

Anprallsockel für Verkehrszeichenbrücken

FE 15.0593/2013/ARB

im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)

Schlussbericht

Universität der Bundeswehr München
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau - Massivbau
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg

HFR Ingenieure GmbH
Dr.-Ing. Thomas Braml
Grünwalderstraße 1
81547 München

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise.....	2
2. Literaturrecherche	5
2.1 Regelwerke.....	5
2.1.1 Stand der Normung und Technik in Deutschland.....	5
2.1.2 Internationale Normung.....	17
2.2 Dynamische Grundlagen zum Stoß.....	19
2.2.1 Ideal-elastischer und ideal-plastischer Stoß.....	19
2.2.2 Harter und weicher Stoß.....	19
2.2.3 Dynamische Anprallberechnungen nach DIN EN 1991-1-7 [7].....	19
2.2.4 Bisherige Untersuchungen zu Fahrzeuganprall.....	22
3. Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken	23
3.1 Anfragen bei Behörden.....	23
3.2 Auswertung der Schadensfälle.....	23
4. Risikoanalyse gemäß DIN EN 1991-1-7 [7]	40
4.1 Grundlagen der DIN EN 1991-1-7 [7].....	40
4.2 Qualitative Risikoanalyse.....	42
4.2.1 Risikoverursachung.....	44
4.2.2 Gefährdungsszenarien.....	44
4.2.3 Schadensfolgen und Ereignisbäume.....	53
4.2.4 Maßnahmenplanung.....	56
4.2.5 Risikobewertung.....	56
4.2.6 Risikobehandlung.....	62
4.3 Quantitative Risikoanalyse.....	63
4.3.1 Grundlagen und Vorgehensweise.....	63
4.3.2 Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung (FORM).....	63
4.3.3 Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit für eine Verkehrszeichenbrücke.....	65
4.3.4 Auswertung der zur Verfügung stehenden Daten in Hinblick auf die Anprallereignisse.....	71
5. Numerische Untersuchungen zur Ableitung von statischen Ersatzlasten für Fahrzeuganprall an Verkehrszeichenbrücken	75
5.1 Grundlagen der Berechnungen und verwendete Programme.....	75
5.2 Ausgewählte Unfallszenarien.....	75
5.2.1 Anprallereignis in Form eines überwiegend harten, bzw. weichen Stoßes.....	75
5.2.2 Szenario A – Unfallszenario für einen überwiegend harten Stoß.....	76
5.2.3 Szenario B – Unfallszenario für einen überwiegend weichen Stoß.....	76
5.2.4 Szenario C – Unfallszenario für einen überwiegend weichen Stoß mit Berücksichtigung der Trägheit des Betonsockels.....	77
5.2.5 Szenarien D und E – Unfallszenario für einen überwiegend weichen Stoß mit Berücksichtigung der Trägheit des Betonsockels und der Energieverluste durch Formänderung.....	78
5.3 Ausgewählte Verkehrszeichenbrücke für die Referenzberechnungen.....	79
5.4 Konventionelle Bemessung des Referenzbauwerkes.....	83
5.4.1 Betrachtete Bemessungssituationen.....	83
5.4.2 Weiterleitung der Kräfte in den Baugrund.....	86

5.5	Numerische Berechnungen mit SOFiSTiK [27]	87
5.5.1	Aufbringen der Lasten	88
5.5.2	Betrachtete Steifenanordnung	89
5.5.3	Betrachtete Werkstoffmodelle	90
5.5.4	Ergebnis der Berechnungen in SOFiSTiK [27]	90
5.6	Numerische Berechnungen mit Siemens NX Nastran [10] für einen dynamischen Anprall ...	92
5.6.1	Grundlagen der Modellierung	92
5.6.2	Vereinfachtes Modell zur Abschätzung einer realistischen Anprallgeschwindigkeit mit Berücksichtigung der Energieverluste beim Anprall....	101
5.6.3	Simulierte Anprallsituationen	102
5.6.4	Ergebnisse der Berechnungen in Siemens NX Nastran [10]	104
5.7	Empfehlung für statische Ersatzlasten	116
5.7.1	Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Anprallereignissen	116
5.7.2	Vergleich der statischen und dynamischen Berechnungen	116
5.7.3	Realistische Stoßkraft bei einem Anprall	117
6.	Konstruktion von Verkehrszeichenbrücken mit vorgeschalteten Fahrzeugrückhaltesystem	120
6.1	Derzeitige typische Konstruktionen	120
6.2	Einfluss der konstruktiven Auslegungen	124
6.3	Vorschläge für eine Verbesserung der Konstruktion	125
7.	Textvorschlag für die ZTV-ING	126
7.1	Auswertung der Risikoanalyse und der numerischen Berechnungen	126
7.1.1	Textvorschlag für statische Ersatzlasten sowie für die Konstruktion	127
8.	Zusammenfassung und Ausblick	128
8.1	Zusammenfassung	128
8.2	Ausblick	130
9.	Literaturverzeichnis	131

Anhang A) Auswertung der Gefährdungsszenarien im Rahmen der qualitativen Risikoanalyse

1. Einführung

1.1 Problemstellung

Für die Planung von Verkehrszeichenbrücken werden in Deutschland neben den Regelungen in den Eurocodes für Lasteinwirkungen [1] und für die Bemessung von Stahlbeton [2] und Stahlbau [3] die Angaben in den ZTV-ING, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 9, Abschnitt 1 Verkehrszeichenbrücken [4] berücksichtigt. Im Teil 9 Bauwerke – Abschnitt 1 Verkehrszeichenbrücken, Kapitel 6.7 ist der Fahrzeuganprall auf Verkehrszeichenbrücken wie folgt geregelt:

- (1) Es gelten die RPS-Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme [5] und
- (2) Zur Bemessung des Stiels ist immer eine Ersatzlast von 100 kN in einer Höhe von 1,25 m über OK Straße in Rahmenebene oder rechtwinklig dazu in jeweils ungünstigster Richtung zu berücksichtigen.

Ein Anprall auf den Fahrzeugriegel einer Verkehrszeichenbrücke ist nicht zu berücksichtigen. In der RIZ-ING [6] sind weiterführende Angaben in Hinblick auf die Anpralllasten bei Geschwindigkeiten kleiner und größer als 50 km/h sowie bei Vorhandensein eines Anprallsockels enthalten. So kann z. B. bei einer zulässigen Geschwindigkeit von $v_{zul} > 50$ km/h und dem Vorhandensein eines Anprallsockels auf eine statische Ersatzlast zur Berücksichtigung eines Fahrzeuganpralls verzichtet werden.

In der DIN EN 1991-1-7, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen [7] sind im Abschnitt 4 die Einwirkungen infolge Fahrzeuganprall geregelt. Die Angaben beziehen sich auf Brückenbauwerke. Verkehrszeichenbrücken werden in der DIN EN 1991-1-7 [7] nicht direkt angesprochen, da aber Stiele von Verkehrszeichenbrücken als Stützkonstruktionen von Schilderriegeln über Straßen anzusehen sind, stellt sich die Frage, ob diese Anpralllasten auch für die Stiele und Riegel von Verkehrszeichenbrücken anzuwenden sind. Brücken sind nach DIN EN 1991-1-7 [7] für eine statische Ersatzlast von 1000 kN in Fahrtrichtung und 500 kN rechtwinklig dazu zu bemessen. Der Deutsche Nationale Anhang [1] erhöht die Lastwerte zusätzlich um 50 % auf 1500 kN bzw. 750 kN.

In Abbildung 1 sind die geforderten Lastansätze und konstruktiven Maßnahmen der beiden Regelwerke gegenübergestellt. Es wird ersichtlich, dass sich die Regelungen in der ZTV-ING [4] von denen in der DIN EN 1991-1-7 [7] deutlich unterscheiden.

Eurocode		ZTV – ING / RIZ – ING
außerorts	1500 kN mit Anprallsockel oder FRS	ZTV-ING: 100 kN mit Anprallsockel RIZ-ING: nur Anprallsockel, keine statische Ersatzlast
innerorts [km/h]	$< v_{zul}$ 1000 kN mit Anprallsockel oder FRS	$v_{zul} > 50$ km/h
	50 1000 kN kein Anprallsockel	$v_{zul} \leq 50$ km/h 100 kN kein Anprallsockel
	$v_{zul} <$ 250 kN kein Anprallsockel	

Abbildung 1 – Gegenüberstellung der Lastansätze des Eurocodes [7], der ZTV-ING [4] sowie RIZ-ING [6]

Im Zuge des Forschungsvorhabens soll geprüft werden, ob die in der DIN EN 1991-1-7, Abschnitt 4 [7], genannten Einwirkungen infolge Fahrzeuganprall auch für Verkehrszeichenbrücken anzuwenden sind, oder ob hier aufgrund des vorhandenen Anprallsockels und der Fahrzeugrückhaltesysteme gemäß RPS [5] Anpassungen und gesonderte Regelungen erforderlich werden.

Die konstruktive Ausbildung von Verkehrszeichenbrücken erfolgt u. a. gemäß den Regelungen in den Richtzeichnungen für Ingenieurbauten [6]. In den Richtzeichnungen „VZB“ werden die konstruktiven Details für Straßen mit $v_{zul} < 50$ km/h sowie für Straßen mit $v_{zul} > 50$ km/h geregelt. Bei Verkehrszeichenbrücken mit Anprallsockel wird dabei zwischen den Varianten mit integrierter Schutzeinrichtung und mit vorgeschalteter Schutzeinrichtung unterschieden. Im Zuge des Forschungsvorhabens ist weiterhin zu untersuchen, ob durch die Formulierung spezifischer Anforderungen für die Konstruktion, d. h. für das Zusammenwirken von Anprallsockel und Schutzeinrichtung, Anforderungen zur Minimierung der Schäden im Anprallfall für Dritte sowie für die Konstruktion selbst formuliert werden können.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen des FE-Vorhabens sollen Strategien und Konzepte für die Festlegung von Anpralllasten auf Verkehrszeichenbrücken sowie für die konstruktive Durchbildung der Fundamente und der aufgehenden Konstruktion entwickelt werden. In einem Textvorschlag für die ZTV-ING 9-1 sollen die Erkenntnisse für die Praxis aufbereitet werden und die bislang auftretenden Unklarheiten und Unsicherheit damit beseitigt werden.

Auf folgende Punkte soll eingegangen werden:

- (1) Formulierung von notwendigen Anforderungen für die Konstruktionen zur Minimierung der Schäden im Anprallfall für Dritte sowie für die Konstruktion selbst,
- (2) Klärung der Anwendbarkeit der Einwirkungen gemäß DIN EN 1991-1-7 [7] auf Verkehrszeichenbrücken,
- (3) Bestimmung des Risikos eines Anpralls und der Häufigkeit von Anprallereignissen. Zudem soll die Schwere solcher Anprallereignisse und die zugehörigen statischen Ersatzlasten anhand numerischer Simulationen bestimmt werden.

Insbesondere sind dabei auch die Wirtschaftlichkeit, die Sichtverhältnisse und die Regelungen in den RPS [5] zu berücksichtigen.

Das Anprallereignis soll sowohl seitlich des Verkehrsraums als auch oberhalb des Verkehrsraums betrachtet werden. Zudem sollen vorstehende Schutzeinrichtungen berücksichtigt werden. Insgesamt sind die Randbedingungen in einer Risikostudie einzubeziehen.

1.3 Vorgehensweise

Entwicklung von Konstruktionen mit möglichst geringen Schäden für Dritte sowie für die Konstruktion

Grundsätzlich werden Prall- und Kraftstöße unterschieden [8]. Bei Prallstößen kommt es zu einer gegenseitigen Beeinflussung zwischen der aufprallenden Masse (Anprallkörper, Projektil) und der getroffenen Masse (Bauwerk). Je nach Art dieser Rückwirkung unterscheidet man zwischen hartem und weichem Stoß.

Bei einem harten Prallstoß erleidet die aufschlagende Masse keine, allenfalls eine sehr geringe Verformung. Beim Stoß bzw. Anprall gegen eine Verkehrszeichenbrücke ist die Tragkonstruktion so auszulegen, dass sie einen harten Prallstoß möglichst ohne Schädigung (elastisch) aufnehmen kann. Beim weichen Prallstoß wird ein Großteil der kinetischen Energie durch elastische und / oder plastische Deformation des aufprallenden Körpers zerstreut. Werden Energie dissipierende Elemente planmäßig eingebaut, so kann die Stoßwirkung deutlich gemindert werden. So wird durch den Einsatz von Fahrzeugrückhaltesystemen eine lokale Zerstörung von Planke und Pfosten zum Abbau der kinetischen Energie hingenommen, ebenso ein Knautschen der vorderen und seitlichen Karosseriebereiche. Ein solcher Anprall liegt zwischen einem harten und einem weichen Stoß.

Von zentraler Bedeutung für die Größe der Anpralllast ist die Bestimmung und Festlegung der Deformationsfähigkeit der Verkehrszeichenbrücken. Sind zudem ein Anprallsockel sowie ein Fahrzeugrückhaltesystem vorgeschaltet, so kann das Gesamtsystem betrachtet werden. Eine Verkehrszeichenbrücke unterscheidet sich durch dieses Zusammenspiel in Hinblick auf Steifigkeiten und Energiedissipation deutlich von Unterbauten von Brückenbauwerken.

Die vorhandenen Konstruktionen von Verkehrszeichenbrücken sind daher einer Schwachstellenanalyse unter Einbezug der Auswertung von aufgetretenen Schäden zu unterwerfen. Die Schäden sind dabei in Hinblick auf den Schaden der Konstruktion selbst sowie auf den Schaden des anprallenden Fahrzeugs zu untersuchen.

Aufbauend auf der Schwachstellenanalyse sind Optimierungsvorschläge zu erarbeiten. Es handelt sich dabei um ein Optimierungsproblem mit mehreren Zielgrößen, für das eine ingenieurmäßige Lösung zu erarbeiten ist.

Folgende Zielgrößen sind zu beachten:

- Möglichst geringe Schäden für Dritte,
- Möglichst geringe Schäden an der Konstruktion,
- Wirtschaftlichkeit der Konstruktion.

Die Konstruktion ist damit so auszulegen, dass der Anprall optimal zwischen einem harten und einem weichen Stoß liegt. Dies bedeutet, dass sowohl an der Konstruktion als auch am anprallenden Fahrzeug möglichst wenige Schäden entstehen.

Entwicklung von Lastmodellen:

Eine angemessene Modellierung von Stoßlasten erfordert gemäß [8]

- die Aufstellung eines Auftrittsmodells und weiter,
- die Aufstellung des Einwirkungs-Widerstands-Modells.

Wenn dynamische Anpralllasten eintreten, sind ihre Auswirkungen auf das Tragwerk meist hochgradig nichtlinear. Es ist daher nur mit Einschränkungen möglich, die Einwirkungen getrennt vom Widerstand zu behandeln. Eine Berechnung mit quasi-statischer Ersatzlast erfasst die Verhältnisse nicht vollkommen.

Die in Tabelle NA.2-4.1 der DIN EN 1991-1-7 [7] angegebenen statisch äquivalenten Anprallkräfte sind daher für Verkehrszeichenbrücken und für Verkehrszeichenbrücken in Kombination mit Anprallsockel und Fahrzeugrückhaltesystemen anzupassen. Zudem sind Fundamentgrößen, Steifigkeiten, Abstände zur Fahrbahn, Lage, etc. zu berücksichtigen.

Die Anprallgeschwindigkeiten hängen weiterhin vom Abstand der Straße zum Tragwerk, dem Winkel des Kollisionskurses, der Anfangsgeschwindigkeit und den topographischen Merkmalen des Terrains zwischen Straße und Tragwerk ab.

Im Verlaufe des Forschungsvorhabens wurde festgelegt, dass für die numerischen dynamischen Berechnungen, die in der RPS [5] und in der DIN EN 1317-2 [9] angegebenen Fahrzeuge für Anprallversuche an Fahrzeugrückhaltesystemen zugrunde gelegt werden. Als Grundlage wurde eine Aufhaltstufe mit einem sehr hohen Rückhaltevermögen gewählt. Ein solches Fahrzeugrückhaltesystem wird gemäß RPS [5] meist für den Schutz von Stielen von Verkehrszeichenbrücken an Bundesautobahnen gefordert. Die Abnahmeprüfung hat gemäß [9] mit einer TB 81-Prüfung zu erfolgen. Bei dem Fahrzeug für die Durchführung einer solchen Abnahmeprüfung handelt es sich um einen Sattelzug, der mit einer Anprallgeschwindigkeit von 65 km/h und mit einer Gesamtprüfmasse von 38 t gegen das Fahrzeugrückhaltesystem fährt.

Die Berechnung einer statischen Ersatzlast erfolgte, auf der Grundlage dieses Fahrzeugtyps, mit numerischen dynamischen Berechnungen mit dem FE Programmsystem Siemens NX [10] an einer typischen Verkehrszeichenbrücke. Bei dieser typischen Verkehrszeichenbrücke handelt es sich um ein Referenzbauwerk / Regelbauwerk, welches sehr oft zur Anwendung kommt. Die vollständigen statisch-konstruktiven Unterlagen konnten dabei zur Verfügung gestellt werden. Das Referenzbauwerk wird im Kapitel 5.3 dieses Berichtes im Detail vorgestellt.

Auf dieser Basis wurden dann statisch-äquivalente Ersatzlasten für Verkehrszeichenbrücken und für Gesamtsysteme aus Verkehrszeichenbrücke und Fahrzeugrückhaltesystemen entwickelt und für den praktischen Einsatz aufbereitet.

Entwicklung eines Risikoprofils für einen Fahrzeuganprall

Bei der Beurteilung von Versagensfällen ist nicht nur die Häufigkeit des Auftretens, sondern auch die Schwere der Folgen für die Gesellschaft bei Eintritt eines Versagensfalls von Bedeutung. Dies wird durch den Begriff des Risikos als Produkt von Versagenswahrscheinlichkeit und zu erwartenden Versagensfolgen definiert.

Ein bestimmtes Risiko kann entweder durch hohe Versagenswahrscheinlichkeit mit geringen Versagensfolgen oder umgekehrt durch geringe Versagenswahrscheinlichkeit mit hohen Folgen verursacht werden.

Das Risikoprofil ist auf der Grundlage einer qualitativen Risikoanalyse sowie einer quantitativen Risikoanalyse zu erstellen. In der qualitativen Risikoanalyse werden alle Gefährdungen und zugehörigen Gefährdungsszenarien identifiziert. In der quantitativen Risikoanalyse werden für alle unerwünschten Ereignisse und deren Folgen Wahrscheinlichkeiten abgeschätzt. Diese können gemäß DIN EN 1991-1-7 [7] teilweise auf Ingenieurabschätzungen beruhen.

Im Rahmen der Risikostudie ist das generelle Risiko eines Anpralls, die Häufigkeit von Anprallereignissen und die Schwere dieser Anprallereignisse herauszuarbeiten. Das Risiko kann nun durch verschiedene Strategien gesteuert und minimiert werden. Die Wirtschaftlichkeit spielt dabei eine besondere Rolle.

Folgende Strategien können zur Risikosteuerung eingesetzt werden:

- Verringerung der Auftretenswahrscheinlichkeit z. B. durch geeignete Anordnung der Verkehrszeichenbrücken,
- Verringerung der Schäden bzw. der Versagensfolgen z. B. durch optimal abgestimmtes Zusammenspiel von Schutzeinrichtungen und Konstruktion der Verkehrszeichenbrücke und des Anprallsockels.

Als Grundlage für die probabilistischen Berechnungen und die numerischen Untersuchungen des Last-Verformungsverhaltens bei einem Anprallereignis wurden von der BASt Daten aus der SIB-Bauwerke-Datenbank zur Verfügung gestellt. Die Auswertung der Daten hat jedoch leider gezeigt, dass in dieser Datenbank Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken nicht explizit dokumentiert sind, so dass die Daten für die Auswertung nicht genutzt werden konnten. Dasselbe gilt für die von der Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellten Daten aus SIB-Bauwerke, da keine genaue Aussage darüber enthalten ist, ob in dem erfassten Schlüssel „Anprall gegen ein Hindernis“ in jedem Fall ein Anprall an eine Verkehrszeichenbrücke erfasst ist.

Daher wurden in Abstimmung mit der BASt eigene Recherchen zur Beschaffung aussagekräftiger Daten erforderlich. Es zeigte sich dabei, dass es keine zentrale Erfassung von Anprallereignissen an Schilderbrücken und der dabei aufgetretenen Verformungen in den einzelnen Bundesländern gibt. Somit wurde eine Datenbeschaffung bei einzelnen Dienststellen erforderlich. Von der Autobahndirektion Südbayern wurden den Autoren dieses Berichtes Unfalldaten von Verkehrszeichenbrücken für die letzten vier Jahre, von der Autobahndirektion Nordbayern für die letzten 15 Jahre zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus haben die Autobahnmeistereien Freiburg, Karlsruhe, Ludwigsburg, Ulm, Wangen, Heidenheim, Kirchheim, Mannheim, Herrenberg, Walldorf und Rottweil entsprechende Daten zur Verfügung gestellt. Die Autoren danken den genannten Behörden und den jeweiligen Mitarbeitern vielmals für die Unterstützung.

Der Schwerpunkt im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde auf die Datenbeschaffung in Hinblick auf die Auftretenswahrscheinlichkeit von Anprallereignissen an Verkehrszeichenbrücken sowie auf die numerischen dynamischen Berechnungen zur Vorausberechnung der Anpralltragfähigkeit von typischen Verkehrszeichenbrücken gelegt.

2. Literaturrecherche

2.1 Regelwerke

2.1.1 Stand der Normung und Technik in Deutschland

Verkehrszeichenbrücken werden in Deutschland in Verbindung mit den Eurocodes auch auf der Grundlage der Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, ZTV-ING, Teil 9 Bauwerke, Abschnitt 1 Verkehrszeichenbrücken, [4] konstruiert und bemessen. Im Abschnitt 6.7 der ZTV-ING, Teil 9 werden die Grundlagen für die Bemessung infolge Fahrzeuganprall erläutert, die nachfolgend aufgeführt werden:

- (1) Es gelten die RPS [5],
- (2) zur Bemessung des Stiels ist immer eine Ersatzlast von 100 kN in einer Höhe von 1,25 m über OK Straße in Rahmenebene oder rechtwinklig dazu in jeweils ungünstigster Richtung zu berücksichtigen.

Zusätzlich sind im Abschnitt 2 – Baugrundsätze [4] die Regelungen für die Ortbetonsockel angegeben:

- (3) Zum Schutz vor Fahrzeuganprall sind bei $v > 50$ km/h Ortbetonsockel entsprechend der DIN EN 1991-1-7 [7] mit einer Höhe von mindestens 80 cm über Fahrbahn vorzusehen, wobei deren Stirnseiten halbkreisförmig auszurunden sind.

Die Art und Weise der Konstruktion der Sockel ist in den Richtzeichnungen für Ingenieurbauten [6] geregelt. In der Richtzeichnung „VZB 4“ sind die konstruktiven Anforderungen für Verkehrszeichenbrücken mit Anprallsockel aufgeführt. Siehe hierzu die nachfolgenden Abbildungen 2 bis 4.

Das Fahrzeugrückhaltesystem ist hier vor dem Anprallsockel angeordnet. Bei Straße mit einer zulässigen Geschwindigkeit von $v_{zul} > 50$ km/h ist stets ein Anprallsockel vorzusehen. Wird der Anprallsockel im Mittelstreifen angeordnet, so muss dieser mindestens 3,50 m breit sein.

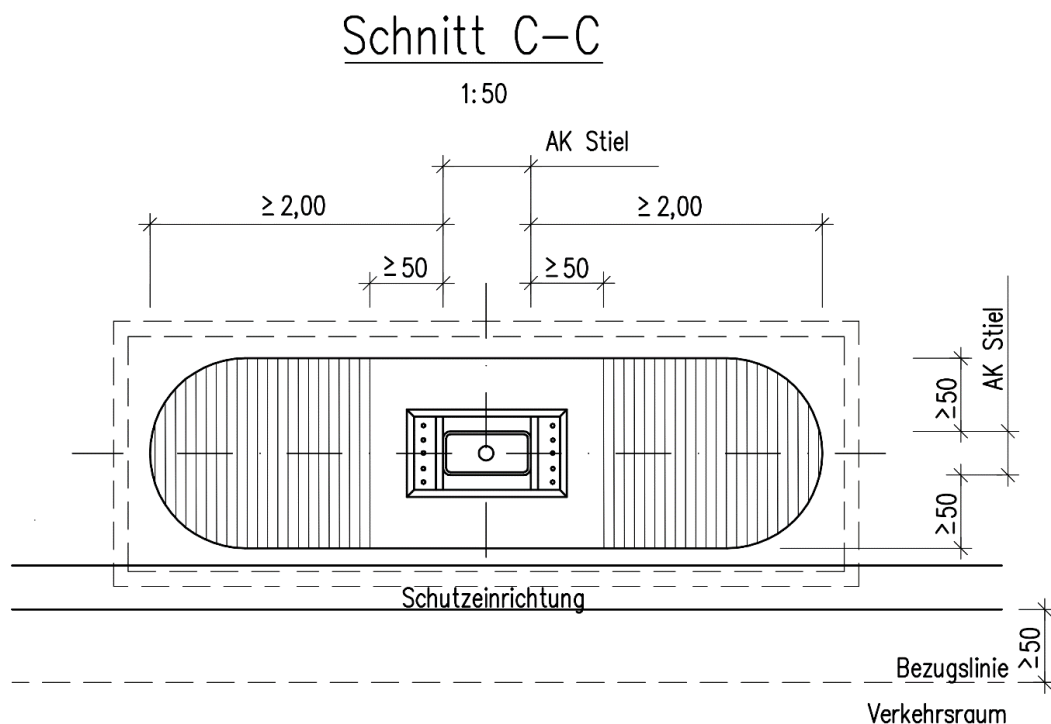
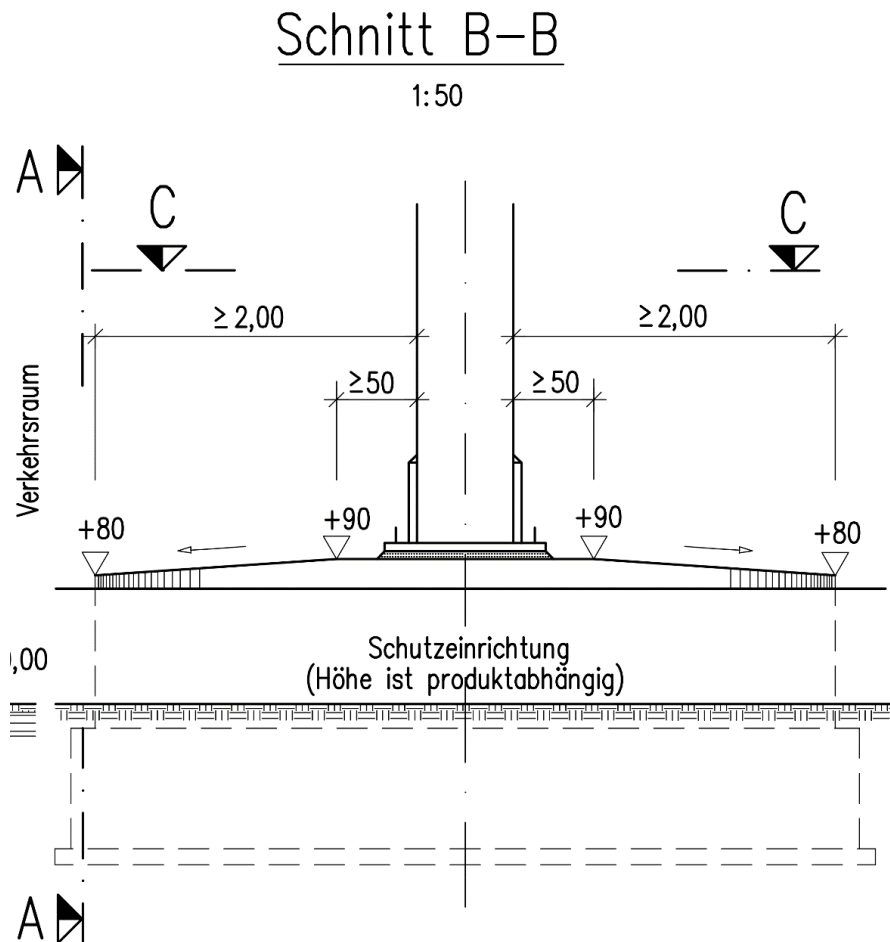
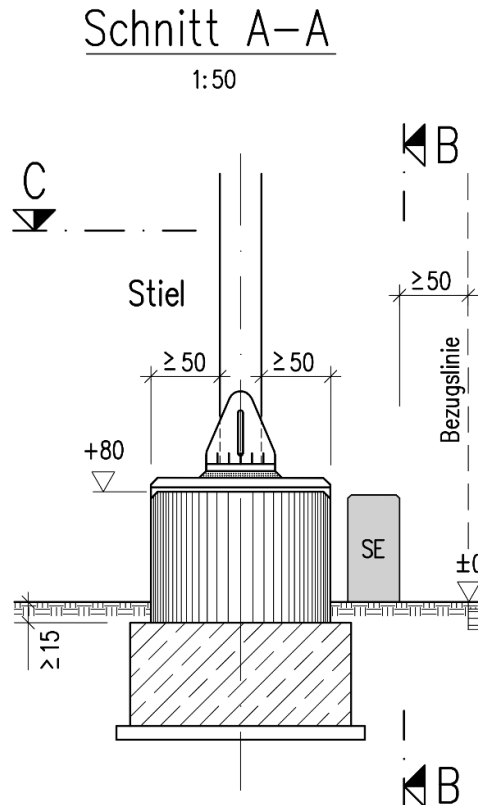


Abbildung 2 – Auszug aus Richtzeichnung „VZB 4“ [4], Draufsicht auf den Anprallsockel



In der Richtzeichnung „VZB 5“ der RIZ-ING [6] sind Verkehrszeichenbrücken mit Anprallsöckel und integrierter Schutzeinrichtung geregelt (siehe hierzu die nachfolgenden Abbildungen 5 bis 7). Die Konstruktion gemäß „VZB 5“ ist bei Straßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit von $v_{zul} > 50$ km/h anzuwenden.

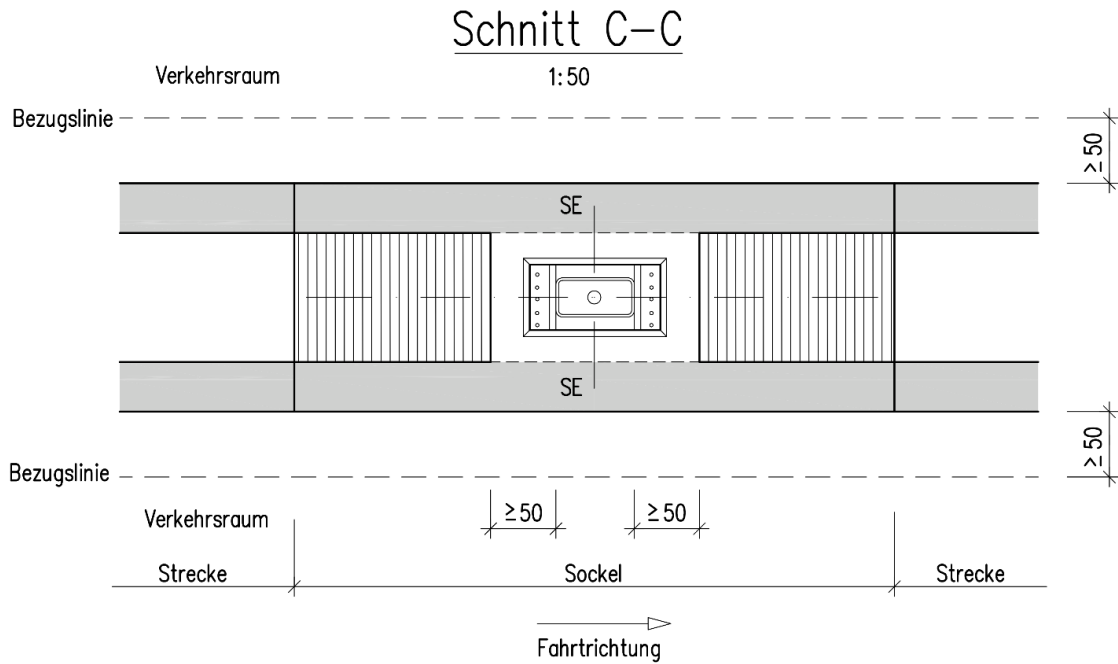


Abbildung 5 – Auszug aus Richtzeichnung „VZB 5“ [4], Draufsicht auf den Anprallsöckel

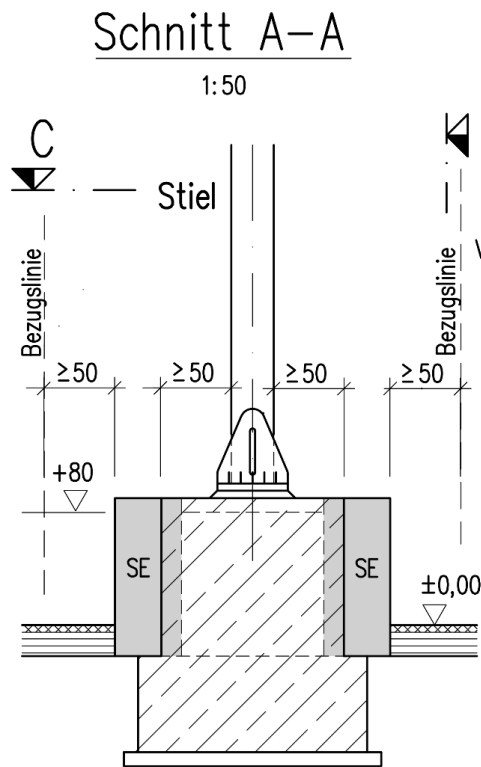


Abbildung 6 – Auszug aus Richtzeichnung „VZB 5“ [4], Seitenansicht auf den Anprallsöckel

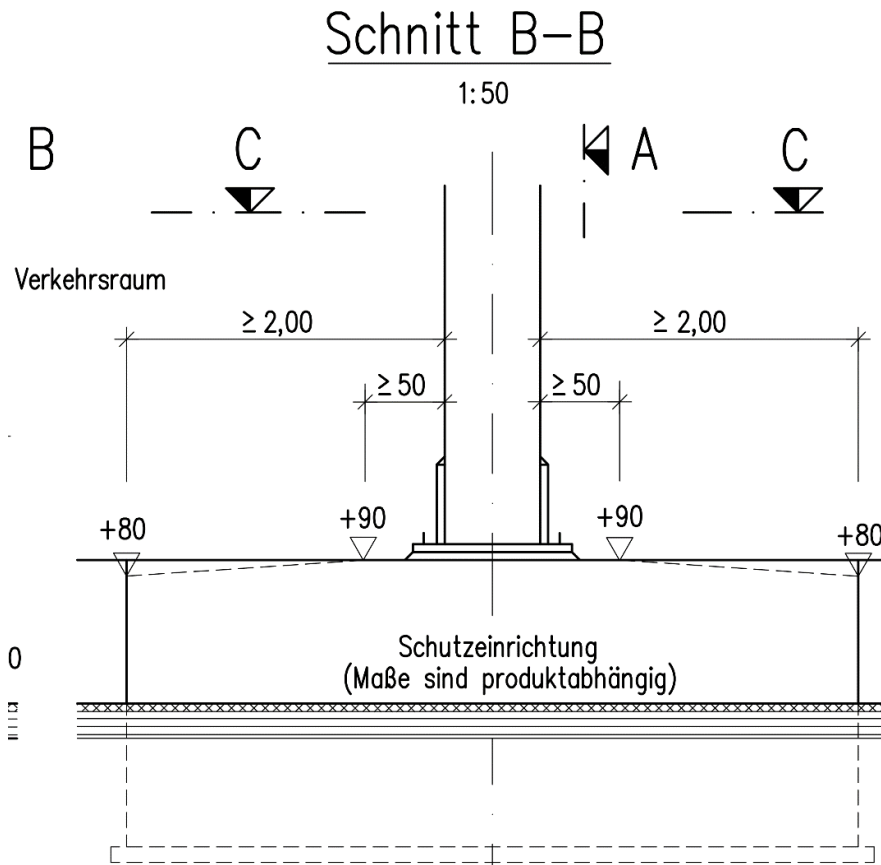


Abbildung 7 – Auszug aus Richtzeichnung „VZB 5“ [4], Vorderansicht auf den Anprallsattel

Bei Konstruktionen gemäß „VZB 4“ und „VZB 5“ der RIZ-ING [6] sind gemäß den Angaben in der RIZ-ING [6] keine weiteren Maßnahmen für Fahrzeuganprall erforderlich. Es sind damit keine Anpralllasten bei der Bemessung der Anprallsattel zu berücksichtigen.

Für die Stiele selbst der Verkehrszeichenbrücken sind die Anpralllasten gemäß ZTV-ING [4], Teil 9, Abschnitt 6.7, mit einer Ersatzlast von 100 kN in einer Höhe von 1,25 m über OK Straße im Zuge der statischen Berechnung zu berücksichtigen.

Bei Straßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit von $v_{zul} \leq 50$ km/h kann auf einen Anprallsattel verzichtet werden. Diese Konstruktionen sind in der Richtzeichnung „VZB 2“ der RIZ-ING [6] geregelt. Siehe hierzu die nachfolgende Abbildung 8.

Stiel der Tragkonstruktion ohne Schutzeinrichtung

Grundlage: ZTV-ING 9-1

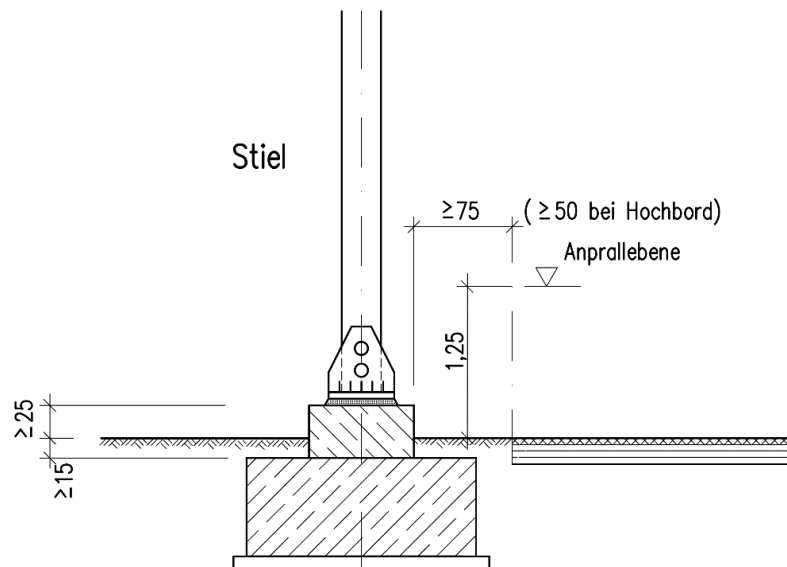


Abbildung 8 – Auszug aus Richtzeichnung „VZB 4“ [4], Verkehrszeichenbrücke ohne Anprallsokkel

Gemäß den Angaben in der ZTV-ING [4] sowie in der RIZ-ING [6] sind die Anprallsokkel gemäß den Regelungen in der DIN EN 1991-1-7 [7] zu konstruieren. Der Teil 1-7 des Eurocode 1 [1] behandelt Außergewöhnliche Einwirkungen. Im Abschnitt 4.3 – Außergewöhnliche Einwirkungen aus dem Anprall von Straßenfahrzeugen sind in Tabelle 4.1 die statischen Anprallkräfte aus Straßenverkehr auf Stützkonstruktionen von Tragwerken aufgeführt. Siehe hierzu die nachfolgende Abbildung 9 für Unterbauten und Abbildung 10 für Überbauten.

Im Nationalen Anhang zu DIN EN 1991-1-7/NA [1] werden für Deutschland die Einwirkungen für die Unterbauten von Brückenbauwerken um 50% erhöht.

Tabelle 4.1 — Anhaltswerte für äquivalente statische Anprallkräfte aus Straßenverkehr auf Stützkonstruktionen von Tragwerken an und über Straßenverkehrswegen

Kategorie	Kraft F_{dx}^a kN	Kraft F_{dy}^a kN
Autobahnen und Bundesstraßen	1 000	500
Landstraßen außerhalb von Ortschaften	750	375
Innerstädtische Straßen	500	250
Privatstraßen und Parkgaragen für:		
— Pkws	50	25
— Lkws ^b	150	75
^a x = in Fahrtrichtung, y = quer zur Fahrtrichtung. ^b Lkws mit Leergewicht größer als 3,5 t.		

Abbildung 9 – Auszug aus DIN EN 1991-1-7 [7], Anprall auf Unterbauten

Tabelle 4.2 — Anhaltswerte für äquivalente statische Anprallkräfte auf Überbauten

Kategorie	Äquivalente statische Ersatzkraft F_{dx}^a kN
Autobahnen und Bundesstraßen	500
Landstraßen außerhalb von Ortschaften	375
Innerstädtische Straßen	250
Privatstraßen und Parkgaragen	75
^a x = in Fahrtrichtung	

Abbildung 10 – Auszug aus DIN EN 1991-1-7 [7], Anprall auf Überbauten

NDP zu 4.3.1(1), Anmerkung 1: Bemessungswerte für Fahrzeuganpralllasten

Sind stützende Bauteile (z. B. Pfeiler, tragende Stützen, Rahmenstiele, Wände, Endstäbe von Fachwerkträgern oder dergleichen) für Anprall von Kraftfahrzeugen zu bemessen, so sind die in Tabelle NA.2–4.1 angegebenen statisch äquivalenten Anprallkräfte anzusetzen.

Tabelle NA.2–4.1 — Statisch äquivalente Anprallkräfte aus Straßenfahrzeugen

	1	2	3
Kategorie	Statisch äquivalente Anprallkraft in MN		
	F_{dx} in Fahrtrichtung	F_{dy} rechtwinklig zur Fahrtrichtung	
1	Straßen außerorts	1,5	0,75
2	Straßen innerorts bei $v \geq 50$ km/h ^a	1,0	0,5
	Straßen innerorts bei $v < 50$ km/h ^{a,b}		
3	— an ausspringenden Gebäudeecken	0,5	0,5
4	— in allen anderen Fällen	0,25	0,25
5	Für Lkw befahrbare Verkehrsflächen (z. B. Hofräume) bzw. Gebäude mit Pkw-Verkehr > 30 kN	0,1	0,1
6	Für Pkw befahrbare Verkehrsflächen	0,050	0,025
7	— bei Geschwindigkeitsbeschränkung für $v \leq 10$ km/h	0,015	0,008
8	Tankstellenüberdachungen ^{b,c}	0,1	0,1
	Parkgaragen für Pkw ≤ 30 kN ^b		
9	— Einzel-/Doppel-Garage, Carports	0,01	0,01
10	— in allen anderen Fällen	0,04	0,025

^a Nur anzusetzen, wenn stützende Bauteile der unmittelbaren Gefahr des Anpralls von Straßenfahrzeugen ausgesetzt sind, d. h. im Allgemeinen im Abstand von weniger als 1 m von der Bordschwelle.

^b Nur anzusetzen, wenn bei Ausfall der stützenden Bauteile die Standsicherheit von Gebäude/Überdachung/Decke gefährdet ist.

^c Nur anzusetzen, wenn die stützenden Bauteile nicht am fließenden Verkehr liegen, sonst wie Zeilen 1 bis 4.

Abbildung 11 – Auszug aus DIN EN 1991-1-7/NA [1], Anprall auf Unterbauten

Gemäß den Angaben in [11] erfolgte die derzeit gültige Festlegung der Anprallkräfte, siehe Abbildung 11, auf rein theoretischer Ebene. Das Bauteilverhalten sowie die Art und Weise der Konstruktion des anprallenden Fahrzeuges fand in der Berechnung keine Berücksichtigung. Es wurde vollständig von einem harten Stoß ausgegangen. Bei der Festlegung der Höhe der Anpralllast wurde dabei eine Unfallwahrscheinlichkeit von $P = 1,0 \times 10^{-4}$ pro Jahr und km festgelegt. Gemäß [12] konnte die Unfallwahrscheinlichkeit in Deutschland, d. h. die Verkehrsunfälle auf Autobahnen pro km/Jahr, auf der Grundlage einer realen Datenerhebung mit $P = 1,4 \times 10^{-5}$ pro Jahr festgestellt werden.

Die Möglichkeit eines Schutzes der Unterbauten von Brückenbauwerken durch Fahrzeugrückhaltesysteme gemäß RPS [5] ging in die DIN EN 1991-1-7/NA [1] nicht ein.

Für Überbauten werden im Nationalen Anhang [1] keine abweichenden Regelungen gegenüber denen in der DIN EN 1991-1-7 [7] festgelegt.

Im Abschnitt 4.3.1 (1) des nationalen Anhanges werden konstruktive Hinweise für die Ausführung von Betonsockeln aufgeführt.

NCI zu 4.3.1(1), Anmerkung 1: Bemessungswerte für Fahrzeuganpralllasten

Die statisch äquivalenten Anprallkräfte dürfen abweichend von Tabelle NA.2–4.1 festgelegt werden:

- anhand von zuvor durchgeführten Risikostudien,
- wenn genauere Untersuchungen über die Interaktionen zwischen anprallendem Fahrzeug und angefahrenem Bauteil durchgeführt werden, z. B. durch elastisch-plastisches Verhalten des Bauteils.

Die Stützen und Pfeiler von Straßen- bzw. Eisenbahnbrücken über Straßen sind zusätzlich zur Bemessung auf Anprall von Kraftfahrzeugen durch besondere Maßnahmen zu sichern. Als besondere Maßnahmen gelten abweisende Leiteinrichtungen, die in mindestens 1 m Abstand von den zu schützenden Bauteilen vorzusehen sind, oder Betonsockel unter den zu schützenden Bauteilen, die mindestens 0,8 m hoch sind und parallel zur Fahrtrichtung mindestens 2 m und rechtwinklig dazu mindestens 0,5 m über die Außenkante dieser Bauteile hinausragen.

Abbildung 12 – Auszug aus NA zu DIN EN 1991-1-7 [1], Angaben für die konstruktive Ausbildung von Anprallsöckeln

Diese Vorgaben für die konstruktive Durchbildung der Anprallsöckel sind in den jeweiligen Richtzeichnungen für die Anprallsöckel „VZB 4“ und „VZB 5“ übernommen.

Gemäß den Angaben im NCI, siehe Abbildung 12, sind die Unterbauten von Straßen- und Eisenbahnbrücken zusätzlich zur Bemessung auf Anprall von Kraftfahrzeugen durch besondere Maßnahmen zu schützen. Auf Verkehrszeichenbrücken wird nicht explizit eingegangen. In der derzeitigen Praxis werden Verkehrszeichenbrücken auf Anprall von Kraftfahrzeugen bemessen sowie zusätzlich durch besondere Maßnahmen, wie z. B. Anprallsöckel und Fahrzeugrückhaltesysteme, geschützt.

Die Anpralllasten an Verkehrszeichenbrücken werden dabei allerdings nicht nach Tabelle NA.2-4.1 [1] gewählt, sondern gemäß ZTV-ING [4] mit 100 kN in 1,25 m Höhe über OK Straße (siehe auch Abbildung 1). Der Anprallsöckel selbst ist nicht mit einer Anpralllast zu bemessen. Der Nationale Anhang lässt nun zu, dass die in Tabelle NA 2-4.1 aufgeführten statisch äquivalenten Anprallkräfte abweichend festgelegt werden dürfen, wenn Risikostudien und genauere Untersuchungen über die Interaktion zwischen anprallendem Fahrzeug und angefahrenem Bauteil durchgeführt werden. Diese Untersuchungen werden im Rahmen des Forschungsvorhabens geführt, siehe hierzu die nachfolgenden Kapitel. Das nationale Anwendungsdokument gibt zudem an, dass die zusätzlich die Regelungen und Festlegung der Richtlinie für passive Schutzvorrichtungen an Straßen (RPS) [5] gelten.

In den RPS [5] sind die Einsatzkriterien und einsatzspezifischen Anforderungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme geregelt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens soll für die durchzuführenden Untersuchungen von einer Aufhaltstufe H4b gemäß Tabelle 1 der RPS [5] des Fahrzeug-Rückhaltesystems vor den Verkehrszeichenbrücken ausgegangen werden.

Gemäß Abschnitt 3.4.1.1 der RPS ist z. B. bei einem Mittelstreifen von zweibahnigen Straßen mit $v_{zul} > 50$ km/h in Bereichen mit einer erhöhten Abkommenswahrscheinlichkeit für LKW und einem DTV(SV) > 30000 die Aufhaltstufe H4b vorzusehen.

Die DIN EN 1317-1, Rückhaltesystem an Straßen – Teil 1 Terminologie und allgemeine Kriterien für Prüfverfahren [13] definiert die Rückhaltesystem an Straßen und legt die Fahrzeuge fest, die für Anprallprüfungen eingesetzt werden.

In Tabelle 1 der DIN EN 1317-1 [13] sind die Fahrzeuge festgelegt, die für die Prüfungen von Fahrzeug – Rückhaltesystemen herangezogen werden.

Tabelle 1 – Festlegungen für Fahrzeug für die Prüfung von Fahrzeug-Rückhaltesystemen, entnommen aus DIN EN 1317-1 [14]

Masse kg ±								
Gesamtprüfmasse	900 ± 40	1 300 ± 65	1 500 ± 75	10 000 ± 300	13 000 ± 400	16 000 ± 500	30 000 ± 900	38 000 ± 1 100
Prüf-Trägheits- masse ^a	825 ± 40	1 300 ± 65	1 500 ± 75	10 000 ± 300	13 000 ± 400	16 000 ± 500	30 000 ± 900	38 000 ± 1 100
Einschließlich Höchstballast ^b	100	160	180	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
ATD eingebaut	78 ± 4	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich
Maße m (Grenzabweichung ± 15 %)								
Radspur (vorne und hinten)	1,35	1,40	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Radradius (unbelastet)	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	0,46	0,52	0,52	0,55	0,55
Radstand (zwischen den äußersten Achsen)	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	4,60	6,50	5,90	6,70	11,25
Lage des Masse- schwerpunkts^{c,d} m								
Längsabstand von der Vorderachse (CGX) ± 10 %	0,90	1,10	1,24	2,70	3,80	3,10	4,14	6,20
Seitlicher Abstand von der Fahrzeug- mittellinie (CGY)	± 0,07	± 0,07	± 0,08	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10	± 0,10
Höhe über dem Boden (CGZ):								
Fahrzeugmasse (± 10 %)	0,49	0,53	0,53	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
Last (+15 %, -5 %)	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar	1,50	1,40	1,60	1,90	1,90
Fahrzeugart	PKW	PKW	PKW	LKW ohne Anhänger	Bus	LKW ohne Anhänger	LKW ohne Anhänger	Sattelzug
Anzahl der Achsen ^e	1 S + 1	1 S + 1	1 S + 1	1 S + 1	1 S + 1	1 S + 1/2	2 S + 2	1 S + 3/4
^a	Bei Lastkraftwagen (HGV): einschließlich Last.							
^b	Einschließlich Mess- und Aufzeichnungseinrichtungen.							
^c	Die Lage des Masseschwerpunkts des Fahrzeugs muss bestimmt werden, wenn sich im PKW kein ATD befindet.							
^d	Die Lage des Masseschwerpunkts eines zweiachsigen Fahrzeugs muss nach ISO 10392 bestimmt werden.							
^e	S: Lenkachse							

In der DIN EN 1317-2, Rückhaltesysteme an Straßen – Teil 2: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Schutzeinrichtungen und Fahrzeugbrüstungen, [9], sind die Kriterien wie Anprallgeschwindigkeit, Anprallwinkel, Gesamtprüfmasse für Anprallprüfungen von Fahrzeugen geregelt. Die nachfolgende Tabelle 2 zeigt die Zuordnung von Fahrzeugart zur Prüfungsstufe.

Tabelle 2 – Festlegungen für Fahrzeug für die Prüfung von Fahrzeug-Rückhaltesysteme, entnommen aus DIN EN 1317-2 [15], Tabelle 1

Prüfung	Anprallgeschwindigkeit km/h	Anprallwinkel Grad	Gesamtprüfmasse kg	Fahrzeugart
TB 11	100	20	900	Personenkraftwagen
TB 21	80	8	1 300	Personenkraftwagen
TB 22	80	15	1 300	Personenkraftwagen
TB 31	80	20	1 500	Personenkraftwagen
TB 32	110	20	1 500	Personenkraftwagen
TB 41	70	8	10 000	Lastkraftwagen
TB 42	70	15	10 000	Lastkraftwagen
TB 51	70	20	13 000	Bus
TB 61	80	20	16 000	Lastkraftwagen
TB 71	65	20	30 000	Lastkraftwagen
TB 81	65	20	38 000	Sattelzug

In Tabelle 2 der DIN EN 1317, Teil 2, [9] wird geregelt, welche Abnahmeprüfung für welche Aufhaltestufe erforderlich ist. So ist z. B. für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens betrachtete Aufhaltestufe mit sehr hohem Rückhaltevermögen H4b eine Abnahmeprüfung TB 81 und TB 11 erforderlich.

Tabelle 3 - Zuordnung von Aufhaltestufe für das Fahrzeug-Rückhaltesystem mit erforderlicher Abnahmeprüfung entnommen aus DIN EN 1317-2 [15], Tabelle 2

Aufhaltestufen			Abnahmeprüfung
Rückhaltevermögen bei geringem Anprallwinkel	T1		TB 21
	T2		TB 22
	T3		TB 41 und TB 21
Normales Rückhaltevermögen	N1		TB 31
	N2		TB 32 und TB 11
Höheres Rückhaltevermögen	H1		TB 42 und TB 11
	L1		TB 42 und TB32 und TB 11
	H2		TB 51 und TB 11
	L2		TB 51 und TB32 und TB 11
	H3		TB 61 und TB 11
	L3		TB 61 und TB32 und TB 11
Sehr hohes Rückhaltevermögen	H4a H4b		TB 71 und TB 11 TB 81 und TB 11
	L4a L4b		TB 71 und TB32 und TB 11 TB 81 und TB32 und TB 11
ANMERKUNG 1 Aufhaltestufen mit geringem Anprallwinkel sind nur für vorübergehende Schutzeinrichtungen vorgesehen. Vorübergehende Schutzeinrichtungen können auch für höheres Rückhaltevermögen geprüft werden.			
ANMERKUNG 2 Eine bei einer gegebenen Aufhaltestufe erfolgreich geprüfte Schutzeinrichtung ist als Einrichtung anzusehen, die auch die Prüfbedingung der niedrigeren Gruppe erfüllt hat, wobei N1 und N2 jedoch nicht T3 umfassen, die H-Stufen nicht die L-Stufen und H1, ..., H4b nicht N2 umfassen.			
ANMERKUNG 3 Da die Prüfung und Entwicklung von Schutzeinrichtungen mit sehr hohem Rückhaltevermögen in verschiedenen Ländern unter Verwendung sehr unterschiedlicher Typen von schweren Fahrzeugen stattgefunden hat, sind in dieser Norm gegenwärtig die beiden Prüfungen TB 71 und TB 81 angegeben. Die beiden Stufen des Rückhaltevermögens H4a und H4b sollten nicht als äquivalent angesehen werden, und zwischen ihnen besteht keine hierarchische Ordnung. Das gleiche gilt für die beiden Aufhaltestufen L4a und L4b.			
ANMERKUNG 4 Die Leistung der Aufhaltelassen L wird im Vergleich zu den entsprechenden Klassen H durch die Ergänzung von Prüfung TB 32 erhöht.			

Die Tabelle 2 und Tabelle 3 zeigen, dass für ein Fahrzeug-Rückhaltesystem der Aufhaltstufe H4b folgendes Fahrzeug für die Anprallprüfung erforderlich ist.

Fahrzeugart: Sattelzug
Gesamtprüfmasse: 38000 kg
Anprallgeschwindigkeit: 65 km/h [$\cong 65 \text{ km/h} / 3,6 = 18,06 \text{ m/s}$]
Anprallwinkel: 20 Grad

In der Einsatzempfehlung für Fahrzeug-Rückhaltesysteme der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde die kinetische Anprallenergie und die theoretische Durchschnittskraft gemäß DIN 1317-1 [13] ausgewertet (siehe Tabelle 4). Die Durchbiegung auf der dem Verkehr zugewandten Seite beinhaltet dabei die Verformung d. h. die Verschiebung der Schutzeinrichtung.

