
Entwicklung eines vom Fahrzeug-Rückhaltesystem unabhängigen Einwirkungs- modells für den Anprall an Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Entwicklung eines vom Fahrzeug-Rückhaltesystem unabhängigen Einwirkungsmodells für den Anprall an Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

von

Vazul Boros

Maciej Kwapisz

AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Wien

Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 15.0682

Entwicklung eines vom Fahrzeug-Rückhaltesystem unabhängigen Einwirkungsmodells für den Anprall an Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

Fachbetreuung:

Iris Hindersmann

Referat:

Stahlbau, Brückenausstattung

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen

Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach

Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/fv-b7>

Bergisch Gladbach, Juli 2025

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht. Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an verlag@bast.de zur Verfügung gestellt werden.

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 Straßen- und Verkehrswesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Kurzfassung

Im Zuge des Forschungsvorhabens wurden knapp 30 Anprallprüfungen an verschiedene Fahrzeug-Rückhaltesysteme ausgewertet, um tiefere Erkenntnisse über den Anprallvorgang zu erlangen und so ein robustes Lastmodell zu entwickeln, das diesen Einwirkungen bestmöglich entspricht.

Die Auswertung ergab einerseits, dass es zielführend ist die Messergebnisse mit einem Tiefpassfilter zu prozessieren, um den Einfluss der Eigenschwingungen des Prüfstands zu reduzieren. Bei einer Grenzfrequenz von etwa 10 Hz lässt sich hierbei ein großer Anteil der beim realen Bauwerk nicht vorhandenen Eigenschwingungen herausfiltern. Bei größeren Frequenzen würden sich zudem Dehnraten ergeben, die den Ansatz von Vergrößerungsfaktoren für die Festigkeit von Beton und Bewehrung gerechtfertigten würden.

Eine probabilistische Analyse der Randbedingungen bei den Anprallprüfungen ergab, dass diese im Vergleich zu den realen Abkommensunfällen mit ca. 90% Wahrscheinlichkeit größere Horizontalbeanspruchungen bewirken. Es wurde zudem aufgezeigt, wie mittels Anpassungsfaktoren auch ein anderes Sicherheitsniveau erreicht werden kann, sofern dies erwünscht ist. Bei den Vertikalkräften zeigte sich, dass die bei den Anprallprüfungen für die Aufhaltestufen H1 und H2 eingesetzten, verhältnismäßig leichten LKW hingegen nicht als repräsentativ für den realen Verkehr erachtet werden können. Deshalb ist es sinnvoll die Messwerte zu korrigieren.

Im Vorhaben wurden drei Einwirkungsmodelle für Anpralllasten miteinander verglichen: eine konzentrierte Last, ein Tandem-System und gleichmäßig verteilte Lasten. Vergleichsrechnungen ergaben, dass die konzentrierte Last und das Tandem-System eine konservativere Lastverteilung ergeben, als in den Versuchen gemessen wurde. Insgesamt entsprach die gleichmäßig verteilte Last am besten den Messergebnissen.

Die Anprallprüfungen wurden ausgewertet, um das Einwirkungsmodell so zu kalibrieren, dass es sowohl für 4 m als auch für 12 m die Messwerte stets überschreitet. Zusätzlich wurde sichergestellt, dass im Falle der Horizontalkraft die resultierenden Schnittgrößen aus der gleichmäßig verteilten Last mindestens so groß sind, wie beim Aufbringen der maximalen Einwirkung in einem 4 m Block als konzentrierte Last.

In einer Wirtschaftlichkeitsuntersuchung wurde geprüft, inwiefern die außergewöhnlichen Einwirkungen aus Anprall maßgebend für die Auslegung der Bauteile werden können. Bei dem Ansatz der Anprallkräfte als konzentrierte Last ist dies häufig der Fall. Bei der gleichmäßig verteilten Last bzw. dem Tandem-System zeichnet sich eher ab, dass in den meisten Fällen die Bewehrung im Bauteil unverändert bleiben würde.

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsvorhaben scheint das in der nächsten Ausgabe der Eurocodes enthaltene Einwirkungsmodell mit einer gleichmäßig verteilten Horizontallast über 4 m Länge mit den Messergebnissen aus den Anprallprüfungen in Einklang zu sein. Die Kalibrierung ergab, dass eine Horizontalkraft von insgesamt 700 kN eine robuste Bemessung sicherstellt, die für alle geprüften Fahrzeug-Rückhaltesysteme die geforderte Sicherheit bietet. Zugleich ergab eine Wirtschaftlichkeitsberechnung, dass aufgrund der günstigeren Lastverteilung diese außergewöhnliche Einwirkungskombination voraussichtlich nicht maßgebend wird gegenüber anderen Grenzzuständen wie

beispielsweise der Gebrauchstauglichkeit. Vor diesem Hintergrund ist es fraglich, ob es erforderlich ist mehrere Horizontalkraftklassen zu bilden, basierend auf den Auswertungen kann dies jedoch in beliebiger Anzahl erfolgen. Hinsichtlich der Vertikallast, die begleitend zum Anprall zu berücksichtigen ist, ist eine deutliche Erhöhung bezogen auf den Grundwert im Eurocode erforderlich, insbesondere, wenn die Vertikallast ebenfalls als gleichmäßig verteilte Last angesetzt wird. Bei einer gleichmäßig verteilten Last wird ein Wert von 450 kN empfohlen.

Abstract

Development of an Impact Model Independent of Vehicle Restraint Systems for Collisions with Safety Barriers on Structures

In a research project almost 30 impact tests on various vehicle restraint systems were evaluated in order to gain a deeper understanding of the impact process and thus develop a robust load model that corresponds well to these impact loads.

