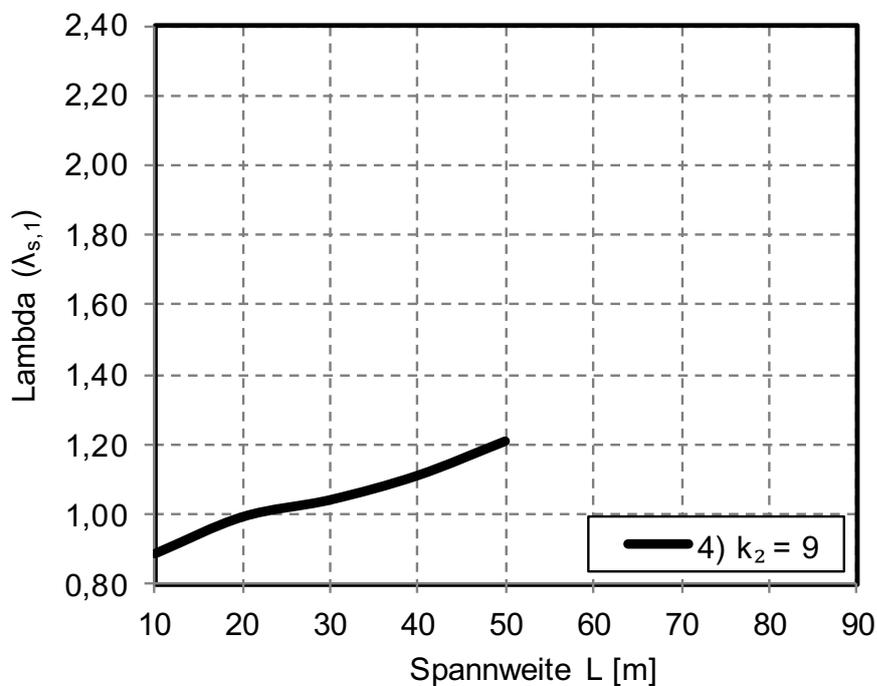


Abbildung G.11: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{s,1}$  – Einfeldträger Querkraft (Randaufleger), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, Anpassung durch  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  nicht erforderlich)

## Bilder

Abbildung 2.1: Eingangsgrößen einer Verkehrslastsimulation .....	18	Abbildung 3.2: Feldquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B1 [Geiß14].....	34
Abbildung 2.2: Beispielhafte Fahrzeugtypenverteilung .....	19	Abbildung 3.3: Stützquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B1 [Geiß14].....	34
Abbildung 2.3: Fundamentaldiagramm [Kühn04].....	20	Abbildung 3.4: Regelquerschnitt - Beispielbrücke B2.....	35
Abbildung 2.4: Tagesganglinie des Gesamtverkehrs .....	21	Abbildung 3.5: Längsschnitt - Beispielbrücke B235	
Abbildung 2.5: Tagesganglinie des Schwerverkehrs .....	21	Abbildung 3.6: Feldquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B2 .....	35
Abbildung 2.6: Fahrzeugabstände im fließenden Verkehr [Kasc09].....	22	Abbildung 3.7: Stützquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B2 .....	35
Abbildung 2.7: Verteilung der Kolonnenlänge ....	23	Abbildung 3.8: Querschnitt und statisches System - Beispielbrücke B3 .....	36
Abbildung 2.8: 24 Fahrzeugbänder einer Richtungsfahrbahn mit 3 Fahrstreifen (Blau = Hauptspur, Rot = Nebenspur 1, Orange = Nebenspur 2) .....	23	Abbildung 3.9: Feldquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B3 .....	36
Abbildung 2.9: Mögliche Stellungen eines überholenden LKW.....	24	Abbildung 3.10: Stützquerschnitt mit Bewehrung - Beispielbrücke B3 .....	37
Abbildung 2.10: Bezugs-Wöhlerlinien des Beton- und Spannstahls [Kroh14].....	25	Abbildung 3.11: Regelquerschnitt – Beispielbrücke B4.....	37
Abbildung 2.11: Beanspruchungskollektive unterschiedlicher Völligkeit [Kroh14] ..	25	Abbildung 3.12: Längsschnitt – Beispielbrücke B4.....	37
Abbildung 2.12: M- $\sigma$ -Diagramm für einen Spannbetonquerschnitt [Kroh14].....	26	Abbildung 3.13: Bewehrung Regelquerschnitt Überbau .....	38
Abbildung 2.13: M- $\sigma$ -Beziehungen eines beispielhaften Spannbetonquerschnittes.....	27	Abbildung 3.14: Spannbewehrung Regelquerschnitt Überbau .....	38
Abbildung 2.14: Vergleich von Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von Sattelzugfahrzeugen in Bezug zur Schwerverkehrsstärke .....	31	Abbildung 4.1: Entwicklung des Transportaufkommens in Deutschland [Mio. t. p.a.], [InBv07] [InBv14] [Prog07] [Bund16].....	39
Abbildung 2.15: Vergleich von Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von LKW mit Anhänger in Bezug zur Schwerverkehrsstärke .....	31	Abbildung 4.2: Anzahl der Anträge für Schwervertransporte bei der Autobahndirektion Nordbayern, Links: 1978-2004, Rechts: 2000-2015 [Kasc09] [Auto16].....	39
Abbildung 2.16: Vergleich von Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von LKW ohne Anhänger in Bezug zur Schwerverkehrsstärke .....	32	Abbildung 4.3: Einordnung der Grundszenarien zu vorliegenden Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von Sattelzugfahrzeugen in Bezug zur Schwerverkehrsstärke .....	45
Abbildung 3.1: Querschnitt und Statisches System - Beispielbrücke B1 [Geiß14].....	34	Abbildung 4.4: Einordnung der Grundszenarien zu vorliegenden Datenbeständen der	