Tabelle 4 – Durchschnittskraft aufgrund der Kinematik gemäß DIN 1317-1 [14] entnommen aus Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen [1], Tabelle B.1

Aufhaltestufe	Kinetische Energie [kJ]	Durchbiegung auf der dem Verkehr zugekehrten Seite [m]					
		0,1	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
		Durchschnittskraft \bar{F} [kN]					
T1	6,2	16,8	9,3	5,8	4,2	3,3	2,7
T2	21,5	36,5	24,2	16,7	12,7	10,3	8,6
T3	36,6	46,7	33,8	24,7	19,4	16,0	13,6
N1	43,3	59,2	42,0	30,3	23,7	19,4	16,5
N2	81,9	112,0	79,4	57,2	44,7	36,7	31,1
H1	126,6	93,6	76,6	61,7	51,6	44,4	38,9
H2	287,5	133,0	116,8	100,4	88,1	78,5	70,8
H3	462,1	266,4	227,1	189,8	163,0	142,9	127,1
H4a	572,0	311,3	267,6	225,4	194,7	171,4	153,1
H4b	724,6	269,1	242,1	213,6	191,1	172,8	157,8

2.1.2 Internationale Normung

In der Tabelle 5 sind die für die Planung und Konstruktion von Verkehrszeichenbrücken geltenden Regelwerke im In- und Ausland aufgelistet. Es zeigt sich, dass für die genannten Länder ähnliche Regelungen wie in Deutschland herrschen, wobei die Verwendung des Eurocodes [7] in allen genannten Fällen im Vordergrund steht. In Deutschland gibt es die zusätzlichen Regelungen in Hinblick auf die Ausbildung der Anprallsokkel an Verkehrszeichenbrücken.

Tabelle 5 – Normenüberblick im In- und Ausland aus [12]

Land	Norm
Deutschland	<ul style="list-style-type: none"> • ZTV-ING Teil 9 Abschnitt 1 [4] • DIN EN 1991-1-7 [7], [1] • DIN EN 12767 [14]
Österreich	<ul style="list-style-type: none"> • ÖNORM EN 12767: 2013 10 15 • ÖNORM EN 1991-1-7: 2014 09 01 • RVS 13.03.51/13.04.31 Wegweiserbrücken
Frankreich	<ul style="list-style-type: none"> • XP P98-550-1 • NF EN 12767 • NF EN 1991-1-7
Schweiz	<ul style="list-style-type: none"> • SN EN 12767
Großbritannien	<ul style="list-style-type: none"> • BS EN 12767 • BS EN 1991-1-7 • NA to BS EN 1991-1-7: 2006

Im Forschungsvorhaben „Anprallbemessung von Brückenunterbauten für Neubau- und Bestandsbauwerke“, FE 15.0557/2012/FRB, [12] wurde eine umfangreiche Literaturrecherche in Hinblick auf die statischen Anprallkräfte an Brückenunterbauten im internationalen Vergleich durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis der Literaturrecherche.

Die Tabelle 6 zeigt die deutlichen Unterschiede bei der Höhe der statischen Ersatzanpralllast. So ist z. B. in Südafrika eine Ersatzkraft von 375 kN zu berücksichtigen, wogegen die restlichen Länder Anprallkräfte größer 1500 kN wählen. Die Literaturrecherche in [12] hat zudem ergeben, dass in den Jahren 1995 bis 2014 in Deutschland keine signifikanten Schäden an Brückenunterbauten in Hinblick auf Anprallereignisse entstanden waren. Durch den Schutz der Konstruktionen durch passive Schutzeinrichtungen, d. h. durch Fahrzeugrückhaltesysteme, ist diese Sicherheit gegeben.

Eine Unterscheidung der in Tabelle 6 angegebenen statischen Ersatzanpralllasten in Hinblick auf die Bauwerksart, z. B. Unterbauten von Brückenbauwerken oder Anprall an Verkehrszeichenbrücken wurde in den jeweiligen Ländern nicht vorgenommen. Verkehrszeichenbrücken werden auch hier, so wie in Deutschland, nicht extra erwähnt.

Tabelle 6 - Äquivalente statische Anprallkräfte im internationalen Vergleich entnommen aus [12]

Nation	Normbezeichnung	Statische Ersatzanpralllast [kN]
Australien	AS 5100, CI 10.2; 2014	2000
Neuseeland	NZTA	2000
Südafrika	SA:TMH7 CI 3.7.5	375
USA	AASHTO LRFD 3.6.5.2; 2014	1800
United Kingdom	NA to BS EN 1991-1-7; 2006	2250*
Schweiz	SIA 261; 2005	1500*
Deutschland	DIN EN 1991-1-7/NA:2010-12	1500

*Abminderung und Vergrößerung in Abhängigkeit wesentlicher Einflussparameter möglich

2.2 Dynamische Grundlagen zum Stoß

Grundsätzlich können zwei Stoßarten unterschieden werden: (1) der sogenannte Anprallstoß einer Masse, z. B. aus Fahrzeuganprall, und (2) der Kraft- und Versetzungsstoß verursacht durch eine Explosion oder ein Erdbeben [8]. Im Rahmen des Forschungsvorhabens in Hinblick auf den Anprall von Fahrzeugen an Verkehrszeichenbrücken wird nur auf den Anprallstoß einer Masse eingegangen.

2.2.1 Ideal-elastischer und ideal-plastischer Stoß

Liegt die Stoßbeanspruchung zweier Objekte in beiden Körpern im rein elastischen Bereich, spricht man von einem ideal-elastischen Stoß. In diesem Fall wird die gesamte Bewegungsenergie beim Stoß kurzfristig in elastische Formänderungsenergie umgewandelt, um dann wieder voll in Bewegungsenergie zurückgewandelt zu werden.

Bei einem ideal-plastischen Stoß wird die Bewegungsenergie einmal in Formänderungsenergie umgewandelt und dann nicht mehr restituiert.

In der Realität sind Stöße immer eine Mischung von beiden. Inwieweit es sich um einen elastischen, bzw. plastischen Stoß handelt, wird mit der Stoßzahl ϵ beziffert, auch Stoßziffer oder Restitutionszahl genannt. Diese berechnet sich aus dem Verhältnis von Restitutionsimpuls I_R und Stoßimpuls I_S . Bei einem ideal-elastischen ist die Stoßzahl 1, bei einem ideal-plastischen Stoß entsprechend 0 (vgl. [8] [15]).

$$\epsilon = \frac{I_R}{I_S} \quad (1)$$

2.2.2 Harter und weicher Stoß

Zusätzlich zum elastischen und plastischen Stoß kann zwischen hartem und weichem Stoß differenziert werden. Das Unterscheidungsmerkmal liegt hierbei in der Steifigkeitsdifferenz der Stoßobjekte [8]: (1) Ist die aufprallende Masse unendlich steif, bzw. deren Verformung sehr gering, spricht man von einem harten Stoß (z. B.: Anprall eines Gabelstaplers an eine filigrane Stahlhallenstütze [16] [17] [18]). (2) Fährt hingegen ein Fahrzeug gegen ein sehr massives Widerlager einer Brücke, wird der Großteil der kinetischen Energie in der Knautschzone des Fahrzeuges durch Verformung dissipiert. Man spricht von einem weichen Stoß [8].

In der Realität treten Verformungen sowohl im gestoßenen als auch im stoßenden Körper auf. Im Falle von Fahrzeugrückhaltesystemen an Straßen zum Beispiel soll die kinetische Aufprallenergie zum Schutz der Insassen in der Karosserie des Fahrzeuges und durch planmäßiges Nachgeben und lokales Versagen von Pfosten und Planke dissipiert werden. Eine vollständige mechanische Beschreibung eines kombinierten harten und weichen Stoßes ist somit in der Realität sehr komplex, vgl. [19] [8] [18] [7] [1].

2.2.3 Dynamische Anprallberechnungen nach DIN EN 1991-1-7 [7]

Der informative Anhang C zur DIN EN 1991-1-7 [7] gibt alternativ zu den angegebenen statischen Ersatzlasten zwei Näherungsberechnungen an vereinfachten Bemessungsmodellen an. Diese sind in Deutschland nicht verbindlich [1].

Für den weichen Stoß an einem harten Hindernis ist die Einwirkung von der Bauwerksantwort entkoppelt. Eine Bemessung kann mit in der Norm definierten und in der Praxis gängigen statischen Ersatzlasten erfolgen. Entsprechend kann durch Gleichsetzen der kinetischen Energie der stoßenden Masse $E_{kin} = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ und die im stoßenden Körper gespeicherte Energie $E_{pot} = \frac{1}{2} k \cdot w^2$ die maximale dynamische Interaktionskraft abgeschätzt werden mit:

$$F = v_r \sqrt{km} \quad (2)$$

wobei:

- v_r die Geschwindigkeit des Objektes beim Aufprall,
- k die äquivalente elastische Steifigkeit des Anprallobjektes (d.h. Verhältnis der Kraft F zur Gesamtverformung w),
- m die Masse des Anprallobjekts ist.

Anders kann die maximale Stoßkraft ausgedrückt werden als:

$$F_{max} = \frac{m \cdot v_r^2}{w} \quad (3)$$

wobei:

- w die Gesamtverformung ist.

Die Formel (2) aus dem Anhang C des DIN EN 1991-1-7 [7] geht von einer linearen Verformung während des Anpralles aus (siehe Abbildung 14). Für einen nicht ideal-elastischen inhomogenen Körper – wie z. B. die Knautschzone eines Fahrzeugs – ist eine „äquivalente“ Steifigkeit k zu definieren, die möglichst alle Arten von geometrischen und physikalischen Nichtlinearitäten berücksichtigt. Dafür wird der deterministische Wert von 300 kN/m angegeben [7]. Die „äquivalente“ Steifigkeit k ist dabei für LKW's und PKW's identisch.

Der Anhang C erlaubt zusätzlich eine Abminderung der Anprallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Verzögerung nach dem Verlassen des Fahrstreifens und des dabei zurückgelegten Abstandes:

$$v_r = v_0 \sqrt{1 - d / (v_0^2 / 2a) \cdot \sin\varphi} \quad (4)$$

wobei:

- d der Abstand der Mittellinie des Fahrstreifens vom dem Bauteil,
- a die Verzögerung,
- φ der Winkel zwischen dem Fahrstreifen und dem Kurs des abkommenden Fahrzeugs beträgt.

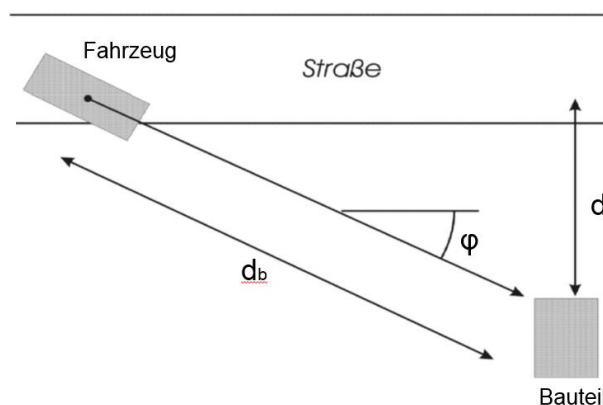


Abbildung 13 - Situationsskizze zu Fahrzeuganprall, Bild C.2 aus [7]

Tabelle 7 – Anhaltswerte für probabilistische Berechnungen und Anpralllasten, Tabelle C.1 aus [7]

Variable	Bezeichnung	Wahrscheinlichkeitsverteilung	Mittelwert	Standardabweichung
v_0	Fahrzeuggeschwindigkeit			
	— Autobahn	Lognormal	80 km/h	10 km/h
	— Stadtstraße	Lognormal	40 km/h	8 km/h
	— Einfahrt	Lognormal	15 km/h	5 km/h
	— Parkhaus	Lognormal	5 km/h	5 km/h
a	Verzögerung	Lognormal	4,0 m/s ²	1,3 m/s ²
m	Fahrzeugmasse – Lkw	Normal	20 000 kg	12 000 kg
m	Fahrzeugmasse – Pkw	—	1 500 kg	—
k	Fahrzeugsteifigkeit	Deterministisch	300 kN/m	—
φ	Winkel	Rayleigh	10°	10°

Wird der Anprall als Rechteckimpuls auf die Tragwerksoberfläche gesehen, kann die Stoßdauer berechnet werden zu:

$$F \cdot \Delta t = mv \quad (5)$$

$$\Delta t = \sqrt{m/k}$$

Kann der Anprallkörper näherungsweise mit gleichmäßigem Querschnitt und Material angenommen werden, gilt:

$$k = EA/L \quad (6)$$

$$m = \rho AL \quad (7)$$

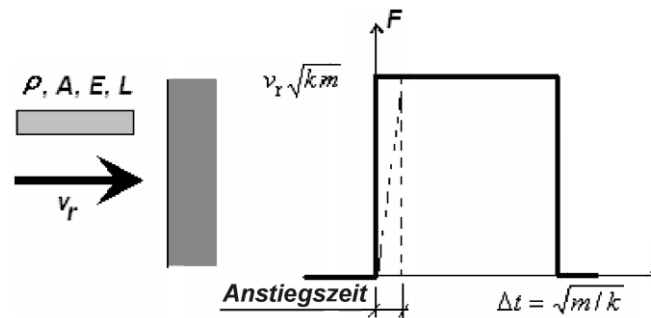
Dabei ist:

L die Länge des Anprallkörpers,

A die Querschnittsfläche,

E der E-Modul,

ρ die Massendichte des Anprallkörpers.

Abbildung 14 - Bild C.1 aus dem Anhang C - Anprall-Modell [7], F = dynamische Interaktionskraft

Im Falle eines harten Stoßes gegen ein weiches Hindernis wird das Anprallobjekt als unendlich starr angenommen. Hier empfiehlt es sich, die Duktilität des Tragwerks so einzustellen, dass die gesamte Anprallenergie absorbiert werden kann [7] [1] [17] [20]:

$$\frac{1}{2} m v_r^2 \leq F_o y_o \quad (8)$$

Dabei ist:

F_o die plastische Tragfähigkeit des Tragwerks, die Grenzkraft unter statischer Belastung,

y_o die Verformungskapazität des Tragwerks am Angriffspunkt des Stoßes.

2.2.4 Bisherige Untersuchungen zu Fahrzeuganprall

In Deutschland stehen umfangreiche, zeitgemäße und aktuelle Versuche in Hinblick auf Anprallereignisse an Bauwerken nicht zur Verfügung.

Historisch wurden Einwirkungen infolge Fahrzeuganprall in nationalen Regelungen erstmals 1934 in den Bemessungsgrundlagen für stählerne Eisenbahnbrücken (BE) erwähnt. Die Deutsche Reichsbahn sah vor, dass Stützen von stählernen Eisenbahnbrücken, die gegen Anprall nicht geschützt sind, zusätzlich für eine ruhend wirkende Ersatzlast von 100 t zu bemessen sind [21]. Eine Anpralllast, die mit 1000 kN in Fahrtrichtung auf einer Höhe von 1,20 m anzusetzen ist, findet sich durchgängig in allen Fassungen der DIN 1072 [22] ab 1944 bis 2003.

In Popp [21] wird zugrunde gelegt, dass die Anpralllast von 100 Tonnen ein geschätzter Lastwert aus der Anfangszeit der Motorisierung ist. Aus diesem Grunde wurden im Rahmen der Forschungsarbeit in [21] fünf Anprallversuche an Stahlbetonstützen durchgeführt. Das anprallende Fahrzeug wies dabei eine Masse von 18 t und eine Geschwindigkeit von 70 km/h bis 80 km/h auf. Popp [21] zeigte die Wirksamkeit einer Zerschellschicht bei Stahlbetonstützen mit einer Querschnittsdicke von 10 cm. Aus der Forschungsarbeit wurden Vorschläge für die Bewehrung anprallgefährdeter Stahlbetonstützen entwickelt, die Einzug in die teils bis heute gültigen Normen gefunden haben. Zudem wurde gezeigt, dass unter Berücksichtigung einer solchen Zerschellschicht die Anprallkräfte in einer Höhe von 1000 kN abgetragen werden können.

Internationale Forschungen in Hinblick auf die Untersuchung der Tragfähigkeit anprallgefährdeter Stützen sind in [12] aufgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten führten zu den in Tabelle 6 aufgeführten statischen Ersatzlasten für Anprallereignisse.

Forschungsarbeiten für den Fahrzeuganprall an Verkehrszeichenbrücken sind trotz intensiver Recherche nicht bekannt. Die aktuellen Anprallversuche im Zusammenhang mit der RPS [5] in Hinblick auf den Anprall an Fahrzeugrückhaltesysteme wurden analysiert, können jedoch für den Anprall an Verkehrszeichenbrücken nicht herangezogen werden.

3. Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken

3.1 Anfragen bei Behörden

Um die Auftretenswahrscheinlichkeit eines Fahrzeuganpralls an Verkehrszeichenbrücken sowie die Schadensfolgen abschätzen zu können, wurden bei verschiedenen Behörden Anfragen in Hinblick auf die Unfallereignisse gestellt.

Folgende Behörden wurden kontaktiert:

- Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
- Autobahndirektion Südbayern
- Autobahndirektion Nordbayern
- Landesstraßenbaubehörde Sachsen-Anhalt
- Autobahnmeisterei Freiburg
- Autobahnmeisterei Karlsruhe
- Autobahnmeisterei Ludwigsburg
- Autobahnmeisterei Ulm
- Autobahnmeisterei Wangen
- Autobahnmeisterei Heidenheim
- Autobahnmeisterei Kirchheim
- Autobahnmeisterei Mannheim
- Autobahnmeisterei Herrenberg
- Autobahnmeisterei Walldorf
- Autobahnmeisterei Rottweil

Von der Autobahndirektion Südbayern, Verkehrsrechenzentrale, wurden die Unfalldaten an Verkehrszeichenbrücken der letzten vier Jahre zur Verfügung gestellt. Die Autobahndirektion Nordbayern konnte auf Daten der letzten 15 Jahre zurückgreifen. Zudem konnten Angaben zu Unfallereignissen von den Autobahnmeistereien Ludwigsburg, Wangen im Allgäu, Herrenberg, Rottweil und Freiburg gemacht werden.

3.2 Auswertung der Schadensfälle

Folgende Daten konnten zur Verfügung gestellt und ausgewertet werden:

Autobahnmeisterei Ludwigsburg:

- keine Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken
- Zeitraum: wurde nicht bekanntgegeben
- betreutes Fernstraßennetz in km: derzeit nicht bekannt

Autobahnmeisterei Wangen im Allgäu:

- keine Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken
- Zeitraum: wurde nicht bekanntgegeben
- betreutes Fernstraßennetz in km: 56 km (je Richtungsfahrbahn)

Autobahnmeisterei Herrenberg:

- keine Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken
- Zeitraum: wurde nicht bekanntgegeben
- betreutes Fernstraßennetz in km: 90 km (je Richtungsfahrbahn)

Autobahnmeisterei Rottweil:

- keine Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken
- Zeitraum: seit 1995 (Dienstantritt des Dienststellenleiters Herrn Hans Dieter Wölk)
- betreutes Fernstraßennetz in km: 74 km (je Richtungsfahrbahn)

Autobahnmeisterei Ulm:

- keine Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken
- Zeitraum: seit 1996 (Dienstantritt des Dienststellenleiters Herrn Hans Dieter Wölk)
- betreutes Fernstraßennetz in km: 70 km (je Richtungsfahrbahn)

Autobahnmeisterei Freiburg:

- keine Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken
- Zeitraum: seit 15 Jahren
- betreutes Fernstraßennetz in km: derzeit nicht bekannt

Autobahndirektion Südbayern:

- 8 Unfallereignisse
- Zeitraum: Dezember 2012 bis Dezember 2015
 - 2015: 4 Unfälle
 - 2014: 3 Unfälle
 - 2013: 0 Unfälle
 - 2012: 1 Unfall
- 5 Anprallereignisse an Rahmenstiel
- 2 Anprallereignisse an Rahmenriegel (2 davon Baustellen – LKW)
- betreutes Fernstraßennetz in km: ca. 900 km je Richtungsfahrbahn

Autobahndirektion Nordbayern:

- 23 Unfallereignisse
- Zeitraum: Dezember 2003 bis Dezember 2017
 - 2003: 1 Unfall
 - 2004: 0 Unfälle
 - 2005: 1 Unfall
 - 2006: 0 Unfälle
 - 2007: 0 Unfälle
 - 2008: 0 Unfälle
 - 2009: 2 Unfälle
 - 2010: 1 Unfall
 - 2011: 4 Unfälle
 - 2012: 1 Unfall
 - 2013: 1 Unfall
 - 2014: 4 Unfälle
 - 2015: 1 Unfall
 - 2016: 4 Unfälle
 - 2017: 3 Unfälle
- 11 Anprallereignisse an Rahmenstiel
- 12 Anprallereignisse an Rahmenriegel (7 davon Baustellen – LKW)

- betreutes Fernstraßennetz in km: 1316 km (bei Richtungsfahrbahnen zusammen)

Die Detailauswertung der Unfallereignisse im Zuständigkeitsbereich der Autobahndirektion Südbayern erfolgt in Tabelle 8 und der Unfallereignisse im Zuständigkeitsbereich der Autobahndirektion Nordbayern in Tabelle 9.

Die Auswertung der Anprallereignisse im Einzugsgebiet der Autobahndirektion Südbayern kann sehr detailliert erfolgen, da für die Anprallereignisse Einsicht in die Schadensgutachten genommen werden konnte. Bei den Unfalldaten der Autobahndirektion Nordbayern konnten nicht für alle Anprallereignisse detaillierte Unterlagen zur Verfügung gestellt werden.

Tabelle 8 – Auswertung der Unfalldaten der Autobahndirektion Südbayern

Unfall 1	Unfall 2	Unfall 3
		
26.12.2015	19.07.2015	31.03.2015
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A9, Fahrtri. München	BAB A94, Fahrtri. Passau	BAB A7, Fahrtri. Füssen/Reutte
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
-	Kleinbus	umgekippte Anhänger eines LKWs
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
	Stahlkon. mit Doppelriegel	VZ-Träger im Mittelstreifen
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Rahmenstiel (außen)	Rahmenstiel	unterer Bereich des Stiels
Schäden:	Schäden:	Schäden:
<p>an Schutzplanke</p> <p>Deformationen vers. Bauteile</p> <p>weitere</p>	<p>Beschädigte Anbauteile (nur Beschichtung)</p> <p>Oberflächenbeschädigung des Korrosionsschutzes</p> <p>Brandspuren (oberflächlich)</p> <p>plastische Verformung einzelner Ankerschrauben</p> <p>Abplatzungen am Unterguss</p>	<p>an Vz-Gehäuse, Befestigung des Wartungspodests</p> <p>Deformation des Querschnitts der Rundrohr-Stahlstütze</p> <p>plastisches Verformung und Zerstörung Gewinde</p> <p>vers. plastische Deformationen (insbesondere Zustiegsleiter)</p> <p>Verschiebung Fußplatte</p> <p>Verdrehung der ges. Aufbauten</p>
Instandsetzung:	Instandsetzung:	Instandsetzung:
<p>Beschichtung und Fundamentsanierung</p> <p>Erneuerung der Steigleiter (gesamt brutto: 16.929,93 €)</p>	<p>der Anbauteile, des Korrosionsschutzes, der Ankerschrauben o. Fdts.</p>	<p>der Stütze (& Befestigungspkt. des Wartungspodest) der Ankerschraube</p> <p>Korrosionsschutz der betroffenen Bauteile</p>

Unfall 4	Unfall 5	Unfall 6
		
31.03.2015	26.06.2014	23.06.2014
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A92, Fahrtri. Deggendorf	BAB A8 Ost, Fahrtri. München	BAB A9, Fahrtri. Nürnberg
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
Containerdeckel eines LKWs	Baustellen-LKW mit nicht vollständig abgesenkter Mulde	umgefallener LKW
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
Stahlkon. mit Doppelriegel	Stahlkon. mit Doppelriegel	Stahlkon. mit Doppelriegel
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Querriegel der VZB	untere Querriegel der VZB	Rahmenstiel
Schäden:	Schäden:	Schäden:
<p>Deformation des U-förmigen Blechquerschnitts, des Untergurtes und des Stegs, des Riegels am Auflagerbereich und des Stahl-Gitterrosts</p> <p>Verschiebung der horizontalen Verbindung zwischen Untergurt und Stiel</p>	<p>Deformation des Hohlprofilquerschnitts, des Untergurts und des Steges</p> <p>Anprallspuren der Mulde an unterem Querriegel</p> <p>mögliche Schäden an den Schweißnähten (ungewiss)</p>	<p>an Korrosionsschutz</p> <p>an Beschichtung des Riegels im Bereich des Anfahrtschadens (<i>die darunterliegende Zinkschicht wurde dabei nicht verletzt</i>)</p> <p>Querschnittsverformung des Stiels</p> <p><i>Ursache des Schadens: Herstellprozess des Stiels, nicht der Anprall an sich</i></p>
Instandsetzung:	Instandsetzung:	Instandsetzung:
des unteren Querriegels, & sämtl. Schraubenverbindungen, von 4 vertikalen U-Profilen zw. oberen & unteren Querriegel	des unteren Querriegels	nur Korrosionsschutz, da Standsicherheit noch geg. (Instandsetzung nur möglich, da Zinkschicht nicht verletzt)

Unfall 7	Unfall 8
	
23.05.2014	06.12.2012
Wo:	Wo:
BAB A99, Fahrtri. Lindau	BAB A8 Ost, Fahrtri. München
Fahrzeug:	Fahrzeug:
Baustellen-LKW mit Bagger ohne vollst. abgesenktem Baggerarm	-
Konstruktion:	Konstruktion:
Stahlkon. mit Doppelriegel	Stahlkon. mit Doppelriegel
Anprallstelle:	Anprallstelle:
unterer Querriegel der VZB	Rahmenstiel (Mittelstreifen)
Schäden:	Schäden:
<p>Deformation des Hohlprofilquerschnitts, insbesondere des Untergurts</p> <p>Schäden an Auflagertasche</p> <p>Risse an vertikal. Schweißnaht zw Hohlprofil des Stiels und der Auflagertasche</p> <p>sign. Verformung des Bolzens im Bolzenauflager</p> <p>Schrägstellung des unteren Riegels der Auflagertasche</p>	<p>plastische Deformationen des Hohlprofils des Stiels im unteren Bereich</p> <p>Riss in der Längsschweißnaht</p>
Instandsetzung:	Instandsetzung:
des unteren Querriegels, der Anschlussbolzen und der kompletten Auflagertasche <i>(Instands. nicht in allen Punkt. gem. ZTV-ING)</i>	des Stiels & evtl. nachträglich Verankerungskonstruktion und Fundament <i>(bis AbbauBereich Schweißnaht d. aufgeschw. Blech verstärken)</i>

Tabelle 9 – Auswertung der Unfalldaten der Autobahndirektion Nordbayern




Unfall 9	Unfall 10	Unfall 11
		
22.05.2014	07.12.2016	16.06.2016
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A93	BAB A3	BAB A9
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
Baustellen - LKW	LKW	Baustellen - LKW
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
Kragarmkonstruktion	VZ-Träger im Mittelstreifen	1-feldrige VZB
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Verkehrsschild	Schutzplanke	Verkehrsschild
Schäden:	Schäden:	Schäden:
Deformationen am Verkehrsschild	Deformationen an der Schutzplanke	Deformationen am Verkehrsschild

Tabelle 10 – Auswertung der Unfalldaten der Autobahndirektion Nordbayern



Unfall 12	Unfall 13	Unfall 14
	Kein Bild vorhanden	
22.07.2011	18.11.2003	31.05.2005
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A6	BAB A6	BAB A9
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
LKW	LKW-Brand	Keine Angaben vorhanden
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
1-feldrige VZB	Nicht bekannt	1-feldrige VZB
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Stiel		Riegel
Schäden:	Schäden:	Schäden:
LKW-Anprall an die Betonschutzwand, LKW ist anschließend gegen den Riegel gekippt	LKW-Brand	Deformationen am Riegel

Tabelle 11 – Auswertung der Unfalldaten der Autobahndirektion Nordbayern




Unfall 15	Unfall 16	Unfall 17
		
07.03.2014	28.07.2009	11.07.2016
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A3	BAB A3	BAB A3
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
LKW - Baustellenfahrzeug	LKW	LKW
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
1-feldrige VZB	1-feldrige VZB	1-feldrige VZB
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Riegel	Riegel	Riegel
Schäden:	Schäden:	Schäden:
LKW-Anprall durch Baustellenfahrzeug an den Riegel	LKW-Anprall, Deformation am Verkehrsschild	Deformationen am Verkehrsschild

Tabelle 12 – Auswertung der Unfalldaten der Autobahndirektion Nordbayern


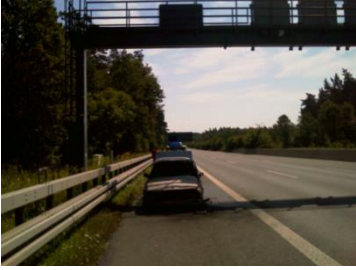

Unfall 18	Unfall 19	Unfall 20
		
07.03.2014	07.08.2009	21.09.2011
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A3	BAB A73	BAB A73
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
LKW - Baustellenfahrzeug	PKW	LKW
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
1-feldrige VZB	1-feldrige VZB	1-feldrige VZB
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Riegel	-	Schutzeinrichtung vor dem Stiel (Betonschutzwand)
Schäden:	Schäden:	Schäden:
LKW-Anprall durch Baustellenfahrzeug an den Riegel	PKW-Brand unter VZB	Anprallspuren an der Betongleit- wand

Tabelle 13 – Auswertung der Unfalldaten der Autobahndirektion Nordbayern




Unfall 19	Unfall 20	Unfall 21
		
23.08.2011	19.04.2017	06.10.2015
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A9	BAB A9	BAB A9
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
LKW	LKW	LKW (Kranwagen)
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
1-feldrige VZB	1-feldrige VZB	1-feldrige VZB
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Stiel	Schutzplanke für VZB	Riegel
Schäden:	Schäden:	Schäden:
LKW-Anprall an den Stiel. VZB musste ersetzt werden.	Deformation der Schutzplanke	Deformation am Riegel

Tabelle 14 – Auswertung der Unfalldaten der Autobahndirektion Nordbayern




Unfall 20	Unfall 21	Unfall 22
		
06.10.2015	08.12.2010	24.01.2016
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A9	BAB A9	BAB A3
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
LKW	LKW	LKW
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
1-feldrige VZB	1-feldrige VZB	1-feldrige VZB
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Stiel	Riegel	Stiel
Schäden:	Schäden:	Schäden:
LKW-Anprall an den Stiel. VZB musste ersetzt werden.	Deformation des Riegels und des Stiels	Deformation am Stiel

Tabelle 15 – Auswertung der Unfalldaten der Autobahndirektion Nordbayern







Unfall 23	Unfall 24	Unfall 25
		
22.07.2014	18.04.2017	26.09.2011
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A9	BAB A6	BAB A3
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
LKW	LKW	LKW (Baustellenverkehr)
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
1-feldrige VZB	1-feldrige VZB	1-feldrige VZB
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Stiel	Riegel	Riegel
Schäden:	Schäden:	Schäden:
LKW-Anprall an den Stiel. VZB musste ersetzt werden.	Deformation des Riegels	Deformation am Riegel

Tabelle 16 – Auswertung der Unfalldaten der Autobahndirektion Nordbayern

Unfall 26	Unfall 27	Unfall 28
		
28.11.2013	06.08.2014	18.09.2017
Wo:	Wo:	Wo:
BAB A9	BAB A9	BAB A9
Fahrzeug:	Fahrzeug:	Fahrzeug:
LKW	LKW	LKW
Konstruktion:	Konstruktion:	Konstruktion:
1-feldrige VZB	Kragarm	1-feldrige VZB
Anprallstelle:	Anprallstelle:	Anprallstelle:
Schutzplanke vor VZB und Stiel der VZB	Verkehrsschild	Stiel wurde vollständig umgefah- ren
Schäden:	Schäden:	Schäden:
Deformation der Schutzplanke und des Stiels der VZB	Deformation des Verkehrsschild- des	Vollständige VZB

Die nachfolgend aufgeführten Anprallereignisse wurden uns im Rahmen der Betreuergruppensitzung zur Verfügung gestellt. Es handelt sich hierbei um Einzelereignisse, so dass diese dann für die nachfolgende ausgeführte Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit nicht herangezogen werden können.

Anprallereignis Nr. 29:

Die nachfolgende Abbildung 15 zeigt einen LKW-Anprall an eine Verkehrszeichenbrücke aus Aluminium. Der Unfall hat auf der BAB A9 stattgefunden. Nähere Angaben liegen nicht vor. Evident ist, dass der LKW Stahlmaterial geladen hatte.



Abbildung 15 - LKW-Anprall an eine VZB aus Aluminium, BAB A9

Anprallereignis Nr. 30:

Bei dem nachfolgendem Anprallereignis konnten nur die Fotoaufnahmen zur Verfügung gestellt werden. Es handelt sich um einen Frontalanprall eines LKW's an eine Verkehrszeichenbrücke mit Anprallschale. Weitere Angaben stehen nicht zur Verfügung.



Abbildung 16 - Blick auf die plastisch verformte Stütze der Verkehrszeichenbrücke



Abbildung 17 - Detailansicht der plastischen Verformung der Stütze



Abbildung 18 - Blick auf den angeprallten LKW

Bewertung der Schadensmerkmale:

Die Auswertung der zur Verfügung gestellten Anprallereignisse zeigt, dass ein vollständiges Versagen, d. h. ein Umfahren der Verkehrszeichenbrücke nur in einem einzigen Fall erfolgt ist. In diesem Fall ist der LKW frontal in den Stiel der Verkehrszeichenbrücken gefahren und hat die Schweißnaht am Stützenfuß abgeschert. Bei dem Anprallsockel dieser Verkehrszeichenbrücke handelte es sich um eine Konstruktion gemäß RIZ-ING [6], VZB 4, aus dem Jahre 1996. Dieser Anprallsockel war deutlich kleiner als die derzeit gemäß den Richtzeichnungen erforderlichen. Der seitliche Überstand über die Stützen wurde dabei mit 40 cm vorgegeben. In den derzeit gültigen Richtzeichnungen muss der Überstand mindestens 2,0 m betragen. Zudem war in diesem Anprallereignis die Verkehrszeichenbrücke nur durch eine stählerne Schutzplanke und nicht durch eine Betonschutzwand geschützt.

Bei den restlichen Anprallereignissen handelt es sich um Anprallvorgänge, die zu einer plastischen Deformation des Stiels oder des Riegels der Verkehrszeichenbrücke führte. Dabei konnte festgestellt werden, dass das Zusammenspiel der rückhaltenden Wirkung des vorgeschalteten Fahrzeurückhaltesystems und die Energiedissipation durch den Anprallsockel funktioniert, so dass das Schadensausmaß sowohl für das anprallende Fahrzeug als auch für die Verkehrszeichenbrücke selbst deutlich gesenkt werden konnte.

Die Anprallereignisse auf den Riegel einer Verkehrszeichenbrücke haben überwiegend bei Baustellenverkehr stattgefunden. So zeigt sich, dass bei vielen Ereignissen im Baustellenbereich ein hochgefahrterer Kipper eines LKW-Anhängers die Ursache war. Im normalen Straßenverkehr sind Anprallereignisse an den Riegel von Verkehrszeichenbrücken eher selten. Da die Schilder an Verkehrszeichenbrücken ähnliche Höhen wie Überbauten von Brücken aufweisen, kann dies darauf zurückgeführt werden, dass solche Anprallereignisse auch bei der Durchfahrt unter Brücken auftreten würden und dadurch die Wahrscheinlichkeit für den Anprall an den Riegel von Verkehrszeichenbrücken deutlich gesenkt ist.

Insgesamt hat die Auswertung der Schadensereignisse gezeigt, dass die bisher gewählte Konstruktion für Verkehrszeichenbrücken im Zusammenspiel mit dem Anprallsockel und dem Fahrzeurückhaltesystem den Anprallereignissen standhält. Es handelt sich um sehr seltene Einzelereignisse, bei denen die Tragfähigkeit der Verkehrszeichenbrücke versagt und diese vollständig umgefahren wird. Wie zuvor beschrieben konnte ein solches Ereignis festgestellt werden. Hier ist jedoch festzuhalten, dass es sich dabei um eine ältere Verkehrszeichenbrücke handelte, deren Anprallsockel nicht nach den derzeit gültigen Regelwerken konstruiert und ausgelegt worden ist.

4. Risikoanalyse gemäß DIN EN 1991-1-7 [7]

4.1 Grundlagen der DIN EN 1991-1-7 [7]

Gemäß DIN EN 1991-1-7 [7] dürfen die statisch äquivalenten Anprallkräfte abweichend von Tabelle NA.2-4.1 festgelegt werden

- anhand von zuvor durchgeführten Risikostudien,
- wenn genauere Untersuchungen über die Interaktion zwischen anprallendem Fahrzeug und angefahrenen Bauteil durchgeführt werden, z. B. durch elastisch-plastisches Verhalten des Bauteils.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird sowohl eine Risikostudie als auch eine numerische Untersuchung durchgeführt, in dem das elastisch-plastische Bauteilverhalten berücksichtigt wird.

Die Risikoanalyse gemäß DIN EN 1991-1-7 [7] unterscheidet dabei zwischen einer Qualitativen Risikoanalyse und einer Quantitativen Risikoanalyse. Die nachfolgende Abbildung 19 zeigt einen Überblick über die Risikoanalyse.

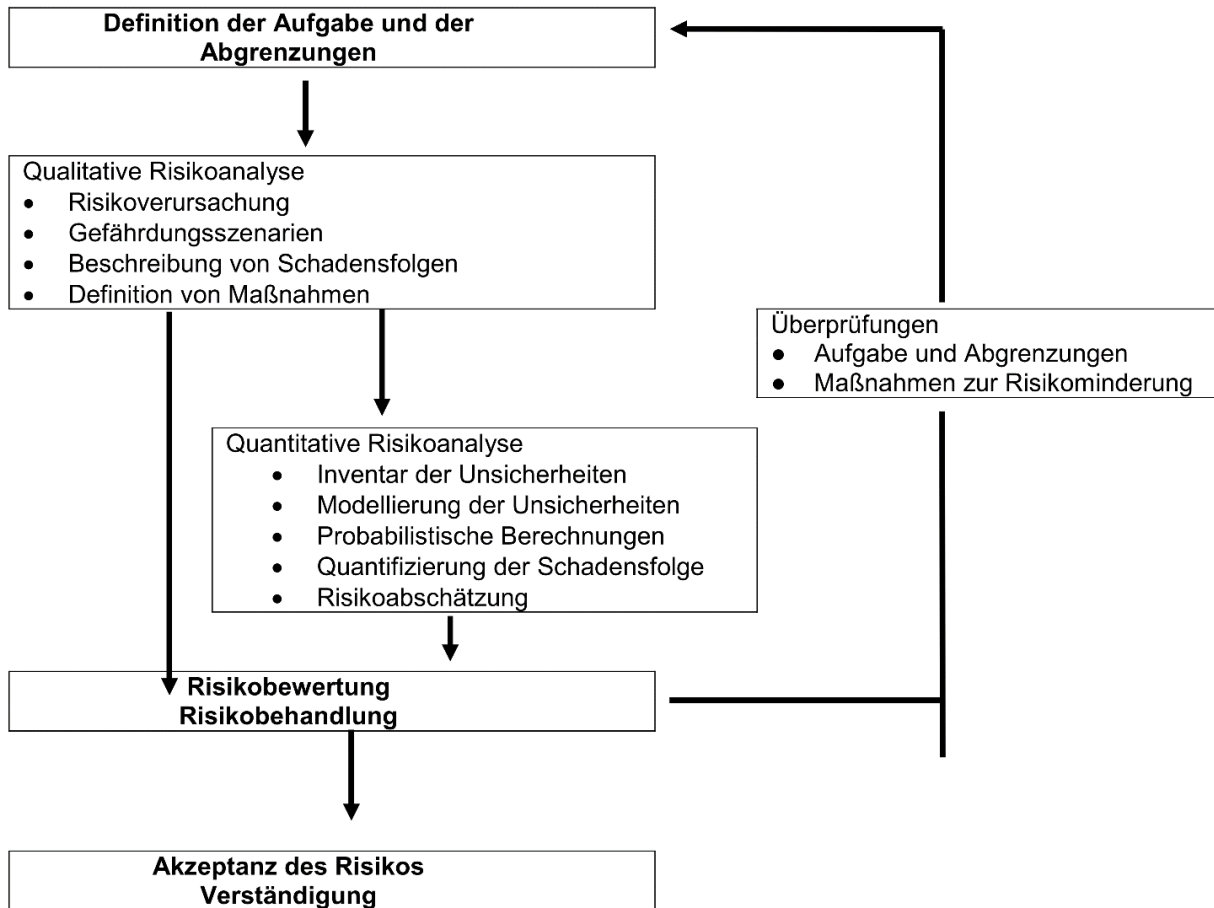


Abbildung 19 – Überblick über die Risikoanalyse gemäß DIN EN 1991-1-7 [7]

Die Risikoanalyse lässt sich auch wie folgt darstellen:



Abbildung 20 – Inhalte des Risikomanagements

Mathematisch kann das Risiko wie folgt ausgedrückt werden:

Risiko = Versagenswahrscheinlichkeit * Versagensfolgen

$$R_f = P_f * V_f \quad (1)$$

mit: R_f = Risiko
 P_f = Versagenswahrscheinlichkeit
 V_f = Versagensfolgen

Ein bestimmtes Risiko kann also entweder durch
 - eine hohe Versagenswahrscheinlichkeit mit geringen Versagensfolgen

oder

- umgekehrt durch eine geringe Versagenswahrscheinlichkeit mit hohen Folgen
 verursacht werden.

4.2 Qualitative Risikoanalyse

Gemäß DIN EN 1991-1-7 [7] sollten in dem qualitativen Teil der Risikoanalyse alle Gefährdungen und zugehörigen Gefährdungsszenarien identifiziert werden. Dies stellt dabei eine Hauptaufgabe dar.

A) Risikoverursachung und Risikoanalyse:

Um der Schadenshöhe an Personen und der Konstruktion selbst entgegenwirken zu können, ist die Ermittlung der Ursache des hier im Mittelpunkt stehenden unerwünschten Ereignisses von besonderer Bedeutung. In unserem Fall ist der Fahrzeuganprall an eine Verkehrszeichenbrücke die Ursache für die Schäden. In einer ersten Stufe wird sich zunächst mit der Risikoverursachung auseinandergesetzt.

Zur präzisen Analyse für die Erstellung aller möglichen Gefährdungsszenarien für dieses unerwünschte Ereignis wird im zweiten Schritt das detaillierte Bild eines Szenarios anhand seiner einzelnen Komponenten beschrieben. Hierzu gehören im Wesentlichen:

- Ort des Anpralls und Anprallpunkt des Fahrzeugs
- der Fahrverlauf des Fahrzeugs infolge des Anpralls
- Erfüllung der Funktion einer Leitplanke
- Lage des Fahrzeugs nach dem Anprall

Zudem sind folgende weiteren Komponenten zur Identifizierung eines Szenarios bedeutend:

- Art der beteiligten Fahrzeuge
- denkbare Folgeereignisse
- Mögliche erschwerende Begleitumstände

Die Reihung der Komponenten ergibt ein jeweiliges Szenario, welches nach eigener Abschätzung einem Gefährdungsgrad zugeordnet wird.

Die Szenarien werden getrennt für ein System ohne bzw. mit Fahrzeug-Rückhaltesystem betrachtet. So kann der Unterschied der beiden Systeme verdeutlicht und die Effizienz eines Fahrzeug-Rückhaltesystems beurteilt werden.

Für eine genauere Betrachtung werden Ereignisbäume herangezogen und diesen, neben einer Kombination verschiedener Folgeereignisse auf ein auslösendes Ereignis (in diesem Fall der primäre Anprall), auch die Höhe der Folgeschäden und ihre tatsächlichen Eintrittshäufigkeiten hinzugefügt. Die Schadensfolgen werden dabei klar definiert.

Liegen Daten von Unfallhäufigkeiten und den Versagensfolgen vor, so können diese Daten in die Ereignisbäume eingepflegt werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes lag keine ausreichende Datengrundlage vor, so dass die Ereignisbäume nicht ausgefüllt werden können. Die Erfordernis dafür ist die Kenntnis von Art und Weise des Unfallhergangs sowie die Schwere der Verletzungen der Personen bei den Anprallereignissen. Solche Daten liegen nicht vor.

B) Risikobewertung:

Nach eingehender Risikoanalyse werden die Szenarien, unabhängig von ihrer tatsächlichen Häufigkeit, nach ihrem Gefährdungsgrad bewertet, wobei bei jedem einzelnen Szenario von einer gleichen Eintrittswahrscheinlichkeit ausgegangen wird. Ziel ist es, maßgebende Szenarien herauszuarbeiten. An diese soll sich die darauffolgende Risikobehandlung orientieren. Für die Wahl der maßgebenden Szenarien wird eine Grenze gesetzt, die von Risikoakzeptanzkriterien bestimmt und vorläufig nach eigener Abschätzung festgelegt wird. Szenarien unterhalb dieser Grenze werden akzeptiert, da der Gefährdungsgrad dieser so gering ist, dass er für die Gesellschaft als akzeptabel erachtet werden kann. Szenarien, die oberhalb dieser Grenze liegen, sind nicht akzeptabel und müssen behandelt werden, da deren Gefährdungsgrad zu hoch ist.

C) Risikobehandlung und Maßnahmenplanung:

Im Rahmen der Risikobehandlung wird nun nach Lösungen für nicht akzeptierbare Szenarien gesucht, die den Gefährdungsgrad mindern oder sogar eliminieren können. Dazu müssen passende Schutzmaßnahmen ergriffen und eine der Realität nahe kommende Anpralllast definiert werden. Die verschiedenen Maßnahmen sollen der Sicherheit von Personen und Konstruktion sowie der Wirtschaftlichkeit des Gesamtsystems dienen. Dem Gefährdungspotenzial „Dritter“ (Personen, die aufgrund der Behinderung durch den primären Anprall in einem Folgeanprall verletzt oder getötet werden) kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

Zusammenfassend können die Aufgaben einer qualitativen Risikoanalyse wie folgt dargestellt werden:

- Welche Risikofaktoren können wahrgenommen werden?
- Welche Art von Risiken ergeben sich aus den einzelnen Faktoren?
- Welche Gegenmaßnahmen können durchgeführt werden?
- Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Gegenmaßnahmen erfolgreich sein werden?

Die Identifizierung aller Gefährdungen und der zugehörigen Gefährdungsszenarien ist eine Hauptaufgabe der qualitativen Risikoanalyse.

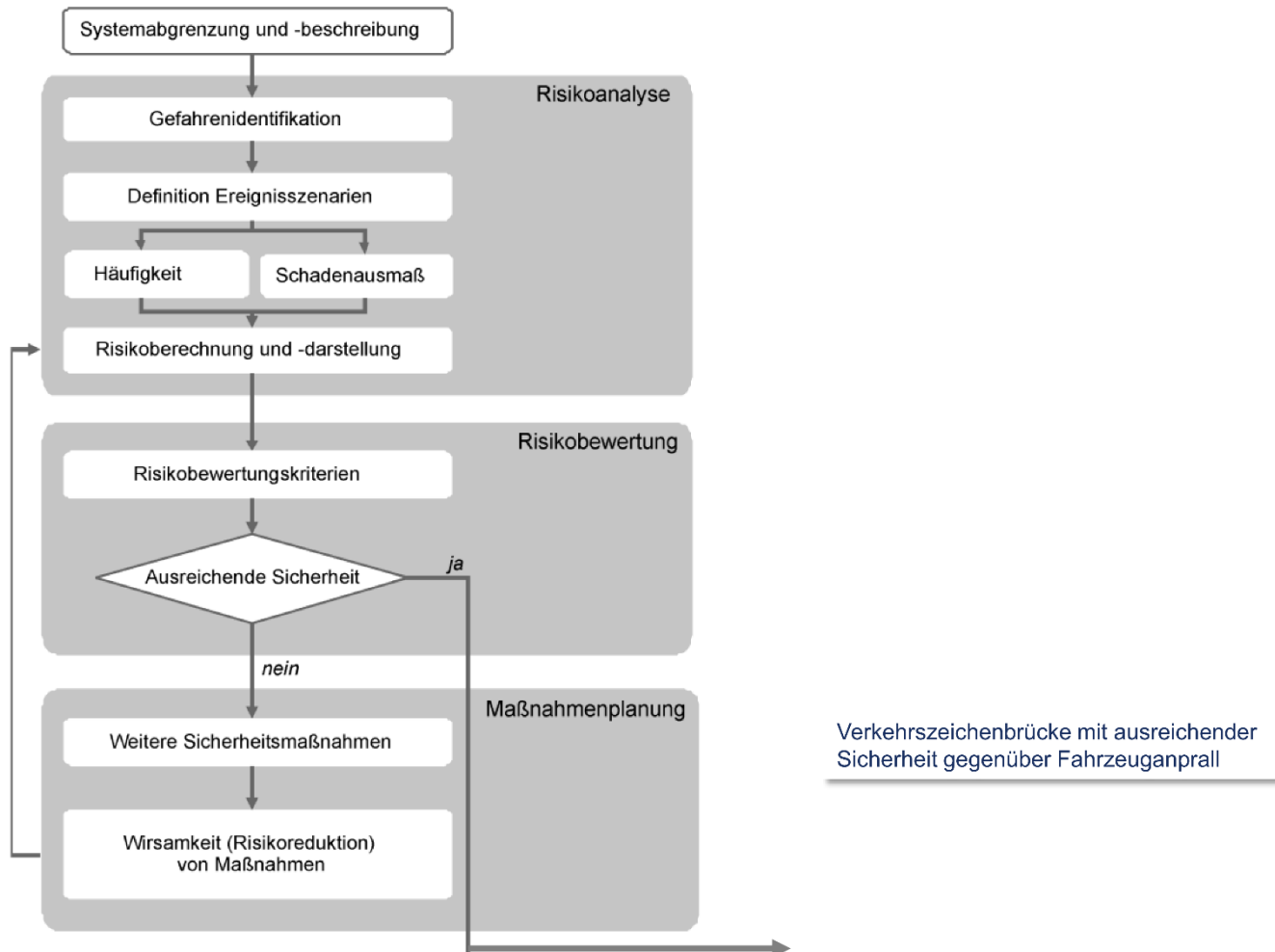


Abbildung 21 – Übersicht Risikoanalyse, entnommen aus [9] Bewertung der Sicherheit in Straßentunneln, FE 03.378/2004/FRB

4.2.1 Risikoverursachung

Ein Anprallereignis an eine Verkehrszeichenbrücke wird in den meisten Fällen durch die Verschuldung eines Verkehrsbeteiligten stattfinden.

Das Fehlverhalten hat den Auswertungen des statistischen Bundesamtes [7] zufolge in den meisten Fällen folgende Ursachen:

- Nichtbeachten der Vorfahrt
- nicht angepasste Geschwindigkeit
- ungenügender Abstand
- Falsche Straßenbenutzung
- Alkoholeinfluss
- Fehler beim Überholen

Die Art und Weise der Konstruktion einer Verkehrszeichenbrücke kann das Risiko eines Anpralls in Abhängigkeit der Größe der Folgeschäden für Personen und Konstruktion wesentlich beeinflussen und erhöhen.

Eine mangelhafte Konstruktion kann in Folgendem begründet sein durch [3]:

- Missachten von Richtlinien,
- das Nichtbefinden im Geltungsbereich der zuständigen Richtlinien,
- das Nichtbeachten von kritischen Abständen bzw. wenn die Gefahrenstelle innerhalb dieser liegt
- Nichteinhalten von Mindestwerten,
- Nichthinreichender Abstand der Straße zu schutzbedürftigen Bereichen,
- Borde und Rinnen mit mehr als 7,5 cm Höhenversatz vor Fahrzeug-Rückhaltesystemen bzw. Allgemein ein Vorfinden eines Höhenversatzes vor Anpralldämpfer,
- nicht oder unzureichend gesicherte Arbeitsstellen auf der Fahrbahn,
- Straßenabschnitte mit Radienrelationen außerhalb des brauchbaren Bereiches nach den „Richtlinien für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung“ (RAS-L), bzw. nach den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen“ (RAA), „Richtlinien für die Anlage von Landstraßen“ (RAL) und „Richtlinien für die Anlage von Stadtstraßen“ (RASt), die die Regelungen der RAS-L ersetzen.
- schlechter Zustand der Straße,
- Spurrillen oder z.B. Löcher im Zusammenhang mit Regen, Schnee oder Eis,
- schlechte Geometrien,
- steile Böschungen,
- scharfkantige Bauteile,
- sie Leitplanke ist zu hoch und kann ein Durchrutschen eines Motorradfahrers unter der Leitplanke verursachen,
- ungünstiger Verlauf der Schutzeinrichtung,
- zu steife oder zu weiche Bauteile,
- Wahl einer ungünstigen Position an der Fahrbahn,
- Straßenabschnitte mit mehreren aufeinanderfolgenden Kurven mit Radien kleiner als das 1,5-fache des zulässigen Mindestradius nach den RAS-L,
- Straßenabschnitte mit Strecken mit untypisch großen Richtungsänderungen.

4.2.2 Gefährdungsszenarien

Die Entwicklung der Gefährdungsszenarien spielt bei der qualitativen Risikoanalyse eine wesentliche Rolle. Es ist zu definieren, welche Ereignisse auftreten können, so dass es zu dem zu untersuchenden Risiko kommt.

Im Falle des Anpralls auf Verkehrszeichenbrücken können die nachfolgend aufgeführten Szenarien auftreten. Für die Herleitung jedes Szenarios wird die Abfolge von Geschehnissen in Rahmen eines Anprallereignisses genau analysiert. Zudem sind hierbei die Folgeereignisse von besonderer Bedeutung im Hinblick auf die Risikobestimmung.

Für den Fahrzeuganprall an Verkehrszeichenbrücken werden für die Bestimmung der Gefährdungsgrade insgesamt acht Szenarien gebildet. Diese werden nachfolgend einzeln aufgeführt.

