

Zukunftssicherheit der Ermüdungslastmodelle nach DIN EN 1991-2

FA 15.629

Forschungsstellen: Ingenieurbüro Prof. Dr. U. Freundt, Weimar

Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Stahlbau (Prof. Dr.-Ing. K. Geißler)

Bearbeiter: Freundt, U. / Geißler, K. / Böning, S. / Kraus, J.K.

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

Abschluss: Mai 2020

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 Forschungsprojekts 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-Zeitverläufe 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- σ -Beziehung und Wöhlerlinie untersucht. Beide Punkte stellen bisher notwendige Vereinfachungen für eine verallgemeinerbare Lösung der Ermüdungsproblematik im Massivbau dar.

2 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.

2.1 Analyse vereinfachter Tragsysteme

Eine Betrachtung vereinfachter 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 Bild 1 beispielhaft dargestellt.

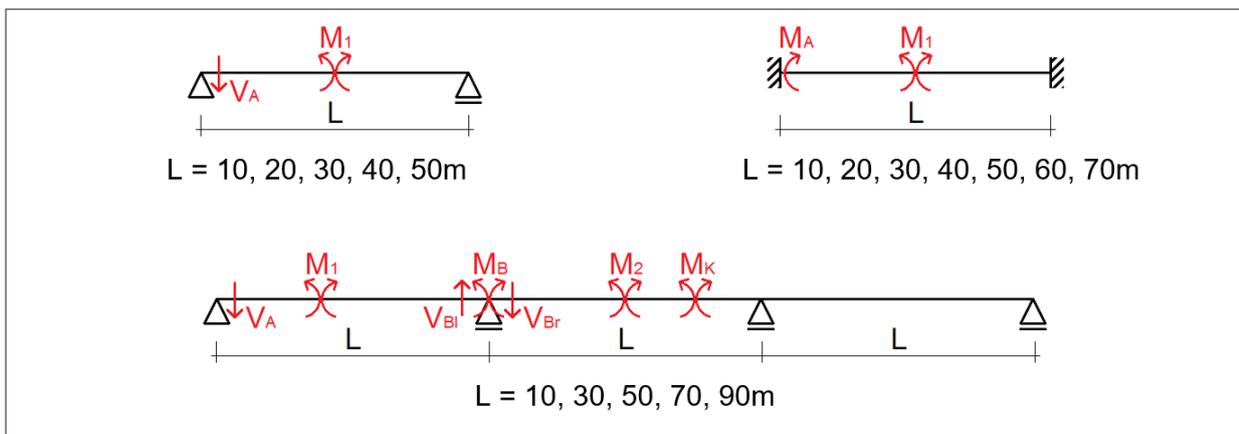


Bild 1: Zusammenstellung relevanter Tragsysteme und Nachweisstellen in Längsrichtung in Anlehnung an [Dani94]

2.2 Analyse detaillierter Tragsysteme

Zusätzlich 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. Bemessungsgrundlage aller Beispielbrücken sind die 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].

2.2.1 Beispielbrücke B1

Das erste Beispiel stellt ein zweifeldriges Bauwerk mit Stützweiten von 2 x 22,50 m dar. In Querrichtung handelt es sich um einen zweistegigen Plattenbalken mit einer Fahrbahnbreite von 8,00 m

(Bild 2). Als Vorspannung wurden Spannglieder mit nachträglichem Verbund gewählt.

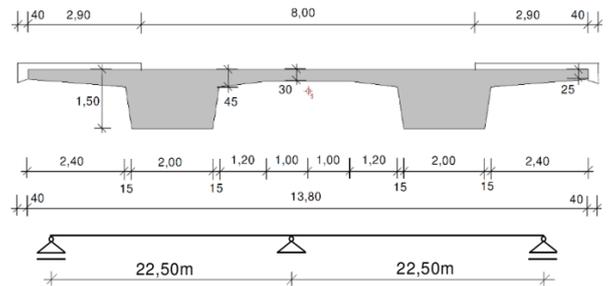


Bild 2: Querschnitt und Statisches System – Beispielbrücke B1 [Geiß14]

2.2.2 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 (Bild 3). Als Vorspannung wurden auch hier Spannglieder mit nachträglichem Verbund gewählt.

