

Erfahrungen aus der Neubewertung beulsensitiver Stahlhohlkastenbrücken

Sven Nagel¹, Max Spannaus², Michael Volz³

¹Ingenieurgesellschaft für Stahlbau und Schweißtechnik mbH,

²Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München,

³Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt

Zusammenfassung: Stahlhohlkastenbrücken werden seit Jahrzehnten gebaut. Die Beulbemessungsvorschriften wurden sukzessive erweitert und Fertigungstoleranzen in den Ausführungsnormen begrenzt. Nach heutigem Kenntnisstand ist davon auszugehen, dass bei Bauwerken, die vor 1980 errichtet wurden, mögliche Beulsicherheitsdefizite vorliegen, die eine Neubewertung erforderlich machen. Anhand eines aktuellen Praxisbeispiels werden die Auswirkungen unterschiedlicher Nachweismethoden und die Einflüsse der gemessenen Imperfektionen diskutiert.

1 Problemstellung

1.1 Bautechnische Herausforderung

Hohlkästen aus Stahl werden seit Jahrzehnten insbesondere im Großbrückenbau eingesetzt. Die Konstruktionen werden in der Regel durch zahlreiche Blechdickenabstufungen, Anpassungen der Querschnittshöhe, Anzahl, Querschnitt und Anordnung der Steifen sowie lokale konstruktive Verstärkungen hinsichtlich eines minimierten Werkstoffeinsatzes optimiert. Nachrechnungserfahrungen zeigen, dass insbesondere bei älteren Bauwerken diese Optimierung perfektioniert wurde. Nahezu konstante Spannungsausnutzungsgrade von annähernd 100 % über die gesamte Bauwerkslänge rufen auch unter Anwendung heutiger Bemessungssoftware Bewunderung für die konstruktive und rechnerische Sorgfalt der damaligen Tragwerksplaner hervor. Die damals gültige Bemessungsgrundlage (DIN 4114:1952 gültig bis 1978) genügt unseren heutigen Anforderungen an die Beulsicherheit nicht mehr in vollem Umfang. Dies betrifft insbesondere die Beulsicherheitsnachweise der Stege sowie der Längssteifen und führt weiterhin zu einer Überschätzung des

Schubbeulwiderstandes. Das für die Längssteifen meist maßgebende knickstabartige Verhalten war zu diesem Zeitpunkt noch nicht Gegenstand der Tragwerksbemessung [1]. Neben den aus heutiger Sicht bestehenden Bemessungsdefiziten lagen den Bauwerken auch keine festgeschriebenen Fertigungstoleranzen für die ausgesteiften Blechfelder zugrunde. Eine Beurteilung, inwieweit bei einer Bauwerksprüfung festgestellte Beulverformungen auf Überbeanspruchungen oder Fertigungstoleranzen zurückzuführen sind, ist in der Regel nur auf der Grundlage umfangreicher rechnerischer und messtechnischer Untersuchungen möglich. Beide Problemkreise (rechnerisch & Fertigungstoleranzen) sind in den Fokus der Behörden gerückt, so dass mit [1] eine systematische und zielgerichtete Neubewertung der potenziell betroffenen Bauwerke eingeleitet wurde.

1.2 Zielsetzung

Dieser Beitrag erhebt nicht den Anspruch einer grundlagenorientierten Erkenntnisvermittlung, sondern soll vielmehr die Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen im Bereich der Baustatik für die Herausforderungen der Nachrechnungspraxis sensibilisieren und zu einem Erfahrungsaustausch mit den nachrechnenden Ingenieuren motivieren. Zu diesem Zweck wird exemplarisch ein aktuelles Projekt in vereinfachter Form und mit unterschiedlichen Modellierungstiefen, bzw. Bemessungsansätzen anonymisiert diskutiert.

2 Praxisbeispiel

Bei dem untersuchten Beispielbauwerk (vgl. Abbildung 1) handelt es sich um ein dreifeldriges, stark gevoutetes Bauwerk. Der konkrete Untersuchungsbereich liegt im markierten Abschnitt des Stützbereiches. Der zu untersuchende Hohlkasten wird für diesen Bericht vereinfachend als Querschnitt mit konstanter mittlerer Höhe ohne Berücksichtigung von Schubspannungen idealisiert.