The evaluation showed that it would be advisable to process the measurement results with a low-pass filter in order to reduce the influence of the test setup's natural vibrations. At a cut-off frequency of around 10 Hz, a large proportion of the natural vibrations not present in the real structure can be filtered out. Furthermore, at higher frequencies, the high strain rates which would occur would justify the use of magnification factors for the strength of concrete and reinforcement.

A probabilistic analysis of the boundary conditions in the impact tests showed that with a probability of approx. 90% these cause greater horizontal loads compared to real accidents. It was also shown how a different level of safety can be achieved by means of adjustment factors, if desired. In the case of vertical forces, it became apparent that the relatively light trucks used in the impact tests for restraint levels H1 and H2 cannot be considered representative of real traffic. For this reason, it makes sense to correct the measured values accordingly.

The project compared three load impact models: a concentrated load, a tandem system and uniformly distributed loads. A comparison of finite element calculations showed that the concentrated load and the tandem system resulted in a more conservative load distribution than was measured in the tests. The uniformly distributed load corresponded best to the measurement results.

The impact tests were evaluated in order to calibrate the impact model in such a way that it always surpasses the measured values for both 4 m and 12 m. In addition, it was ensured that in the case of the horizontal force, the resulting internal forces from the uniformly distributed load are at least as high as in case of applying the maximum action in a 4 m block as a concentrated load.

In an economic feasibility study, it was examined to what extent the accidental loads from impact can be decisive for the design of the structural members. This is often the case when the impact forces are applied as a concentrated load. With the uniformly distributed load or the tandem system, it is more likely that the reinforcement in the component would remain unchanged.

Based on the findings from the research project, the load model included in the upcoming generation of the Eurocodes with a uniformly distributed horizontal load over a length of 4 m appears to be consistent with the measurement results from the impact tests. The calibration showed that a total horizontal force of 700 kN ensures a robust design that provides the required safety for all tested vehicle restraint systems. At the same time, economic comparisons showed that, due to the more favorable load distribution, this

accidental design situation is unlikely to be decisive compared to other limit states such as serviceability. Therefore, it is doubtful whether it is necessary to form several horizontal force classes, but the evaluations carried out in the project allow for the creation of any chosen number of categories if required. Regarding the vertical load acting simultaneously with the impact force, a significant increase compared to the recommended value in the Eurocode is required, especially if the vertical load is also applied as a uniformly distributed load. The recommended value is 450 kN in case of a uniformly distributed load.

Kurzbericht

1. Aufgabestellung

Im Forschungsvorhaben war auf der Grundlage der Messergebnisse aus bisher durchgeführten Anprallprüfungen ein einheitliches, produktunabhängiges Lastmodell für die Bemessung von Brücken im Falle eines Anpralls auf Fahrzeug-Rückhaltesysteme zu entwickeln. Darüber hinaus sollten hierbei auch die begleitend anzusetzenden Vertikallasten überprüft und falls erforderlich angepasst werden. Durch den Einbezug von statistisch erhobenen Unfalldaten wie Geschwindigkeit, Fahrzeugmasse und Anprallwinkel war es zudem vorgesehen die Anprallprüfungen realen Unfallereignissen gegenüberzustellen. Bei der Entwicklung des Einwirkungsmodells sind die Praxistauglichkeit und eine wirtschaftliche Planung im Vordergrund gestanden. Bei Einführung eines neuen wissenschaftlich fundierten Einwirkungsmodells soll zukünftig die Einstufung neuer Fahrzeug-Rückhaltesysteme erleichtert werden. Eine entsprechend vorausschauende, robuste Bemessung beugt auch potenziellen Problemen beim späteren Austausch der Schutzeinrichtung vor und erleichtert die Ausschreibung.

2. Untersuchungsmethode

2.1.1 Datenauswertung der Anprallprüfungen

Die Fahrzeugrückhaltesysteme für den Einsatz auf Bauwerken werden nach DIN EN 1317 „Rückhaltesysteme an Straßen“ (DIN EN 1317-1, 2011) getestet. Gemäß einer nationalen Anforderung in den Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme - RPS (FGSV, 2009) werden während der Prüfung die Kräfte gemessen, die durch die Schutzeinrichtung und das Fahrzeug in das Bauwerk eingeleitet werden. Es wurden die Rohdaten von insgesamt 27 solchen Anprallversuchen von sieben Herstellern für das Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um die Kraftmessung der Einwirkung auf die drei in den Prüfstand integrierten, 4 m langen Betonkonsolen (Block A, B und C). Die Anprallkräfte setzen sich aus zwei horizontalen und einer vertikalen Komponente zusammen. Zur Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs der Anprallkräfte wurden vier Ansätze untersucht:

- direkte Übernahme der maximalen Kräfte, wie sie auch in den Prüfberichten verwendet wurden,
- Mittelung der Kräfte über den Zeitraum von 25 μ s gemäß (Heng et al., 2021),
- Integral des zeitlichen Verlaufs der Aufprallkräfte wie in (Popp, 1961) beschrieben,
- Filtern der Daten mit einem Tiefpassfilter von 10 Hz, aufsummieren über alle Blöcke (A, B und C gleich 12 m).

Das letzte Verfahren wurde als am besten geeignet identifiziert, da einerseits die Datenfilterung mehr Objektivität in die Bewertung der Aufprallkräfte bringt und andererseits durch die Aufsummierung der auftretenden Kräfte sichergestellt wird, dass insgesamt genau so viel Kraft eingeleitet wird, wie bei den einzelnen Versuchen gemessen wurde.

