

Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken

**Ingenieurmodelle
zur wirklichkeitsnahen
Ermittlung der Tragfähigkeit**

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 162



bast

Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken

**Ingenieurmodelle
zur wirklichkeitsnahen
Ermittlung der Tragfähigkeit**

von

Matthias Müller

Bundesanstalt für Straßenwesen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 162

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 2113003
Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken –
Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung
der Tragfähigkeit

Referat
Betonbau

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

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-566-8

Bergisch Gladbach, April 2021

Kurzfassung – Abstract

Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Die Bemessung des schubfesten Anschlusses von Gurten gegliederter Querschnitte erfolgt in Deutschland derzeit analog zum Querkraftnachweis für Stegquerschnitte mit einem Fachwerkmodell unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Betontragentils infolge Rissreibung. Die Neigung des Druckstrebenwinkels innerhalb des Fachwerks wird bei Anwendung dieses Bemessungsmodells auf die Gurte gegliederter Querschnitte nicht auf Grundlage des tatsächlichen Spannungszustandes bei Erstrissbildung festgelegt. Stattdessen erfolgt die Festlegung des Winkels auf Basis eines rein rechnerischen Spannungszustandes, mit einer theoretisch zur Schubrissbildung führenden Schubspannung [14], wobei die Längsspannung σ_x nicht gleichermaßen mit der Schubspannung gesteigert wird. Tatsächlich wachsen unter einer Laststeigerung bis zum GZT die Spannungen τ und σ im Gurtanschnitt gleichermaßen an.

In den in [14] durchgeführten Untersuchungen zum Tragverhalten von Druckgurtanschlüssen wurde gezeigt, dass diese Vorgehensweise das tatsächliche Tragverhalten nicht hinreichend genau berücksichtigt. Dies führt insbesondere in Gurtbereichen, die unter hohen Längsdruckspannungen stehen, zu konservativen Ergebnissen. Es wurden daher Bemessungsansätze erarbeitet und vorgestellt, die die tatsächlichen Spannungsverhältnisse und die wahrscheinliche Rissbildung mit größerer Genauigkeit erfassen.

Die Anwendungsmöglichkeiten für die unterschiedlichen Bemessungsvorschläge werden hier beschrieben und anhand von Beispielrechnungen mit den derzeitigen Bemessungsregeln nach DIN EN 1992-2/NA bzw. DIN FB 102 verglichen. Die Ergebnisse des Vergleichs sind ein Beleg für das Potenzial der neu entwickelten Modelle.

Für die geplante Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie werden Formulierungsvorschläge für mögliche Richtlinientexte erarbeitet. Hierbei orientieren sich die Vorschläge im Hinblick auf Gliederung, Abkürzungen und Formelzeichen am derzeitigen Stand der Nachrechnungsrichtlinie, Stand Mai 2011 [15], inkl. der ersten Ergänzung, Stand April 2015 [16].

Compression chord connection in box girder bridges – engineering models for realistic determination of the load-bearing capacity

The design of the shear-resistant connection of flanges with the webs in structured cross-sections is currently carried out in Germany in analogy to the shear force design for web cross-sections using the “truss model with crack friction”. The inclination of the compression strut angle within the truss is not determined on the basis of the actual stress state at first crack formation when this dimensioning model is applied to the flanges of structured cross sections. Instead, the angle is determined on the basis of the theoretical shear stress leading to shear cracking at a constant longitudinal stress state [14].

The investigations carried out in [14] on the load-bearing behavior of the connection of compression flanges showed that this procedure does not take sufficient account of the actual load-bearing behavior. This leads to conservative results, especially in flange areas subject to high longitudinal compressive stress. Therefore, design proposals were developed and presented that captures the actual stress conditions and the probable crack formation with greater accuracy.

The application possibilities for the various design proposals are described here and compared with the current design rules according to DIN EN 1992-2/NA or DIN FB 102 by means of example calculations. The results of the comparison are proof of the potential of the models presented.

Formulation proposals for possible guideline texts will be developed and presented for the planned further development of the structural assessment guideline. The proposed structure, abbreviations and symbols are based on the current status of the structural assessment guideline (May 2011 [15]) including the first amendment (April 2015 [16]).

Inhalt

1	Herausforderungen	7	5.1.1	Querschnitte und Beanspruchung	22
1.1	Allgemeines	7	5.1.2	Nachweis des Druckgurtanschlusses. .	23
1.2	Ausgangslage.	7	5.1.3	Vereinfachtes Fachwerkmodell nach DIN EN 1992-2/NA	24
1.3	Zielsetzung und Vorgehensweise.	7	5.1.4	Fachwerkmodell mit Rissreibung nach DIN EN 1992-2/NA	24
2	Tragverhalten von Druckgurt- anschlüssen	8	5.1.5	Anwendung des Vorschlags zur Nachrechnung von Druckgurt- anschlüssen mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung.	25
2.1	Trag- und Rissverhalten	8	5.1.6	Anwendung des Vorschlags zur Ermittlung der mit der vorhandenen Anschlussbewehrung aktivierbaren Gurtbreite	26
2.2	Ansatz des Fachwerkmodells mit Rissreibung.	10	5.1.7	Anwendung des Vorschlags zur Nachrechnung von ungerissenen Druckgurtanschlüssen mit geringer Anschlussbewehrung	28
2.2.1	Rissneigung	10	5.1.8	Zusammenstellung der Ergebnisse . . .	32
2.2.2	Weitere Traganteile	10	5.2	Bauwerk 2	34
2.3	Schlussfolgerungen	11	5.2.1	Querschnitte und Beanspruchung	34
3	Simulationsrechnungen	11	5.2.2	Nachweis des Druckgurtanschlusses. .	35
3.1	Elementansatz und Rissverhalten	11	5.2.3	Vereinfachtes Fachwerkmodell nach DIN EN 1992-2/NA	35
3.2	Versuchsnachrechnungen	12	5.2.4	Fachwerkmodell mit Rissreibung nach DIN EN 1992-2/NA	36
3.3	Berücksichtigung brückenbau- relevanter Abmessungen	14	5.2.5	Anwendung des Vorschlags zur Nachrechnung von Druckgurt- anschlüssen mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung.	37
3.3.1	FE-Modell für Hohlkastenbrücken	14	5.2.6	Anwendung des Vorschlags zur Ermittlung der mit der vorhandenen Anschlussbewehrung aktivierbaren Gurtbreite	39
3.3.2	Rissverhalten und Spannungs- verteilung	14	5.2.7	Anwendung des Vorschlags zur Nachrechnung von ungerissenen Druckgurtanschlüssen mit geringer Anschlussbewehrung	40
3.4	Fazit	16	5.2.8	Zusammenstellung der Ergebnisse . . .	43
4	Vorschläge für die Bemessung.	18	5.3	Fazit	44
4.1	Tragfähigkeit ungerissener Gurt- querschnitte ohne rechnerisch erforderliche Anschlussbewehrung . . .	18			
4.2	Tragfähigkeit gerissener Gurtquer- schnitte mit rechnerisch erforder- licher Anschlussbewehrung	19			
4.3	Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der erforderlichen Gurtfläche	21			
5	Nachrechnung bestehender Bauwerke	22			
5.1	Bauwerk 1	22			

6	Zusammenfassung und Ausblick . . .	46
	Literatur	47
	Bilder	48
	Tabellen	50
	Anlage	52

1 Herausforderungen

1.1 Allgemeines

Die Anforderungen an Brückenbauwerke haben sich in den vergangenen Jahren infolge ständig steigender Verkehrslastzahlen deutlich erhöht. Gleichzeitig wurden die Bemessungsvorschriften zum Nachweis des schubfesten Anschlusses von Gurten an die Stege kontinuierlich weiterentwickelt. Die für Neubauten konzipierten Nachweisformate zur Ermittlung der Gurtanschlussbewehrung führen derzeit teilweise zu erheblichen rechnerischen Tragfähigkeitsdefiziten bei der Nachrechnung bestehender Brückenbauwerke. Hierbei stellen sich insbesondere die Bodenplatten von Hohlkastenbrücken im Bereich der Druckgurtanschlüsse über den Innenstützen häufig als besonders kritisch heraus. Dieses Ergebnis kann nur zum Teil auf die im Laufe der Jahre deutlich gestiegenen und derzeit bei der Nachrechnung anzusetzenden Verkehrslasten zurückgeführt werden, die nur einen kleinen Beanspruchungsanteil an den gesamten Bemessungsschnittgrößen im GZT liefern. In der Regel stellen die relativ hohen Eigengewichtsanteile bereits etwa 70 % der Gesamtbeanspruchung. Von MAURER et al. in [11, 12] durchgeführte Untersuchungen zu den Auswirkungen der mit Einführung der Eurocodes für den Brückenbau geänderten Verkehrslastmodelle auf die Gesamtbeanspruchungen bestätigen diese Aussage. Folglich sind die Ursachen für die bei der Nachrechnung festzustellenden rechnerischen Tragfähigkeitsdefizite auf Querschnittsebene vor allem auf die mit der Weiterentwicklung der Regelwerke geänderten Bemessungsvorschriften und Konstruktionsregeln zurückzuführen.

Der Nachweis des schubfesten Anschlusses gegliederter Querschnitte erfolgt in Deutschland auf Basis des Fachwerkmodells mit Rissreibung, das zum Nachweis der Querkrafttragfähigkeit von Stegquerschnitten entwickelt wurde. Zur Kalibrierung dieses Modells wurden überwiegend Versuche an statisch bestimmt gelagerten Versuchsträgern aus Stahlbeton mit geringer Querschnittshöhe herangezogen. Das für Stahlbetonstegquerschnitte entwickelte Fachwerkmodell mit Rissreibung wird derzeit in Deutschland ohne nennenswerte Modifikationen auch für die Bemessung des schubfesten Anschlusses von Gurtquerschnitten verwendet. Hierdurch werden das Tragverhalten kennzeichnende Unterschiede zwischen Steg- und Gurtquerschnitt vernachlässigt. Die Anwendung der derzeitigen Ansätze führt bei der Planung neuer Bauwerke zu robu-

ten und wirtschaftlichen Konstruktionen. Eine nachträgliche Verstärkung bestehender Konstruktionen ist hingegen nur mit erheblichem Aufwand möglich.

Vor dem Hintergrund dieser Erkenntnisse ist eine Weiterentwicklung der derzeitigen Bemessungskonzepte von großer praktischer Bedeutung, da eine realitätsnahe und wirtschaftliche Beurteilung der Tragfähigkeit des Brückenbestandes mit den derzeitigen Ansätzen nur bedingt möglich ist.