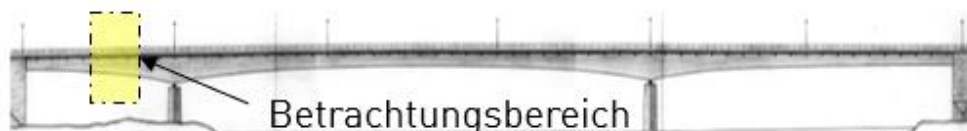


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Beispielbauwerks

Voruntersuchungen nach DIN EN 1993-1-5 Abs. 9.2.1 haben ergeben, dass die Quersteifen im Bodenblech nicht als starre Beulfeldbegrenzung wirken. Erweiterte numerische Betrachtungen haben hingegen die beulfeldbegrenzende Wirkung für die Stegbereiche nachgewiesen. Somit sind die in Abbildung 2 dargestellten Querschnittsbereiche hinsichtlich des Stabilitätsverhaltens zu bewerten. In den hier nicht betrachteten Bauwerksabschnitten der größten Stützmomente liegen zusätzliche konstruktive Verstärkungen vor, die den Untersuchungsschwerpunkt vereinfachen bzw. verlagern. Die bemessungsrelevante Normalspannungsverteilung am idealisierten Querschnitt unter der Berücksichtigung der mittragenden Breite sowie der elastischen Schubverzerrungen nach DIN EN 1993-1-5 Abs. 3.2.1 ist in Abbildung 3 dargestellt.

2.1 Nachweisverfahren und normative Anforderungen

Gemäß DIN EN 1993-2/NA hat die Beulbemessung in Deutschland für den Brückenneubau faktisch ausschließlich mit der Methode der reduzierten Spannungen nach DIN EN 1993-1-5 Abs. 10 zu erfolgen. Ein vollständig numerischer Nachweis z. B. nach DIN EN 1993-1-5 Anh. C oder mit wirksamen Breiten erfordert eine Zustimmung im Einzelfall. Auch die Nachrechnungsrichtlinie [2] verweist im Standardfall auf die Methode der reduzierten Spannungen nach DIN FB 103 Abs. III-10. Mit Zustimmung der Straßenbaubehörde kann bei Nachweisüberschreitungen die Nachrechnung an wirksamen Querschnitten nach DIN FB 103, III-4 bis III-9 erfolgen. Dies geht jedoch mit einer Nachweisklasse C und einer vorläufig eingeschränkten Nutzungsdauer von 20 Jahren einher.

2.2 Methode der reduzierten Spannungen

Die Methode der reduzierten Spannungen DIN EN 1993-1-5 Abs. 10 hat bekanntlich die Vorteile der einfacheren Handhabbarkeit [3] sowie der implizit berücksichtigten Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Wie auch in diesem Beitrag deutlich wird, liegen die Nachteile des Verfahrens bei biegebeanspruchten Baufeldern mit zusammengesetzten Querschnitten und der rein elastischen Betrachtung. Lastumlagerungen nach Erreichen des überkritischen Verhaltens z. B. des Steges auf die angrenzenden Bauteile können mit diesem Verfahren nicht berücksichtigt werden [4].

Ausgangspunkt der Berechnung ist die unter Berücksichtigung der Schubverzerrungen am Gesamtquerschnitt ermittelte Spannungsverteilung. Ein schrittweises Vorgehen ist erforderlich:

