

# **Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen**

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 169**

**bast**

# **Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen**

von

Winfried Neumann  
Armin Brauer

RUHRBERG Ingenieurgesellschaft  
Hagen

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 169**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

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

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

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

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt 89.0323**  
Entwicklung von Bemessungshilfen  
für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen

### Fachbetreuung

Thomas Mayer

### Referat

Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

### Herausgeber

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

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

### Druck und Verlag

Fachverlag NW in der  
Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen  
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53  
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48  
[www.schuenemann-verlag.de](http://www.schuenemann-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-95606-596-5

Bergisch Gladbach, Juli 2021

## Kurzfassung – Abstract

### **Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen**

Für den Nachweis der Tragfähigkeit von bestehenden Stahlbetonkragarmen infolge geänderter Belastungen durch Erneuerung des Fahrzeug-Rückhaltesystems sowie der Brückenkappe stehen in den Einsatzempfehlungen der BASt vereinfachte Bemessungshilfen zur Ermittlung der Beanspruchungen und Beanspruchbarkeiten am Kragarmanschnitt zur Verfügung. Diese Bemessungshilfen sind auf Grundlage eines linear-elastischen Materialverhaltens entwickelt worden.

Zur Untersuchung des Einfluss eines nichtlinearen Materialverhaltens auf die Tragfähigkeit der Stahlbetonkragarme werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mit Hilfe von FE-Berechnungen diverse Parameterstudien durchgeführt. Diese dienen zunächst der Identifizierung bemessungsrelevanter Parameter. Einen maßgeblichen Einfluss hat dabei das Verhältnis von Querschnittshöhe am Kragarmende zu Querschnittshöhe am Kragarmanschnitt.

Ausgehend von einer Kragplatte mit konstanter Querschnittshöhe werden in einem zweiten Schritt für ausgewählte Fälle einer veränderten Plattengeometrie weitere FE-Berechnungen zur Untersuchung des nichtlinearen Materialverhaltens durchgeführt.

Auf Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen wird abschließend eine vereinfachte Bemessungshilfe zur Abschätzung des Einflusses des nichtlinearen Materialverhaltens auf die Größe der erforderlichen Biegebewehrung im Anschnitt des Stahlbetonkragarmes entwickelt. Die Bemessungshilfe kann in Kombination mit den bekannten Bemessungshilfen aus den Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme verwendet werden.

### **Development of design tools for existing reinforced concrete cantilever slabs based on non-linear analysis**

For the verification of the load bearing capacity of existing reinforced concrete cantilever slabs due to modified loads as a result of replacing vehicle restraint systems or bridge caps, the recommendations for the use of vehicle restraint systems published by the German Federal Highway Research Institute (BASt) provide several simplified design tools for determining the internal forces and the load capacities at the restraint of the cantilever. These design tools have been developed on the basis of linear-elastic material behaviour.

Within the scope of the research project, several numerical studies are carried out in order to investigate the influence of non-linear material behaviour on the load bearing capacity of reinforced concrete cantilever slabs. The results of the studies allow an identification of relevant parameters for design. It turned out that the ratio of cross-section height at the end to cross-section height at the restraint of the cantilever has a decisive influence.

Based on a cantilever slab with a constant cross-section height, in a second step, further FEM-calculations to investigate non-linear material behavior are conducted for special cases with a different slab height ratio.

Finally, on basis of the results of the investigations carried out, a simplified design tool for estimating the influence of the non-linear material behaviour on the size of the required reinforcement at the restraint of the reinforced concrete cantilever slab is developed. The design tool can be used in combination with the well-known design tools according to the recommendations for the use of vehicle restraint systems.

## Summary

### Development of design tools for existing reinforced concrete cantilever slabs based on non-linear analysis

## 1 Problem

In the case of bridge repairs, which generally include a conversion of the safety barriers and a replacement of the bridge cap, the load bearing capacity of the existing reinforced concrete cantilever slab must be proved. In this case, the bending load bearing capacity in the cantilever cross-section must be checked, in particular due to the increased impact loads on safety barriers.

Against this background, there is an urgent need to use all available potentials in existing buildings for load transfer in the cantilever-cap area in order to avoid costly retrofitting measures or even demolition.

For the verification of the load bearing capacity of existing reinforced concrete cantilevers, simplified design tools are available in the application recommendations of BAST for determining the loads and load capacities at the restraint of the cantilever. These tools have been developed on the basis of linear-elastic material behaviour. The non-linear material behaviour with the possibilities of redistribution of the internal forces represents a load bearing reserve not used in the previous verification methods for the ultimate limit state.

The aim of the research project is the development of extended design tools for reinforced concrete cantilever arms using system reserves at the ultimate limit state for actions from vehicle impact on safety barriers by taking into account the non-linear material behaviour.

The possibilities for using this load bearing capacity potential of existing structures are to be simplified by the design tools to be created.

## 2 Procedure of investigations

Within the framework of parameter investigations, the influence of different boundary conditions on the

load bearing behaviour of the reinforced concrete cantilever is first examined and evaluated with the aid of FEM-calculations, taking into account the non-linear material behaviour. In a second step, the parameter investigations will be extended to standard cases known from the recommendations for the use of vehicle restraint systems, taking particular account of the criteria identified as relevant.

Numerical models with a high degree of detail are used for cantilever design. The activation of all available load bearing reserves requires this comprehensive system modeling. The static system of the FEM-calculation for the cantilever slab takes place with the participation of the bending stiffness of the cap and the cornice beam, the appropriate modelling of the cap fixation to the cantilever tip and taking into account the non-linear material behaviour.

The starting point of the investigation are the results of a material linear calculation. In the non-linear system analysis frame, this reinforcement quantity is gradually reduced, whereby the steel expansion that occurs is determined in each case. In accordance with the regulations of DIN-Fachbericht 102 and the National Appendix to DIN EN 1992-2, the permissible steel elongation of 25‰ is defined as a criterion for bending failure.

By comparing the required reinforcement quantity from the non-linear system analysis with the required reinforcement quantity from the linear calculation, a reduction factor results for each investigated combination of boundary conditions.

## 3 Results

The investigations to identify relevant parameters show that the ratio of cross section height at the end of the cantilever to cross-section height at the restraint of the cantilever has a decisive influence on the bending load bearing capacity of the reinforced concrete cantilever slab taking into account the non-linear material behaviour. Other influencing factors such as the degree of longitudinal reinforcement, the degree to which the cantilever is clamped into the reinforced concrete deck slab, the use of plate anchors in the horizontal joint between the cap and cantilever arm or the type of safety barrier are only of minor importance.

The reduction of the required reinforcement taking into account the non-linear material behaviour compared to the reinforcement determined with a linear-elastic calculation is approx. 20 to 30% with a cantilever length of 2.40m. Depending on the cantilever length, the influence of the non-linear load bearing behaviour on the required reinforcement quantity changes.

For the subsequent investigations of standard cases from the application recommendations of BAST, no further parameters are therefore taken into account with the exception of changes to the slab geometry and the cantilever length.

The scope of all investigations finally covers cantilever lengths from 1.20m to 3.60m and height ratios from slab height at the cantilever end to slab height at the restraint of the cantilever from 1:1 to 1:3.

With decreasing cantilever length, the influence of non-linear material behaviour on the degree of reinforcement increases. The ratio values of the required reinforcement at the restraint of the cantilever from non-linear and linear calculation are approx. 85% for a cantilever length of 3.60m and drop to approx. 50% for a cantilever length of 1.20m. In addition, the influence of the slab geometry plays a much greater role with short cantilever lengths. The ratio values of the required reinforcement are between 51 and 76% for a cantilever length of 1.20 m depending on the slab geometry, while the ratio values for a cantilever length of 3.60m depending on the slab geometry are between 82 and 87% and show almost no differences.

## 4 Conclusion for practice

Based on the results of the investigations carried out, a design tool for estimating the influence of the non-linear material behaviour on the size of the required flexural reinforcement at the restraint of the reinforced concrete cantilever slab is developed. Using the design tool, the reduction factor for determining the required flexural reinforcement at the restraint of the cantilever for covering non-linear material behavior can be determined.

The design tool can be used in combination with the familiar design guides from the application recommendations for vehicle restraint systems.

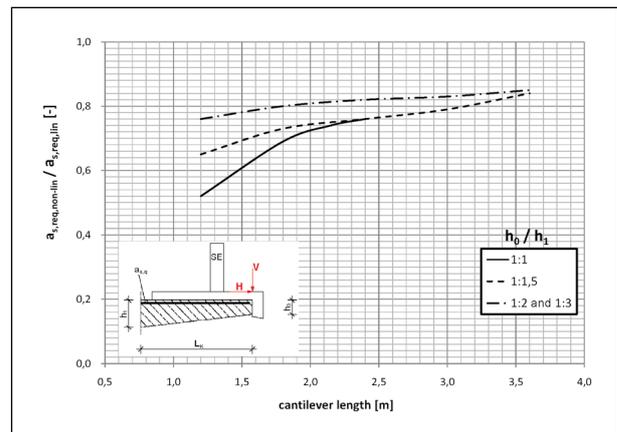


Fig. 1: Reduction of the required flexural reinforcement at the restraint of the cantilever due to non-linear material behaviour on impact with safety barriers

Finally, a proposal for a supplement to the recommendations for the use of vehicle restraint systems is formulated on the basis of the available research results.



## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	9	<b>7</b>	<b>Vorschlag für die Ergänzung der Einsatzempfehlungen</b> .....	25
1.1	Hintergrund und Veranlassung .....	9	<b>8</b>	<b>Weiterer Forschungsbedarf</b> .....	26
1.2	Zielsetzung .....	9	<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	26
1.3	Vorgehensweise .....	9		<b>Literatur</b> .....	27
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	10		<b>Bilder</b> .....	28
<b>3</b>	<b>Grundlagen der stofflich nicht-linearen Berechnung</b> .....	10		<b>Tabellen</b> .....	29
<b>4</b>	<b>Studien zur Identifizierung relevanter Parameter</b> .....	12			
4.1	Vorbemerkungen .....	12			
4.2	FE-Berechnungen .....	12			
4.2.1	Allgemeines .....	12			
4.2.2	System und Materialeigenschaften ...	12			
4.2.3	Untersuchte Parameter .....	15			
4.2.4	Belastung des Kragarmes .....	17			
4.2.5	Ablauf der Parameterstudien .....	18			
4.2.6	Ergebnisse der Parameterstudien ...	18			
4.3	Identifizierung relevanter Parameter ..	20			
<b>5</b>	<b>Entwicklung von Bemessungshilfen</b> .....	21			
<b>6</b>	<b>Bemessungshilfen für Standardfälle</b> .....	22			
6.1	Vorbemerkungen .....	22			
6.2	Ergänzende Parameterstudien .....	22			
6.2.1	Umfang der ergänzenden Parameterstudien .....	22			
6.2.2	Ergebnis der ergänzenden Parameterstudien .....	22			
6.3	Bemessungshilfe .....	24			
6.4	Anwendungsbeispiele .....	24			



# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Veranlassung

Bei Brückeninstandsetzungen, die in der Regel eine Umrüstung des Schutzeinrichtungssystems beinhalten, muss die Tragfähigkeit des Kragarms nachgewiesen werden. Hierbei ist die Biegetragfähigkeit im Kragarmanschnitt aufgrund der erhöhten Anpralllasten auf Schutzeinrichtungen zu überprüfen.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Dringlichkeit, alle zur Verfügung stehenden Potenziale bei Bestandsbauten zum Lastabtrag im Kappen-Kragarmbereich zu nutzen, um auf aufwendige Ertüchtigungsmaßnahmen oder sogar Abbruch verzichten zu können. Eine in den bisherigen Nachweismethoden für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ungenutzte Tragreserve stellt das nichtlineare Materialverhalten mit den sich bietenden Möglichkeiten der Schnittkraftumlagerung dar.

Beispielhaft ist in Heft B 108 [24] der Berichte der BASt an exemplarisch ausgewählten Untersuchungsergebnissen das Potenzial dieser Berechnungsmethode dargelegt.

## 1.2 Zielsetzung

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erstellung von Bemessungshilfen für Stahlbetonkragarme unter Nutzung von Systemreserven im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Einwirkungen aus Fahrzeuganprall auf Schutzeinrichtungen durch Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens.

Die Möglichkeiten zur Nutzung dieses Tragfähigkeitspotenzials von Bestandskonstruktionen soll durch die zu erstellenden Bemessungshilfen der vereinfachten Nutzung zugeführt werden.

## 1.3 Vorgehensweise

Für die Kragarmbemessung werden numerische Modelle mit hohem Detaillierungsgrad verwendet. Die Aktivierung aller zur Verfügung stehenden Tragreserven erfordert diese umfassende Systemmodellierung. Das abzubildende statische System der FE-Berechnung für die Kragplatte erfolgt unter Mitwirkung der Biegesteifigkeit der Kappe und des Gesimbsbalkens, der zutreffenden Modellierung des Kappenanschlusses an die Kragarmspitze und un-

ter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens.

Mit der verwendeten Software InfoCAD [19] lässt sich die Rissbildung in Betonbauteilen mithilfe des Berechnungsmodus „Nichtlineare Systemanalyse“ berücksichtigen.

Durch diese Berechnungsweise wird Optimierungspotenzial im Hinblick auf die Bemessungsschnittgrößen am Kragarmanschnitt genutzt. Dieses Potenzial ergibt sich aus möglichen Schnittkraftumlagerungen innerhalb der Platte, die durch das Aufreißen biegebeanspruchter Betonquerschnitte und dem damit verbundenen Steifigkeitsabfall hervorgerufen werden. Beanspruchungen können dadurch aus hochbeanspruchten Bereichen in weniger stark ausgenutzte Bereiche umgelagert werden.

Als Voraussetzung für die Anwendung dieser Berechnungsmethode müssen bleibende Schädigungen zugelassen werden, da die Schnittkraftumlagerung mit großen Verformungen und Plastizierungen im hochbeanspruchten Bereich verbunden sein können.