	Verkehrscharakteristik – Anteil von LKW mit Anhängern in Bezug zur Schwerverkehrsstärke ..... 45		
Abbildung 4.5:	Einordnung der Grundszenarien zu vorliegenden Datenbeständen der Verkehrscharakteristik – Anteil von LKW ohne Anhänger in Bezug zur Schwerverkehrsstärke ..... 46	Abbildung 5.9:	Schädigungssumme Spannstahl unter Ansatz von ELM 4 nach Norm bei Variation der Anstiege der Wöhler-Linie – Stelle 1 ..... 57
Abbildung 4.6:	Prognose-Szenario D - Maßstäbliche Darstellung der betrachteten LKW-Kolonne ..... 49	Abbildung 5.10:	Schädigungssumme Spannstahl unter Ansatz von Gesamtgewichtsverteilungen für die Fahrzeuge und objektspezifischen Verkehrszahlen bei Variation der Anstiege der Wöhler-Linie – Stelle 1 ..... 58
Abbildung 5.1:	Ermittelte Schädigungssummen Betonstahl unter verschiedenen Grundbeanspruchungen und Ansätzen für die Schädigungsermittlung – Stelle 1 ..... 53	Abbildung 6.1:	Detaillierte Methode zur Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$ . 60
Abbildung 5.2:	Ermittelte Schädigungssummen Spannstahl unter verschiedenen Grundbeanspruchungen und Ansätzen für die Schädigungsermittlung – Stelle 1 ..... 54	Abbildung 6.2:	Vereinfachte Methode zur Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$ ..... 60
Abbildung 5.3:	Ermittelte Schädigungssummen Betonstahl unter verschiedenen Grundbeanspruchungen und Ansätzen für die Schädigungsermittlung – Stelle 2 ..... 54	Abbildung 6.3:	Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite $\Delta\sigma E$ , 1 bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK $\sigma_s$ ( $\Delta\sigma Rsk = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 62
Abbildung 5.4:	Ermittelte Schädigungssummen Spannstahl unter verschiedenen Grundbeanspruchungen und Ansätzen für die Schädigungsermittlung – Stelle 2 ..... 55	Abbildung 6.4:	Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite $\Delta\sigma E$ , 1 bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK $\sigma_p$ ( $\Delta\sigma Rsk = 120 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 3$ , $k_2 = 7$ ) ..... 62
Abbildung 5.5:	Anteil der einzelnen Fahrzeuge an der Schädigungssumme für den Betonstahl – Stelle 1 ..... 55	Abbildung 6.5:	Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$ bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK $\sigma_s$ ( $\Delta\sigma Rsk = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ). Faktor $\lambda$ bei allen Methoden jeweils bezogen auf das ELM3 mit Erhöhungsfaktor 1,75 ..... 62
Abbildung 5.6:	Anteil der einzelnen Fahrzeuge an der Schädigungssumme für den Spannstahl – Stelle 1 ..... 56	Abbildung 6.6:	Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$ bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK $\sigma_p$ ( $\Delta\sigma Rsk = 120 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 3$ , $k_2 = 7$ ). Faktor $\lambda$ bei allen Methoden jeweils bezogen auf das ELM3 mit Erhöhungsfaktor 1,40 ..... 62
Abbildung 5.7:	Schädigungssumme Betonstahl unter Ansatz von ELM 4 nach Norm bei Variation der Anstiege der Wöhler-Linie – Stelle 1 ..... 56		
Abbildung 5.8:	Schädigungssumme Betonstahl unter Ansatz von Gesamtgewichtsverteilungen für die Fahrzeuge und objektspezifischen Verkehrszahlen bei Variation der Anstiege der Wöhler-Linie – Stelle 1 ..... 57		