Tabelle 17 – Anprallort an der VZB

1.	Ort des Anpralls an der VZB
a)	am linken Stiel der VZB
b)	am rechten Stiel der VZB
c)	am Riegel der VZB

Tabelle 18 – Anprallpunkt am anprallenden Fahrzeug

2.	Anprallpunkt am anprallenden Fahrzeug
d)	frontaler Anprall
e)	seitlicher Anprall

Tabelle 19 – Fahrverlauf des Fahrzeugs infolge Anprall

3.	Fahrverlauf des Fahrzeugs infolge Anprall	
f)	kein Abprall (kommt direkt an der VZB zum Stehen)	Restgeschwindigkeit = 0
g)	Fahrzeug prallt an der Verkehrszeichenbrücke ab	Restgeschwindigkeit ≠ 0
h)	Fahrzeug streift die VZB	Restgeschwindigkeit ≠ 0
i)	Fahrzeug überschlägt sich infolge Anprall	Restgeschwindigkeit ≠ 0

Tabelle 20 – Funktionsfähigkeit des Fahrzeugrückhaltesystems

4.	Fahrzeugrückhaltesystem erfüllt seine Funktion
j)	Rückhaltesystem hält Fahrzeug zu 100 % zurück
k)	Rückhaltesystem hält Fahrzeug nicht zurück

Tabelle 21 – Lage des Fahrzeugs nach dem Anprallereignis

5.	Lage des Fahrzeugs nach dem Anprallereignis
l)	außerhalb der Fahrbahn (Fahrbahnrand, Mittel- oder Seitenstreifen)
m)	auf der Fahrbahn (auch Gegenfahrbahn)

Tabelle 22 - Anpralllast

6.	Beteiligte Fahrzeuge
n)	Leichtverkehr (z. B. Motorrad)
o)	Personenfahrzeug (PKW)
p)	Schwerverkehr (LKW)

Tabelle 23 – Folgeereignisse nach dem Anprall

7.	Folgeereignisse aufgrund Fahrzeuganprall auf eine Verkehrszeichenbrücke
q)	sekundärer Anprall
r)	Anprall Dritter
s)	Massenkollision
t)	Stau
u)	Verlust Ladegut

Tabelle 24 – Mögliche erschwerende Begleitumstände

8.	Mögliche erschwerende Begleitumstände
v)	Hindernisse, z. B. Baum
w)	Böschung
x)	Menschen auf der Fahrbahn

Definition von Gefährdungsgraden:

Tabelle 25 – Definition von Gefährdungsgraden

Definition von Gefährdungsgraden	
➤ Sehr niedrige Gefährdung, unwahrscheinlich	0,00
➤ Niedrige Gefährdung	0,25
➤ Mittlere Gefährdung	0,50
➤ Hohe Gefährdung	0,75
➤ Sehr hohe Gefährdung	1,00

Definition der Gefährdungsgrade für verschiedene Systeme:

- A) Verkehrszeichenbrücke ohne vorgeschaltetes Fahrzeugrückhaltesystem und
- B) Verkehrszeichenbrücke mit vorgeschaltetem Fahrzeugrückhaltesystem

A) Gefährdungsgrade für eine Verkehrszeichenbrücke ohne vorgeschaltetes Fahrzeug-Rückhaltesystem

Tabelle 26 – Gefährdungsgrade (Fahrzeug Motorrad, ohne vorgeschaltetes Fahrzeugrückhaltesystem), (FB = Fahrbahn)

	Kein Abprall (direkt an Konstruktion)		Abprall		Streifen		überschlagen	
	auf FB	außerhalb FB	auf FB	außerhalb FB	auf FB	außerhalb FB	auf FB	außerhalb FB
Fall Motorrad								
primärer Anprall	1,00	1,00	0,95	0,95	0,80	0,80	1,00	1,00
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Primären)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Sekundären)	0,70	0,60	0,65	0,60	0,65	0,60	0,75	0,70
Anprall Dritter	0,65	0,55	0,60	0,55	0,60	0,55	0,70	0,65
Massenkollision	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Stau	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Böschung	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
VZB	0,50	0,50	0,40	0,40	0,25	0,25	0,45	0,45

Tabelle 27 – Gefährungsgrade (Fahrzeug PKW, ohne vorgeschaltetes Fahrzeurückhaltesystem)

	Kein Abprall (direkt an Konstruktion)		Abprall		Streifen		überschlagen	
	auf FB	außerhalb FB	auf FB	außerhalb FB	auf FB	außerhalb FB	auf FB	außerhalb FB
Fall PKW								
primärer Anprall	1,00	0,95	0,80	0,80	0,60	0,60	1,0	1,00
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Primären)	1,00	1,00	0,75	0,70	0,75	0,70	0,90	0,85
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Sekundären)	0,90	0,75	0,90	0,85	0,90	0,85	0,90	0,85
Anprall Dritter	0,80	0,70	0,65	0,60	0,65	0,60	0,70	0,65
Massenkollision	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Stau	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Böschung	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
VZB	0,80	0,80	0,70	0,70	0,55	0,55	0,75	0,75

Tabelle 28 – Gefährungsgrade (Fahrzeug LKW, ohne vorgeschaltetes Fahrzeurückhaltesystem)

	Kein Abprall (direkt an Konstruktion)		Abprall		Streifen		überschlagen	
	auf FB	außerhalb FB	auf FB	außerhalb FB	auf FB	außerhalb FB	auf FB	außerhalb FB
Fall LKW								
primärer Anprall	1,00	1,00	0,80	0,80	0,55	0,55	1,00	1,00
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Primären)	0,25	0,25	0,30	0,25	0,30	0,25	0,30	0,25
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Sekundären)	1,00	0,85	1,00	0,95	1,00	0,95	1,00	0,55
Verlust Ladegut	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Anprall Dritter	0,85	0,70	0,85	0,70	0,85	0,70	0,85	0,70
Massenkollision	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Stau	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Böschung	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
VZB	1,00	1,00	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00

B) Gefährdungsgrade für eine Verkehrszeichenbrücke mit vorgeschaltetem Fahrzeug-Rückhaltesystem

Tabelle 29 – Gefährdungsgrade (Fahrzeug LKW, mit vorgeschaltetem Fahrzeurrückhaltesystem)

	Kein Abprall (direkt an Konstruktion)			Abprall		
	auf FB	außerhalb FB		auf FB	außerhalb FB	
Fall Motorrad	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht
primärer Anprall	0,90	0,90	0,95	0,85	0,80	0,85
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Primären)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Sekundären)	0,70	0,60	0,60	0,65	0,60	0,60
Anprall Dritter	0,65	0,55	0,55	0,60	0,55	0,55
Massenkollision	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Stau	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Böschung	0,70	0,70	0,90	-	0,70	0,90
VZB	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,10

Tabelle 30 – Gefährdungsgrade (Fahrzeug LKW, mit vorgeschaltetem Fahrzeurrückhaltesystem)

	streifen			überschlagen		
	auf FB	außerhalb FB		auf FB	außerhalb FB	
Fall Motorrad	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht
primärer Anprall	0,65	0,65	0,70	1,00	1,00	1,00
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Primären)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Sekundären)	0,65	0,60	0,60	0,75	0,70	0,70
Anprall Dritter	0,60	0,55	0,55	0,70	0,65	0,65
Massenkollision	0,50	0,50	0,50	0,50	0,55	0,50
Stau	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Böschung	-	0,70	0,90	-	0,70	0,90
VZB	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20

Tabelle 31 – Gefährungsgrade (Fahrzeug PKW, mit vorgeschaltetem Fahrzeurückhaltesystem)

	Kein Abprall (direkt an Konstruktion)			Abprall		
	auf FB	außerhalb FB		auf FB	außerhalb FB	
Fall PKW	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht
primärer Anprall	0,80	0,80	0,85	0,70	0,65	0,70
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Primären)	0,80	0,80	0,80	0,75	0,70	0,70
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Sekundären)	0,90	0,75	0,75	0,90	0,85	0,85
Anprall Dritter	0,80	0,70	0,70	0,65	0,60	0,60
Massenkollision	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Stau	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Böschung	0,50	0,50	0,60	-	0,50	0,60
VZB	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,50

Tabelle 32 – Gefährungsgrade (Fahrzeug PKW, mit vorgeschaltetem Fahrzeurückhaltesystem)

	streifen			überschlagen		
	auf FB	außerhalb FB		auf FB	außerhalb FB	
Fall PKW	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht
primärer Anprall	0,50	0,50	0,55	1,00	1,00	1,00
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Primären)	0,75	0,70	0,70	0,75	0,85	0,85
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Sekundären)	0,90	0,85	0,85	0,90	0,85	0,85
Anprall Dritter	0,65	0,60	0,60	0,70	0,65	0,65
Massenkollision	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Stau	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Böschung	-	0,50	0,60	-	0,50	0,60
VZB	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,55

Tabelle 33 – Gefährdungsgrade (Fahrzeug PKW, mit vorgeschaltetem Fahrzeugrückhaltesystem)

	Kein Abprall (direkt an Konstruktion)			Abprall		
	auf FB	außerhalb FB		auf FB	außerhalb FB	
Fall LKW	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht
primärer Anprall	1,00	1,00	1,00	0,80	0,80	0,80
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Primären)	0,25	0,25	0,25	0,30	0,25	0,25
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Sekundären)	1,00	0,85	0,80	1,00	0,95	0,90
Anprall Dritter	0,85	0,70	0,70	0,85	0,70	0,70
Massenkollision	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Stau	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Böschung	0,30	0,30	0,30	-	0,30	0,30
VZB	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	0,95

Tabelle 34 – Gefährdungsgrade (Fahrzeug PKW, mit vorgeschaltetem Fahrzeugrückhaltesystem)

	streifen			überschlagen		
	auf FB	außerhalb FB		auf FB	außerhalb FB	
Fall LKW	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht	Hält zu- rück	Hält zu- rück	Hält nicht
primärer Anprall	0,55	0,55	0,55	1,00	1,00	1,00
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Primären)	0,30	0,25	0,25	0,30	0,25	0,25
sekundärer Anprall (Gefährdung für den Sekundären)	1,00	0,95	0,90	1,00	0,95	0,90
Anprall Dritter	0,85	0,70	0,70	0,85	0,70	0,70
Massenkollision	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Stau	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Böschung	-	0,30	0,30	-	0,30	0,30
VZB	0,00	0,00	0,80	0,00	0,00	0,95

Bei der Berechnung des Erwartungswertes von Gesamtgefährdungsgraden wird angenommen, dass die entwickelten Gefährdungsszenarien Nr. 1 bis Nr. 8 mit **gleicher** Wahrscheinlichkeit auftreten.

Aufgrund der zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichtes vorhandenen unzureichenden Datenbasis wird vorab dieser Ansatz gewählt. Die nachfolgenden Berechnungen sind daher beispielhaft zu verstehen und müssen ggf. nach Vorliegen ausreichender Daten aktualisiert werden.

Beispiel 1:

Anprall eines Motorrades an eine Verkehrszeichenbrücke ohne vorgeschaltetem Fahrzeurückhaltesystem

Kurzbeschreibung	<i>Szenario 8</i>	Kombination: 1abc) 2) 3i) 5m) 6n)
------------------	-------------------	-----------------------------------

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00
sekundäre Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,45 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{1,00+1,00+0,75+0,70+0,50+0,25+0,45}{7} = \underline{0,664}$$

Beispiel 2:

Anprall eines PKW's an eine Verkehrszeichenbrücke mit vorgeschaltetem Fahrzeurückhaltesystem

Kurzbeschreibung	<i>Szenario 15</i>	Kombination: 1abc) 2) 3h) 4j) 5m) 6o)
------------------	--------------------	---------------------------------------

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift das Fahrzeurückhaltesystem, welche das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,50 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,75
sekundäre Gefährdung = 0,90 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,65 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{0,50+0,75+0,90+0,65+0,50+0,25+0,00}{7} = \underline{0,444}$$

In der Anlage A sind die verschiedenen Szenarien aufgeführt und entsprechend ausgewertet.

4.2.3 Schadensfolgen und Ereignisbäume

Grundsätzlich wird, wie in der Praxis üblich, zwischen Personen- und Sachschäden als Schadensfolge unterschieden.

Unter einem Personenschaden versteht man die Beeinträchtigung der körperlichen Unversehrtheit eines Menschen. Hier wird die Schadenshöhe in „Leichtverletzte, Schwerverletzte und Getötete“ unterteilt. „Leichtverletzte“ sind Unfallopfer mit einem Krankenhausaufenthalt von weniger als 24h ohne erforderliche stationäre Behandlung. Für Personen, die sich mehr als 24h im Krankenhaus aufhalten müssen und für die eine stationäre Behandlung notwendig ist, wird der Begriff „Schwerverletzte“ verwendet. Getötete sind sofort während dem Unfall Verunglückte oder sehr schwer Verletzte, deren gravierenden Verletzungen innerhalb von 30 Tagen zum Tode führen.

Die Höhe eines Sachschadens wird in „Euro“ ausgedrückt. „Ein Sachschaden liegt dann vor, wenn eine Sache zerstört, beschädigt oder in ihrem Wert gemindert wird“. Dies bezieht sich nicht nur auf Unfallfolgekosten aufgrund der Beschädigung oder Zerstörung der Konstruktion bzw. Materiellem, sondern auch auf Kosten für Verletzte.

Zur Analyse und Plausibilitätskontrolle von Eintrittshäufigkeiten, Personen- und Sachschäden werden Ereignisbäume für die verschiedenen Szenarien entsprechend der gewählten Kombinationen erstellt.

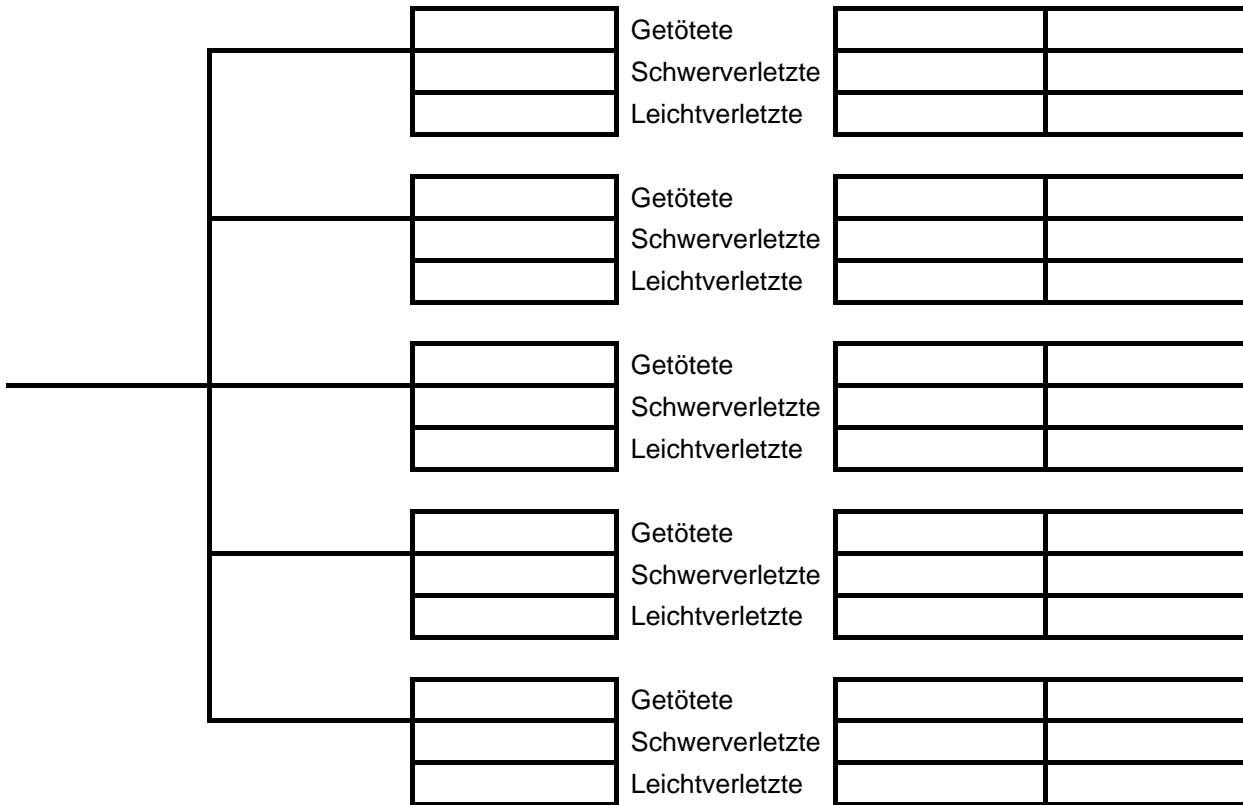
Ein Ereignisbaum ist eine graphische Darstellung von Verkettungen von links nach rechts. Ausgehend von einem auslösenden Ereignis (Spalte 1) folgt eine Abfolge weiterer (Folgespalten), eine Schadensklassifizierung, die Zuordnung ihrer Häufigkeit pro Jahr und dem erwarteten Schadensausmaß pro Jahr.

Die beiden folgenden Graphiken stellen Ereignisbäume in Abhängigkeit von Personenschäden bzw. von Sachschäden dar. Diese dienen in der weiteren Bearbeitung als Vorlage.

Ereignisbaum in Abhängigkeit von Personenschäden:
(prinzipieller Überblick zum Verständnis)

Tabelle 35 – Struktur
Ereignisbau Anprall LKW, Schadensindikator Personenschaden

1	2	3	4	5	6
Anprall LKW	Unfalltyp 1,2,3,4,5	Verteilung Schadensausmaß	Schadensausmaßklasse (Personenschäden)	Häufigkeit pro Jahr	Erwartetes Ausmaß (Personenschäden)



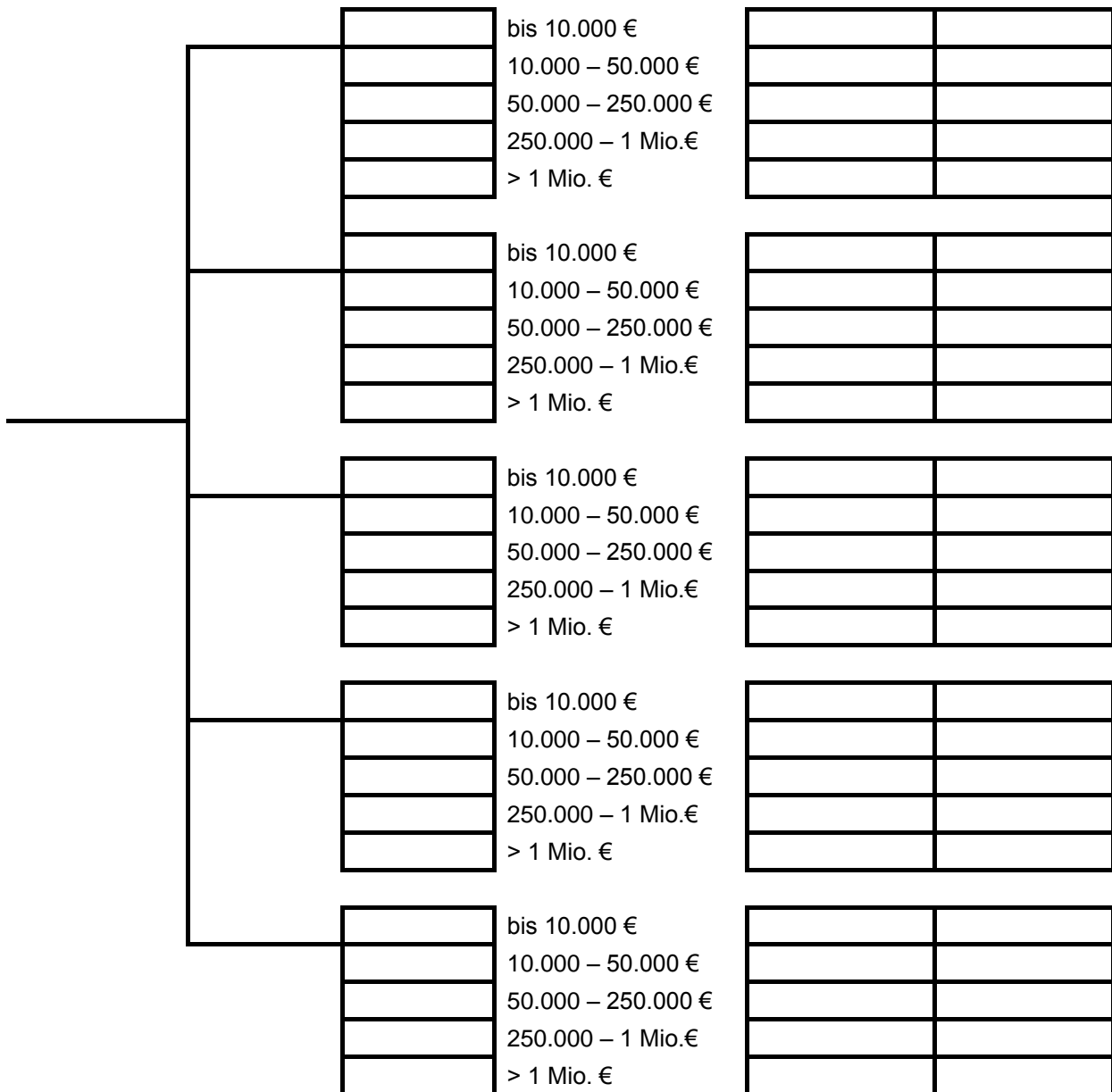
Folgeereignisse in der Spalte 2 („Unfalltyp 1, 2, 3, 4, 5“).

Unfalltyp 1: Sekundäranprall, Unfalltyp 2: Anprall Dritter, Unfalltyp 3: Massenkollision, Unfalltyp 4: Staubildung und Unfalltyp 5: Verlust des Ladeguts.

Ereignisbaum in Abhängigkeit von Sachschäden:

Tabelle 36 – Struktur Ereignisbau Anprall LKW, Schadensindikator Sachschaden und Verletzte

1	2	3	4	5	6
Anprall LKW	Unfalltyp 1,2,3,4,5	Verteilung Schadensausmaß	Schadensausmaßklasse (Personenschäden)	Häufigkeit pro Jahr	Erwartetes Ausmaß (Personenschäden)



Folgeereignisse in der Spalte 2 („Unfalltyp 1, 2, 3, 4, 5“).

Unfalltyp 1: Sekundäranprall, Unfalltyp 2: Anprall Dritter, Unfalltyp 3: Massenkollision, Unfalltyp 4: Staubbildung und Unfalltyp 5: Verlust des Ladeguts.

4.2.4 Maßnahmenplanung

Zur Reduzierung des Gesamtrisikos können zwei grundsätzliche Aspekte gesteuert werden. Zum einen kann die Eintrittswahrscheinlichkeit gemindert und zum anderen das Schadensausmaß gesenkt werden. Dazu können verschiedene mögliche Maßnahmen ergriffen werden:

- Strategie zur Risikominimierung [1]:
 - Geeignete Anordnung der Verkehrszeichenbrücken,
 - optimierter Verkehrsführung.

- Strategie zur Senkung des Schadensausmaß [1]:
 - Variieren der Steifigkeit der Konstruktion,
 - verwenden von aktiven oder passiven Dämpfungssystemen,
 - innerer steifer Kern mit austauschbaren verschieden weichen „Schutzschalen“,
 - Wahl einer geeigneten Geometrie der Konstruktion selbst,
 - Einsatz von Fahrzeug-Rückhaltesystemen,
 - optimal abgestimmtes Zusammenspiel von Schutzeinrichtung und Konstruktion,
 - Verankerung des Bauteils,
 - Bemessung mit geeigneten Anpralllasten,
 - optimierte Konstruktion des Anprallsockels.

4.2.5 Risikobewertung

Zur Bestimmung eines Risikos wird im Allgemeinen das Produkt aus Auftretenswahrscheinlichkeit und Schadensfolge gebildet [23]. Ein wirkliches Nullrisiko existiert in der Praxis nicht. Um die Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme bzw. des ganzen Systems gewährleisten und ein angemessenes Gesamtsystem realisieren zu können, muss ein bestimmtes Risiko akzeptiert werden. Um Schadensfolgen an Gegenstand und Person und deren Kosten so gering wie möglich zu halten, versucht man den Grenzwert für die Risikoakzeptanz so niedrig wie möglich zu halten. Je mehr dieser Grenzwert schließlich überschritten wird, desto erforderlicher werden Sicherheitsmaßnahmen. Der Grenzwert ist beispielsweise von folgenden Faktoren abhängig:

- Anzahl der Unfallopfer,
- Schwere der Unfallfolgen,
- Wirtschaftliche Folgen,
- Kosten von Sicherheitsmaßnahmen.

Die Detailberechnungen der Gefährdungsgrade können der Anlage A entnommen werden. Nachfolgend ist die Auswertung der zuvor erstellten Szenarien aufgeführt:

Die Auswertung wird beispielhaft vorgenommen, da aufgrund der fehlenden detaillierten Datengrundlage davon ausgegangen wird, dass jedes Szenario und jeder Gefährdungsgrad mit der gleichen Auftretenswahrscheinlichkeit auftritt. In der Realität wird dies voneinander abweichen.

Tabellarische Zusammenfassung (System ohne Fahrzeug-Rückhaltesystem):

Szenario	Gefährdungsgrad	Szenario	Gefährdungsgrad
Szenario 1	0,633	Szenario 13	0,681
Szenario 2	0,657	Szenario 14	0,650
Szenario 3	0,644	Szenario 15	0,600
Szenario 4	0,606	Szenario 16	0,714
Szenario 5	0,681	Szenario 17	0,622
Szenario 6	0,621	Szenario 18	0,700
Szenario 7	0,579	Szenario 19	0,611
Szenario 8	0,664	Szenario 20	0,567
Szenario 9	0,694	Szenario 21	0,633
Szenario 10	0,750	Szenario 22	0,681
Szenario 11	0,625	Szenario 23	0,631
Szenario 12	0,581	Szenario 24	0,706

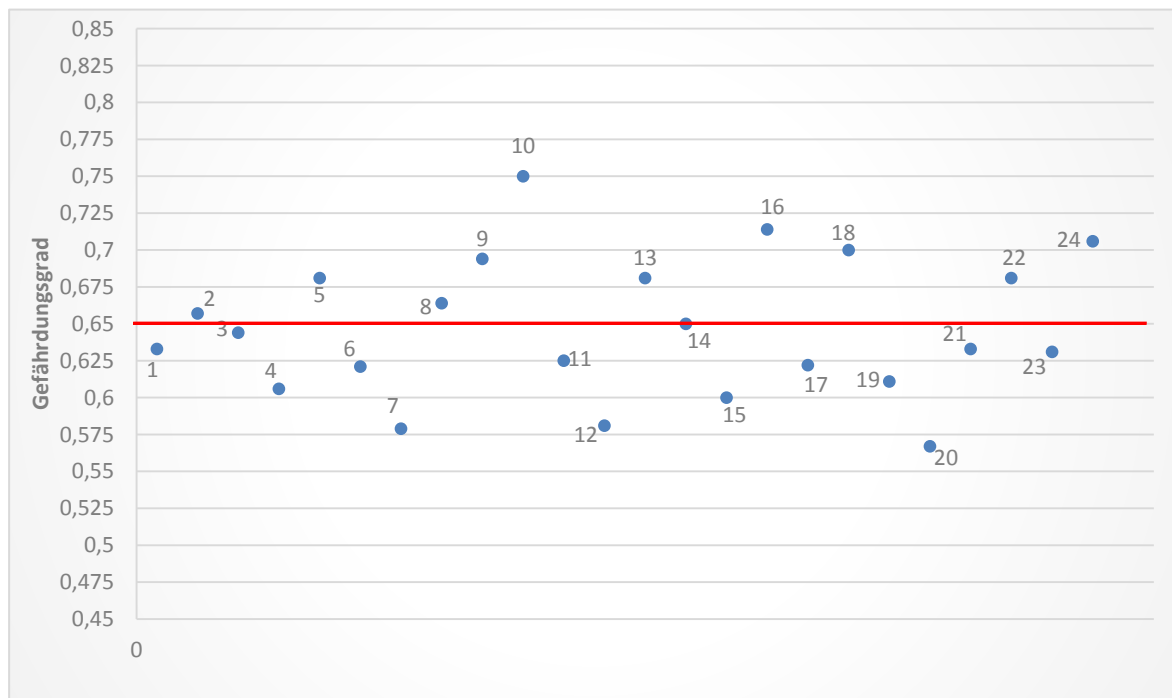


Abbildung 22 – Auswertung der Risikobewertung für System ohne Fahrzeugrückhaltesystem

Tabellarische Zusammenfassung (System mit Fahrzeug-Rückhaltesystem):

Szenario	Gefährdungsgrad	Szenario	Gefährdungsgrad
Szenario 1	0,563	Szenario 19	0,488
Szenario 2	0,588	Szenario 20	0,507
Szenario 3	0,619	Szenario 21	0,550
Szenario 4	0,550	Szenario 22	0,575
Szenario 5	0,550	Szenario 23	0,586
Szenario 6	0,594	Szenario 24	0,656
Szenario 7	0,531	Szenario 25	0,511
Szenario 8	0,521	Szenario 26	0,544
Szenario 9	0,563	Szenario 27	0,611
Szenario 10	0,600	Szenario 28	0,500
Szenario 11	0,600	Szenario 29	0,556
Szenario 12	0,656	Szenario 30	0,600
Szenario 13	0,538	Szenario 31	0,472
Szenario 14	0,569	Szenario 32	0,525
Szenario 15	0,631	Szenario 33	0,525
Szenario 16	0,506	Szenario 34	0,522
Szenario 17	0,536	Szenario 35	0,581
Szenario 18	0,588	Szenario 36	0,622

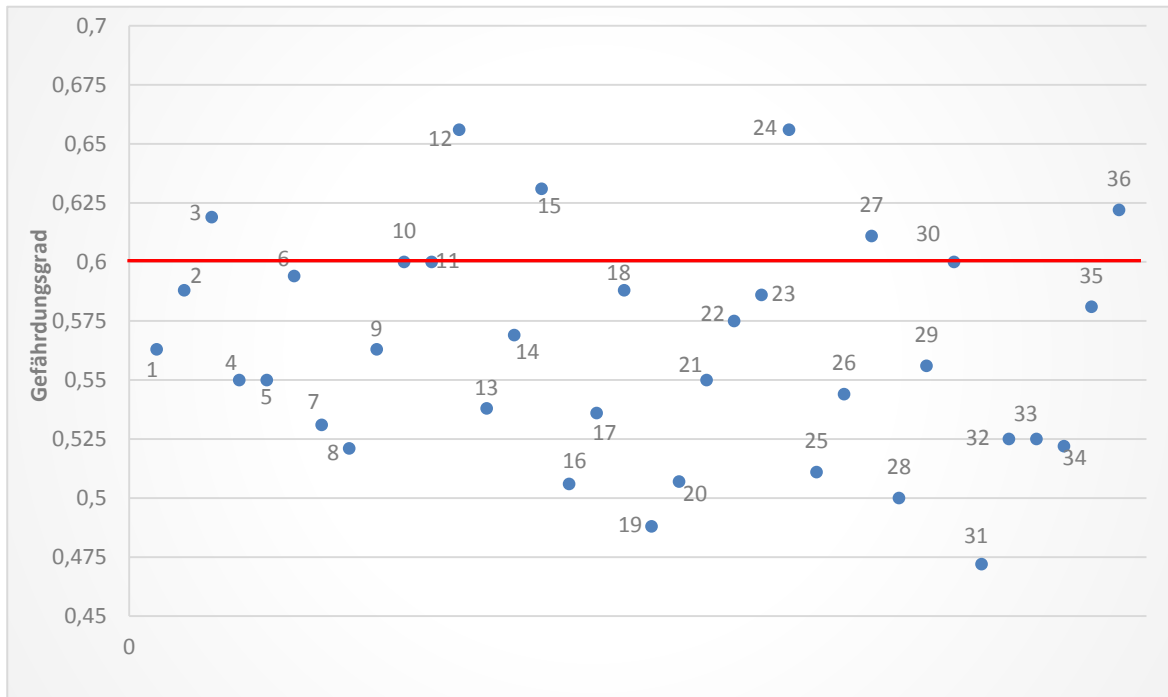


Abbildung 23 – Auswertung der Risikobewertung für System ohne Fahrzeugrückhaltesystem

Nachfolgend werden durch die Auswertung der Gefährdungsgrade der erstellten Szenarien maßgebende Gefährdungsszenarien erarbeitet. Dabei wird die Grenze, die den akzeptierbaren vom nicht akzeptierbaren Bereich trennt, dort festgelegt, wo ein Gefährdungsgrad in der Größe 0,65 (für ein System ohne Fahrzeugrückhaltesystem) bzw. in der Größe 0,60 (für ein System mit Fahrzeugrückhaltesystem) vorliegt. Zur näheren Betrachtung werden alle Szenarien oberhalb dieser Grenze herangezogen.

Hierzu gehören:

- Für ein System ohne Fahrzeugrückhaltesystem:

Szenarien 2, 5, 8, 9, 10, 13, 14, 16, 18, 22, 24.

- Für ein System mit Fahrzeugrückhaltesystem:

Szenarien 3, 10, 11, 12, 15, 24, 27, 30, 36.

Alle anderen Szenarien werden nicht weiter betrachtet, weil deren Risiko gemäß zugrunde gelegter Annahmen akzeptiert wird. In der Folge ergeben sich insgesamt 11 Szenarien ohne und 9 Szenarien mit Fahrzeugrückhaltesystem, die ein erhöhtes Risiko darstellen.

Wenn man die Systeme ohne und mit vorgeschaltetem Fahrzeugrückhaltesystem gegenüberstellt, ergibt sich eine deutliche Verbesserung der Gefährdungsgrade. Der Mittelwert des Gefährdungsgrades für alle Szenarien mit einem System mit Fahrzeugrückhaltesystem beträgt 0,562, der Mittelwert für alle Szenarien ohne Fahrzeug-Rückhaltesystem 0,647. Die Senkung macht die Relevanz bzw. die Signifikanz eines Fahrzeugrückhaltesystems deutlich. Das Risiko kann durch den Einsatz folglich gesenkt werden.

Nach dieser Analyse ergeben sich für ein System ohne Fahrzeug-Rückhaltesystem lediglich drei Szenarien, die den festgelegten Grenzwert 0,65 überschreiten, wobei sie nahe an dem definierten Grenzwert liegen. Für ein System mit Fahrzeugrückhaltesystem ergeben sich 4 Szenarien, die den Grenzwert 0,60 überschreiten. Im Detail ist hier vor allem die primäre Gefährdung hoch. Die Gefährdung Dritter und der Konstruktion ist dabei wesentlich geringer. Da in vielen Fällen die Sicherheit Dritter im Vordergrund steht, wird mit der Annahme, dass die tatsächlichen Folgen mit ihren Schweregraden für einen Fahrzeugtyp „Motorrad“ nicht gravierend sind, der Fall Motorrad bzw. das Risiko eines Anpralls eines Motorrads an eine Verkehrszeichenbrücke als Einzelfallereignis toleriert.

Für den Fall PKW ergeben sich fünf Szenarien ohne Fahrzeugrückhaltesystem und zwei Szenarien mit Fahrzeugrückhaltesystem, für die eine Risikobehandlung notwendig ist. Die Gefährdungsverteilung für den primären Anprall, für Dritte und für die Verkehrszeichenbrücke ist dabei im Vergleich zu den Fällen Motorrad und LKW relativ ausgeglichen. Der kleinste Wert für ein System ohne Fahrzeugrückhaltesystem liegt bei 0,65 für das Szenario 14. Szenario 10 erreicht mit seinem Gefährdungsgrad den Maximalwert aller Szenarien und liegt bei 0,75. Gleichermaßen betrifft dies das System mit FZR mit einem Maximalwert von 0,656 für das Szenario 24. Szenario 15 liegt dabei mit einem Wert von 0,631 dem Maximalwert relativ nahe. Daraus lässt sich schließen, dass stark risikomindernde Maßnahmen notwendig sind. Daraus ergibt sich für die jeweiligen Fälle das erste maßgebende Szenario.

Für den Fall LKW ergeben sich drei Szenarien für ein System ohne Fahrzeugrückhaltesystem und drei Szenarien für ein System mit Fahrzeugrückhaltesystem. Zwar sind die Gesamtgefährdungsgrade im Gegensatz zu denen im Fall PKW niedriger, jedoch ist zu bedenken, dass hier die primäre Gefährdung und die Gefährdung durch erschwerende Begleitumstände viel niedriger sind. Wichtiger ist aber, dass die Gefährdung Dritter und die der Verkehrszeichenbrücke umso höher sind. Dieses Risiko des Anpralls eines LKW an eine Verkehrszeichenbrücke darf keineswegs akzeptiert werden und ergibt das zweite maßgebende Szenario, einmal für ein System ohne Fahrzeugrückhaltesystem und einmal mit.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Vorgaben in der RPS [5] für die Anordnung von Fahrzeugrückhaltesystemen mit den Ergebnissen der qualitativen Risikoanalyse übereinstimmen. Die Fahrzeugrückhaltesystem gemäß RPS [5] senken wie erwartet das Risiko für einen Fahrzeuganprall und für Folgeschäden für Dritte erheblich.

Folgende maßgebende und präziser zu betrachtende Gefährdungsszenarien ergeben sich somit [9]:

Szenario Typ 1 – System ohne Fahrzeugrückhaltesystem: Fall PKW

Kurzbeschreibung

Ein PKW kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Der Unfall verursacht einen sekundären Anprall und mit niedriger Wahrscheinlichkeit einen Anprall Dritter. Auch eine Massenkollision ist möglich. Mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen in Fahrtrichtung ist zu rechnen. Eine Staubbildung ist außerdem wahrscheinlich, wobei Personen ihr Fahrzeug verlassen und ebenso angefahren werden könnten.

Mögliche Situationen

Situation 1:

Der PKW wird so stark verlangsamt, dass er direkt an der Verkehrszeichenbrücke zum Stillstand kommt, er besitzt nach dem Anprall keine Restgeschwindigkeit. Der PKW befindet sich außerhalb der Fahrbahn auf einem Seitenstreifen. (Szenario 9)

Situation 2:

Der PKW wird so stark verlangsamt, dass er direkt an der Verkehrszeichenbrücke zum Stillstand kommt, er besitzt nach dem Anprall keine Restgeschwindigkeit. Der PKW befindet sich auf der Fahrbahn, da kein Seitenstreifen vorhanden ist. (Szenario 10)

Situation 3:

Der PKW überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen. (Szenario 13)

Situation 4:

Der PKW prallt an der VZB ab, fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt auf der Fahrbahn liegen. (Szenario 14)

Situation 5:

Der PKW überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt auf der Fahrbahn liegen. (Szenario 16)

Szenario Typ 2 – System ohne Fahrzeugrückhaltesystem: Fall LKW

Kurzbeschreibung

Ein LKW kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Der Unfall verursacht einen sekundären Anprall und mit niedriger Wahrscheinlichkeit einen Anprall Dritter. Auch eine Massenkollision ist möglich. Mit einem erhöhten Verkehrsaufkommen in Fahrtrichtung ist zu rechnen. Eine Staubbildung ist außerdem sehr wahrscheinlich, wobei Personen ihr Fahrzeug verlassen und ebenso angefahren werden könnten. Zudem besteht die Gefahr, dass der LKW sein Ladegut verliert.

Mögliche Situationen

Situation 1:

Der LKW wird so stark verlangsamt, dass er direkt an der Verkehrszeichenbrücke zum Stillstand kommt, er besitzt nach dem Anprall keine Restgeschwindigkeit. Der LKW befindet sich außerdem auf der Fahrbahn, da kein Seitenstreifen vorhanden ist. (Szenario 18)

Situation 2:

Der LKW prallt an der VZB ab, fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt auf der Fahrbahn liegen. (Szenario 22)

Situation 3:

Der LKW überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt auf der Fahrbahn liegen. (Szenario 24)

Szenario Typ 3 – System mit Fahrzeurückhaltesystem: Fall PKW

Kurzbeschreibung

Ein PKW kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeurückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Schutzmaßnahmen wie der Einsatz des Fahrzeurückhaltesystems oder auch Seitenstreifen sind nahezu wirkungslos. Der Unfall verursacht einen sekundären Anprall und mit niedriger Wahrscheinlichkeit einen Anprall Dritter. Auch eine Massenkollision ist möglich. Eine Staubbildung ist wahrscheinlich.

Mögliche Situationen

Situation 1:

Der PKW prallt nicht an der Schutzplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Diese wird so stark verformt, dass sie den PKW nicht mehr zurückhalten kann, so dass dieser bis zur Verkehrszeichenbrücke gelangt, an der er letztendlich außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt. (Szenario 15)

Situation 2:

Der PKW überschlägt sich infolge des Anpralls an der Schutzplanke, welche den PKW somit nicht zurückhalten kann, trifft die Verkehrszeichenbrücke, wo der PKW außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt. (Szenario 24)

Szenario Typ 4 – System mit Fahrzeurückhaltesystem: Fall LKW

Kurzbeschreibung

Ein LKW kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeurückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Schutzmaßnahmen wie der Einsatz des Fahrzeurückhaltesystems oder auch Seitenstreifen sind nahezu wirkungslos. Der Unfall verursacht einen sekundären Anprall und mit niedriger Wahrscheinlichkeit einen Anprall Dritter. Auch eine Massenkollision ist möglich. Eine Staubbildung ist wahrscheinlich. Außerdem besteht die Gefahr, dass der LKW sein Ladegut verliert.

Mögliche Situationen

Situation 1:

Der LKW prallt nicht an der Schutzplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Diese wird so stark verformt, dass sie den LKW nicht mehr zurückhalten kann und gelangt bis zur Verkehrszeichenbrücke, an der der LKW letztendlich außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt. (Szenario 27)

Situation 2:

Der LKW prallt an der Schutzplanke ab, die den LKW nicht zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Schutzplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand. (Szenario 30)

Situation 3:

Der LKW überschlägt sich infolge des Anpralls an der Schutzplanke, welche den LKW somit nicht zurückhalten kann, trifft die Verkehrszeichenbrücke, wo der LKW außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt. (Szenario 36)

4.2.6 Risikobehandlung

Im Risikomanagement wird häufig auf das sog. ALARP-Prinzip (as low as reasonable practicable) zurückgegriffen, welches Grenzwerte für akzeptable und nicht akzeptable Bereiche definiert.

Unfall mit Todesfolge, kritische Verletzung					
Unfall mit sehr schweren Verletzungen					
Unfall mit schweren Verletzungen					
Unfall mit mittleren Verletzungen					
Unfall mit leichten Verletzungen					
Unfall ohne Schäden					
Personenschaden	Sehr Selten	Selten	Gelegentlich	Oft	Häufig
Eintrittswahrscheinlichkeit	Mehr als 1 x pro Jahr	1 x pro Monat	1 x pro Woche	Mehr als 1 x pro Woche	Täglich / öfter am Tag
	Ereignis Ursachenanalyse: stark risikomindernde Maßnahmen sind erforderlich				
	Einfache Ursachenanalyse: risikomindernde Maßnahmen sind erforderlich				
	Keine Ursachenanalyse: prüfen, ob vorhandene Maßnahmen ausreichen				

Abbildung 24 – Risikobehandlung

Dabei werden Schadensausmaß (hier: Personenschäden) und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten betrachtet. Im vorliegenden Beispiel ergab die eingehende Analyse, dass bei Personenschäden bis zu mittleren Verletzungen, die nur sehr selten bis gelegentlich vorkommen, und Personenschäden bis zu leichten Verletzungen, die oft bzw. häufig vorkommen lediglich zu prüfen ist, ob die schon vorhandenen Maßnahmen ausreichen. Bei mittleren Verletzungen, die oft oder häufig, bei schweren Verletzungen die sehr selten bis gelegentlich oder bei sehr schweren Verletzungen, die auch nur selten vorkommen, lässt sich nach einer einfachen Ursachenanalyse feststellen, dass risikomindernde Maßnahmen erforderlich werden.

Das trifft auf alle die Szenarien, die den Grenzwert für eine Risikoakzeptanz überschreiten. Für Personenschäden, bei denen schwere Verletzungen oft und häufig bzw. sehr schwere Verletzungen öfter als gelegentlich auftreten genau wie jegliche kritischen Verletzungen mit oder ohne Todesfolge, müssen stark risikomindernde Maßnahmen vorgenommen werden. Das trifft vor allem auf die gewählten maßgebenden Gefährdungsszenarien zu.

Da die tatsächlichen Unfallhäufigkeiten mit den Schadenfolgen und Verletzungsgraden aus den zur Verfügung stehenden Daten nicht ermittelt werden können, kann durch das Fehlen der Eintrittswahrscheinlichkeiten der jeweiligen Szenarien und der Unfalldaten eine detaillierte weitere Ausarbeitung im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht vorgenommen werden.

4.3 Quantitative Risikoanalyse

4.3.1 Grundlagen und Vorgehensweise

Probabilistische Methoden ermöglichen im Gegensatz zu den deterministischen und semi-probabilistischen Berechnungsmethoden die direkte Ermittlung der rechnerischen Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerks oder Bauteils u. a. auf der Grundlage der tatsächlichen Materialeigenschaften sowie der lokalen Belastungssituation. Die Unsicherheiten und die Streuungen der maßgebenden Variablen auf der Einwirkungs- und Widerstandsseite werden dadurch reduziert und das Bauwerk kann auf der Grundlage der tatsächlichen Eigenschaften beurteilt werden. Die Veröffentlichungen des Joint Committee on Structural Safety, JCSS, [24] und [25] geben dabei die Grundlagen für eine probabilistische Berechnung an die Hand.

Die Zuverlässigkeit eines Tragwerks wird grundsätzlich als Komplement zur Versagenswahrscheinlichkeit p_f definiert. Die allgemeine Grenzzustandsfunktion ergibt sich zu:

$$g(R, Q) = R - Q \quad (9)$$

Das Versagen tritt ein, wenn die Einwirkung Q größer wird als der Widerstand R . Im Allgemeinen sind dabei R und Q Zufallsvariablen, die durch eine statistische Verteilung beschrieben werden.

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f kann dann mit:

$$p_f = P(g < 0) \quad (10)$$

und die Zuverlässigkeit p_s mit

$$p_s = 1 - p_f \quad (11)$$

berechnet werden.

Im konstruktiven Ingenieurbau ist der Sicherheitsindex β ein Maß für die Zuverlässigkeit eines Bauteils, der als sogenannter „verallgemeinerter Sicherheitsindex“ [23] eingeführt wird.

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f) = \Phi^{-1}(1 - p_f) \quad (12)$$

Strenge Lösungen für β existieren nur, wenn es sich um eine lineare Grenzzustandsfunktion handelt und die beiden Basisvariablen R und Q normalverteilt oder logarithmisch normalverteilt sind. Ist dies, so wie in den meisten Fällen, nicht der Fall, dann wird auf Näherungsverfahren wie z. B. die Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung (FORM) sowie die Zuverlässigkeitstheorie 2. Ordnung (SORM) zurückgegriffen. Die Grundlagen hierfür sowie weitere Verfahren sind in [23] übersichtlich dargestellt. Die Zielzuverlässigkeiten sind im EUROCODE, DIN EN 1990, [26] angegeben. In Deutschland wurden die Teilsicherheitsbeiwerte des semi-probabilistischen Sicherheitskonzepts für die Schadensfolgeklasse CC 2 kalibriert. Eine Unterscheidung in unterschiedliche Lastklassen ist nicht vorgesehen. Dies erfolgt teilweise durch die Länder durch unterschiedliche Anforderungen an den Brandschutz oder an die Prüfung der statisch konstruktiven Unterlagen.

4.3.2 Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung (FORM)

Die Zuverlässigkeitstheorie erster Ordnung, *First Order Reliability Method (FORM)*, ist eine Erweiterung der Momentenmethode, sodass beliebige Verteilungen der Basisvariablen berücksichtigt werden können. Hierfür müssen nicht normalverteilte, korrelierte Eingangsgrößen X_i in normalverteilte, standardisierte und unkorrelierte Basisvariablen Y_i überführt werden. Dabei ist die Voraussetzung, dass Informationen über die Verteilungsfunktion F_{X_i} der Basisvariablen vorhanden sind oder sinnvoll abgeschätzt werden können. Bei der Transformation sollen die Wahrscheinlichkeiten einander entsprechender Punkte gleich sein, sodass für alle Basisvariablen und für alle Punkte gelten muss:

$$F_{X_i}(x_i) = \Phi(y_i) \quad (13)$$

Daraus folgen die Transformationsbeziehungen für den Spezialfall unabhängiger, nicht normalverteilter Zufallsvariablen:

$$x_i = F_{X_i}^{-1}(\Phi(y_i)) \quad (14)$$

oder

$$y_i = \Phi^{-1}(F_{X_i}(x_i)) \quad (15)$$

mit:

$$i = 1, 2, \dots, n$$

Φ^{-1} = inverse Funktion der standardisierten Normalverteilung

$F_{X_i}^{-1}$ = inverse Funktion der Verteilungsfunktion F_{X_i} der Basisvariablen X_i

Die nachfolgende Abbildung 25 zeigt anschaulich diese Transformation.

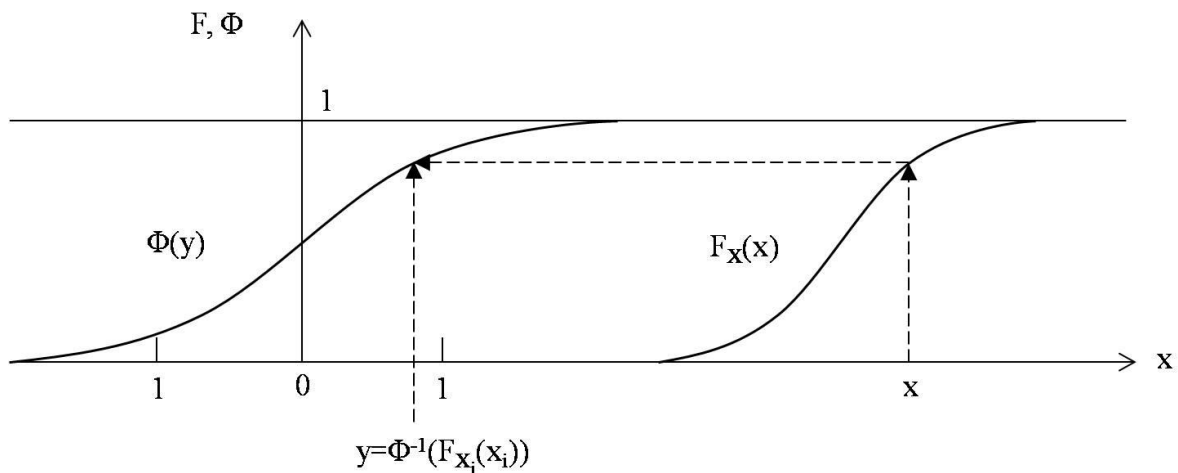


Abbildung 25 - Darstellung der Transformationsbeziehung

Im Gegensatz zur Momentenmethode können jetzt Näherungswerte für die Versagenswahrscheinlichkeit angegeben werden. Die Zuverlässigkeitstheorie erster Ordnung *FORM* führt also die für die Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit P_f notwendige mehrdimensionale Integration über den Versagensbereich auf eine Optimierungsaufgabe mit Nebenbedingungen zurück. Vorausgesetzt wird, dass die Grenzzustandsfunktion h in der Umgebung des Bemessungspunktes \mathbf{u}^* stetig und mindestens einmal differenzierbar ist.

4.3.3 Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit für eine Verkehrszeichenbrücke

Die nachfolgend geführten probabilistischen Berechnungen dienen überwiegend im Hinblick auf die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Einflusses der Anpralllast auf die Sicherheit einer Verkehrszeichenbrücke. Die Berechnungen wurden an dem Referenzbauwerk gemäß Kapitel 5.3 durchgeführt. Die Schnittgrößenermittlung erfolgte mit dem Programmsystem Sofistik [27], siehe hierzu die Abbildung 26.

Folgende Eingangsdaten wurden gewählt:

Schildersatzfläche: Höhe = 5,00 m, Breite = 15,50 m

Schild eigengewicht: $g = 0,4 \text{ kN/m}^2$

Windlast Zone I: $w = 1,20 \text{ kN/m}^2$

Windlast Zone IV: $w = 3,00 \text{ kN/m}^2$

Die Abbildung 26 zeigt das Stabwerksmodell für die Berechnung der Schnittgrößen als Grundlage für die probabilistischen Berechnungen.

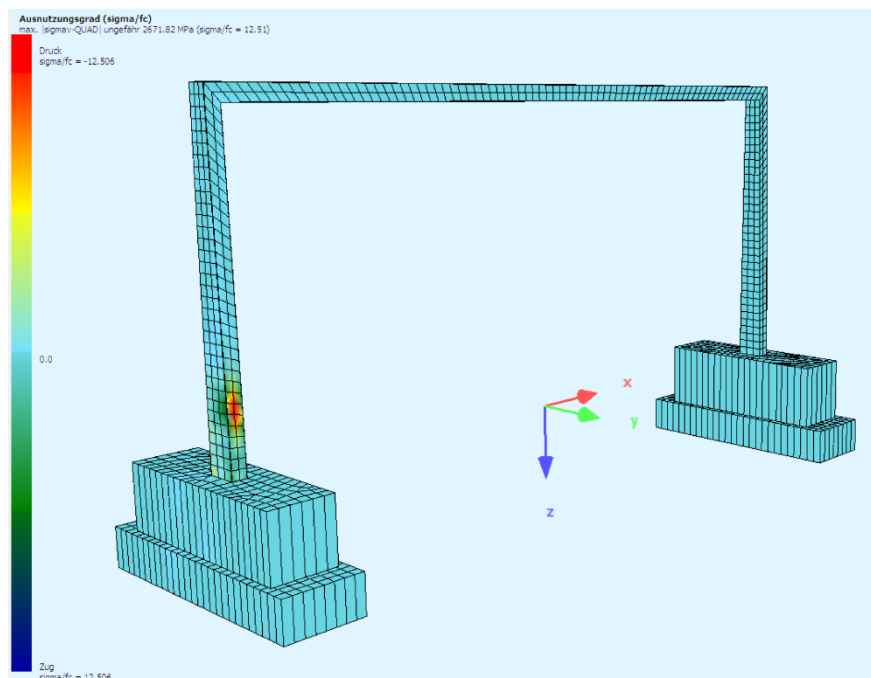


Abbildung 26 - SOFiStiK Modell für die Berechnung der Schnittgrößen als Grundlage für die probabilistische Berechnung

Im Kapitel 5.4 wurde festgestellt, dass für den maßgebenden Bemessungszustand im Hinblick auf die Biegetragfähigkeit die Einwirkungen infolge Wind maßgebend werden. Den nachfolgenden Abbildungen können die Biegemomente infolge Windbeanspruchung für die Windzone I und IV entnommen werden.

Die nachfolgenden probabilistischen Berechnungen werden für den Grenzzustand der Biegetragfähigkeit geführt. Im Zuge der numerischen FE-Berechnungen zeigt sich, dass u. a. auch das Abscheren der Schweißnaht an der Fußplatte sowie die Querkrafttragfähigkeit am Stützenfuß maßgebend werden. In beiden Fällen werden konstruktive Zusatzmaßnahmen vorgeschlagen. Aus diesem Grund werden diese Grenzzustände vorerst im Rahmen einer probabilistischen Berechnung nicht berücksichtigt.

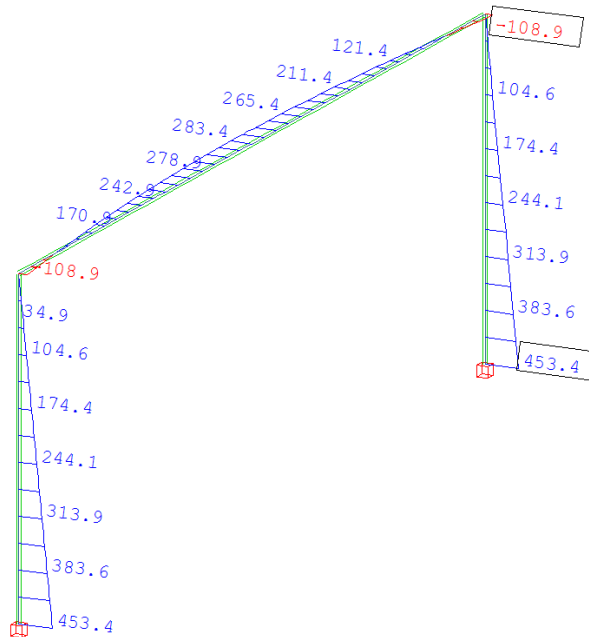


Abbildung 27 - Biegemoment M_y infolge Wind, Windzone I

Für die Außergewöhnliche Einwirkungskombination mit der Einwirkung infolge Anprall als Leiteinwirkung kann der ψ_2 -Faktor mit 0,5 für die Windbeanspruchung gewählt werden. Dieser Ansatz entspricht dem derzeitigen Stand, der in der Praxis so umgesetzt wird. Gemäß DIN EN 1990/NA, Tab. NA.A.1.2 (A)-(C) wäre die Windbeanspruchung bei der außergewöhnlichen Bemessungssituation nur mit 0,2 zu berücksichtigen.