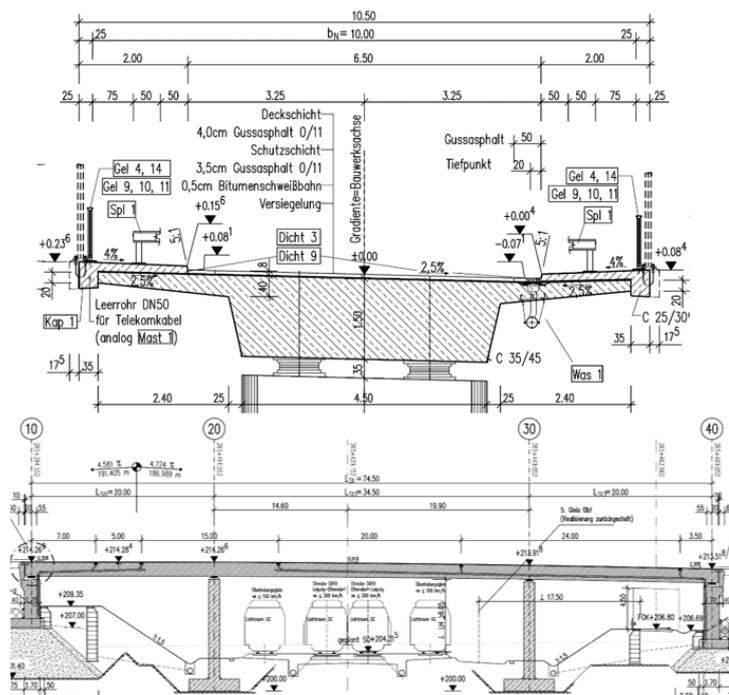


Bild 3: Regelquerschnitt und Längsschnitt – Beispielbrücke B2

2.2.3 Beispielbrücke B3

Um verallgemeinerungsfähige Aussagen ableiten zu können, wird ein in Längsrichtung zweifeldriges Bauwerk mit Stützweiten von 2 x 40 m und einem Plattenbalkenquerschnitt als Systemgrundlage erforderlich. Deshalb wird die Beispielbrücke B3 mit dem Zweck der Vergleichsrechnungen entworfen und berechnet. Der Querschnitt ist ein zweistegiger Plattenbalken mit einer Fahrbahnbreite von 7,00 m. Die Konstruktionshöhe wird

mit 1,80 verhältnismäßig schlank ausgebildet. Der Querschnitt ist in Bild 4 dargestellt. Als Vorspannung wurden auch hier Spannglieder mit nachträglichem Verbund gewählt.

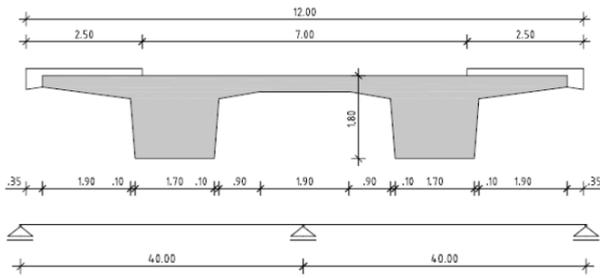


Bild 4: Querschnitt und statisches System – Beispielbrücke B3

2.2.4 Beispielbrücke B4

Zur Abrundung wird noch ein einfeldriges Bauwerk in Spannbetonbauweise untersucht. Die Stützweite beträgt 24,60 m, die Konstruktionshöhe 1,35 m. Der Überbauquerschnitt ist ein zwei-stegiger Plattenbalken mit einer Fahrbahnbreite von 7,00 m. Die Breite zwischen den Geländern beträgt 12,30 m. Regelquer- und Längsschnitt sind in Bild 5 dargestellt.