2.1.2 Dynamisches Verhalten

Das dynamische Verhalten der Versuchseinrichtung unterscheidet sich von dem einer realen Brücke, was zu Ungenauigkeiten bei der Kraftbestimmung führen kann. Für drei im Projekt betrachteten realen Brücken wurden vereinfachte FE-Modelle erstellt, um zu prüfen, ob eine dynamische Wechselwirkung zwischen dem LKW und der Brücke zu Stande kommen kann. Es wurde festgestellt, dass dieser Effekt einen deutlich geringeren Einfluss auf die Schnittkräfte als im Versuch nimmt. Außerdem würden die so entfernten hochfrequenten Anteile des Kraftsignals einer Dehnungsrate höher als 0,1 1/s entsprechen. Gemäß dem *fib Model Code 2010* (*fib Model Code 2010*, 2013) ergeben sich bei einer solchen Dehnungsrate Vergrößerungsfaktoren für die Festigkeit von Beton und Bewehrung von 1,1 bis 1,2. Diese Reserven der Festigkeit werden bei der Bemessung jedoch nicht berücksichtigt und bieten somit eine zusätzliche Sicherheit, die die Filterung kurzzeitiger Kraftspitzen noch mehr rechtfertigt.

2.1.3 Charakteristische Last

Ein wissenschaftlich fundiertes Lastmodell sollte eine Abschätzung darüber treffen können, welcher Anteil der tatsächlich auftretenden Anprallereignisse durch das Modell erfasst wird. Alternativ kann ermittelt werden, mit welchem Anpassungsfaktor die Ergebnisse der Anprallprüfungen beaufschlagt werden müssen, um ein vorgegebenes Quantil der realen Anprallereignisse abzudecken. Diese Untersuchung berücksichtigt nicht die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Anprallereignisses, sondern fokussiert ausschließlich auf die Wahrscheinlichkeiten bestimmter Anprallparameter, vorausgesetzt, dass ein Anprallereignis stattfindet. Es wurden drei separate Untersuchungen mit unterschiedlichen Annahmen zu den Verteilungsfunktionen durchgeführt:

- Vorgaben des JCSS Probabilistic Model Code (JCSS, 2001) bzw. des ISO 10252 (*ISO 10252*, 2020),
- statistischen Auswertungen der GIDAS Datenbank,
- statistische Parameter die repräsentativ für Deutschland sind.

Die Ermittlung des Anpassungsfaktors erfolgt grundsätzlich basierend auf einfachen mechanischen Grundlagen. Für die Vertikalkraft wird ein linearer Zusammenhang mit dem Fahrzeuggewicht angenommen. Die Horizontalkraft wird gemäß ISO 10252 (2020) basierend auf drei wesentlichen Kenngrößen ermittelt: Fahrzeuggewicht, Fahrzeuggeschwindigkeit und Anprallwinkel.

Um die Verteilungsfunktion für den Anpassungsfaktor der Horizontalkraft zu ermitteln, wurden zwei Stichprobenauswahltechniken angewandt: "Orthogonal Array Sampling" und "Latin Hypercube Sampling". Bei der Vertikalkraft war eine analytische Berechnung möglich.

3. Untersuchungsergebnisse

3.1.1 FE-Berechnung

Es wurden drei Einwirkungsmodelle untersucht: eine konzentrierte Last nach dem aktuell gültigen Eurocodes (EC (2010)), eine Tandemlast wie in der Nachrechnungsrichtlinie (BMVDI, 2015) festgelegt (NRL), sowie eine über 4 m Länge gleichmäßig verteilte Last nach der zukünftigen Ausgabe der Eurocodes (EC (202x)). Um die drei Lastmodelle zu

vergleichen, wurden diese am gleichen Finite-Elemente-Modell mit einem verhältnismäßig kurzen Kragarm untersucht. Alle Lastmodelle wurden mit einer Horizontal- bzw. Vertikalkraft von jeweils 100 kN angesetzt.

Bei den Anprallprüfungen wurden für die drei 4 m langen Blöcke die Horizontal- und Vertikalkräfte aufgezeichnet, um die tatsächliche Verteilung dieser Kräfte im Falle eines Anpralls zu ermitteln. Der Abgleich mit den Messergebnissen ergab, dass alle drei Modelle eine stärkere Konzentration der Lasten ergeben als sie tatsächlich auftreten. Das Modell EC (202x) nähert sich den Messergebnissen am besten an, ist aber ebenfalls noch konservativ.

3.1.2 Charakteristische Last

Die Ergebnisse für die Horizontalkraft zeigen, dass die Anprallprüfungen in der Regel etwa 90% der realen Anprallereignisse abdecken. Eine Ausnahme bilden H2-Systeme auf Autobahnen, bei denen die Prüfungen nur etwa dem 75%-Quantil der Unfälle entsprechen. Berücksichtigt man jedoch die niedrigeren durchschnittlichen Fahrzeuggewichte und Geschwindigkeiten auf Straßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit von weniger als 100 km/h, erreicht man mit ca. 88% nahezu das gleiche Sicherheitsniveau. Anpassungsfaktoren in Abhängigkeit von den Quantilen zeigen, dass auch ein höheres Sicherheitsniveau erreichbar ist, jedoch steigen die Multiplikatoren deutlich an, was die Wirtschaftlichkeit in Frage stellt. Für die Vertikalkraft ergeben sich im Falle der Aufhaltestufen H1 und H2, bei denen Fahrzeuge mit lediglich 10 t bzw. 13 t bei den Anprallprüfungen eingesetzt werden, im Vergleich geringe Quantilwerte und dementsprechend hohe Anpassungsfaktoren. Die angesetzten Vergrößerungsfaktoren betragen für die Vertikalkraft 3,11 (H2) und 1,11 (H4b) sowie für die Horizontalkraft 1,06 (H2) und 0,99 (H4b).