Das Biegemoment M_y infolge Wind berechnet sich dann zu: $M_{yW} = 0,453 \text{ MNm} \times 0,5 = 0,2265 \text{ MNm}$

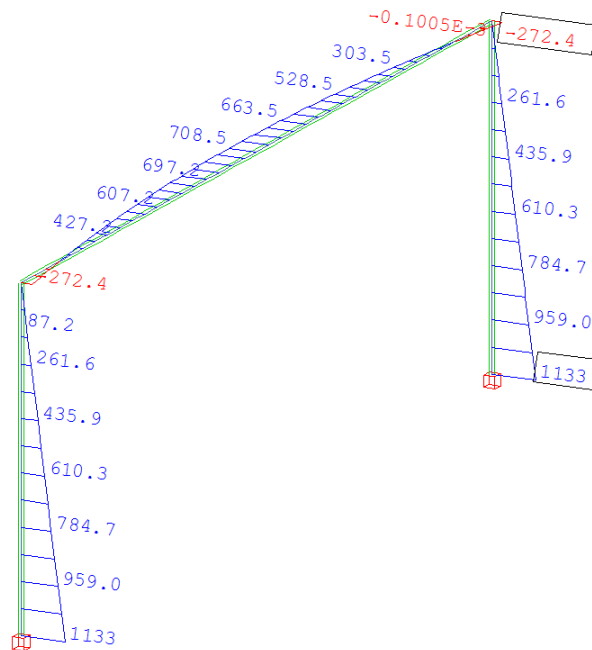


Abbildung 28 - Biegemoment M_y infolge Wind, Windzone IV

Das Biegemoment M_y infolge Wind berechnet sich dann zu: $M_{yW} = 1,133 \text{ MNm} \times 0,5 = 0,5665 \text{ MNm}$

Berechnung der Biegemomente am Stützenfuß infolge Anprall:

Biegemoment infolge Anprall:

Fall 1: Anpralllast 100 kN

Fall 2: Anpralllast 600 kN

Die Ersatzlast liegt 1,25 m über Oberkante der Straße. Die Regelhöhe für den Anprallsockel beträgt 0,90 m, so dass die Anpralllast in 35 cm Höhe über OK Sockel angreift.

$$M_{y1} = 100 \text{ kN} \times 0,35 \text{ m} = 35 \text{ kNm}$$

$$M_{y2} = 600 \text{ kN} \times 0,35 \text{ m} = 210 \text{ kNm}$$

In den Berechnungen wird der Grenzzustand der Biegetragfähigkeit am Stützenfuß betrachtet. Die Grenzzustandsfunktion für den Spannungsnachweis am Fußpunkt kann dabei wie folgt formuliert werden:

$$g(M_R) = U_R \cdot \text{zul}\sigma - \left(\frac{U_E \cdot N_G}{A} + \frac{U_{EA} \cdot M_{\text{Anprall}} + U_{EW} \cdot M_W}{W_y} \right) \quad (16)$$

Mit:

- U_R = Modellunsicherheit Biegebiegungswiderstand
- $\text{zul}\sigma$ = zulässige Baustahlspannung
- A = Querschnittsfläche Profil am Fußpunkt
- W_y = Widerstandsmoment Profil am Fußpunkt
- N_G = Normalkraft infolge Eigengewicht
- M_{Anprall} = Biegemoment infolge Anprall
- M_{Wind} = Biegemoment infolge Windbeanspruchung
- U_{EA} = Modellunsicherheit Anprall
- U_E = Modellunsicherheit Eigengewicht
- U_{EW} = Modellunsicherheit Wind

Die Verteilungsfunktionen sowie der zugehörige Variationskoeffizient werden gemäß [24] gewählt.

Tabelle 37: Modellierung der Zufallsvariablen für die Einwirkungen

Basisvariable	Verteilungsfunktion	Mittelwert	Variationskoeffizient
Anprall M_{Anprall} (H = 100 kN)	Gumbel(max)	0,035 MNm	50 %
Anprall M_{Anprall} (H = 600 kN)	Gumbel(max)	0,210 MNm	50 %
Wind M_{Wind} (Zone I)	Gumbel(max)	0,2265 MNm	20 %
Wind M_{Wind} (Zone IV)	Gumbel(max)	0,5665 MNm	20 %
Eigengewicht N_G	Normal (Gauss)	0,0315 MN	5 %
Modellunsicherheit Einwirkung U_E	Normal (Gauss)	1,0	5 %
Modellunsicherheit Einwirkung Wind U_{EW}	Normal (Gauss)	1,0	15 %
Modellunsicherheit Einwirkung Anprall U_{EA}	Normal (Gauss)	1,0	50 %

Tabelle 38 - Modellierung der Zufallsvariablen für die Widerstände

Basisvariable	Verteilungsfunktion	Mittelwert	Variationskoeffizient
Stahlspannung σ	Lognormal	353 MN/m ²	5 %
Querschnittsfläche A	Normal (Gauss)	0,0176 m ²	5 %
Widerstandsmoment W_y	Normal (Gauss)	0,00343 m ³	5 %
Modellunschärfe Widerstandsmodell U_R	Normal (Gauss)	1,0	5 %

Folgende Berechnungen wurden durchgeführt:

1. Berechnung: Dateiname „VZB_1“
- Windlastzone I und Anpralllast 100 kN in 1,25 m Höhe über OK Fahrbahn
2. Berechnung: Dateiname „VZB_2“
- Windlastzone I und Anpralllast 600 kN in 1,25 m Höhe über OK Fahrbahn
3. Berechnung: Dateiname „VZB_3“
- Windlastzone IV und Anpralllast 600 kN in 1,25 m Höhe über OK Fahrbahn

Die probabilistischen Berechnungen dienen als Grundlage für die Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung des Einflusses der Höhe der Anpralllast bei den unterschiedlichen Windlastzonen. Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit für die 1. Variante zeigte, dass die Zuverlässigkeit $\beta = 5,771$ bezogen auf 1 Jahr liegt. Dies Sicherheitsniveau entspricht den Vorgaben gemäß dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept, siehe hierzu den Ausdruck aus der probabilistischen Berechnung mit dem Programmsystem Comrel [28] gemäß Abbildung 29.

```

Numerical Results

*****
----- COMREL-TI (Version 8) -----
---- (c) Copyright: RCP GmbH (1989-2007) ----
*****

-----
Job name ..... :                               VZB_1
Failure criterion no. :           1
Comment : Biegenachweis Fußpunkt
Transformation type : Rosenblatt
Optimization algorithm: RFLS
-----

FORM-beta=  5.771; SORM-beta=  --  ; beta(Sampling)=  --  (IER=  0)
FORM-Pf=  3.95E-09; SORM-Pf=  --  ; Pf(Sampling)=  --

----- Statistics after COMREL-TI -----
State Function calls           =  101
State Funct. gradient evaluations =    9
Total computation time (CPU-secs.)=  0.06
The error indicator (IER) was =  0
*****

Reliability analysis is finished
    
```

Abbildung 29 - Ausdruck aus der Comrel-Berechnung für die Berechnung Nr. 1

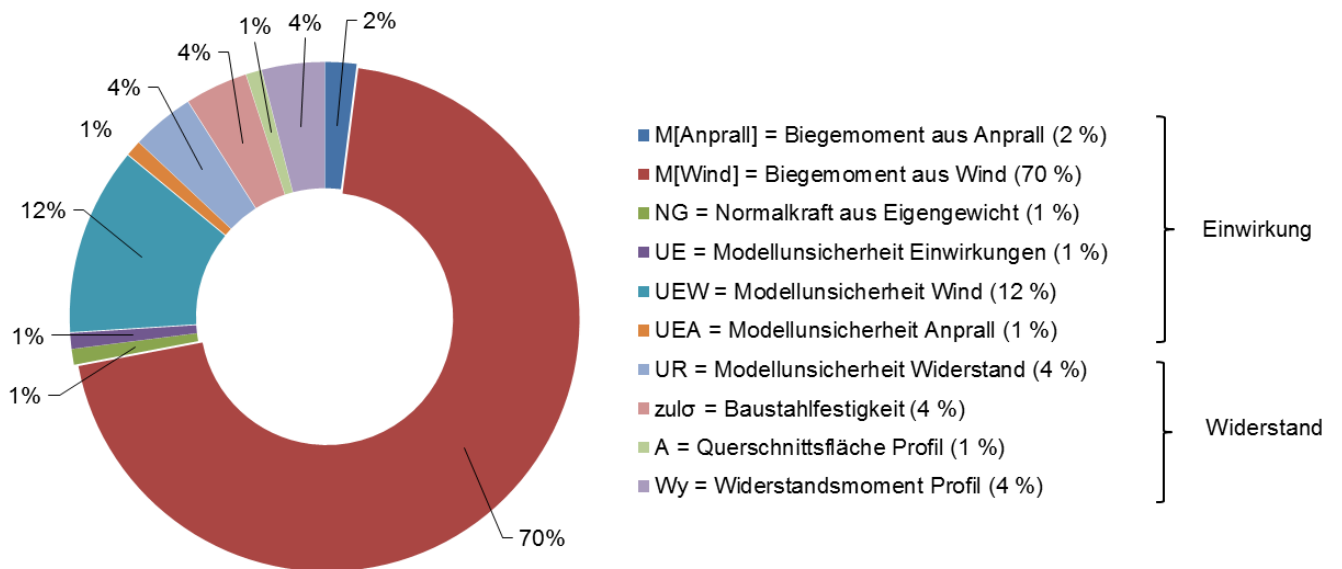


Abbildung 30 - Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung Nr. 1 (Windzone I, Anpralllast H = 100 kN)

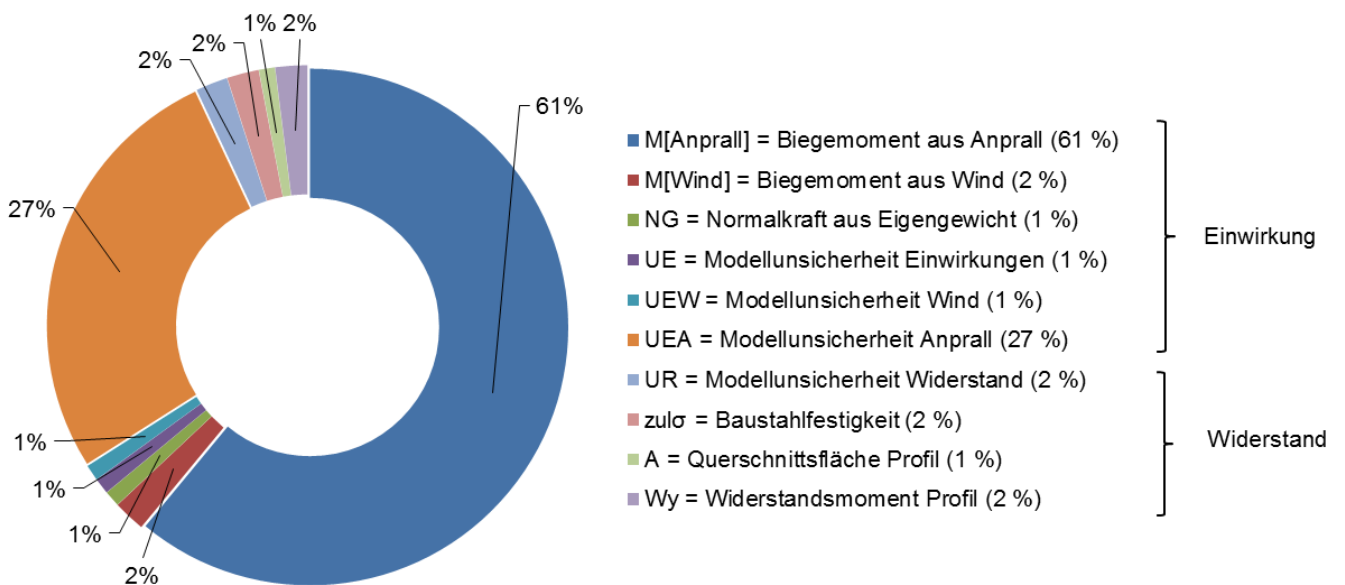


Abbildung 31 - Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung Nr. 2 (Windzone I, Anpralllast H = 600 kN)

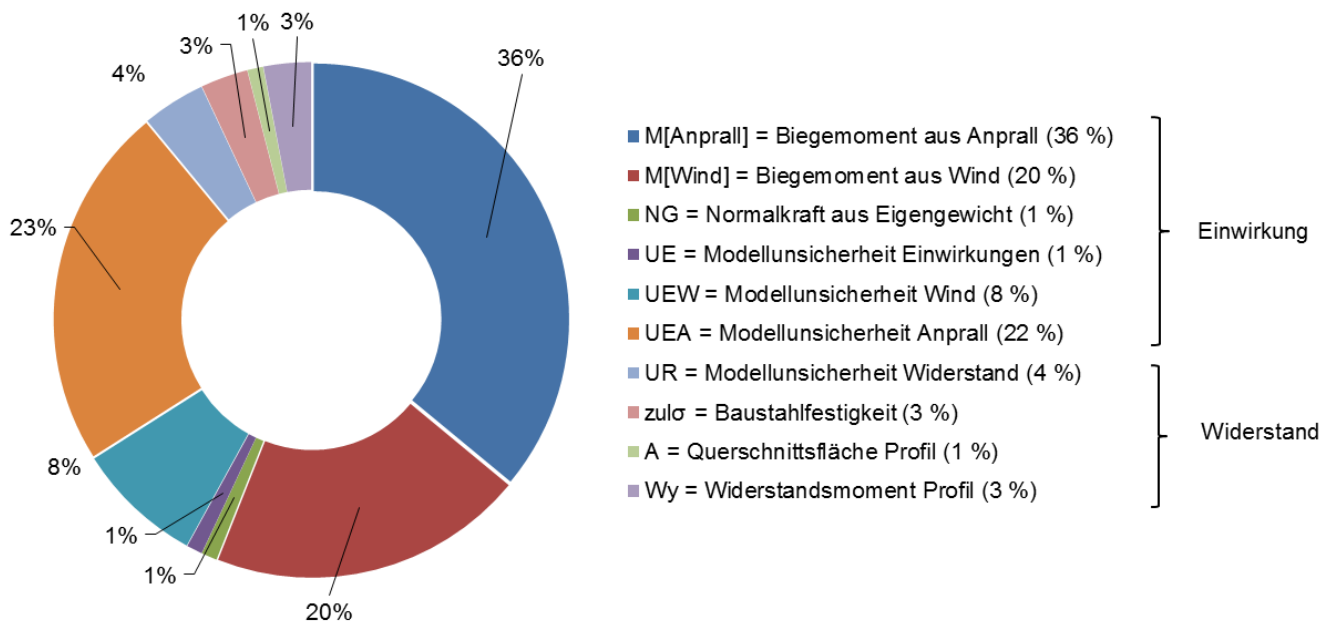


Abbildung 32 - Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für die Berechnung Nr. 3 (Windzone IV, H = Anpralllast H = 600 kN)

Zusammenfassend kann auf der Grundlage der Sensitivitätsanalyse folgendes festgestellt werden:

In der kleinsten Windzone, der Windlastzone I, spielt die Anpralllast bei H = 100 kN trotz des sehr hohen Variationskoeffizienten mit 50 % für die Sicherheit der Verkehrszeichenbrücke nur eine untergeordnete Rolle. Für die Bemessung der Verkehrszeichenbrücke ist hier die Windlast maßgebend. Bei einer Anpralllast von H = 600 kN in der Windzone I wird die Anpralllast maßgebend für die Bemessung und für die Zuverlässigkeit der Verkehrszeichenbrücke. Der Variationskoeffizient für die Anpralllast wurde auch in dieser Berechnung mit 50 % sehr hoch bewertet. Die Modellunsicherheit für die Modellierung des Anpralles wurde ebenso mit einem Variationskoeffizienten von 50 % gewählt. Dies führt u. a. auch dazu, dass die Wichtungsfaktoren, d. h. die Sensitivitäten, entsprechend hoch sind für den Anprall und die zugehörige Modellunsicherheit. Der hohe Variationskoeffizient bildet jedoch die tatsächlichen Verhältnisse bei einem Anprallereignis ab. Bei der Berechnung Nr. 3, d. h. bei Berücksichtigung der Windlastzone IV und einer Anpralllast von H = 600 kN, stellt sich ein ausgewogeneres Verhältnis des Einflusses der Basisvariablen auf die Zuverlässigkeit der Verkehrszeichenbrücke ein. So hat das Biegemoment infolge Anprall mit 36 % Einfluss den größten Einfluss, jedoch hat auch die Beanspruchung infolge Wind mit 20 % einen maßgeblichen Anteil. Der Variationskoeffizient für die Windbeanspruchung wurde mit 20 % gewählt.

Es zeigt sich in allen Berechnungen sehr deutlich, dass die Basisvariablen mit kleinen Variationskoeffizienten, d. h. mit einer kleinen Streuung um den Mittelwert, einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Sicherheit einer Verkehrszeichenbrücke haben. So können die Querschnittsgeometrie des Stiels, die Stahlspannung sowie das Eigengewicht sehr gut bestimmt werden und es liegen abgesicherte Informationen und Variationskoeffizienten vor. Der Einfluss dieser Basisvariablen liegt demzufolge bei 1 % bis 5 % und spielt daher eine eher untergeordnete Rolle.

Es lässt sich festhalten, dass für die Bemessung einer Verkehrszeichenbrücke die Kenntnis über die Windbeanspruchung sowie über die Anprallkräfte maßgebend ist.

4.3.4 Auswertung der zur Verfügung stehenden Daten in Hinblick auf die Anprallereignisse

Es kann festgestellt werden, dass nur wenige Daten in Hinblick auf Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken trotz intensiver Nachfragen und eigenen Anfragen zur Verfügung gestellt werden konnten. Für Mautbrücken sowie für Wechselverkehrszeichenträger konnten dagegen keine Daten recherchiert werden. Es ist für Verkehrszeichenbrücken möglich, mit den Daten eine generelle Aussage zu treffen, die einen ersten Anhaltswert für die Auftretenswahrscheinlichkeit von Anprallereignissen an Verkehrszeichenbrücken gibt. Es wird dabei unterschieden zwischen den Anprall an Verkehrszeichenbrücken im Bereich von Knotenpunkten und Zentren wie München oder Nürnberg sowie auf der freien Strecke. Es wurden Daten für den Großraum München und Nürnberg sowie für die freie Strecke im Bundesland Baden-Württemberg zur Verfügung gestellt. Festzuhalten ist, dass bei den Daten keine Angaben zur Verletzungen mit Schweregrad der Beteiligten enthalten sind. Aus diesem Grund, können zwar die Auftretenswahrscheinlichkeiten berechnet werden, jedoch ist es nicht möglich, im Rahmen der qualitativen Risikoanalyse diese Daten für die Berechnung der Gefährungsgrade zu verwenden.

Anbei erfolgt die Auswertung der zur Verfügung gestellten Daten für die Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken:

- A) Freie Strecke (Daten aus Baden-Württemberg)
 Betreutes Autobahnnetz: 410 km je Richtungsfahrbahn
 Anprallereignisse: 1 Unfallereignis in den letzten 10 bis 20 Jahren
- B) Knotenpunkte, ABD Südbayern Großraum München
 Betreutes Autobahnnetz: 900 km je Richtungsfahrbahn
 Anprallereignisse: 8 Unfallereignisse in 4 Jahren
- C) Knotenpunkte, ABD Nordbayern, Dienststelle Fürth, Großraum Nürnberg
 Betreutes Autobahnnetz: 560 km je Richtungsfahrbahn
 Anprallereignisse: 15 Unfallereignisse in 6 Jahren

Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit:

Aufgrund der geringumfänglichen Datengrundlage erfolgt eine vereinfachte statistische Auswertung. Die Umrechnung der Anprallereignisse und somit der Häufigkeitsverteilung auf einen Bezugszeitraum 1 Jahr erfolgt vereinfacht, in dem die Anzahl der Ereignisse in X Jahren linear auf 1 Jahr umgerechnet werden.

A) Freie Strecke (Daten Baden-Württemberg)

$$P(\text{Anprall}) = 1 \text{ Ereignis} / (2 \times 410 \text{ km}) = 0,0012 \quad (\text{bezogen auf 10 bis 15 Jahre})$$

Bezogen auf 1 Jahr:

$$P(\text{Anprall}) = 0,0012 \times (1 \text{ Jahr} / 15 \text{ Jahre}) = 0,00008 = 8 \times 10^{-5}$$

B) Knotenpunkt, Großraum München

$$P(\text{Anprall}) = 8 \text{ Ereignisse} / (2 \times 900 \text{ km}) = 0,0044 \quad (\text{bezogen auf 4 Jahre})$$

Bezogen auf 1 Jahr:

$$P(\text{Anprall}) = 0,0044 \times (1 \text{ Jahr} / 4 \text{ Jahre}) = 0,0011 = 1,1 \times 10^{-3}$$

C) Knotenpunkt, Großraum Nürnberg

$$P(\text{Anprall}) = 15 \text{ Ereignisse} / (2 \times 560 \text{ km}) = 0,0134 \text{ (bezogen auf 6 Jahre)}$$

Bezogen auf 1 Jahr:

$$P(\text{Anprall}) = 0,0134 \times (1 \text{ Jahr} / 6 \text{ Jahre}) = 0,0022 = 2,2 \times 10^{-3}$$

$$P(\text{Anprall gesamt, Mittelwert B) und C}) = (1,1 \times 10^{-3} + 2,2 \times 10^{-3}) / 2 = 1,7 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$$

Es handelt sich hier um alle Anprallereignisse, d. h. auch Anprall infolge Baustellenverkehr etc. Anprall infolge Baustellenverkehr stellt dabei einen hohen Anteil der Ereignisse dar, wie die nachfolgende Auswertung zeigt.

Gesamtanzahl der Anprallereignisse:	28 Anprallereignisse (ABD Nordbayern und ABD Südbayern)
Davon Anprall infolge Baustellenverkehr:	7 Anprallereignisse infolge Baustellenverkehr (5 Ereignisse ABD Nordbayern und 2 Ereignisse ABD Südbayern)

Die zur Verfügung gestellten Daten aus Baden-Württemberg, erlauben keine solche Auswertung, da zwischen den Anprallereignissen nicht unterschieden wurde, ob infolge Straßenverkehr oder Baustellenverkehr.

Den zur Verfügung gestellten Daten zufolge kann davon ausgegangen werden, dass bei den Anprallereignissen ein Ereignis mit Todesfolge aufgetreten ist. Es handelt sich hierbei um den Unfall Nr. 2 gemäß Tabelle 7.

Zudem ist 1 Anprallereignis mit Verlust der Tragfähigkeit der Verkehrszeichenbrücke aufgetreten.

Auswertung der Daten:

Auftretenswahrscheinlichkeit ohne Berücksichtigung der Anprallereignisse infolge Baustellenverkehr:

B) Knotenpunkt, Großraum München

$$P(\text{Anprall} / \text{km}) = 6 \text{ Ereignisse} / (2 \times 900 \text{ km}) = 0,0033 \text{ (bezogen auf 4 Jahre)}$$

Bezogen auf 1 Jahr:

$$P(\text{Anprall} / \text{km}) = 0,0033 \times (1 \text{ Jahr} / 4 \text{ Jahre}) = 0,00083 = 8,3 \times 10^{-4}$$

C) Knotenpunkt, Großraum Nürnberg

$$P(\text{Anprall} / \text{km}) = 10 \text{ Ereignisse} / (2 \times 560 \text{ km}) = 0,0089 \text{ (bezogen auf 6 Jahre)}$$

Bezogen auf 1 Jahr:

$$P(\text{Anprall} / \text{km}) = 0,0089 \times (1 \text{ Jahr} / 6 \text{ Jahre}) = 0,0014 = 1,4 \times 10^{-3}$$

$$\text{Mittelwert B) und C)} = (8,3 \times 10^{-4} + 1,4 \times 10^{-3}) / 2 = 1,12 \times 10^{-3}$$

Auftretenswahrscheinlichkeit für ein Anprallereignis mit Todesfolge:

In den zur Verfügung stehenden Daten der ABD Nordbayern und der ABD Südbayern hat sich 1 Anprallereignis mit Todesfolge ereignet. Der Bezugszeitraum wird vereinfacht gemittelt aus 4 Jahren (Datenbasis ABD Südbayern) und 6 Jahren (Datenbasis 6 Jahre).

Auftretenswahrscheinlichkeit im Bezugszeitraum 1 Jahr:

$$P(\text{Anprall mit Todesfolge / km}) = [1 \text{ Ereignis} / (2 \times 900 \text{ km} + 2 \times 560 \text{ km})] \times (1 / 5 \text{ Jahre})$$

$$P(\text{Anprall mit Todesfolge / km}) = 6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$$

Die Auswertung gilt für Autobahnen im Bereich von Knotenpunkten wie z. B. München oder Nürnberg. Für die Auswertung auf der freien Strecke liegen leider keine Daten vor.

Auftretenswahrscheinlichkeit für ein Anprallereignis mit Verlust der Tragfähigkeit der VZB:

In den zur Verfügung stehenden Daten der ABD Nordbayern und der ABD Südbayern hat sich 1 Anprallereignis mit Verlust der Tragfähigkeit der Verkehrszeichenbrücke ereignet. Die Verkehrszeichenbrücke wurde in diesem Fall umgefahren und ist auf die andere Richtungsfahrbahn gelangt. Der Bezugszeitraum wird vereinfacht gemittelt aus 4 Jahren (Datenbasis ABD Südbayern) und 6 Jahren (Datenbasis 6 Jahre).

Auftretenswahrscheinlichkeit im Bezugszeitraum 1 Jahr:

$$P(\text{Anprall mit Todesfolge / km}) = [1 \text{ Ereignis} / (2 \times 900 \text{ km} + 2 \times 560 \text{ km})] \times (1 / 5 \text{ Jahre})$$

$$P(\text{Anprall mit Todesfolge / km}) = 6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$$

Die Auswertung gilt für Autobahnen im Bereich von Knotenpunkten wie z. B. München oder Nürnberg. Für die Auswertung auf der freien Strecke liegen leider keine Daten vor.

Folgende Auftretenswahrscheinlichkeiten konnten mit den Daten berechnet werden:

- Freie Strecke:
 $P(\text{Anprall / km}) = 8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$

- Autobahnknotenpunkte im Bereich von Zentren wie München oder Nürnberg:
 $P(\text{Anprall / km}) = 1,7 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$
 $P(\text{Anprall / km ohne Baustellenverkehr}) = 1,12 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$
 $P(\text{Anprall mit Todesfolge / km}) = 6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$
 $P(\text{Anprall mit Verlust Tragfähigkeit VZB / km}) = 6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$

Es ist zu beachten, dass für die Auswertung die Daten von einem Streckennetz d. h. der Autobahnen mit einer Länge von insgesamt 1870 km je Richtungsfahrbahn, d. h. gesamt $2 \times 1870 \text{ km} = 3740 \text{ km}$ zur Verfügung standen.

Das gesamte Autobahnnetz in Deutschland hat eine Länge von 12993 km (Stand 2016) je Richtungsfahrbahn, d. h. gesamt $2 \times 12993 \text{ km} = 25986 \text{ km}$.

Somit konnten Daten von 14 % der Streckenlänge zur Verfügung gestellt werden.

Eine Übersicht über Unfall- und Todeshäufigkeiten, denen der Mensch im normalen Leben ausgesetzt ist, sind in [23] angegeben. Diese liegen bei

- 10^{-4} / Jahr für Verkehrsunfälle mit Motorfahrzeugen oder Stürze und
- 10^{-7} / Jahr für Blitzschlag, tödliche Bisse und Stiche von Tieren

In [23] werden auf der Basis dieser Daten und weiterer Auswertungen Anhaltswerte für akzeptable Wahrscheinlichkeiten angegeben. So wird für Versagensfälle mit Verlust der Tragfähigkeit eine Wahrscheinlichkeit von $P_f = 10^{-3}$ / Jahr als absolute obere Grenze angesehen. Als untere Grenze für eine Versagenswahrscheinlichkeit, z. B. Unfälle mit Todesfolge, wird in [23] 10^{-7} bis 10^{-8} angesehen.

Gemäß den Angaben in [[https://de.wikipedia.org/wiki/Autobahn_\(Deutschland\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Autobahn_(Deutschland))] hat es in Deutschland im Jahr 2014 auf Bundesautobahnen folgende Ereignisse gegeben:

- 18901 Unfälle mit Personenschaden im Jahr 2014
- 375 getötete Personen infolge Unfälle im Jahr 2014

Insgesamt zeigt sich, dass die Konstruktion der Verkehrszeichenbrücken bisher so gewählt ist, dass die Auftretenswahrscheinlichkeiten für Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken im erwartbaren und gegenüber den Unfallereignissen generell im üblichen Bereich liegen. Die Auftretenswahrscheinlichkeit für ein Anprallereignis, das zum Verlust der Tragfähigkeit der Verkehrszeichenbrücke führte, konnte mit $6,8 \times 10^{-5}$ / Jahr festgestellt werden. Diese liegt im Bereich der Empfehlungen für Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β [29] für die Tragfähigkeit mit einem Bezugszeitraum von 1 Jahr, der bei $\beta = 4,7$ ($1,3 \times 10^{-6}$) liegt.

Es kann daher festgestellt werden, dass die Lastansätze für Verkehrszeichenbrücke mit Berücksichtigung der Anpralllasten gemäß ZTV-ING mit 100 kN in 1,25 m Höhe über OK Fahrbahn zu einer Bemessung und Konstruktion der Verkehrszeichenbrücken führt, mit der die Anforderungen an die Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β erfüllt werden.

5. Numerische Untersuchungen zur Ableitung von statischen Ersatzlasten für Fahrzeuganprall an Verkehrszeichenbrücken

5.1 Grundlagen der Berechnungen und verwendete Programme

Zur Untersuchung des Last-Verformungsverhaltens und der auftretenden Kräften wurden folgende Berechnungsarten herangezogen:

- Statische, nichtlineare Berechnungen mit einer statischen Ersatzlast
- Dynamische, nichtlineare Berechnungen des tatsächlichen Anpralls (Crash simulation)

Die statischen nichtlinearen Berechnungen wurden mit Hilfe von Sofistik [27] durchgeführt und dienen der Ermittlung der Auswirkung von Faktoren wie z. B. der lokalen Steifenanordnung oder dem Einfluss der Materialverfestigung durch die schnelle Stoßbelastung. In Kap. 5.5 werden die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt. Eine genaue Erläuterung dieser Untersuchungen kann [19] entnommen werden.

Die dynamischen nichtlinearen Berechnungen wurden mit Hilfe von Siemens NX Nastran [10] durchgeführt und dienen der genauen Abschätzung der bei einem Stoß auftretenden Kräfte. Die Grundlagen der Modellierung sowie die Ergebnisse dieser Berechnungen können Kap. 5.6 entnommen werden.

5.2 Ausgewählte Unfallszenarien

In den vorangegangenen Kapiteln wurde auf verschiedene Unfallszenarien eingegangen. An Bundesautobahnen werden die Verkehrszeichenbrücken in den meisten Fällen mit einem Rückhaltesystem der Aufhaltstufe H4b gemäß [9] ausgeführt. Die Anprallprüfung für Systeme einer solchen Aufhaltstufe erfolgt mit einem 38-t-LKW. Im Zuge der Bearbeitung wurde festgelegt, dass die dynamischen Anprallberechnungen mit einem solchen LKW-Fahrzeug durchgeführt werden. Für die Ermittlung einer statischen Last wurde damit der Lastfall eines anprallenden LKWs mit einer Masse von 38 t und einer Anprallgeschwindigkeit von 65 km/h gemäß DIN EN 1317-2 [9] zugrunde gelegt. Letzteres entspricht einer Geschwindigkeit von 18,06 m/s.

Dieses Anprallszenario wird im Folgenden kritisch diskutiert. Es stellt sich heraus, dass dieses Szenario ein vollständiges Versagen der Stütze der Verkehrszeichenbrücke zur Folge hat und nur in sehr außergewöhnlichen Fällen der Realität entspricht. Mittels ingenieurmäßiger Überlegungen werden daraufhin verschiedene Szenarien hergeleitet, die die Anprallgeschwindigkeit und die tatsächlich auf den Stiel der Verkehrszeichenbrücke einwirkende Anprallmasse reduzieren und somit auch auf realistischeren Unfallszenarien abzielen. So wird z. B. die rückhaltende Wirkung des Anprallsockels mit herangezogen, da ein Großteil der aufprallenden Energie von diesem dissipiert wird.

5.2.1 Anprallereignis in Form eines überwiegend harten, bzw. weichen Stoßes

In Kap. 2.2.2 wird auf die Unterscheidung zwischen hartem und weichem Stoß eingegangen. Die zur Verfügung stehenden und ausgewerteten Unfallereignisse zeigen, dass je nach Anprallereignis von einem überwiegend harten oder weichen Stoß ausgegangen werden kann.

Die Unfallszenarien 9 und 10 sind klassische Beispiele für einen überwiegend harten Stoß. Die betroffenen Stützen hatten weder einen Anprallsockel noch waren sie durch ausreichend dimensionierte Fahrzeugrückhaltesysteme geschützt. Dadurch kam es zu einem ungebremsten Stoß des Lastkraftwagens auf die Stütze und entsprechend zu einem vollständigen Versagen der Stiele der Verkehrszeichenbrücken.

Die Anprallereignisse 2 und 3 sind klassische Beispiele für einen überwiegend weichen Stoß. Die betroffenen Stützen wiesen einen Anprallsockel auf oder/und waren durch ausreichend dimensionierte Fahrzeugrückhaltesysteme geschützt. Dadurch konnte das Fahrzeug vor dem Anprall auf die Stütze ausreichend abgebremst werden und die Verkehrszeichenbrücken haben nur plastische Verformungen erfahren und haben nicht vollständig versagt.

5.2.2 Szenario A – Unfallszenario für einen überwiegend harten Stoß

Betrachtet man also die Unfallszenarien 9 und 10, kann davon ausgegangen werden, dass das Fahrzeug ungehindert auf die Stütze anprallt. Entsprechend wird ein Stoß nach DIN EN 1317-2 [9] mit folgenden Randbedingungen simuliert (siehe auch Tabelle 39 und Kap. 2.1.1):

- Anprall durch einen LKW mit $m = 38 \text{ t}$
- Geschwindigkeit bei Anprall $v = 65 \text{ km/h} = 18,06 \text{ m/s}$

Ein Anprallwinkel von 20° (siehe DIN EN 1317-2 [9]) wird vernachlässigt (Vereinfachung auf der sicheren Seite liegend).

Tabelle 39 – Kriterien für Anprallprüfungen von Fahrzeugen aus [9]

Prüfung	Anprallgeschwindigkeit km/h	Anprallwinkel Grad	Gesamtprüfmasse kg	Fahrzeugart
TB 81	65	20	38 000	Sattelzug

5.2.3 Szenario B – Unfallszenario für einen überwiegend weichen Stoß

Neu zu errichtende Verkehrszeichenbrücken sind nach [4] mit einem Anprallsockel entsprechend den Richtzeichnungen „VZB 4“ und „VZB 5“ [6] zu versehen. Diese ragen mindestens $\Delta u = 2,0 \text{ m}$ vor den Stützen hervor (siehe auch Abbildungen 3 und 6) und sind so konstruiert und dafür ausgelegt, dass sie bei einem Anprall das anprallende Fahrzeug abbremsen.

Die Stoßenergie bei einem Anprall ist sehr viel größer im Vergleich zur Reibung des Sockels auf dem Untergrund. Aufgrund dessen wird die maximale statische Kapazität des Stahlbetonsockels $F_{So,Rd}$ voll aktiviert und bleibt werden des Anprallvorgangs konstant bestehen. Es gilt:

$$F_{So,Rd} = -m \cdot a_{So} = konst. \tag{17}$$

a_{So} Abbremsbeschleunigung durch den Stb.-Sockel (< 0)

Daraus ergibt sich der Zeitpunkt t_1 , an dem die Stütze den Anprall erfährt, zu:

$$t_1 = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot a_{So} \cdot \Delta u}}{a_{So}} \tag{18}$$

v_0 Anfangsgeschwindigkeit bei erstem Kontakt zwischen Sockel und Fahrzeug,

Δu Abstand zwischen Stütze und Vorderkante Anprallsockel.

Die reduzierte Geschwindigkeit v_1 , mit der das Fahrzeug theoretisch auf die Stütze trifft, kann auf folgenden Wert reduziert werden:

$$v_1 = \sqrt{v_0^2 + 2 \cdot a_{So} \cdot \Delta u} = \sqrt{v_0^2 - 2 \cdot \frac{F_{So,Rd}}{m} \cdot \Delta u} \tag{19}$$

Auch nach dem Stoß des Fahrzeuges an der Stütze wird ein Großteil der Fahrzeugmasse durch den Betonsockel selber weiter abgebremst. Die tatsächlich auf die Stütze wirkende Masse reduziert sich dadurch erheblich. Dabei ist bei dem unmittelbaren Anprall ein hoher Teil des Widerstandes durch die Trägheit der Struktur gegeben. Aufgrund dessen wird hier vereinfachend die gesamte Masse analog zu den Massenverhältnissen zwischen Stütze und Betonsockel aufgeteilt:

$$m_{1,St} = m_0 \cdot \frac{m_{St}}{m_{St} + m_{So}} \quad (20)$$

m_{St} Masse der Stütze,

m_{So} Masse des Stahlbetonsockels,

m_0 Masse des Fahrzeuges (Anprallkörper).

5.2.4 Szenario C – Unfallszenario für einen überwiegend weichen Stoß mit Berücksichtigung der Trägheit des Betonsockels

In der Realität wird bereits bei dem Anprall des Fahrzeuges auf den Betonsockel dessen Trägheit aktiviert. Die Kraft, die dabei zum Abbremsen des Fahrzeuges zur Verfügung steht, übertrifft deutlich die statische Widerstandskraft $F_{So,Rd}$ aus Reibung und Erddruck. Sie kann mittels dynamischer Grenzbetrachtungen folgendermaßen abgeschätzt werden:

Gleichung (21) beschreibt den Impuls zum Zeitpunkt unmittelbar vor und nach dem Stoß auf den Anprallsockel (die Impulsverluste aus Deformation werden zunächst vernachlässigt).

$$I_0 = m_0 \cdot v_0 = I_1 = m_{So} \cdot v_{1,So} + m_0 \cdot v_1 \quad (21)$$

I_0 Impuls unmittelbar vor dem Stoß auf den Anprallsockel,

I_1 Impuls unmittelbar nach dem Stoß auf den Anprallsockel,

$v_{1,So}$ Geschwindigkeit des Sockels nach dem Stoß,

v_1 Geschwindigkeit des Fahrzeuges (Anprallkörper) nach dem Stoß,

v_0 Geschwindigkeit des Fahrzeuges (Anprallkörper) vor dem Stoß,

m_0 Masse des Fahrzeuges (Anprallkörper).

Geht man davon aus, dass sich der Sockel auch nach dem Stoß langsamer bewegt als der Anprallkörper ($v_{1,So} < v_1$), lässt sich folgende Gleichung für die Geschwindigkeit v_1 des Fahrzeuges nach dem ersten Anprall mit dem Betonsockel herleiten:

$$v_1 = \frac{m_0}{m_{So} \cdot \frac{v_{1,So}}{v_1} + m_0} \cdot v_0 > \frac{m_0}{m_{So} + m_0} \cdot v_0 \quad (22)$$

Es sei hier erwähnt, dass die Grenzbetrachtung $v_{1,so} = v_1$ unter den oben genannten Bedingungen nicht auftreten kann, da die Masse des Erdkörpers hinter dem Sockel vollständig vernachlässigt wird. Dies führt zwar zu einer konservativen Einschätzung der widerstehenden Masse, es ist jedoch unrealistisch, dass der Anprallsockel mit einer Geschwindigkeit von mehreren Metern pro Sekunde in Bewegung kommt (für das nachfolgende Zahlenbeispiel wird z. B. eine Geschwindigkeit von > 8 m/s berechnet). Nichtsdestotrotz wird dieses Rechenbeispiel mitbetrachtet, um eine Größenordnung der möglichen Anprallgeschwindigkeit auf die Stütze zu erhalten und somit eine bessere Abschätzung für die tatsächlich eintretende Stoßbelastung auf die Stütze selber zu erhalten.

5.2.5 Szenarien D und E – Unfallszenario für einen überwiegend weichen Stoß mit Berücksichtigung der Trägheit des Betonsockels und der Energieverluste durch Formänderung

Wie groß die Restgeschwindigkeit tatsächlich zum Zeitpunkt des Stoßes vom Anprallkörper auf die Stütze ist, hängt in von vielen Faktoren ab. Dies sind z. B. die Verformungskapazität des Fahrzeuges sowie der genaue Stoßwinkel, etc. Aufgrund der großen Unsicherheiten lässt sich die tatsächlich eintretende Geschwindigkeit und wirksam anprallende Masse im Endeffekt nicht konkret mit einfachen Rechenmethoden berechnen. Eine konservative Abschätzung der Restgeschwindigkeit und wirksamen Masse kann jedoch mit Gleichung (19) und (22) bzw. Gleichung (20) hergeleitet werden.

Bei den oben genannten Überlegungen werden allerdings die Verluste der Anprallenergie aus Formänderung und die Aktivierung des Erdkörpers hinter dem Fundament noch vernachlässigt. Berücksichtigt man z. B. die volle Aktivierung des Erdkörpers hinter dem Sockel, kann man davon ausgehen, dass das Fahrzeug vor dem Anprall mit der Stütze zum kompletten Stillstand kommt.

Für eine bessere Abschätzung der Restgeschwindigkeit wird in einem stark vereinfachten Modell der Anprallkörper auf einen einfachen Rechteckblock mit der ungefähren Steifigkeit eines Betonsockels und der zugehörigen Reibung vorgestellt. Aus diesem Modell wird einmal die reduzierte Geschwindigkeit direkt entnommen und als weiteres Unfallszenario behandelt. In einem weiteren Schritt wird die Geschwindigkeit mit Hilfe von Gleichung (19) unter Annahme der mittleren Stoßkraft aus dem vereinfachten Modell berechnet und ebenfalls als weiteres Unfallszenario behandelt.

Als wirksame Masse werden jeweils die volle Masse und die nach Gleichung (20) reduzierte Masse angesetzt.

5.3 Ausgewählte Verkehrszeichenbrücke für die Referenzberechnungen

Verkehrszeichenbrücken können grundsätzlich als ein- oder mehrfeldrige Brücken oder als Kragarm ausgeführt werden (siehe Abbildung 33).



Abbildung 33 – Beispiele für typische Verkehrszeichenbrücke: A)

Die Unfallereignisse haben gezeigt, dass der dynamische Anprall lokal am Fußpunkt erfolgt (Anprall am Riegel aufgrund von Fahrerfehlverhalten meist infolge Baustellenverkehr wird hier nicht betrachtet). Der Anprall erfolgt dabei so schnell, dass der obere Teil der Brücke aufgrund der Trägheit sich zunächst nicht mitbewegt und wie eingespannt wirkt. Da dieses Phänomen unabhängig vom jeweiligen Tragkonstruktionstyp ist, werden die folgenden Berechnungen nur an einem Typ von Verkehrszeichenbrücken betrachtet [19].

In Abbildung 34 sind die ca. 920 von der ABD Nordbayern betreuten Verkehrszeichenbrücken nach verwendeten Baumaterialien unterteilt. Es zeigt sich, dass für die meisten metallischen Verkehrszeichenbrücken herkömmlicher Baustahl verwendet wird.

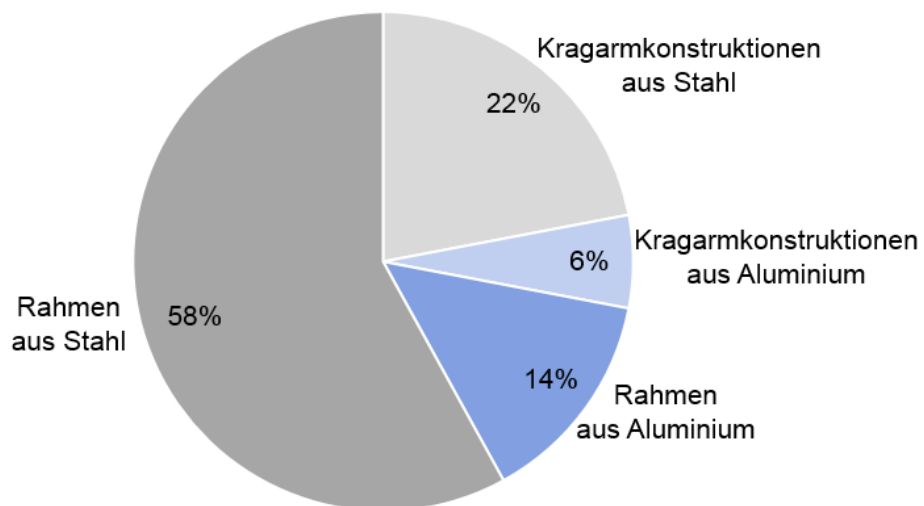


Abbildung 34 – Verteilung der ca. 920 von der ABD Nordbayern betreuten Verkehrszeichenbrücken aus Metall [19]

Als Referenzbauwerk wird somit eine Verkehrszeichenbrücke auf der A 9 Anschlussstelle AS Berg/Bad Steben bei km 251,954 in Fahrtrichtung Berlin betrachtet. Die statischen Berechnungen sowie die Konstruktionspläne zu der Brücke wurden von der Fa. RÖGER GmbH, Dillenburg [30] [31] zur Verfügung gestellt. Für Mautbrücken sowie für Wechselverkehrszeichenträger konnten trotz intensiver Bemühungen keine statistischen Daten in Hinblick auf Anprallereignisse recherchiert werden. Aus diesem Grunde wird als Referenzbauwerk für die dynamischen FE-Berechnungen das nachfolgend beschriebene Bauwerk gewählt.

Es handelt sich hierbei um eine einfeldrige Verkehrszeichenbrücke aus profilierten, geschweißten Hohlkastenträgern mit abgerundeten Ecken (siehe Abbildung 35). Die Gründung erfolgt auf Stahlbetonsockeln. Das Referenzbauwerk weist eine Spannweite von rund 19 m auf und überbrückt damit eine befestigte Fahrbahn von ca. 14,50 m, welche einem RQ 36 Regelquerschnitt für Autobahnen der Entwurfsklasse EKA 1 nach RAA (Richtlinie für die Anlage von Autobahnen) entspricht [30].

Die Rahmenkonstruktion besteht aus geschweißten Hohlkastenträgern mit abgerundeten Ecken aus feuerverzinktem Baustahl S 235 JR. Die Wandstärke beträgt 8 mm. Am Fußpunkt ist eine 30 mm starke Fußplatte vorgesehen, die mit dem Hohlkasten verschweißt ist. Nach VZB 10 Blatt 4 sind zur Verstärkung 10 mm starke Rippenbleche an der Vorder- und Hinterseite des Rahmenstiels geschweißt und mit der Fußplatte verbunden. Im Bereich des zu erwartenden Anpralls bzw. der normativ vorgesehenen Anprallhöhe ist laut Stahlbauplan des Referenzbauwerks eine Quersteife mit einer Blechstärke von $t = 6$ mm vorgesehen. Die Breite der Steife beträgt $b = 125$ mm, die Länge der Steife ist den Innenmaßen des Hohlkastenträgers angepasst. Die Abbildung 36 bis Abbildung 39 zeigen Auszüge der Konstruktion.

Die 25 cm langen Schubknaggen zur Aufnahme der horizontalen Kräfte sind im Gegensatz zur Darstellung in der Richtzeichnung um 90° gedreht und liegen parallel zur Längsseite des Hohlkastens. Zur Verankerung in den Betonsockel sind 14 feuerverzinkte Ankerschrauben M 36 der Güte 5.6 mit Kontermutter vorgesehen. Für den detaillierten Stahlbauplan und die statische Berechnung des Referenzbauwerks wird auf [30] [31] verwiesen.

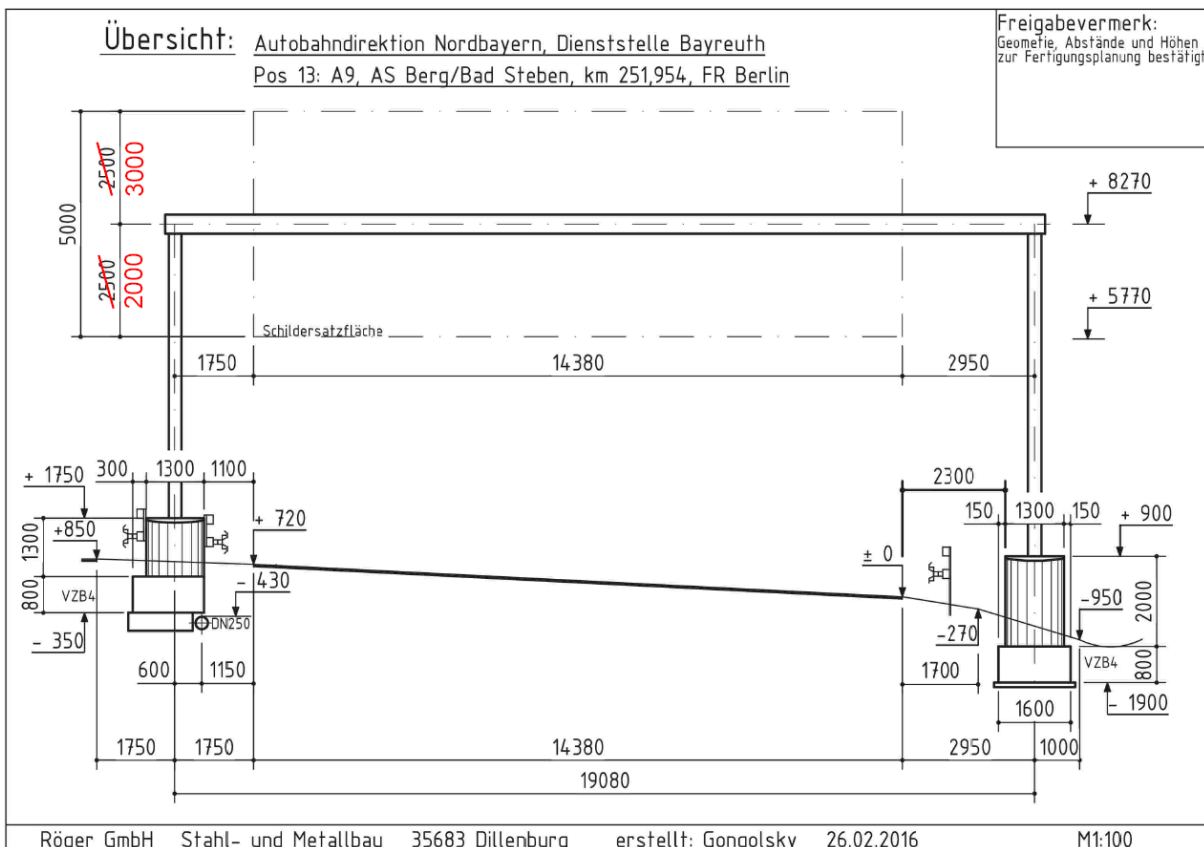


Abbildung 35 – Ansicht der Verkehrszeichenbrücke aus [30]

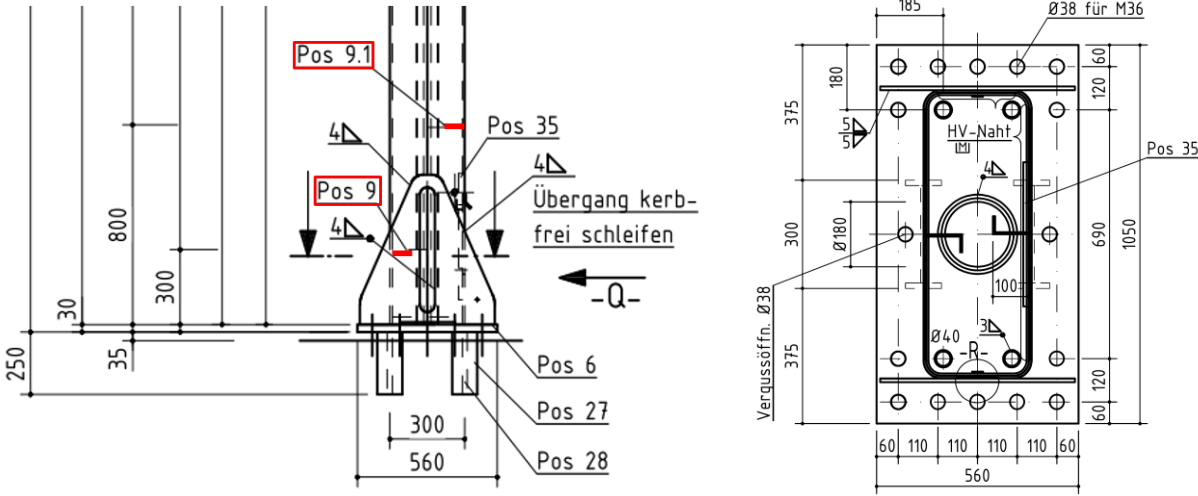


Abbildung 36 – Fußpunkt des Referenzbauwerks aus [30]

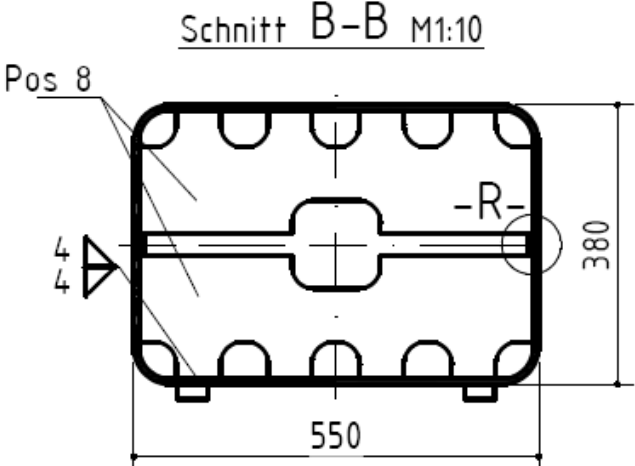


Abbildung 37 – Querschnitt durch den Riegel aus [30]

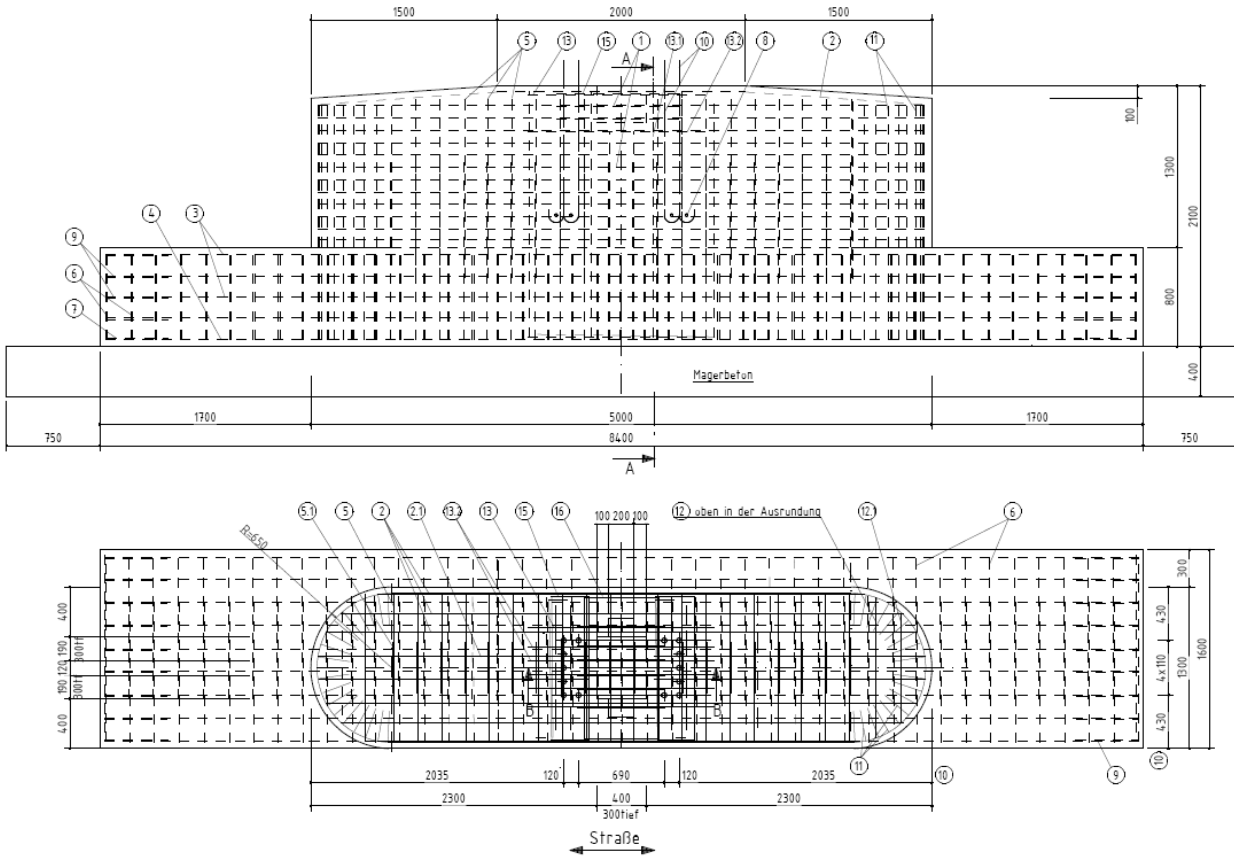


Abbildung 38 – Ansicht und Draufsicht Anprallsöckel aus [30]

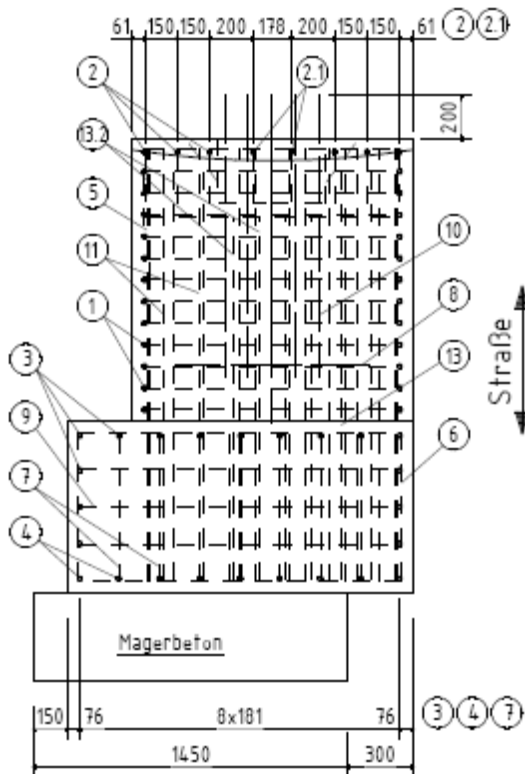


Abbildung 39 – Querschnitt durch den Anprallsöckel aus [30]

5.4 Konventionelle Bemessung des Referenzbauwerkes

In der Praxis werden Verkehrszeichenbrücken als ebene Stabwerksmodelle bemessen. Zur Vereinfachung bei den geführten Berechnungen wird das in Kapitel 5.3 eingeführte Referenzbauwerk noch folgendermaßen vereinfacht:

- Beide Stützenlängen werden gleich der kürzeren Stütze gesetzt ($L = 6,50$ m ab Betonsockel-OK);
- Die Verformungen im Baugrund werden zunächst vernachlässigt und die Auflagerbedingungen werden als vollständig eingespannt betrachtet; (die Lastweiterleitung der Kräfte in den Baugrund wird in Kapitel 5.4.2 gesondert betrachtet).