1.2 Ausgangslage

In [14] wurden Vorschläge zur Bemessung des schubfesten Anschlusses von Druckgurten an die Stegquerschnitte erarbeitet und vorgestellt. Grundlagen waren neben den Ergebnissen dokumentierter Versuche analytische Betrachtungen und numerische Berechnungen in unterschiedlichen Skalierungsebenen des Berechnungsmodells. Die Komplexität des verwendeten FE-Modells wurde schrittweise gesteigert, um zunächst an einfachen und analytisch nachvollziehbaren Beispielen die Wirkungsweise des verwendeten Modells zu erfassen. Durch die Nachrechnung von dokumentierten Bauteilversuchen gelang die Verifikation eines Modells für die Anwendung zur Tragfähigkeitsanalyse von Gurtanschlüssen. Gleichzeitig wurden die analytischen Voruntersuchungen durch die numerischen Modellrechnungen bestätigt. Die Anwendung des verifizierten Modells auf einen Referenzquerschnitt bzw. ein Referenzsystem mit für den Brückenbau relevanten Abmessungen und durchgeführte Sensitivitätsanalysen ließen weitere Schlussfolgerungen zum Tragverhalten zu. Auf diesen Untersuchungen aufbauend wurden die eingangs erwähnten Bemessungsvorschläge abgeleitet.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

In diesem Bericht wird das Potenzial der Bemessungsvorschläge aufgezeigt und es werden Vorschläge zur Überführung in die Praxis erarbeitet.

Die Zusammenhänge und Hintergründe zu den in [14] vorgeschlagenen Bemessungsmodellen werden zunächst beschrieben. Im Anschluss werden in Beispielrechnungen an konkreten Brückenbauwerken die Ergebnisse der Bemessungsvorschläge mit den Ergebnissen der Bemessungsregeln nach der derzeit gültigen DIN EN 1992-2/NA verglichen. Hier-

durch werden Potenziale und Grenzen der einzelnen Modelle anschaulich dargestellt.

Die Bemessungsvorschläge werden in Form von Textbausteinen zusammengefasst, die sich in ihrer Struktur an der derzeitigen Ausgabe der Nachrechnungsrichtlinie [15, 16] orientieren.

2 Tragverhalten von Druckgurtanschlüssen

Das für die Querkraftbemessung von Stegquerschnitten entwickelte Fachwerkmodell mit Rissreibung wird in Deutschland für den Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen den Gurten und den Stegen gegliederter Querschnitte ohne nennenswerte Anpassungen übertragen. In [14] wurde gezeigt, dass mit der Anwendung des Fachwerkmodells mit Rissreibung wesentliche das Tragverhalten von Gurtanschlüssen beeinflussende Randbedingungen vernachlässigt werden. Dies führt insbesondere in den unter hohen Längsdruckspannungen stehenden Gurtbereichen zu konservativen Bemessungsergebnissen. Nachfolgend werden die wesentlichen Hintergründe aus [14] zusammenfassend dargestellt.

2.1 Trag- und Rissverhalten

Die Stegquerschnitte dienen dem direkten Abtrag äußerer Lasten in die Auflager. Nahezu die gesamte Querkraftbeanspruchung im Querschnitt muss durch die Stege übertragen werden. Gleichzeitig wird eine Änderung der resultierenden Kräfte in der Biegedruck- bzw. Biegezugzone infolge einer Biegebeanspruchung des Längssystems erst durch die schubfeste Verbindung über die komplette Höhe

der Stege ermöglicht. Folglich sind die Stegquerschnitte für die volle rechnerische Querkraftbeanspruchung zu dimensionieren, um Gleichgewicht sicherzustellen.

Die Gurtscheiben gegliederter Querschnitte stellen für den Fall der Biegung mit Längskraft hingegen lediglich eine Verbreiterung der jeweiligen Druck- bzw. Zugzone der Stegquerschnitte dar. Dabei muss nur der Anteil der Biegedruck- bzw. Biegezugkraft schubfest an den Steg angeschlossen werden, der zur Sicherstellung des Gleichgewichts unter definierter Belastung im GZT erforderlich ist.

In den Stegen gegliederter Querschnitte entwickeln sich die geneigten Schubrisse in der Regel aus Biegrissen. Die Rissneigung wird im Fall konventionell gelagerter Bauwerke im Wesentlichen durch die Höhe der Vorspannung beeinflusst. Die freien Rissenden der Biegeschubrisse ermöglichen eine gegenseitige Verschiebung (Gleitung) der benachbarten Rissufer mit zunehmender Verformung. Hierdurch können Reibungskräfte im Riss aktiviert werden, die jedoch mit zunehmender Öffnung der Risse kleiner werden. Eine schematische Darstellung des beschriebenen Zusammenhangs kann Bild 1 entnommen werden.

Im Gegensatz zum im Wesentlichen durch Biegeschubrissebildung gekennzeichneten Steg kann bei der Auswertung von Versuchen zum Tragverhalten von Druckgurtanschlüssen von BADAWY und BACHMANN [3] sowie BACCHETTA und BACHMANN [1] eine Lokalisierung der Schubzugrisse im stegnahen Bereich mit zunehmender Längsdruckspannung infolge des ansteigenden Moments zum Feld hin im Druckgurt festgestellt werden. Gleichzeitig geht mit der größer werdenden Längsdruckspannung eine immer flachere Neigung der Risse einher.

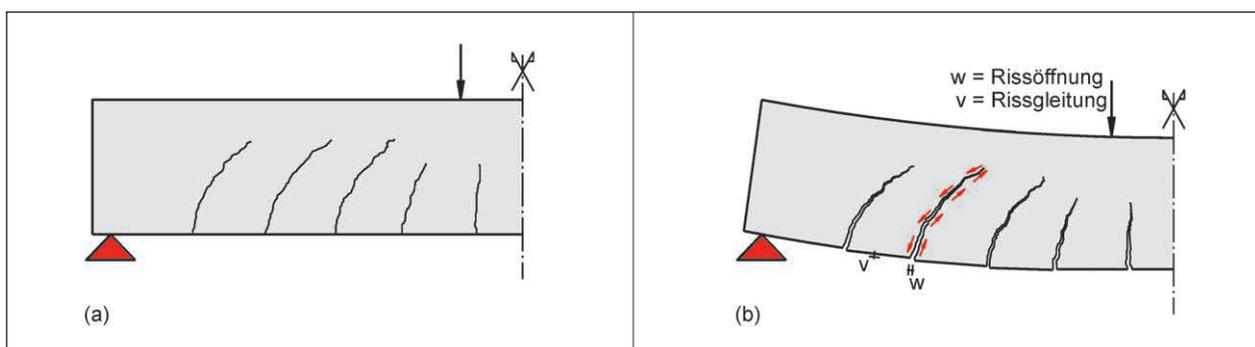


Bild 1: Verschiebungen und Kräfte am idealisierten Biegeschubrissebild (a) unverformt (b) verformt aus [14]

Die schematische Darstellung der Rissbilder dokumentierter Versuche in Bild 2 verdeutlicht die beschriebenen Zusammenhänge sehr anschaulich. Das Rissverhalten im Druckgurt kann auf die sich ändernden Scheibenspannungsverhältnisse in der Gurtscheibe zurückgeführt werden. Die Winkeländerung und die Lokalisierung der Risse sind dabei unabhängig von der Querschnittsform (Plattenbalken oder Hohlkasten) und der Art der äußeren Belastung (Einzellasten oder gleichmäßig verteilte Lasten), da die Änderung der Längsdruckspannungen vom Biegemomentenverlauf im Längssystem abhängt und die Schubspannungen vom Verlauf der Querkraftbeanspruchung. Folglich werden die

Längsspannungen immer durch ein Polynom höheren Grades beschrieben als die der Schubspannungen. Die Neigung der Hauptdruckspannungen nach (2.1), die gleichzeitig den theoretischen Risswinkeln entsprechen, wird folglich mit betragsmäßig größer werdendem Biegemoment flacher.

$$\theta = \beta = 0,5 \cdot \arctan\left(\frac{-2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma_x}\right) \quad (2.1)$$

Der beschriebene Zusammenhang ist anschaulich nochmals für die Verhältnisse einer Bodenplatte einer Hohlkastenbrücke an der Innenstütze in Bild 3 dargestellt.

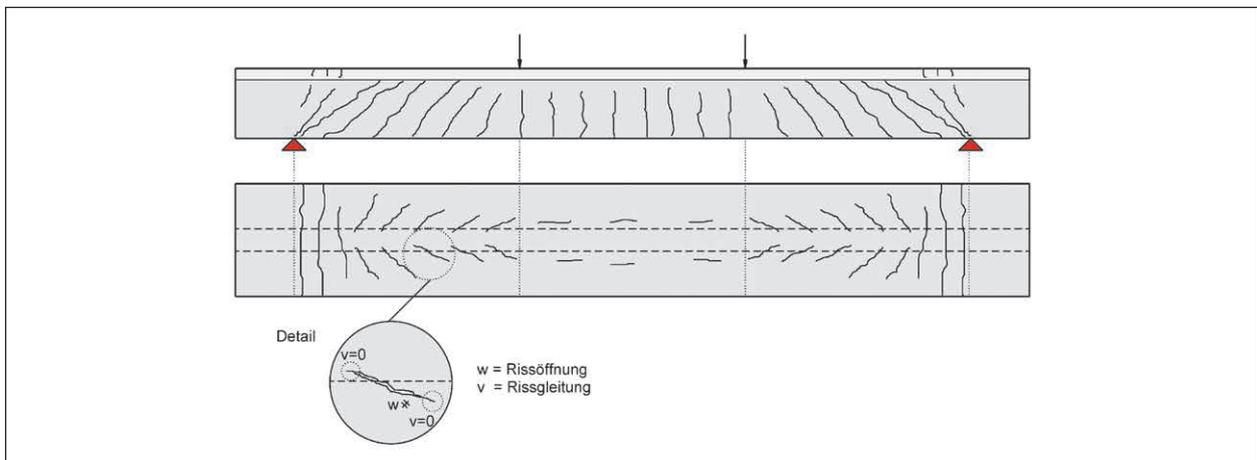


Bild 2: Idealisiertes Rissbild eines Plattenbalkens mit Druckgurt aus [14] in Anlehnung an die dokumentierten Rissbilder von Versuchsträgern aus [3]