3.1.3 Auswertung

Die gewählte Auswertung der gemessenen Anprallkräfte (Tiefpassfilter von 10 Hz, aufsummieren der Kräfte über alle drei Blöcke) wird im Weiteren als „Methode Empfehlung“ bezeichnet. Im nächsten Schritt wird überprüft, ob die so erhaltenen Kräfte die folgenden drei Kriterien erfüllen:

- Insgesamt soll mindestens die gleiche Kraft in das Bauwerk eingeleitet werden, wie bei der Anprallprüfung gemessen wurde ($H \geq H_{ABC}$; $V \geq V_{ABC}$)
- Pro Block soll mindestens die gleiche Kraft eingeleitet werden, wie bei der Anprallprüfung gemessen wurde ($H \geq \max(H_A, H_B, H_C)$; $V \geq \max(V_A, V_B, V_C)$)
- Der Spitzenwert der Horizontalkraft für die Bemessung soll mindestens so groß sein, wie es beim Aufbringen des Maximums aus einem 4 m langen Block als Einzellast der Fall wäre ($H \cdot 0,25 \geq \max(H_A, H_B, H_C) \cdot 0,6$)

Die Faktoren 0,25 und 0,6 wurden aus den FE-Berechnungen abgeleitet und aufgerundet. Bei der Vertikalkraft entfällt diese letzte Bedingung deshalb, weil das Fahrzeuggewicht auf mehrere Radachsen verteilt wird und es somit zu keiner punktueller Belastung mit der gesamten Masse des Fahrzeugs kommen kann.

Weiters wurde eine Gegenüberstellung mit den aktuell gültigen Auswertungsverfahren (bezeichnet als „Methode Referenz“) vorgenommen, wobei die drei oben beschriebenen Kriterien kontrolliert wurden.

3.1.4 Horizontalkraft

Die resultierende Horizontalkraft wurde für beide betrachteten Auswertemethoden in Verhältnis zur gemessenen Kraft gesetzt. Wie erwartet, ergeben sich bei der Auswertung von allen drei Blöcken für die Methode Empfehlung exakt Werte von 1, da die gesamte Kraft eingeleitet wurde. Der Mittelwert der Werte für die Methode Referenz ist ebenfalls gleich 1, wobei die einzelnen Fahrzeug-Rückhaltesysteme eine gewisse Streuung aufweisen. Bei einer Betrachtung der maximalen Werte eines vier Meter langen Blockes lassen sich die eingeleiteten Kräfte als konservativ einstufen, da mit einem Mittelwert von ca. 1,7 alle eingeleiteten Kräfte höher sind als die pro Block gemessenen. Somit ist auch die zweite Bedingung erfüllt.

Abschließend wird überprüft, ob die Spitzenwerte der Horizontalkraft, die für die Bemessung herangezogen werden, die entsprechenden Messwerte abdecken. Daher wird diejenige Kraft gesucht, die bei einer Verteilung über 4 m zu gleichen Spitzenwerten führt, wie eine Einzellast, die gleich der maximal gemessenen Horizontalkraft pro Block ist.

Diese Vorgehensweise ist in der Abbildung 1 dargestellt, wobei die Messwerte je 4 m Block blau markiert wurden. Die Berücksichtigung der charakteristischen Anpralllasten erfolgt durch die Skalierung mit einem Multiplikationsfaktor und wurde mit „x“ gekennzeichnet. Der so ermittelte Maximalwert der Horizontalkraft wurde mit einer gestrichelten Linie markiert. Dieser wurde mit dem Faktor von 2,5 multipliziert, was die gesuchte Horizontalkraft von ca. 700 kN ergibt, die über allen ermittelten Werten liegt. Daraus ergibt sich, dass die letzte der drei Bedingungen maßgebend wird und bei ihrer Einhaltung die beiden anderen Kriterien ebenfalls stets erfüllt werden. Basierend auf dieser Erkenntnis kann die Auswertung ggf. weiter vereinfacht werden.

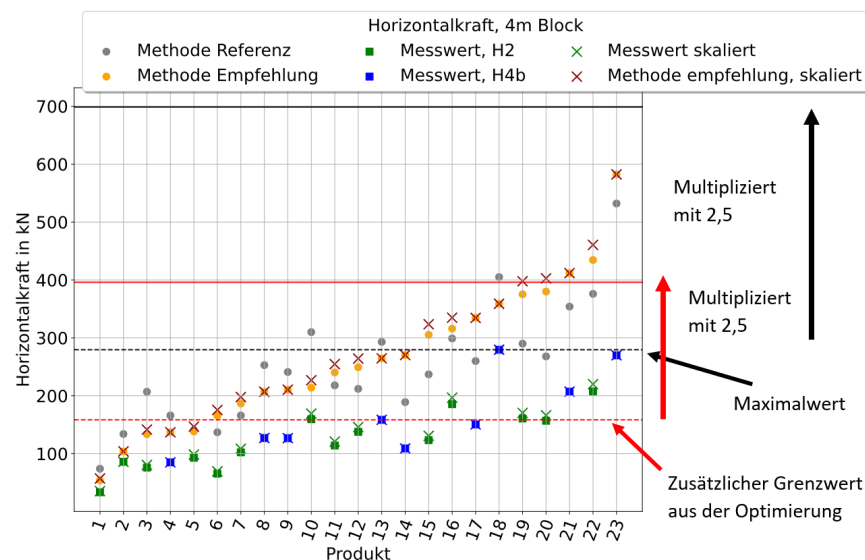


Abbildung 1: Auswertung der Horizontalkraft hinsichtlich der Abdeckung der Spitzenwerte

Abschließend wurden iterativ zwei bzw. drei Grenzwerte ermittelt, um die Fahrzeug-Rückhaltesysteme zu kategorisieren, wobei eine Unterteilung in drei Kategorien keinen nennenswerten Mehrwert bringt. Die Grenzwerte der Unterteilung wurden so gewählt, dass die Summe der quadratischen Abweichungen des Abstands zur nächsthöheren Grenzwertlinie minimiert wird. Bei zwei Kategorien, werden mehr als die Hälfte der Fahrzeug-Rückhaltesysteme mit dem gefundenen Grenzwert abgedeckt, was eine Reduktion der Horizontalkraft auf 400 kN zulassen würde.