- Abbildung 6.7: Beanspruchungskollektive der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung (links) und der Momentenschwingbreite  $\Delta M$  (rechts) - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )..... 63
- Abbildung 6.8: Beanspruchungskollektive der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung (links) und der Momentenschwingbreite  $\Delta M$  (rechts) - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )..... 63
- Abbildung 6.9: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs- äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 64
- Abbildung 6.10: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs- äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma_E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 64
- Abbildung 6.11: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ). Faktor  $\lambda$  bei allen Methoden jeweils bezogen auf das ELM3 mit Erhöhungsfaktor 1,75..... 64
- Abbildung 6.12: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ). Faktor  $\lambda$  bei allen Methoden jeweils bezogen auf das ELM3 mit Erhöhungsfaktor 1,40..... 64
- Abbildung 6.13: Beanspruchungskollektive der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung (links) und der Momentenschwingbreite  $\Delta M$  (rechts) - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ )..... 65
- Abbildung 6.14: Beanspruchungskollektive der Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung (links) und der Momentenschwingbreite  $\Delta M$  (rechts) - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ )..... 65
- Abbildung 6.15: Definition des Korrekturfaktors  $\lambda_{\text{Korrektur}}$  ..... 66
- Abbildung 6.16: Zusammenhang zwischen Korrekturfaktor und der Spannungsschwingbreite infolge des ELM 3, vgl. Anhang E ..... 66
- Abbildung 7.1: Vergleich der Ergebnisse nach [DIN EN 1992-2/NA] und Simulation - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ) ..... 68
- Abbildung 7.2: Vergleich der Ergebnisse nach [DIN EN 1992-2/NA] und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ) ..... 68
- Abbildung 7.3: Vergleich der Ergebnisse nach [DIN EN 1992-2/NA] und Simulation - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ) ..... 68
- Abbildung 7.4: Vergleich der Ergebnisse nach [DIN EN 1992-2/NA] und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ) ..... 69
- Abbildung B.1: Vergleich zwischen Regelung nach [DIN EN 1992-2/NA], Ergebnissen mit Eingangsparametern nach Danielewicz (vgl. Tabelle B.10) und Ergebnissen mit Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“ ohne Schwingbeiwert im fließenden Verkehr (vgl. Tabelle B.9) - Einfeldträger (Feldmoment  $M_1$ )..... 110