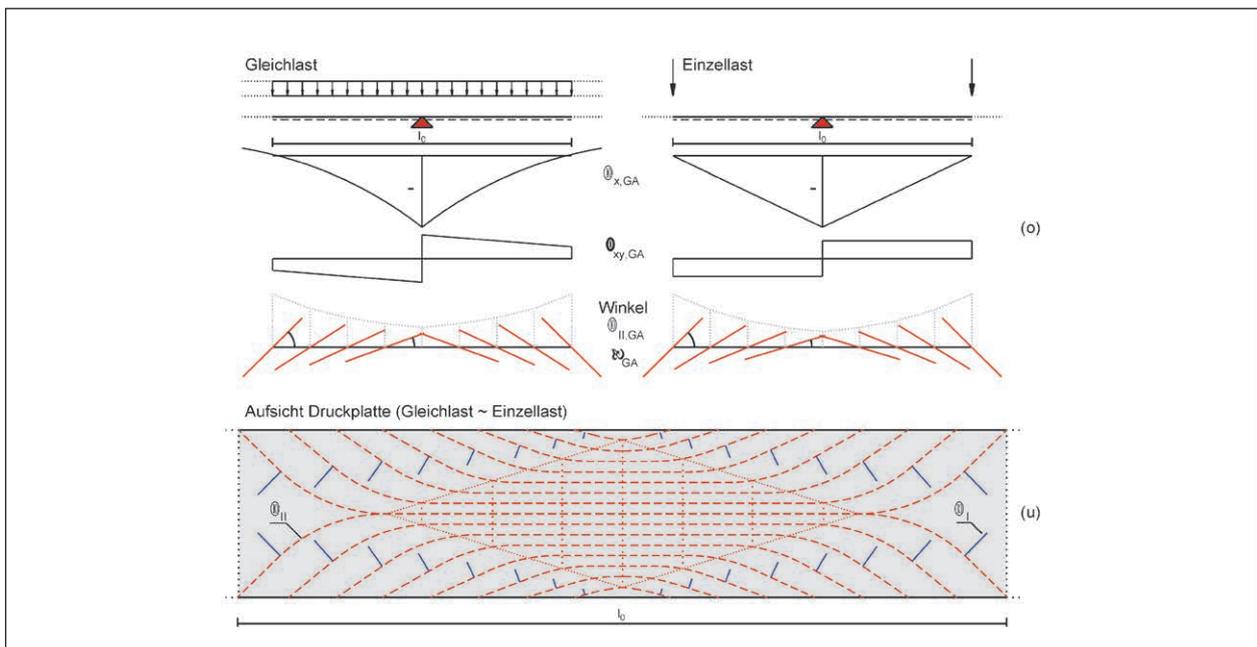


Bild 3: Entwicklung der Hauptdruckspannungsrichtung im Bodenplattenanschnitt (GA) einer Hohlkastenbrücke in Abhängigkeit der Belastungsart im Zustand I (o), Idealisierter Hauptspannungstrajektorienverlauf (u); l_0 : Bereich zwischen den Momentennullpunkten [14]

2.2 Ansatz des Fachwerkmodells mit Rissreibung

2.2.1 Rissneigung

Die Ermittlung der Rissneigung β hat bei der Bemessung auf Basis des Fachwerkmodells mit Rissreibung entscheidenden Einfluss auf das Berechnungsergebnis und erfolgt nach (2.2).

$$\cot\beta = 1,2 - 1,4 \cdot \frac{\sigma_{xd}}{f_{cd}} \quad (2.2)$$

Hierbei handelt es sich um eine linearisierte und in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit gebrachte Form der ursprünglichen Ausgangsgleichung (2.3) [17].

$$\cot\beta = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{xd}}{f_{ctd}}} \quad (2.3)$$

Diese folgt aus Gleichung (2.4) zur Ermittlung der Hauptzugspannung. Mit $\tau_{xyd}/\sigma_I = \cot\beta$ und $\sigma_I = f_{ctd}$ in Gl. (2.4) erhält man die Gleichung (2.3).

$$\begin{aligned} \sigma_I &= \frac{\sigma_{xd}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xd}}{2}\right)^2 + \tau_{xyd}^2} \quad (2.4) \\ \Rightarrow \frac{\tau_{xyd}}{\sigma_I} &= \sqrt{1 - \frac{\sigma_{xd}}{\sigma_I}} \end{aligned}$$

Bei den hier getroffenen rechnerischen Annahmen wird eine zunehmende Beanspruchung τ_{xyd} bei konstant bleibender Längsspannung σ_{xd} unterstellt. Mit $\tau_{xyd}/\sigma_I = \cot\beta$ korrespondiert der errechnete Risswinkel β mit der bis zur Rissbildung gesteigerten Schubspannung τ_{xyd} bei konstanter Längsspannung σ_{xd} . Es handelt sich folglich um die zur Rissbildung führende anwachsende Schubspannung τ_{xyd} unter ansteigender Belastung bei konstant bleibender Längsspannung σ_{xd} [14].

Diese Vorgehensweise zur Ermittlung der Rissneigung wurde für querkraftbeanspruchte Stegquerschnitte entwickelt und ist für diesen Anwendungsfall zutreffend. In der Regel werden die mittleren Längsspannungen in den Stegen konventionell gelagerter Brücken nur von der Höhe der unter ansteigender Belastung konstant bleibenden Vorspannung beeinflusst. Die vorhandene Schub- und die mittlere Längsspannung sind somit unabhängig

voneinander. Vor diesem Hintergrund hat der beschriebene Ansatz den theoretischen Risswinkel in der Schwerachse des Querschnitts auf Basis der im ungerissenen Zustand I ermittelten Spannungen zum Ergebnis.

Als wesentlicher Unterschied zum Tragverhalten des Stegs wurde in Kapitel 2.1 ausgeführt, dass es sich beim Gurt um eine Verbreiterung der jeweiligen Biegedruck- bzw. Biegezugzone handelt. Eine Änderung der Längskräfte in den Gurten infolge einer Biegebeanspruchung des Längssystems ist nur durch eine entsprechende Änderung des Schubflusses innerhalb der Gurtanschlussfuge zum Steg möglich. Hieraus folgt, dass die vorhandenen Längsspannungen in den Gurten mit den Schubspannungen in der Gurtanschlussfuge korrespondieren (siehe Kapitel 2.2 bzw. Bild 3). Durch die derzeitige Vorgehensweise einer impliziten Ermittlung der zur Rissbildung führenden Schubspannung bei konstanter Längsspannung werden bei Anwendung auf Druckgurte rechnerische Spannungsverhältnisse zugrunde gelegt, die sich tatsächlich so nicht einstellen. Insbesondere für den Fall, dass unter einer gegebenen Kombination aus Längsdruck- und Schubspannung im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine Rissbildung noch nicht zu erwarten ist ($\sigma_I < f_{ct}$), führt diese Vereinfachung in der Rechnung zu steileren Risswinkeln und in der Folge zu einer steileren Neigung der Druckstreben.

2.2.2 Weitere Traganteile

Im gerissenen Zustand II setzt sich der Schub- bzw. Querkraftwiderstand in den Stegen gegliederter Querschnitte aus einer Reihe unterschiedlicher Traganteile zusammen. Neben der Fachwerktragwirkung zählen hierzu Rissreibungskräfte, Vertikalkraftanteile geneigter Spannglieder, Kräfte infolge einer Dübelwirkung der Längsbewehrung sowie Traganteile der ungerissenen Betondruckzone. Einen Untersuchungsschwerpunkt im Rahmen aktueller Forschungsvorhaben stellt die Quantifizierung zusätzlicher Betontraganteile in schwach schubbewehrten Bauteilen dar (z. B. in Form einer Sprengwerk- oder Druckbogentragwirkung [6, 7, 8, 9, 13]).

Die Aktivierung der neben der Fachwerktragwirkung genannten Traganteile setzt immer ein bestimmtes Modell- bzw. Rissverhalten voraus. Alle genannten Widerstände beruhen auf der Modellvorstellung des durch Querkraftbiegung beanspruchten Stegquerschnitts. So setzen die Sprengwerk-

oder Druckbogentragwirkung eine direkte äußere Last voraus, um eine Umlenkung der resultierenden Betondruckkraft im Inneren des Bauteils zu bewirken. Im Fall eines schubfest an den Steg angeschlossenen Gurts kann die Umlenkung eines etwaigen Bogen- oder Sprengwerkanteils jedoch nur durch innere Kräfte (z. B. in Form einer Zugkraft in der Anschlussbewehrung) erfolgen.

Beim derzeit in Deutschland normativ eingeführten Bemessungsmodell, dem Fachwerkmodell mit Rissreibung, wird neben der reinen Fachwerktragwirkung ausgehend vom wahrscheinlichen Risswinkel die Rissreibung als ergänzender Betontraganteil berücksichtigt. Hierbei wird vorausgesetzt, dass der Rissbildungsprozess neben der Rissöffnung durch eine gleichzeitig stattfindende gegenseitige Verschiebung der Rissufer charakterisiert wird. Die Höhe des durch Rissreibung erzeugten Traganteils normal zur Bauteilachse ist überdies abhängig von der mittleren Neigung der Risse. Je flacher der Risswinkel in Bezug zur Bauteillängsachse, desto geringer ist der zusätzliche Traganteil V_{cc} infolge Rissreibung im Modell nach [17].

In den Bildern 1 und 2 sind die Biegeschubrissbildung im Steg eines Balkens unter kombinierter Querkraft-Biegebeanspruchung und die Schubzugrissbildung im Druckgurt eines Plattenbalkens schematisch dargestellt. Während die Modellvorstellung einer gegenseitigen Verschiebung der Rissufer beim Balken mit Biegeschubrissbildung hier gut nachvollzogen werden kann, gelingt die Übertragung des Rissreibungsmodells auf den Druckgurtanschluss aufgrund der zu erwartenden Risskinematik nicht ohne Weiteres. Die Ausdehnung der Schubzugrisse in Druckgurten ist innerhalb der Druckplatte begrenzt. Die gegenseitigen Verschiebungen der Rissufer müssen zu den Rissenden hin daher gegen Null gehen (siehe Bild 2). In der Folge sind auch keine signifikanten Gleitungen auf der freien Risslänge zu erwarten [14]. Darüber hinaus nimmt der theoretische Rissreibungskraftanteil in Tragrichtung der Gurtanschlussbewehrung bei mit zunehmender Längsdruckspannung flacher werdender Rissneigung zusätzlich ab.

2.3 Schlussfolgerungen

Auf Basis der vergleichenden analytischen Betrachtungen zum Tragverhalten von Gurt- und Stegquerschnitten können erste Erkenntnisse abgeleitet werden:

Der derzeit in Eurocode 2 bzw. dem Nationalen Anhang in Deutschland normativ geregelte Ansatz zur Berücksichtigung der Rissneigung führt bei der Übertragung auf die unter hohen Längsdruckspannungen stehenden Bereiche von Gurtquerschnitten im Allgemeinen zu konservativen Ergebnissen. Durch die gleichzeitig teilweise sehr flachen Risswinkel und die im Bauteil begrenzten Risslängen mit erkennbarem Rissanfang und Rissende kann davon ausgegangen werden, dass von einer etwaigen Rissreibung keine nennenswerte Steigerung der Tragfähigkeit im GZT ausgeht.

Darüber hinaus hat die im Vergleich zur Schubspannung stärker anwachsende Längsdruckspannung im Gurt einen positiven Einfluss auf die Höhe der übertragbaren Beanspruchungen innerhalb des noch ungerissenen Gurtquerschnitts. Dies erklärt auch die mit größer werdender Längsdruckspannung zunehmende Lokalisierung der Risse im stegnahen Bereich, in dem gleichzeitig die betragsmäßig größten Schubspannungen übertragen werden (siehe Bild 2).