3.1.5 Vertikalkraft

Die Auswertung der Vertikalkraft erfolgte auf identische Weise wie bei der Horizontalkraft. Es konnte festgestellt werden, dass die Gesamtkraft in der Methode Empfehlung erwartungsgemäß der gemessenen Kraft entspricht, während der Mittelwert aus der Methode Referenz einem Wert von ca. 0,8 entspricht.

Bei der blockweisen Betrachtung ergibt sich für Methode Referenz ein Medianwert von ca. 1,25 (konzentrierte Last) und für Methode Empfehlung ein Medianwert von 1,5 (gleichmäßig verteilte Last). Während es bei der Methode Referenz bei mehreren Produkten zu einer Unterschreitung der gemessenen Vertikalkraft kommt, liegen nach der Auswertung mit der Methode Empfehlung alle Produkte auf der sicheren Seite.

Für die Vertikalkraft sind die Vergrößerungsfaktoren für H2-Systeme sehr hoch und führen bei einigen Produkten zu unrealistisch hohen Kräften. Es wird daher vorausgesetzt, dass die hochskalierten Vertikalkräfte nicht höher sein können als die der hochskalierten H4b-Systeme. Um alle Produkte konservativ abzudecken, kann eine vertikale Kraft von 440 kN angesetzt werden, die über 4 m verteilt wird. Eine zweite Grenzlinie, beispielsweise für einen möglichen Einsatz an bestehenden Brücken, wurde mit 210 kN ermittelt.

3.1.6 Gegenüberstellung der Einwirkungsmodelle

Für das Einwirkungsmodell gemäß EC (202x) ergibt sich mit der empfohlenen Auswertungsmethode eine anzusetzende Horizontalkraft von 700 kN und eine Vertikalkraft von 450 kN (aufgerundet), wobei diese auf 4 m verteilt werden. Anschließend wurde anhand des FE-Modells ein Vergleich mit den aktuell geltenden Einwirkungen vorgenommen. Die Spitzenwerte der Schnittkräfte am Anschnitt des Kragarms werden verglichen, um den Einfluss auf die Bemessungsschnittgrößen zu quantifizieren.

Obwohl für das Lastmodell mit gleichmäßig verteilter Last gemäß EC (202x) höhere erforderliche Gesamtkräfte ermittelt wurden, sind die daraus resultierenden Schnittkräfte nicht zwangsläufig höher als die aus der konzentrierten Last gemäß EC (2010). Grundsätzlich werden jedoch sowohl die gemessenen Kräfte als auch die gemäß Nachrechnungsrichtlinie stets annähernd erreicht bzw. mit einer Ausnahme übertroffen. Lediglich bei den Horizontalkräften ergeben sich deutlich geringere Schnittgrößen als beim Ansatz gemäß EC (2010). Der Vergleich mit den Messwerten macht jedoch deutlich, dass dies in erster Linie dadurch begründet ist, dass der Ansatz mit konzentrierter Last hier konservativ zu sein scheint. Die Gegenüberstellung der FE-Berechnungen mit unterschiedlichen Kragarmlängen hat gezeigt, dass mit zunehmender Kragarmlänge das Einwirkungsmodell gemäß EC (202x) am Kragarmanschnitt immer größere Sicherheiten aufweist.

3.1.7 Wirtschaftlichkeitsprüfung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt, um zu überprüfen, ob bzw. inwiefern eine Erhöhung der Einwirkungen aus Anpralllasten einen Einfluss auf die Auslegung der Bauwerke nehmen würde. Es wurden dafür drei reale Brücken mit Spannweiten zwischen 7 und 20 Metern für Fallstudien ausgewählt. Bei allen Beispielbauwerken war der Nachweis zur Begrenzung der Rissbreite maßgebend bei der Festlegung der Bewehrung im Bereich des Kragarms. Darüber hinaus bestimmen auch konstruktive Regelungen und baupraktische Überlegungen die gewählten Bewehrungsdurchmesser und -abstände. Um den Vergleich mit den Anpralllasten zu erleichtern, wurde rückgerechnet, welche Horizontalkraft in der außergewöhnlichen Einwirkungskombination durch die im Bauwerk vorhandene Bewehrung aufgenommen werden

kann, wobei durch Variation der eingesetzten Vertikalkraft auch deren Einfluss berücksichtigt wurde. In Tabelle 1 sind die aufnehmbaren Anprallkräfte für die drei Beispielbauwerke im Mittelbereich zusammengefasst. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass im Falle des Einwirkungsmodells, bei dem die Lasten konzentriert aufgebracht werden, bereits sehr schnell die Anprallkräfte maßgebend werden können für die erforderliche Bewehrung. Im Gegensatz dazu zeichnet sich bei den anderen beiden Einwirkungsmodellen eher ab, dass in den meisten Fällen selbst die größten Anprallkräfte nicht maßgebend werden.