Exemplarisch ist in Bild 1 das Vorgehen zur Ermittlung der erforderlichen Bewehrung im Kragarmanschnitt unter Anwendung nichtlinearer Verfahren dargestellt. Das Diagramm bezieht sich auf einen 2,40 m langen Kragarm mit  $h_0 = 25$  cm und  $h_1 = 37,5$  cm (Verhältnis 1:1,5).

Ausgangspunkt der Untersuchung sind die Ergebnisse einer stofflich linearen Berechnung, die eine erforderliche Bewehrungsmenge von  $9,7$   $\text{cm}^2/\text{m}$  im Anschnitt ergab. Im Rahmen der nichtlinearen Systemanalyse wurde diese Bewehrungsmenge schritt-

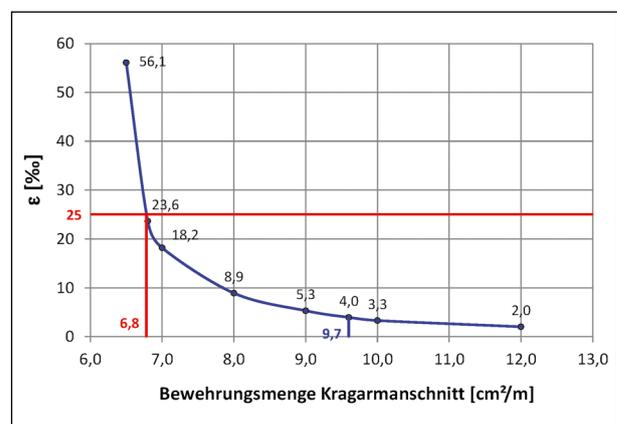


Bild 1: Vorgehen zur Ermittlung der erforderlichen Bewehrung im Kragarmanschnitt unter Anwendung nichtlinearer Verfahren (aus [24])

weise reduziert, wobei jeweils die sich einstellende Stahldehnung ermittelt wurde.

Als Kriterium für ein Biegeversagen wurde in Anlehnung an die Regelungen des DIN-FB 102 [12] eine Überschreitung der zulässigen Stahldehnung von 25 ‰ definiert. Wie Bild 1 zu entnehmen ist, wird diese Grenzdehnung bei einer Bewehrungsmenge von  $6,8 \text{ cm}^2/\text{m}$  erreicht. D. h. das System ist unter Einhaltung von 25 ‰ Stahldehnung mit einer Bewehrungsmenge von  $6,8 \text{ cm}^2/\text{m}$  im Anschnitt stand-sicher. Dies entspricht einer Reduktion der erforderlichen Biegebewehrung um 30 %.

Im Rahmen von Parameteruntersuchungen wird zunächst der Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen auf das Tragverhalten des Stahlbeton-Kragarmes unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens untersucht und bewertet. Unter besonderer Berücksichtigung der als relevant identifizierten Kriterien werden die Parameteruntersuchungen auf Standardfälle ausgeweitet, die aus den Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme [3] bekannt sind.

Im Hinblick auf eine anwendungsfreundliche Nutzung der Untersuchungsergebnisse für die Instandsetzung von Brückenkappen werden aus den Berechnungsergebnissen schließlich „Bemessungsdiagramme“ abgeleitet, aus denen die erforderliche Bewehrungsmenge im Kragarmanschnitt entnommen werden kann.

## 2 Stand der Technik

Im Zuge von Brückeninstandsetzungen ist häufig ein Ersatz der bestehenden Schutzeinrichtung in Kombination mit der Erneuerung der Brückenkappe erforderlich. Für die geänderte bauliche Situation ist der Nachweis der Tragfähigkeit des bestehenden Stahlbetonkragarms zu erbringen. Hierbei ist insbesondere die Biegetragfähigkeit im Kragarmanschnitt bei Berücksichtigung erhöhter Einwirkungen aus Fahrzeuganprall von Bedeutung.

Für Standardfälle enthalten die Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme [3] diverse Diagramme zur Ermittlung der maßgebenden Bemessungsschnittgrößen bzw. der erforderlichen Biegebewehrung am Kragarmanschnitt. Grundlage dieser Diagramme sind FE-Berechnungen unter Berücksichtigung der Tragwirkung von Kappe und

Gesims bei Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens.

Mit den bislang vorliegenden vereinfachten Nachweismethoden für den Grenzzustand der Tragfähigkeit ist eine Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens nicht möglich.

## 3 Grundlagen der stofflich nichtlinearen Berechnung

In diesem Kapitel werden die für die stofflich nichtlineare Berechnung maßgeblichen (Grenz-)kriterien für das Biegeversagen eines Stahlbetonkragarmes erläutert. Das Biegeversagen bestehender Stahlbetonkragarme wird im Wesentlichen durch folgende Parameter und Kriterien beeinflusst:

- Vorhandene obere Bewehrung in Brückenquer- richtung,
- vorhandene Bewehrung in Brückenlängsrich- tung (beide Bewehrungslagen),
- Geometrie des Kragarmes (Verhältniswert der Plattendicken  $h_0/h_1$ ),
- Absolutwert der statischen Nutzhöhe des Krag- armes am Übergang zum Haupttragwerk,
- Absolutwert der statische Nutzhöhe an der Krag- armspitze,
- Länge des Kragarmes,
- Einspanngrad des Kragarmes in die anschlie- ßenden Bauteile mit den Grenzwerten eines elastisch eingespannten Anschlusses (Fahr- bahnplatte als Durchlaufträger mit Kragarmen, z. B. bei Stahlverbundbrücken mit torsionswei- chen Hauptträgern) und eines nahezu starr ein- gespannten Kragarmes (Massivquerschnitt des Haupttragwerkes),
- Festigkeiten des vorhandenen Betonstahles und Betons,
- geometrische Ausbildung von Kappe und Ge- sims,
- konstruktive Ausbildung der Verbindungsele- mente zwischen Kappe/Gesims und der Krag- armspitze (Einsatz von Tellerankern/nachträgli- cher Bewehrungsanschluss),

- Bewehrungsgrad und Betonfestigkeit von Kappe und Gesims,
- Begrenzung der Dehnungen im Betonstahl auf einen zu definierenden Grenzwert.

Die Einflüsse der Parameter/Kriterien auf das Tragverhalten von Kragarmen werden qualitativ dargestellt und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die möglichst realitätsnahe Ermittlung vorhandener Tragreserven bewertet.

Die jeweilige Bandbreite der zu berücksichtigenden Parameter/Kriterien wird unter Berücksichtigung vorliegender Erfahrungswerte mit Bestandsbauwerken und unter Verwendung relevanter Fachliteratur festgelegt.

Zur Abbildung von Scheiben- und Plattentragwirkung des Stahlbetonkragarmes werden in den FE-Berechnungen Schalenelemente eingesetzt. Bei der Verwendung von Schalenelementen wird eine lineare Spannungs- und Dehnungsverteilung über die Querschnittshöhe angenommen (Bernoulli-Hypothese). Im Falle von auflagernahen Einzellasten kann diese Idealisierung zu ungenauen Ergebnissen führen (ROMBACH [25]). Im Rahmen der durchzuführenden FE-Berechnungen werden jedoch hauptsächlich Systeme untersucht, bei denen die Lasten nicht in unmittelbarer Auflagernähe angreifen und auf der mitmodellierten Kappe angebracht werden, sodass hierdurch für eine Verteilung der Lasten gesorgt ist.

Bei Anwendung des stofflich nichtlinearen Berechnungsverfahrens wird eine vorhandene Platten-Biegebewehrung vordefiniert, die der Berechnung zugrunde gelegt wird. Im Falle einer Überschreitung der Betonzugfestigkeit und einer daraus folgenden beginnenden Rissbildung wird diese Bewehrung aktiviert.

Die nichtlineare Systemanalyse ist ein iteratives Verfahren. Unter Annahme einer anfänglichen Schnittgrößenverteilung in der Platte werden die zugehörigen Dehnungsverteilungen in den einzelnen Knotenpunkten ermittelt. Hierbei wird ein Aufreißen des Querschnitts berücksichtigt, das einen Abfall der Plattenbiegesteifigkeit im jeweiligen Knotenpunkt zur Folge hat.

Da sich in hochbeanspruchten Bereichen größere Risstiefen als in weniger stark beanspruchten Bereichen ergeben, sind die Steifigkeitsänderungen nicht überall dieselben. Diese aktualisierte Steifig-

keitsverteilung berücksichtigend, ergeben sich gegenüber der anfänglichen Schnittgrößenverteilung veränderte Schnittgrößen in der Platte. Äußere und innere Schnittkräfte stehen nun nicht mehr im Gleichgewicht. Um das Ungleichgewicht zu beheben, wird eine verbesserte äußere Schnittgrößenverteilung bestimmt, aus der dann wiederum die Dehnungsverteilungen in den einzelnen Knotenpunkten resultieren. Diese Berechnungsschritte werden so lange fortgesetzt, bis das Ungleichgewicht eine akzeptable Grenze unterschreitet.

In Bild 2 ist exemplarisch die Dehnungsverteilung eines gerissenen Betonquerschnitts dargestellt. Dabei wurde ein Ebenbleiben des Querschnitts vorausgesetzt. Wie zu erkennen ist, ergibt sich in Höhe der Schwereachse eine positive Dehnung. Wird diese Dehnung systembedingt behindert, folgt daraus eine Druck-Normalkraftbeanspruchung des Querschnitts – ein Effekt, der als „selbsterzeugte Vorspannung“ oder „Gewölbewirkung“ bezeichnet werden kann (siehe hierzu auch PFEIFFER & QUAST [27]).

Eine solche systembedingte Dehnungsbehinderung ist bei Plattentragwerken aufgrund der inneren statischen Unbestimmtheit grundsätzlich gegeben. Daraus resultierende Normalkraftbeanspruchungen wirken sich in der Regel günstig aus.

Die Querverteilung fällt umso stärker ins Gewicht, je größer die Biegesteifigkeit des Gesimsbalkens ist. Durch ein Aufreißen des Betonquerschnitts reduziert sich daher der Querverteilungseffekt. Eine Überschätzung der aus Bemessungssicht günstigen Lastverteilung wird dadurch vermieden, dass der Steifigkeitsabfall infolge Rissbildung im Rahmen der numerischen Berechnung auch für das Gesims und die Kappe berücksichtigt wird.

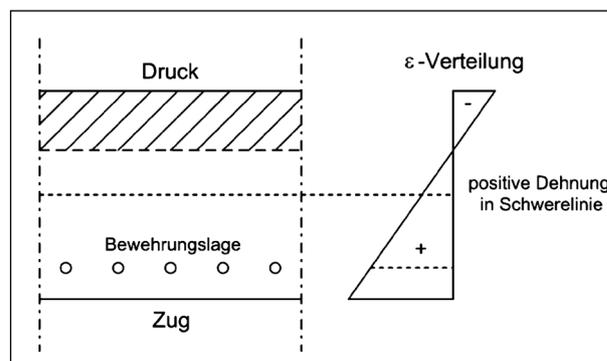


Bild 2: Exemplarischer Dehnungsverlauf im gerissenen Betonquerschnitt infolge einer positiven Momentenbeanspruchung; positive Dehnung in Höhe der Schwereachse

## 4 Studien zur Identifizierung relevanter Parameter

### 4.1 Vorbemerkungen

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 dargelegten Einflussfaktoren werden zunächst 18 Beispielfälle konkret berechnet.

Diese Beispielrechnungen dienen der quantitativen Abschätzung des Einflussgrades der vorgenannten Parameter/Kriterien auf das Tragverhalten von Stahlbetonkragarmen unter Einbeziehung des nichtlinearen Materialverhaltens.

Die Basis für die konkreten Beispielberechnungen bilden zwei typische Bestandssituationen. Die Auswahl dieser typischen Beispielsituationen erfolgt auf Grundlage von Erfahrungswerten aus bislang bearbeiteten Projekten von Seiten des Auftragnehmers.

Ausgehend von zwei Kragarmlängen (Systeme jeweils starr eingespannt) mit vorgegebener Beton- und Betonstahlgüte und konstanter Plattendicke (Plattengeometrie  $h_0/h_1 = 1$ ) werden die Einflüsse folgender Parameter/Kriterien vergleichend berechnet:

- Veränderung der Plattengeometrie (3 Abstufungen),
- Erhöhung der Bewehrung in Brückenlängsrichtung im Kragarm,
- Berücksichtigung einer elastischen Einspannung der Kragarme in die anschließenden Bauteile,
- Variante zu den Verbindungsmitteln zwischen Kappe/Kragarm,
- Verwendung eines Fahrzeug-Rückhaltesystems aus Beton,
- Verringerung der gesamten Kragarmhöhe.

Damit ergeben sich  $2 \times (1+8) = 18$  Beispielrechnungen.

Im Kragarmanschnitt liegen in Abhängigkeit des Brückentyps verschiedene Einspanngrade vor. Bei Stahlverbundbrücken mit torsionsweichen Hauptträgern ist die Fahrbahnplatte als Durchlaufträger mit Kragarmen und quasi gelenkiger Lagerung auf den Hauptträgern ausgebildet. Hier ist in Abhängigkeit der Biegesteifigkeit der Fahrbahnplatte eine elastische Einspannung vorhanden. Bei massiven

Stahlbetonquerschnitten spannt sich der Kragarm sowohl in die angrenzenden Plattenbereiche als auch in den Hauptträgersteg ein, sodass eine nahezu starre Einspannung vorliegt. Eine elastische Einspannung wirkt sich grundsätzlich positiv auf die berechnete Kragarmbeanspruchung aus.

Auf Grundlage der Berechnungsergebnisse erfolgt eine technisch sinnvolle und praxiserichte Eingrenzung der im Detail zu untersuchenden Parameter. Darüber hinaus werden aus den Beispielrechnungen Möglichkeiten zur vereinfachten Anwendung der zu entwickelnden Bemessungshilfen für im Detail nicht explizit untersuchte Parameter abgeleitet. Diese Vorgehensweise dient der Erfassung des Einflusses von Parametern mit nur geringer Bedeutung für das Tragverhalten der Kragarme.