Die Übertragung des Fachwerkmodells mit Rissreibung bei Querkraft im Steg auf Druckgurtquerschnitte ist zum einen durch die fehlende Berücksichtigung von Längs- und Schubspannungen als korrespondierende Größen und zum anderen aufgrund der beschriebenen vom Stegquerschnitt abweichenden Risskinematik nicht mechanisch begründet. Die mit diesem Modell erzielten Bemessungsergebnisse liegen jedoch immer auf der sicheren Seite. Dies führt bei Neubauten zu einer robusten Auslegung ist aber bei der Nachrechnung bestehender Bauwerke nicht zielführend.

3 Simulationsrechnungen

Die Nachrechnung von gut dokumentierten Versuchen zum Tragverhalten der Gurte gegliederter Querschnitte dient der Kalibrierung und Verifizierung der verwendeten Rechenmodelle.

3.1 Elementansatz und Rissverhalten

Die Systemmodellierungen erfolgen mit Schalenelementen im Rahmen einer experimentellen Version des Programmsystems SOFiSTiK. Die Elemente werden hierbei in mehrere Schichten, sogenannte Layer, über die Elementdicke unterteilt. Beweh-

rungelemente aus Betonstahl werden in verschmierter Form innerhalb einzelner Layer berücksichtigt. Die Berechnung der Elementschnittgrößen erfolgt durch Integration der Layerspannungen, die in allen Elementschichten einzeln ermittelt werden [20].

Die Rissbildung wird im verwendeten Materialmodell in verschmierter Form berücksichtigt. Hierbei handelt es sich um ein sogenanntes „fixed crack model“, ein Modell mit fixierten Rissrichtungen. Eine Überschreitung der Betonzugfestigkeit im Integrationspunkt des Elements führt zur Rissentstehung. Die Rissrichtung wird normal zur Hauptzugspannungsrichtung angenommen und im Anschluss für die weitere Berechnung fixiert. Durch die fehlende Berücksichtigung eines „shear retention factors“ im verwendeten Modell, ist eine Übertragung von Schubspannungen in der Rissebene des Betons nicht möglich. Aufgrund des in Kapitel 2.2.2 beschriebenen geringen zu erwartenden Einflusses der Rissreibung im Druckgurt, ist ein nennenswerter negativer Einfluss durch die Verwendung des Rissmodells nicht zu erwarten.

Die Festlegung der Rissrichtung im Rechenmodell erfolgt immer nach dem letzten Iterationsschritt. Bis dahin ist eine Drehung der Hauptspannungsrichtungen ungehindert möglich. Daher kann durch die unmittelbare nichtlineare Berechnung einer vorgegebenen Laststufe ohne schrittweise Laststeigerung ein dem Modell mit rotierenden Rissen ähnliches Verhalten erzeugt werden [14]. Die hier beschriebenen Simulationsrechnungen wurden sowohl unter Berücksichtigung einer schrittweisen Laststeigerung als auch durch direkte Berechnung des untersuchten Lastfalls durchgeführt. Hierbei können vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf die rechnerisch erreichbare Bruchlast und die Rissbilder festgestellt

werden. Auch hieraus kann gefolgert werden, dass Auswirkungen einer möglichen Rissreibung im vorliegenden Fall als eher gering einzuschätzen sind.

3.2 Versuchsnachrechnungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuchsnachrechnungen mittels nichtlinearer FEM den dokumentierten Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen gegenübergestellt. Eine ausführliche Beschreibung der Versuche kann den Originalquellen [3, 1] entnommen werden. Für eine umfassende Darstellung der Strukturmodellierung und der Systemkalibrierung wird auf [14] verwiesen.

Bei den nachgerechneten Trägern handelt es sich um Plattenbalkenquerschnitte, deren System und Verteilung der Gurtanschlussbewehrung in Bild 4 dargestellt sind.

Die Belastung der Träger erfolgte seinerzeit zunächst kraft- und später in den höheren Beanspruchungsbereichen weggeregelt bis zum Bruch. Neben dem Last-Verformungsverhalten der Träger werden die Dehnungen der Gurtanschlussbewehrung, die Betonstauchungen, die Versagenslast und Versagensart sowie die Rissbilder mit den Ergebnissen der numerischen Simulation verglichen.

Der Vergleich zwischen Rechenwerten und dokumentierten Versuchswerten ist exemplarisch für einen Versuchsträger in den Bildern 5 und 6 dargestellt.

In Bild 5 sind die Rechenwerte der Dehnungen der Gurtanschlussbewehrung im Gurtanschnitt sowie die Rechenwerte der Betonstauchungen in verschiedenen Auswerteschnitten der Gurtplatte im

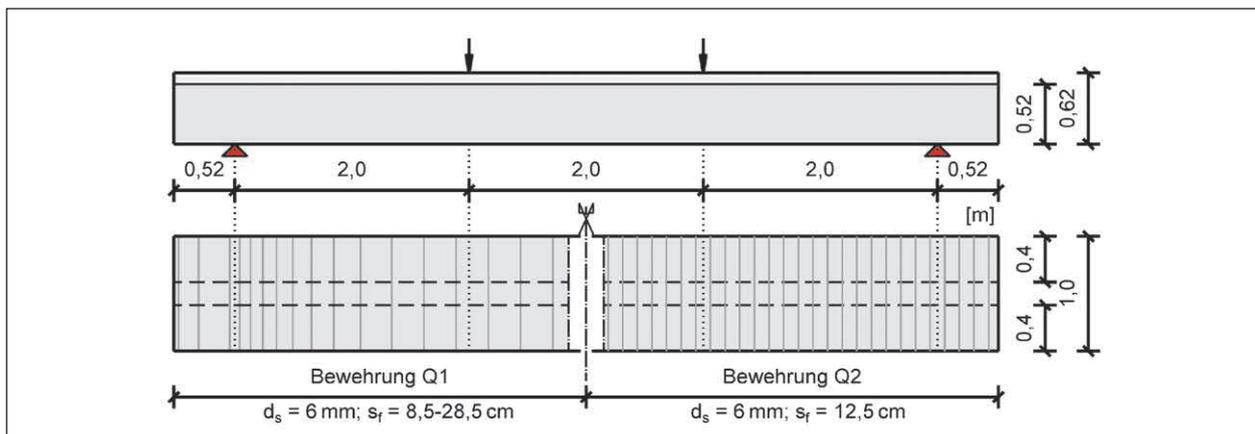


Bild 4: System und Gurtanschlussbewehrung der Versuchsträger Q1 und Q2 nach [3] aus [14]

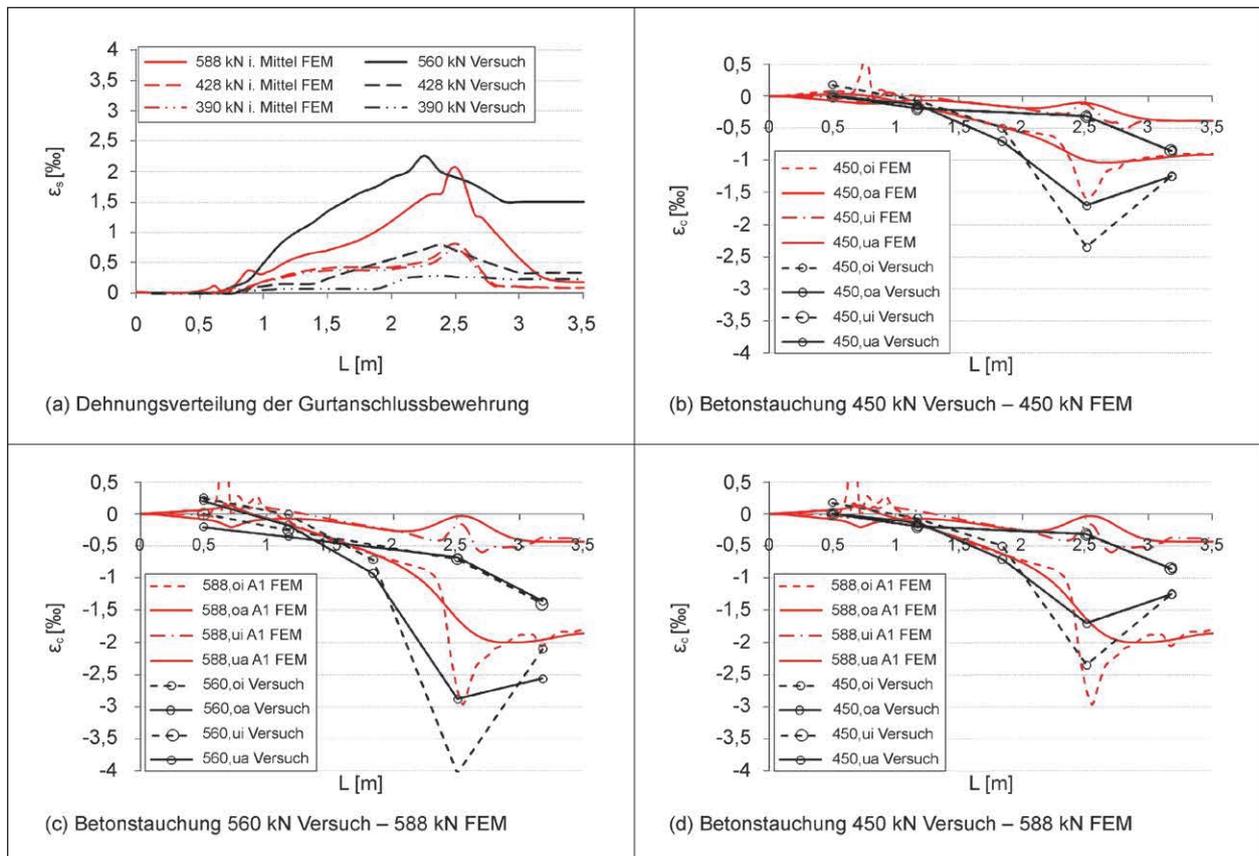


Bild 5: Dehnungen der Gurtanschlussbewehrung und Stauchungen der Gurtplatte des Balkens Q2 in Versuch und Simulation aus [14]

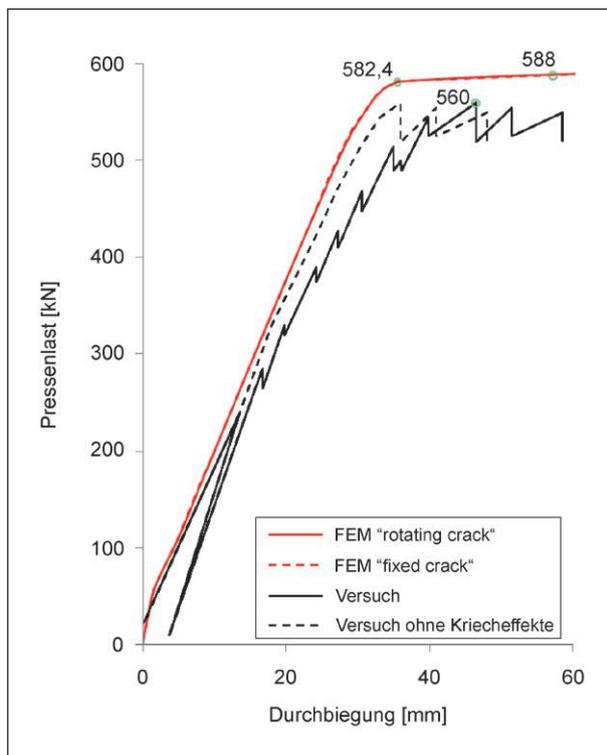


Bild 6: Last-Verformungsverhalten des Balkens Q2 in der Simulation im Vergleich zu Träger Q4 im Versuch aus [14]

Vergleich zu den Versuchsergebnissen dargestellt (o/u = Oberseite/Unterseite Gurt; i/a = Gurtanschnitt/Kragarmspitze). Es ist zu erkennen, dass die Bewehrungsdehnungen qualitativ und quantitativ in guter bis sehr guter Näherung durch die numerische Simulation abgebildet werden. Die Betonstauchungen in unterschiedlichen Betonrandfasern werden qualitativ sehr gut durch das Rechenmodell erfasst. Insbesondere im Lasteinleitungsbereich wurden im Versuch jedoch betragsmäßig größere Stauchungen dokumentiert.