- Abbildung B.2: Vergleich zwischen Regelung nach [DIN EN 1992-2/NA], Ergebnissen mit Eingangsparametern nach Danielewicz (vgl. Tabelle B.10) und Ergebnissen mit Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“ ohne Schwingbeiwert im fließenden Verkehr (vgl. Tabelle B.9) - Dreifeldträger (Stützmoment MB) ... 110
- Abbildung C.1: M- $\sigma$ -Beziehungen im Stützbereich für Spannstahl  $\sigma_p$  und Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $0,9 \cdot M_p,indir$ ) .. 112
- Abbildung C.2: M- $\sigma$ -Beziehungen im Stützbereich für Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $1,1 \cdot M_p,indir$ ) ..... 112
- Abbildung C.3: M- $\sigma$ -Beziehungen im Feldbereich für Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $0,9 \cdot M_p,indir$ ) ..... 113
- Abbildung C.4: M- $\sigma$ -Beziehungen im Feldbereich für Spannstahl  $\sigma_p$  und Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $1,1 \cdot M_p,indir$ ) .. 113
- Abbildung C.5: M- $\sigma$ -Beziehungen am Momentennullpunkt für Spannstahl  $\sigma_p$ , Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $0,9 \cdot M_p,indir$ ) ..... 114
- Abbildung C.6: M- $\sigma$ -Beziehungen am Momentennullpunkt für Spannstahl  $\sigma_p$ , Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $1,1 \cdot M_p,indir$ ) ..... 114
- Abbildung C.7: M- $\sigma$ -Beziehungen im Stützbereich für Spannstahl  $\sigma_p$  und Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $0,9 \cdot M_p,indir$ ) .. 115
- Abbildung C.8: M- $\sigma$ -Beziehungen im Stützbereich für Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $1,1 \cdot M_p,indir$ ) ..... 115
- Abbildung C.9: M- $\sigma$ -Beziehungen im Feldbereich für Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $0,9 \cdot M_p,indir$ ) ..... 116
- Abbildung C.10: M- $\sigma$ -Beziehungen im Feldbereich für Spannstahl  $\sigma_p$  und Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $1,1 \cdot M_p,indir$ ) .. 116
- Abbildung C.11: M- $\sigma$ -Beziehungen am Momentennullpunkt für Spannstahl  $\sigma_p$ , Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-OK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-UK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $0,9 \cdot M_p,indir$ ) ..... 117
- Abbildung C.12: M- $\sigma$ -Beziehungen am Momentennullpunkt für Spannstahl  $\sigma_p$ , Bewehrung  $\sigma_s$  an Querschnitts-UK und für Beton  $\sigma_c$  an Querschnitts-OK ( $0,9 \cdot P_m$ ,  $0,9 \cdot M_p,dir$ ,  $1,1 \cdot M_p,indir$ ) ..... 117
- Abbildung D.1: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma Rsk = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 119
- Abbildung D.2: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma Rsk = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 119
- Abbildung D.3: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma Rsk = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 120

- Abbildung D.4: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 121
- Abbildung D.5: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 121
- Abbildung D.6: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 122
- Abbildung D.7: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 122
- Abbildung D.8: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 123
- Abbildung D.9: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 123
- Abbildung D.10: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 124
- Abbildung D.11: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 124
- Abbildung D.12: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 125
- Abbildung D.13: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 126
- Abbildung D.14: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 126
- Abbildung D.15: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 127
- Abbildung D.16: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 127
- Abbildung D.17: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E, 1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 128

- Abbildung D.18: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momenten-nullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 128
- Abbildung D.19: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 129
- Abbildung D.20: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 129
- Abbildung D.21: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 130
- Abbildung D.22: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 130
- Abbildung D.23: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momenten-nullpunkt UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 131
- Abbildung D.24: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 132
- Abbildung D.25: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 132
- Abbildung D.26: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 133
- Abbildung D.27: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 133
- Abbildung D.28: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momenten-nullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 134
- Abbildung D.29: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Momenten-nullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 134
- Abbildung D.30: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 135
- Abbildung D.31: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungs-äquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E,1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 136

- Abbildung D.32: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung der schädigungsäquivalenten Schwingbreite  $\Delta\sigma E_1$  bei unterschiedlichen Stufen der Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 136
- Abbildung E.1: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 137
- Abbildung E.2: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 138
- Abbildung E.3: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 138
- Abbildung E.4: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 139
- Abbildung E.5: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 139
- Abbildung E.6: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 139
- Abbildung E.7: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 140
- Abbildung E.8: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 140
- Abbildung E.9: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 140
- Abbildung E.10: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 141
- Abbildung E.11: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 141
- Abbildung E.12: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 141
- Abbildung E.13: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 142

- Abbildung E.14: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Stützbereich UK  $\sigma_s$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 142
- Abbildung E.15: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Feldbereich OK  $\sigma_s$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 142
- Abbildung E.16: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Feldbereich UK  $\sigma_s$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 143
- Abbildung E.17: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Momentennullpunkt OK  $\sigma_s$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 143
- Abbildung E.18: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_s$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 143
- Abbildung E.19: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Stützbereich OK  $\sigma_{p1}$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 144
- Abbildung E.20: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Stützbereich OK  $\sigma_{p2}$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 144
- Abbildung E.21: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Feldbereich UK  $\sigma_{p1}$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 144
- Abbildung E.22: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Feldbereich UK  $\sigma_{p2}$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 145
- Abbildung E.23: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Momentennullpunkt UK  $\sigma_{p2}$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 145
- Abbildung E.24: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Stützbereich OK  $\sigma_s$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 146
- Abbildung E.25: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Stützbereich UK  $\sigma_s$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 146
- Abbildung E.26: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Feldbereich OK  $\sigma_s$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 146
- Abbildung E.27: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors  $\lambda$  bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung  
- Feldbereich UK  $\sigma_s$   
( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 147