### 4.2 FE-Berechnungen

#### 4.2.1 Allgemeines

Die Parameterstudien zur Identifizierung relevanter Kriterien für die Tragfähigkeit von Stahlbetonkragarmen werden mithilfe des Finite-Element-Programms InfoCAD [19] der Infograph GmbH durchgeführt. Die Software ermöglicht eine nichtlineare Berechnung des Systems unter Berücksichtigung einer Rissbildung im Beton und sich verändernder Materialsteifigkeiten.

#### 4.2.2 System und Materialeigenschaften

Die für die FE-Berechnung verwendeten numerischen Modelle erfassen die Biegefestigkeit der Kappe einschließlich des Gesimses sowie den Kappenanschluss an die Kragspitze.

In Bauwerkslängsrichtung wird das System mit einer Länge modelliert, die mindestens dem Vierfachen der Kragarmlänge entspricht. Damit werden Störeffekte, die sich an den seitlichen Rändern aus den systembedingten Diskontinuitäten ergeben, weitestgehend ausgeschlossen.

Die verwendeten Schalenelemente sind in der Regel quadratisch mit Seitenlängen von 20 cm. Die Änderung der Querschnittshöhe wird durch die Verwendung von Elementen mit stufenweise unterschiedlicher Dicke berücksichtigt.

Um die Detailgenauigkeit des FE-Modells weiter zu erhöhen wird die Brückenkappe mitmodelliert, d. h. es wird eine zusätzliche Betonschale generiert, mit

der die Brückenkappe einschließlich Gesimsbalken abgebildet ist. Bild 3 zeigt exemplarisch für eine Kragarmlänge von 3,00 m das für die FE-Berechnungen verwendete Modell. Folgende Bauteile werden dabei abgebildet:

- Stahlbetonkragarm als Schalenelemente mit abgestufter Dicke,
- Kappe als Schalenelemente mit einer mittleren Dicke von 20 cm,
- Gesimsbalken als Schalenelemente mit einer Dicke von 35 cm,
- Koppellelemente (nur Druck) zwischen Kappe und Kragarm,
- Koppellelemente (Zug und Druck) an der Kragarmspitze zwischen Kappe und Kragarm,
- Bewehrungsanschluss zwischen Gesimsbalken und Kragarmspitze (nichtlineare Feder),
- Allseits verschiebbliche Telleranker zur Aufnahme des Kippmomentes (lineare Feder).

### Koppellelemente

Die Auflagerung der Kappe auf dem Kragarm erfolgt in der horizontalen Fläche über Koppellelemente, die nur Druckkontakt übertragen können. Lediglich an der Kragarmspitze werden Koppellelemente angeordnet, die zusätzlich Zugkräfte übertragen können. Damit wird die Dübelwirkung der an der Kragarmspitze in den Gesimsbalken eingreifenden Bewehrung erfasst.

### Bewehrungsanschluss

Der Bewehrungsanschluss selbst wird unter der Annahme, dass der Stahl nach Erreichen seiner Streckgrenze plastiziert, als bilineare Feder modelliert. Die genaue Herleitung der Federsteifigkeit ist Heft B 108 [24] zu entnehmen. Die Federsteifigkeit beträgt bei einer angenommenen Bewehrungsmenge von  $5,0 \text{ cm}^2/\text{m}$  und einer Anordnung der Federn in jedem Knoten (Abstand von  $0,2 \text{ m}$ )

$$c_{F,s} = 47 \text{ MN/m.}$$

(Gl. 1)

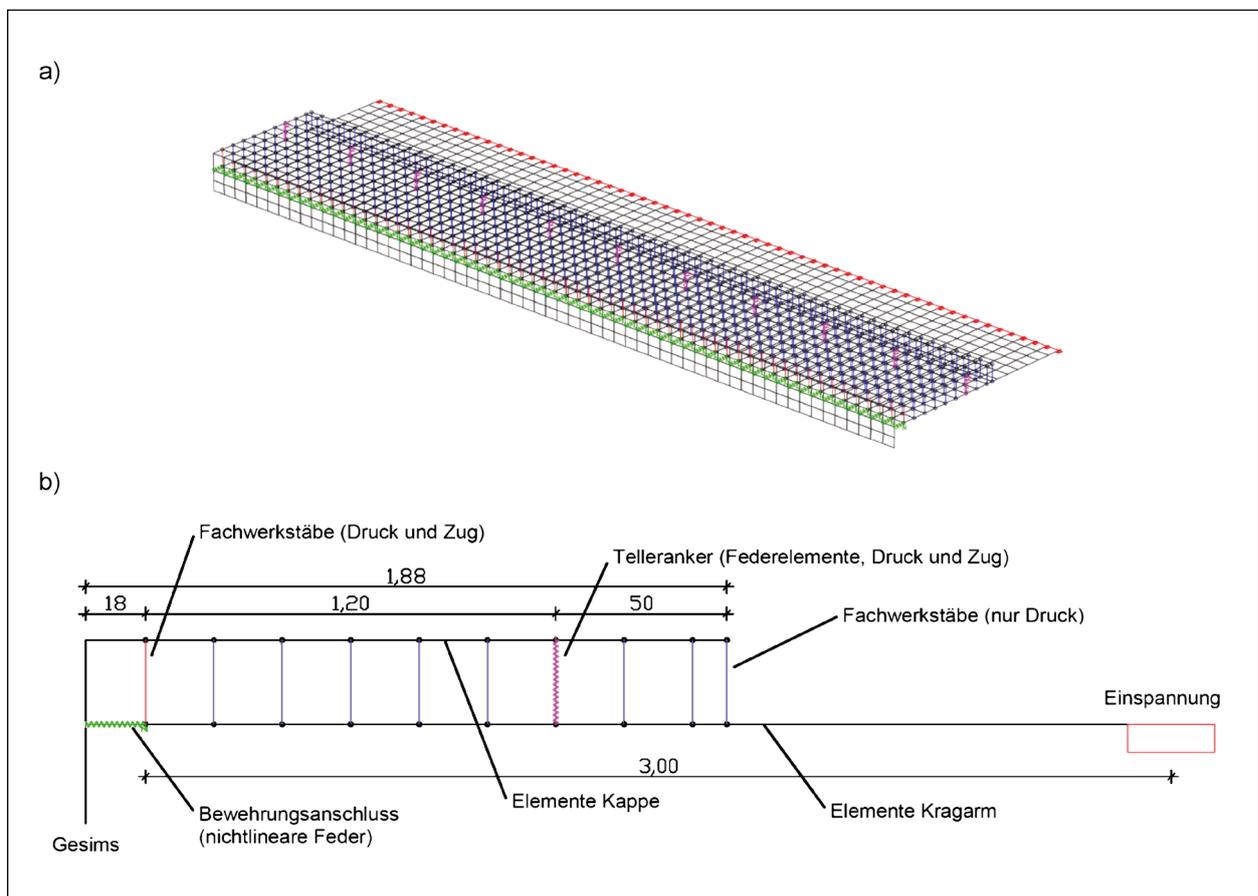


Bild 3: Numerisches FE-Modell – a) 3D-Gesamtdarstellung, b) Querschnitt mit Darstellung des Anschlusses der Kappe an den Kragarm

Die Kraft bei Fließbeginn beträgt

$$\max F = A \cdot f_y = 5,0 \cdot 0,2 \cdot 50 = 50 \text{ kN} \quad (\text{Gl. 2})$$

mit einem zugehörigen Verformungsweg von

$$\text{zug. } u = \frac{\max F}{c_F} = \frac{0,05}{47} \cdot 10^3 = 1,1 \text{ mm.} \quad (\text{Gl. 3})$$

Daraus resultiert das in Bild 4 dargestellte nicht-lineare Federgesetz für den Bewehrungsanschluss an der Kragarmspitze.

Die angenommene Bewehrungsmenge entspricht einer Bewehrung von  $d_s = 16 \text{ mm}$  im Abstand von  $s = 40 \text{ cm}$  und stellt somit eine realistische Größenordnung einer üblicherweise zur Verankerung von neu errichteten Brückenkappen auf Bestandsbauwerken nachträglich eingebauten Bewehrung dar.

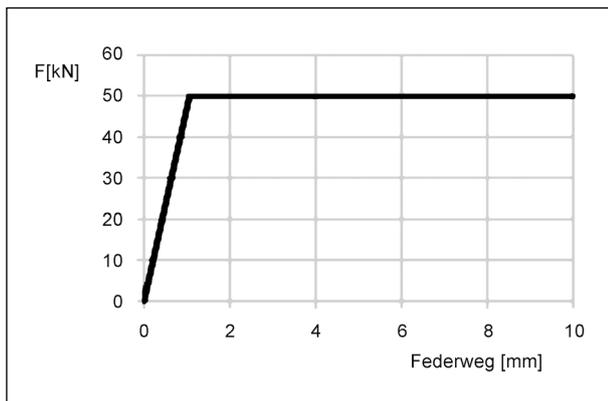


Bild 4: Nichtlineares Federgesetz für das Last-Verformungs-Verhalten des Bewehrungsanschlusses an der Kragarmspitze

### Telleranker

Für die im Abstand von 1,20 m angeordneten Telleranker wurde vereinfachend ein linear-elastischer Zusammenhang vorausgesetzt, wobei angenommen wurde, dass die Grenztragfähigkeit der Anker bei einem Verformungsweg von 1,0 mm erreicht wird. Die Grenztragfähigkeit für allseits verschiebliche Sanierungsanker mit einer Verwendbarkeit in der Betonzugzone beträgt bei Einsatz eines Dübels M16 ca. 36 kN. Daraus resultiert eine Federsteifigkeit von

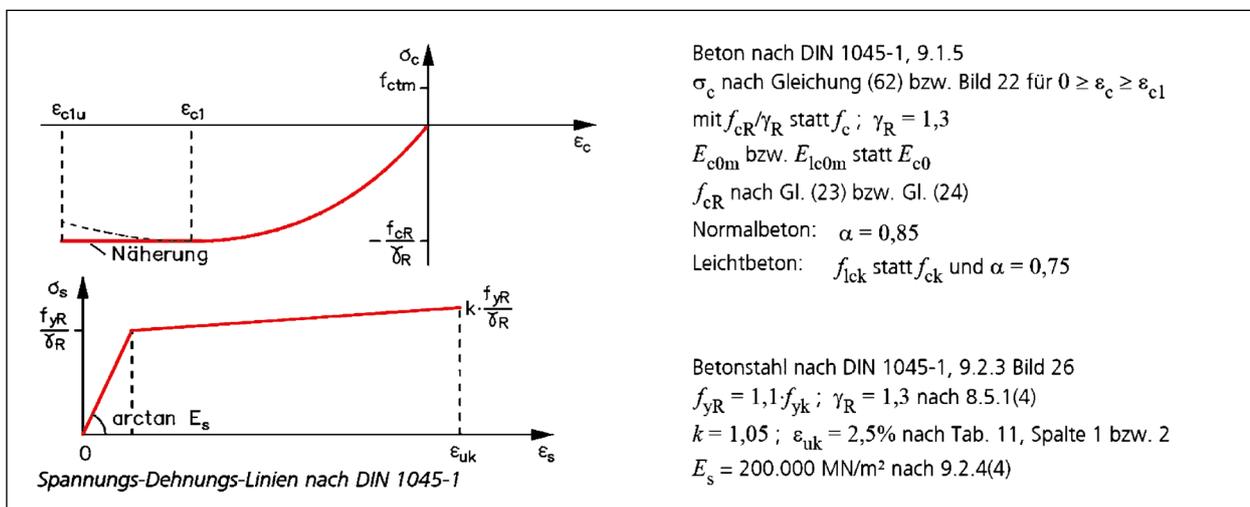
$$c_{F,TA} = F/u = 36/1,0 = 36 \text{ kN/mm} = 36 \text{ MN/m} \quad (\text{Gl. 4})$$

Diese Modellierungsweise setzt voraus, dass nach Durchführung der Berechnungen jeweils geprüft wird, ob die Grenztragfähigkeit der Anker überschritten worden ist. Für diesen Fall wäre von einem Bruch der Anker auszugehen, sodass das entsprechende Federelement aus dem System zu entfernen und eine erneute Berechnung durchzuführen wäre. Die Tragfähigkeit der Anker wird jedoch in keiner der durchgeführten Berechnungen erreicht.

### Beton

Den Betonelementen wird programmintern das in Bild 5 dargestellte Last-Verformungs-Verhalten zugewiesen. Als Materialgüte wird eine Betongüte C 25/30 festgelegt, sodass sich eine rechnerische maximale Druckfestigkeit von

$$\begin{aligned} (f_{cR}/\gamma_R)_A &= (0,85 \cdot \alpha \cdot f_{ck})/\gamma_R & (\text{Gl. 5}) \\ &= (0,85 \cdot 0,85 \cdot 25)/1,1 = 16,4 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$



Beton nach DIN 1045-1, 9.1.5  
 $\sigma_c$  nach Gleichung (62) bzw. Bild 22 für  $0 \geq \epsilon_c \geq \epsilon_{c1}$   
 mit  $f_{cR}/\gamma_R$  statt  $f_c$ ;  $\gamma_R = 1,3$   
 $E_{c0m}$  bzw.  $E_{lc0m}$  statt  $E_{c0}$   
 $f_{cR}$  nach Gl. (23) bzw. Gl. (24)  
 Normalbeton:  $\alpha = 0,85$   
 Leichtbeton:  $f_{lck}$  statt  $f_{ck}$  und  $\alpha = 0,75$

Betonstahl nach DIN 1045-1, 9.2.3 Bild 26  
 $f_{yR} = 1,1 \cdot f_{yk}$ ;  $\gamma_R = 1,3$  nach 8.5.1(4)  
 $k = 1,05$ ;  $\epsilon_{uk} = 2,5\%$  nach Tab. 11, Spalte 1 bzw. 2  
 $E_s = 200.000 \text{ MN/m}^2$  nach 9.2.4(4)

Bild 5: Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton und Betonstahl für die nichtlineare Systemanalyse mit InfoCAD [19] (hier beispielhaft dargestellt für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation mit  $\gamma_R = 1,3$ )

ergibt. Nach DIN-Fachbericht 102, II-A.2.1 (7) P bzw. DIN EN 1992-2/NA [9], NCI zu 5.7 ist bei nichtlinearen Verfahren für außergewöhnliche Bemessungssituationen ein Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_R = 1,1$  zu verwenden.