Ein Vergleich der dokumentierten Last-Verformungskurve mit den Ergebnissen der Simulation zeigt ebenfalls gute Übereinstimmungen. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde die Belastung in 18 gleichartigen Stufen aufgebracht. Nach jeder aufgetragenen Laststufe wurden die Verformungen für etwa 30 bis 60 Minuten konstant gehalten, um Messungen am Balken durchzuführen [3]. Infolge von Kriech- bzw. Relaxationseffekten kam es in diesem Zeitraum zu einem Abfall der Pressenlast. Da dieser Effekt in der Versuchsnachrechnung nicht berücksichtigt wird, erscheint das Verformungsverhalten in der Simulation zunächst steifer

als im Realversuch. Um die Ergebnisse von Experiment und Simulation besser miteinander vergleichen zu können, wurde der auf theoretischem Weg ermittelte hypothetische Verlauf der Last-Verformungskurve ohne die Zusatzverformungen infolge Kriechens zusätzlich in Bild 6 eingetragen. Hier ist zu erkennen, dass die Steifigkeit des Balkens im gerissenen Zustand II sehr gut durch das numerische Modell abgebildet wird. Sowohl im Experiment [3] als auch in der Simulation [14] kann das Versagen des hier beschriebenen Balkenversuchs auf ein Biegeversagen zurückgeführt werden. Ein Versagen des Gurtanschlusses konnte in [3] nur für einen Träger unter reiner Längsschubbeanspruchung des Gurtanschlusses erreicht werden.

Alle für die FE-Berechnungen relevanten Eingangsparameter sowie Angaben zu verwendeten Material- bzw. Rissmodellen sind ausführlich in [14] beschrieben.

3.3 Berücksichtigung brückenbau-relevanter Abmessungen

3.3.1 FE-Modell für Hohlkastenbrücken

Mit der landesspezifischen Empfehlung für eine vereinfachte Wahl der Druckstrebenneigung wird in Deutschland mit $\cot \theta = 1,2$ ein deutlich konservativerer Wert vorgeschlagen als die Auswertung der Ergebnisse vorhandener experimenteller Untersuchungen (bspw. [1, 2, 3, 4, 5, 18]) erwarten lassen würde.

Die möglichen Abmessungen von Laborversuchen sind infolge der vorhandenen Platz- und Pressenkapazitäten im Allgemeinen begrenzt. Darüber hinaus erfolgt die Lasteinleitung im Regelfall in wenigen diskreten Punkten. Hierdurch ergeben sich weite Trägerbereiche, in denen die Bernoulli-Hypothese einer linearen Dehnungsverteilung über die Querschnittshöhe nicht zutrifft. In Bild 7 sind diese sogenannten Diskontinuitätsbereiche für den hier

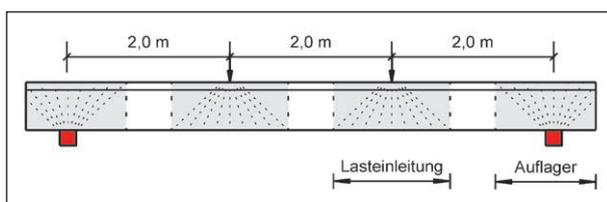


Bild 7: Versuchsträger von BADAWY und BACHMANN [3] mit Diskontinuitätsbereichen (grau) in Anlehnung an [19] aus [14]

nachgerechneten Versuchsträger von BADAWY und BACHMANN aus [3] exemplarisch dargestellt.

Durch die in weiten Teilen des Trägers vorhandenen Störbereiche sind gesicherte Aussagen zu einer möglichen Entwicklung der Druckstrebenneigung im Gurtanschnitt infolge des sich stetig verändernden Längsspannungszustands nicht möglich [14].

Betonbrücken weisen im Allgemeinen einen deutlich höheren Schlankheitsgrad als die betrachteten Laborversuche auf, sodass die Bernoulli-Hypothese in großen Bereichen des Längstragsystems gültig ist. Mithilfe der FE-Methode sind Untersuchungen zum Modellverhalten unter Berücksichtigung der für den Brückenbau relevanten Strukturabmessungen möglich. Hierzu erfolgt die Übertragung des FE-Modells auf ein zweifeldriges Referenzsystem mit Hohlkastenquerschnitt und 50 m Feldlänge. Das System und die theoretischen Abmessungen der Diskontinuitätsbereiche sind in Bild 8 dargestellt.

In der numerischen Simulation werden zwei Belastungsarten untersucht. In Anlehnung an die experimentellen Untersuchungen werden Einzellasten in den Feldern berücksichtigt. Darüber hinaus erfolgen die Simulationsrechnungen zusätzlich mit Gleichlasten, die für Massivbrücken bei der üblichen Bemessungspraxis in der Regel den maßgebenden Einwirkungsanteil darstellen.

3.3.2 Rissverhalten und Spannungsverteilung

Unabhängig von der untersuchten Belastungsart (Einzellast bzw. Gleichlast) und der Höhe und Art der rechnerisch berücksichtigten Vorspannung (es werden sowohl zentrische als auch exzentrische Spanngliedarrangierungen mit einer mittleren zentrischen Vorspannung zwischen $-2,5$ und $-5,0$ MPa berücksichtigt) erfolgt der Rissbildungsprozess in der Bodenplatte des Hohlkastenquerschnitts ausgehend von ersten Biegezugrissen im Feld. Mit Steigerung der Belastung kommt es zu einer Ausweitung der gerissenen Bereiche in Bauwerkslängsrichtung. Mit fortschreitender Ausdehnung der gerissenen Bereiche kann bereits im Zuggurt eine immer flacher werdende Rissneigung im Anschnitt vom Gurt an den Steg im Rechenmodell festgestellt werden. Dieses Modellverhalten kann auf das sich mit zunehmendem Rissfortschritt allmählich einstellende Versatzmaß in Gurtscheibenebene zurückgeführt werden [14] und deckt sich mit Versuchsbeobachtungen von BACCHETTA und BACHMANN [2] sowie SCHIEFERSTEIN [18].

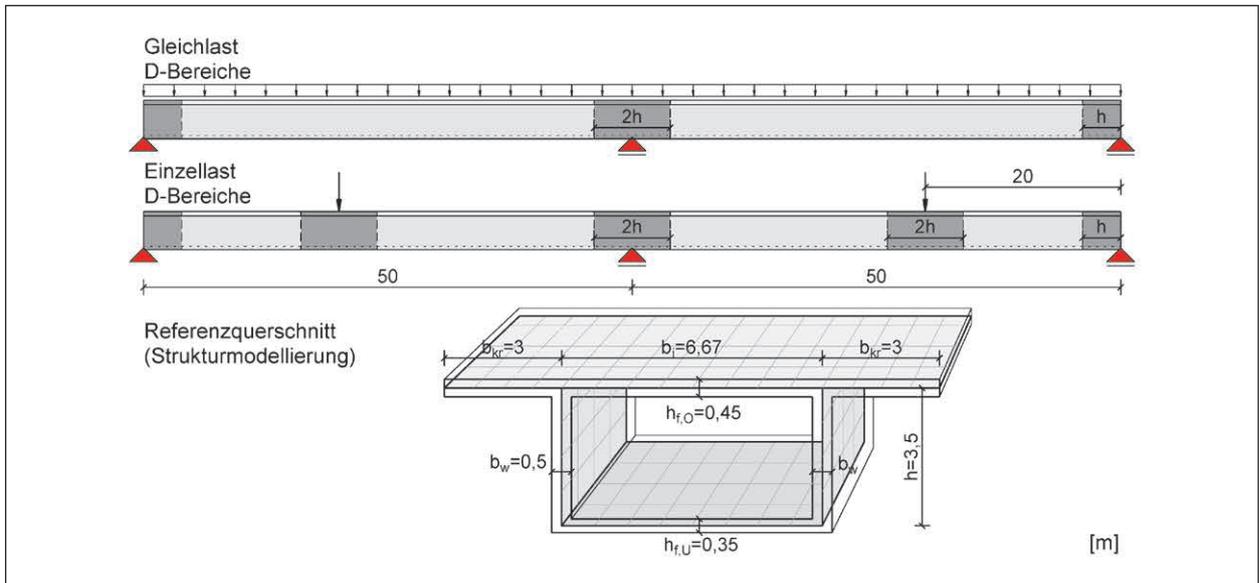


Bild 8: Hohlkasten Referenzsystem mit Querschnittsabmessungen, Belastung, D-Bereichen und schematischer Darstellung der Strukturmodellierung aus [14]

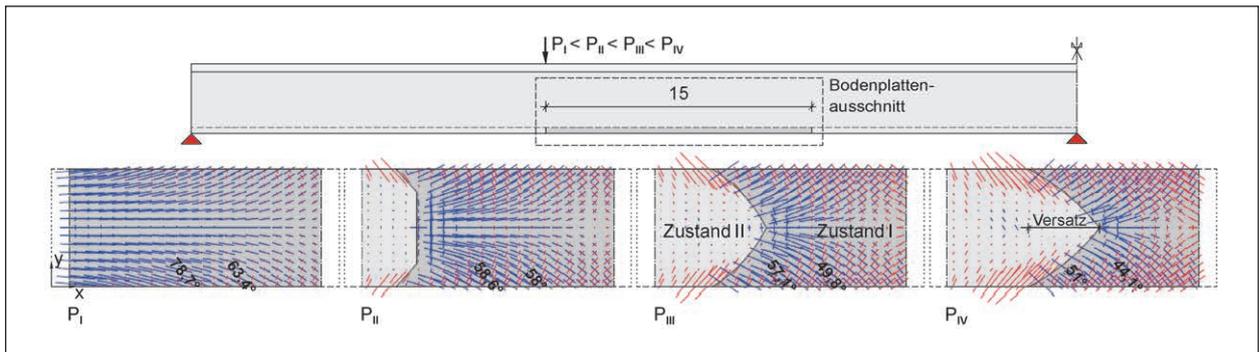


Bild 9: Hauptspannungs- und schematische Rissentwicklung innerhalb eines Bodenplatten-ausschnitts im FE-Modell aus [14]

In den gezogenen Bereichen der Bodenplatte kommt es zunächst zur Biegerissbildung am Ort des maximalen Feldmoments. Diese ersten Risse verlaufen normal zur Bauwerkslängsachse. Durch die allmähliche Entstehung eines Versatzmaßes wird die Übertragung von Schubkräften im Modell gewährleistet. Hierbei kommt es zu einer Änderung der Richtung der Hauptspannungen im Zuggurt, die mit fortschreitender Rissbildung bereits in den noch ungerissenen Bereichen der Bodenplatte beobachtet werden kann. Die Entwicklung der Hauptspannungen mit zunehmender Rissbildung im Modell ist schematisch in Bild 9 dargestellt.