5.4.1 Betrachtete Bemessungssituationen

Unter Berücksichtigung der Lastansätze für verschiedene Windlastzonen und der Einwirkungs-Kombinationen für ständige und vorübergehende GZT - S/V und außergewöhnliche Lasten GZT - A nach DIN EN 1990 [29] wird die Auswirkung einer statisch äquivalenten Ersatzlast auf die Schnittgrößen und damit auf die Bemessung einer Verkehrszeichenbrücke untersucht.

Horizontalkräfte in Fahrtrichtung ergeben sich (1) aus der Windbelastung senkrecht zur Schildebene und (2) aus Fahrzeuganprall. Für das betrachtete Referenzbauwerk ist die Schildersatzfläche mit rund $14,40$ m x $5,00$ m angesetzt (siehe Abbildung 40 und Abbildung 41).

Neben den Eigenlasten des Rahmens, wird das Schildeigengewicht mit $0,50$ kN/m² (entspricht einem innenbeleuchteten Verkehrszeichen). Die Exzentrizität, die sich aus dem 50 cm vertikalen Versatz der Schildersatzfläche und aus der Lage des Verkehrszeichenschwerpunkts 45 cm vor dem Rahmenriegel ergeben, werden durch Momente entsprechend berücksichtigt [19].

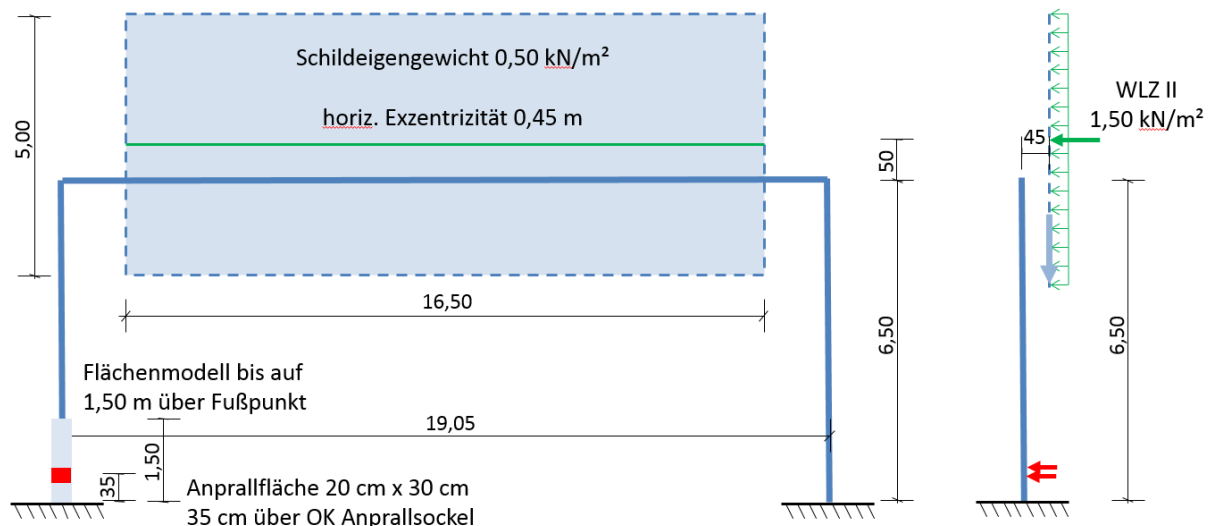


Abbildung 40 – Lastansätze am Referenzbauwerk für die Bemessungssituation GZT-S/V aus [19]

Die Momente und Querkräfte im Rahmenfuß, die sich aus den Bemessungssituationen GZT-S/V und GZT-A berechnen, sind in Abbildung 42 und Abbildung 43 in Abhängigkeit der anzunehmenden Windzonen aufgezeichnet.

Aufgrund des kurzen Hebelarmes zwischen Lastangriffspunkt der Anpralllast und Stützenfußes ist das resultierende Moment aus Anprall nur in den wenigsten Fällen maßgebend (siehe Abbildung 42). Nur für den Fall der Windlastzone I mit gleichzeitig angesetzter Anpralllast von 1500 kN wird die außergewöhnliche Bemessungssituation GZT-A nach DIN EN 1990 [29] maßgebend. Daraus lässt sich schließen, dass bei der Bemessung des Stützenfußes auf Momentenkapazität, d. h. Biegetragfähigkeit, die außergewöhnliche Bemessungssituation mit der Berücksichtigung des Anprallereignisses vernachlässigt werden kann. Diese Erkenntnis kann auch auf Schildbrücken mit geringerer Spannweite übertragen werden [19].

Im Falle der Querkraftbemessung ist der Einfluss der Bemessungslast aus Anprall maßgebend (siehe Abbildung 43): je nach Größe der Einwirkung für Anprall ist die Bemessungslast aus Anprall mit der Last aus Wind vergleichbar (Ansatz der Anpralllast nach ZTV-ING / RiZ-ING mit $F = 100 \text{ kN}$ [6] [4]) bzw. um ein Vielfaches größer (Ansatz der Anpralllast nach DIN EN 1991-1-7 [7]). Der Stützenfuß ist je nach gewähltem Ansatz für eine Bemessungslast von ca. 100 kN bzw. 1500 kN zu bemessen.

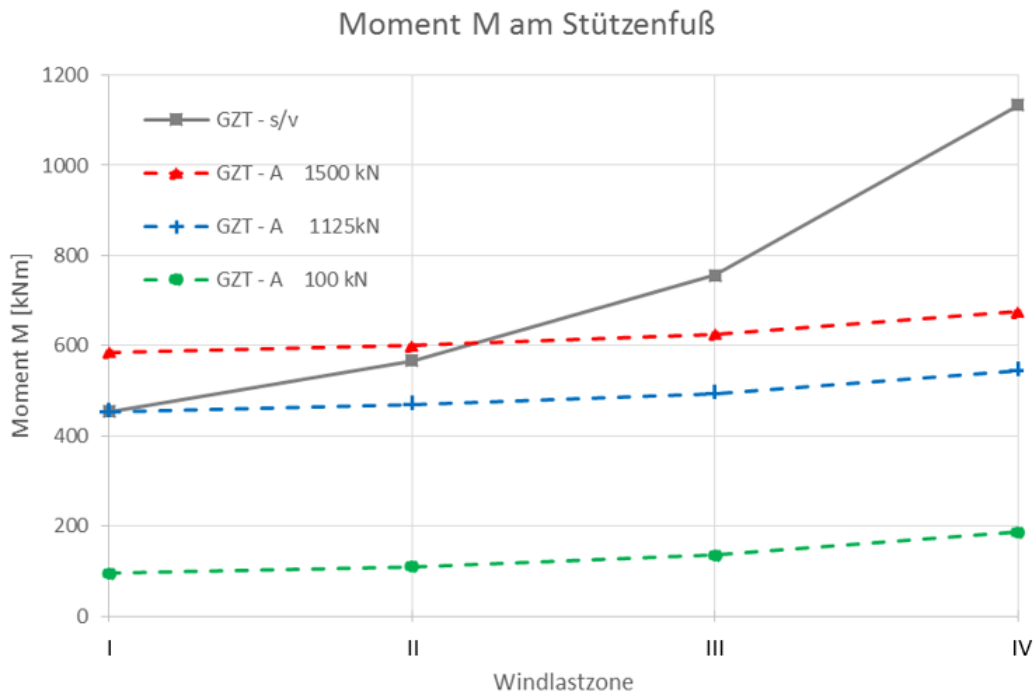


Abbildung 42 – Einspannmoment am Rahmenfuß der gestoßenen Stütze in Abhängigkeit der Windzone und der Anpralllast [19]

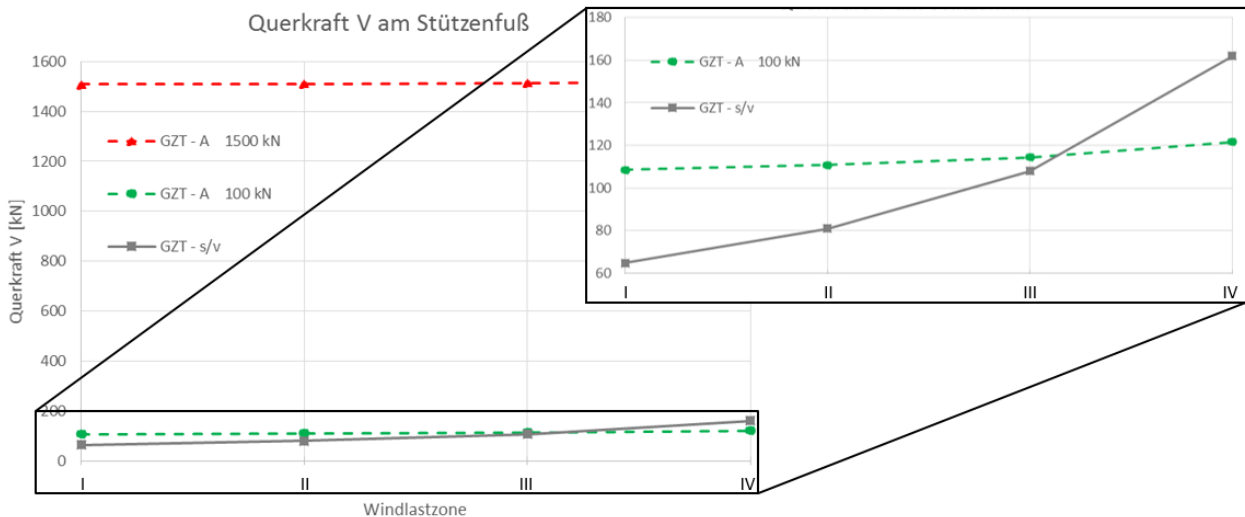


Abbildung 43 – Querkraft am Rahmenfuß der gestoßenen Stütze in Abhängigkeit der Windzone und der Anpralllast [19]

5.4.2 Weiterleitung der Kräfte in den Baugrund

Die Ersatzlasten für Fahrzeuganprall müssen nach ZTV-ING [4] für die Bemessung der unmittelbar betroffenen Bauteile angesetzt werden und deren Einleitung in das unmittelbar angrenzende Bauteil muss nachgewiesen werden. Das bedeutet, dass der Rahmenstiel und die Verbindung am Fußpunkt unter Berücksichtigung der Anpralllast zu bemessen ist. Der Nachweis für die Lasteinleitung in den Baugrund darf explizit entfallen [19].

Zur Beurteilung dieser Regelung wird der maximale Gleitwiderstand eines Fundamentes des Referenzbauwerks nach DIN EN 1997-1 [32] unter Berücksichtigung der ergänzenden Regelungen in der DIN 1054 [33] bestimmt. Die charakteristische Auflast auf dem Fundament aus Rahmen- und Schildeigengewicht beträgt für unser Referenzbauwerk ca. 39,5 kN. Das Eigengewicht des Anprallsockels samt Fundament ergibt sich zu 438,5 kN (siehe [19]).

Unter Annahme eines Reibungswinkels des Bodens von $\varphi'_k = 35^\circ$ darf bei einem Ortbetonfundament ein Reibungsbeiwert von $\tan 35^\circ / 1,1 = 0,64$ angesetzt werden. Daraus ergibt sich ein Gleitwiderstand von ca. 304 kN [19].

Der zusätzlich günstig wirkende passive Erddruck kann mit der Wichte des Bodens 19 kN/m^3 und dem passiven Erddruckbeiwert $K_{pgh} = 7,26$ (aus [34]) für einen Neigungswinkel des Erddrucks von $\delta^\circ_p = -2\varphi/3$ als Widerstand mit 90,5 kN angesetzt werden [19].

Im Grundbau ist laut Eurocode DIN EN 1997-1 [32] für den Gleitnachweis im Grenzzustand GEO - 2 ein zusätzlicher Sicherheitsbeiwert von $\gamma_Q = 1,10$ in der außergewöhnlichen Bemessungssituation GZT - A anzunehmen (siehe im Vergleich (24)). Daraus resultiert eine insgesamt aufnehmbare Last von ca. 358 kN.

In Anbetracht der vorliegenden Schadensbilder kann der Gleitwiderstand jedoch auch deutlich höher sein. Es gibt keine erkennbaren Hinweise aus den zur Verfügung stehenden Daten, die auf größere Verschiebungen des Anprallsockels in seiner Lage hinweisen.

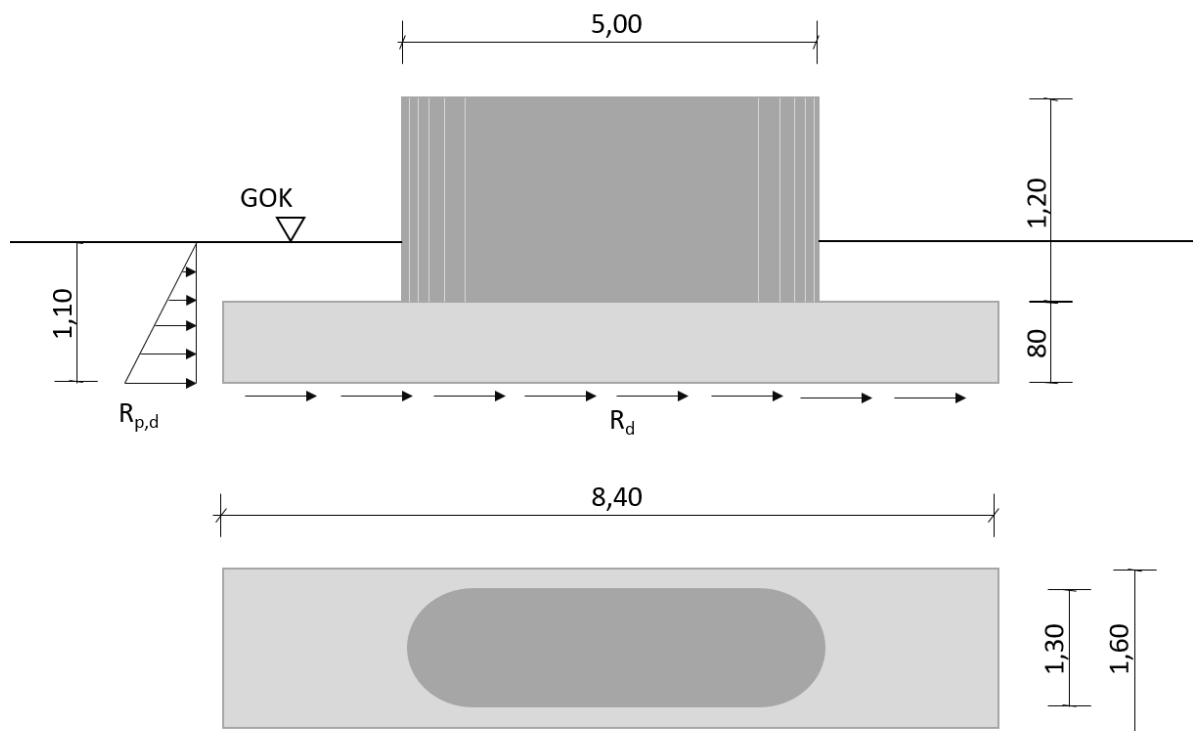


Abbildung 44 – Geometrie des Anprallsockels samt Fundament [19]

5.5 Numerische Berechnungen mit SOFiSTiK [27]

Das Referenzbauwerk wird in SOFiSTiK [27] als kombiniertes Stab-Schalenmodell modelliert. Aufgrund des kurzen Hebelarmes zwischen Fußpunkt des Stützenfußes und Anprallhöhe wird die Rahmenstütze nur lokal belastet und die auftretende Querkraft wird direkt in den Stützenfuß weitergeleitet. Um die benötigte Rechenleistung möglichst gering zu halten, wird daher nur der Stützenfuß im Anprallbereich als Schalenmodell mit hoher Netzfeinheit modelliert. Der Rest des Schilderbrückenrahmens wird als ebenes Stabmodell definiert [19]. In Abbildung 46 sind beispielhaft die Verformungen für den Lastfall Eigengewicht inkl. Schildeigengewicht aufgezeigt.

Die im nationalen Anwendungsdokument der DIN EN 1991-1-7 [7] definierte, 20 cm hohe Anprallersatzfläche wird in SOFiSTiK als unendlich steife Fläche modelliert und mit dem entsprechenden Bereich des Rahmenstiels gekoppelt. Diese Fläche wird weggesteuert in Anprallrichtung bewegt, um den Tragwiderstand der Verkehrszeichenbrüche zu ermitteln. Für weitere Details zur Modellierung wird auf [19] verwiesen.

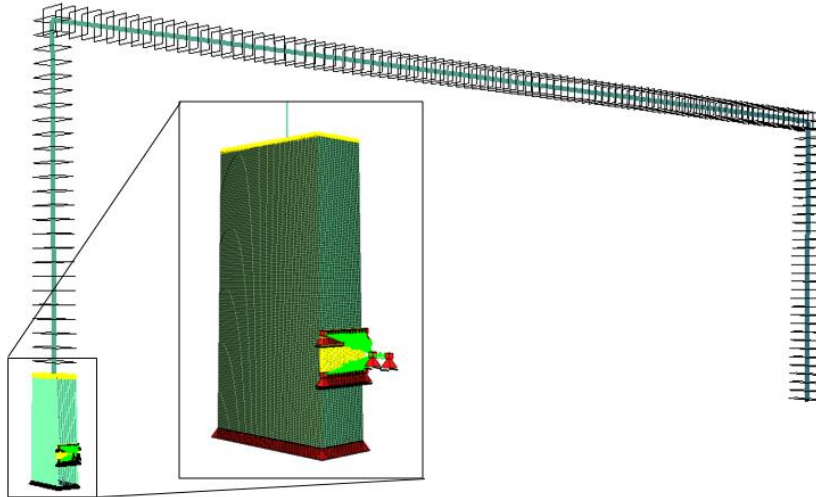


Abbildung 45 – Kombiniertes Stab-Schalenmodell aus [19]

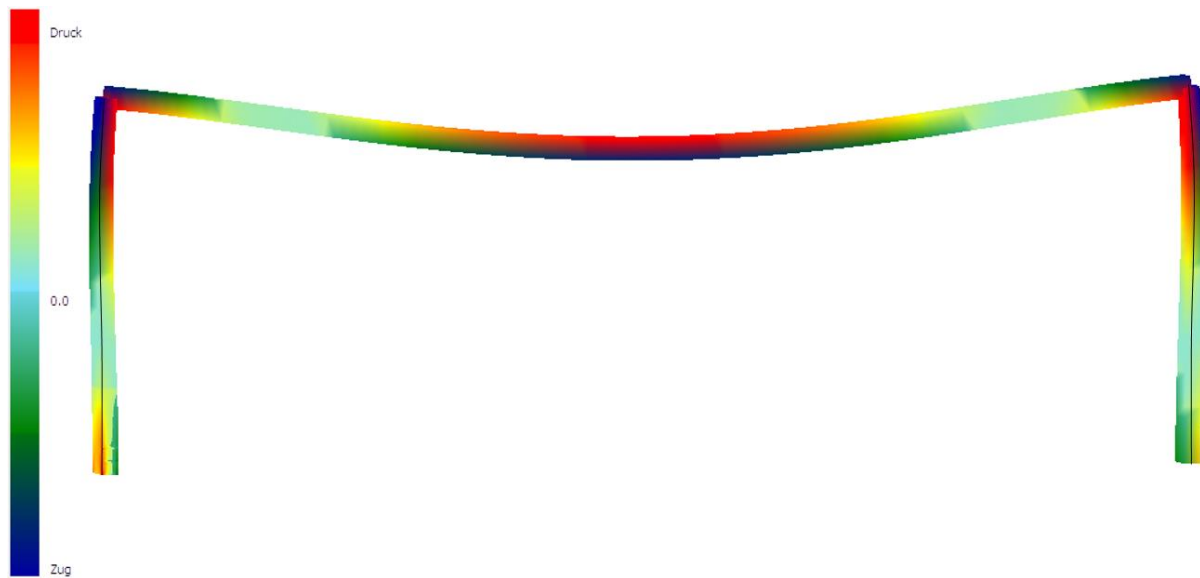


Abbildung 46 – Überhöhte Verformungsfigur und Normalspannungsverlauf im kombinierten Stab-Schalenmodell für den Lastfall Eigengewicht + Schildeigengewicht aus [19]

5.5.1 Aufbringen der Lasten

Neben den Eigenlasten des Rahmens inkl. Schildeigengewicht (siehe auch Kap. 5.4.1) wird eine Windlast von $1,50 \text{ kN/m}^2$ mit einem Kombinationsbeiwert für die außergewöhnliche Bemessungssituation GZT-A $\psi_1 = 0,2$ entsprechend Abbildung 40 berücksichtigt. Es wird Wind in Fahrtrichtung und entgegen der Fahrtrichtung berücksichtigt.

Das Aufbringen der Last aus Anprall erfolgt weggesteuert. Dazu werden die Knoten auf den Kanten der Anprallfläche mit Federn fest an einen ersten, in Anprallrichtung verschieblichen, Punkt gekoppelt. Dieser ist wiederum mit einer Feder fest an einen zweiten Punkt gekoppelt (siehe Abbildung 47). Durch Aufbringen der Verschiebung an diesem letzten Punkt und Auswertung der Kraft der letzten Koppelfeder kann direkt eine Last-Verformungskurve generiert werden, die den Widerstand des Referenzbauwerks bei Anprall darstellt [19].

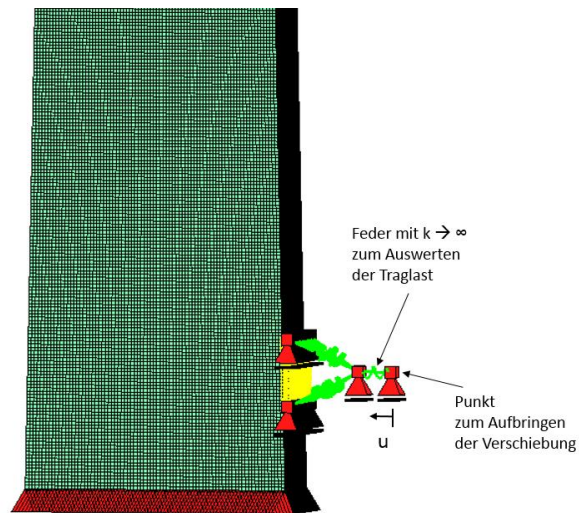


Abbildung 47 – Ausschnitt des FE-Modell, Stützenfuß als Flächenmodell mit Anprallfläche und Punkt zum Aufbringen der Verschiebung aus [19]

5.5.2 Betrachtete Steifenanordnung

Um den Einfluss der Steifen im unmittelbaren Anprallbereich zu quantifizieren, werden folgende Varianten untersucht:

- Var A Hohlkastenquerschnitt des Referenzbauwerks ohne Steifen (Abbildung 48 links)
- Var B Hohlkastenquerschnitt des Referenzbauwerks mit den Horizontalsteifen laut Stahlbauplan (Pos.9 und Pos.9.1 in Abbildung 36) in einer Höhe von 300 mm und 800 mm über dem Stützenfuß (Abbildung 48 Mitte)
- Var C Hohlkastenquerschnitt des Referenzbauwerks mit Horizontalsteifen 50 mm über und unter der Anprallfläche, auf einer Höhe von 200 mm und 500 mm über dem Stützenfuß (Abbildung 48 rechts)

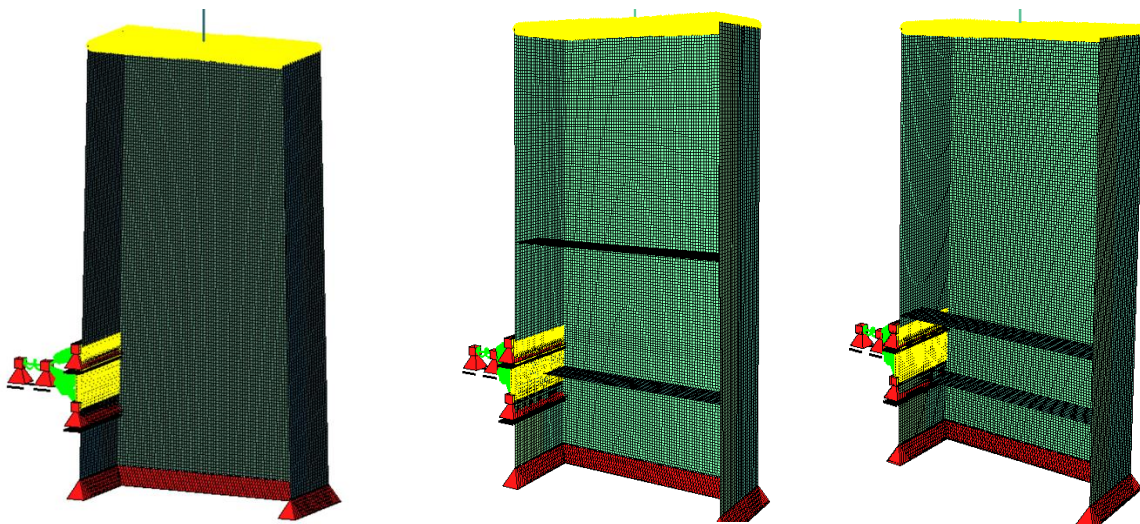


Abbildung 48 – Betrachtete FE-Modelle mit Variation der Steifenanordnung (von links nach rechts: Var A, B und C)

5.5.3 Betrachtete Werkstoffmodelle

Die Geschwindigkeiten bei Anprall verursachen hohe Dehnraten, die auch einen versteifenden und verfestigenden Einfluss auf das Material haben können (z. B. [35] [36]). Um diesen Einfluss zu quantifizieren, werden in [19] die in Abbildung 49 repräsentative Materialkennlinien hergeleitet.

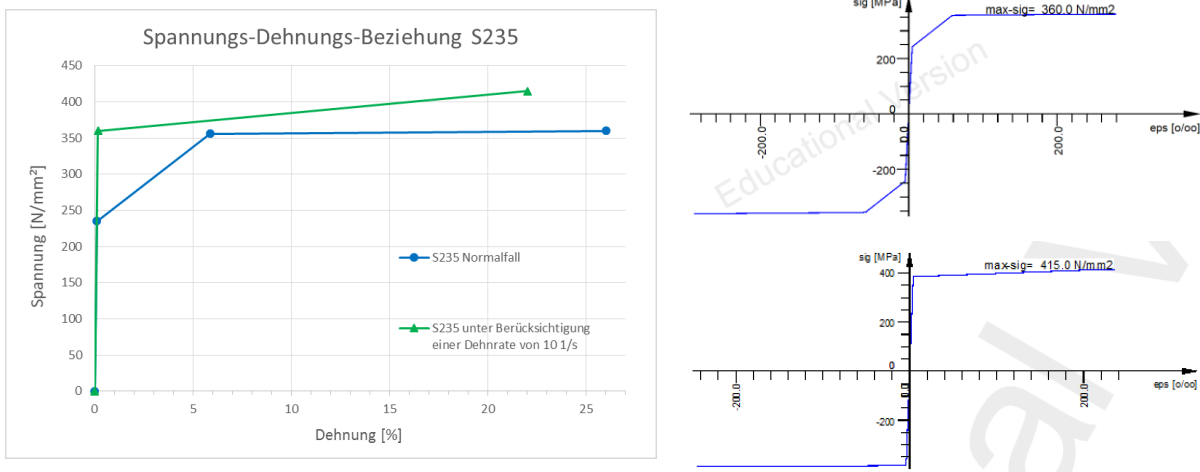


Abbildung 49 – Repräsentative Spannungs-Dehnungs-Linien für die FE-Modellierung in SOFiSTiK (links); Ausschnitte aus den Ausgabeprotokollen für das Modell b.1) (rechts oben), für das Modell b.2) (rechts unten) aus [19]

5.5.4 Ergebnis der Berechnungen in SOFiSTiK [27]

In Abbildung 50 sind die resultierenden Last-Verformungskurven der Verkehrszeichenbrücke für die Lastfälle (1) Wind in Fahrtrichtung, (2) Wind entgegen der Fahrtrichtung und (3) ohne Windeinwirkung dargestellt. Es zeigt sich, dass der Ansatz der Windrichtung und Windstärke einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Lastverformungskurve hat [19].

In Abbildung 51 sind die verschiedenen Last-Verformungskurven der Verkehrszeichenbrücke für die in Abbildung 48 aufgezeigten Steifenkonstellationen und unter Berücksichtigung der Dehnrates zusammengefasst. Es zeigt sich, dass die Variante A ohne Quersteifen den geringsten Widerstand aufweist. Variante B mit jeweils einer Beulsteife 5 cm oberhalb bzw. 5 cm unterhalb der Anprallfläche zeigt einen im Vergleich zu Variante A deutlich höheren Widerstand. Variante B zeigt die Konstellation unseres Referenzbauwerkes, wo eine der Quersteifen innerhalb der Anprallfläche liegt. Diese Variante weist den höchsten Tragwiderstand auf.

Wie zu erwarten hat der Einsatz von Steifen in der Nähe des Anprallbereiches einen deutlich höheren Widerstand und einen geringeren Abfall der Widerstandskraft im Post-Peak-Bereich zur Folge. Dabei gilt: je näher die Steifen an den Anprallbereichen liegen, desto größer ist ihre Wirkung. Der beste Effekt wird erreicht, wenn eine Quersteife im Anprallbereich liegt.

Des Weiteren zeigt sich, dass der Effekt der Dehnrates nicht vernachlässigbar ist. Die Berücksichtigung einer modifizierten Werkstoffkennlinie wegen hoher Dehnrates infolge von Fahrzeuganprall (siehe Var B.2) führt zu einem deutlich höheren Widerstand (Steigerung von ca. 50%). Der stärker abfallende Ast lässt sich auf lokales Stabilitätsversagen zurückführen. Im Gegensatz zum Spannungsnachweis spielt die Streckgrenze hier eine untergeordnete Rolle.

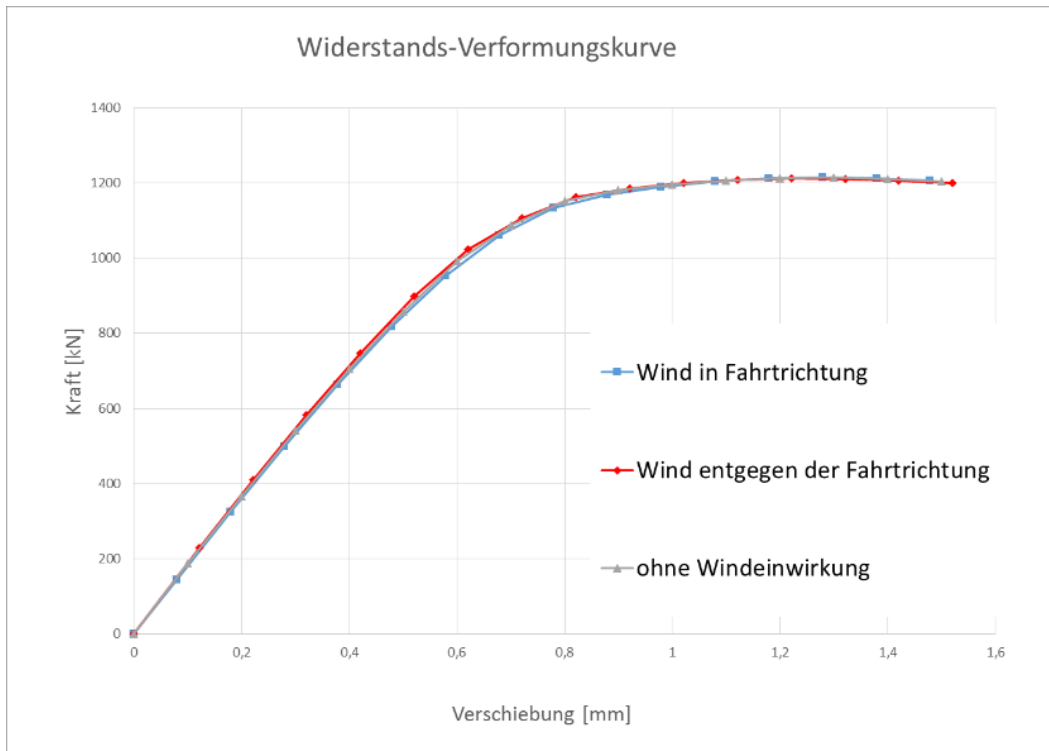


Abbildung 50 – Ergebnisse der Traglastiteration in Abhängigkeit von der Windrichtung aus [19]

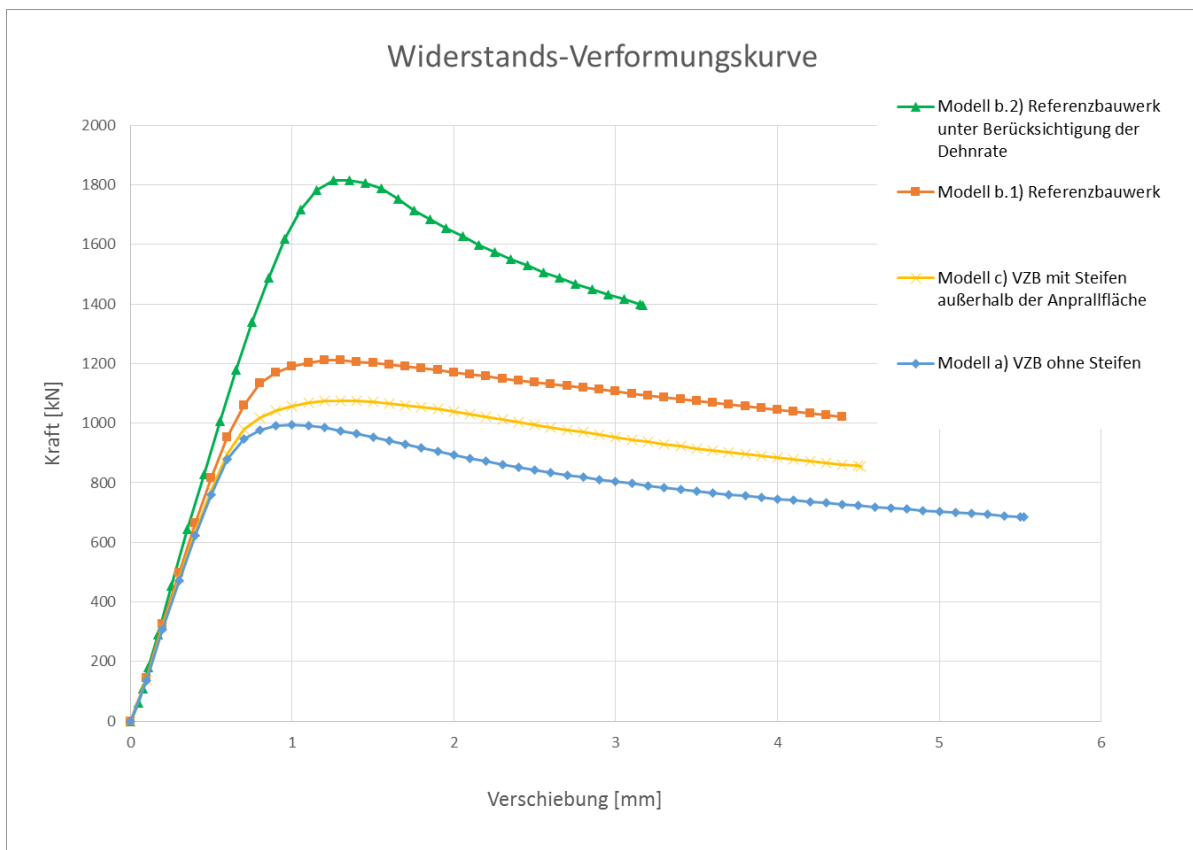


Abbildung 51 – Widerstands-Verformungskurven für die untersuchten Berechnungsmodelle aus [19]

5.6 Numerische Berechnungen mit Siemens NX Nastran [10] für einen dynamischen Anprall

Die zuvor aufgeführten Anprallsimulationen wurden mittels Siemens NX Nastran [10] mit einem sogenannten dynamisch-transienten nichtlinearen Berechnungsalgorithmus berechnet (siehe SOL 601,129 Advanced Nonlinear Transient [37]). Dieser Löser ermöglicht es, die dynamischen Effekte eines Anpralles mit gleichzeitigem Einsatz von nichtlinearen Kontaktelementen zu modellieren.

5.6.1 Grundlagen der Modellierung

Modellierung der Verkehrszeichenbrücke

Die Abbildung 52 zeigt das vereinfachte FE-Modell der Rahmenbrücke. Die Geometrie wurde in Analogie zu Kap. 5.4 vereinfacht. D.h. beide Stützen wurden mit der kürzeren der beiden Stützenlängen modelliert und der Stützen- und Riegelquerschnitt als Rechteck vereinfacht (siehe Abbildung 53).

Sämtliche Querschnitte sind mittels PSHELL-Elementen [37] modelliert. Dabei handelt es sich um CQUAD-4 Schalenelemente [37] mit vier Auswertungspunkten. Die Schalendicke der Elemente wurde entsprechend dem Referenzbauwerk aus Kap. 5.2.4 gewählt (siehe Abbildung 54).

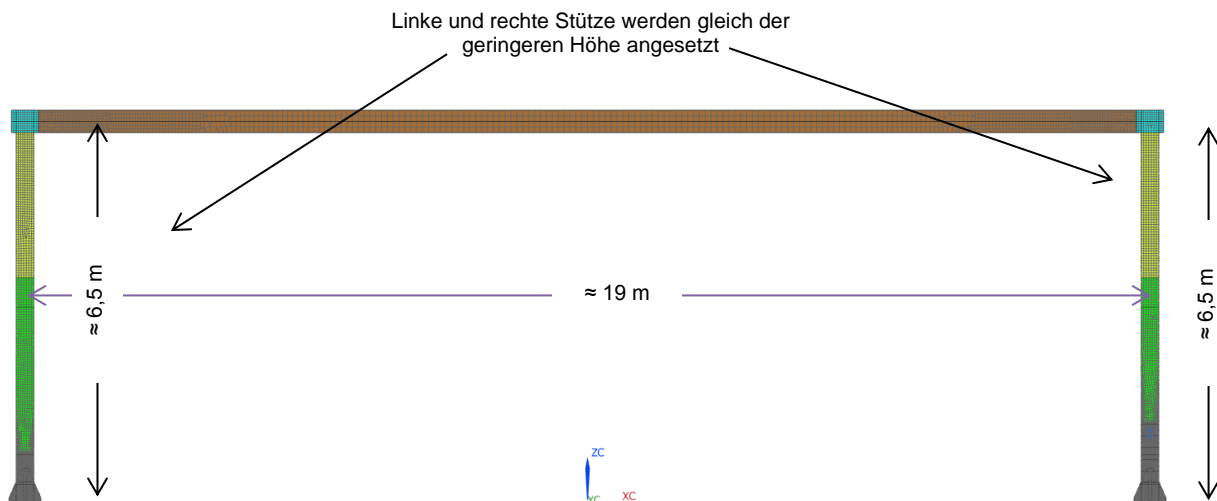


Abbildung 52 - Vereinfachtes Rechenmodell in Siemens NX Nastran [10]

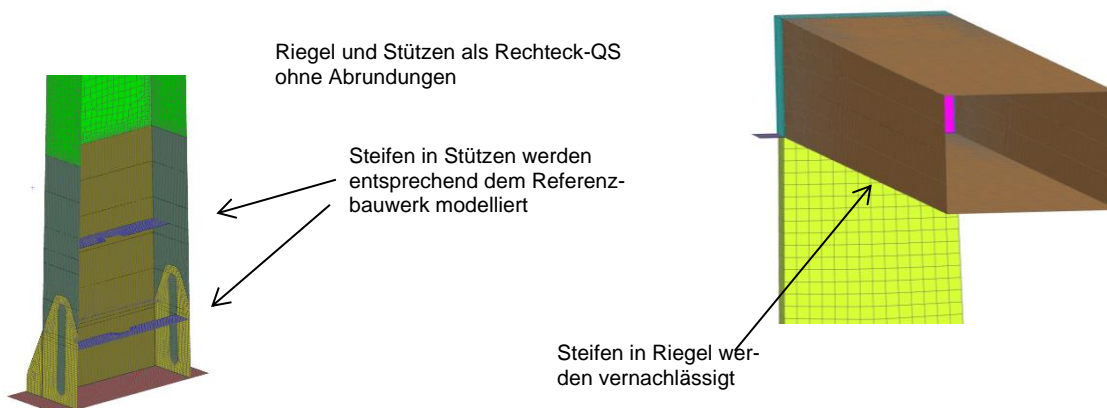


Abbildung 53 – Vereinfachte Rechteckquerschnitte des Rechenmodells in Siemens NX Nastran [10]

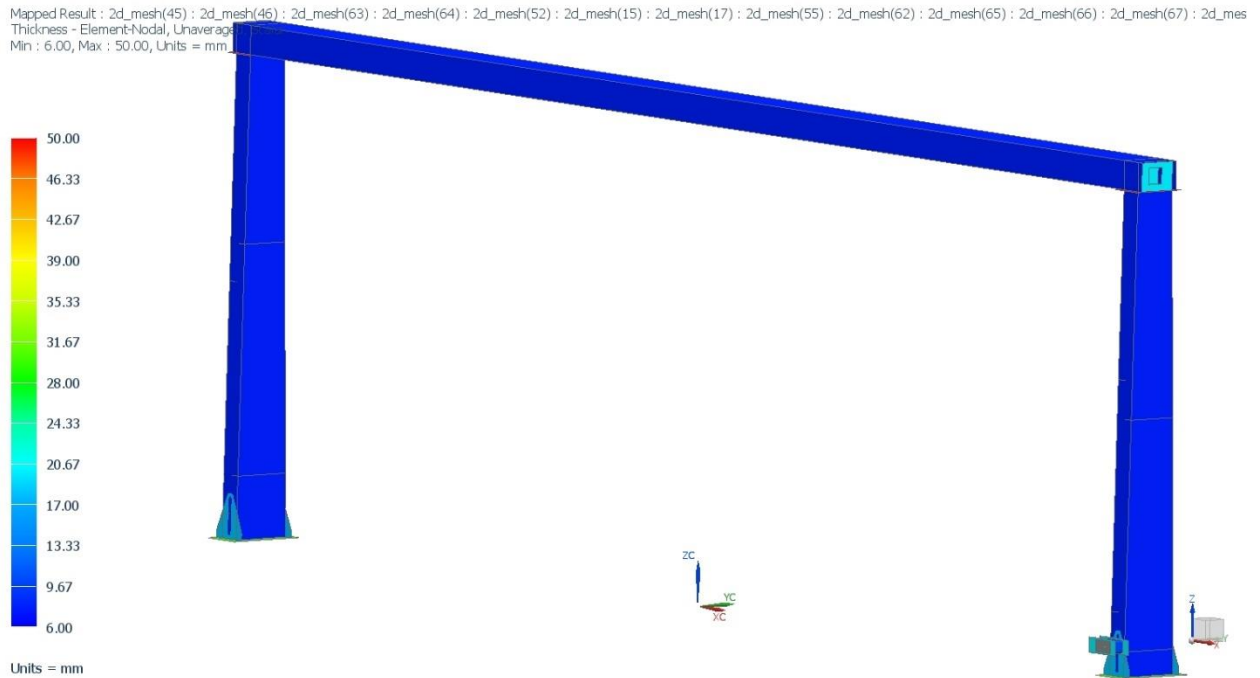


Abbildung 54 – Modellierte Verkehrszeichenbrücken mit farblich gekennzeichneten Elementdicken

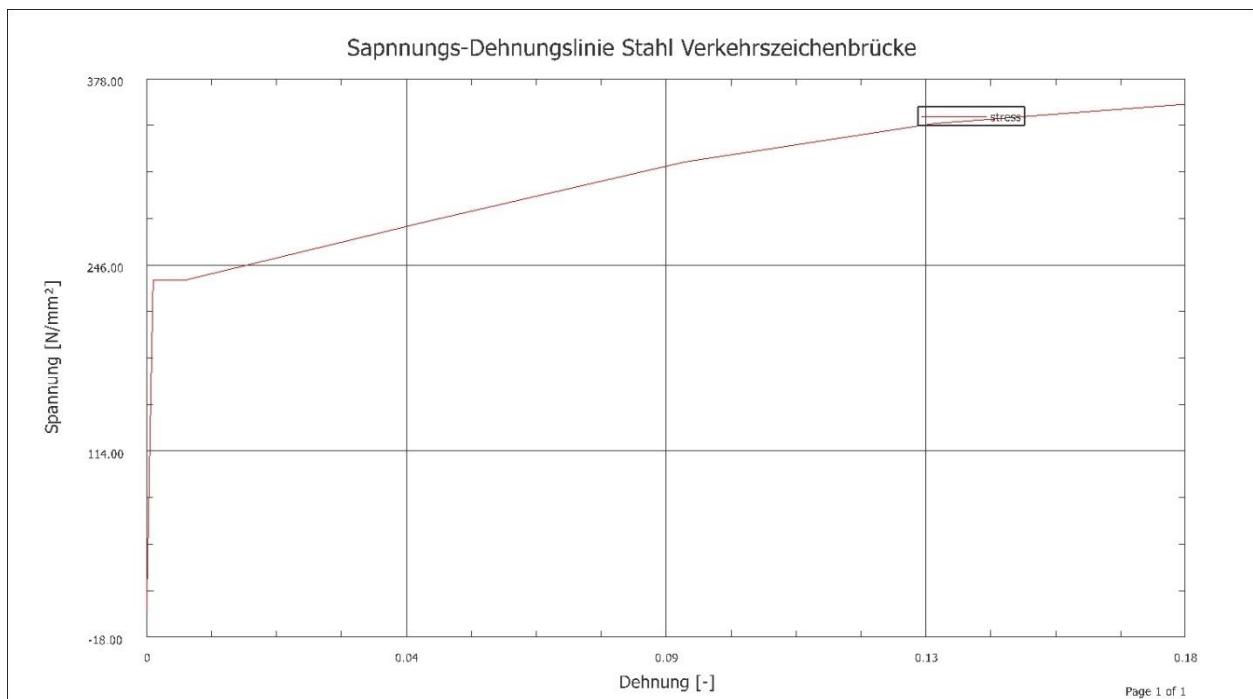


Abbildung 55 – Spannungs-Dehnungslinie des für die Verkehrszeichenbrücke verwendeten Materials

Als Material wird ein Stahl S235 angenommen. Die gewählte Spannungsdehnungslinie ist in Abbildung 55 aufgeführt. Die Einflüsse aus Dehnrates etc. werden bewusst nicht mitbetrachtet. Die verwendete Materialkurve entspricht somit der in Abbildung 49 als S235 Normalfall betrachteten Materialkurve.

Das Eigengewicht der Verkehrszeichenbrücke wird intern durch die Wichte des Stahls und die Applikation der Erdbeschleunigung in z-Richtung miteinberechnet. Die Einwirkungen aus dem Verkehrsschild werden ohne Annahme der Lasten aus Wind extern auf die Längskanten des Riegels aufgetragen.

Um ein sogenanntes Einschwingen in den ersten Zeitschritten der dynamisch-transienten nichtlinearen Simulation zu verhindern, werden die Erdbeschleunigung und die Lasten aus dem Schild in einer vorangegangenen linear-statischen Berechnung durchgeführt. Aus dieser Berechnung werden die Verformungen der

Verkehrszeichenbrücke exportiert (siehe Abbildung 56) und anschließend als Anfangsbedingung gleichzeitig mit den Lasten der dynamisch transienten nichtlinearen Berechnung aufgesetzt. Durch dieses Vorgehen wird der sogenannte Einschwingvorgang so gering wie möglich gehalten. In Abbildung 58 und Abbildung 59 wird die Entwicklung der Stahlspannungen während der ersten Zeititerationen gezeigt. Es kommt lediglich zu numerischen Spannungsschwankungen, welche nach einigen Zeitschritten abgeklungen sind. Der Anprall findet erst nach diesem Phänomen statt.

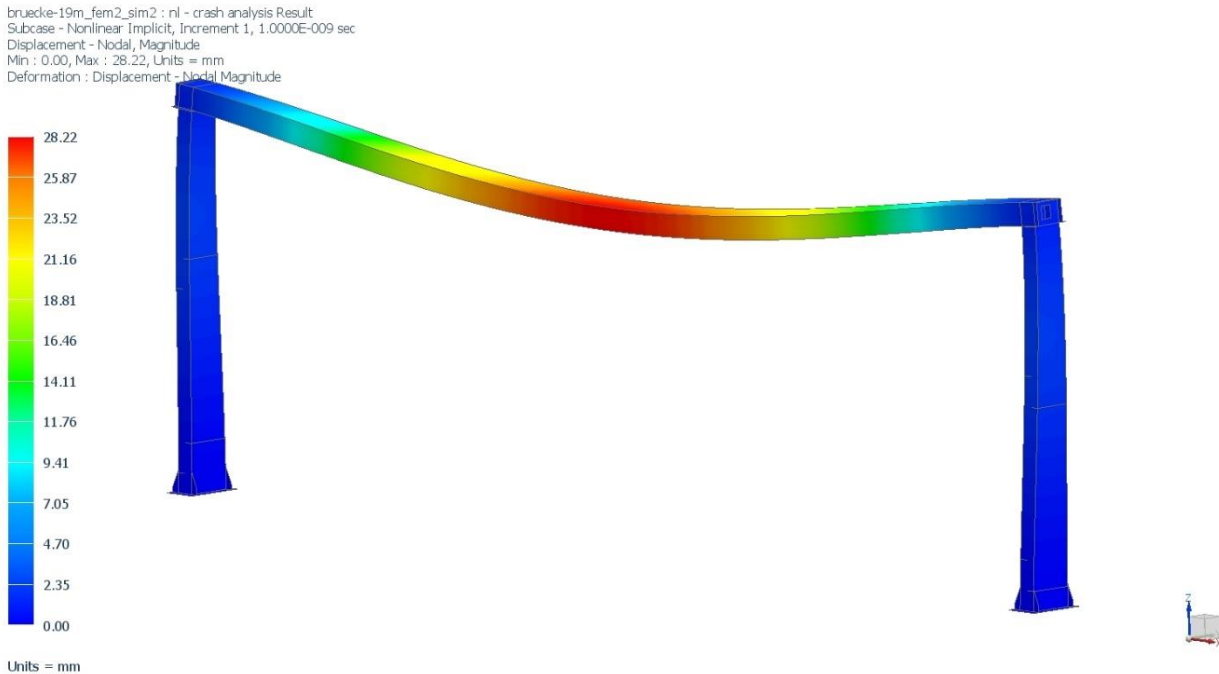


Abbildung 56 – Aufgesetzte Anfangsverformungen (hier stark vergrößert)

Auflagerbedingungen der Verkehrszeichenbrücke

Die Verkehrszeichenbrücke wird als vollständig eingespannt gerechnet. Dazu werden die Schnittkanten zwischen Stütze und Fußplatte mittels unendlich steifen und eindimensionalen SPIDER-Elementen [37] an den Mittelpunkt der Fußplatte gekoppelt, der wiederum in allen 6 Freiheitsgraden (Verschiebung und Verdrehung in x-, y- und z-Richtung) festgehalten wird (siehe Abbildung 57).