Abbildung E.28: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$ bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt OK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 147	Abbildung F.4: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 151
Abbildung E.29: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$ bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Momentennullpunkt UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 147	Abbildung F.5: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 151
Abbildung E.30: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$ bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 3$ , $k_2 = 7$ ) ..... 148	Abbildung F.6: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich OK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 151
Abbildung E.31: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$ bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich OK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 148	Abbildung F.7: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 152
Abbildung E.32: Einfluss von Linearisierungen bei der Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors $\lambda$ bei unterschiedlicher Grundbeanspruchung - Feldbereich UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 148	Abbildung F.8: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentennullpunkt OK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 152
Abbildung F.1: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 3$ , $k_2 = 7$ ) ..... 150	Abbildung F.9: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentennullpunkt UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 5$ , $k_2 = 9$ ) ..... 152
Abbildung F.2: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 3$ , $k_2 = 7$ ) ..... 150	Abbildung F.10: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 3$ , $k_2 = 7$ ) ..... 153
Abbildung F.3: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentennullpunkt UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 3$ , $k_2 = 7$ ) ..... 150	Abbildung F.11: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 3$ , $k_2 = 7$ ) ..... 153
	Abbildung F.12: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momentennullpunkt UK $\sigma$ ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ , $k_1 = 3$ , $k_2 = 7$ ) ..... 153

- Abbildung F.13: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 154
- Abbildung F.14: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 154
- Abbildung F.15: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 154
- Abbildung F.16: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 155
- Abbildung F.17: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momenten-nullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 155
- Abbildung F.18: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momenten-nullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 155
- Abbildung F.19: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 156
- Abbildung F.20: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 156
- Abbildung F.21: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_{p1}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 156
- Abbildung F.22: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 157
- Abbildung F.23: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momenten-nullpunkt UK  $\sigma_{p2}$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 157
- Abbildung F.24: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 158
- Abbildung F.25: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Stützbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 158
- Abbildung F.26: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 158
- Abbildung F.27: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 159
- Abbildung F.28: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momenten-nullpunkt OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 159
- Abbildung F.29: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Momenten-nullpunkt UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 159
- Abbildung F.30: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_p$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 120 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 3$ ,  $k_2 = 7$ ) ..... 160
- Abbildung F.31: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich OK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 160
- Abbildung F.32: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach DIN EN 1992-2/NA:2013-04 und Simulation - Feldbereich UK  $\sigma_s$  ( $\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$ ,  $k_1 = 5$ ,  $k_2 = 9$ ) ..... 160

- Abbildung G.1: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Durchlaufträger Stützmoment, Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,75 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda$ Korrektur = 1,1, vgl. Abschnitt 6.4) ..... 162
- Abbildung G.2: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Durchlaufträger Feldmoment (Mittelfeld), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda$ Korrektur = 1,1, vgl. Abschnitt 6.4) ..... 162
- Abbildung G.3: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Durchlaufträger Feldmoment (Randfeld), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda$ Korrektur = 1,1, vgl. Abschnitt 6.4) ..... 163
- Abbildung G.4: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Durchlaufträger Feldmoment (Koppelfuge), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda$ Korrektur = 1,1, vgl. Abschnitt 6.4) ..... 163
- Abbildung G.5: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Rahmen Stützmoment, Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,75 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda$ Korrektur = 1,1, vgl. Abschnitt 6.4) ..... 164
- Abbildung G.6: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Rahmen Feldmoment, Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda$ Korrektur = 1,1, vgl. Abschnitt 6.4) ..... 164
- Abbildung G.7: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Einfeldträger Feldmoment, Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, inkl.  $\lambda$ Korrektur = 1,1, vgl. Abschnitt 6.4) ..... 165
- Abbildung G.8: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Durchlaufträger Querkraft (Mittelauf. links), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, Anpassung durch  $\lambda$ Korrektur nicht erforderlich) ..... 166
- Abbildung G.9: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Durchlaufträger Querkraft (Mittelauf. rechts), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, Anpassung durch  $\lambda$ Korrektur nicht erforderlich) ..... 166
- Abbildung G.10: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Durchlaufträger Querkraft (Randaufleger), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, Anpassung durch  $\lambda$ Korrektur nicht erforderlich) ..... 167
- Abbildung G.11: Simulationsergebnis für Beiwert  $\lambda_{S,1}$  – Einfeldträger Querkraft (Randaufleger), Erhöhungsfaktor des ELM 3 = 1,40 (basierend auf Prognose-Szenario E, Anpassung durch  $\lambda$ Korrektur nicht erforderlich) ..... 167