Die Richtung der rechnerischen Hauptdruckspannungen im ungerissenen Zustand I bzw. im gerissenen Zustand II ist für das Referenzsystem mit Einzel- und Gleichlast in den Bildern 10 und 11 für verschiedene Belastungsgrößen dargestellt. Im Bereich der Zuggurtanschlüsse sind verhältnismäßig

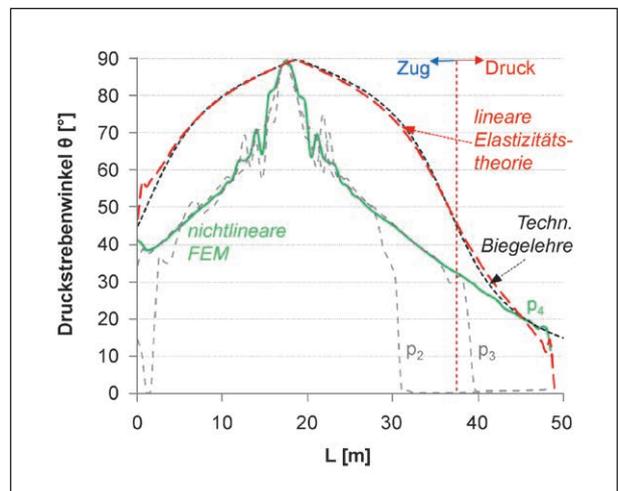


Bild 10: Rechnerische Druckstrebenwinkel im Modell unter Gleichlast p_i ($p_2 < p_3 < p_4$) aus [14]

große Rotationen der Hauptspannungsrichtungen im Zuge des allmählichen Übergangs vom ungeris-

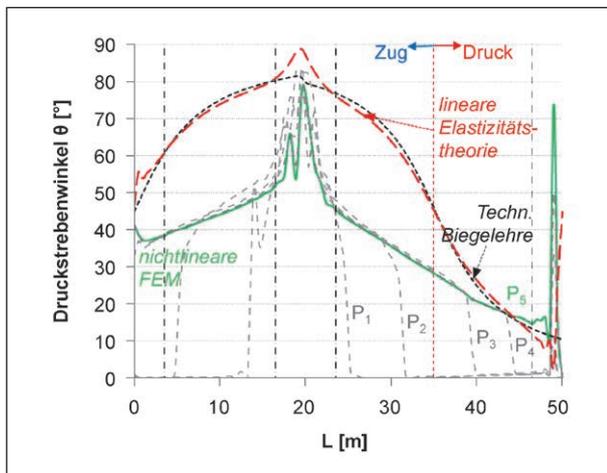


Bild 11: Rechnerische Druckstrebenwinkel im Modell unter Einzellast P_i ($P_1 < P_2 < P_3 < P_4$) aus [14]

senen Zustand I in den gerissenen Zustand II erforderlich, um die Übertragung von Scheibenschubbeanspruchungen zwischen Steg und Gurtplatte im gerissenen Zustand sicherzustellen. Dagegen sind im Rahmen der Modellrechnungen keine nennenswerten Rotationen der Hauptdruckspannungsrichtung in den unter hohen Längsdruckspannungen stehenden Bereichen der Gurtscheibe zu beobachten. Im Übergangsbereich vom Zug- auf den Druckgurt stellen sich im gerissenen Zustand II bei allen durchgeführten Modellrechnungen Druckstrebenwinkel $< 45^\circ$ ein (siehe Bilder 10, 11 und 15). Dies kann mit dem bereits beschriebenen Versatzmaß innerhalb der Gurtscheibe erklärt werden (siehe Bild 12 (b-d), S. 17).

Neben der Entwicklung der Riss- bzw. Druckstrebenneigung im Modell ist in den Bildern 10 und 11 auch der positive Einfluss der hohen Längsdruckspannungen im Biegedruckbereich zu erkennen. Zum einen werden die Neigungswinkel mit zunehmender Längsdruckkraft immer flacher und zum anderen erfolgt die Rissbildung erst auf einem höheren Lastniveau als in den übrigen Bereichen des Gurtes.

In Anlehnung an die Hauptspannungstrajektorien wird ein Stabwerkmodell entwickelt, durch welches die Beanspruchungen in Beton und Gurtanschlussbewehrung wirklichkeitsnah ermittelt werden können. In Bild 12(d) ist das Stabwerkmodell in vereinfachter Form schematisch dargestellt. Insbesondere im Zuggurtbereich wird das Stabwerk innerhalb der Gurtscheibe tatsächlich von der Verteilung der ausgelagerten Biegezugbewehrung beeinflusst.

3.4 Fazit

Mit der nichtlinearen FE-Methode ist es möglich, die Ergebnisse experimenteller Studien zum Tragverhalten von Druckgurtanschlüssen mit guter bis sehr guter Übereinstimmung nachzurechnen. Dabei ist die Übereinstimmung mit integralen Zustandsgrößen, wie beispielsweise das Last-Verformungsverhalten, naturgemäß besser als mit lokalen Zustandsgrößen, wie z. B. gemessenen Dehnungen.

Durch die Übertragung des Modells auf Systeme mit für den Brückenbau relevanten Abmessungen kann darüber hinaus die Entwicklung des Tragverhaltens in weitgehend ungestörten Bereichen des Systems untersucht werden. Ein deutlicher Einfluss des vorhandenen Längsspannungszustandes auf den Neigungswinkel der Betondruckstrebe im gerissenen Zustand II und auf die zur Rissbildung führenden Belastung können festgestellt werden (siehe Bild 12 (c)). Die hohen Längsdruckspannungen im Bereich des Biegedruckgurtes haben sehr flache Risswinkel zur Folge, die zu einer deutlichen Entlastung der Gurtanschlussbewehrung führen.

Darüber hinaus weist der noch ungerissene Gurtquerschnitt im Bereich der Biegedruckzone des Gesamtquerschnitts unter Ausnutzung einer geringen Betonzugfestigkeit bereits einen hohen Tragwiderstand auf.

Die Ergebnisse der nichtlinearen numerischen Systemanalysen werden sowohl durch die analytischen Voruntersuchungen als auch durch den Vergleich mit den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen gestützt [14].

Insbesondere für die Nachrechnung bestehender Konstruktionen mit geringen Anschlussbewehrungsgraden kann die Berücksichtigung dieser Zusammenhänge zu einer realistischeren Einschätzung des tatsächlichen Tragwiderstands führen.

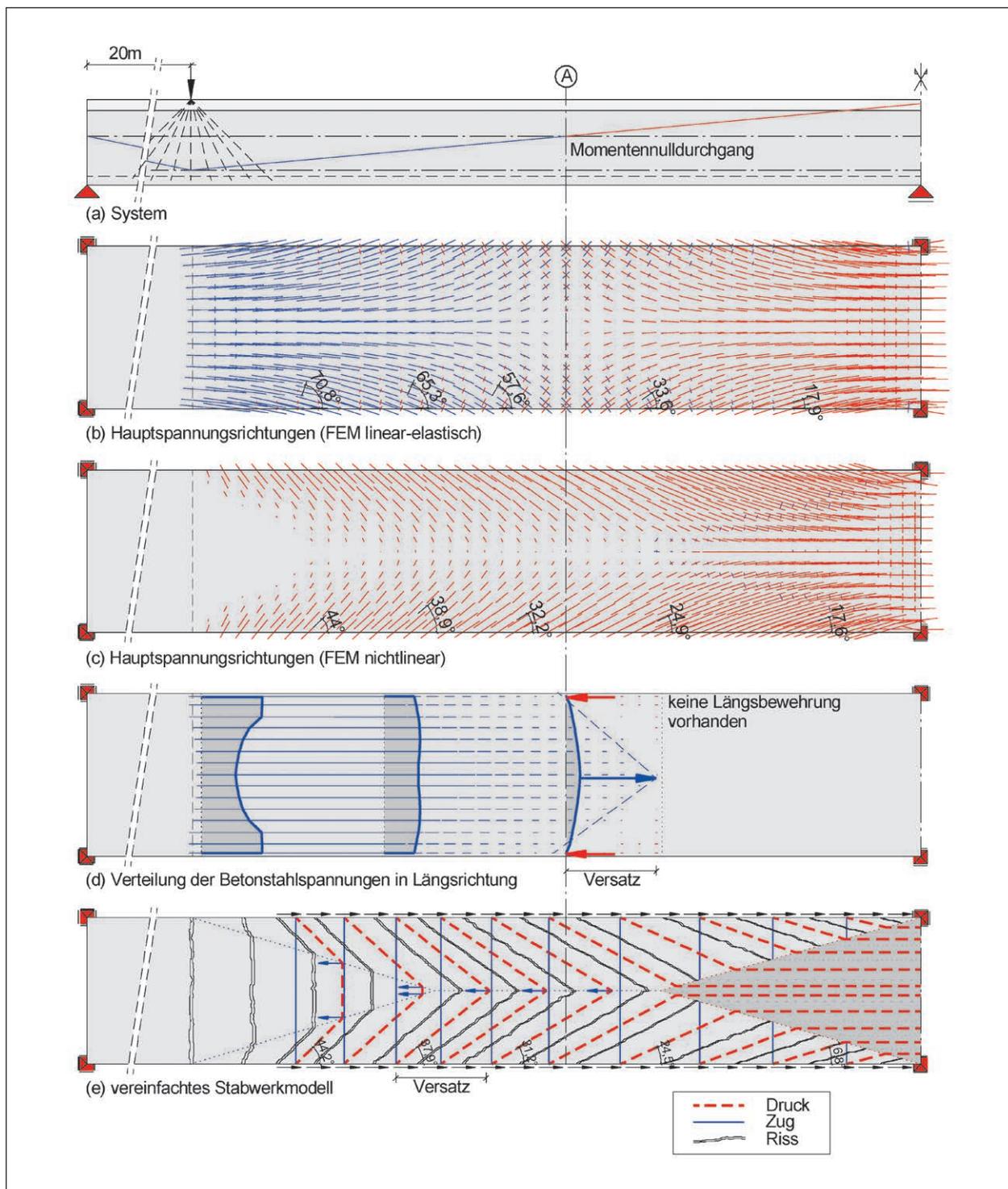


Bild 12: Entwicklung eines Stabwerkmodells für die Bodenplatte nach Abschluss der Rissentwicklung aus [14]

4 Vorschläge für die Bemessung

4.1 Tragfähigkeit ungerissener Gurtquerschnitte ohne rechnerisch erforderliche Anschlussbewehrung

Bei der Planung neuer Spannbetonbrücken erfolgt der Nachweis einer ausreichenden Tragfähigkeit im Allgemeinen unter der Annahme von im GZT gerissenen Querschnitten. Diese Vorgehensweise ist im Hinblick auf eine möglichst robuste Tragwerksauslegung auch sinnvoll und richtig. Für die Beurteilung der Tragfähigkeit bestehender Brückenbauwerke, die vielfach bereits 40 bis 60 Jahre unter Verkehr sind und bis heute keine Schubrissbildung in den Druckgurtbereichen aufweisen, wäre eine rechnerische Berücksichtigung des Tragwiderstands des Druckgurtes im ungerissenen Zustand I jedoch wünschenswert [10].