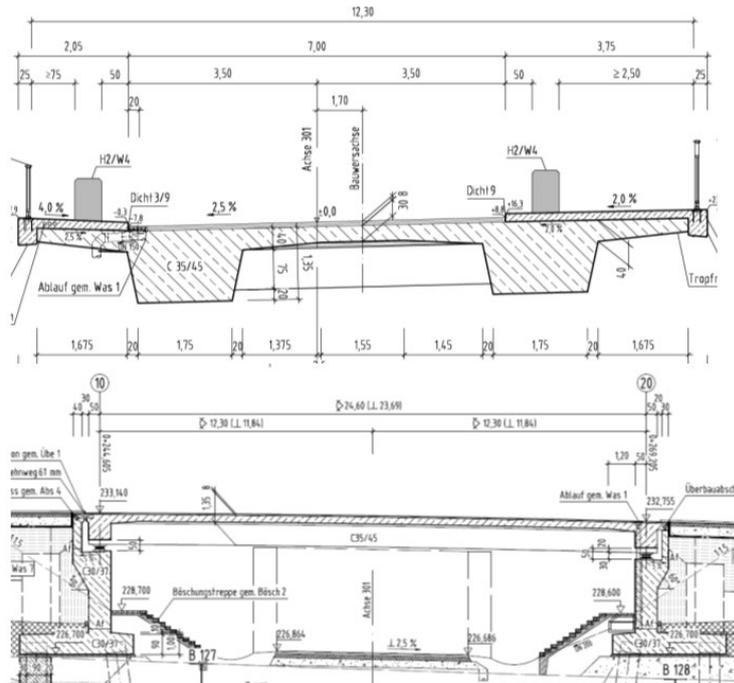


Bild 5: Regelquerschnitt und Längsschnitt – Beispielbrücke B4

3 Verkehrsprognosen

Zur Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Straßengüterverkehrs in Deutschland werden Prognosen im Auftrag des BMVBS beziehungsweise BMDV [InBv14] [Prog07] herangezogen. Das jährliche Transportaufkommen im Straßengüterverkehr wird als Kenngröße der zukünftigen Verkehrsentwicklung herangezogen. Dabei ergibt sich für die folgenden Prognose-Szenarien, jeweils von 2004 bis 2050, eine Zunahme des Transportaufkommens in Deutschland von +63,3 %.

3.1 Grundszenarien

Zur Ableitung geeigneter Fahrzeugkollektive des zukünftigen Verkehrs werden zunächst Grundszenarien definiert, die den aktuellen Verkehr unterschiedlicher Streckentypen beziehungsweise Verkehrsarten darstellen. Die Grundszenarien gliedern sich in:

- Langstreckenverkehr 1 (normal-schwer)
- Langstreckenverkehr 2 (leicht)

- Ortsverkehr 1 (normal-schwer)
- Ortsverkehr 2 (leicht)

3.2 Prognose Szenarien

Basierend auf den Grundszenarien und 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. Der DTSV des Grundszenarios "Langstreckenverkehr 1" wird dazu beispielsweise von 10 000 auf 16 000 angehoben.

Prognose-Szenario B:

Weiterhin soll untersucht werden, wie sich der Anstieg des Transportaufkommens allein auf Basis eines gesteigerten zulässigen Gesamtgewichts auswirkt. Es wird angenommen, dass die Erhöhung ausschließlich fünfsachsige Fahrzeuge betrifft. Entsprechend den Verkehrsprognosen und den für dieses Szenario getroffenen Annahmen ergibt sich ein Mittelwert für den beladenen Zustand der Lkw-Typen 41 und 98 von 57,3 t.

Prognose-Szenario C:

Als eigenständiges Szenario soll untersucht werden, welche Auswirkungen durch eine Erhöhung des Anteils des genehmigungspflichtigen Schwerververkehrs zu erwarten sind. Entsprechend der bisherigen Zunahme der Anträge für Schwertransporte (vgl. [Kasc09]) und des davon abgeleiteten zukünftigen Anstiegs ergibt sich in diesem Szenario eine Erhöhung des Anteils am gesamten Schwerverkehr von 0,5 auf 4,6 %, 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 in diesem Szenario angenommen, dass zukünftig 50 % der Lkw-Typ 98 in Kolonnen fahren. Dazu wird eine feste Kolonnengeometrie aus jeweils 5 Lkw dieses Typs als eigenständiger Fahrzeugtyp definiert. Entsprechend den Angaben der Fahrzeughersteller wird der Fahrzeugabstand zwischen den einzelnen Lkw zu 15 m festgelegt. Die Gesamtlänge der so definierten Kolonne beträgt damit ca. 120 m.

Die gewählte Implementierung von Lkw-Kolonnen geht mit einer Reihe von Vereinfachungen einher. Einerseits sind diese Vereinfachungen damit begründet, dass Lkw-Kolonnen bisher nur in Testfahrten betrieben werden und daher eine messtechnische Erfassung oder Auswertung zum Beispiel 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.