## Tabelle

- Tabelle 2.1: Achsabstände, Achslastverteilung und Gesamtgewichtsverteilung des Fahrzeugtyps 98 ..... 19
- Tabelle 2.2: Gruppe von Ersatzfahrzeugen des bisherigen ELM 4 [DIN EN 1991-2] ..... 28
- Tabelle 2.3: Veränderung der Verkehrszusammensetzung im ELM 4 [Kroh14] . 29
- Tabelle 3.1: Zusammenstellung relevanter Tragsysteme und Nachweisstellen in Längsrichtung in Anlehnung an [Dani94] ..... 33
- Tabelle 4.1: Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“. Daten in Anlehnung an A61 Bliesheim (2004) inkl. gen.pfl. SV (Dauergenehmigung). DTSV = 10.000 pro Richtung ..... 41

<p>Tabelle 4.2: Grundszenario „Langstreckenverkehr 2“. Daten in Anlehnung an „Mittlere Entfernung“ in [NaRiLi11], sowie Ergebnissen der Verkehrsdatenbank (vgl. Anhang A) inkl. gen.pfl. SV (Dauergenehmigung). DTSV = 2.400 pro Richtung ..... 42</p> <p>Tabelle 4.3: Grundszenario „Ortsverkehr 1“. Daten in Anlehnung an „Ortsverkehr“ in [NaRiLi11], sowie Ergebnissen der Verkehrsdatenbank (vgl. Anhang A) inkl. gen.pfl. SV (Dauergenehmigung). DTSV = 2.400 pro Richtung ..... 43</p> <p>Tabelle 4.4: Grundszenario „Ortsverkehr 2“. Daten in Anlehnung an „Ortsverkehr“ in [NaRiLi11], sowie Ergebnissen der Verkehrsdatenbank (vgl. Anhang A) inkl. geringerem Anteil an gen.pfl. SV (Dauergenehmigung). DTSV = 500 pro Richtung ..... 44</p> <p>Tabelle 4.5: Prognose-Szenario A - Abschätzung der zukünftigen Schwerverkehrsstärke DTSV ..... 47</p> <p>Tabelle 4.6: Prognose-Szenario B - Abschätzung des zukünftigen Gesamtgewichtes beladener LKW <math>\mu_2^*</math> ..... 47</p> <p>Tabelle 4.7: Prognose-Szenario B - Resultierende Verteilungen der zukünftigen Fahrzeuggesamtgewichte ..... 48</p> <p>Tabelle 4.8: Prognose-Szenario C - Abschätzung des zukünftigen Anteils des genehmigungspflichtigen SV am gesamten SV. 48</p> <p>Tabelle 4.9: Prognose-Szenario D - Geometrie, Achslastverteilung und Gesamtgewichtverteilung der LKW-Kolonnen 49</p> <p>Tabelle 4.10: Prognose-Szenario D - Fahrzeugtypenverteilung mit 50% der LKW Typ 98 als LKW-Kolonnen ..... 49</p> <p>Tabelle 4.11: Prognose-Szenario E - Abschätzung des zukünftigen Gesamtgewichtes beladener LKW <math>\mu_2^*</math> ..... 50</p>	<p>Tabelle 4.12: Prognose-Szenario E - Abschätzung der zukünftigen Schwerverkehrsstärke DTSV ..... 50</p> <p>Tabelle 7.1: Beiwert <math>\lambda_S, 1</math> für den Einfluss von Spannweite und System inkl. <math>\lambda</math>Korrektur, sofern die Spannungsschwingspiele sowohl im Zustand I als auch Zustand II stattfinden (Vorschlag basierend auf Prognose-Szenario E) ..... 71</p> <p>Tabelle 7.2: Beiwert <math>\lambda_S, 1</math> für den Einfluss von Spannweite und System inkl. <math>\lambda</math>Korrektur, sofern die Spannungsschwingspiele sowohl im Zustand I als auch Zustand II stattfinden (Referenzergebnisse basierend auf Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“) ..... 72</p> <p>Tabelle 7.3: Beiwert <math>\lambda_S, 1</math> für den Einfluss von Spannweite und System ohne <math>\lambda</math>Korrektur, sofern die Spannungsschwingspiele fast ausschließlich im Zustand II stattfinden (Vorschlag basierend auf Prognose-Szenario E) ..... 73</p> <p>Tabelle 7.4: Beiwert <math>\lambda_S, 1</math> für den Einfluss von Spannweite und System ohne <math>\lambda</math>Korrektur, sofern die Spannungsschwingspiele fast ausschließlich im Zustand II stattfinden (Referenzergebnisse basierend auf Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“) ..... 74</p> <p>Tabelle A.1: Mittlere Achsabstände der Fahrzeugtypen ..... 80</p> <p>Tabelle A.2: Mittlere Achslastverteilungen der Fahrzeugtypen ..... 80</p> <p>Tabelle A.3: WIMDaten_A2_BrandenB_2005, Richtung 1, DTSV=5877 ..... 81</p> <p>Tabelle A.4: WIMDaten_A2_BrandenB_2005, Richtung 2, DTSV=6013 ..... 81</p> <p>Tabelle A.5: WIMDaten_A9_Bayer_FR_Muenchen_2005, Richtung 1, DTSV=6461 (Hauptspur) ..... 82</p> <p>Tabelle A.6: WIMDaten_A9_Bayer_FR_Muenchen_2005, Richtung 1, DTSV=905 (Nebenspur) ..... 82</p>
--	--