- 1) Querschnittsklassifizierung der Steifenquerschnitte: Gegebenenfalls sind zusätzliche Abminderungen zu berücksichtigen. Im vorliegenden Beispiel ist dies nicht erforderlich.
- 2) Ermittlung des Beulabminderungsfaktors ρ_c für die Einzelbeulfelder und das Gesamtbeulfeld. Bei ausgesteiften Beulfeldern empfiehlt es sich, die gegenseitige Stützwirkung der benachbarter Einzelbeulfelder auszunutzen und die Beulwerte unter der kombinierten Beanspruchung z. B. mit der Software EBPlate numerisch zu ermitteln. Konservativ, aber für eine erfolgreiche Nachrechnung hochbeanspruchter Bauteile nicht sinnvoll, kann der Wert aus der Gesamtfeldberechnung zur Ermittlung der elastischen Plattenbeulspannung des Gesamtfeldes verwendet werden. Insbesondere bei gleichzeitiger Wirkung von Querkraftbeanspruchungen, die für das knickstabartige knickstabähnliche Verhalten nicht relevant sind, führt dies zu stark konservativen Lösungen. Der sinnvollere Weg der auch in [8] beschrieben wird, nutzt die Unterdrückung lokaler Beulformen.
- 3) Spannungsnachweis unter Anwendung des maßgebenden Gesamtabminderungsfaktors.

Im konkreten Berechnungsbeispiel ergeben sich mit der Methode der reduzierten Spannungen die in Tabelle 1 aufgeführten deutlichen Nachweisüberschreitungen.

In diesem Zusammenhang wird auf mögliche Probleme hingewiesen, die in der Nachrechnungspraxis bei unreflektierter Anwendung kommerzieller Bemessungsprogramme für die Beulnachweise aufgetreten sind (ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

- Für die Brückennachrechnung weisen einige Programme Anwendungslücken bei der Berücksichtigung unterschiedlicher Stegblechdicken auf. Praxisrelevant ist dieses Thema z. B. in Stützbereichen, wo die unteren, eng ausgesteiften Stegbleche, die den maximalen Druckbeanspruchungen ausgesetzt sind, oftmals eine größere Blechdicke aufweisen können. Im Zugbereich oder in der Nähe der neutralen Faser sind geringere Blechdicken und größere Einzelbeulfelder möglich, die dann aber für die Schubbeulberechnung maßgebend sind. Zur deren rechnerischen Berücksichtigung ist eine Schalenbetrachtung in einem FEM-Programm erforderlich.
- Die Grundeinstellungen insbesondere im Hinblick auf das knickstabartige Verhalten können für die Anwendung auf biegebeanspruchte, ausgesteifte Stegbeulfelder ungeeignet sein und in letzter Konsequenz über die Interaktionsformel gemäß DIN EN 1993-1-5 (4.13) zu grob falschen Ergebnissen führen. Die Anwendung muss im Einzelfall geprüft werden.

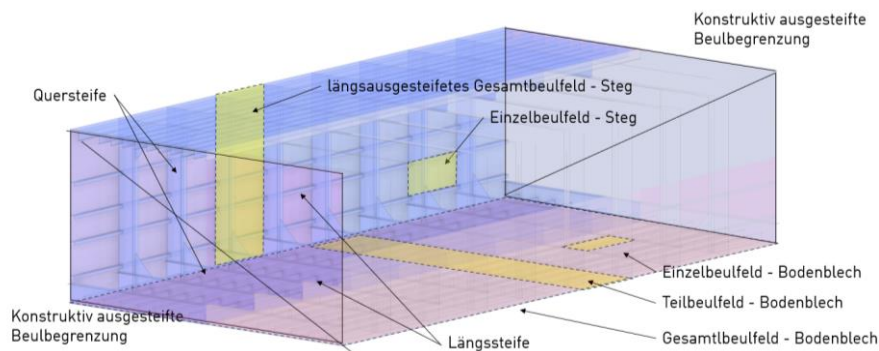


Abbildung 2: Übersicht über Untersuchungsbereiche im Gesamthohlkasten

2.3 Betrachtungen mit wirksamen Breiten

Lastumlagerungen auf Basis wirksamer Breiten / effektiver Querschnitte sollen für eine erfolgreiche Nachweisführung der in Abschnitt 2.2 festgestellten Nachweisüberschreitungen genutzt werden. Die Berechnung erfolgt in folgenden Schritten:

Schritt 1: Bodenblech

- 1) Bestimmung der Abminderungsfaktoren der Einzelbeulfelder (hier aufgrund der c/t -Verhältnisse nicht relevant)
- 2) Bestimmung der Abminderungsfaktoren der Teilbeulfelder (zwischen zwei Quersteifen) (hier wird das knickstabartige Verhalten maßgebend)
- 3) Bestimmung der Abminderungsfaktoren des Gesamtbeulfeldes. In diesem Fall wurden zur Ermittlung der kritischen Plattenbeulspannung im Gesamtbeulfeld unterschiedliche Modellierungstiefen verglichen. Die Einflüsse auf die kritische Beulspannung sind in Abbildung 3 gegenübergestellt. Der wesentliche Einfluss der biegesteifen Querrahmen verglichen mit der reinen Steifigkeit der Quersteifen wird deutlich und führt dazu, dass das knickstabartige Verhalten des Teilbeulfeldes bemessungsrelevant wird. In Tabelle 1 wird diese Auswirkung durch den Fall 5 sowie die Grundkonfiguration (hier mit $\sigma_{cr,p} = 505 \text{ MPa}$), ist in der Zusammenfassung als Fall 3 und 4 aufgeführt.

- 4) In Anlehnung an [4] wird vereinfachend die Bodenblechdicke sowie die Blechdicke der Bodensteifen reduziert.

Schritt 2: Stegblech

- 5) Bestimmung der Abminderungsfaktoren der Einzelbeulfelder
- 6) Bestimmung der Abminderungsfaktoren des Gesamtbeulfeldes (plattenartiges Verhalten gemäß DIN EN 1993-1-5 A.2.1.) Die Nachrechnungspraxis zeigt, dass die Randbedingung von maximal zwei Längssteifen im Druckbereich nicht eingehalten und eine sinngemäße Erweiterung des Verfahrens erforderlich wird. (Knickstabartiges Verhalten nach DIN EN 1993-1-5 Abs. 4.5.3)

Schritt 3: Spannungsnachweis am reduzierten Querschnitt

Schritt 4: Interaktionsnachweis Im Fall von zusätzlicher Schubbeanspruchung getrennte Bewertung nach DIN EN 1993-1-5 Abs. 6 und Interaktionsbeziehungen DIN EN 1993-1-5 Abs. 7.

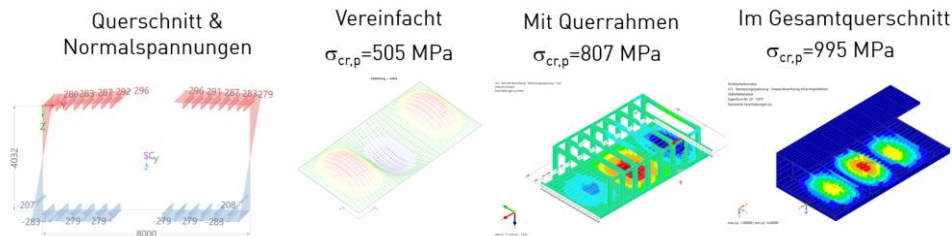


Abbildung 3: links Bemessungsnormalspannungsverteilung am Brutoquerschnitt unter Berücksichtigung elastischer Schubverzerrungen. rechts: Ergebnisse linearer Beulanalysen für Bodenblech für verschiedene Modellierungstiefen.

2.4 Vereinfachte numerische Betrachtungen in Anlehnung an DIN EN 1993-1-5 Anhang C

Allgemeine Erläuterungen zur Vorgehensweise sind in [3] zusammengefasst. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung dieses Beitrages sei darauf hingewiesen, dass selbst versierte Anwender bei der vollständigen numerischen Nachweisführung eines Stahlhohlkastens vor grundsätzlichen Herausforderungen stehen. Neben den üblichen numerischen Grundfragen, wie z. B. nach der erforderlichen Elementgröße zur sicheren Abbildung der Beulfornen oder den zu verwendenden materiell und geometrisch nichtlinearen Lösern, erschweren meist wesentlich banalere Aspekte eine zielgerichtete Bewertung. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien die folgenden Punkte genannt.