Die Zugfestigkeit des Betons wird standardmäßig vernachlässigt. Im Rahmen der FE-Analyse kann jedoch prinzipiell die Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen berücksichtigt werden. Darauf wird allerdings an dieser Stelle verzichtet.

### Kragarm- und Kappenbewehrung

Die kreuzweise angeordnete Bewehrung in der Kragarmplatte sowie der Kappe wird in einer Stahlgüte B 500 modelliert. Das der nichtlinearen FE-Analyse programmintern zugrunde gelegte Last-Verformungs-Verhalten ist ebenfalls Bild 5 zu entnehmen. Nach Erreichen der Streckgrenze wird eine Verfestigung des Stahls um 5 % zugelassen. Die maximal bei einer Dehnung von

$$\epsilon_{uk} = 25 \text{ ‰} \quad (\text{Gl. 6})$$

auf tretende Spannung beträgt somit

$$(k \cdot f_{yR} / \gamma_R)_A = 1,05 \cdot 1,1 \cdot 500 / 1,1 = 525 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Gl. 7})$$

Eine Verfestigung von 5 % korrespondiert nach DIN-Fachbericht 102, II-A.2.1 (7) P bzw. DIN EN 1992-2/NA, NCI zu 5.7 grundsätzlich mit einem normalduktilen Stahl der Güte B 500 A. Für die im Brückenbau in der Regel verwendeten hochduktilen Stähle B 500 B liegt dieser Wert auf der sicheren Seite.

Analog zur Festigkeit des Betons ist für außergewöhnliche Bemessungssituationen gemäß DIN-Fachbericht 102, II-A.2.1 (7) P bzw. DIN EN 1992-2/NA, NCI zu 5.7 bei nichtlinearen Berechnungsverfahren ein einheitlicher Teilsicherheitsbeiwert von  $\gamma_R = 1,1$  zu verwenden.

### 4.2.3 Untersuchte Parameter

Als Basis für die Parameteruntersuchungen dienen zwei Grundsysteme mit Kragarmlängen von  $L_K = 2,40 \text{ m}$  (System 1) bzw.  $L_K = 3,00 \text{ m}$  (System 8). Die Systeme werden am Kragarmanschnitt jeweils als starr eingespannt modelliert. Als Materialeigenschaften werden eine Betongüte C 25/30 und eine Betonstahlgüte B 500 vorgegeben. Die Plattendicke der Grundsysteme beträgt konstant  $h_0 = h_1 = 25 \text{ cm}$ .

Kriterium	Bemerkung
Kragarmlänge $L_K$	2,40 m bzw. 3,00 m
Querschnittshöhe am Kragarmende $h_0$	25 cm
Querschnittshöhe am Kragarmanschnitt $h_1$	25 cm
Geometrie	$h_0/h_1 = 1$
Längsbewehrung $a_{sl}$	5,3 cm <sup>2</sup> /m (oben + unten)
Einspannung	starr
Verbindungs mittel zwischen Gesims und Kragarmspitze	Bewehrung (nicht-lineare Feder)
Verbindungs mittel in der horizontalen Fläche zwischen Kappe und Kragarm	keine
Betongüte	C 25/30
Betonstahl	B 500
Material Schutz einrichtung	Stahl ( $g_{SE} = 0,75 \text{ kN/m}$ )

Tab. 1: Randbedingungen der Grundsysteme für die Parameteruntersuchungen

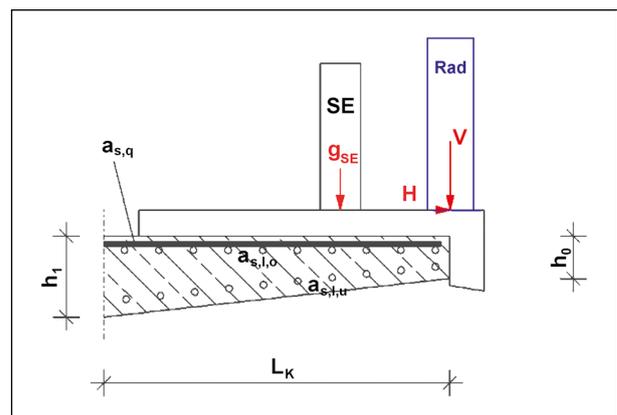


Bild 6: Stahlbetonkragarm mit geometrischen Bezeichnungen und Belastung

Alle geometrisch und statisch relevanten Randbedingungen sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Im Detail werden ausgehend von den Grundsystemen die Einflüsse folgender Parameter/Kriterien vergleichend untersucht:

- Veränderung der Plattengeometrie auf
  - $h_0/h_1 = 1/1,5$ ,
  - $h_0/h_1 = 1/2$ ,
  - $h_0/h_1 = 1/3$ .
- Erhöhung der Bewehrung in Brückenlängsrichtung im Kragarm auf 12,1 cm<sup>2</sup>/m
- Berücksichtigung einer elastischen Einspannung der Kragarme in die anschließenden Bau-

teile durch Modellierung der Fahrbahnplatte zwischen den Hauptträgerstegen

- Variante zu den Verbindungsmitteln zwischen Kappe/Kragarm durch Berücksichtigung von Tellerankern in der horizontalen Fläche zwischen Kappe und Kragarm
- Verwendung eines Fahrzeug-Rückhaltesystems aus Beton
- Verringerung der Querschnittshöhe auf  $h_0 = 20$  cm

Die beiden letztgenannten Parameter werden lediglich in Bezug auf das Grundsystem 1 untersucht. Gegenüber den beiden Grundsystemen wird innerhalb der weiteren Systeme jeweils nur ein Parameter verändert, um direkt den Einfluss der Veränderung erkennen zu können. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die berechneten Systeme und die jeweils untersuchten Parameter. Eine detaillierte Übersicht über die geometrischen und statischen Randbedingungen für die einzelnen Systeme ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Die Veränderung der Kragarmhöhe am Anschnitt (Systeme 2 und 9) auf  $h_1 = 75$  cm (entspricht  $h_0/h_1 = 1/3$ ) erfolgt mit zwei Zwischenschritten von  $h_0/h_1 = 1/1,5$  und  $h_0/h_1 = 1/2$ , sodass sich hier die Systeme 2a, 2b und 2c bzw. 9a, 9b und 9c ergeben.

System	Bemerkung
<b>1</b>	<b>Grundsystem für <math>L_K = 2,40</math> m</b>
2	Erhöhung der Kragarmhöhe $h_1$ am Anschnitt
3	Erhöhung der Längsbewehrung $a_{sl}$
4	elastische Einspannung am Kragarmanschnitt
5	Verdübelung zwischen Kappe und Kragarm (Telleranker)
6	SE aus Beton ( $g_{SE} = 8$ kN/m)
7	Verringerung der Querschnittshöhe auf $h_0 = 20$ cm
<b>8</b>	<b>Grundsystem für <math>L_K = 3,00</math> m</b>
9	Erhöhung der Kragarmhöhe $h_1$ am Anschnitt
10	Erhöhung der Längsbewehrung $a_{sl}$
11	elastische Einspannung am Kragarmanschnitt
12	Verdübelung zwischen Kappe und Kragarm (Telleranker)

Tab. 2: Übersicht der zu untersuchenden Parameter

Lfd. Nr.	Kragarmlänge	Querschnittshöhe Kragarmende	Querschnittshöhe Kragarmanschnitt	Verhältnis	Bewehrung längs, oben	Bewehrung längs, unten	Einspannung	Telleranker	SE Stahl bzw. SE Beton
	$L_K$ [m]	$h_0$ [m]	$h_1$ [m]	$h_0/h_1$ [-]	$a_{sl,o}$ [cm <sup>2</sup> /m]	$a_{sl,u}$ [cm <sup>2</sup> /m]			
1	2,40	0,25	0,25	1	5,3	5,3	voll	nein	Stahl
2a		0,25	0,375	1/1,5	5,3	5,3	voll	nein	
2b		0,25	0,50	1/2	5,3	5,3	voll	nein	
2c		0,25	0,75	1/3	5,3	5,3	voll	nein	
3		0,25	0,25	1	12,1	12,1	voll	nein	
4		0,25	0,25	1	5,3	5,3	elastisch	nein	
5		0,25	0,25	1	5,3	5,3	voll	ja	
6	3,00	0,25	0,25	1	5,3	5,3	voll	nein	Beton
7		0,20	0,20	1	5,3	5,3	voll	nein	Stahl
8		0,25	0,25	1	5,3	5,3	voll	nein	Stahl
9a		0,25	0,375	1/1,5	5,3	5,3	voll	nein	
9b		0,25	0,50	1/2	5,3	5,3	voll	nein	
9c		0,25	0,75	1/3	5,3	5,3	voll	nein	
10		0,25	0,25	1	12,1	6,8	voll	nein	
11	0,25	0,25	1	5,3	5,3	elastisch	nein		
12	0,25	0,25	1	5,3	5,3	voll	ja		

Tab. 3: Übersicht über die Randbedingungen der untersuchten Systeme

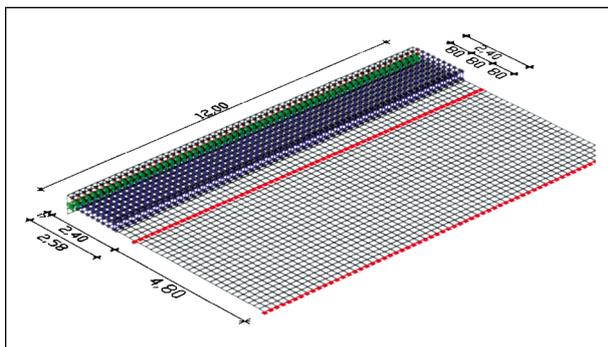


Bild 7: FE-Modell für System 4 zur Berücksichtigung einer elastischen Einspannung

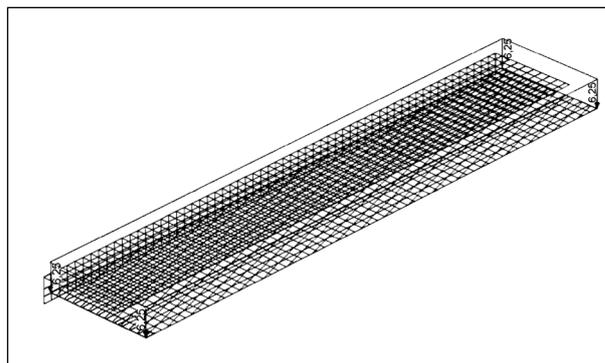


Bild 8: Lastfall Eigengewicht exemplarisch für einen Kragarm mit konstanter Dicke von  $h_0 = 25$  cm

Die Auswirkung einer in den Systemen 4 und 11 zu untersuchenden elastischen Einspannung wird an einem angepassten FE-Modell ermittelt (Bild 7). Hierzu wird die Stahlbetondecke um ein Feld verlängert. Das Längenverhältnis von Kragarmlänge zu Stützweite des Innenfeldes wird mit einer realistischen Größenordnung von  $L_K/L_1 = 0,5$  abgeschätzt. Bei System 4 ergibt sich daraus eine Feldlänge von  $L_1 = 4,80$  m, bei System 11 eine Feldlänge von  $L_1 = 6,00$  m.

Die Bewehrung des Innenfeldes in Längs- und Querrichtung entspricht dabei der gewählten Bewehrung des Kragarmes.

#### 4.2.4 Belastung des Kragarmes

Die Belastung des Kragarmes ergibt sich aus dem Eigengewicht der Stahlbetondecke, der Kappe einschließlich des Gesimses, der Schutzeinrichtung und des Fahrbelages sowie den Lasten aus Fahrzeuganprall.

Das Eigengewicht des Kragarmes ergibt sich bei einer konstanten Querschnittshöhe von  $h_0 = 25$  cm zu  $g_1 = 6,25$  kN/m<sup>2</sup>. Bei einer Aufvoutung des Kragarmes wird das Eigengewicht als trapezförmige, linear zum Kragarmanschnitt hin ansteigende Last aufgebracht. Die Ausbildung der Kappe orientiert sich an der Richtzeichnung für Ingenieurbauten [5] Kap 1. Das Eigengewicht der Kappe ergibt sich aufgrund der veränderlichen Dicke zu  $g_{K1} = 4,0$  kN/m<sup>2</sup> am Schrammbord und  $g_{K2} = 5,8$  kN/m<sup>2</sup> am Gesims. Die Höhe des Gesimses wird mit ca. 55 cm angenommen, sodass bei einer vorgegebenen Gesimsbreite von 35 cm eine Streckenlast von  $g_{Ges} = 5,0$  kN/m resultiert. Das Fahrzeug-Rückhaltesystem wird je nach seiner Ausbildung in Stahl oder Beton mit einer Eigenlast von  $g_{SE,s} = 0,75$  kN/m (Stahl) bzw.  $g_{SE,c} = 8,0$  kN/m (Beton) angesetzt. Der Lastangriffs-

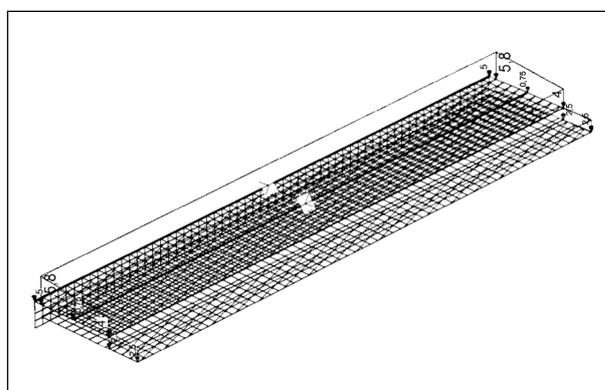


Bild 9: Lastfall Ausbaulasten (Kappe, Gesims, FRS, Belag)

punkt wird entsprechend der Richtzeichnung Kap 1 gewählt. Separate Untersuchungen haben gezeigt, dass die Abweichung dieses Ansatzes gegenüber den Vorgaben der Einsatzempfehlungen, die einen Lastangriff an der Kragarmspitze vorsehen, von vernachlässigbarer Größenordnung in Bezug auf den im weiteren Verlauf dargestellten Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung des Einflusses eines nichtlinearen Materialverhaltens auf die Tragfähigkeit ist.