Tabelle 1 Horizontalkräfte, die durch die vorhandene Bewehrung aufgenommen werden können

Modell	Bauwerk 1			Bauwerk 2			Bauwerk 3		
	$A_{s,erf}$	$\varnothing 16/15 = 13,44 \text{ cm}^2/\text{m}$		$A_{s,erf}$	$\varnothing 16/15 = 13,44 \text{ cm}^2/\text{m}$		$A_{s,erf}$	$\varnothing 14/10 = 15,4 \text{ cm}^2/\text{m}$	
	[cm ² /m]	V = 225 kN	V = 450 kN	[cm ² /m]	V = 225 kN	V = 450 kN	[cm ² /m]	V = 225 kN	V = 450 kN
EC (2010)	10,01	250 kN	-	8,14	270 kN	-	12,29	170 kN	-
EC (202x)	3,78	780 kN	610 kN	2,3	980 kN	890 kN	3,12	750 kN	660 kN
NRL	5,11	480 kN	360 kN	2,49	1010 kN	940 kN	3,45	700 kN	630 kN

4. Folgerungen für die Praxis

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsvorhaben scheint das in der nächsten Ausgabe der Eurocodes enthaltene Einwirkungsmodell mit einer gleichmäßig verteilten Horizontallast über 4 m Länge mit den Messergebnissen aus den Anprallprüfungen im Einklang zu sein. Die Kalibrierung ergab, dass eine Horizontalkraft von insgesamt 700 kN eine robuste Bemessung sicherstellt, die für alle geprüften Fahrzeug-Rückhaltesysteme die geforderte Sicherheit bietet. Zugleich ergab eine Wirtschaftlichkeitsberechnung, dass aufgrund der günstigeren Lastverteilung diese außergewöhnliche Einwirkungskombination voraussichtlich nicht maßgebend wird gegenüber anderen Grenzzuständen wie beispielsweise der Gebrauchstauglichkeit. Vor diesem Hintergrund ist es fraglich, ob es erforderlich ist mehrere Horizontalkraftklassen zu bilden, basierend auf den Auswertungen kann dies jedoch in beliebiger Anzahl erfolgen. Hinsichtlich der Vertikallast, die begleitend zum Anprall zu berücksichtigen ist, ist eine deutliche Erhöhung bezogen auf den Grundwert im Eurocode erforderlich, insbesondere, wenn die Vertikallast ebenfalls als gleichmäßig verteilte Last angesetzt wird.

Im Hinblick auf weiteren Forschungsbedarf ist anzumerken, dass die Lastverteilung im Brückenkragarm eine große Rolle bei der Kalibrierung spielt. Da im Vorhaben die Ergebnisse nur an einer beschränkten Anzahl von Beispielbrücken überprüft werden konnten, sollten diese noch an weiteren Bauwerken verifiziert werden. Hierbei wäre es von Interesse neben den hier untersuchten Rahmenbrücken auch andere Bauarten wie Einfeldträger, andere Spannweiten und andere Kragarmlängen zu betrachten.

Summary

Development of an Impact Model Independent of Vehicle Restraint Systems for Collisions with Safety Barriers on Structures

1. Task description

The research project aimed to develop a standardised, product-independent load model for the design of bridges in the event of an impact on vehicle restraint systems. This was based on the measurements obtained during impact tests. In addition, the accompanying vertical loads, which are to be applied simultaneously, were also to be verified and adjusted if necessary. By including statistical data on accidents such as speed, vehicle mass and impact angle, it was also intended to compare the impact tests with real accidents. During the development of the impact load model important aspects were also practicality and cost-efficient design. The introduction of a new scientifically based impact load model should facilitate the classification of new vehicle restraint systems in the future. A prudent and robust design also prevents potential difficulties when replacing the restraining system becomes necessary and simplifies the tendering process.

2. Investigation method

2.1.1 Data evaluation of the impact tests

The vehicle restraint systems located on bridges are tested in accordance with DIN EN 1317 'Road restraint systems' (DIN EN 1317-1, 2011). In accordance with a national requirement in the guidelines for passive protection on roads by vehicle restraint systems - RPS (FGSV, 2009), the forces applied to the structure by the vehicle restraint system are measured during the test. The raw data from a total of 27 such crash tests from seven manufacturers were made available for the research project. This involved measuring the forces transmitted by the three 4 m long concrete consoles (blocks A, B and C) integrated into the test facility. The impact forces consist of two horizontal and one vertical component. Four approaches were investigated to take into account the development of the impact forces in time:

- direct adoption of the maximum forces as they were also used in the test reports,
- averaging of the forces over the period of 25 μ s according to (Heng et al., 2021),
- integral of the temporal course of the impact forces as described in (Popp, 1961),
- filtering the data with a low-pass filter of 10 Hz, summarizing all blocks (A, B and C equal to 12 m).

The last method was identified as the most suitable, as on the one hand the data filtering brings more objectivity to the evaluation of the impact forces and on the other hand the summation of the forces applied ensures that exactly the same force is applied in total as was measured in the individual tests.

2.1.2 Dynamic behaviour

The dynamic behaviour of the test facility differs from that of a real bridge, which can lead to inaccuracies when determining the internal forces. Simplified FE models were prepared for three real bridges considered in the project in order to check whether a dynamic interaction between the truck and the bridge can occur. It was found that this effect has a significantly lower influence on the internal forces than in the test. In addition, the removed high-frequency components of the force measurements would correspond to a strain rate higher than 0,1 1/s. According to the fib Model Code 2010 (fib Model Code 2010, 2013), such a strain rate results in magnification factors for the strength of concrete and reinforcing steel of 1.1 to 1.2. However, this additional strength is not taken into account in the design and thus offers a hidden safety, which further justifies the filtering of short-term peaks in the measured forces.

2.1.3 Characteristic load

A scientifically founded load model should be able to estimate to which extent the actual impact events are covered by the model. Alternatively, it can be determined which adjustment factor must be applied to the results of the impact tests in order to cover a specified quantile of the real impact events. This investigation does not consider the probability of an impact event occurring, but focusses exclusively on the probabilities of certain impact parameters, assuming that an impact takes place. Three separate analyses were carried out with different assumptions regarding the distribution functions:

- Specifications of the JCSS Probabilistic Model Code (JCSS, 2001) or the ISO 10252 (ISO 10252, 2020),
- statistical analyses of the GIDAS database,
- statistical parameters that are representative for Germany.