Lasteinleitung: Die korrekte Übertragung der am gesonderten Balkenmodell ermittelten Schnittgrößen einschließlich der Wirkung der Schubverzerrungen auf ein Teilmodell ist ein ständiger Diskussionspunkt. Eine homogene Spannungsverteilung ohne Störeinflüsse aus den Lasteinleitungsbereichen ist sicherzustellen. Hierzu können von der Auswertung ausgenommene, Lasteinleitungsbereiche hilfreich sein. Darüber hinaus stellt die Übertragung der zugehörigen Schnittgrößen mit den auf die Bauwerksabschnitte wirkenden Lasten einschließlich einer zwängungsfreien Lagerung eine praktische Herausforderung dar.

Rechenzeit: Auch dies ist heute noch ein Problem in der Bemessungspraxis, da die Codes der gängigen Statik Programme nur sehr begrenzt mehrere CPUs nutzen. Der Einsatz „umfangreicherer“ FEM-Programme (wie beispielsweise Ansys oder Abaqus) ist bei der Modellierung bzw. Lastgenerierung für die Bauwerksanwendung meist unhandlich.

Ersatzimperfectionen: Die Anwendung bzw. Überlagerung einer eigenformaffinen Ersatzimperfection stellt in der Praxis eine große Herausforderung dar. Entscheidend ist, dass sich der Anwender der möglichen Versagensmodi bewusst ist und diese durch geeignete Imperfectionen „anstößt“. Die Erfahrung bei der numerischen Analyse von Hohlkästen zeigt, dass eine große Anzahl an Eigenformen auftritt, die nur einzelne Beulfelder betreffen. Eine Analyse der ersten 20 Eigenformen ist hier meist nicht ausreichend und zielführend, um ein Gesamtfeldbeulen abzubilden.

Die nachfolgenden numerischen Untersuchungen untermauern die Ergebnisse aus Abschnitt 2.3 insbesondere hinsichtlich der Unsicherheiten hinsichtlich der Kopplung der Versagensmechanismen aus dem Teil- und Gesamtbeulfeld des Bodenblechs, untermauert. Entscheidend für die erfolgreiche numerische Bewertung sind die Ersatzimperfectionen der versagensrelevanten Bauteile.

Einzelbeulfelder Steg: Für das folgende Beispiel wird ein Kunstgriff angewendet. Dabei werden die überdrückten Einzelbeulfelder der Stege so weit herausgeschnitten, dass nur noch die Längssteifen einschließlich der mitwirkenden Breite nach DIN EN 1993-1-5 Abs. 9.1 vorhanden sind. Eine Übertragung dieses Ansatzes auf Beulfelder mit signifikanten Schubspannungen ist nicht möglich.

Gesamtbeulfeld Steg: Die Ersatzimperfection ist in Abhängigkeit von der Steifigkeit des Quersystem anzusetzen. In diesem Fall ist die Steifigkeit der Querrahmen als Beulfeldbegrenzung ausreichend, so dass eine alternierende Ersatzlast angesetzt und die resultierende Verformungsfigur als geometrische Ersatzimperfection skaliert wird.

Einzelbeulfelder Untergurt: Im vorliegenden Fall liegen QK3-Querschnitte vor, so dass keine Beuluntersuchung erforderlich ist. Ansonsten kann analog zu den Einzelbeulfeldern des Stegs vorgegangen werden.

Gesamtbeulfeld Untergurt: Hier wurde auf eigenwertaffine Ersatzimperfectionen zurückgegriffen. Durch das Ausschneiden der Einzelbeulfelder des Steges wurde die Anzahl der Eigenformen bis zum Erreichen der ersten globalen Form deutlich reduziert. Alternativ ist ein Vorgehen analog zu den Imperfectionen Gesamtbeulfeld Steg zielführend.