Die einzelnen bei den FE-Berechnungen verwendeten Lastfälle sind in den nachfolgenden Bildern dargestellt.

Für die Berücksichtigung eines Fahrzeuganpralls wird das alternative Lastmodell gemäß 1. Ergänzung zur Nachrechnungsrichtlinie [2] (Bild 10) verwendet, das auf Untersuchungen aus BAST-Bericht B 108 [24] beruht. Als vertikale Komponente ergibt sich eine Linienlast von

$$a_{v,d} = 120/0,32 = 375 \text{ kN/m.} \quad (\text{Gl. 8})$$

Die zugehörige horizontale Komponente beträgt

$$a_{h,d} = 75/0,32 = 235 \text{ kN/m.} \quad (\text{Gl. 9})$$

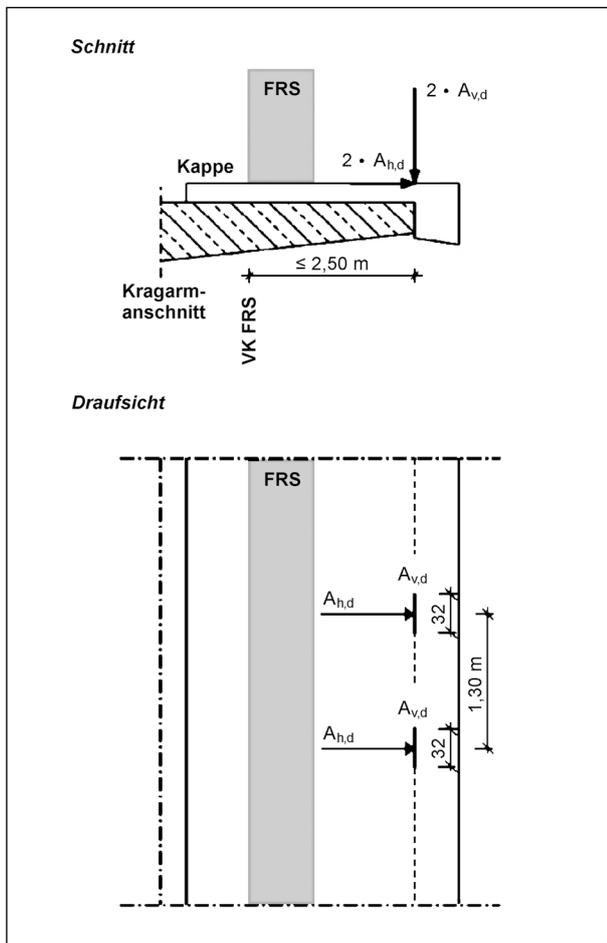


Bild 10: Alternativer Lastansatz für Fahrzeuganprall auf Fahrzeug-Rückhaltesysteme gemäß 1. Ergänzung zur Nachrechnungsrichtlinie [2]

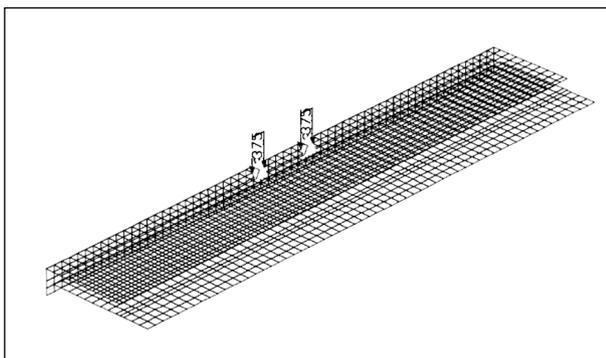


Bild 11: Lastfall Fahrzeuganprall mit alternativem Lastansatz gemäß NRR [2]; vertikale Komponente

#### 4.2.5 Ablauf der Parameterstudien

Grundlage für die Ermittlung des Einflusses der nichtlinearen Systemanalyse auf die erforderliche Bewehrungsmenge bilden die Ergebnisse einer linear-elastischen Berechnung der jeweiligen Systeme bei unveränderten Randbedingungen. Aus der linear-elastischen Berechnung ergibt sich im Krag-

armanschnitt eine erforderliche Bewehrungsmenge für die obere Lage der Querbewehrung.

Ausgehend von dieser Bewehrungsmenge wird eine nichtlineare Systemanalyse mit einer vorgegebenen Grundbewehrung  $a_{s,q,oben}$  durchgeführt, wobei als Grenzbedingung die Einhaltung einer Betonstahldehnung von 25 ‰ vorgegeben wird. Die Grundbewehrung wird schrittweise reduziert bis die Grenzbedingung erreicht wird. Auf diese Weise wird iterativ die minimale Grundbewehrung ermittelt, bei der das System gerade noch standsicher ist. Eine Vergleichbarkeit lässt sich insbesondere für Systeme mit unterschiedlicher statischer Nutzhöhe durch die Bildung des Verhältnswertes

$$\eta_{as} = a_{sq,nichtlinear} / a_{sq,linear} \quad (\text{Gl. 10})$$

erreichen.

#### 4.2.6 Ergebnisse der Parameterstudien

Für die in Tabelle 3 aufgeführten Systeme mit unterschiedlichen Randbedingungen sind die erforderlichen Bewehrungsmengen am Kragarmanschnitt für die obere Lage der Bewehrung in Brückenquerrichtung mithilfe einer linear-elastischen und einer nichtlinearen FE-Berechnung bestimmt worden.

Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der FE-Berechnungen ist Tabelle 4 zu entnehmen. Einen grafischen Überblick geben Bild 12 und Bild 13 für Kragarmlängen von  $L_K = 2,40$  m sowie Bild 14 und Bild 15 für Kragarmlängen von  $L_K = 3,00$  m.

Die Grundlage für die Untersuchungen an Kragarmen mit einer Länge von  $L_K = 2,40$  m bildet das System 1. Die FE-Berechnungen haben diesbezüglich eine erforderliche Bewehrungsmenge in der oberen Lage der Querbewehrung von  $a_{sq,lin} = 14,6$   $\text{cm}^2/\text{m}$  bei Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens sowie von  $a_{sq,nicht-lin} = 10,7$   $\text{cm}^2/\text{m}$  unter Berücksichtigung geometrisch-physikalischer Nichtlinearitäten ergeben. Dies bedeutet eine Reduzierung der erforderlichen Bewehrungsmenge auf ca. 73 %. Die gegenüber dem Grundsystem in den Systemen 3, 4 und 5 veränderten Parameter betreffen Veränderungen am statischen System bzw. an der Querverteilung der Lasten. Die hier ermittelten Bewehrungsmengen sind bei gleicher statischer Nutzhöhe am Kragarmanschnitt direkt mit den Werten aus dem Grundsystem 1 vergleichbar.

Bild 12 stellt die in der nichtlinearen FE-Berechnung ermittelten Bewehrungsmengen am Kragarm-

System	$a_{sq,o,nicht\text{-}lin}$ [cm <sup>2</sup> /m]	$a_{sq,o,lin}$ [cm <sup>2</sup> /m]	Verhältnis $\eta_{as}$ [%]
1	10,7	14,6	73,2
2a	6,8	9,2	73,3
2b	5,6	7,0	79,2
2c	3,9	5,0	77,1
3	10,6	14,6	72,6
4	10,5	12,8	82,2
5	10,5	14,3	73,4
6	11,8	16,0	74,0
7	15,2	20,6	74,0
8	14,6	18,6	78,4
9a	8,9	11,2	79,1
9b	7,0	8,6	81,9
9c	5,0	6,1	81,9
10	14,6	18,6	78,4
11	14,5	16,9	85,8
12	14,6	18,4	79,2

Tab. 4: Erforderliche Bewehrungsmengen am Kragarmanschnitt (obere Lage) aus nicht-linearer und linear-elastischer FE-Berechnung

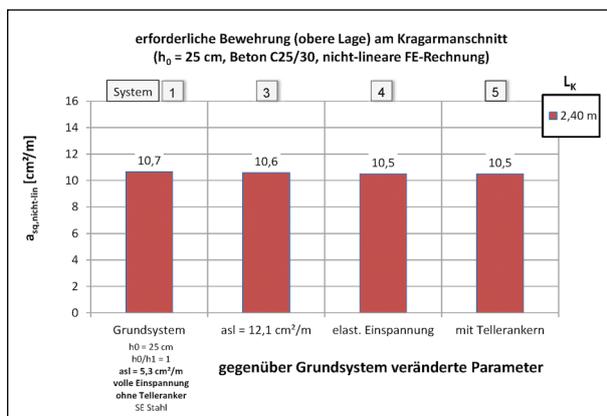


Bild 12: Erforderliche Bewehrung  $a_{sq,o}$  (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer FE-Berechnung für Kragarmlängen von  $L_K = 2,40$  m

schnitt für die Systeme 1, 3, 4 und 5 gegenüber. Eine erhöhte Längsbewehrung (System 3), eine elastische Einspannung (System 4) und der Ansatz von Tellerankern (System 5) führen zwar zu geringfügig günstigeren Ergebnissen, die Unterschiede sind jedoch minimal. Im Verhältnis zu den mit elastischen Materialeigenschaften ermittelten Bewehrungsmengen ergeben sich für die Systeme 1, 3 und 5 Größenordnungen von 69 bis 73 %. Eine nennenswerte Abweichung ergibt sich bei System 4, bei dem mit nichtlinearer Berechnung nur eine Reduzierung der erforderlichen Bewehrung auf ca.

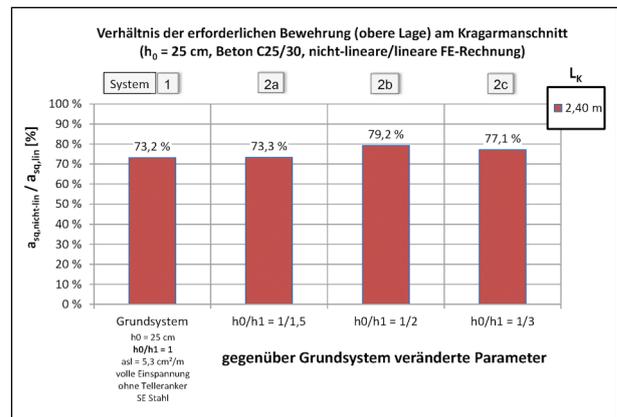


Bild 13: Verhältnis der erforderlichen Bewehrung  $a_{sq,o}$  (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer und linearer FE-Berechnung für Kragarmlängen von  $L_K = 2,40$  m

82 % erzielt werden kann. Dies ist darin begründet, dass bereits durch die elastische Einspannung in der linear-elastischen Berechnung eine günstigere Querverteilung der Lasten erzielt werden kann, so dass die Effekte aus der nichtlinearen Berechnung lediglich nur einen marginalen Einfluss besitzen.

Die Ergebnisse aus den numerischen Untersuchungen lassen sich für den Einfluss einer veränderten Plattengeometrie (Systeme 1 und 2a bis 2c) am sinnvollsten über den Verhältniswert der erforderlichen Bewehrung  $\eta_{as} = a_{sq,nichtlinear}/a_{sq,linear}$  darstellen (Bild 13). Hier sind nennenswerte Unterschiede in Abhängigkeit der Querschnittsgeometrie des Kragarms erkennbar. Der Einfluss der nichtlinearen Berechnung wird mit größer werdender Aufwölbung des Kragarms geringer. Bei einem Höhenverhältnis von  $h_0/h_1 = 1/3$  ergibt sich eine Reduzierung der nichtlinear ermittelten Bewehrungsmenge gegenüber der linear-elastisch ermittelten Bewehrungsmenge auf 77 %. Für das Grundsystem 1 liegt dieser Wert bei ca. 73 %.

Vergleichbare Ergebnisse wie bei den Berechnungen der Systeme mit Kragarmlängen von 2,40 m liefern auch die Berechnungen der Systeme 8 bis 12 mit Kragarmlängen von 3,00 m. Die mit nichtlinearer Berechnung ermittelten Bewehrungsmengen unterscheiden sich für die Systeme 8 (Grundsystem), 10 (Erhöhung Längsbewehrung), 11 (elastische Einspannung) und 12 (Telleranker) nur minimal (siehe Bild 14).

Auch hier ist der Einfluss der nichtlinearen Berechnung gegenüber der linearen Berechnung bei den Systemen 8, 10 und 12 ungefähr gleichgroß (78 bis 79 %), während der Einfluss bei System 11 mit

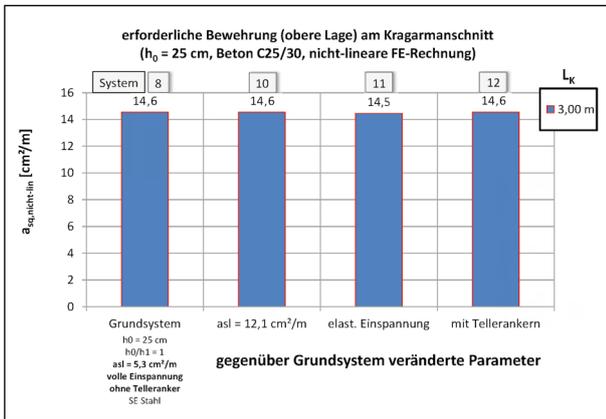


Bild 14: Erforderliche Bewehrung a<sub>sq,o</sub> (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer FE-Berechnung für Kragarmlängen von L<sub>K</sub> = 3,00 m

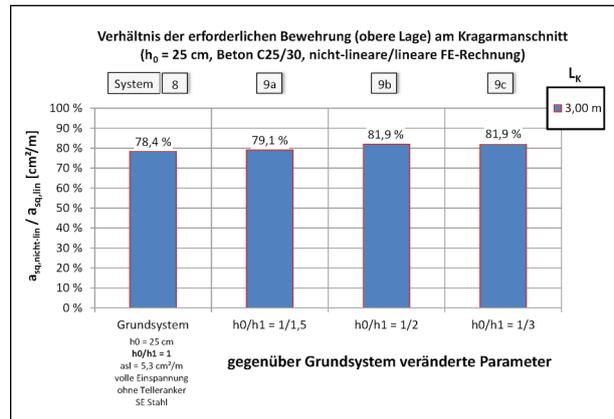


Bild 16: Verhältnis der erforderlichen Bewehrung a<sub>sq,o</sub> (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer und linearer FE-Berechnung

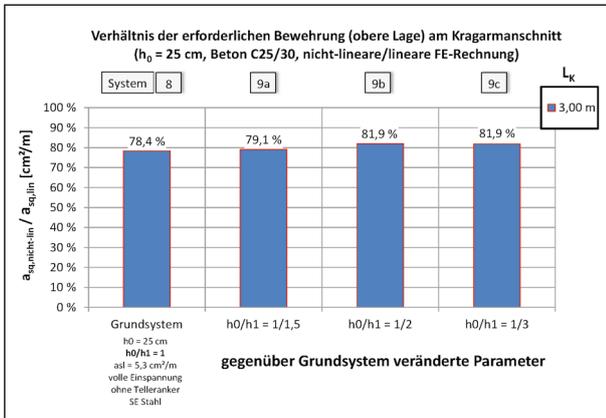


Bild 15: Verhältnis der erforderlichen Bewehrung a<sub>sq,o</sub> (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer und linearer FE-Berechnung für Kragarmlängen von L<sub>K</sub> = 3,00 m

86 % weniger stark ausfällt. Dies ist ebenfalls durch den Querverteilungseffekt begründet, der bereits in der linearen Berechnung durch die elastische Einspannung gegeben ist und die erforderliche Bewehrung auf 16,9 cm<sup>2</sup>/m gegenüber 18,6 cm<sup>2</sup>/m bei starrer Einspannung reduziert.