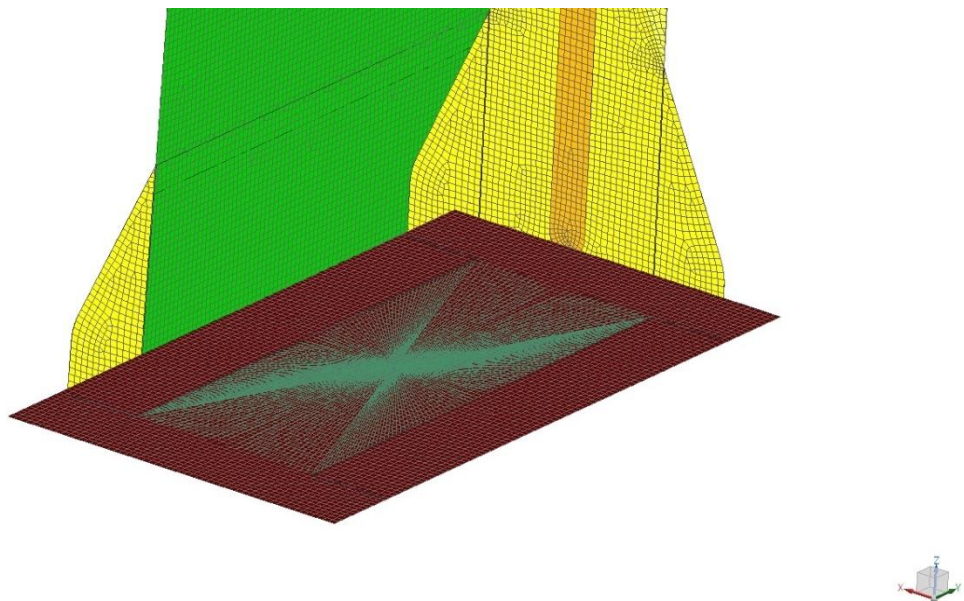


Abbildung 57 – Fuß einspannung der Verkehrszeichenbrücke mittels SPIDER-Elementen [37]

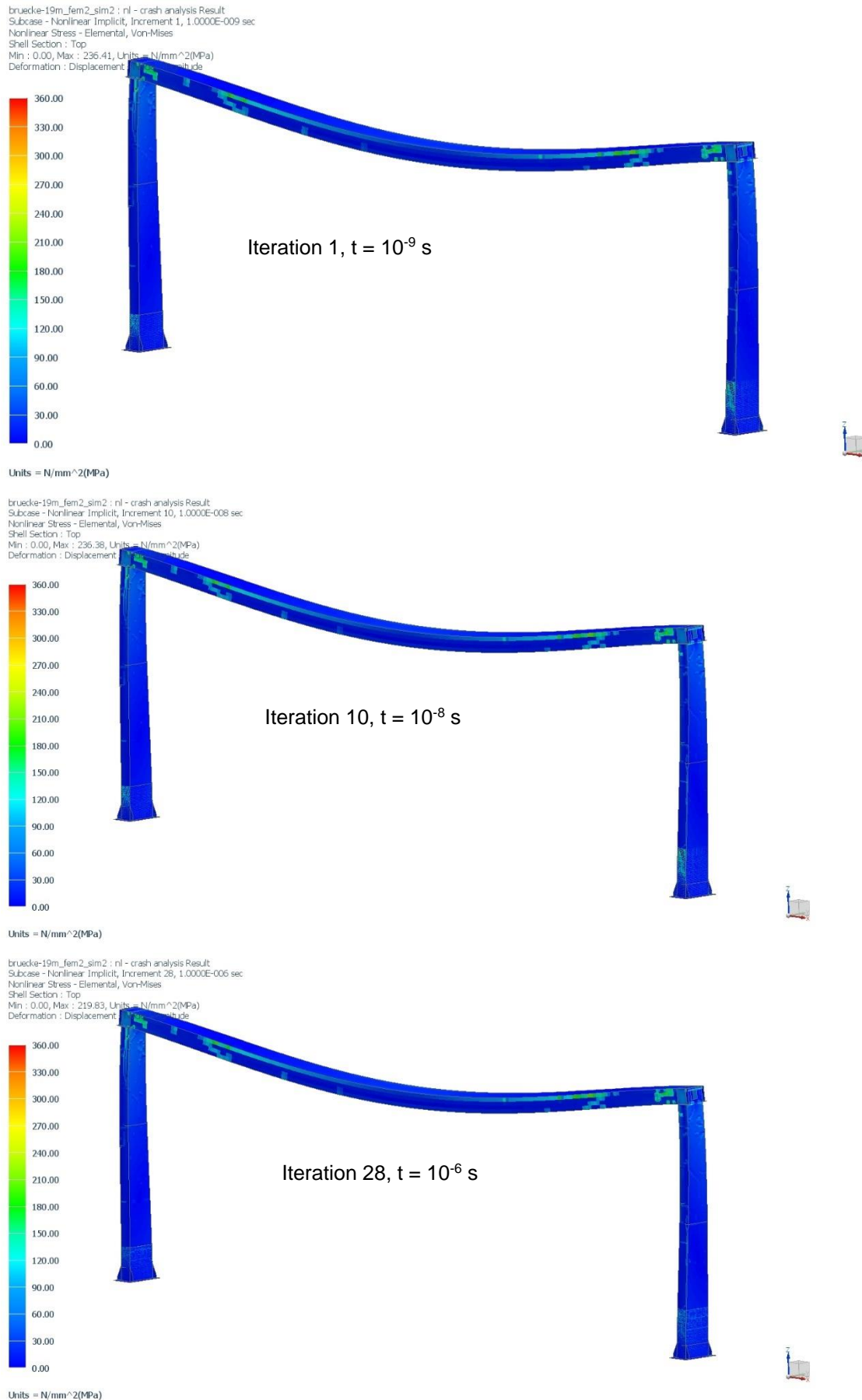


Abbildung 58 – Entwicklung der Stahlspannungen während des Einschwingvorgangs, Teil 1

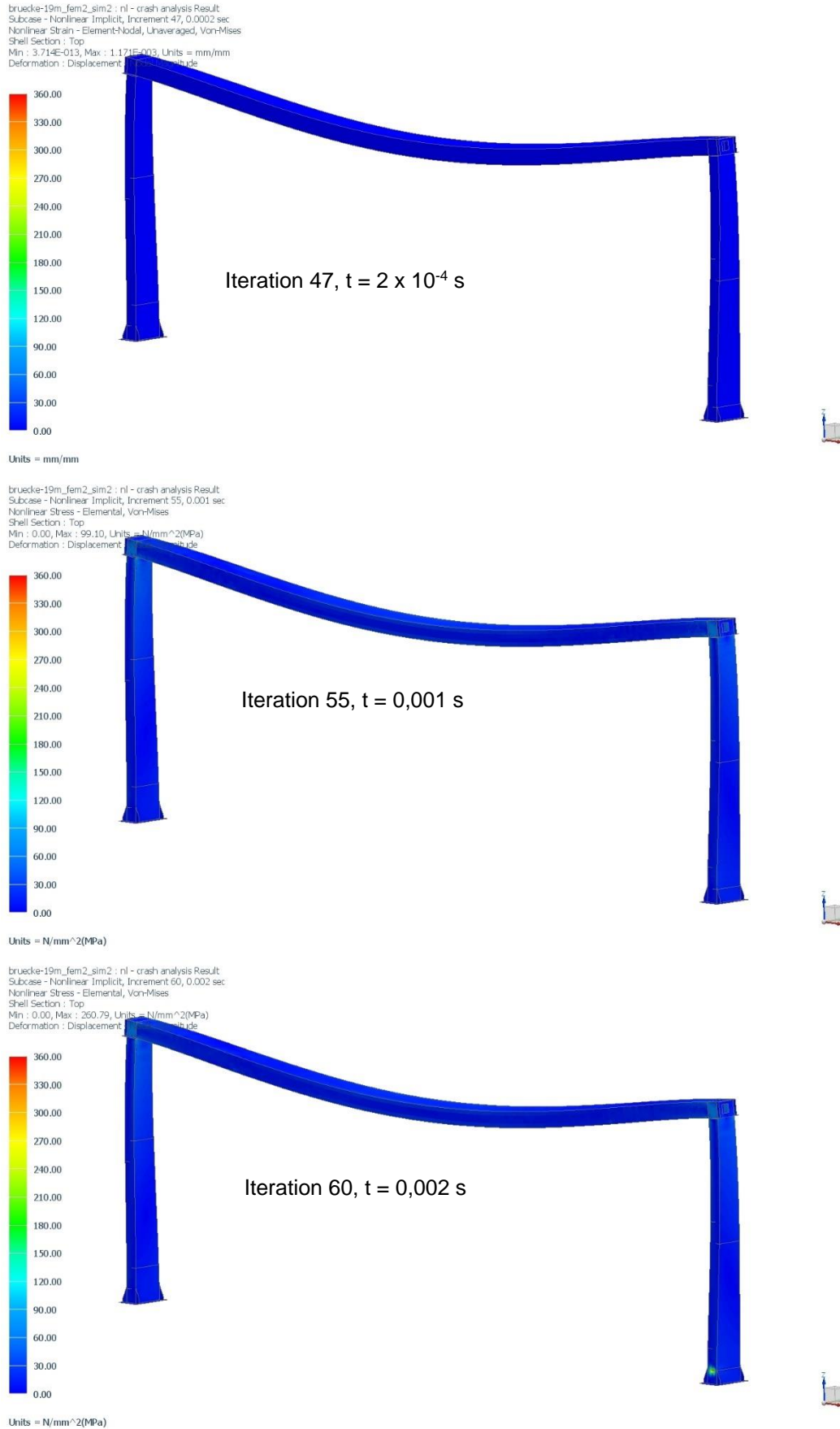


Abbildung 59 – Entwicklung der Stahlspannungen während des Einschwingvorgangs, Teil 2

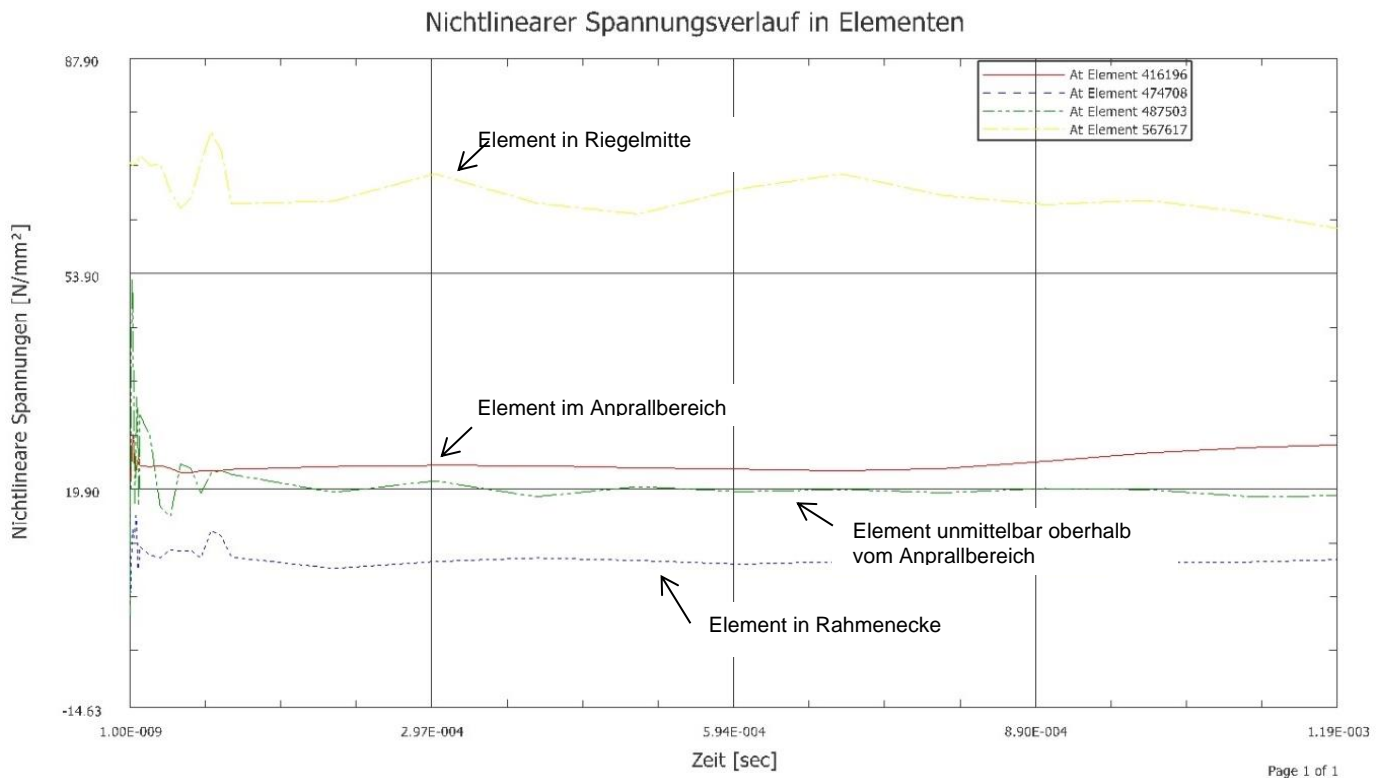


Abbildung 60 – Entwicklung der Stahlspannungen während des Einschwingvorgangs, Teil 3

Modellierung des Anprallkörpers

Bei dem Anprallkörper handelt es sich um eine abstrakte Modellierung eines anprallenden Fahrzeuges (siehe Abbildung 61 und Abbildung 62). Die Höhe des Anprallkörpers entspricht dabei den im Eurocode DIN EN 1991-1-7 [7] geforderten 20 cm und die Breite des Körpers ist so breit gewählt, dass ein Anprall über die gesamte Stützenbreite stattfindet. Die Anprallfläche ist in zwei Richtungen abgerundet, um Singularitäten beim Stoß zu minimieren. Der Anprallkörper wird mit ideal-elastoplastischem Material ($f_y = f_u = 235 \text{ N/mm}^2$, $E_i = 210\,000 \text{ N/mm}^2$) mit unendlicher Bruchdehnung modelliert.

Die Wichte des Anprallkörpers ist vernachlässigbar. Die Last aus Anprall wird als Punktmasse mittels eindimensionaler SPIDER-Elemente [37] an die Rückwand gekoppelt (siehe Abbildung 62).

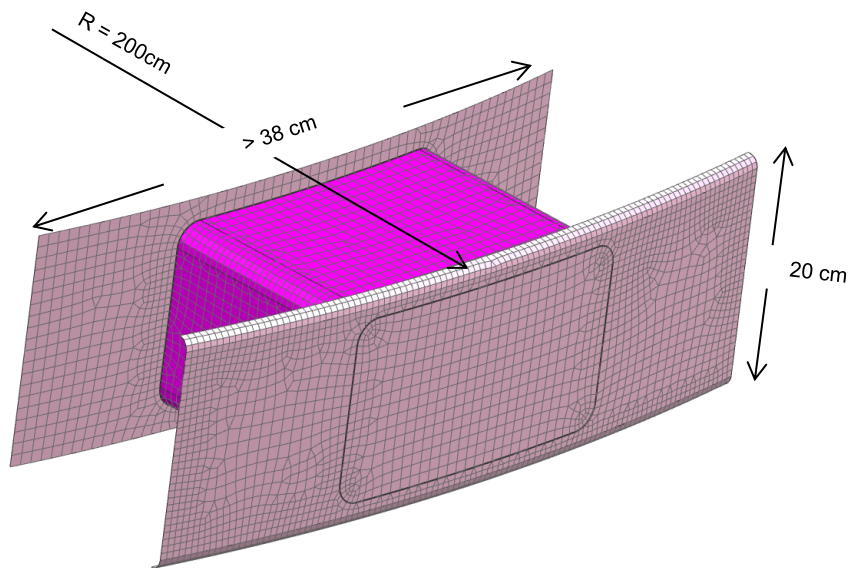


Abbildung 61 – Modellierter Anprallkörper, Ansicht auf anprallende Fläche

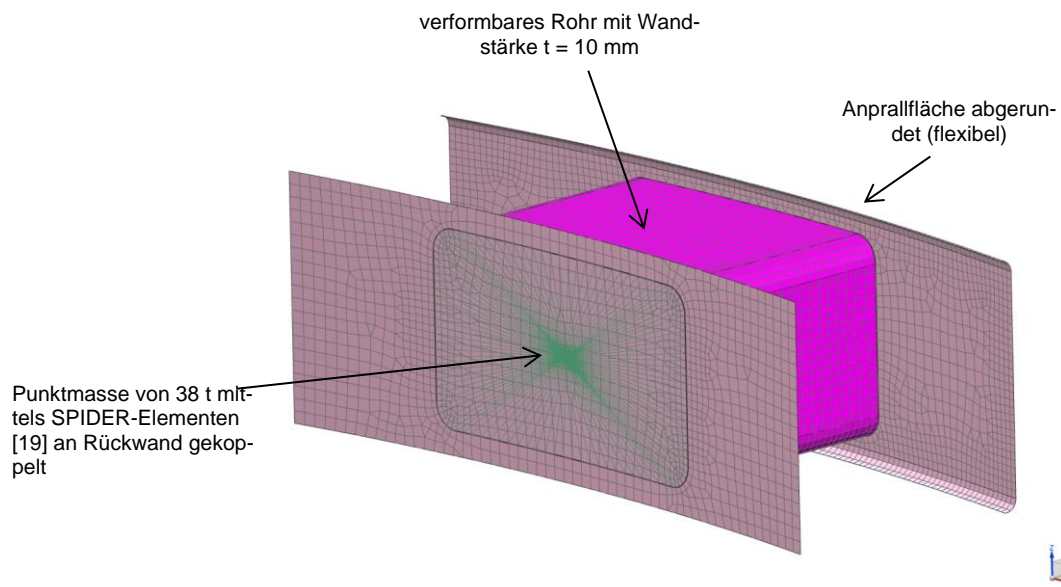


Abbildung 62 – Modellierter Anprallkörper, Ansicht auf Punktmasse (an Rückwand gekoppelt)

Modellierung der Kontaktfläche für den Anprall

Der Stoßübertrag von Anprallkörper auf Verkehrszeichenbrücke wird mittels Kontaktdefinition in Siemens NX Nastran [10] modelliert.

Tabelle 41 – Gewählte Zeitschritte der Zeitschrittintegration

	Zeitschritt	Δt	Anzahl der Zeitschritte
1 - Schwerkraft	$1e^{-9}$ s		10
2 - Schwerkraft 2	$1e^{-8}$ s		9
3 - Schwerkraft 3	$1e^{-7}$ s		9
4 - Schwerkraft 4	$1e^{-6}$ s		9
5 - Schwerkraft 5	$1e^{-5}$ s		9
6 - Anfahrt	$1e^{-4}$ s		14
7 - Anprall	$1e^{-5}$ s		350
8 - Anprall 2	$1e^{-4}$ s		370

5.6.2 Vereinfachtes Modell zur Abschätzung einer realistischen Anprallgeschwindigkeit mit Berücksichtigung der Energieverluste beim Anprall

Zur besseren Abschätzung der Restgeschwindigkeit beim Anprall an die Stütze wird der zuvor vorgestellte Anprallkörper gegen einen rechteckigen Block angeprallt. Der Rechteckblock soll dabei den in Kap. 5.3 vorgestellten Anprallsockel darstellen und ist mit ähnlichen Eigenschaften modelliert wie ein äquivalenter Anprallsockel aus Stahlbeton (E-Modul ca. 15000 N/mm², Masse 44,7 t). Die horizontale Lagerung des Sockels mit dem Baugrund ist starr.

Die Auflagerung des rechteckigen Blockes ist hier mittels Reibkontakt mit einem Reibbeiwert von 0,64 realisiert (siehe Abbildung 64).

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in den Abbildung 65 bis Abbildung 67 zusammengefasst. Es berechnet sich eine Restgeschwindigkeit von ca. 6,7 m/s und ein mittlerer Widerstand von 6350 kN, der während eines Verschiebungswegs von ca. 30 cm wirkt.

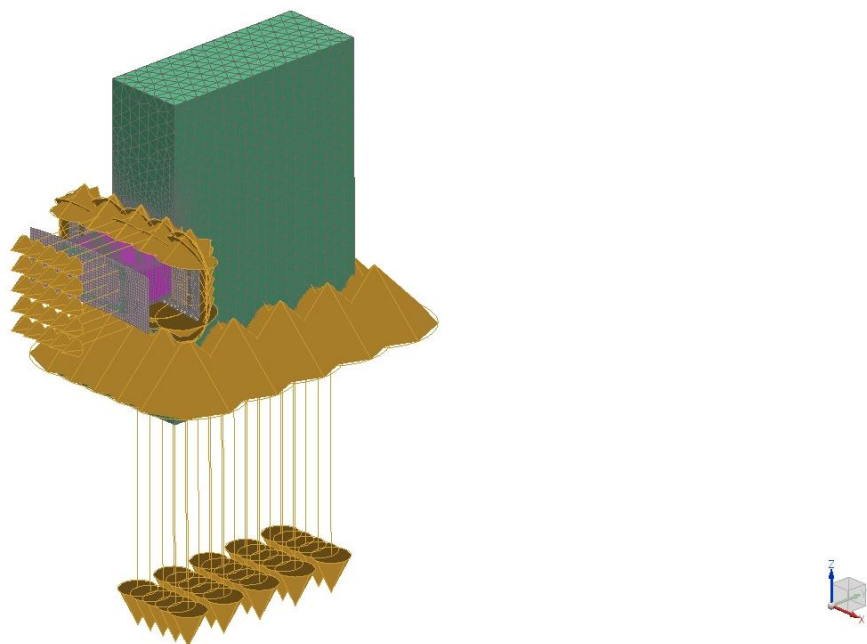


Abbildung 64 – Vereinfachtes Modell zur Abschätzung der Restgeschwindigkeit nach dem Anprall auf den Betonsockel (die Pfeile zeigen die definierten Kontaktflächen zwischen Anprallkörper und Anprallsockel und zwischen Anprallsockel und Bodenplatte)

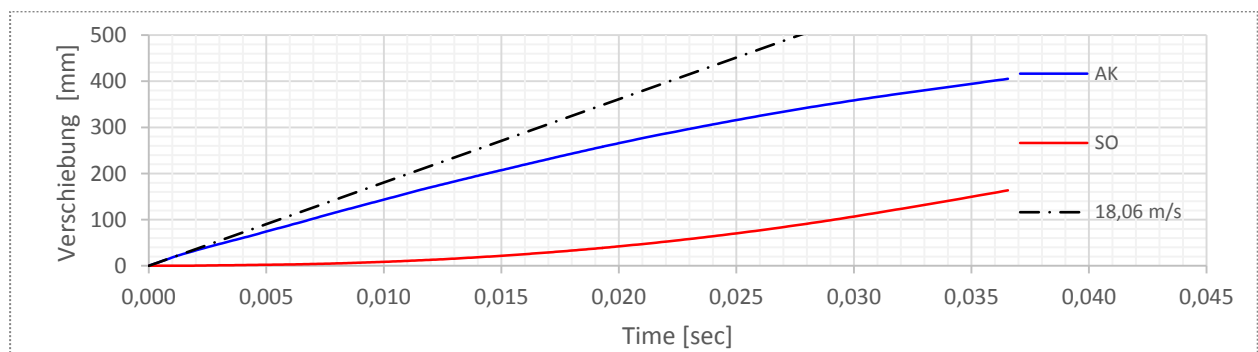


Abbildung 65 – Vereinfachte Simulation zur Abschätzung der Restgeschwindigkeit nach dem Anprall auf den Betonsockel – Mittlere Verschiebung in Anprallkörper (AK) und Anprallsockel (SO) im Vergleich zur Anprallgeschwindigkeit von 18,06 m/s

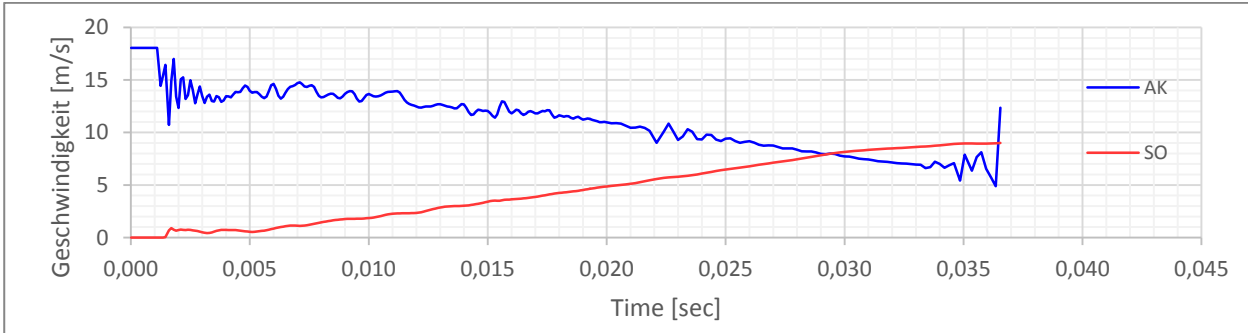


Abbildung 66 – Vereinfachte Simulation zur Abschätzung der Restgeschwindigkeit nach dem Anprall auf den Betonsockel – Mittlere Geschwindigkeit in Anprallkörper (AK) und Anprallsockel (SO)

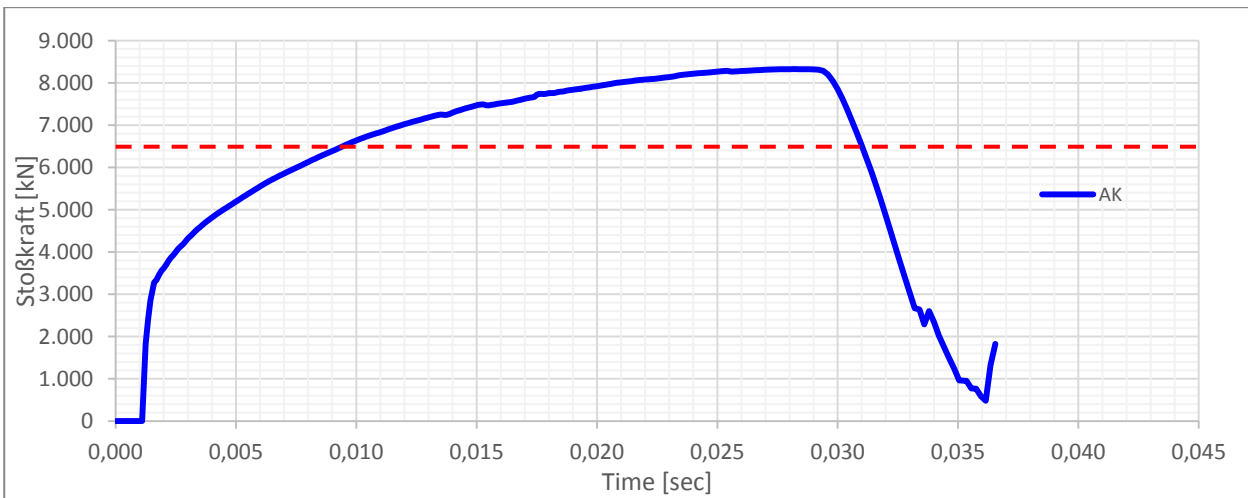


Abbildung 67 – Vereinfachte Simulation zur Abschätzung der Restgeschwindigkeit nach dem Anprall auf den Betonsockel – Summe der Stoßkraft zwischen Anprallkörper (AK) und Anprallsockel

5.6.3 Simulierte Anprallsituationen

Simuliert wird ein frontaler und mittiger Anprall des Anprallkörpers auf die rechte Stütze. Der Anprall findet auf einer Höhe von 25 bis 45 cm oberhalb des Stützenfußes statt. Dies entspricht einer mittleren Anprallhöhe von 0,35 m oberhalb der Fahrbahnoberkante und entspricht unter Annahme eines 90 cm hohen Betonsockels den in den ZTV-ING [4] geforderten 1,25 m Abstand von der Fahrbahnoberkante.

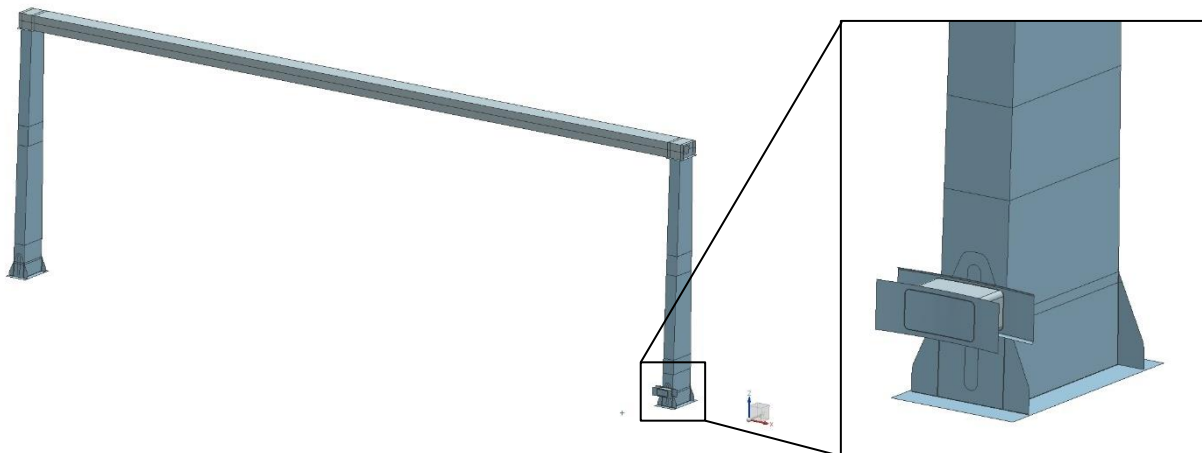


Abbildung 68 – Simulierte Anprallsituation

Entsprechend Kap. 5.2 werden folgende Unfallszenarien simuliert (siehe auch Tabelle 42):

Szenario A

- Die Anfangsgeschwindigkeit wird gleich 18,06 m/s gesetzt.
- Es wird die gesamte Masse mit $m = 38$ t angesetzt.

Szenario B

- Die Anfangsgeschwindigkeit wird unter Annahme eines statischen Sockelwiderstands von 358 kN (siehe Kap. 5.4.2) und der Verwendung von Gleichung (19) gleich 17,0 m/s gesetzt.
- Auf Grundlage der in Kap. 5.4.2 berechneten Massenverteilung wird eine reduzierte Masse von 3,14 t angesetzt.

Szenarien C1 und C2

- Die Anfangsgeschwindigkeit wird unter Annahme einer gesamt ansetzbaren Sockelmasse von 44,7 t. (siehe Kap. 5.4.2) und der Verwendung von Gleichung (22) gleich 8,3 m/s gesetzt.
- Es wird die gesamte Masse mit $m = 38$ t (C1) und die reduzierte Masse von 3,14 t (C2) angesetzt.

Szenarien D1 und D2

- Die Anfangsgeschwindigkeit wird unter Annahme einer insgesamt ansetzbaren Sockelmasse von 44,7 t. (siehe Kap. 5.4.2) und der Simulationsergebnisse von Kap. 5.6.2 gleich 6,7 m/s gesetzt.
- Es wird die volle Masse mit $m = 38$ t (D1) und die reduzierte Masse von 3,14 t (D2) angesetzt.

Szenarien E1 und E2

- Die Anfangsgeschwindigkeit wird unter Annahme einer insgesamt ansetzbaren Sockelmasse von 44,7 t. (siehe Kap. 5.4.2) und der Simulationsergebnisse von Kap. 0 mit weiterer Abbremsung durch den restlichen statischen Sockelwiderstand von 358 kN (siehe Kap. 5.4.2) auf die verbleibenden 170 cm unter Verwendung von Gleichung (19) gleich 3,6 m/s gesetzt.
- Es wird die volle Masse mit $m = 38$ t (E1) und die reduzierte Masse von 3,14 t (E2) angesetzt.

Tabelle 42 – Ausgewählte Szenarien für die dynamischen Simulationen

Szenario	Anprallgeschwindigkeit v_1	Mitwirkende Anprallmasse
A	18,06 m/s	38,0 t
B	17,0 m/s	3,14 t
C.1	8,3 m/s	38 t
C.2	8,3 m/s	3,14 t
D1	6,7 m/s	38,0 t
D2	6,7 m/s	3,14 t
E1	3,6 m/s	38,0 t
E2	3,6 m/s	3,14 t

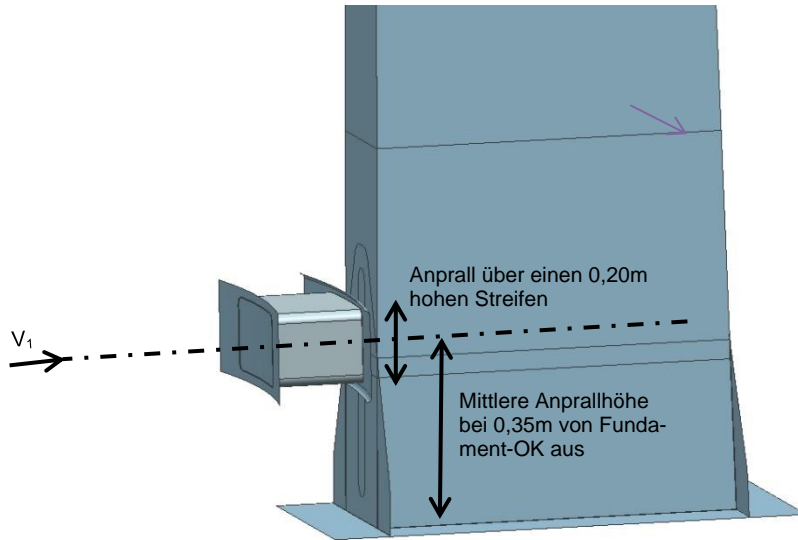


Abbildung 69 – Anfangslage und -geschwindigkeit des Anprallkörpers

5.6.4 Ergebnisse der Berechnungen in Siemens NX Nastran [10]

In der Abbildung 70 bis Abbildung 73 sind die Verschiebungen im Anprallkörper und an der Verkehrszeichenbrücke sowie die Geschwindigkeiten im Anprallkörper und die beim Stoß über die Kontaktfläche übertragenen Kräfte für die simulierten Unfallszenarien dargestellt.

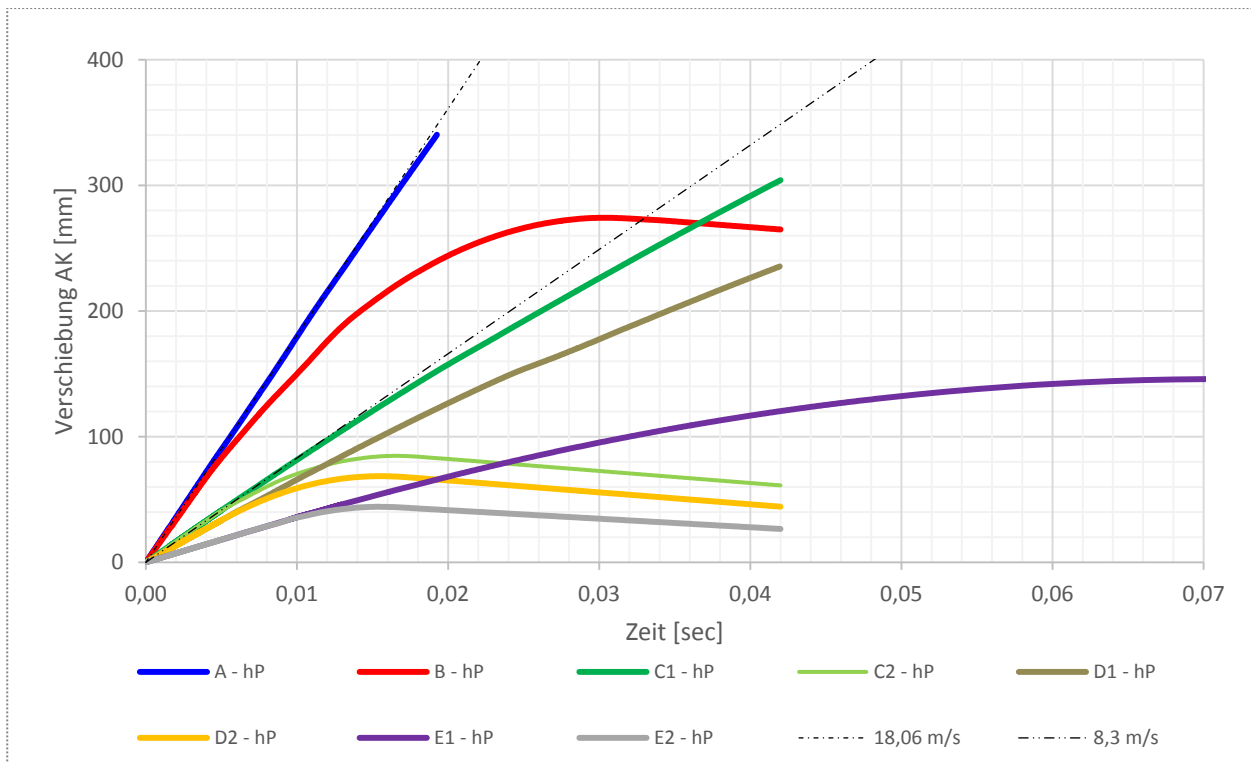


Abbildung 70 – Verlauf der Verschiebungen des Anprallkörpers (AK), punktuell aufgenommen in der hinteren Platte (hP) für unterschiedliche Referenzgeschwindigkeiten von 18,06 m/s und 8,3 m/s

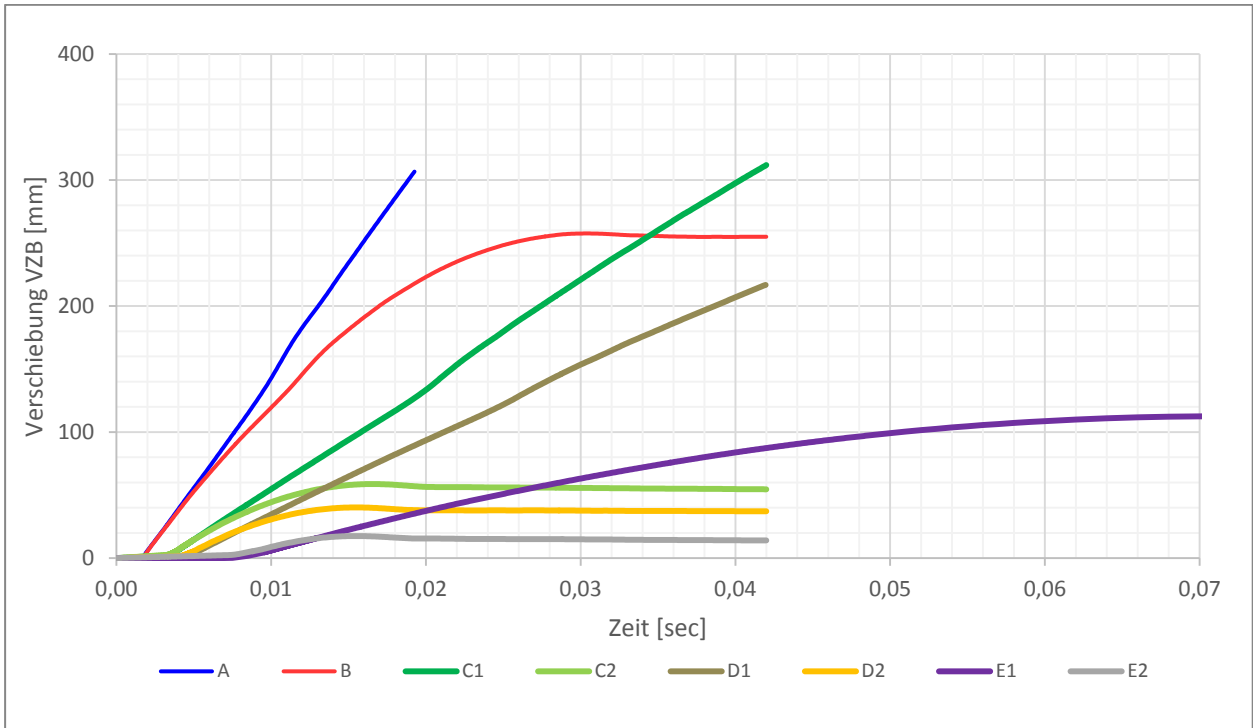


Abbildung 71 – Verlauf der mittleren Verschiebung im Bereich der Anprallfläche der Stütze der Verkehrszeichenbrücke (VZB)



Abbildung 72 – Verlauf der Geschwindigkeit des Anprallkörpers (AK), punktuell aufgenommen in der hinteren Platte (hP) im Vergleich zu den Referenzgeschwindigkeiten von 18,06 m/s und 8,3 m/s

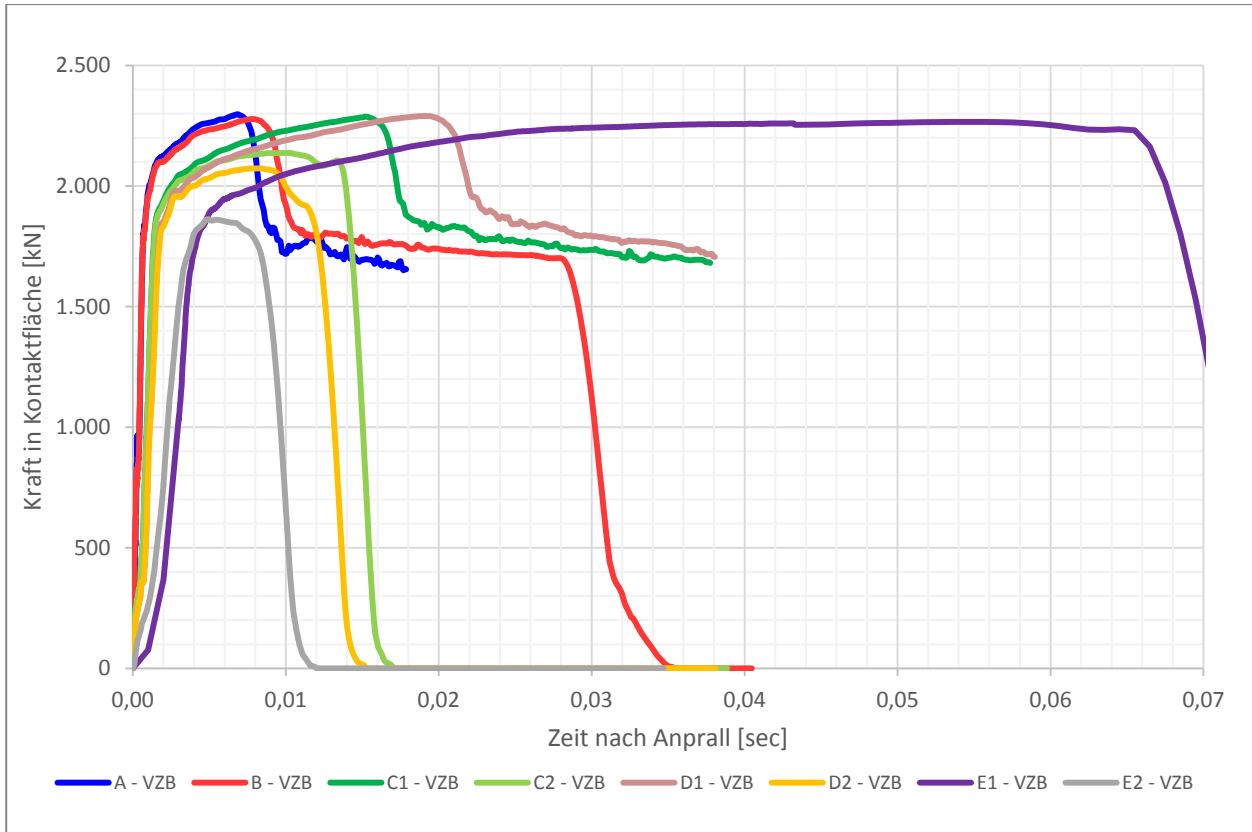


Abbildung 73 – Verlauf der Summe der Kräfte in der Kontaktfläche während des Anprallvorgangs

Szenario A

Bei dem Anprall der gesamten Masse von 38 t. mit der vollen Geschwindigkeit von 18,06 m/s wird die Kapazität der Stütze deutlich überschritten. Die Kraft beim Stoß reicht nicht aus, um die Masse sichtbar abzubremsen und die dynamische Berechnung kann aufgrund der hohen Nichtlinearität bei einer lokalen Stützenverformung von über 300 mm nicht mehr konvergieren. Es ist davon auszugehen, dass in der Realität die Stütze bei diesem Anprallereignis komplett versagt hätte.

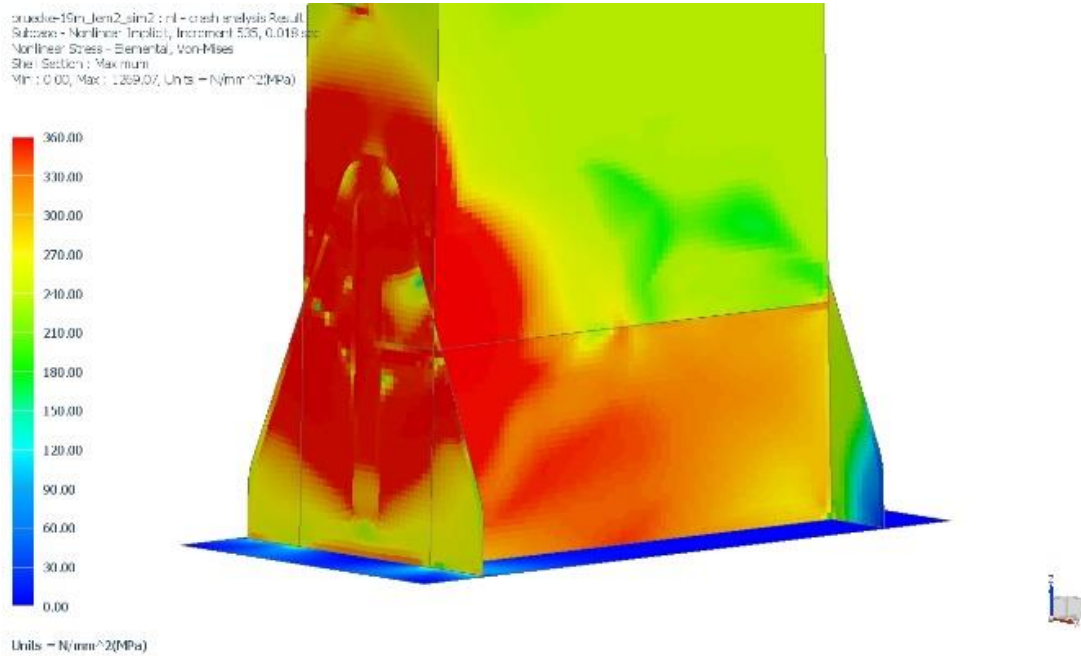


Abbildung 74 – Vergleichsspannungen in der Stahlstütze kurz vor Abbruch der Berechnungen auf Grund von Konvergenzproblemen (Modell A)

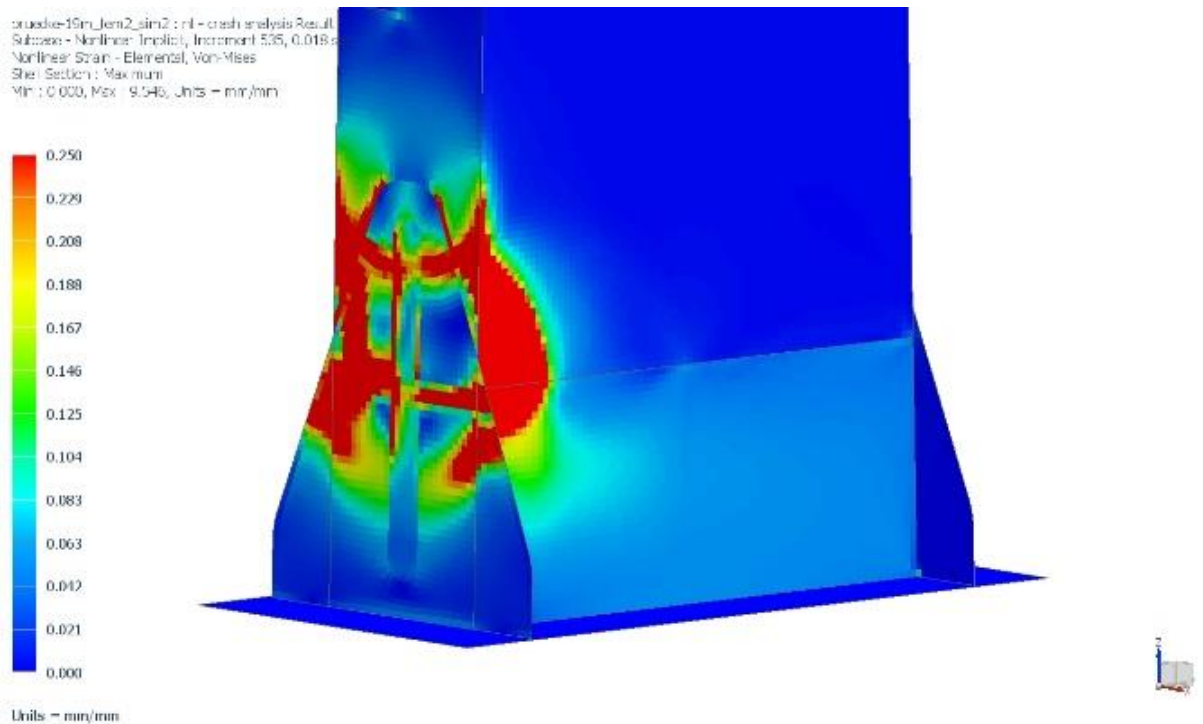


Abbildung 75 - Verformung in der Stahlstütze kurz vor dem Abbruch der Berechnungen auf Grund von Konvergenzproblemen (Modell A)

Szenario B

Bei dem Anprall der reduzierten Masse von 3,14 t. mit der leicht reduzierten Geschwindigkeit von 17 m/s wird ebenfalls die maximale Kraft in der Stütze aktiviert. Die Masse wird abgebremst und es kommt nach ca. 30 msec zu einem Rückstoß mit einer Geschwindigkeit von ca. -1,1 m/s. Die bleibenden Verformungen in der Stütze liegen bei ca. 26 cm und übersteigen deutlich die in der Praxis beobachteten Schäden für stehen gebliebene Verkehrszeichenbrücken (siehe z. B. Anprallereignis 3). Es ist davon auszugehen, dass es in Praxis – bevor es zu so hohen Verformungen kommen kann – zu einem lokalen Abriss im Stahlquerschnitt kommt und die Stütze komplett abgesichert wird. Dieses simulierte Anprallszenario wird somit als Komplettersagen eingestuft.

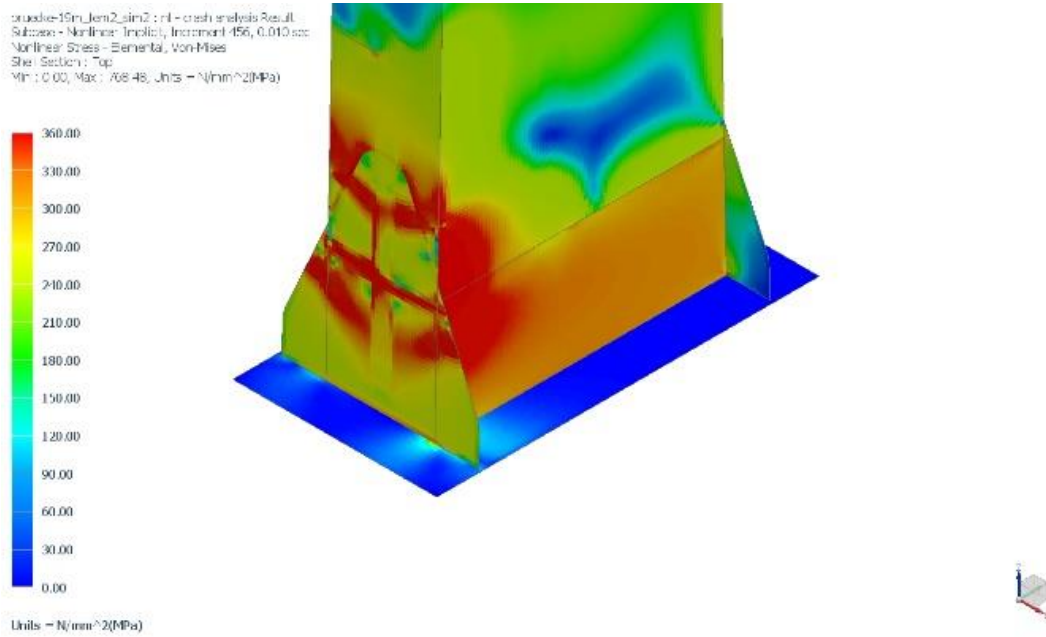


Abbildung 76 – Vergleichsspannungen in der Stahlstütze bei Erreichen der maximalen Stoßkraft (Modell B)

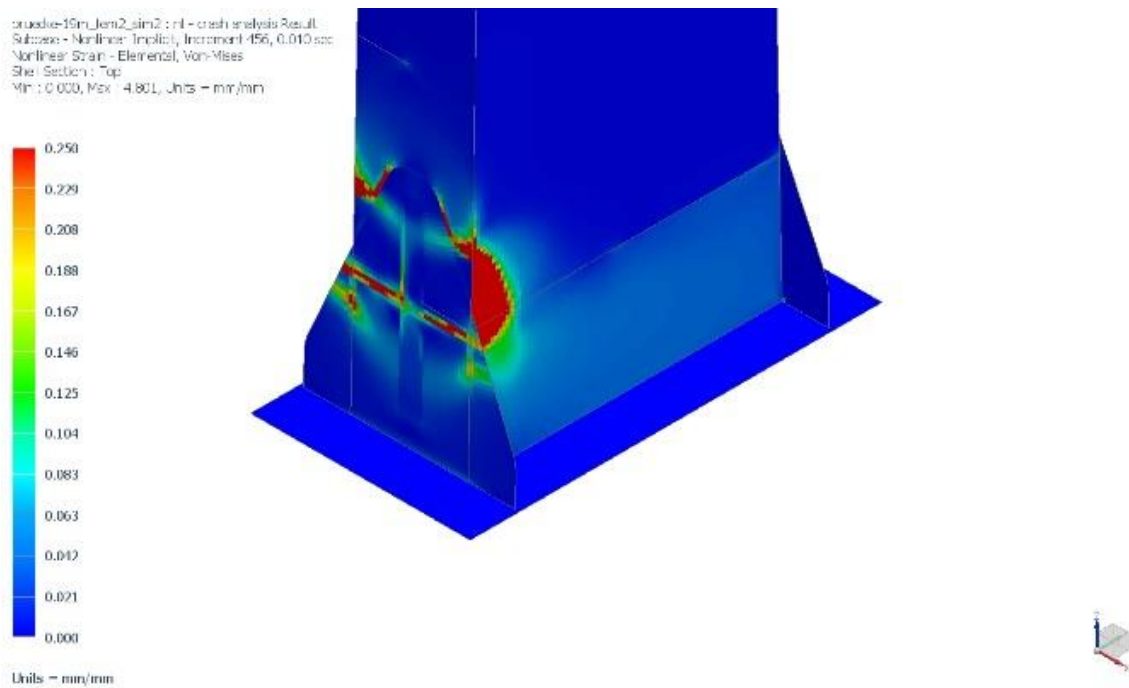


Abbildung 77 - Verformung in der Stahlstütze bei Erreichen der maximalen Stoßkraft (Modell B)

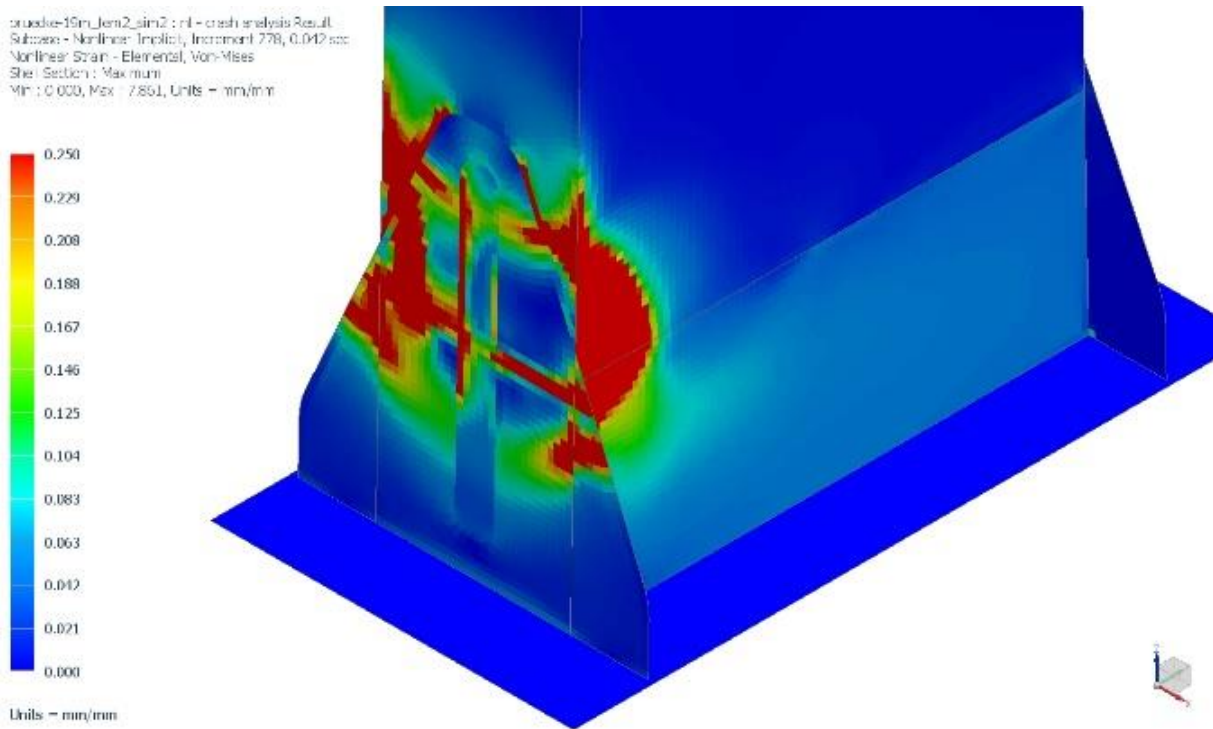


Abbildung 78 – Bleibende Verformungen nach dem Rückprall (Modell B)

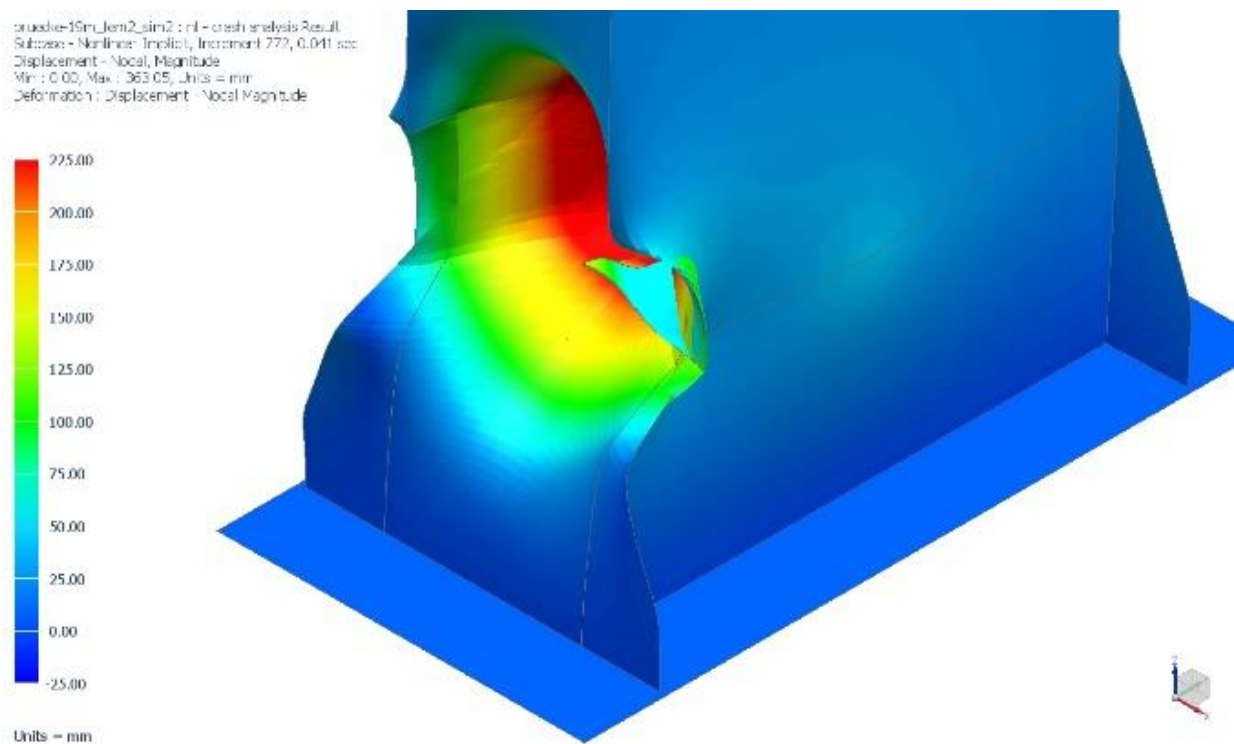


Abbildung 79 - Bleibende Verschiebung nach dem Rückprall (Modell B)

Szenarien C1 und C2

Bei dem Anprall der unterschiedlichen Massen mit einer reduzierten Geschwindigkeit von 8,3 m/s wird wieder jeweils die maximale Kraft in der Stütze aktiviert.