Tabelle A.7:	WIMDaten_A9_SA_FR_Berlin_2004, Richtung 1, DTSV=4675 ..... 83	Tabelle A.24:	BWIMDaten_Göxer-Landstraße_2014_2015, Richtung 1, DTSV=200 ..... 93
Tabelle A.8:	WIMDaten_A24_MV_2004_2005, Richtung 1, DTSV=2935 ..... 84	Tabelle A.25:	BWIMDaten_Göxer-Landstraße_2014_2015, Richtung 2, DTSV=200 ..... 93
Tabelle A.9:	WIMDaten_A24_MV_2004_2005, Richtung 2, DTSV=2956 ..... 84	Tabelle A.26:	BWIMDaten_LingenerDamm_B70_2015_2016, Richtung 1, DTSV=1200 ..... 94
Tabelle A.10:	WIMDaten_A33_NRW_2004_2005, Richtung 1, DTSV=2974 ..... 85	Tabelle A.27:	BWIMDaten_LingenerDamm_B70_2015_2016, Richtung 2, DTSV=1200 ..... 94
Tabelle A.11:	WIMDaten_A33_NRW_2004_2005, Richtung 2, DTSV=3132 ..... 85	Tabelle A.28:	ZSDaten_Wetzlar_2015, Richtung 1 Links: DTSV=962, DTV=2688 (Hauptspur), Rechts: DTSV=243, DTV=7146 (Nebenspur)..... 95
Tabelle A.12:	WIMDaten_A2_Essehof_2014, Richtung 1, DTSV= 9294 ..... 86	Tabelle A.29:	ZSDaten_Wetzlar_2015, Richtung 2 Links: DTSV=962, DTV=2688 (Hauptspur), Rechts: DTSV=243, DTV=7146 (Nebenspur)..... 95
Tabelle A.13:	WIMDaten_A3_Aicha_vorm_Wald_2014, Richtung 1, DTSV=4639 ..... 87	Tabelle A.30:	ZSDaten_FuldaBr_2015, Richtung 1 Links: DTSV=7000, DTV=10370 (Hauptspur), Rechts: DTSV=1751, DTV=15230 (Nebenspur)..... 96
Tabelle A.14:	WIMDaten_A3_Aicha_vorm_Wald_2014, Richtung 2, DTSV=4922 ..... 87	Tabelle A.31:	ZSDaten_EselsWiese_2017, Richtung 1 Links: DTSV=3232, DTV=18270 (Hauptspur), Rechts: DTSV=170, DTV=3930 (Nebenspur)..... 97
Tabelle A.15:	WIMDaten_A7_Bottenweiler_2015, Richtung 1, DTSV=2312 ..... 88	Tabelle B.1:	Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“, DTSV=8000 ..... 99
Tabelle A.16:	WIMDaten_A7_Bottenweiler_2015, Richtung 2, DTSV=2241 ..... 88	Tabelle B.2:	Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“ ohne 72t-Mobilkran, DTSV=8000 ..... 100
Tabelle A.17:	WIMDaten_A9_Baarer_Weiher_2013, Richtung 1, DTSV=5522 ..... 89	Tabelle B.3:	Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“ mit 60t-Mobilkran (59,1t ≤ G ≤ 66,0t) anstatt 72t-Mobilkran, DTSV=8000 ..... 101
Tabelle A.18:	WIMDaten_A24_Neustadt_Glewe_2007, Richtung 1, DTSV=2481 ..... 90	Tabelle B.4:	Grundszenario „Ortsverkehr 1“, DTSV=8000 ..... 102
Tabelle A.19:	WIMDaten_A24_Neustadt_Glewe_2007, Richtung 2, DTSV=2454 ..... 90	Tabelle B.5:	Auxerre-Verkehr..... 103
Tabelle A.20:	WIMDaten_A31_Reken_2015, Richtung 1, DTSV=1961 ..... 91	Tabelle B.6:	Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“ ohne Stau, DTSV=8000 ..... 104
Tabelle A.21:	WIMDaten_A31_Reken_2015, Richtung 2, DTSV=1935 ..... 91		
Tabelle A.22:	BWIMDaten_DreierwalderBrücke_2014, Richtung 1, DTSV=150 ..... 92		
Tabelle A.23:	BWIMDaten_DreierwalderBrücke_2014, Richtung 2, DTSV=150 ..... 92		