Der Einfluss der Plattengeometrie bei Kragarmlängen von L<sub>K</sub> = 3,00 m ist in Bild 15 dargestellt. Die Tendenz, dass der Einfluss der nichtlinearen Berechnung bei stärker werdender Aufvoutung des Querschnitts abnimmt, entspricht dabei den Ergebnissen der Systeme mit Kragarmlängen von 2,40 m. Allerdings ist die Reduzierung der mit nichtlinearer Berechnung ermittelten Bewehrung gegenüber der mit einer linearen Berechnung ermittelten Bewehrung nicht so groß. Sie bewegt sich zwischen 78 % bei einer konstanten Plattendicke und 82 % bei einer Plattengeometrie von h<sub>0</sub>/h<sub>1</sub> = 1/3.

Bild 16 fasst die Ergebnisse der Parameterstudien zum Einfluss der nichtlinearen Berechnung bei Variation einzelner Randbedingungen für die gewählten Kragarmlängen zusammen. Es zeigt sich, dass sich auch die für die Systeme 6 (Schutzeinrichtung aus Beton) und 7 (Reduzierung der konstanten Querschnittshöhe auf 20 cm) berechneten Verhältniswerte von nichtlinear zu linear ermittelter Bewehrung von jeweils 74 % in der Größenordnung des Grundsystems 1 liegen.

### 4.3 Identifizierung relevanter Parameter

Zur Identifizierung relevanter Parameter werden die in Bild 16 dargestellten Verhältniswerte der erforderlichen Biegebewehrung am Kragarmanschnitt bezogen auf die Werte der jeweiligen Grundsysteme 1 (L<sub>K</sub> = 2,4 m) bzw. 8 (L<sub>K</sub> = 3,0 m) ausgewertet. Aus Tabelle 5 ist für Kragarmlängen von L<sub>K</sub> = 2,4 m ersichtlich, dass eine Erhöhung der Längsbewehrung, eine Verankerung mit Tellerankern, eine Schutzeinrichtung aus Beton sowie eine verringerte Querschnittshöhe von h<sub>0</sub> = 20 cm keinen nennenswerten Einfluss auf die prozentuale Reduktion der erforderlichen Bewehrungsmenge aus nichtlinearer Berechnung gegenüber der nach linear-elastischer Berechnung ermittelten Bewehrungsmenge haben. Die Abweichungen liegen für diese Parameter innerhalb eines Bereiches von ±1,2 %.

Die Abweichung des Verhältniswertes bei Berücksichtigung einer elastischen Einspannung von ca. 12 % vom Verhältniswert des Grundsystems bei starrer Einspannung beruht darauf, dass die Effekte

System	Bezeichnung	Verhältnis $\eta_{as}$ [%]	Abweichung von $\eta_{as}$ gegenüber $\eta_{as,Grundsystem}$ [%]
1	<b>Grundsystem</b> $L_K = 2,4$ m	73,2	0,0
2a	$h_0/h_1 = 1/1,5$	73,3	0,1
2b	$h_0/h_1 = 1/2$	79,2	<b>8,3</b>
2c	$h_0/h_1 = 1/3$	77,1	<b>5,4</b>
3	$a_{sl} = 12,1$ cm <sup>2</sup> /m	72,6	-0,8
4	elastische Einspannung	82,2	12,4
5	mit Tellerankern	73,4	0,4
6	SE Beton	74,0	1,2
7	$h_0 = 20$ cm	74,0	1,2

Tab. 5: Abweichung der Verhältniswerte der erforderlichen Bewehrungsmengen von dem Verhältniswert des Grundsystems für  $L_K = 2,4$  m

System	Bezeichnung	Verhältnis $\eta_{as}$ [%]	Abweichung von $\eta_{as}$ gegenüber $\eta_{as,Grundsystem}$ [%]
8	<b>Grundsystem</b> $L_K = 3,0$ m	78,4	0,0
9a	$h_0/h_1 = 1/1,5$	79,1	0,9
9b	$h_0/h_1 = 1/2$	81,9	<b>4,6</b>
9c	$h_0/h_1 = 1/3$	81,9	<b>4,5</b>
10	$a_{sl} = 12,1$ cm <sup>2</sup> /m	78,4	0,0
11	elastische Einspannung	85,8	9,5
12	mit Tellerankern	79,2	1,0

Tab. 6: Abweichung der Verhältniswerte der erforderlichen Bewehrungsmengen von dem Verhältniswert des Grundsystems für  $L_K = 3,0$  m

einer günstigen Querverteilung der Lasten, die durch eine nichtlineare Berechnung erfasst werden können, bereits zum Großteil durch die Berücksichtigung der elastischen Einspannung bei der linear-elastischen Berechnung erfasst werden. Die erforderliche Bewehrung bei nichtlinearer Berechnung ist sowohl bei starrer Einspannung als auch bei elastischer Einspannung nahezu gleich groß (siehe Tabelle 4).

Signifikante Abweichungen in den Verhältniswerten der erforderlichen Bewehrungsmenge ergeben sich somit ausschließlich bei einer Variation der Querschnittshöhe am Kragarmanschnitt bei gleichblei-

bender Querschnittshöhe an der Kragarmspitze. Die Abweichungen betragen bis zu 8,3 %.

Die Tendenz bezüglich relevanter und nicht relevanter Parameter bei Kragarmlängen von  $L_K = 2,4$  m lässt sich auch bei Kragarmlängen von  $L_K = 3,0$  m erkennen (Tabelle 6). Auch haben die Parameter „Längsbewehrung“ und „Telleranker“ einen Einfluss in vernachlässigbarer Größenordnung. Für die Berücksichtigung einer elastischen Einspannung gelten die gleichen Schlussfolgerungen wie bereits zuvor anhand einer Kragarmlänge von 2,4 m erläutert worden ist. Der Einfluss der Plattengeometrie verbleibt als einziger relevanter Parameter. Die Größenordnung ist bei einer Kragarmlänge von  $L_K = 3,0$  m mit bis zu 5 % allerdings etwas geringer als bei einer Kragarmlänge von  $L_K = 2,4$  m.

Für die sich anschließenden Untersuchungen werden daher bis auf Veränderungen an der Plattengeometrie keine weiteren Parameter berücksichtigt.

## 5 Entwicklung von Bemessungshilfen

In Ergänzung zu den Bemessungshilfen in den aktuell gültigen Einsatzempfehlungen der BASt [3] werden Darstellungsformen in Diagrammform als Bemessungshilfen unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens erarbeitet.

Dabei werden im Wesentlichen folgende Parameter erfasst:

1. Kragarmlängen,
2. Kragarmgeometrie.

Weitere Parameter, z. B.

- Bewehrung in Brückenlängsrichtung vorh.  $a_{s,längs}$ ,
- Verwendung von Verbindungsmitteln in der horizontalen Fuge zwischen Kappe und Kragarm (z. B. Telleranker),
- Art der Schutzeinrichtung (Stahl bzw. Beton) und
- Kragarmdicken

haben sich in den bisherigen Untersuchungen als vernachlässigbare Größen heraus gestellt und werden in den zu entwickelnden Bemessungshilfen nicht separat erfasst.

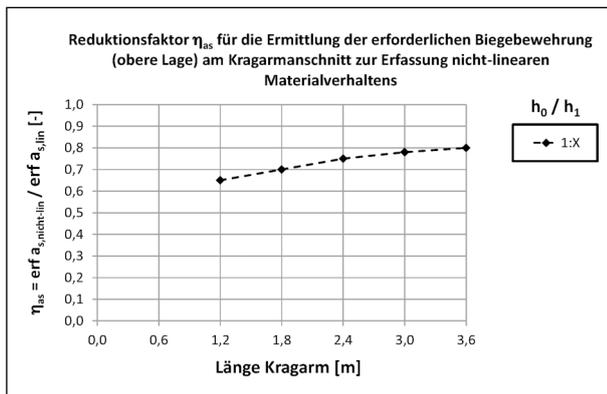


Bild 17: Allgemeine Darstellungsform einer Bemessungshilfe zur Erfassung des nichtlinearen Materialverhaltens

Aufgrund der geringen Anzahl relevanter Parameter wird auf eine Darstellungsform der neuen Bemessungshilfen, die den bekannten Bemessungshilfen für die lineare Berechnung entspricht, verzichtet. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Erfassung des nichtlinearen Materialverhaltens lassen sich sinnvollerweise über die Angabe eines Reduktionsfaktors darstellen, mit dem die auf Grundlage linearer Berechnungsmethoden ermittelte Bewehrung am Kragarmanschnitt beaufschlagt werden kann.

Für unterschiedliche Kragarmgeometrien  $h_0/h_1$  werden in der Darstellungsform gemäß Bild 17 jeweils separate Kurven zur Verfügung gestellt, mit deren Hilfe der entsprechende Reduktionsfaktor in Abhängigkeit der Kragarmlänge abgelesen werden kann.

Die Ermittlung der erforderlichen Biegebewehrung unter Berücksichtigung eines linear-elastischen Werkstoffverhaltens kann dabei in gewohnter Weise unter Verwendung der Bemessungstabellen aus den Einsatzempfehlungen der BAST [3] erfolgen.

## 6 Bemessungshilfen für Standardfälle

### 6.1 Vorbemerkungen

Die in Kapitel 5 hinsichtlich der Darstellungsform und Inhalt erarbeitete Bemessungshilfe wird mithilfe umfangreicher Parameterstudien für die in den Einsatzempfehlungen der BAST [3] dargestellten Standardfälle ausgearbeitet. Dabei wird der baupraktische Bereich der Kragarmlängen von 1,2 m bis 3,6 m abgebildet.

Die Schrittweite der zu untersuchenden Parameter leitet sich aus dem sich jeweils ergebenden Kurven-

verlauf ab. Um den Verlauf der Tragfähigkeitskurven eindeutig zu beschreiben, werden mindestens vier Bemessungswerte je Kurve ermittelt.

Die Anwendung der Bemessungshilfen wird abschließend an zwei Beispielen erläutert.

## 6.2 Ergänzende Parameterstudien

### 6.2.1 Umfang der ergänzenden Parameterstudien

Aufbauend auf den Parameterstudien aus Kapitel 4 werden für Kragarmlängen von 1,20 m, 1,80 m und 3,60 m weitere Parameterstudien durchgeführt. Die Randbedingungen entsprechen dabei exakt den Bedingungen aus den Systemen 1, 2a, 2b und 2c (siehe Tabelle 3). Für jede untersuchte Kragarmlänge wird somit für Plattengeometrien von  $h_0/h_1 = 1$ ,  $h_0/h_1 = 1/1,5$ ,  $h_0/h_1 = 1/2$  und  $h_0/h_1 = 1/3$  jeweils eine linear-elastische FE-Berechnung sowie mehrere iterative nichtlineare FE-Berechnungen zur Ermittlung der erforderlichen Bewehrung am Kragarmanschnitt durchgeführt. Tabelle 7 gibt einen Überblick über den Umfang der ergänzenden Untersuchungen

### 6.2.2 Ergebnis der ergänzenden Parameterstudien

Für die in Tabelle 7 zusammen gestellten Systeme sind die erforderlichen Bewehrungsmengen in der oberen Lage der in Brückenquerrichtung verlaufenden Bewehrung mithilfe einer linear-elastischen und einer nichtlinearen FE-Berechnung ermittelt worden. Tabelle 8 stellt die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen gegenüber. Aus den Bewehrungsmengen nach linear-elastischer und nichtlinearer Berechnung wird zudem der Verhältniswert

$$\eta_{as} = a_{sq,nichtlinear} / a_{sq,linear}$$

bestimmt.