Die Skalierung der Einzelbeulformen erfolgt entsprechend ihrem Anwendungsfall nach DIN EN 1993-1-5 Tab. C.2. Anschließend ist die Kombinatorik der einzelnen Imperfectionsfälle und deren Vorzeichen mit dem Ziel der Ermittlung der kleinsten rechnerischen Traglast durchzuführen. Dabei ist zu beachten, dass bei ungünstigen Überlagerungen lasterhöhende Effekte auftreten können. In Abbildung 4 sind die plastischen Dehnungen im letzten konvergenten Lastschritt für die maßgebende Ersatzimperfection einschließlich der Last-Verformungs-Kurve (Auslenkung senkrecht zum Bodenblech in Feldmitte) dargestellt. Die Ausbildung des knickstabartigen Versagens im Bodenblech ist deutlich zu erkennen. In der Lastfaktor-Verformungs-Kurve ist der, der Bemessungsspannung zuzuordnende Lastschritt sowie eine um den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M1}=1,1$ erhöhte Einwirkung gekennzeichnet. Die Traglast des Hohlkastens und der in Abschnitt 2.3 ermittelte Versagensmechanismus werden damit bestätigt. Der Ausnutzungsgrad liegt unter 80%.

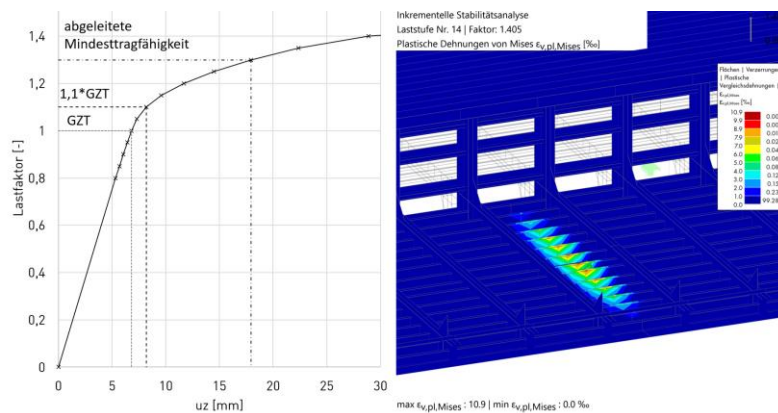


Abbildung 4: links: Last-Verformungskurve für ein Ausweichen senkrecht zur Bodenebene im Bereich des Fließgelenks. rechts: plastische Vergleichsdehnung im letzten konvergenten Schritt.

2.5 Bauwerksimperfectionen

Die messtechnische Bestimmung der tatsächlichen Bauwerksverformungen ist mit zahlreichen Herausforderungen verbunden. Insbesondere die Zugänglichkeiten oder unvermeidbare Bauwerksschwingungen können die Messgenauigkeit so weit reduzieren, dass sie über die Herstelltoleranzen hinausgehen und damit für eine Bewertung unbrauchbar sind. Im konkreten Fall wurden an das Bauwerk angepasste Setzlatten, redundante Laserscans sowie die Fotogrammetrie eingesetzt (vgl. Abbildung 5). Durch die Auswertung mit effektiven Querschnitten können Überschreitungen der aktuellen Herstelltoleranzen nach DIN EN 1090-2:2018 durch eine Vergrößerung der Ausfallflächen pragmatische bewertet werden. Ebenso kann der Einfluss von Steifenverformungen durch die in [5] beschriebene Vorgehensweise in eine zusätzlich reduzierte Wanddicke überführt werden. Für die Beulfeldvermessung sind keine festen Anforderungen definiert. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass unterschiedliche Messmethoden zu stark abweichenden Ergebnissen führen können. Auf Grund der Größe von Brückenbauwerken, laufender Verkehrseinwirkungen, Geometrieänderungen auf Grund von Temperaturschwankungen und natürlich unterschiedlicher Genauigkeiten in Abhängigkeit der gewählten Messmethode stellt die Dokumentation vorhandener Imperfectionen eine große Herausforderung und einen großen Aufwand dar. Aus diesem Grund ist es empfehlenswert, in einem ersten Schritt die Bauwerke hinsichtlich der realen Beulgefahr zu berechnen und erst im Anschluss den Umfang und die erforderliche Genauigkeit einer Vermessung zu definieren.