Mit der Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie [15, 16] wird erstmals seit Einführung der DIN Fachberichte im Jahr 2003 wieder ein Nachweisformat unter begrenzter Ausnutzung der Betonzugfestigkeit zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit schwach bewehrter Stegquerschnitte von Spannbetonbrücken für die Nachrechnung verfügbar gemacht. Für die Bemessung des Gurtanschlusses wird bereits mit der für den Neubau von Betonbrücken verbindlich anzuwendenden DIN EN 1992-2 (/NA) ein Nachweisformat unter Berücksichtigung begrenzter Betonzugspannungen zur Verfügung gestellt. Mit diesem werden jedoch lediglich die vorhandenen Schubspannungen in Abhängigkeit von der Betonzugfestigkeit begrenzt. Der positive Einfluss des gleichzeitig wirksamen Längsdruckspannungszustandes bleibt unberücksichtigt.

Das nachfolgend für die Bemessung von Druckgurten vorgeschlagene Nachweisformat ist an das bereits bestehende Konzept zur Tragfähigkeitsbewertung von Stegquerschnitten der ersten Ergänzung zur Nachrechnungsrichtlinie [16] angelehnt, um die praktische Anwendung zu erleichtern. Der Anwendungsbereich ist ausschließlich auf Druckgurtbereiche beschränkt, die keine Rissbildung aufweisen.

Es ist nachzuweisen, dass die rechnerischen Hauptzugspannungen im GZT in der Mittelfläche Druckgurtscheiben im Anschnitt zum Steg (GA) die Bedingung gemäß (4.1) erfüllen.

$$\sigma_{I,GA,Ed} \leq k_1 \cdot f_{ctd} = k_1 \cdot \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \quad (4.1)$$

mit

$$k_1 = 0,8$$

$$\alpha_{ct} = 0,85$$

Die Faktoren α_{ct} und k_1 dienen der Erfassung von Langzeiteffekten und ungünstigen Auswirkungen etwaiger lokaler Spannungsspitzen, die durch das Rechenmodell zur Ermittlung der Beanspruchungen nicht erfasst werden können. Bild 13 zeigt einen Vergleich des Bemessungsvorschlags mit den Erstrisslasten experimenteller Untersuchungen sowie von Modellrechnungen im Rahmen einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse im Druckgurt des in Kapitel 3.3 vorgestellten Referenzsystems. Bei den experimentellen Untersuchungen handelt es sich um Scheibenversuche aus der Literatur. Genauere Informationen zur Ermittlung der Versuchspunkte in Bild 13 können [14] entnommen werden. Zum Vergleich ist auch der derzeitige Ansatz der DIN EN 1992-2 in Bild 13 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass dieser mit größer werdender Längsdruckspannung zunehmend sehr konservative Ergebnisse zur Folge hat.

Für den Nachweis der Druckgurtscheibe als ungerissener Betonquerschnitt werden hier zwei Fälle bei der Ermittlung der Beanspruchungen unterschieden. Im Fall 1 befindet sich der Gesamtquerschnitt im untersuchten Abschnitt des Längssystems im ungerissenen Zustand I. Hiervon kann ausgegangen werden, wenn die Randspannungen auf der Biegezugseite die mittlere Zugfestigkeit des Betons f_{ctm} im GZT nicht überschreiten. Andernfalls gilt Fall 2, hier ist die Biegerissbildung im Gesamtquerschnitt bei der Ermittlung der Beanspruchungen in

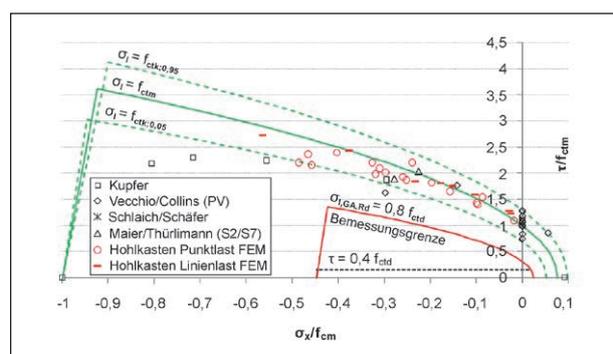


Bild 13: Vergleich numerisch und experimentell ermittelter Erstrisslasten mit dem Bemessungsvorschlag nach (4.1) aus [14]

der Druckgurtschiebe und der Schubspannungen im Anschnitt zu berücksichtigen.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Nachweisvorschlages ist, dass die Druckgurte tatsächlich keine Risse aufweisen. Bereiche, in denen Risse nachträglich verpresst wurden gelten in diesem Zusammenhang als gerissen. Darüber hinaus ist das Nachweisformat in direkten Wirkungsbereichen von Spanngliedverankerungen (bspw. bei Spanngliedverankerung innerhalb der Gurtscheibe) nicht anzuwenden.

Die Nachweisführung darf in der Mittelfläche des Gurtquerschnitts erfolgen (ohne Überlagerung mit etwaigen Querbiegemomenten). Jedoch sind die Biegerandzugspannungen infolge Querbiegung auf f_{ctd} zu begrenzen. Hierdurch soll auch unter ungünstigen Bedingungen sichergestellt werden, dass das Gesamtbauteil im ungerissenen Zustand I verbleibt.

4.2 Tragfähigkeit gerissener Gurtquerschnitte mit rechnerisch erforderlicher Anschlussbewehrung

Für den Nachweis des schubfesten Anschlusses der Druckgurte gegliederter Querschnitte an die Stege wird ein Modell auf Grundlage des in Bild 12 dargestellten Stabwerkmodells vorgeschlagen. Der Neigungswinkel der Betondruckstrebe wird hierbei ohne Ansatz einer zusätzlichen Rissreibungskomponente ermittelt.

Abweichend von den Regeln der DIN EN 1992 bzw. des DIN Fachberichts 102 wird auf Basis der umfangreichen durchgeführten Modellrechnungen mit Variation der Parameter vorgeschlagen, die minimale Neigung der Betondruckstrebe θ_f im Abstand h vom Zwischenaufleger entsprechend der Neigung der Hauptdruckspannungstrajektorien im Gurtanschnitt festzulegen. Vereinfachend kann die Ermittlung des Winkels unter Annahme eines ungerissenen Gurtquerschnitts für den ebenen Spannungszustand (σ , τ) gemäß (4.7) erfolgen. Bei der Berechnung sind die Querschnittswerte unter Einbeziehung der mitwirkenden Gurtbreiten entsprechend DIN EN 1992-1/NA zu berücksichtigen. Über die Länge des Druckgurtanschnittes kann eine linear veränderliche Druckstrebenneigung bis zu $\theta_f \leq 35^\circ$ im Momentennullpunkt in Rechnung gestellt werden (siehe Bild 14).

Im Bereich des Biegemomentennulldurchgangs unter Berücksichtigung des Gesamtmoments inklusive dem Anteil aus Vorspannung erfolgt die Ermittlung des Neigungswinkels der Betondruckstrebe in Anlehnung an DIN EN 1992-2/NA. Dieser Bereich stellt im Hinblick auf die Spannungsverhältnisse im Gurtanschnitt einen Sonderbereich dar. Während in den unter hohen Längsspannungen stehenden Gurtbereichen die Längsspannungen mit den Schubspannungen korrespondieren (eine Steigerung der Schubspannungen im Gurtanschnitt führt auch zu einer Steigerung der Längsspannungen), führt eine Erhöhung der Schubbeanspruchung im Bereich des Momentennulldurchgangs lediglich zu einer Vergrößerung Längskraftänderung. Die absolute Längskraft im Momentennulldurchgang entspricht jedoch immer genau dem Normalkraftanteil aus Vorspannung. Da die Längsspannung in diesem Querschnitt konstant ist, kann der Schubbrisswinkel mit ausreichender Genauigkeit nach Gleichung (4.2) ermittelt werden (Bezugsnorm DIN EN 1992; Druckspannungen gehen in Gleichung (4.2) mit positivem Vorzeichen ein).

$$\cot \theta = \cot \beta = 1,2 + 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \geq 1,4 \quad (4.2)$$

Diese Vorgehensweise stellt eine Weiterentwicklung des in [14] beschriebenen Ansatzes dar und berücksichtigt die Beanspruchungssituation im Momentennulldurchgang für vorgespannte Querschnitte mit größerer Genauigkeit.

Mit den so ermittelten Winkeln sind die Nachweise der Tragfähigkeit der Gurtanschlussbewehrung nach (4.5) und der schiefen Betondruckstrebe nach (4.6) zu führen. Die Ermittlung der Beanspruchungen im Gurtanschnitt erfolgt unter Berücksichtigung der Auswirkungen der Rissbildung im Gesamtquerschnitt (Zustand II) nach (4.4). Für die Nachrechnung wird empfohlen, die Abschnittslängen Δx auf die Staffelung der Gurtanschlussbewehrung abzustimmen. Auch im Falle einer nicht gestaffelten Gurtanschlussbewehrung kann die Wahl kurzer Abschnittslängen Δx ggf. zu einer Optimierung der Nachrechnungsergebnisse führen.