Die Verhältniswerte der erforderlichen Bewehrung steigen mit zunehmender Querschnittshöhe  $h_1$  am Kragarmanschnitt an. Der Anstieg ist bei kurzen Kragarmlängen wesentlich ausgeprägter als bei großen Kragarmlängen. Bei kürzeren Kragarmlängen liegen die Verhältniswerte zudem grundsätzlich niedriger als bei größeren Kragarmlängen. Daraus lassen sich zwei Rückschlüsse ableiten. Der Einfluss der nichtlinearen Systemanalyse auf die erforderliche Bewehrungsmenge ist bei kürzeren Krag-

Lfd. Nr.	Kragarmlänge	Querschnittshöhe Kragarmende	Querschnittshöhe Kragarmanschnitt	Verhältnis	Bewehrung längs, oben	Bewehrung längs, unten	Einspannung	Telleranker	SE Stahl bzw. SE Beton
	$L_k$ [m]	$h_0$ [m]	$h_1$ [m]	$h_0/h_1$ [-]	$a_{sl,o}$ [cm <sup>2</sup> /m]	$a_{sl,u}$ [cm <sup>2</sup> /m]			
13	1,20	0,25	0,25	1	5,3	5,3	voll	nein	Stahl
14		0,25	0,375	1/1,5	5,3	5,3	voll	nein	
15		0,25	0,50	1/2	5,3	5,3	voll	nein	
16		0,25	0,75	1/3	5,3	5,3	voll	nein	
17	1,80	0,25	0,25	1	5,3	5,3	voll	nein	Stahl
18		0,25	0,375	1/1,5	5,3	5,3	voll	nein	
19		0,25	0,50	1/2	5,3	5,3	voll	nein	
20		0,25	0,75	1/3	5,3	5,3	voll	nein	
21	3,60	0,25	0,25	1	5,3	5,3	voll	nein	Stahl
22		0,25	0,375	1/1,5	5,3	5,3	voll	nein	
23		0,25	0,50	1/2	5,3	5,3	voll	nein	
24		0,25	0,75	1/3	5,3	5,3	voll	nein	

Tab. 7: Übersicht über die Randbedingungen der ergänzenden Parameterstudien

$L_k$ [m]	$h_0/h_1$ [-]	$a_{sq,o,nicht-lin}$ [cm <sup>2</sup> /m]	$a_{sq,o,lin}$ [cm <sup>2</sup> /m]	Verhältnis $\eta_{as}$ [%]
1,20	1	4,5	8,8	51,2
	1/1,5	3,7	5,8	64,4
	1/2	3,4	4,5	75,6
	1/3	2,4	3,2	73,2
1,80	1	7,8	11,3	68,7
	1/1,5	5,4	7,4	72,9
	1/2	4,5	5,6	79,8
	1/3	3,1	4,1	76,4
3,60	1	19,6	23,4	83,8
	1/1,5	11,2	13,5	82,6
	1/2	8,4	10,0	83,8
	1/3	6,2	7,1	86,5

Tab. 8: Erforderliche Bewehrungsmengen am Kragarmanschnitt (obere Lage) aus nichtlinearer und linear-elastischer FE-Berechnung

armtlängen deutlich stärker als bei größeren Kragarmtlängen und der Einfluss der nichtlinearen Systemanalyse nimmt bei größeren Vouten ab.

In Bild 18 ist der Verlauf der erforderlichen Biegebewehrung am Kragarmanschnitt infolge einer linear-elastischen FE-Berechnung unter Einbeziehung der in Kapitel 4 untersuchten Kragarmtlängen von 2,4 m und 3,0 m aufgetragen. Die dargestellten

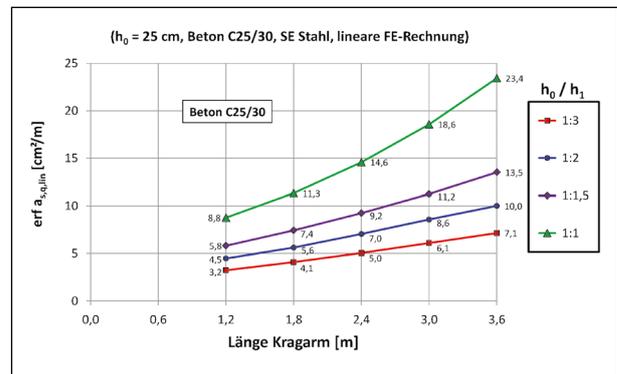


Bild 18: Erforderliche Bewehrung (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus linearer FE-Berechnung

Bewehrungsmengen gelten für eine Querschnittshöhe des Stahlbetonkragarmes an der Kragarmspitze von  $h_0 = 25$  cm, für eine Betongüte des Kragarmes von C25/30 und für eine Ausführung der Schutzeinrichtung in Stahlbauweise. Die Kurven verlaufen stetig und zeigen einen unterschiedlich ausgeprägten exponentiellen Verlauf.

Die vergleichbare Darstellung der erforderlichen Biegebewehrung am Kragarmanschnitt unter gleichen Randbedingungen als Resultat einer nichtlinearen Systemanalyse zeigt Bild 19.

In einem weiteren Schritt werden die mithilfe der nichtlinearen FE-Berechnung ermittelten Bewehrungsmengen als bezogene Größen im Verhältnis

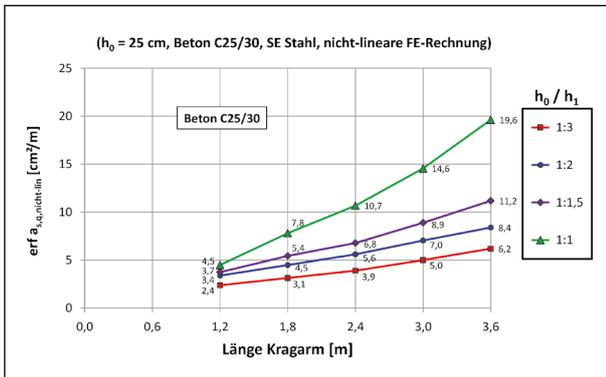


Bild 19: Erforderliche Bewehrung (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer FE-Berechnung

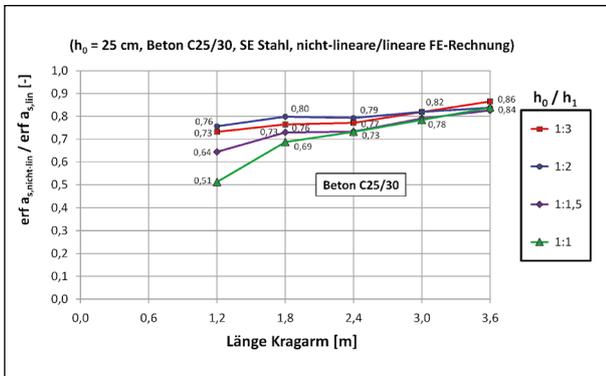


Bild 20: Verhältniswerte der erforderlichen Bewehrung (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer/linearer FE-Berechnung

zu der bei gleichen Randbedingungen mit linear-elastischer FE-Berechnung ermittelten Bewehrung dargestellt (siehe Bild 20). Es bestätigt sich die bereits zuvor beschriebene Tendenz des mit zunehmender Kragarmlänge geringer werdenden Einflusses der nichtlinearen Berechnung.

Die punktuell ermittelten Verhältniswerte unterliegen offensichtlich einer gewissen Streuung, weshalb die Kurven nicht immer stetig verlaufen. Auffällig ist die Tatsache, dass bei einer Kragarmlänge von  $L_K = 1,20$  m der Einfluss der nichtlinearen Berechnung überproportional zuzunehmen scheint. Dies kann durch die gegenüber größeren Kragarm-längen wesentlich größere Steifigkeit des Kragarmes erklärt werden, die bei einer linear-elastischen Berechnung nur geringe Schnittgrößenumlagerungen erlaubt und somit eine relativ hohe Bewehrungsmenge erfordert.

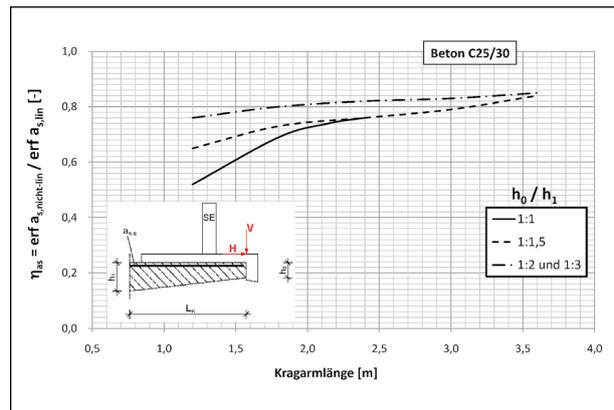


Bild 21: Reduktionsfaktor  $\eta_{as}$  für die Ermittlung der erforderlichen Biegebewehrung am Kragarmanschnitt zur Erfassung nichtlinearen Materialverhaltens

### 6.3 Bemessungshilfe

Auf Grundlage der in Bild 20 dargestellten Kurvenverläufe wird eine Bemessungshilfe erstellt, mit deren Handhabung eine überschlägige Abschätzung des Einflusses einer nichtlinearen Tragwerksanalyse auf die erforderliche Bewehrungsmenge am Kragarmanschnitt möglich ist (Bild 21).

Aufgrund der stark unterschiedlichen Ergebnisse für die Reduktionsfaktoren im Bereich kürzerer Kragarm-längen werden für Voutenverhältnisse  $h_0/h_1 = 1:1$  und  $h_0/h_1 = 1:1,5$  separate Kurven angegeben. Die Kurve für eine konstante Plattendicke endet bei einer Kragarmlänge von 2,40 m, da bei größeren Kragarm-längen in der Regel gevoutete Kragplatten zur Ausführung gekommen sind. Die Kurvenverläufe für eine Plattengeometrie  $h_0/h_1 = 1:2$  und  $h_0/h_1 = 1:3$  werden aufgrund der geringen Unterschiede der Berechnungsergebnisse zusammengefasst und verlaufen durchgängig deckungsgleich.

### 6.4 Anwendungsbeispiele

Zur Veranschaulichung wird die Anwendung der neu entwickelten Bemessungshilfe anhand der beiden bereits existierenden Beispiele aus Anhang B zu den Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme [3] erläutert. Die Beispiele werden im Rahmen des Vorschlags zur Ergänzung der Einsatzempfehlungen in Kapitel 7 dargestellt.

## 7 Vorschlag für die Ergänzung der Einsatzempfehlungen

Die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsberichtes können im Zuge der Fortschreibung der Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme [3] berücksichtigt und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. An dieser wird ein Vorschlag für die Ergänzung des Kapitels 4, Abschnitt 10 in den Einsatzempfehlungen zur Erfassung des Einflusses des nichtlinearen Tragverhaltens erarbeitet.

### Ergänzung des Kapitels 4, Abschnitt 10 der Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme

Anhand des Bild 22 kann die mögliche Abminderung der erforderlichen Biegebewehrung am Kragarmanschnitt auf Grundlage einer nichtlinearen Tragwerksanalyse gegenüber der linear-elastischen Berechnung bestimmt werden. Die dort dargestellten Abminderungsfaktoren wurden unter Annahme eines nichtlinearen Materialverhaltens und unter ansonsten gleichen Randbedingungen wie bei der linear-elastischen Berechnung (z. B. Berücksichtigung der Tragwirkung von Kappe und Gesims) mittels FE-Berechnung bestimmt. Sie gelten in Verbindung mit den Diagrammen E1 und E2 für die dargestellten Standardfälle mit Kappenbreiten von 1,50 m bis 2,05 m inklusive Schutzeinrichtungen mit einem Eigengewicht von bis zu 800 kg/m und den alternativen Lastansatz für den Anprall an

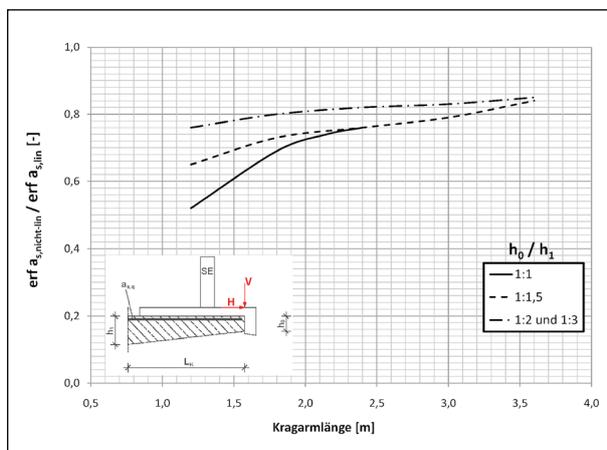


Bild 22: Abminderung der erf. Biegebewehrung am Kragarmanschnitt aufgrund des nichtlinearen Tragverhaltens für 1,50 bis 2,05 m breite Kappen, einer Höhe des Kragarmrandes von  $h_0 = 20$  cm bis 25 cm und einem Beton C 25/30 (außergewöhnliche LFK „Anprall an Schutzeinrichtung“)

Fahrzeug-Rückhaltesysteme gemäß „1. Ergänzung der Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand“. Neben den in den Diagrammen E1 und E2 genannten Voraussetzungen gelten auch die in Anhang B2 näher beschriebenen Randbedingungen. Das Bild 22 ist ebenfalls in Kombination mit den Diagrammen B7 und B8 anwendbar. Der Geltungsbereich des Bild 22 umfasst Kragarmbereiche mit einem ungestörten Lastausbreitungsbereich in Brückenlängsrichtung für Einwirkungen aus Fahrzeuganprall. Kragarmbereiche an Brückenden bilden aufgrund der Bauwerksfuge einen Sonderfall, der separat zu beurteilen ist.