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 fünfsachsiger Lkw wird dazu mit 52 t angenommen, wodurch ein Anstieg des Transportaufkommens um +43 % zu erreichen wäre. Der verbleibende Anstieg von +14 % soll durch eine Erhöhung des DTSV abgedeckt werden. Zur Abbildung zukünftiger Lkw-Kolonnen werden zusätzlich die entsprechenden Annahmen des Prognose-Szenarios D übernommen.

4 Einfluss der Linearisierung von M-σ-Beziehung und Wöhlerlinie

Den aktuell normativ geregelten Schadensäquivalenzfaktoren λ liegt eine Linearisierung der M-σ-Beziehung und der Wöhlerlinie zugrunde. Welchen Einfluss diese Linearisierungen auf das spätere Bemessungsergebnis haben, soll anhand von Beispielen aufgezeigt werden. Dazu werden Verkehrssimulationen für realistische Beispielbrücken durchgeführt (Abschnitt 2.2). Je Simulation werden unterschiedliche Stufen der Linearisierung untersucht. Im Wesentlichen wird dabei zwischen einer detaillierten und vereinfachten Methode unterschieden. Die detaillierte Methode (Bild 6) berücksichtigt zum einen den bilinearen Verlauf der Bezugs-Wöhlerlinie. Zum anderen wird auch der nichtlineare Verlauf der M-σ-Beziehung berücksichtigt, wodurch die Grundbeanspruchung zu einem wesentlichen Einflussfaktor wird. Die vereinfachte Methode reduziert die Bezugs-Wöhlerlinie auf eine lineare Form mit der Steigung m_2 . Zusätzlich erfolgt eine Linearisierung der M-σ-Beziehung, wodurch die Grundbeanspruchung ihren Einfluss auf den Faktor λ verliert [Dani94].

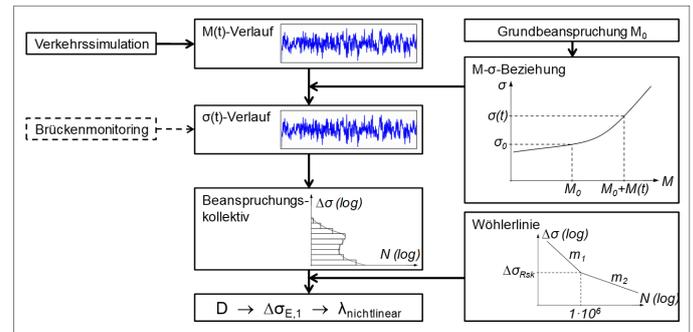


Bild 6: Detaillierte Methode zur Ermittlung des Schadensäquivalenzfaktors λ

4.1 Ergebnisse der Vergleichsrechnungen

Im Ergebnis (Bild 7) lässt sich erkennen, dass die Schadensäquivalenzfaktoren λ auf Grundlage der vereinfachten Methode teilweise unterhalb derjenigen der detaillierten Methode liegen. Die aktuell normativ geregelte Bemessung auf Grundlage der vereinfachten Methode unterschätzt also an dieser Stelle den tatsächlichen Ermüdungsschaden.

4.2 Korrektur der λ -Faktoren für nichtlineare M-σ-Beziehungen

Aufgrund des Defizits der λ -Faktoren nach der vereinfachten Methode soll ein geeigneter Korrekturfaktor ($\lambda_{\text{Korrektur}}$) abgeleitet werden. Dieser Faktor soll die maximalen Unterschiede zwischen den λ -Faktoren nach der vereinfachten und detaillierten Methode abdecken, siehe Bild 7.

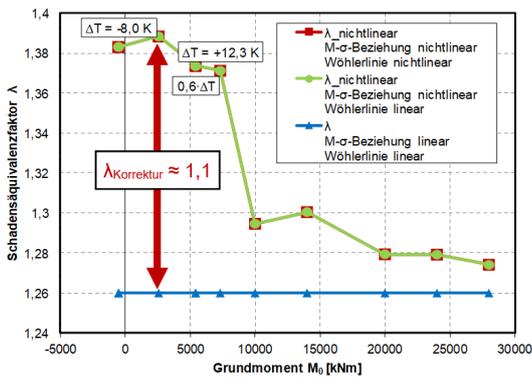


Bild 7: Definition des Korrekturfaktors $\lambda_{Korrektur}$

Es zeigt sich, dass der Korrekturfaktor im Bereich niedriger Grundbeanspruchung nur bei sehr kleinen Spannungsschwingbreiten infolge des ELM 3 sehr hohe Werte annimmt (Bild 8). 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 $\lambda_{Korrektur} = 1,1$ vorgeschlagen.