---

Tabelle B.7:	Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“ ohne Stau, mit Kolonne von 5x LKW Typ 98 als ein Fahrzeug (anstatt LKW Typ 98), DTSV=8000 .....	105
Tabelle B.8:	Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“ mit Berücksichtigung schon heute auftretender Kolonnen (max. Kolonnenabstand=100m), DTSV=8000 .....	106
Tabelle B.9:	Grundszenario „Langstreckenverkehr 1“ ohne Schwingbeiwert im fließenden Verkehr (d.h. $\varphi=1,0$ anstatt $\varphi=1,1$ ), DTSV=8000 .....	107
Tabelle B.10:	Simulationsparameter nach Danielewicz: Auxerre-Verkehr, kein Stau, kein Schwingbeiwert, max. Kolonnenabstand=100m, DTSV=8000 .....	108

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 2021

**B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager**

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 161: Lagerwege von Brücken**

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit**

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen**

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten**

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen**

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen**

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan**

Staeck, Eilers

€ 15,50

**B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen**

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen**

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt**

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)**

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren**

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton**

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2022

**B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen**

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)**

Purtak, Möbius

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen**

Staeck

€ 15,00

**B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten**

Freundt, Böning, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn**

Windmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland**

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung**

Schreck, Decker, Wawrzyniak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten**

Maurer, Wentzek, Hegger, Adam, Rombach, Harter, Zilch, Tecusan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau**

Seitner, Probst, Bormann, Vilgertshofer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen**

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brennberger, Zulauf, Locher

€ 18,00

**B 184: Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken**

Kindl, Stadler, Walther, Bornmann, Freitag  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 185: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität**

Hill, Bahlau, Butenhof, Degener, Klein, Kukushkin, Riedlinger, Oppermann, Lambracht, Mertens  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2023

**B 186: Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie**

Zilch, Kriechbaum, Maurer, Heinrich, Weiher, Runtemund  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 187: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen**

Friedrich € 18,00

**B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm**

Butz, Rill, Freundt, Böning, Werner, Fischer, Lau  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 189: Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie – Validierung erweiterter Nachweisformate zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken**

Fischer, Thoma, Hegger, Schmidt  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken**

Morgenthal, Rau, Hallermann, Schellenberg, Martín-Sanz, Schuber, Kübler  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 191: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau**

Thewes, Vollmann, Wahl, König, Stepien, Riepe, Weißbrod  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 192: Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur**

Lindström, Zulauf, Rothenfluh, Bruns, Brunner, Roth, Caminada, Graf, Dahl  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 193: Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenten Brücke**

Empelmann, Javidmehr, Rathgen, Hellenbrand, Ulbricht, Wagner, Kessel, Sietas  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 194: Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken**

Taffe, Vonk  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 195: Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2**

Geißler, Kraus, Freundt, Böning  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

---

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.