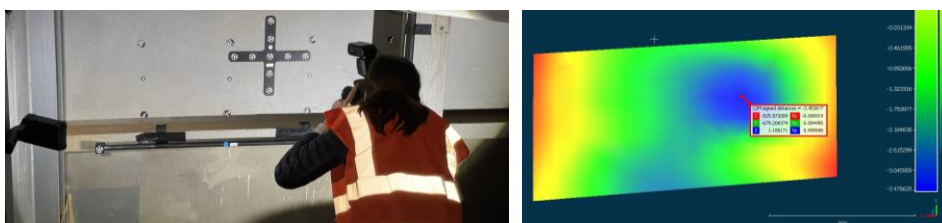


Abbildung 5: (links) Vermessung der Stegbleche und Stegsteifen durch Fotogrammetrie. (rechts) beispielhafte Auswertung der Einzelbeulfelder.

3 Zusammenfassung

Scheinbare rechnerische Defizite lassen sich bei bestehenden Bauwerken leicht aufzeigen. Dagegen ist der erfolgreiche Tragfähigkeitsnachweis für die häufig konstruktiv aufwendig gestalteten Bestandsbauwerke auf Basis der aktuellen Regelwerke eine wesentlich schwierigere Aufgabe, bei der Ingenieure die gewohnten Wege von Nachweisen für Neubauten verlassen und für den Anwendungsfall sinnvolle Methoden anwenden und diese gegebenenfalls erweitern müssen. Die Gegenüberstellung der Teilergebnisse in Tabelle 1 verdeutlicht beispielhaft die erheblichen rechnerischen Unterschiede zwischen unterschiedlichen den Verfahren. Die Nachweise auf Basis der Methode der reduzierten Spannungen (MRS) zeigen sowohl unter dem Ansatz (1) elastischer (el. SV) als auch unter (2) plastischer (pl.) Schubverzerrungen erhebliche Nachweisüberschreitungen. Unter Ausnutzung der Lastumlagerungen auf die angrenzenden Bauteile kann die Tragfähigkeit auf Basis der effektiven Querschnitte (eff. QS) nachgewiesen werden. Formal führt dies, wie auch der Ansatz plastischer Schubverzerrungen, nach [2] zu einer vorläufig eingeschränkten Nutzungsdauer und sollte daher nicht den ersten Berechnungsschritt darstellen. Die Differenzierung zwischen (3), (4) und (5) verdeutlicht den Einfluss der Querrahmensteifigkeit und wurde insbesondere zum Vergleich mit der vollständig numerischen Lösung für ein vertieftes Verständnis des Zusammenwirkens unterschiedlich ausgedehnter Einzel-, Teil- und Gesamtbeulfelder durchgeführt. Die vollständig numerische Analyse wird in erster Linie als Validierung für undurchsichtigeren Situationen betrachtet.

Nachweis	1) MRS el. SV.	2) MRS pl. SV	3) eff. QS el. SV	4) eff. QS pl. SV	5) eff. QS pl. SV & $\sigma_{cr,p}$ erw	6) Numerisch
Ausnutzung	170 %	130 %	105 %	91 %	85 %	< 80%

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Ausnutzungsgrade nach Nachweismethodik

Literatur

- [1] G. MARZAHN, BUNDESMINISTERIUM FÜR DIGITALES UND VERKEHR: Obmannschreiben 2022-02 - Beulverhalten älterer Stahl- und Stahlverbundbrücken. Bonn. 14.01.2022.
- [2] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG : Richtlinien zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie). 2010.
- [3] B. Braun, U. Kuhlmann: Stahlbau Kalender 2009: Beitrag 3 Bemessung und Konstruktion von aus Blechen zusammengesetzten Bauteilen nach DIN EN 1993-1-5. Ernst & Sohn Verlag, Berlin. 2019.
- [4] J. NAUMES, K. GEIBLER, M. BARTZSCH: Vereinfachtes Verfahren für den Beulnachweis bei Ausnutzung plastischer Querschnittsreserven durch Einführung einer "wirksamen Blechdicke": Erläuterungen und Beispiele. Stahlbau, Vol. 84, Ausgabe 8, S.534-542.
- [5] G. MARZAHN, BUNDESMINISTERIUM FÜR DIGITALES UND VERKEHR: Obmannschreiben 2023-01 – Beulverhalten älterer Stahl- und Stahlverbundbrücken – Vereinfachungen und Reduzierung des Nachweisumfanges. Bonn. 03.03.2023.