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

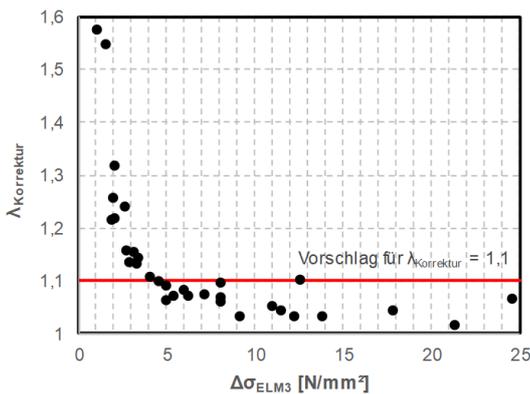


Bild 8: Zusammenhang zwischen Korrekturfaktor und der Spannungsschwingbreite infolge des ELM 3

5 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 λ -Faktoren. Dazu erfolgt eine Gegenüberstellung von Ergebnissen aus Verkehrssimulationen und der Berechnung nach Eurocode. Anschließend wird ein

Vorschlag zur Modifizierung der λ -Faktoren ausgearbeitet, um deren Zukunftsfähigkeit zu gewährleisten.

5.1 Ergebnisse der Bewertung

Hinsichtlich der schädigungsäquivalenten Spannungsschwingbreite sind nur relativ moderate Unterschiede feststellbar (Bild 9, oben). Für eine geeignete Einschätzung der jeweiligen Schädigung und der Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien erfolgt eine Umrechnung in eine Schädigungssumme D (Bild 9, unten), mit:

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

Es zeigt sich, dass die Berechnungen des Ermüdungsschadens anhand des ELM 3 und dessen λ -Faktoren in vielen Fällen bereits durch die Grundszenarien überschritten werden. Die Ergebnisse der Prognose-Szenarien liegen dementsprechend noch weiter oberhalb.

Insgesamt ist festzustellen, dass die hier betrachteten Beispielbrücken an den untersuchten Spannungspunkten bezüglich der Prognose-Szenarien keine nennenswerte Ermüdungsgefahr zeigen, das heißt $D \ll 1$. Die Bemessung der Beispielbrücken erfolgte für übliche Auslastungsgrade. Es wird jedoch betont, dass Auswirkungen aus variierenden Auslastungsgraden hier nicht explizit untersucht werden.

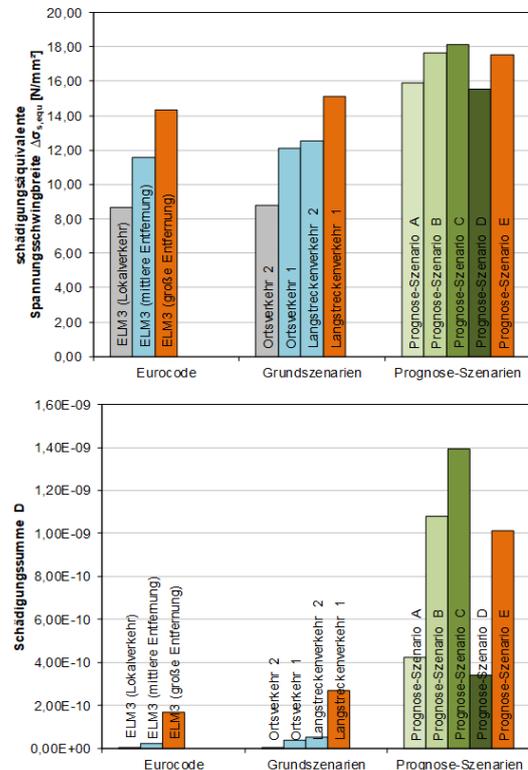


Bild 9: Gegenüberstellung der Ergebnisse nach [DIN EN 1992-2/NA] und Simulation – Beispielbrücke B2 (L = 20 + 34,5 + 20m), Stützbereich UK σ_s ($\Delta\sigma_{Rsk} = 175 \text{ N/mm}^2$, $k_s = 5$, $k_f = 9$)