The adjustment factor is generally determined based on simple mechanical principles. A linear relationship with the vehicle weight is assumed for the vertical force. The horizontal force is determined in accordance with ISO 10252 (2020) based on three key parameters: Vehicle weight, vehicle velocity and impact angle.

Two sampling techniques were used to determine the distribution function for the horizontal force adjustment factor: orthogonal array sampling and Latin hypercube sampling. For the vertical force, an analytical calculation was possible.

3. Results

3.1.1 FE-computation

Three impact load models were analysed: a concentrated load according to the current Eurocodes (EC (2010)), a tandem system as specified in the German reassessment guideline (BMVDI, 2015) (NRL), and a uniformly distributed load over a length of 4 m according to the upcoming edition of the Eurocodes (EC (202x)). In order to compare the three load

models, they were analysed using the same finite element model with a relatively short cantilever. All load models were applied with a horizontal and vertical force of 100 kN in total each.

During the impact tests, the horizontal and vertical forces were recorded for the three 4 m long blocks in order to determine the actual distribution of these forces in the event of an impact. The comparison with the measurement results showed that all three models produce a higher concentration of loads than those occurring in reality. While the EC model (202x) comes closest to the measurement results, it is still conservative.

3.1.2 Characteristic load

The results for the horizontal force show that the crash tests generally correspond to around 90% of the real impact events. An exception are H2 systems on motorways, where the tests only correspond to about the 75% quantile of accidents. However, if the lower average vehicle weights and velocities on roads with a speed limit of less than 100 km/h are taken into account, the safety level is almost the same at around 88%. Adjustment factors can be computed for any given quantile thus achieving a higher level of safety, but the factors increase significantly, which may result in a questionable economic efficiency. For the vertical force, in the case of containment levels H1 and H2, where vehicles with only 10 tonnes and 13 tonnes respectively are used in the crash tests, the quantile values are low in comparison and the adjustment factors are correspondingly high. The adjustment factors applied are 3.11 (H2) and 1.11 (H4b) for the vertical force and 1.06 (H2) and 0.99 (H4b) for the horizontal force.

3.1.3 Assessment

The selected procedure for analysing the recorded impact force signals (low-pass filter of 10 Hz, summation of the forces over all three blocks) will thereafter be referred to as the “recommended method”. The next step is to check whether the forces obtained in this way fulfil the following three criteria:

- In total, at least the same force should be applied to the structure as was measured during the crash test ($H \geq H_{ABC}$; $V \geq V_{ABC}$)
- At least the same force should be applied per block as was measured during the crash test ($H \geq \max(H_A, H_B, H_C)$; $V \geq \max(V_A, V_B, V_C)$)
- The peak value of the horizontal force for the design should be at least as high as would be the case if the maximum from a 4 m long block were applied as a concentrated load ($H \cdot 0.25 \geq \max(H_A, H_B, H_C) \cdot 0.6$)

The factors 0.25 and 0.6 were derived from the FE calculations and rounded up. This last condition is not applied to the vertical force because the vehicle weight is distributed over several axles and therefore no concentrated loading with the entire mass of the vehicle can occur.

Furthermore, a comparison was made with the current evaluation methods (referred to as the “reference method”), whereby the three criteria described above were verified.

3.1.4 Horizontal load

The ratio of the resulting horizontal force over the measured force was calculated for both evaluation methods. As expected, the evaluation of all three blocks for the recommended

method results in values of exactly 1, as the entire force was applied. The mean value of the values for the reference method is also equal to 1, although the individual vehicle restraint systems show a certain variance. Considering the maximum values of a 4 m long block, the applied forces are conservative, since all applied forces are higher than those measured per block, with a mean value of approx. 1.7. The second condition is therefore also fulfilled.

Finally, it is verified whether the peak values of the horizontal force, which are used for the design, reach the corresponding measured values. Therefore, we determined the force, which distributed over 4 m, results in the same peak values as the maximum horizontal force recorded per block, if it is applied as concentrated load.

This procedure is shown in Figure 1, with the measured values per 4 m block marked in blue. The characteristic impact loads are taken into account by scaling with a multiplication factor and are marked with 'x'. The maximum value of the horizontal force determined in this way was marked with a dashed line. This was multiplied by a factor of 2.5, resulting in the required horizontal force of approx. 700 kN, which is higher than all other values. This shows that the last of the three conditions is decisive and if it is met, the other two criteria are also always fulfilled. Based on this finding, the evaluation can be further simplified if necessary.

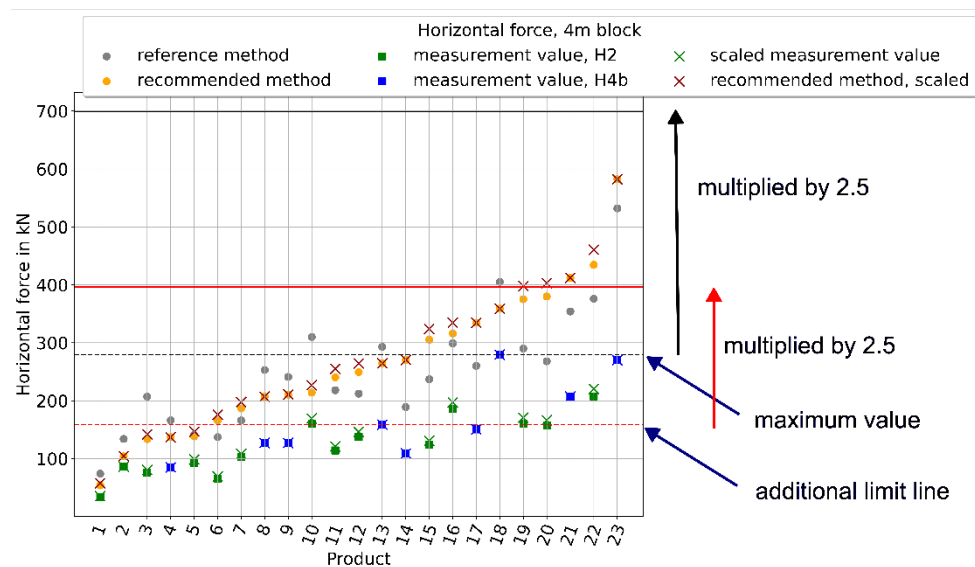


Figure 1: Evaluation of the horizontal force with the envelope of the peak values