Bei dem Anprall mit der vollen Masse wird die Masse sichtbar abgebremst. Die dynamischen Berechnungen können aber aufgrund der hohen Nichtlinearität bei einer lokalen Stützenverformung von ca. 300 mm nicht mehr konvergieren und die Berechnungen werden abgebrochen, bevor es zu einem kompletten Abbremsen der Masse kommt.

Beim Anprall mit der reduzierten Masse kommt es ca. 13 msec nach dem Anprall zum kompletten Abbremsen und zu einem Rückstoß mit einer Geschwindigkeit von ca. -0,8 m/s. Die bleibenden Verformungen in der Stütze liegen bei ca. 6 cm.

Szenarien D1 und D2

Bei dem Anprall mit der vollen Masse wird die Masse leicht abgebremst. Die dynamischen Berechnungen werden aber aufgrund der begrenzten Zeitschritte vor einem vollkommenen Abbremsen der Masse abgebrochen. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt bereits hohen lokalen Stützenverformung von über 200 mm ist von einem vorzeitigen Versagen der Stütze auszugehen und die Zeitschritte werden für dieses Unfallszenario nicht verlängert.

Bei dem Anprall der reduzierten Masse mit einer stark reduzierten Geschwindigkeit von 6,7 m/s wird abhängig von der angesetzten Masse die maximale Kraft in der Stütze aktiviert. Es kommt nach ca. 15 msec zum kompletten Abbremsen und zu einem Rückstoß mit einer Geschwindigkeit von ca. -1,1 m/s. Die bleibenden Verformungen in der Stütze betragen ca. 4 cm.

Szenarien E1 und E2

Bei dem Anprall der vollen Masse von 38 t kann die Masse abgebremst werden und es kommt 75 msec nach dem Anprall zu einem Rückstoß mit einer Restgeschwindigkeit von ca. -0,33 m/s. Die bleibenden Verformungen liegen bei ca. 11 cm.

Beim Anprall mit der reduzierten Masse kommt es ca. 6 msec nach dem Anprall zum kompletten Abbremsen und zu einem Rückstoß mit einer Geschwindigkeit von ca. -0,8 m/s. Die bleibenden Verformungen in der Stütze liegen bei ca. 1,4 cm.

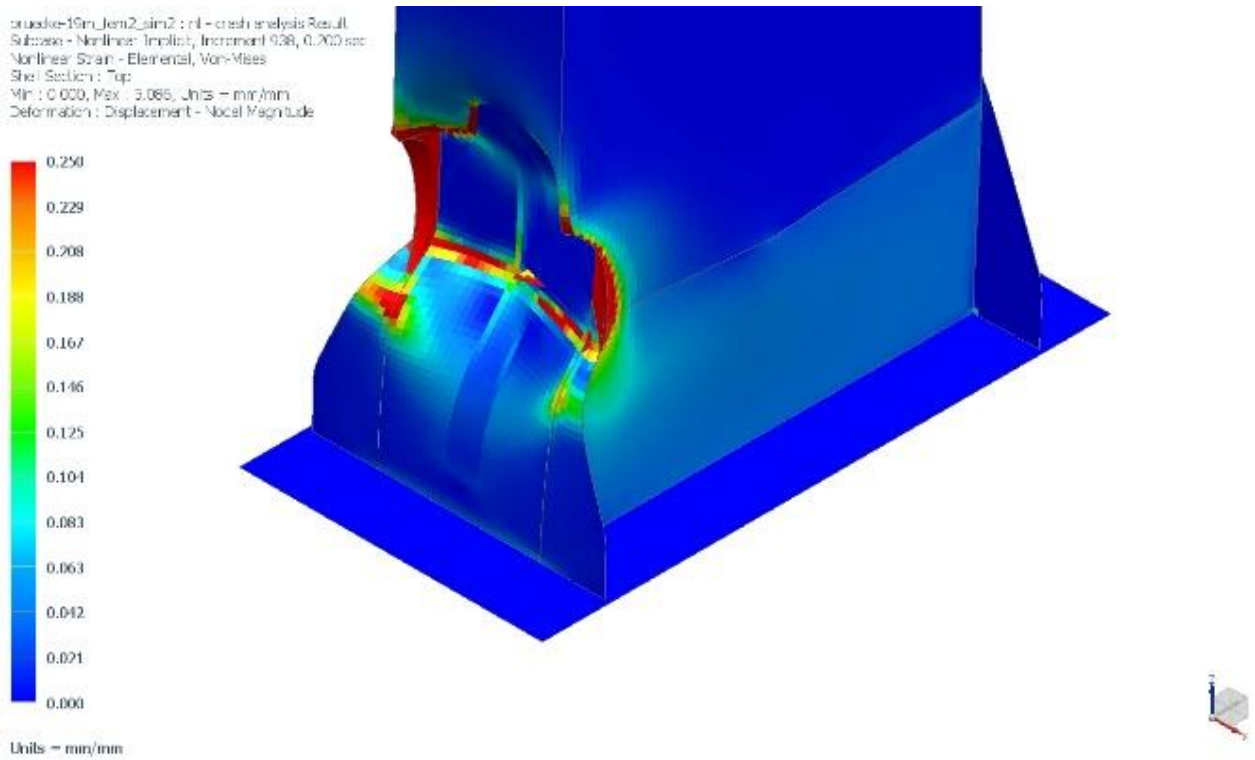


Abbildung 80 – Bleibende Verformungen nach dem Rückprall (Modell E1)

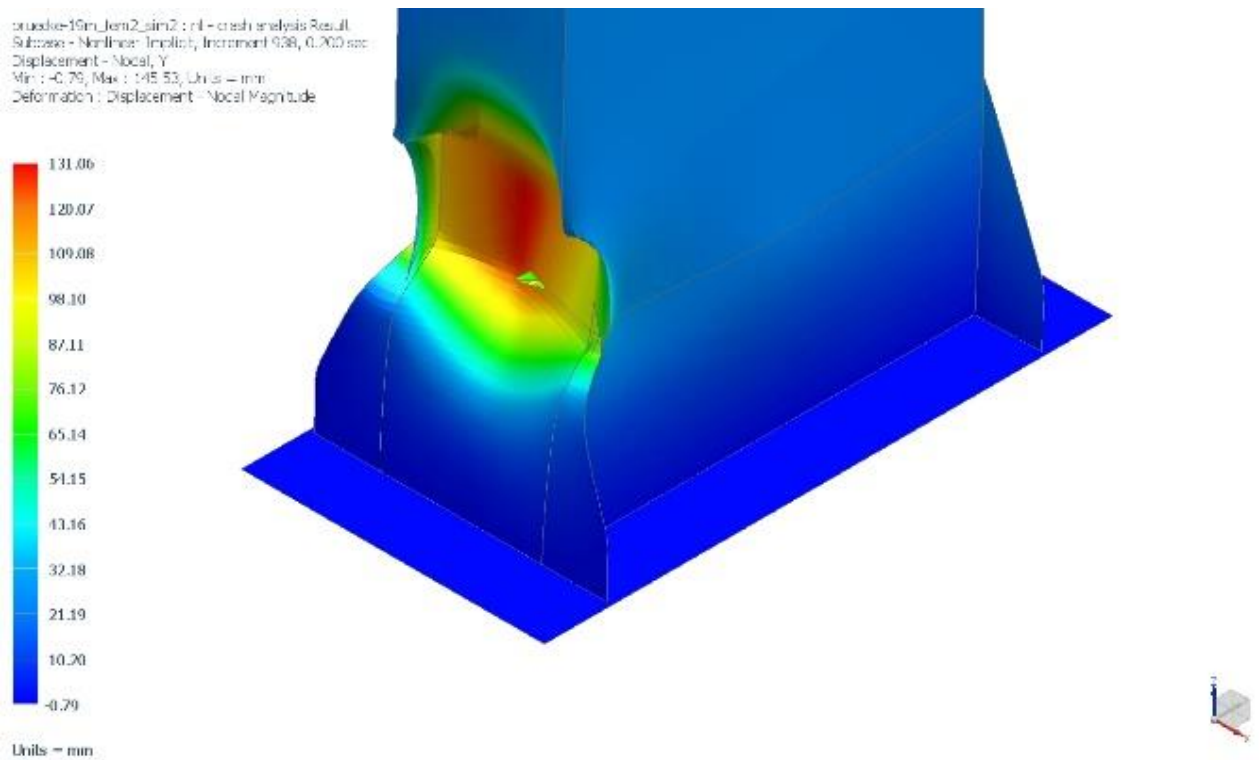
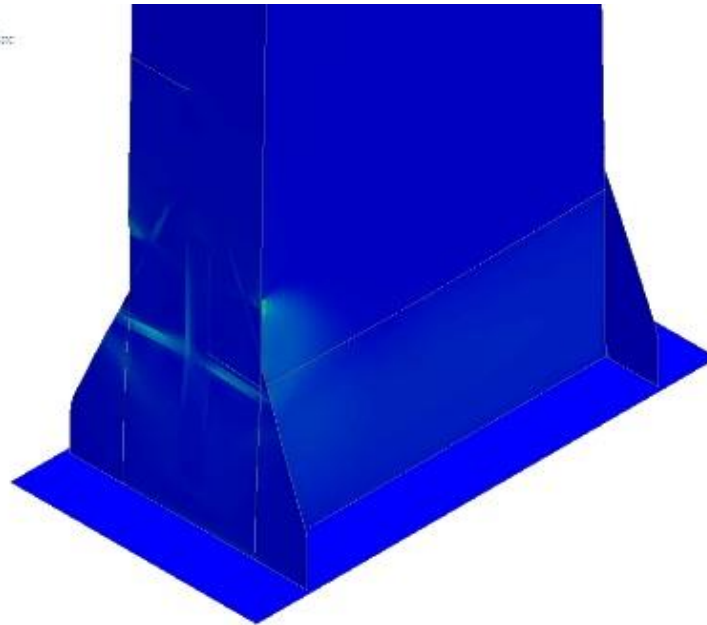
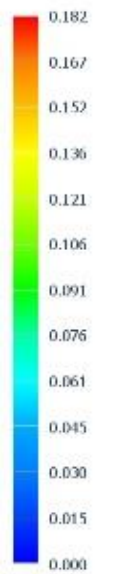


Abbildung 81 - Bleibende Verschiebungen nach dem Rückprall (Modell E1)

quasie-15m_Jem2_sim2 : nl - crash analysis Result
 Subcase - Nonlinear, Implicit, Increment 770, 0.042 sec
 Nonlinear Strain - Elemental, Von-Mises
 Shear Section - Top
 Min : 0.000, Max : 0.232, Units = mm/mm
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude

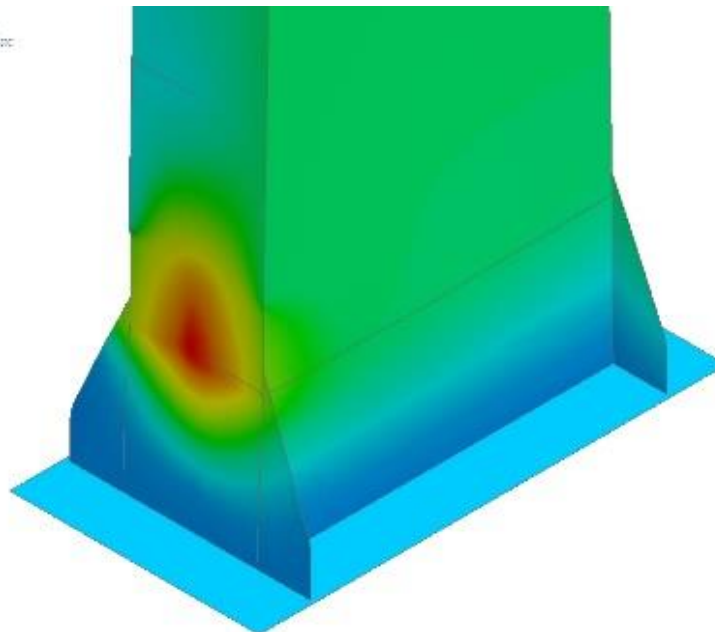


Units = mm/mm



Abbildung 82 – Bleibende Verformungen und Verschiebungen nach dem Rückprall (Modell E2)

quasie-15m_Jem2_sim2 : nl - crash analysis Result
 Subcase - Nonlinear, Implicit, Increment 770, 0.042 sec
 Displacement - Nodal, Y
 Min : -4.71, Max : 41.37, Units = mm
 Deformation : Displacement - Nodal Magnitude



Units = mm



Abbildung 83 - Bleibende Verschiebungen nach dem Rückprall (Modell E2)

Zusammenfassung

In Abbildung 84bis Abbildung 86 und Tabelle 43 werden die Ergebnisse aus den unterschiedlichen Simulationen zusammengefasst. Es zeigt sich, dass es für die reduzierte Masse von 3,14 t erst ab einer Restgeschwindigkeit von ca. 8,7 m/s zu einem realistischen Rückstoß kommt, der sich auch der Auswertung der Schadensfälle zufolge so einstellen wird. Bei Annahme der vollen Masse kommt der Rückstoß erst bei einer Geschwindigkeit von 3,6 m/s zustande.

In den anderen Fällen wird die volle dynamische Tragkapazität von über 2250 kN erreicht und die Bruchdehnung von 25 % wird in großen Bereichen überschritten. Die errechneten gemittelten Verschiebungen in der Stütze von über 15 cm sind für den kurzen Hebelarm zwischen Fußplatte und Anprallhöhe unrealistisch und in der Praxis würde es in diesen Fällen viel früher zu einem lokalen Abreißen im Stahlquerschnitt kommen (siehe auch das plötzliche Ablassen der Tragkapazität bei einer Verformung von 12 cm in Abbildung 84). Die Stütze würde entsprechend vollständig abscheren.

In den Fällen, wo es zu einem realistischen Rückstoß kommt (Szenarien C2, D2, E1 und E2), werden bleibende Verformungen von 1,4 cm bis ca. 11 cm gemessen. Diese Verformungen sind realistisch und entsprechen den in Kap. 3.2 zusammengestellten Unfallbildern.

Aus den geführten numerischen und dynamischen Berechnungen am Gesamtmodell können nun Last-Zeit-Verläufe generiert werden. Einzelne Verläufe können den vorherigen Abbildungen entnommen werden. Solche Last-Zeit-Verläufe werden z. B. bei Anprall von Schiffen an Unterbauten als Grundlage für numerische Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass das hier verwendete dynamische Modell von einer starren Lagerung des Anprallsockels auf dem Baugrund ausgeht. Wird eine verschiebliche Lagerung berücksichtigt, so werden zusätzliche elastische Verformungskapazitäten generiert, so dass in die Gesamtverformung diese zusätzlichen Verformungen eingehen. Es zeigte sich, dass im vorliegenden Fall die verschiebliche Lagerung keine wesentlichen Auswirkungen auf das Ergebnis im Hinblick auf die Berechnung einer statischen Ersatzlast hat.

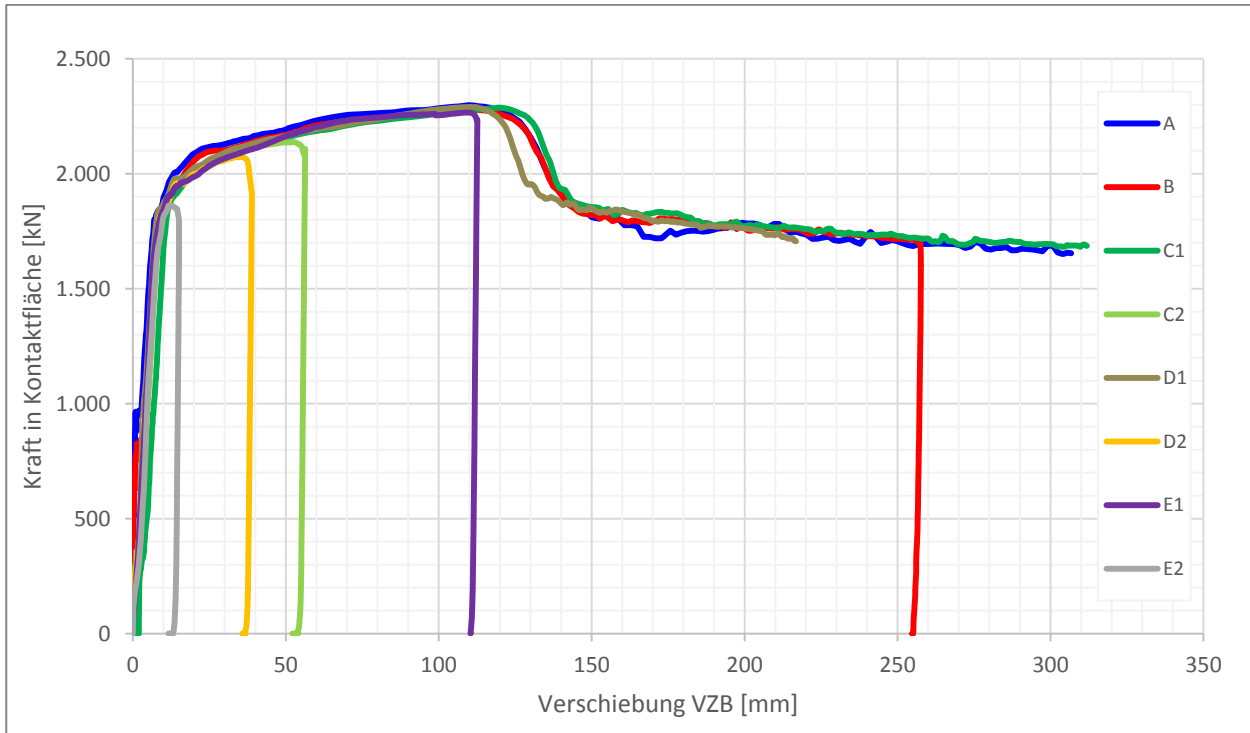


Abbildung 84 – Resultierende Kraft-Verformungskurve im Anprallbereich der Stütze der Verkehrszeichenbrücke

Tabelle 43 – Zusammenfassung der Ergebnisse aus den unterschiedlichen Simulationen

Szenario	Komplettes Abbremsen mit Rückprall	Komplettversagen	Maximal auftretende Stoßkraft	Mittlere auftretende Stoßkraft	Geschwindigkeit bei Rückprall (vordere Platte)	Bleibende Verformungen
A	Nein	Ja	2300 kN	1920 kN	-	-
B	Ja	Ja	2280 kN	1740 kN	-1,11 m/s ^{*)}	25,5 cm ^{*)}
C1	Nein	Ja	2290 kN	1640 kN	-	-
C2	Ja	Nein	2140 kN	1390 kN	-1,10 m/s	5,5 cm
D1	Nein	Ja	2290 kN	1635 kN	-	-
D2	Ja	Nein	2070 kN	1120 kN	-0,97 m/s	3,7 cm
E1	Ja	Nein	2266 kN	1968 kN	-0,33 m/s	11,0 cm
E2	Ja	Nein	1863 kN	1189 kN	-0,71 m/s	1,4 cm

^{*)} Theoretisch wird ein Anprall simuliert, aufgrund der hohen Verformungen an der Stütze ist aber davon auszugehen, dass es in der Realität zu einem lokalen Versagen und Abreißen der Stütze kommt

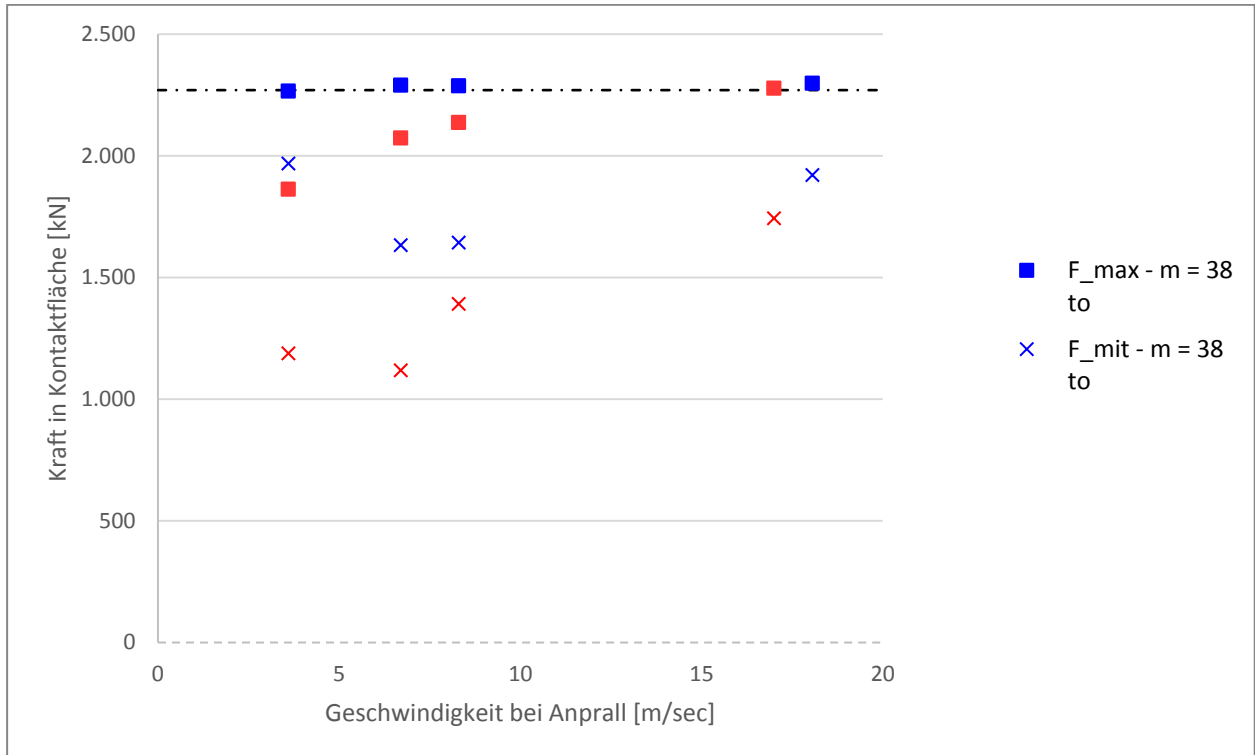


Abbildung 85 – Maximal- und Mittelwert der Stoßkraft

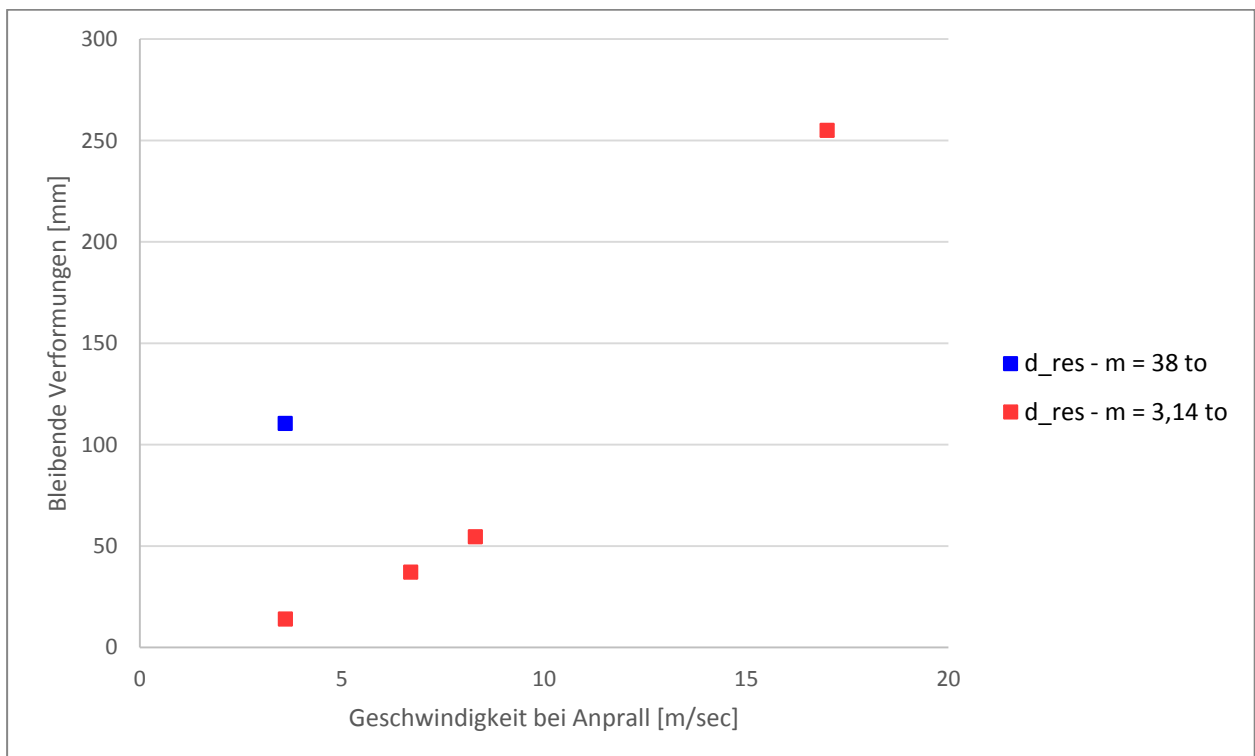


Abbildung 86 – Verbleibende Verformungen an der Stütze beim Stattfinden eines Rückstoßes

5.7 Empfehlung für statische Ersatzlasten

5.7.1 Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Anprallereignissen

In Kap. 5.6.4 sind die Ergebnisse verschiedener numerisch nachgebildeter Anprallsituationen zusammengefasst. In den Fällen, bei denen die Tragkapazität der Stütze ausreichend war, um einen realistischen Rückstoß zu simulieren, werden bleibende Verformungen in der Größenordnung von 1,4 bis 11 cm an der Stütze erreicht. Ein Vergleich mit den in Kap. 3 zusammengefassten Anprallereignissen zeigt, dass diese Verformungen in der gleichen Größenordnung liegen wie bei den in der Realität stattgefundenen Anprallereignissen.

In den Simulationen, bei denen kein realistischer Rückstoß berechnet werden konnte, übersteigen die Verformungen deutlich die Bruchdehnung von 25%. Hier wird ein vollständiges Abscheren der Stütze am Auflagepunkt vorausgesagt, was den in Kap. 3 zusammengefassten Ereignissen entspricht.

Daraus lässt sich schließen, dass mit den in Kap. 0 vorgestellten numerischen Simulationen die in der Realität vorkommenden Anprallereignisse gut nachempfunden werden und dass die Simulationen ein gutes Bild über die in Realität vorkommenden Anprallkräfte geben.

5.7.2 Vergleich der statischen und dynamischen Berechnungen

In den folgenden Abbildungen werden die statischen und dynamischen Berechnungen direkt verglichen. Es zeigt sich, dass in der dynamischen Berechnung höhere Stoßkräfte erreicht werden können als in der statischen Berechnung. Dies liegt hauptsächlich daran, dass bei der dynamischen Berechnung die Trägheit der Verkehrszeichenbrücke mitberücksichtigt wird und es so effektiv zu einer Steigerung der Tragkapazität kommt.

Des Weiteren zeigt sich, dass in den dynamischen Berechnungen deutlich höhere Verformungen erreicht werden und die Verkehrszeichenbrücke viel weicher reagiert. Dies liegt daran, dass in den statischen Berechnungen die Anprallfläche als steife Fläche modelliert wird. In der dynamischen Berechnung sind sowohl Anprallkörper und als auch Stütze flexibel und es kommt nach kurzem Anprall zu einem sogenannten Anlegen (siehe Abweichung der Kurven aus statischer und dynamischer Berechnung).

Ein direkter Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft aus den statischen Berechnungen (siehe Abbildung 51, Modell b.1, $F_{max} \approx 1200 \text{ kN}$) mit der resultierenden maximalen Stoßkraft aus den dynamischen Berechnungen zeigt (siehe Abbildung 84, $F_{max} \approx 2290 \text{ kN}$) zeigt, dass die Aktivierung der Trägheit der Verkehrszeichenbrücke eine Steigerung von ca. 90 % der Widerstandskraft erbringt.

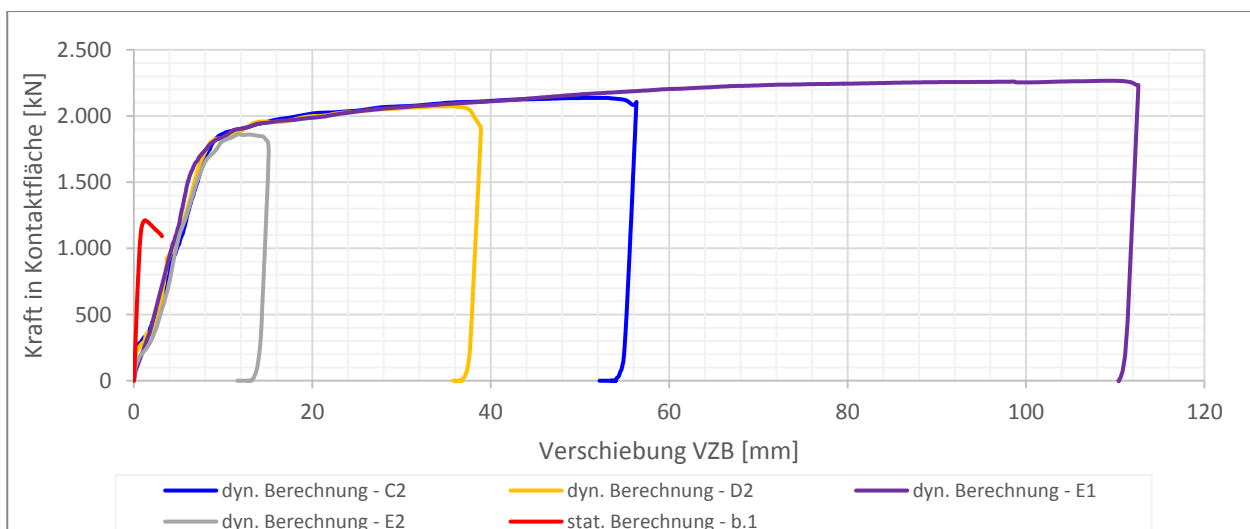


Abbildung 87 – Vergleich der statischen und dynamischen Berechnungen

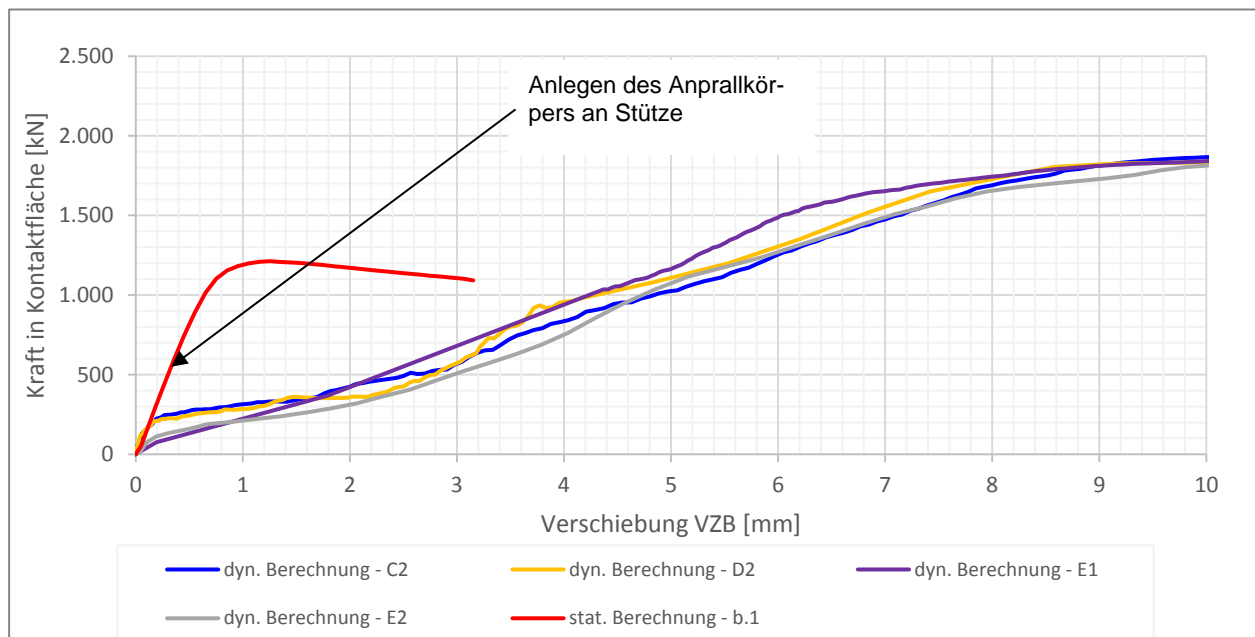


Abbildung 88 – Vergleich der statischen und dynamischen Berechnungen – Vergrößerung der Anfangsverformungen

5.7.3 Realistische Stoßkraft bei einem Anprall

Bei den dynamischen Berechnungen hat sich gezeigt, dass höhere Stoßkräfte erreicht werden können als in der statischen Berechnung ermittelt wurden. In der Tat liegen die Kräfte beim Stoß meist bei der maximalen dynamischen Tragkapazität der Stütze. Erst bei den Unfallszenarien mit deutlich reduzierten Anprallgeschwindigkeiten $v \leq 6,7$ m/s und einer reduzierten Masse von 3,14 to. verringern sich die aktivierten Stoßkräfte geringfügig (siehe Abbildung 85).

Diese Schlussfolgerung entspricht den Beobachtungen u. a. von [21], [8] und spiegelt die Problematik wieder, eine dynamische Stoßbelastung durch eine statische Ersatzkraft abzudecken.

Einfluss dynamischer Belastung

- Durch die Stoßbelastung werden auf Grund von dynamischen Effekten (Einfluss der Dehnrage, Mitwirkung der Trägheit, etc.) höhere Tragwiderstände erreicht als bei einer rein statischen Belastung. Diese Effekte hängen unmittelbar mit der Anprallgeschwindigkeit zusammen und können durch eine statische Ersatzkraft nur indirekt erfasst werden.
- Abhängig von der anprallenden Masse wird mehr oder weniger Energie in die Stütze eingetragen. Ein vollständiges Versagen der Stütze wird im Endeffekt allein dadurch entschieden, ob die Verformungskapazität der Stütze ausreicht, um die anprallende Masse zum Stehen zu bringen. Die Verformungskapazität lässt sich wiederum nur indirekt durch eine statische Ersatzkraft erfassen.

Indirekte Berücksichtigung der dynamischen Effekte für eine statische Ersatzlast

Die statischen und dynamischen Berechnungen haben gezeigt, dass durch die Berücksichtigung der dynamischen Effekte eine Laststeigerung von ca. 90 % durch die Trägheit und ca. 50% durch die Dehnraten effekte zu erwarten ist. Berücksichtigt man weiterhin, dass die mittlere Festigkeit von Stahl ca. 20% höher [32] [3] anzunehmen ist, kommt man zu folgender Laststeigerung:

$$F_{dyn,R} = \varphi_{träg} \cdot \varphi_{\dot{\epsilon}} \cdot \varphi_{mit} \cdot F_{stat,R} \approx 1,9 \cdot 1,5 \cdot 1,2 \cdot F_{stat,R} = 3,42 \cdot F_{stat,R} \quad (25)$$

Vereinfacht kann die statische Ersatzlast also um $1/3,42 = 0,29$ vermindert werden.

Indirekte Berücksichtigung der Verformungskapazität

Maßgebend für die Verformungskapazität der Stütze sind zusätzlich zu den Duktilitätsanforderungen für den Stahl selbst auch konstruktive Anforderung wie die Anordnung von Steifen etc. Die Duktilitätsanforderung an den Stahl sind in DIN EN 1993-1-1 [3] geregelt und es wird hier nicht weiter darauf eingegangen.

In den konstruktiven Anforderungen wird im folgendem Kapitel eingegangen.

Limitierung der anprallenden Energie

Maßgebend für die anprallende Energie in Form von Anprallgeschwindigkeit und -masse ist das Verhalten der Verkehrszeichenbrücke und insbesondere der Stütze beim Anprall im Hinblick auf ein mögliches Abscheren der Stütze und damit ein vollständiges Versagen, d. h. ein Umfallen der Verkehrszeichenbrücke. Die dynamischen Berechnungen haben gezeigt, dass die rückhaltende und energiedissipierende Wirkung des Anprallsockels erforderlich ist, so dass realistische Berechnungen durchgeführt werden können, die von der Tragfähigkeit der Stütze ausgehen, d. h. ein direktes vollständiges Abscheren der Stütze tritt beim Anprallereignis nicht auf.

Auf Grund des hohen Energieaufkommens bei einem Anprall ist es unrealistisch und unwirtschaftlich, die Stütze für einen maximalen Stoß von einer Masse von 38 t in Kombination mit einer Anprallgeschwindigkeit von 65 km/h zu bemessen. Vielmehr gilt es diesen Extremfall durch entsprechende Schutzmaßnahmen zu verhindern und die Stütze der Verkehrszeichenbrücke für einen Restanprall zu bemessen.

Dieser Ansatz ist auch in der SIA 261 [38] gewählt. Die Untersuchungen in der SIA 261 haben gezeigt, dass bei Tragwerken, die durch ein Fahrzeugrückhaltesystem geschützt sind, die Anprallkraft deutlich reduziert werden kann. Die Höhe der Reduktion ist dabei von der Rückhaltewirkung des Systems abhängig. So wird z. B. angegeben, dass bei Tragwerken, welche durch Betonschutzwände geschützt sind, der Fahrzeuganprall (Fahrzeugchassis) nicht zu berücksichtigen ist. Lediglich soll hier der Anprall der Fahrzeugaufbauten und der Ladungen berücksichtigt werden.

Ermittlung einer realistischen statischen Ersatzkraft

Ein realistischer Restanprall liegt den durchgeführten dynamischen Berechnungen zufolge bei einer Restgeschwindigkeit von ca. 3,6 m/s und einer Masse von 38 t. oder bei ca. 12 m/s und einer Masse von 3,14 t. Die dabei absorbierte kinetische Energie berechnet sich damit folgendermaßen:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \approx 245 \text{ kNm} \quad (26)$$

Vernachlässigt man weitere Energieverluste, wie z. B. aus Wärmeabstrahlung bei schneller Verformung, etc., kann man daraus schließen, dass diese kinetische Energie durch plastische Deformation der Stütze aufgenommen werden muss. Vereinfachend ergibt sich also:

$$E_{pl} = F_{dyn,R} \cdot d_{res} \geq E_{kin} \quad (27)$$

In unserem Fall der Referenzbrücke hat sich gezeigt, dass für die Stütze im Anprallbereich eine plastische und damit bleibende Verformungen von $d_{res} = \text{ca. } 12 \text{ cm}$ auftreten kann, die noch nicht zu einem vollständigen Versagen der Stütze führt. Dies bestätigt auch die Auswertung der Daten und Fotoaufnahmen der zur Verfügung stehenden Anprallereignisse. Damit berechnet sich eine dynamische Widerstandskraft von

$$F_{dyn,R} \geq \frac{E_{kin}}{d_{res}} = \frac{245,4 \text{ kNm}}{0,12 \text{ m}} = 2045 \text{ kN} \quad (28)$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung (25) berechnet sich somit eine statische Ersatzkraft bei großen Verformungen und bei großen Verzerrungen von

$$F_{stat,R} \geq \frac{F_{dyn,R}}{3,42} = 600 \text{ kN} \quad (29)$$

Die Ergebnisse der linear-elastischen Berechnungen mit SOFiSTiK [27] können dem Kapitel 5.5.4 dieses Berichtes entnommen werden. In Abbildung 51 sind die Widerstands-Verformungskurven für verschiedene Berechnungsvarianten im Hinblick auf die Anordnung von Querkraftsteifen am Auflagerpunkt der Stützen dargestellt.

6. Konstruktion von Verkehrszeichenbrücken mit vorgeschaltetem Fahrzeurückhaltesystem

6.1 Derzeitige typische Konstruktionen

Verkehrszeichenbrücken sind Bauwerke an Straßenverkehrswegen. Neben den normativen Vorschriften für die Berechnung der Standsicherheit von Verkehrszeichenbrücke sind auch Aspekte der Straßenverkehrssicherheit zur Vermeidung von Verkehrsunfällen und von Verkehrsbehinderungen zu berücksichtigen.



Abbildung 89 - Typische Verkehrszeichenbrücke über deutsche Autobahnen

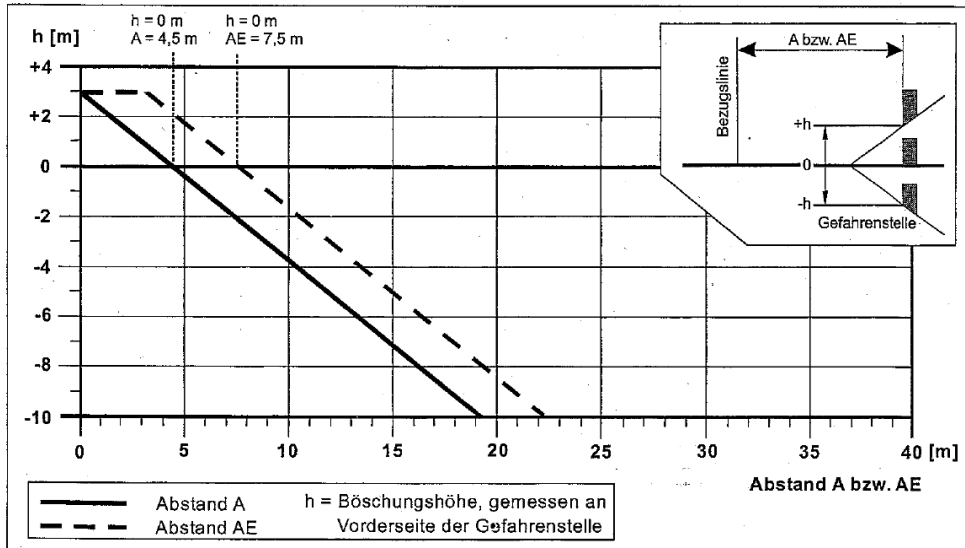
Im Gegensatz zur aktiven Sicherheit im Straßenverkehr, welche Maßnahmen zur Unfallvermeidung umfasst, versteht man unter der so genannten passiven Sicherheit alle Maßnahmen zur Reduzierung der Verletzungsschwere im Falle eines Unfalls. Neben den bekannten fahrzeugseitigen Schutzmaßnahmen wie z.B. Sicherheitsgurt und Airbag kommt auch dem straßenseitigen passiven Schutz besondere Bedeutung zu.

Die RPS 2009 [5] sieht vor, dass vor dem Aufstellen einer Schutzeinrichtung zunächst zu prüfen ist, ob durch Beseitigung oder bauliche Umgestaltung der Gefahrenstelle nicht grundsätzlich ein besserer passiver Schutz gewährleistet werden kann.

Im Hinblick auf Verkehrszeichenbrücken können folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Ausreichender Abstand des Stiels zum Fahrbahnrand.
- Die Ausbildung der Verkehrszeichenbrücke als stark verformbarer und abscherbarer Gegenstand der Straßenausstattung im Sinne der „DIN EN 12767- Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung“ [14], d. h. die Tragkonstruktion wird so hergestellt, dass sie sich beim Anprall eines Fahrzeuges auf kontrollierte Art verhält (Auszug aus [14])

Ab welchem Abstand A eine Gefahrenstelle ein zusätzliches Schutzsystem benötigt, wird in der RPS 2009 [5] in Abhängigkeit von der zulässigen Geschwindigkeit und der Geländetopologie neben dem Verkehrsraum geregelt (Abbildung 4).


 Abbildung 90 - Kritische Abstände A für Straße mit $v_{zul} = 60 \text{ km/h}$ bis 70 km/h [5]

Bei ebenem Gelände ($h = 0$) und einer zulässigen Geschwindigkeit v_{zul} von 60 km/h bis 70 km/h beträgt der kritische Abstand A zum Beispiel $4,5 \text{ m}$ gemäß Abbildung 90. Für Verkehrszeichenbrücken, deren Stiel im Mittelstreifen angeordnet ist, kann die Einhaltung dieses kritischen Abstands konstruktiv nicht erfolgen. Auch der Rahmenstiel am äußeren Fahrbahnrand kann kaum im Abstand A von mehr als vier Metern entfernt von der befestigten Fahrbahn geplant werden, da sich dadurch die Stützweiten von Verkehrszeichenbrücken stark erhöhen würden.

Verkehrszeichenbrücken sind Ingenieurbauwerke im Sinne der DIN 1076 [39]. Sie sind demnach ein in sich eigenständiges Bauwerk und nicht als Teil der Straßenausstattung oder als Bauprodukt zu betrachten. Grundsätzlich können Verkehrszeichenbrücken als steife widerstandsfähige oder als nachgiebige, d. h. stark verformbare Tragkonstruktionen ausgeführt werden. In den skandinavischen Ländern und in den USA findet der Ansatz Zuspruch, dass Verkehrszeichenbrücken, auch über mehrere Autobahnfahrstreifen, als leichte Fachwerkskonstruktionen, die im Falle eines Anpralls planmäßig versagen, ausgebildet werden.

Digitale Wechselverkehrszeichen zum Verkehrsmanagement gewinnen aufgrund immer höherer Verkehrsbelastungen immer mehr an Bedeutung. Die daraus erforderliche Begehbarkeit der Brücke zur Wartung der Informationstafel, das Gewicht und die große Schildfläche beeinflussen die Geometrie der Tragkonstruktion. In Kombination mit größeren Spannweiten aufgrund des bundesweiten Ausbaus der Autobahnen, führt diese Entwicklung zu mächtigen Verkehrszeichenbrücken, die mit filigranen umfahrbaren Tragwerken nicht mehr vergleichbar sind.

Eine Ausbildung der Rahmenstiele an den Fahrbahnrändern nach dem Grundsatz der passiven Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung (DIN EN 12767, [14]) ist aufgrund der erforderlichen Querschnitte und der notwendigen Tragfähigkeit nur schwer umsetzbar.

Im Hinblick auf Fahrzeuginsassenschutz und Unfallfolgenminderung können folgende Szenarien durchdacht werden:

- Die Tragkonstruktion leistet im Falle eines Anpralls geringen Widerstand und versagt (geringe Energieabsorption).

→ Schutz der Insassen im Unfallfahrzeug (primär), Gefährdung des Folgeverkehrs durch Versagen

- Die Tragkonstruktion ist steif und widersteht dem Anprall, (hohe Energieabsorption).

→ Vermeidung von Sekundärnfällen, auf Kosten der Insassensicherheit im Unfallfahrzeug.

Die im deutschsprachigen Raum üblichen Geometrien von Verkehrszeichenbrücken sind weit davon entfernt, Hindernisse mit geringer Energieabsorption an Straßen darzustellen. In Deutschland wird aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens die Meinung vertreten, dass das Versagen eines Bauwerks in direkter

Straßennähe durch Gefährdung des Nachfolgeverkehrs zu insgesamt größeren Unfallfolgen führt als für das direkt betroffene anprallende Fahrzeug. Im Sinne der passiven Sicherheit und der Minimierung der Unfallfolgen sollen Verkehrszeichenbrücken daher auf Kosten der Insassensicherheit des anprallenden Fahrzeugs einem Anprall widerstehen. Der Gedankengang wird durch den in den RPS 2009 [5] erwähnten Grundsatz bestärkt, dass dem Schutz unbeteiligter Dritter eine besondere Bedeutung zukommt.

Die Verkehrszeichenbrücke kann also im Sinne den RPS 2009 [5] als Gefahrenstelle im kritischen Abstand der Fahrbahnränder nicht vermieden werden. Für derartige Gefahrenstellen sehen die RPS 2009 das Vorschalten einer Schutzeinrichtung vor.

Schutzeinrichtungen werden anhand von Anprallversuchen zugelassen, wobei die Prüfverfahren und die Abnahmekriterien in der DIN EN 1317-2 [9] geregelt sind. Anhand dieser Versuche werden Schutzeinrichtungen hinsichtlich ihres Leistungsvermögens in Klassen eingeteilt. Die wesentlichen Leistungsklassen dabei sind:

Die Aufhaltstufe (N1 – N2; H1 – H4b) bestimmt den Typ, die Masse m , die Anprallgeschwindigkeit v_r und der Anprallwinkel φ des Prüffahrzeugs DIN EN 1317-2 [9], welches gegen die Schutzeinrichtung gefahren wird und das diese nicht durchbrechen darf.

Der Wirkungsbereich definiert den Abstand zwischen der Vorderkante der unverformten Schutzeinrichtung und der maximalen Position der Hinterkante der Schutzeinrichtung nach Anprall (Abbildung 7). Die DIN EN 1317-2 [15] regelt die maximalen Abstände zur Kategorisierung der jeweiligen Wirkungsbereichsklasse (W1 – W8).

Die Fahrzeugeindringung VI ist durch die maximal seitliche Position eines 4,0 m hohen, anprallenden Fahrzeugs definiert siehe Abbildung 91 - Durchbiegung D, Wirkungsbereich W und Fahrzeugeindringung VI. Auch hier regelt die DIN EN 1317-2 die maximalen Abstände zur Kategorisierung der jeweiligen Klasse der Fahrzeugeindringung (VI1 – VI9).

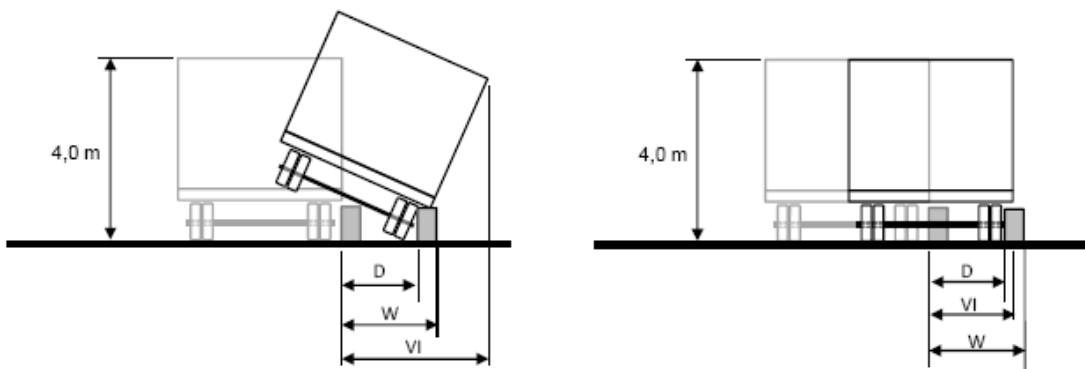


Abbildung 91 - Durchbiegung D, Wirkungsbereich W und Fahrzeugeindringung VI [9]

Für die jeweilige Gefahrenstufe regeln die RPS 2009 [5] das erforderliche Leistungsvermögen der Schutz-einrichtungen. Anprallsockel von Verkehrszeichenbrücken sind laut RPS 2009 [5] nicht als einsturzgefährdete Bauwerke einzustufen, sondern gelten als nicht verformbare flächenhafte Hindernisse. Sie sind Hindernisse mit besonderer Gefährdung von Fahrzeuginsassen und damit nach der Gefahrenstufe 3 einzuordnen, siehe Abbildung 92.

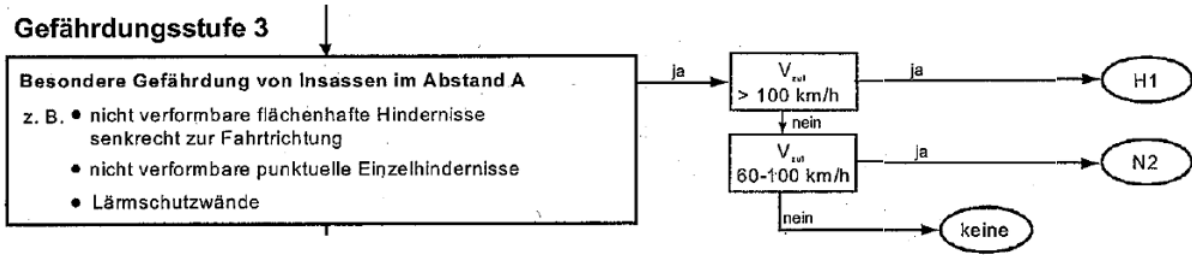


Abbildung 92 - Ausschnitt aus dem Ablaufdiagramm: Einsatzkriterien für Schutzeinrichtungen am äußeren Fahrbahnrand aus RPS 2009

Zur Beurteilung des durch die Regelungen der RPS 2009 gewährleisteten Anprallschutzes für die Verkehrszeichenbrücke werden in Tabelle 44 die im Bereich von Verkehrszeichenbrücken relevanten Aufhaltstufen und die dazugehörigen Prüfparameter aufgeführt. Dies erfolgt gemäß den Angaben in den RPS 2009 [5] und der DIN EN 1317-2 [9].

Unabhängig vom Vorhandensein eine Stütze im Mittelstreifen ist zwischen zweibahnigen Straßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit $v_{zul} > 50$ km/h eine Mindestaufhaltstufe zur Vermeidung von Durchbrüchen und der Gefährdung Dritter von durchgängig mindestens H2 gefordert [5].

Tabelle 44 - Mindestaufhaltstufen für Schutzeinrichtungen am äußeren Fahrbahnrand für Hindernisse der Gefährdungsstufe 3

Erfordernis nach RPS 2009 [5]		Abnahmeprüfung nach DIN EN 1317-2 [9]			
zul. Geschwindigkeit v_{zul}	erf. Aufhaltstufe	Fahrzeugtyp	Anprallgeschwindigkeit v_r	Anprallwinkel φ	Gesamtprüfmasse m
$v_{zul} < 60$ km/h	kein FRS	-	-	-	-
60 km/h $< v_{zul}$ $v_{zul} < 100$ km/h	N2	PKW	100 km/h	20°	900 kg
		PKW	110 km/h	20°	1 500 kg
$v_{zul} > 100$ km/h	H1	PKW	100 km/h	20°	900 kg
		LKW	70 km/h	15°	10 000 kg
im Mittelstreifen	H2	PKW	100 km/h	20°	900 kg
		Bus	70 km/h	20°	13 000 kg

Die in der Tabelle aufgeführten Aufhaltstufen geben die Mindestwerte gemäß RPS [5], Bild 7, an.