### Ergänzung der Beispiele aus Anhang B zu den Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme

Beispiel 1:

$$L_K = 3,00 \text{ m}$$

$$h_0/h_1 = 50/25 = 2$$

$$g_{SE} = 1 \text{ kN/m (SE Stahl)}$$

Erforderliche Biegebewehrung unter Berücksichtigung linear-elastischen Materialverhaltens:

$$a_{s1} = 8,4 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Reduktionsfaktor für nichtlineares Materialverhalten aus Bild 22:

$$\text{erf } a_{s,\text{nicht-lin}}/\text{erf } a_{s,\text{lin}} = 0,83$$

Erforderliche Biegebewehrung unter Berücksichtigung eines nichtlinearen Materialverhaltens:

$$a_{s1,\text{nicht-lin}} = 0,83 \cdot 8,4 = 7,0 \text{ cm}^2/\text{m}$$

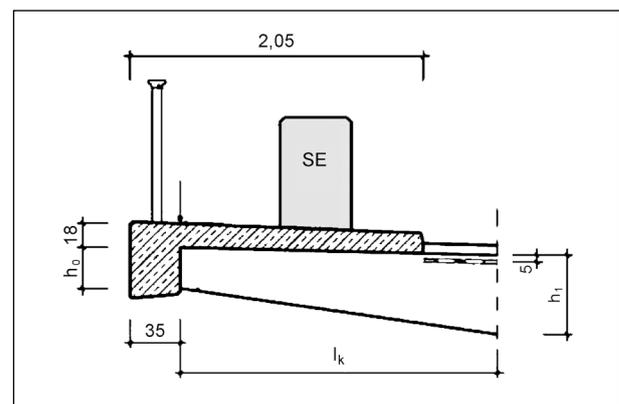


Bild 23: Beispiel 1 aus Anhang B zu den Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme [3]

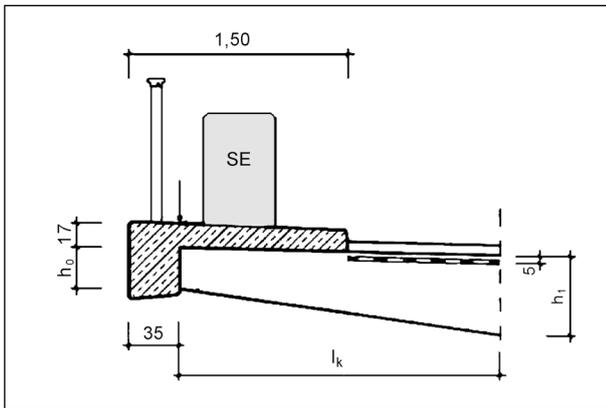


Bild 24: Beispiel 2 aus Anhang B zu den Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme [3]

Beispiel 2:

$$L_K = 1,70 \text{ m}$$

$$h_0/h_1 = 30/20 = 1,5$$

$$g_{SE} = 8 \text{ kN/m (SE Beton)}$$

Erforderliche Biegebewehrung unter Berücksichtigung linear-elastischen Materialverhaltens:

$$a_{s1} = 10,3 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Reduktionsfaktor für nichtlineares Materialverhalten aus Bild 22:

$$\text{erf } a_{s,\text{nicht-lin}}/\text{erf } a_{s,\text{lin}} = 0,72$$

Erforderliche Biegebewehrung unter Berücksichtigung eines nichtlinearen Materialverhaltens:

$$a_{s1,\text{nicht-lin}} = 0,72 \cdot 10,3 = 7,4 \text{ cm}^2/\text{m}$$

## 8 Weiterer Forschungsbedarf

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Untersuchungen behandeln Kragarmbereiche mit einer ungestörten Ausbreitung der Anpralllasten in Brückenlängsrichtung. Dies ist in den FE-Modellen durch ein Verhältnis von Kragarmbreite/Kragarmlänge  $\geq 4$  gewährleistet.

Einen Sonderfall stellen die Kragarmbereiche an Brückenenden dar. Aufgrund der Bauwerksfuge ist bei einem Fahrzeuganprall auf die Schutteinrichtung an Brückenenden keine ungestörte Lastausbreitung innerhalb des Kragarmquerschnitts möglich. Hier ergeben sich lokal erhöhte Beanspruchungen, die durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht erfasst werden und einer gesonderten Betrachtung bedürfen.

## 9 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ist der Einfluss des nichtlinearen Materialverhaltens auf die Tragfähigkeit bestehender Stahlbetonkragarme untersucht worden. Durch umfangreiche Parameterstudien mithilfe von FE-Berechnungen konnte gezeigt werden, dass durch eine nichtlineare Systemanalyse bislang nicht berücksichtigte Tragfähigkeitsreserven aktiviert werden können.

Dabei wurden verschiedene Parameter im Hinblick auf ihre Relevanz auf das Tragverhalten der Kragarme eingestuft. Von entscheidender Bedeutung ist die Plattengeometrie als Verhältnis von Querschnittshöhe am Kragarmende zu Querschnittshöhe am Kragarmanschnitt.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Parameterstudien wurde eine Bemessungshilfe entwickelt, mit der sich der Einfluss des nichtlinearen Materialverhaltens auf die erforderliche Bewehrungsmenge am Kragarmanschnitt abschätzen lässt. Die Bemessungshilfe kann in Kombination mit den bekannten Bemessungshilfen der Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme [3] verwendet werden.

Die Untersuchungen beziehen sich auf Kragarmbereiche mit einem ungestörten Lastausbreitungsbereich in Brückenlängsrichtung für Einwirkungen aus Fahrzeuganprall. Kragarmbereiche an Brückenenden bilden aufgrund der Bauwerksfuge einen Sonderfall, der separat zu beurteilen ist.

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), Ausgabe 05/2011
- [2] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), 1. Ergänzung, Ausgabe 04/2015
- [3] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme, Bergisch Gladbach, Stand 08/2017
- [4] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Technische Kriterien für den Einsatz von Fahrzeug-Rückhaltesystemen in Deutschland, Bergisch Gladbach, Stand 30.08.2017
- [5] Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING), aktuelle Fassung 12/2015
- [6] DIN EN 1991-2:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010
- [7] DIN EN 1991-2/NA:2012-08: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken
- [8] DIN EN 1992-2:2010-12: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln; Deutsche Fassung EN 1992-2:2005 + AC:2008
- [9] DIN EN 1992-2/NA:2013-04: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln
- [10] DIN-Fachbericht 101 – Einwirkungen auf Brücken. Beuth Verlag, Berlin, März 2003
- [11] DIN-Fachbericht 101 – Einwirkungen auf Brücken. Beuth Verlag, Berlin, März 2009
- [12] DIN-Fachbericht 102 – Betonbrücken. Beuth Verlag, Berlin, März 2009
- [13] EIBL, J.; KEINTZEL, E.; CHARLIER, H.: Dynamische Probleme im Stahlbetonbau. Teil 2: Stahlbetonbauteile und -bauwerke unter dynamischer Beanspruchung. Heft 392 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Berlin, 1988
- [14] GRASSER, E.; THIELEN, G.: Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken. DAfStb Heft 240; Beuth Verlag, Berlin, 1991
- [15] GRASSHOFF, S.: Fahrbahnplattenanschnittsmomente zweistegiger Plattenbalckenbrücken, Beton und Stahlbetonbau 1974, Heft 4, S. 97-100
- [16] HOLST, K.-H.: Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton – Entwurf, Konstruktion und Berechnung, 3. Aufl., Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 1993
- [17] HOMBERG, H.; ROPERS, W.: Fahrbahnplatten mit veränderlicher Dicke, Bd. I, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1965
- [18] HOMBERG, H.: Platten mit zwei Stegen, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1973
- [19] InfoCAD: aktuelle Programmversion, InfoGraph GmbH, Aachen; [www.infocad.de](http://www.infocad.de)
- [20] KRACKE, E.-A.; LODDE, K.: Leitfaden Straßenbrücken – Entwurf, Baudurchführung, Erhaltung, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2011
- [21] MAYER, T.: Rückhaltesysteme auf Brücken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 138, Bergisch Gladbach, 05/2017
- [22] NEUMANN, W.: Kragarme von Fahrbahnplatten für Beton- und Stahlverbundbrücken, Verkehrsblatt-Dokument-Nr. B 5255, Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn, 1994
- [23] NEUMANN, W.: Auskragende Fahrbahnplatten für Beton- und Stahlverbundbrücken (Heft 749 – Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik), Hrsg.: Bundesministe-

- rium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn, 1997
- [24] NEUMANN, W.; RAUERT, T.: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 108, Bergisch Gladbach, 12/2014
- [25] ROMBACH, G.: Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Betonbau, Ernst und Sohn Verlag, Berlin, 2000
- [26] ROMBACH, G.; VELASCO, R.: Schnittgrößen auskragender Fahrbahnplatten infolge von Radlasten nach DIN-Fachbericht, Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 5, S. 376-389
- [27] PFEIFFER, U.; QUAST, U.: Nichtlineares Berechnen stabförmiger Bauteile, Beton- und Stahlbetonbau 98 (2001), Heft 9, S. 529-538
- Bild 7: FE-Modell für System 4 zur Berücksichtigung einer elastischen Einspannung
- Bild 8: Lastfall Eigengewicht exemplarisch für einen Kragarm mit konstanter Dicke von  $h_0 = 25 \text{ cm}$
- Bild 9: Lastfall Ausbaulasten (Kappe, Gesims, FRS, Belag)
- Bild 10: Alternativer Lastansatz für Fahrzeuganprall auf Fahrzeug-Rückhaltesysteme gemäß 1. Ergänzung zur Nachrechnungsrichtlinie [2]
- Bild 11: Lastfall Fahrzeuganprall mit alternativem Lastansatz gemäß NRR [2]; vertikale Komponente
- Bild 12: erforderliche Bewehrung  $a_{sq,o}$  (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nicht-linearer FE-Berechnung für Kragarmlängen von  $L_K = 2,40 \text{ m}$

## Bilder

- Bild 1: Vorgehen zur Ermittlung der erforderlichen Bewehrung im Kragarmanschnitt unter Anwendung nichtlinearer Verfahren (aus [24])
- Bild 2: Exemplarischer Dehnungsverlauf im gerissenen Betonquerschnitt infolge einer positiven Momentenbeanspruchung; positive Dehnung in Höhe der Schwereachse
- Bild 3: Numerisches FE-Modell – a) 3D Gesamtdarstellung, b) Querschnitt mit Darstellung des Anschlusses der Kappe an den Kragarm
- Bild 4: Nichtlineares Federgesetz für das Last-Verformungs-Verhalten des Bewehrungsanschlusses an der Kragarmspitze
- Bild 5: Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton und Betonstahl für die nichtlineare Systemanalyse mit InfoCAD [19] (hier beispielhaft dargestellt für die ständige und vorübergehende Bemessungssituation mit  $\gamma_R = 1,3$ )
- Bild 6: Stahlbetonkragarm mit geometrischen Bezeichnungen und Belastung
- Bild 13: Verhältnis der erforderlichen Bewehrung  $a_{sq,o}$  (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer und linearer FE-Berechnung für Kragarmlängen von  $L_K = 2,40 \text{ m}$
- Bild 14: Erforderliche Bewehrung  $a_{sq,o}$  (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nicht-linearer FE-Berechnung für Kragarmlängen von  $L_K = 3,00 \text{ m}$
- Bild 15: Verhältnis der erforderlichen Bewehrung  $a_{sq,o}$  (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer und linearer FE-Berechnung für Kragarmlängen von  $L_K = 3,00 \text{ m}$
- Bild 16: Verhältnis der erforderlichen Bewehrung  $a_{sq,o}$  (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer und linearer FE-Berechnung
- Bild 17: Allgemeine Darstellungsform einer Bemessungshilfe zur Erfassung des nicht-linearen Materialverhaltens
- Bild 18: Erforderliche Bewehrung (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus linearer FE-Berechnung
- Bild 19: Erforderliche Bewehrung (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer FE-Berechnung

Bild 20: Verhältniswerte der erforderlichen Bewehrung (obere Lage) am Kragarmanschnitt aus nichtlinearer/linearer FE-Berechnung

Bild 21: Reduktionsfaktor  $\eta_{as}$  für die Ermittlung der erforderlichen Biegebewehrung am Kragarmanschnitt zur Erfassung nicht-linearen Materialverhaltens

Bild 22: Abminderung der erf. Biegebewehrung am Kragarmanschnitt aufgrund des nicht-linearen Tragverhaltens für 1,50 bis 2,05 m breite Kappen, einer Höhe des Kragarmrandes von  $h_0 = 20$  cm bis 25 cm und einem Beton C 25/30 (außergewöhnliche LFK „Anprall an Schutzeinrichtung“)

Bild 23: Beispiel 1 aus Anhang B zu den Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme [3]

Bild 24: Beispiel 2 aus Anhang B zu den Einsatzempfehlungen für Fahrzeug-Rückhaltesysteme [3]

Tab. 8: Erforderliche Bewehrungsmengen am Kragarmanschnitt (obere Lage) aus nicht-linearer und linear-elastischer FE-Berechnung

## Tabellen

Tab. 1: Randbedingungen der Grundsysteme für die Parameteruntersuchungen

Tab. 2: Übersicht der zu untersuchenden Parameter

Tab. 3: Übersicht über die Randbedingungen der untersuchten Systeme

Tab. 4: Erforderliche Bewehrungsmengen am Kragarmanschnitt (obere Lage) aus nicht-linearer und linear-elastischer FE-Berechnung

Tab. 5: Abweichung der Verhältniswerte der erforderlichen Bewehrungsmengen von dem Verhältniswert des Grundsystems für  $L_K = 2,4$  m

Tab. 6: Abweichung der Verhältniswerte der erforderlichen Bewehrungsmengen von dem Verhältniswert des Grundsystems für  $L_K = 3,0$  m

Tab. 7: Übersicht über die Randbedingungen der ergänzenden Parameterstudien

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 2016

B 123: **Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**  
Geißler, Krohn € 15,50

B 124: **Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**  
Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: **Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**  
Mielecke, Kistner, Graubner, Knäuf, Fischer, Schmidt-Thrö  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: **Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**  
Mielecke, Graubner, Roth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**  
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden**  
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: **Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**  
Schmellekamp  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 130: **Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**  
Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 131: **Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus**  
Schmidt-Thrö, Mielecke, Jungwirth, Graubner, Fischer, Kuhlmann, Hauf  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: **Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**  
Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: **Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**  
Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: **Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erhaltungskonzepte von Straßenbrücken**  
Gehrlein, Lingemann, Jungwirth  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2017

B 135: **Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**  
Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: **HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**  
Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: **Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton**  
Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: **Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken**  
Mayer  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: **Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie**  
Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: **Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5**  
U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: **Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln**  
Moormann, Buhmann  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: **Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken**  
Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brenberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2018

B 143: **Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**  
Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: **Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**  
Neumann, Brauer € 16,50

B 145: **8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband**  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

#### 2019

B 147: **Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen**  
Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

## 2020

**B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**

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

**B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit**

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

**B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke**

Keßler, Gehlen € 16,00

**B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze**

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken**

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

**B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens**

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

**B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt**

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

**B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern**

Friedrich € 9,00

**B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken**

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

**B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten**

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband**

€ 16,00

**B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags**

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staeck  
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

**B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems**

Lehardt, Seiler, Gerdes € 15,50

## 2021

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

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

**B 161: Lagerwege von Brücken**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Staeck, Eilers € 15,50

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

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

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

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

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG  
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen  
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

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

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.