Finally, two and three possible boundaries were determined iteratively in order to categorise the vehicle restraint systems, whereby a subdivision into three categories does not provide any significant added value. The boundaries of the categories were selected in such a way that the sum of the quadratic deviations of the distance to the next higher boundary is minimised. With two categories, more than half of the vehicle restraint systems are covered by the intermediate boundary, which would allow the horizontal force to be reduced to 400 kN.

3.1.5 Vertical force

The vertical force was analysed in the same way as the horizontal force. As expected, it was found that the total force in the recommended method corresponds to the measured force, while the mean value from the reference method corresponds to a value of approx. 0.8.

The block-by-block analysis results in a median value of approx. 1.25 (concentrated load) for the reference method and a median value of 1.5 (uniformly distributed load) for the recommended method. While the reference method results in several systems falling below the measured vertical force, all products are conservative when analysed using the recommended method.

For the vertical force, the magnification factors for H2 systems are very high and lead to unrealistically high forces for some products. It is therefore assumed that the adjusted vertical forces cannot be higher than those of the adjusted H4b systems. In order to cover all products conservatively, a vertical force of 440 kN can be applied, which is distributed over 4 metres. A second boundary, for example for possible use on existing bridges, was determined at 210 kN.

3.1.6 Comparison of the impact load models

For the impact load model according to EC (202x), the recommended evaluation method results in a horizontal force of 700 kN and a vertical force of 450 kN (after rounding up), which are distributed over 4 metres. A comparison was made with the currently applied impact loads using the FE model. The peak values of the internal forces at the start of the cantilever are compared in order to quantify the influence on the design.

Although higher required total forces were determined for the load model with uniformly distributed load according to EC (202x), the resulting internal forces are not necessarily higher than those from the concentrated load according to EC (2010). In principle, however, both the measured forces and those according to the reassessment guideline are always approximately achieved or, with one exception, exceeded. Only the horizontal forces result in significantly lower internal forces than the approach according to EC (2010). However, the comparison with the measured values makes it clear that this is primarily due to the fact that the concentrated load approach appears to be conservative here. The comparison of the FE calculations with different cantilever lengths has shown that with increasing cantilever length, the load model according to EC (202x) becomes increasingly conservative.

3.1.7 Economic efficiency analysis

As part of the research project, an economic efficiency analysis was also carried out to check whether and to what extent an increase in the impact loads would have an influence on the design of the structures. Three real bridges with spans between 7 and 20 metres were selected for case studies. For all selected structures, the serviceability limiting state of crack width limitation was decisive in determining the reinforcement in the cantilever area. In addition, design regulations and practical considerations also determine the selected reinforcement diameters and spacing. In order to simplify the comparison with the impact loads, the horizontal force that can be absorbed by the existing reinforcement in the structure in the accidental load combination was recalculated. Hereby two different values for the vertical force were considered to account for its influence. Table 1 summarises the impact forces that can be absorbed by the middle section of the bridge for the three case studies. The results indicate that in the case of the impact load model, in which the loads are applied as a concentrated load, the impact forces often become decisive for the required reinforcement. In contrast, the other two impact load models do rarely become decisive, even in case of large total impact forces.

Table 1 Horizontal forces that can be sustained by the existing reinforcement

Model	bridge 1			bridge 2			bridge 3		
	$A_{s,req}$	$\varnothing 16/15 = 13,44 \text{ cm}^2/\text{m}$		$A_{s,req}$	$\varnothing 16/15 = 13,44 \text{ cm}^2/\text{m}$		$A_{s,req}$	$\varnothing 14/10 = 15,4 \text{ cm}^2/\text{m}$	
	[cm ² /m]	V = 225 kN	V = 450 kN	[cm ² /m]	V = 225 kN	V = 450 kN	[cm ² /m]	V = 225 kN	V = 450 kN
EC (2010)	10,01	250 kN	-	8,14	270 kN	-	12,29	170 kN	-
EC (202x)	3,78	780 kN	610 kN	2,3	980 kN	890 kN	3,12	750 kN	660 kN
NRL	5,11	480 kN	360 kN	2,49	1010 kN	940 kN	3,45	700 kN	630 kN

4. Consequences for practice

Based on the findings from the research project, the impact load model included in the upcoming generation of the Eurocodes with a uniformly distributed horizontal load over a length of 4 m appears to be consistent with the measurement results from the impact tests. The calibration showed that a horizontal force of 700 kN in total ensures a robust design that provides the required safety for all tested vehicle restraint systems. At the same time, an economic efficiency calculation showed that, due to the more favourable load distribution, this accidental combination of actions is unlikely to be decisive compared to other limit states such as serviceability. With this in mind, it is questionable whether it is necessary to form several categories for horizontal forces, but based on the analyses this can be done in any number. Regarding the vertical load acting simultaneously with the impact, a significant increase compared to the recommended value in the Eurocode is required, especially if the vertical load is also applied as a uniformly distributed load.

With regard to the need for further research, it should be noted that the load distribution in the bridge cantilever plays a major role in the calibration. As the results of the project could only be checked on a limited number of case studies, they should be verified on further structures. In addition to the frame bridges examined here, it would also be interesting to consider other bridge types such as simply supported beams, other spans and other cantilever lengths.