6.2 Einfluss der konstruktiven Auslegungen

Einfluss von Schutzeinrichtungen

Gemäß den Angaben in den RPS 2009 [5] handelt es sich bei Verkehrszeichenbrücken neben Straßen um nicht verformbare flächenhafte Hindernisse die in die Gefährdungsstufe 3 einzuordnen sind. Es sind demnach immer Schutzeinrichtungen gemäß Tabelle 44 anzuordnen.

Im Ergänzungsdokument zur SIA 261 [38] ist der Einfluss von Fahrzeurückhaltesystemen auf die Höhe der Anprallkräfte angegeben, siehe hierzu die nachfolgende Abbildung 93.

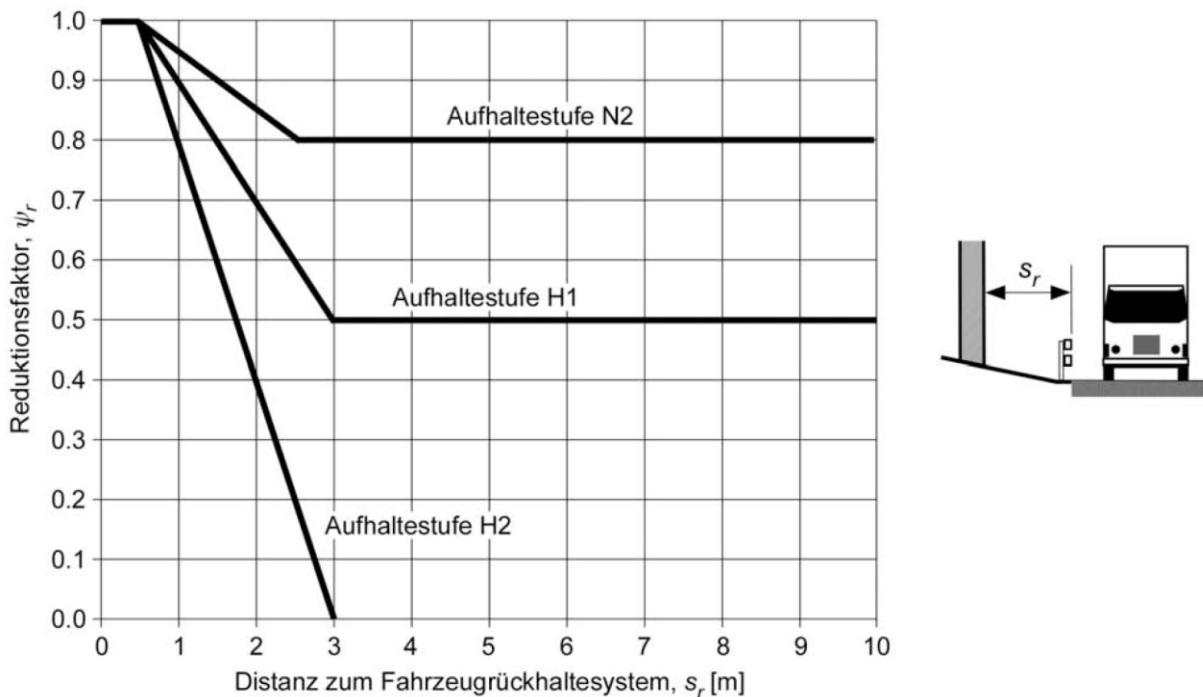


Abbildung 93 - Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung von Fahrzeurückhaltesystemen gemäß [38]

Die SIA 261 [38] gibt zudem an, dass bei Tragwerken, die durch Betonschutzwände geschützt sind, der Fahrzeuganprall (Fahrzeugchassis) nicht berücksichtigt werden muss. Zu berücksichtigen ist jedoch der Anprall von Fahrzeugaufbauten und Ladungen, falls sich das Tragwerk zwei Meter oder näher hinter der Leitmauer befindet. Hier wird davon ausgegangen, dass die gemäß den geltenden Normen ausgeführten Betonschutzwände starre Fahrzeurückhaltesysteme sind, welche auch beim Anprall schwerer Lastfahrzeuge generell wenig deformiert und kaum durchbrochen werden.

Wie in den vorherigen Kapiteln entnommen werden kann, wird die rückhaltende Wirkung bzw. der Energieabbau der anprallenden Last durch den Anprallsockel berücksichtigt. Der Einfluss eines vorgeschalteten Fahrzeurückhaltesystems wird im Rahmen der ingenieurmäßigen Bewertung der untersuchten Szenarien für die dynamischen FE-Berechnungen berücksichtigt. Die rückhaltende Wirkung geht in die Bewertung mit ein.

6.3 Vorschläge für eine Verbesserung der Konstruktion

Einfluss der Steifenanordnung

Die vorangegangenen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der Einsatz von Steifen im unmittelbaren Anprallbereich positiv auf die Stützen auswirkt (siehe Kap 5.5 und Kap. 5.7.3). Es zeigte sich, je näher die Steifen am Anprallbereich liegen, desto größer ist deren Wirkung. Die maximale Erhöhung der Tragfähigkeit wird erreicht, wenn eine Quersteife unmittelbar im Anprallbereich liegt, siehe hierzu auch Abbildung 48.

In Hinblick auf die Erhöhung der lokalen Tragfähigkeit wird vorgeschlagen, zwei zusätzliche Steifen im Auflagerbereich der Stiele einzuführen.

Prinzipiskizze für die Anordnung der Steifen $t = 12 \text{ mm}$

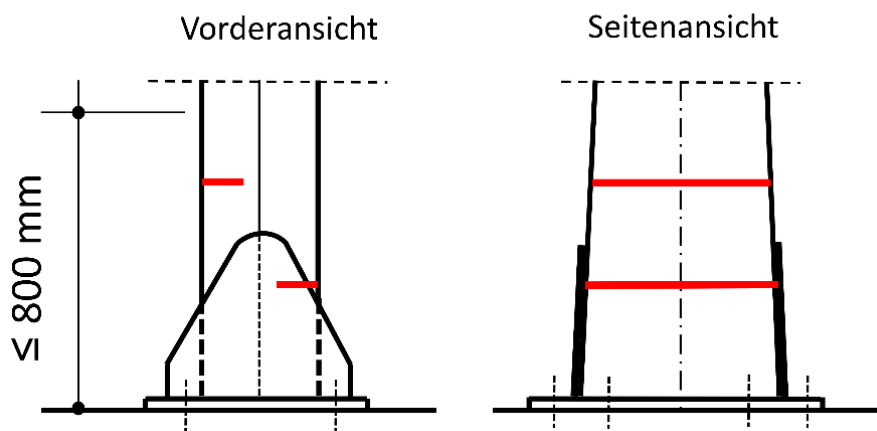


Abbildung 94 - Vorschlag für die Steifenanordnung im Auflagerbereich

Die Blechdicke der Steifen sollte mit $t = 12 \text{ mm}$ gewählt werden.

Die dynamischen Berechnungen unter Einbezug des Anprallsockels gemäß RiZ-ING VZB 4 [6] haben gezeigt, dass die konstruktive Ausbildung der Sockel einen sehr hohen Einfluss auf die Anprallkräfte und Anprallgeschwindigkeit auf die Stütze hat. Die bisher gewählten Konstruktionen gemäß VZB 4 können den Berechnungen zufolge so beibehalten werden.

7. Textvorschlag für die ZTV-ING

7.1 Auswertung der Risikoanalyse und der numerischen Berechnungen

In den durchgeführten dynamischen Berechnungen unter Berücksichtigung mehrerer Szenarien im Hinblick auf die Energiedissipation durch den Anprallsockel zeigt sich, dass ein realistisches und praxisnahes Anprallereignis an die Stütze einer Verkehrszeichenbrücke bei einer Restgeschwindigkeit von ca. 3,6 m/s und einer Masse von 38 to. oder bei einer Geschwindigkeit von ca. 12 m/s und einer Masse von 3,14 to liegt. Die Reduzierung gegenüber dem vollen LKW Anprall mit 38 to und 18,06 m/s wird dabei durch den Anprallsockel hervorgerufen. Die dynamische Widerstandskraft der Stütze des Referenzbauwerkes konnte dann mit 2045 kN berechnet werden. Die plastische Verformung der Stütze beträgt dabei ca. 12 cm. Eine solche auftretende Verformung deckt sich auch mit der Auswertung der Fotoaufnahmen aus den zur Verfügung stehenden Anprallereignissen.

Die statischen und dynamischen Berechnungen haben gezeigt, dass durch die Berücksichtigung der dynamischen Effekte eine Laststeigerung von ca. 90 % durch die Trägheit der Verkehrszeichenbrücke und ca. 50% durch die Dehnrateneffekte zu erwarten ist. Demzufolge können die statischen Ersatzlasten um 70 % gegenüber den berechneten dynamischen Anprallkräften reduziert werden.

Die bei großen Verformungen und großen Verzerrungen noch aufnehmbare Last kann demzufolge mit mindestens $2045 \text{ kN} \times 30 \% = 600 \text{ kN}$ berechnet werden.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass Konstruktionen, die für eine statische Ersatzlast von 100 kN im Rahmen einer linear elastischen Berechnung bemessen wurden, in der Lage sind, bei großen Verformungen und großen Verzerrungen statische Ersatzlasten von mindestens 600 kN aufzunehmen, ohne dass die Verkehrszeichenbrücke versagt.

Wie bereits in Kapitel 4 im Rahmen der statistischen Untersuchung von Anprallereignissen nachgewiesen wird damit eine Versagenswahrscheinlichkeit im Rahmen der Forderungen der DIN EN 1990 [29] erreicht.

Die positive Wirkung eines vorgeschalteten Fahrzeugrückhaltesystems wurde in den numerischen Berechnungen nicht berücksichtigt. So gibt jedoch z. B. die SIA 261 [38] an, dass bei Tragwerken, die durch Betonleitmauern geschützt sind, bei einem Anprall das Fahrzeugchassis nicht zu berücksichtigen ist, sondern lediglich der Anprall der Fahrzeugaufbauten und der Ladungen.

Vergleicht man die statische Ersatzlast für ein Anprallereignis an Verkehrszeichenbrücke in einer Höhe von 100 kN mit den 1500 kN, die als statische Ersatzlast für die Unterbauten von Brücken gemäß EC 1 [1] angegeben werden, so zeigt sich, dass durch das Zusammenspiel von steifem Anprallsockel und nachgiebiger Verkehrszeichenbrücke ein deutlich positiver Effekt erzielt werden kann. Im Vergleich hierzu treten bei steifen, unnachgiebigen und starren Unterbauten von Brückenbauwerken deutlich größere Anprallkräfte auf.

Zur Berücksichtigung der Einwirkungen infolge Anprall in Hinblick auf die Querkraftbemessung wird eine statische Ersatzlast in einer Höhe von 1,25 m über OK Fundament mit $H = 100 \text{ kN}$ vorgeschlagen.

Die qualitative Risikoanalyse zeigte, dass Schutzeinrichtungen vor den Verkehrszeichenbrücken anzuordnen sind, so dass die Gefährungsgrade und -potentiale deutlich gesenkt werden. Eine Anpassung der Lage der Verkehrszeichenbrücken ist aufgrund der vorgegebenen Randbedingungen kaum möglich. Die betrieblichen und straßenbaubedingten Randbedingungen sind hier übergeordnet maßgebend.

Die Art und Weise der Schutzeinrichtung, die vor der Verkehrszeichenbrücke anzuordnen ist, wird gemäß den RPS 2009 [5] gewählt. Dies sollte so beibehalten werden.

Gemäß dem recherchierten Datenmaterial konnte die Auftretenswahrscheinlichkeit P für ein Anprallereignis auf der freien Strecke mit $P(\text{Anprall} / \text{km}) = 8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$ und im Bereich von Knotenpunkten wie z. B. München oder Nürnberg mit $P(\text{Anprall} / \text{km}) = 1,7 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$ berechnet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich um bestehende Schilderbrücken handelt, bei deren Bemessung eine maximale statische Ersatzlast von $H = 100 \text{ kN}$ angesetzt wurde. Zudem ist zu beachten, dass in den Anprallereignissen auch die Ereignisse infolge von Baustellenverkehr mit Anprall des nicht eingefahrenen Kippanhängers berücksichtigt sind. Aus den Daten kann weiterhin das Risiko für ein Anprallereignis mit Todesfolge sowie mit einem Verlust der Tragfähigkeit der VZB berechnet werden. Die Risiken für Autobahnen um Zentren wie München oder Nürnberg wurden wie folgt berechnet:

Risiko bzw. $P(\text{Anprall mit Todesfolge} / \text{km}) = 6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$

Risiko bzw. $P(\text{Anprall mit Verlust Tragfähigkeit VZB} / \text{km}) = 6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$

Auf der freien Strecke geht aus den recherchierten Daten nicht hervor, ob das Anprallereignis eine Todesfolge hatte. Das Risiko für den Anprall kann für die freie Strecke mit

Risiko bzw. $P(\text{Anprall} / \text{km}) = 8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$
berechnet werden.

Die Berechnung des Risikos eines Anprallereignisses an eine Verkehrszeichenbrücke mit Todesfolge zeigt, dass diese im Hinblick auf die Auftretenswahrscheinlichkeit in ähnlicher Größenordnung liegt, die der Eurocode 0 [29] als Zielzuverlässigkeit bzw. als Versagenswahrscheinlichkeit für die Berechnung und Bemessung von Baukonstruktionen angibt. Die im Eurocode 0 angegebenen Überlagerungsvorschriften für die Außergewöhnliche Bemessungssituation bei der Bemessung von Verkehrszeichenbrücken können damit so beibehalten werden.

Für Mautbrücken sowie für Wechselverkehrszeichenträger konnten trotz intensiver Bemühungen keine statistischen Daten in Hinblick auf Anprallereignisse recherchiert werden. Auf der sicheren Seite liegend wird empfohlen, die vorgeschlagenen statischen Ersatzlasten und konstruktiven Maßnahmen auch für Mautbrücken und Wechselverkehrszeichenträger zu übernehmen.

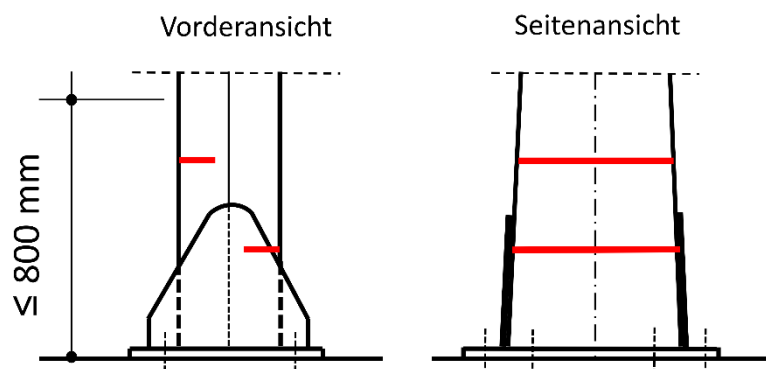
7.1.1 Textvorschlag für statische Ersatzlasten sowie für die Konstruktion

Das entsprechende Kapitel 6.7 Fahrzeuganprall in der der ZTV-ING, Teil 9 Bauwerke, Abschnitt 1 Verkehrszeichenbrücken könnte wie folgt formuliert werden:

6.7 Fahrzeuganprall

- (1) *Es gelten die RPS.*
- (2) *Zur Bemessung des Stiels ist eine horizontale statische Ersatzlast von 100 kN (Außergewöhnliche Einwirkung im Rahmen einer linear elastischen Berechnung) in einer Höhe von 1,25 m über OK Straße in jeweils ungünstigster Richtung zu berücksichtigen.*
- (3) *Im Auflagerbereich der Stiele sind zur lokalen Ableitung der Horizontalkräfte infolge Anprall konstruktiv 2 Steifen mit einer Bleckdicke $t = 12 \text{ mm}$ und mit einer Stahlgüte S 235 anzuordnen. Je Querschnittshälfte der rechteckigen Riegel ist dabei 1 Steife einzubauen. Die Steifen sind im Bereich von 20 cm bis 80 cm ab Unterkante Stütze einzubauen. Siehe hierzu die nachfolgende Abbildung.*

Prinzipskizze für die Anordnung der Steifen $t = 12 \text{ mm}$



8. Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Verkehrszeichenbrücke werden in Deutschland gemäß den Regelungen der Eurocodes für Lastannahmen und Bemessung sowie der ZTV-ING [4] und der RiZ-ING [6] geplant. In Hinblick auf die Einwirkungen infolge Anprall gibt es im Hinblick auf die statische Ersatzlast große Unterschiede. So ist z. B. gemäß Eurocode 1 [1] für Brücken allgemein außerorts eine horizontale Anpralllast von 1500 kN zu berücksichtigen. Gemäß den ZTV-ING [4] ist für Schilderbrücken in einem solchen Fall eine Anpralllast von 100 kN anzusetzen. In beiden Fällen ist jeweils auch die Anordnung eines Anprallsockels erforderlich. Die konstruktive Durchbildung eines solchen Anprallsockels ist in den Richtzeichnungen RiZ-ING [6] geregelt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird aufbauend auf einer qualitativen und quantitativen Risikoanalyse sowie der Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Anprallereignissen an Verkehrszeichenbrücken eine statische Ersatzkraft für ein Anprallereignis anhand dynamischer numerischer FE-Berechnungen berechnet.

Für die Durchführung der qualitativen und quantitativen Risikoanalyse konnten Daten für Anprallereignisse aus Baden-Württemberg und aus Bayern beschafft werden. Insgesamt liegen der Berechnung der Auftretenswahrscheinlichkeit die Daten von 1870 km Autobahn zugrunde. Dies entspricht ca. 14 % des insgesamt 12993 km (Stand 2016) langen Autobahnnetzes in Deutschland. Folgende Auftretenswahrscheinlichkeiten konnten berechnet werden:

- Freie Strecke:

P(Anprall / km)	=	$8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$
-----------------	---	----------------------------------
- Autobahnknotenpunkte im Bereich von Zentren wie München oder Nürnberg:

P(Anprall / km)	=	$1,7 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$
P(Anprall / km ohne Baustellenverkehr)	=	$1,12 \times 10^{-3} / \text{Jahr}$
P(Anprall mit Todesfolge / km)	=	$6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$
P(Anprall mit Verlust Tragfähigkeit VZB / km)	=	$6,8 \times 10^{-5} / \text{Jahr}$

Es zeigt sich, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. das Risiko für einen Fahrzeuganprall an eine Verkehrszeichenbrücke mit Todesfolge im Bereich der Zielzuverlässigkeiten und Versagenswahrscheinlichkeiten für Baukonstruktionen gemäß Eurocode 0 [29] liegt. Die im Eurocode 0 angegebenen Vorschriften und Überlagerungskombinationen für die Außergewöhnlichen Einwirkungen können damit bei der Bemessung von Verkehrszeichenbrücken weiterhin ohne Änderungen angewandt werden. Eine Anpassung ist nicht erforderlich. Dies gilt ebenso für die statisch-konstruktive Ausbildung der Anprallsockel.

Bei der Bemessung von Verkehrszeichenbrücken gemäß ZTV-ING [4] werden die Anpralllasten in Höhe von 100 kN für die Biegetragfähigkeit der Stützen nicht maßgebend. Die Außergewöhnliche Einwirkungskombination, welche die Anpralllasten berücksichtigt, würde erst bei einer statischen Anpralllast von 1125 kN unter Berücksichtigung der Windlastzone I maßgebend, bei höheren Windlastzonen erst bei deutlich größeren Anpralllasten. Die ständige Bemessungssituation ist für die Biegebemessung der Stützen stets maßgebend. Dies liegt daran, dass die Anpralllasten aufgrund der geringen Höhe des Angriffspunktes über dem Auflager mit 35 cm (Angriffspunkt 1,25 m über OK Fahrbahn abzgl. 90 cm Höhe des Anprallsockels) nur einen sehr kleinen Hebelarm für das Biegemoment am Stützenfuß aufweisen.

Dagegen wird bei der Querkraftbemessung die Außergewöhnliche Einwirkungskombination in den meisten Fällen maßgebend. Aus diesem Grunde werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Querkraftverstärkungen am Stützenfuß vorgeschlagen.

Die qualitative Risikoanalyse gemäß Kapitel 4.2 dieses Berichtes zeigt die maßgebenden Gefährdungsszenarien für Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken. Da die zur Verfügung stehenden Daten für die Anprallereignisse keine Hinweise auf die Schwere der Verletzungen der anprallenden Personen oder von Dritten enthalten, konnte die Berechnung der Gefährdungsszenarien nur auf der Grundlage ingenieurmäßiger Schätzungen unter Berücksichtigung des zur Verfügung gestandenen Fotomaterials der Anprallereignisse vorgenommen werden. Es zeigte sich jedoch, dass wie erwartet in allen Fällen die Anordnung von Fahrzeugrückhaltesystemen eine deutliche Senkung des Gefährdungsgrades für den Anprallenden und für Dritte bewirkt. Als Ergebnis der qualitativen Risikoanalyse kann daher bestätigt werden, dass die Anordnung von Fahrzeugrückhaltesystemen gemäß den Angaben in den RPS [5] zu einer deutlichen Reduzierung der Auswirkungen von Anprallereignissen auf Verkehrszeichenbrücken führen. In vergleichbaren Studien, z. B. SIA 261 [38], wird dies bestätigt. Der Hinweis in den ZTV-ING, Kapitel 6.7, Fahrzeuganprall, in Hinblick auf die Anwendung der RPS [5] ist beizubehalten.

Am Gesamtmodell einer Verkehrszeichenbrücke wurden dynamische Berechnungen mit dem Programm Siemens NX [10] durchgeführt. Der Anprallkörper wurde dabei so modelliert, dass der LKW-Anprall möglichst realistisch nachempfunden werden kann. Für die Berechnung der Tragfähigkeit der Verkehrszeichenbrücke und der auftretenden dynamischen Einwirkungen wurden mehrere Szenarien berücksichtigt. Es wurden dabei insgesamt fünf Hauptszenarien betrachtet. Diese beinhalten im Wesentlichen eine Variation der Anprallgeschwindigkeit und der Anprallmasse. Dies erfolgte unter Berücksichtigung der Art und Weise der energiedissipierenden Wirkungen des Anprallsockels. Es zeigte sich, dass ein Anprallsockel gemäß Richtzeichnung RiZ-ING VZB 4 [6] eine deutliche Reduzierung des Anprallereignisses im Hinblick auf Geschwindigkeit und einwirkende Masse an die Stütze bewirkt.

Die statischen und dynamischen Berechnungen haben gezeigt, dass durch die Berücksichtigung der dynamischen Effekte eine Laststeigerung von ca. 90 % durch die Trägheit der Verkehrszeichenbrücke und ca. 50% durch die Dehnrateneffekte zu erwarten ist. Demzufolge können die statischen Ersatzlasten aufgrund der Nachgiebigkeit des Gesamtsystems um 70 % gegenüber den berechneten dynamischen Anprallkräften reduziert werden. Ein realistisches und praxisnahes Anprallereignis liegt den durchgeführten dynamischen Berechnungen zufolge bei einer Restgeschwindigkeit von ca. 3,6 m/s und einer Masse von 38 t. oder bei ca. 12 m/s und einer Masse von 3,14 t. Die Reduzierung gegenüber dem nicht abgeminderten LKW Anprall mit 38 t und 18,06 m/s wird dabei durch den Anprallsockel hervorgerufen.

Die dynamische Widerstandskraft der Stütze des Referenzbauwerkes konnte dann mit 2045 kN berechnet werden. Die plastische Verformung der Stütze beträgt dabei ca. 12 cm. Eine solche auftretende Verformung deckt sich auch mit der Auswertung der Fotoaufnahmen aus den zur Verfügung stehenden Anprallereignissen.

Die statische Ersatzlast bei großen Verzerrungen und bei großen Verformungen kann demzufolge mit 2045 kN x 30 % = 600 kN berechnet werden. Der Angriffspunkt der statischen Ersatzlast liegt dabei 1,25 m über OK Fahrbahn. Diese Angriffshöhe entspricht den derzeitigen Regelungen. Da es sich bei dem untersuchten Referenzbauwerk um eine typische Verkehrszeichenbrücke auf der Basis eines ausgeführten Bauwerks handelt, kann das Ergebnis als repräsentativ betrachtet werden. Für die Bemessung ist die statische Ersatzkraft von $H = 600$ kN nicht geeignet, da durch die großen Verformungen und Verzerrungen Tragreserven aktiviert werden, die bei der Bemessung unter Ansatz von Eigengewicht, Wind und Anpralllasten nach DIN EN 1993 nicht berücksichtigt werden. Die Anprallberechnungen haben jedoch gezeigt, dass die, untersuchte Verkehrszeichenbrücke, die mit einer statischen Ersatzlast von $H = 100$ kN bemessen wurde in der Lage ist, bei Akzeptanz von großen Schädigungen des Tragwerks einen Anprall mit den vorgenannten Parametern ohne ein Totalversagen aufzunehmen.

Daher wird empfohlen die statische Ersatzlast mit $H = 100$ kN sowohl für Verkehrszeichenbrücken außerorts mit $v_{zul} > 50$ km/h als auch innerorts mit $v_{zul} \leq 50$ km/h zu berücksichtigen und damit gemäß den derzeitigen Regelungen beizubehalten. Die Berücksichtigung einer solchen statischen Ersatzlast führt zu Konstruktionen, die in der Lage sind, die bei einem Anprallereignis auftretenden Einwirkungen aufzunehmen, ohne dass die Konstruktion versagt.

Gemäß den bisherigen Regelungen in den ZTV-ING [4] und RiZ-ING [6] sind bei der Bemessung keine Anpralllasten auf den Riegel von Verkehrszeichenbrücken zu berücksichtigen. Die Auswertung der Schadensfälle hat gezeigt, dass solche Anprallereignisse überwiegend bei Baustellenverkehr auftreten. Im normalen Straßenverkehr sind solche Ereignisse nur sehr selten aufgetreten, die dann auch meist zu einer Deformation des Verkehrsschildes geführt haben. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass Verkehrszeichenbrücken eine größere lichte Höhe wie Brückenüberbauten über Straßen aufweisen, so dass solche Ereignisse nur sehr selten auftreten und zu hohe Fahrzeuge in den meisten Fällen bei der Durchfahrt unter einer Brücke bereits Schäden erleiden. Aus diesem Grunde wird vorgeschlagen, diese Regelung beizubehalten und keine Anpralllasten an den Riegel von Verkehrszeichenbrücken zu berücksichtigen.

Für die Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit und der lokalen Tragfähigkeit der Stütze am Anprallort wird die Anordnung von zwei zusätzlichen Steifen vorgeschlagen. Diese sollen im Abstand von 20 cm bis 80 cm oberhalb des Fußpunktes eingebaut werden. Sowohl die linear-elastische Berechnung mit SOFiSTiK als auch die dynamischen numerischen Berechnungen mit Siemens NX zeigten große Tragfähigkeitssteigerungen. Die genaue Ausbildung kann der Abbildung 94 dieses Berichtes entnommen werden.

Für Mautbrücken sowie für Wechselverkehrszeichenträger konnten trotz intensiver Bemühungen keine statistischen Daten in Hinblick auf Anprallereignisse recherchiert werden. Aus diesem Grund konnten die zuvor aufgeführten Untersuchungen und Berechnungen nur an Verkehrszeichenbrücken erfolgen. Auf der sicheren Seite liegend wird empfohlen, die vorgeschlagenen konstruktiven Maßnahmen auch für Mautbrücken und Wechselverkehrszeichenträger zu übernehmen.

Die Autoren danken den nachfolgend genannten Behörden und den jeweiligen Mitarbeitern vielmals für die Unterstützung bei der Datenbeschaffung von Anprallereignissen an Verkehrszeichenbrücken. Folgende Behörden haben mitgewirkt: BASt, Autobahndirektion Südbayern, Autobahndirektion Nordbayern und die nachfolgenden Autobahnmeistereien Freiburg, Karlsruhe, Ludwigsburg, Ulm, Wangen, Heidenheim, Kirchheim, Mannheim, Herrenberg, Walldorf und Rottweil.

8.2 Ausblick

Bei den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens betrachteten Verkehrszeichenbrücken wurde für die Bestimmung der statischen Ersatzlast mittels der dynamischen FE-Berechnungen die rückhaltende Wirkung eines vorgeschalteten Fahrzeugrückhaltesystems nicht berücksichtigt. In vielen Fällen kann gemäß der Richtzeichnung VZB 5 gemäß [6] eine Schutzeinrichtung in den Anprallsockel integriert werden. Inwiefern ein solches System die energiedissipierende Wirkung des Anprallsockels nochmals erhöhen kann, sollte in zusätzlichen Berechnungen noch geprüft werden. Ist ein Fahrzeugrückhaltesystem gemäß der Richtzeichnung VZB 4 vor dem Anprallsockel angeordnet, so kann seine rückhaltende und energiedissipierende Wirkung ebenso berücksichtigt werden. In solchen Fällen gibt das Ergänzungsdokument zur SIA 261 [38] an, dass der Fahrzeuganprall (Fahrzeugchassis) an den Stiel einer Verkehrszeichenbrücke nicht zu berücksichtigen ist. Zu berücksichtigen ist jedoch der Anprall von Fahrzeugaufbauten und Ladungen, falls sich das Tragwerk zwei Meter oder näher hinter der Schutzwand befindet.

Solche weiterführenden Untersuchungen waren nicht Bestandteil des vorgegebenen Projektumfanges.

Weiterhin wird in der SIA 261 [38] der Einfluss des Verkehrs, d. h. der Anteil der Schwere Lastfahrzeuge am Gesamtverkehr, sowie der Einfluss des Abstandes der Distanz des Tragwerks vom Fahrbahnrand im Hinblick auf die Höhe der statischen Anpralllast berücksichtigt. Solche Untersuchungen wurden aufgrund des vorgegebenen Projektumfanges nicht durchgeführt. Zudem hat sich gezeigt, dass die wirtschaftlichen Folgen der mit diesem Bericht vorgeschlagenen Maßnahmen kaum eine weitere Unterteilung der Anpralllasten rechtfertigen.

Gemäß den Empfehlungen in den vorherigen Kapiteln soll zwischen Verkehrszeichenbrücken, die innerorts und außerorts angeordnet sind, in Hinblick auf die Höhe der statischen Ersatzlast, nicht unterschieden werden. Eigene FE-Berechnungen an Verkehrszeichenbrücken ohne Anprallsockel und an Straßen mit einer zulässigen Geschwindigkeit von $v \leq 50$ km/h wurden nicht durchgeführt. Die Empfehlung basiert auf den FE-Berechnungen der Verkehrszeichenbrücken mit Anprallsockel und einer entsprechenden ingenieurmäßigen Einschätzung sowie Vergleichsberechnungen an einem linear-elastischen Stabwerk mit SO-FiSTiK [27].

Weiterhin ist zu beachten, dass für die qualitative und quantitative Risikoanalyse nur Daten aus ca. 14 % des deutschen Autobahnnetzes beschafft werden konnten. Für Anprallereignisse an Verkehrszeichenbrücken, die innerorts angeordnet sind und keinen Anprallsockel aufweisen, liegen keine Daten vor. Solche Daten wurden auch nicht gezielt angefragt.

Eine Vergrößerung der Datenbasis würde sich in allen Belangen sehr empfehlen.

9. Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 1991-1-7/NA: Nationaler Anhang - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen, Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2010-12.
- [2] „DIN EN 1992-2:2010-12, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken,“ 2010, 2010.
- [3] DIN EN 1993-1-1:2005: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2005.
- [4] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 9 Bauwerke, Abschnitt 1 Verkehrszeichenbrücken, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2013.
- [5] Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme, RPS, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement, 2009.
- [6] Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING), Bundesanstalt für Straßenwesen, 2015.
- [7] DIN EN 1991-1-7: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen - Außergewöhnliche Einwirkungen; Deutsche Fassung EN 1991-1-7:2006 + AC:2010, Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2010.
- [8] C. Petersen, Dynamik der Baukonstruktionen, Braunschweig / Wiesbaden: Vieweg, 2000.
- [9] DIN EN 1317-2: Rückhaltesystem an Straßen – Teil 2: Leistungsklassen, Abnahmekriterien für Anprallprüfungen und Prüfverfahren für Schutzeinrichtungen und Fahrzeugbrüstungen; Deutsche Fassung EN 1317-2:2010: Ausgabe Januar 2011, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [10] Siemens NX Nastran, *NX 10.0.2.6*, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2014.
- [11] F. B. L. V. Bauhaus - Universität Weimar, „Anprall an Stützen und Pfeiler,“ Bauhaus - Universität Weimar, Weimar, 2009.
- [12] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Anprallbemessung von Brückenunterbauten für Neubau- und Bestandsbauwerke, FE 15.0557/2012/FRB, Schlussbericht,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, BASt, Bergisch Gladbach, 2017.
- [13] DIN EN 1317-1: Rückhaltesystem an Straßen – Teil 1: Terminologie und allgemeine Kriterien für Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1317-1:2010: Ausgabe Januar 2011., Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [14] DIN EN 12767: Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen für die Straßenausstattung – Anforderungen und Prüfverfahren; Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2013.
- [15] R. Rackwitz, „Einwirkungen auf Bauwerke,“ in *Der Ingenieurbau: Grundwissen*, Bde. %1 von %2[8] Tragwerkszuverlässigkeit, Einwirkungen, G. Mehlhorn, Hrsg., Berlin, Ernst & Sohn, 1996, pp. 73-416.
- [16] M. Feyerabend, „Gabelstapler-Anprallschutz - Bemessung mit einer dynamischen Näherungslösung,“ *Bauingenieur* 68, pp. 35-41, 1993.
- [17] M. Feyerabend, *Der harte Querstoß auf Stützen aus Stahl und Stahlbeton*, Bd. Heft 7, Karlsruhe: Massivbau Baustofftechnologie Karlsruhe, 1988.
- [18] J. Eibl und K. Block, „Zur Beanspruchung von Balken und Stützen bei hartem Stoß (impact),“ *Bauingenieur* 56, pp. 369-377, 1981.
- [19] F. Runggaldier, *Untersuchungen zur Tragfähigkeit des Rahmenstiels einer einfeldrigen Verkehrszeichenbrücke infolge Einwirkungen aus Anprall - Grundlagen für eine statische Ersatzlast*, München: MA-Arbeit, TU München, 2017.
- [20] H. Kramer, *Angewandte Baudynamik, Grundlagen und Praxisbeispiele*, 2. Hrsg., Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2013.
- [21] C. Popp, *Der Querstoß beim Aufprall von Kraftfahrzeugen auf Stützen und Rahmenstiele in Straßenunterführungen*, Bd. Heft 14, F. a. d. G. d. Stahlbaues, Hrsg., Köln: Stahlbau-Verlag, 1961.
- [22] „DIN 1072: Straßen- und Wegbrücken,“ Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1985-12.
- [23] G. Spaethe, *Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen*, Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [24] J. C. o. S. S. (JCSS), „Probabilistic Model Code 12th,“ JCSS, Zürich, 2002.

- [25] J. C. o. S. S. (JCSS), „Probabilistic Assessment of Existing Structures,“ JCSS, RILEM Publications, Zürich, 2001.
- [26] DIN EN 1990:2012-12, Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011.
- [27] SOFiSTiK AG, Oberschleißheim, Germany, SOFiSTiK Manual, Version 2016-6, Oberschleißheim, 2016.
- [28] R. C. P. RCP Consult GmbH, „Comrel,“ RCP Consult GmbH, München, 2017.
- [29] DIN EN 1990: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2010.
- [30] Röger, Statische Berechnung Verkehrszeichenbrücke AS Berg/Bad Steben, A615017-4, erstellt am 06.02.2016, Dillenburg: Stahlbau-Verkehrstechnik, 2016.
- [31] Röger, Statische Berechnung Verkehrszeichenbrücke AS Berg/Bad Steben, A615055-1, erstellt am 04.03.2016, Dillenburg: Stahlbau-Verkehrstechnik, 2016.
- [32] DIN EN 1997-1: Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln, Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V., 2014.
- [33] DIN 1054: Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2010.
- [34] Schneider, Bautabellen für Ingenieure - 20. Auflage, A. Goris, Hrsg., Köln: Werner Verlag, 2012.
- [35] B. Kühn, Beitrag zur Vereinheitlichung der europäischen Regelungen zur Vermeidung von Sprödbruch, G. Sedlacek, Hrsg., Aachen: Shaker Verlag, 2005.
- [36] F. M. Mazzolani, Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas, London: E & FN Spon, 2000.
- [37] NX Nastran 10, NX Nastran 10 - Advanced Nonlinear Theory and Modeling Guide, Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2014.
- [38] B. f. Strassen, „Richtlinie - Anprall von Strassenfahrzeugen auf Bauwerksteile von Kunstbauten, Ergänzungen zur Norm SIA 261, Einwirkungen auf Tragwerke,“ ASTRA , Bern, 2005.
- [39] DIN 1076 Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, 1999-11.

Anhang A)

Ereignisszenarien für ein System ohne Fahrzeug-Rückhaltesystem**Fall Motorrad:***Szenario 1:***Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug wird so stark verlangsamt, dass es direkt an der Verkehrszeichenbrücke zum Stillstand kommt, es besitzt nach dem Anprall keine Restgeschwindigkeit. Das Fahrzeug befindet sich außerdem außerhalb der Fahrbahn auf einem Seitenstreifen.

- | | |
|-------------------------|--|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären= 1,00
sekundäre Gefährdung = 0,60 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,55 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,90 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,50 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+1,00+0,60+0,55+0,50+0,25+0,90+0,50}{8} = \underline{0,633}$

*Szenario 2:***Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 5m) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug wird so stark verlangsamt, dass es direkt an der Verkehrszeichenbrücke zum Stillstand kommt, es besitzt nach dem Anprall keine Restgeschwindigkeit. Das Fahrzeug befindet sich außerdem auf der Fahrbahn, da kein Seitenstreifen vorhanden ist.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00
sekundäre Gefährdung = 0,70 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,65 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,50 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+1,00+0,70+0,65+0,50+0,25+0,50}{7} = \underline{0,657}$

Szenario 3:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt von der VZB ab, fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,95 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,60 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,55 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,90 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,40 |

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,95+1,00+0,60+0,55+0,50+0,25+0,90+0,40}{8} = \underline{0,644}$$

Szenario 4:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und streift eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,80 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,60 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,55 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,90 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,25 |

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,80+1,00+0,60+0,55+0,50+0,25+0,90+0,25}{8} = \underline{0,606}$$

Szenario 5:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,70 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,65 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,90 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,45 |

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{1,00+1,00+0,70+0,65+0,50+0,25+0,90+0,45}{8} = \underline{0,681}$$

Szenario 6:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 5m) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der VZB ab, fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,95 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,65 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,60 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,40 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{0,95+1,00+0,65+0,60+0,50+0,25+0,40}{7} = \underline{0,621}$$

Szenario 7:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 5m) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und streift eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,80 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,65 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,60 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,25 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{0,80+1,00+0,65+0,60+0,50+0,25+0,25}{7} = \underline{0,579}$$

Szenario 8:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 5m) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,45 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{1,00+1,00+0,75+0,70+0,50+0,25+0,45}{7} = \underline{0,664}$$

Fall Motorrad:

Szenario 9:

Kurzbeschreibung **Kombination: 1abc) 2) 3f) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug wird so stark verlangsamt, dass es direkt an der Verkehrszeichenbrücke zum Stillstand kommt, es besitzt nach dem Anprall keine Restgeschwindigkeit. Das Fahrzeug befindet sich außerdem außerhalb der Fahrbahn auf einem Seitenstreifen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,95 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,60 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,80 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,95+1,00+0,75+0,70+0,50+0,25+0,60+0,80}{8} = \underline{0,694}$

Szenario 10:

Kurzbeschreibung **Kombination: 1abc) 2) 3f) 5m) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug wird so stark verlangsamt, dass es direkt an der Verkehrszeichenbrücke zum Stillstand kommt, es besitzt nach dem Anprall keine Restgeschwindigkeit. Das Fahrzeug befindet sich außerdem auf der Fahrbahn, da kein Seitenstreifen vorhanden ist.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,90 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,80 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,8 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+1,00+0,90+0,80+0,50+0,25+0,80}{7} = \underline{0,750}$

Szenario 11:

Kurzbeschreibung **Kombination: 1abc) 2) 3g) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt von der VZB ab, fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,80
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,70
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,60
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,60
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,70

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{0,80+0,70+0,85+0,60+0,50+0,25+0,60+0,70}{8} = \underline{0,625}$$

Szenario 12:

Kurzbeschreibung **Kombination: 1abc) 2) 3h) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und streift eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,60
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,70, sekundäre Gefährdung = 0,85
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,60
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,60
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,55

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{0,60+0,70+0,85+0,60+0,50+0,25+0,60+0,55}{8} = \underline{0,581}$$

Szenario 13:

Kurzbeschreibung **Kombination: 1abc) 2) 3i) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 1,00
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,85, sekundäre Gefährdung = 0,85
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,65
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,60
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,75

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{1,00+0,85+0,85+0,65+0,50+0,25+0,60+0,75}{8} = \underline{0,681}$$

Szenario 14:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 5m) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der VZB ab, fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,80
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,75, sekundäre Gefährdung = 0,90
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,65
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,70

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,80+0,75+0,90+0,65+0,50+0,25+0,70}{7} = \underline{0,650}$$

Szenario 15:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 5m) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und streift eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,60
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,75, sekundäre Gefährdung = 0,90
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,65
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,55

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,60+0,75+0,90+0,65+0,50+0,25+0,55}{7} = \underline{0,600}$$

Szenario 16:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 5m) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 1,00
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,90, sekundäre Gefährdung = 0,90
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,75

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{1,00+0,90+0,90+0,70+0,50+0,25+0,75}{7} = \underline{0,714}$$

Fall LKW:*Szenario 17:***Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug wird so stark verlangsamt, dass es direkt an der Verkehrszeichenbrücke zum Stillstand kommt, es besitzt nach dem Anprall keine Restgeschwindigkeit. Das Fahrzeug befindet sich außerdem außerhalb der Fahrbahn auf einem Seitenstreifen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,85 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,30 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 1,00 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{1,00+0,25+0,85+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+1,00}{9} = \underline{0,622}$$

*Szenario 18:***Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 5m) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug wird so stark verlangsamt, dass es direkt an der Verkehrszeichenbrücke zum Stillstand kommt, es besitzt nach dem Anprall keine Restgeschwindigkeit. Das Fahrzeug befindet sich außerdem auf der Fahrbahn, da kein Seitenstreifen vorhanden ist.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 1,00 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,85 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 1,00 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{1,00+0,25+1,00+0,75+0,85+0,50+0,25+1,00}{8} = \underline{0,70}$$

Szenario 19:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt von der VZB ab, fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,80
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,95
- Verlust Ladegut Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,30
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 1,00

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,80+0,25+0,95+0,75+0,70+0,50+0,25+0,50+1,00}{9} = \underline{0,611}$

Szenario 20:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und streift eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,55
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,95
- Verlust Ladegut Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,30
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,85

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,55+0,25+0,95+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+0,85}{9} = \underline{0,567}$

Szenario 21:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt außerhalb der Fahrbahn (am Fahrbahnrand, am Mittelstreifen oder Seitenstreifen) liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 1,00
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,95
- Verlust Ladegut Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,30
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 1,00

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+0,25+0,95+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+1,00}{9} = \underline{0,633}$

Szenario 22:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 5m) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der VZB ab, fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,80
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,30, sekundäre Gefährdung = 1,00
- Verlust Ladegut Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,85
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 1,00

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,80+0,30+1,00+0,75+0,85+0,50+0,25+1,00}{8} = \underline{0,681}$

Szenario 23:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 5m) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und streift eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug fährt mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,55
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,30, sekundäre Gefährdung = 1,00
- Verlust Ladegut Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,85
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,85

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,55+0,30+1,00+0,75+0,85+0,50+0,25+0,85}{8} = \underline{0,631}$

Szenario 24:

Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 5m) 6p)

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen eine Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,30, sekundäre Gefährdung = 1,00 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,85 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 1,00 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+0,30+1,00+0,75+0,85+0,50+0,25+1,00}{8} = \underline{0,706}$

Ereignisszenarien für ein System mit Fahrzeug-Rückhaltesystem

Fall Motorrad:

Szenario 1:

Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 4j) 5l) 6n)

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt nicht an der Leitplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Die Leitplanke kann das Fahrzeug noch zurückhalten und bleibt außerhalb der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,90 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,60 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,55 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,70 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,90+1,00+0,60+0,55+0,50+0,25+0,70+0,00}{8} = \underline{0,563}$

Scenario 2:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 4j) 5m) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt nicht an der Leitplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Die Leitplanke kann das Fahrzeug noch zurückhalten. Da aber kein Seitenstreifen vorhanden ist, ragt das Fahrzeug am Ende auf die Fahrbahn.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,90
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,70
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,65
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,70
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,90+1,00+0,70+0,65+0,50+0,25+0,70+0,00}{8} = \underline{0,588}$

Scenario 3:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 4k) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt nicht an der Leitplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Diese wird so stark verformt, dass sie das Fahrzeug nicht mehr zurückhalten kann und gelangt bis zur Verkehrszeichenbrücke, an der das Fahrzeug letztendlich außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,95
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,60
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,55
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,90
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,20

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,95+1,00+0,60+0,55+0,50+0,25+0,90+0,20}{8} = \underline{0,619}$

Szenario 4:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 4j) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der Leitplanke ab, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt schließlich außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,80
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,60
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,55
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,70
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,80+1,00+0,60+0,55+0,50+0,25+0,70+0,00}{8} = \underline{0,550}$$

Szenario 5:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 4j) 5m) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der Leitplanke ab, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt schließlich auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,85
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,65
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,60
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,85+1,00+0,65+0,60+0,50+0,25+0,00}{7} = \underline{0,550}$$

Szenario 6:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 4k) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der Leitplanke ab, die das Fahrzeug nicht zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,85
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,60
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,55
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,90
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,10

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,85+1,00+0,60+0,55+0,50+0,25+0,90+0,10}{8} = \underline{0,594}$$

Szenario 7:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 4j) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift die Leitplanke, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,65
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,60
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,55
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,70
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,65+1,00+0,60+0,55+0,50+0,25+0,70+0,00}{8} = \underline{0,531}$$

Szenario 8:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 4j) 5m) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift die Leitplanke, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,65
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,65
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,60
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,65+1,00+0,65+0,60+0,50+0,25+0,00}{7} = \underline{0,521}$$

Szenario 9:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 4k) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift die Leitplanke, die das Fahrzeug nicht zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,70
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,60
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,55
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,90
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,70+1,00+0,60+0,55+0,50+0,25+0,90+0,00}{8} = \underline{0,563}$$

Szenario 10:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 4j) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich an der Leitplanke infolge des Anpralls, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 1,00
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,70
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,65
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,70
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{1,00+1,00+0,70+0,65+0,50+0,25+0,70+0,00}{8} = \underline{0,600}$$

Szenario 11:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 4j) 5m) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich an der Leitplanke infolge des Anpralls, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 1,00
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{1,00+1,00+0,75+0,70+0,50+0,25+0,00}{7} = \underline{0,600}$$

Szenario 12:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 4k) 5l) 6n)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls an der Leitplanke, welche das Fahrzeug somit nicht zurückhalten kann, trifft die Verkehrszeichenbrücke, wo das Fahrzeug außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 1,00
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 1,00, sekundäre Gefährdung = 0,70
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,65
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,90
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,20

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{1,00+1,00+0,70+0,65+0,50+0,25+0,90+0,20}{8} = \underline{0,656}$$

Fall PKW:**Szenario 13:****Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 4j) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt nicht an der Leitplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Die Leitplanke kann das Fahrzeug noch zurückhalten und bleibt außerhalb der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,80 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,80, sekundäre Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,50 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{0,80+0,80+0,75+0,70+0,50+0,25+0,50+0,00}{8} = \underline{0,538}$$

Szenario 14:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 4j) 5m) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt nicht an der Leitplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Die Leitplanke kann das Fahrzeug noch zurückhalten und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,80 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,80, sekundäre Gefährdung = 0,90 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,80 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,50 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{0,80+0,80+0,90+0,80+0,50+0,25+0,50+0,00}{8} = \underline{0,569}$$

Szenario 15:

Kurzbeschreibung **Kombination: 1abc) 2) 3f) 4k) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt nicht an der Leitplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Diese wird so stark verformt, dass sie das Fahrzeug nicht mehr zurückhalten kann und gelangt bis zur Verkehrszeichenbrücke, an der das Fahrzeug letztendlich außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,85
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,80, sekundäre Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,60
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,60

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,85+0,80+0,75+0,70+0,50+0,25+0,60+0,60}{8} = \underline{0,631}$

Szenario 16:

Kurzbeschreibung **Kombination: 1abc) 2) 3g) 4j) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der Leitplanke ab, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt schließlich außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,65
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,70, sekundäre Gefährdung = 0,85
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,60
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,50
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,65+0,70+0,85+0,60+0,50+0,25+0,50+0,00}{8} = \underline{0,506}$

Szenario 17:

Kurzbeschreibung **Kombination: 1abc) 2) 3g) 4j) 5m) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der Leitplanke ab, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt schließlich auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,70
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,75, sekundäre Gefährdung = 0,90
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,65
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,70+0,75+0,90+0,65+0,50+0,25+0,00}{7} = \underline{0,536}$

Szenario 18:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 4k) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der Leitplanke ab, die das Fahrzeug nicht zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,70
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,70, sekundäre Gefährdung = 0,85
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,60
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,60
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,50

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,70+0,70+0,85+0,60+0,50+0,25+0,60+0,50}{8} = \underline{0,588}$$

Szenario 19:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 4j) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift die Leitplanke, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,50
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,70, sekundäre Gefährdung = 0,85
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,60
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,50
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,50+0,70+0,85+0,60+0,50+0,25+0,50+0,00}{8} = \underline{0,488}$$

Szenario 20:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 4j) 5m) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift die Leitplanke, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,50
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,75, sekundäre Gefährdung = 0,90
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,65
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,50+0,75+0,90+0,65+0,50+0,25+0,00}{7} = \underline{0,507}$$

Szenario 21:

Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 4k) 5l) 6o)

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift die Leitplanke, die das Fahrzeug nicht zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,55
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,70, sekundäre Gefährdung = 0,85
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,60
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,60
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,35

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,55+0,70+0,85+0,60+0,50+0,25+0,60+0,35}{8} = \underline{0,550}$$

Szenario 22:

Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 4j) 5l) 6o)

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich an der Leitplanke infolge des Anpralls, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 1,00
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,85, sekundäre Gefährdung = 0,85
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,65
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,50
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{1,00+0,85+0,85+0,65+0,50+0,25+0,50+0,00}{8} = \underline{0,575}$$

Szenario 23:

Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 4j) 5m) 6o)

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich an der Leitplanke infolge des Anpralls, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 1,00
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,75, sekundäre Gefährdung = 0,90
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{1,00+0,75+0,90+0,70+0,50+0,25+0,00}{7} = \underline{0,586}$$

Szenario 24:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 4k) 5l) 6o)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls an der Leitplanke, welche das Fahrzeug somit nicht zurückhalten kann, trifft die Verkehrszeichenbrücke, wo das Fahrzeug außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,85, sekundäre Gefährdung = 0,85 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,65 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,60 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,55 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+0,85+0,85+0,65+0,50+0,25+0,60+0,55}{8} = \underline{0,656}$

Fall LKW:**Szenario 25:****Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 4j) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt nicht an der Leitplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Die Leitplanke kann das Fahrzeug noch zurückhalten und bleibt außerhalb der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,85 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,30 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+0,25+0,85+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+0,00}{9} = \underline{0,511}$

Szenario 26:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 4j) 5m) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt nicht an der Leitplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Die Leitplanke kann das Fahrzeug noch zurückhalten und bleibt auf der Fahrbahn liegen.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 1,00 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,85 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,30 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+0,25+1,00+0,75+0,85+0,50+0,25+0,30+0,00}{9} = \underline{0,544}$

Szenario 27:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3f) 4k) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt nicht an der Leitplanke ab, sondern bleibt direkt an ihr stehen. Diese wird so stark verformt, dass sie das Fahrzeug nicht mehr zurückhalten kann und gelangt bis zur Verkehrszeichenbrücke, an der das Fahrzeug letztendlich außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,80 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,30 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,95 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+0,25+0,80+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+0,95}{9} = \underline{0,611}$

Szenario 28:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 4j) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der Leitplanke ab, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt schließlich außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,80 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,95 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,30 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,80+0,25+0,95+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+0,00}{9} = 0,500$

Szenario 29:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 4j) 5m) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der Leitplanke ab, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt schließlich auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,80 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,30, sekundäre Gefährdung = 1,00 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,85 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{0,80+0,30+1,00+0,75+0,85+0,50+0,25+0,00}{8} = 0,556$

Szenario 30:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3g) 4k) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug prallt an der Leitplanke ab, die das Fahrzeug nicht zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,80
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,90
- Verlust Ladegut Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,30
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,95

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,80+0,25+0,90+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+0,95}{9} = \underline{0,600}$$

Szenario 31:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 4j) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift die Leitplanke, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 0,55
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,95
- Verlust Ladegut Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,30
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,00

$$\text{Gesamtgefährdungsgrad: } \frac{0,55+0,25+0,95+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+0,00}{9} = \underline{0,472}$$

Szenario 32:

Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 4j) 5m) 6p)

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift die Leitplanke, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,55 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,30, sekundäre Gefährdung = 1,00 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,85 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{0,55+0,30+1,00+0,75+0,85+0,50+0,25+0,00}{8} = \underline{0,525}$$

Szenario 33:

Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3h) 4k) 5l) 6p)

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug streift die Leitplanke, die das Fahrzeug nicht zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 0,55 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,90 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,30 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,80 |

Gesamtgefährdungsgrad:
$$\frac{0,55+0,25+0,90+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30}{8} = \underline{0,525}$$

Szenario 34:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 4j) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich an der Leitplanke infolge des Anpralls, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt an der Leitplanke außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,95 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,70 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Mit/in Böschung | Gefährdung = 0,30 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+0,25+0,95+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+0,00}{9} = \underline{0,522}$

Szenario 35:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 4j) 5m) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Das Fahrzeug überschlägt sich an der Leitplanke infolge des Anpralls, die das Fahrzeug zurückhalten kann, fährt noch mit einer bestimmten Restgeschwindigkeit kurzzeitig weiter und kommt auf der Fahrbahn zum Stillstand.

- | | |
|-------------------------|---|
| • primärer Anprall | primäre Gefährdung = 1,00 |
| • sekundärer Anprall | Gefährdung für Primären = 0,30, sekundäre Gefährdung = 1,00 |
| • Verlust Ladegut | Gefährdung = 0,75 |
| • Anprall Dritter | Gefährdung = 0,85 |
| • Massenkollision | Gefährdung = 0,50 |
| • Stau | Gefährdung = 0,25 |
| • Verkehrszeichenbrücke | Gefährdung = 0,00 |

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+0,30+1,00+0,75+0,85+0,50+0,25+0,00}{8} = \underline{0,581}$

Szenario 36:**Kurzbeschreibung Kombination: 1abc) 2) 3i) 4k) 5l) 6p)**

Das Fahrzeug kommt von der Fahrbahn ab und prallt gegen das Fahrzeug-Rückhaltesystem vor einer Verkehrszeichenbrücke. Fahrzeug überschlägt sich infolge des Anpralls an der Leitplanke, welche das Fahrzeug somit nicht zurückhalten kann, trifft die Verkehrszeichenbrücke, wo das Fahrzeug außerhalb der Fahrbahn zum Stillstand kommt.

- primärer Anprall primäre Gefährdung = 1,00
- sekundärer Anprall Gefährdung für Primären = 0,25, sekundäre Gefährdung = 0,90
- Verlust Ladegut Gefährdung = 0,75
- Anprall Dritter Gefährdung = 0,70
- Massenkollision Gefährdung = 0,50
- Stau Gefährdung = 0,25
- Mit/in Böschung Gefährdung = 0,30
- Verkehrszeichenbrücke Gefährdung = 0,95

Gesamtgefährdungsgrad: $\frac{1,00+0,25+0,90+0,75+0,70+0,50+0,25+0,30+0,95}{9} = \underline{0,622}$