5.2 Bestimmung zukunftsfähiger λ -Faktoren zur Bemessung

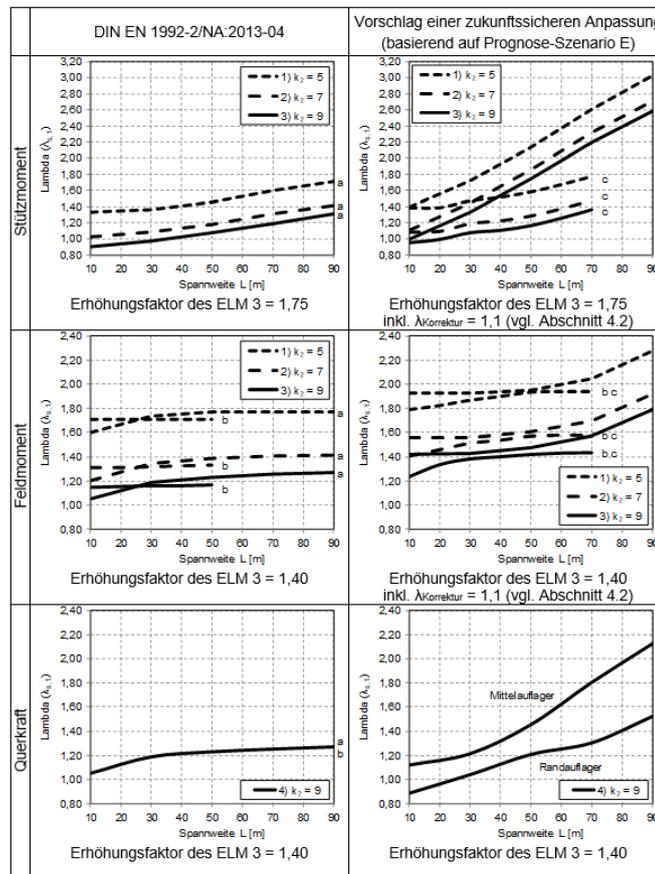
Um die Zukunftsfähigkeit einer Bemessung auf Grundlage des ELM 3 inklusive λ -Faktoren gewährleisten zu können, wird im Folgenden ein Vorschlag zur Modifizierung der aktuellen λ -Faktoren nach [DIN EN 1992-2/NA] erarbeitet. Als Grundlage dient das Prognose-Szenario E (als Erweiterung des Grundszenarios "Langstreckenverkehr 1") aus Abschnitt 3.2 sowie die vereinfachten Tragsysteme aus Abschnitt 2.1. Zur Beurteilung der Ergebnisse werden zusätzlich λ -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 1 der bisherigen normativen Regelung gegenübergestellt. Als Referenz werden in Tabelle 2 die Beiwerte $\lambda_{s,1}$ aus dem Grundszenario "Langstreckenverkehr 1" dargestellt. Für den Beiwert $\lambda_{s,2}$ (Einfluss von Verkehrsaufkommen und Verkehrsart) wird eine Erhöhung des Verkehrsaufkommens durch den Wert $N_{obs} = 3,0$ 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 $N_{obs} = 2,5$ Mio. Lkw je Jahr anzusetzen wäre (DTSV = 10 000). Beim Beiwert $\lambda_{s,3}$ (Einfluss der Nutzungsdauer) ist keine Anpassung erforderlich. Analog dazu wird auch für den Beiwert $\lambda_{s,4}$ (Einfluss weiterer Fahrstreifen) empfohlen, die aktuelle vereinfachte normative Regelung beizubehalten.

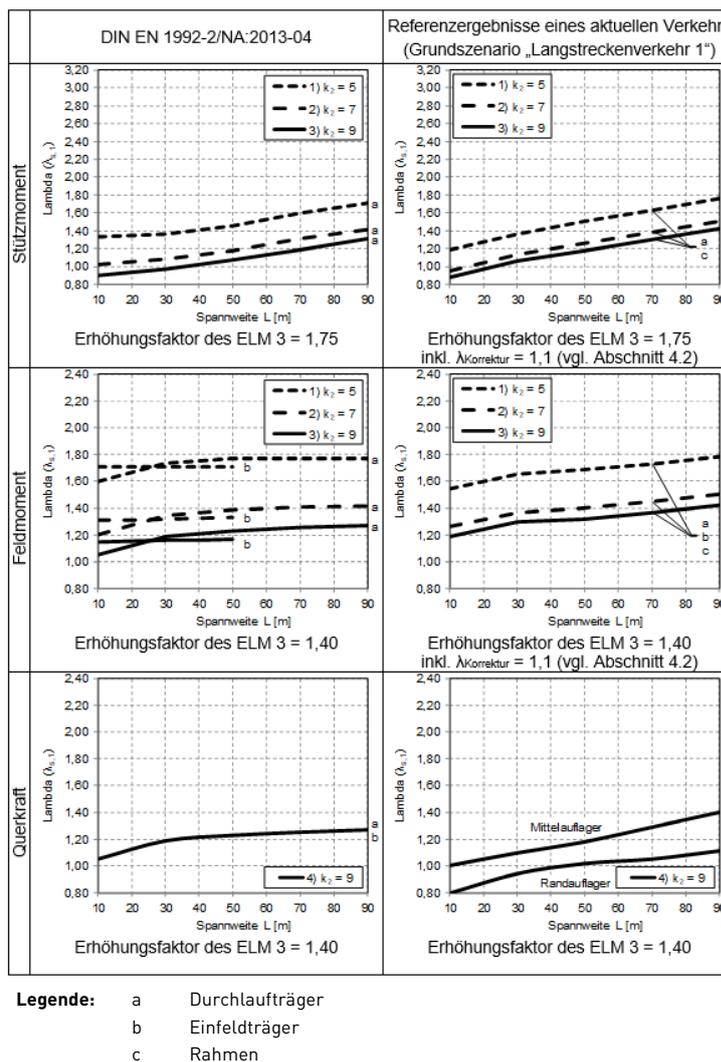
Der Beiwert φ_{fat} (Einfluss der Fahrbahnoberflächenrauigkeit) wurde bereits in [MeDa94] für Massivbrücken kalibriert. Durch eine Zunahme des Verkehrsaufkommens ist nicht davon auszugehen, dass sich dadurch eine Änderung beim Einfluss der Fahrbahnoberflächenrauigkeit ergibt. Es wird daher vorgeschlagen,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

Tabelle 1: Beiwert $\lambda_{s,1}$ für den Einfluss von Spannweite und System inkl. $\lambda_{Korrektur}$, 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 2: Beiwert λ_{s3} für den Einfluss von Spannweite und System inkl. $\lambda_{\text{Korrektur}}$, sofern die Spannungsschwingspiele sowohl im Zustand I als auch im Zustand II stattfinden (Referenzergebnisse basierend aufgrund Szenario "Langstreckenverkehr 1")



6 Zusammenfassung

Der vorliegende Forschungsbericht behandelt die Zukunftssicherheit des aktuell normativ geregelten Nachweises schädigungsäquivalenter Spannungsschwingbreiten basierend auf dem Ermüdungslastmodell ELM 3 inkl. λ -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 nichtlinearen M- σ -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 λ -Faktoren ausgearbeitet. Diesbezüglich wird auch ein Defizit der bisherigen Methode zur Ermittlung der λ -Faktoren identifiziert, das durch die Linearisierung der M- σ -Beziehung hervorgerufen wird. Um dies zu kompensieren, wird der Korrekturfaktor $\lambda_{\text{Korrektur}}$ 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 wohlgehemt 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- beziehungsweise Streckenarten. Für die Zukunft bietet sich dazu vor allem an, die Form des Beanspruchungskollektivs im Nachweiskonzept zu berücksichtigen.

7 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.

[Dani94] Danielewicz, I.: Zur Ermüdungsbemessung von Betonstraßenbrücken. 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 B 77. Wirtschaftsverlag NW. Bremen, 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: Verkehrsverflechtungsprognose 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 04.243 des Arbeitsprogrammes der BASt. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Heft B68. Wirtschaftsverlag NW. Bremen, 2009.

[MeDa94] Merzenich, G.; Danielewicz, I.: Dynamische Simulation des Auxerre-Verkehrs für Stahlbetonbrücken zur Bestimmung des schädigungs-äquivalenten

Schwingbeiwerts. 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.