Die Bezeichnungen in den Gleichungen (4.3) bis (4.7) entsprechen den Vorgaben der DIN EN 1992.

$$v_{Ed} \leq v_{Rd} \quad (4.3)$$

$$v_{Ed} = \Delta F_d / \Delta x \quad (4.4)$$

$$v_{Rd,sy} = a_s \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta \quad (4.5)$$

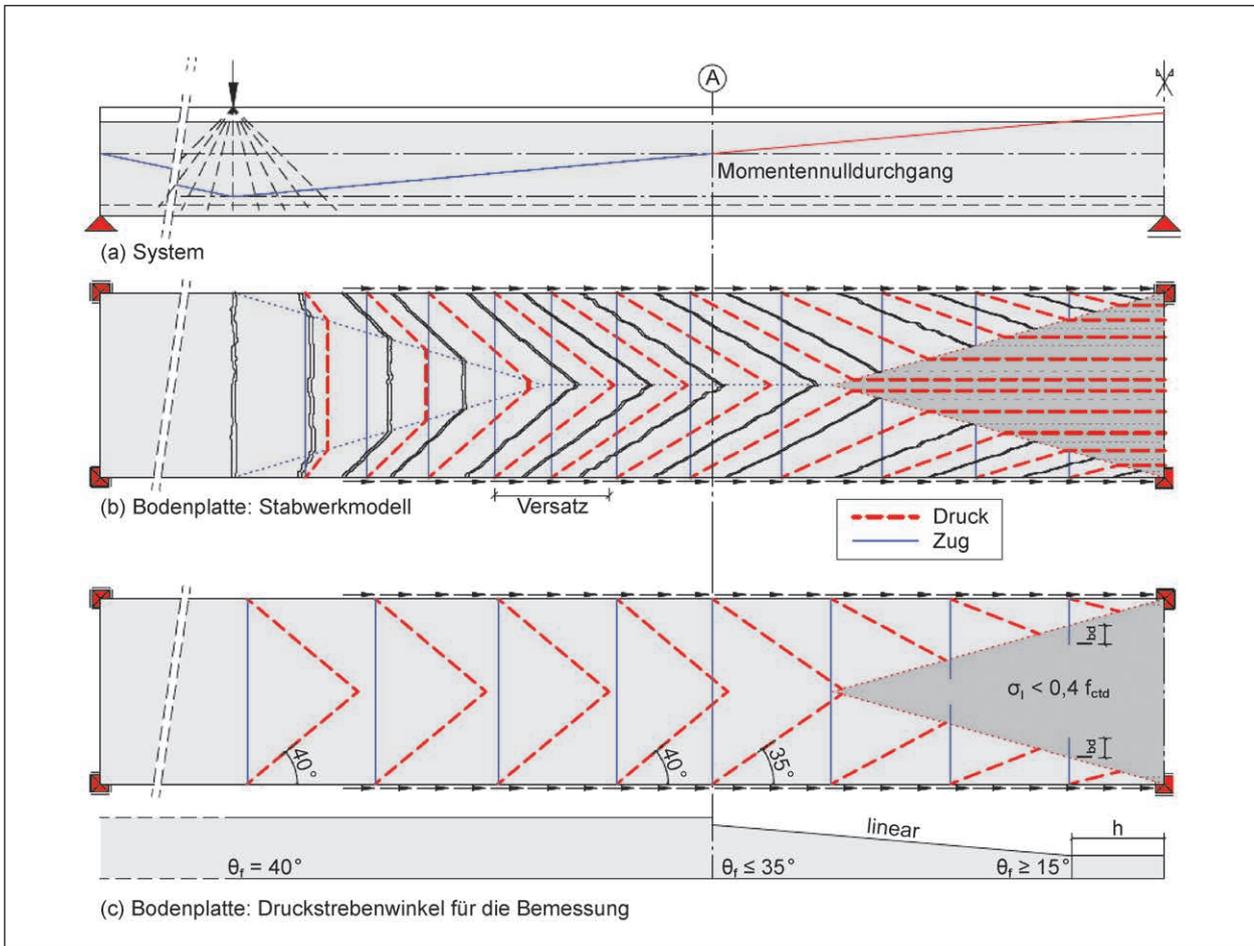


Bild 14: Vorschlag zur Ermittlung der Druckstrebenneigung und der Verankerungsbereiche der Gurtanschlussbewehrung in Anlehnung an [14]

$$v_{Rd,max} = h_f \cdot v \cdot f_{cd} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (4.6)$$

mit

$$15^\circ \leq \theta = 0,5 \cdot \arctan \left(\frac{-2\tau_{xy}}{\sigma_x} \right) \leq 35^\circ$$

$$1,4 \leq \cot \theta = \left| \frac{\frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}}{\tau_{xy}} \right| \leq 3,7 \quad (4.7)$$

In Bild 15 ist ein Vergleich der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise zur Ermittlung der Druckstrebenneigung mit den Ergebnissen von Simulationsrechnungen dargestellt. Für die Ergebnisse der Modellrechnungen wurden einzelne Parameter (Gurtplattendicke, Vorspannung, Anschlussbewehrungsgrad, Gurtplattenbreite etc.) ausgehend vom Referenzquerschnitt variiert. Die Auswertung erfolgt im Gurtanschnitt des ersten Feldes. Die Winkel im mittleren Feldbereich mit bis zu 90° kennzeichnen Bie-

gerisse. In diesen Bereichen sind nur sehr geringe Schubkräfte zu übertragen. Es ist zu erkennen, dass der Ansatz für alle durchgeführten Modellrechnungen zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen für die Bemessung des Druckgurtanschlusses führt. Im Bereich des Momentennulldurchgangs (Übergang vom Zug- auf den Druckgurt) wird mit dem vorgeschlagenen Druckstrebenwinkel ein konservativer Ansatz verfolgt. In der numerischen Simulation wurden in diesen Bereichen teilweise deutlich flachere Winkel ermittelt. Einen Einfluss auf den Winkel in den Modellrechnungen hatten die vorhandene Vorspannung und der Gurtanschlussbewehrungsgrad. Insbesondere die Auswirkungen des Anschlussbewehrungsgrads sind jedoch nicht ausreichend durch experimentelle Untersuchungen belegt. Hier besteht noch Optimierungspotenzial und Forschungsbedarf.

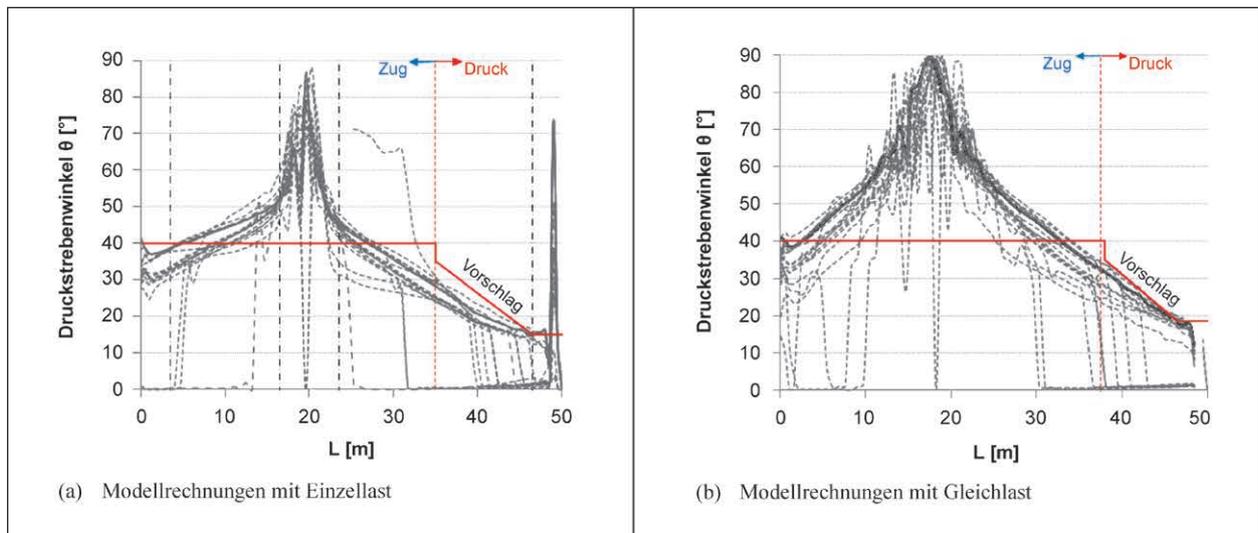


Bild 15: Qualitativer Vergleich des Vorschlags zur Ermittlung der Druckstrebenwinkel mit Ergebnissen nichtlinearer Simulationsrechnungen aus [14]

4.3 Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der erforderlichen Gurtfläche

Für ältere Betonbrücken mit sehr geringen Gurtanschlussbewehrungsgraden, für die der Nachweis des schubfesten Anschlusses mit den in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschriebenen Verfahren nicht nachgewiesen werden kann, darf eine reduzierte mitwirkende Druckgurtbreite rechnerisch in Ansatz gebracht werden. Dies setzt die Annahme voraus, dass die Systemtraglast nach Überschreitung der Fließgrenze der Bewehrung im Gurtanschnitt noch nicht erreicht ist. Hierbei wird der Umstand ausgenutzt, dass in Einzelfällen nur eine geringere Gurtbreite als die nach DIN EN 1992 Mitwirkende erforderlich ist, um eine ausreichende Tragfähigkeit im GZT nachzuweisen [14].

Die Nachweisführung mit reduzierter Gurtbreite sollte analog zum normalen Vorgehen durchgeführt werden. Zusätzlich ist die Ermittlung der Tragfähigkeit für Biegung mit Längskraft im GZT für die Querschnitte, für die eine verminderte mitwirkende Gurtbreite angesetzt wurde, durchzuführen.

Bei Anwendung dieses Nachweiskonzepts kann eine erhöhte und nicht auf das übliche Maß begrenzte Rissbildung im Gurtanschnitt nicht ausgeschlossen werden. Für den Nachweis der Rissbreitenbegrenzung im GZG ist weiterhin die mitwirkende Gurtbreite nach DIN EN 1992 anzusetzen, da die zur Spannungumlagerung erforderliche Rissbildung sonst nicht berücksichtigt würde. Es kann

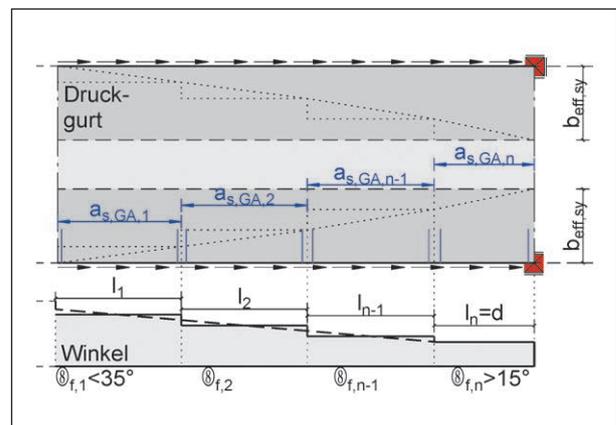


Bild 16: Reduzierte mitwirkende Gurtfläche in Abhängigkeit der vorhandenen Bewehrung

davon ausgegangen werden, dass der Nachweis der Rissbreitenbegrenzung im GZG aufgrund der genannten Randbedingungen maßgebenden Einfluss auf das Ergebnis der Nachrechnung hat und in vielen Fällen nicht erbracht werden kann. Daher wird dieses Verfahren ausschließlich zur Ermittlung der Resttragfähigkeit von Bauwerken im GZT mit einer vorläufig eingeschränkten Restnutzungsdauer vorgeschlagen (Nachweisklasse C gemäß Nachrechnungsrichtlinie).

Die durch die vorhandene Gurtanschlussbewehrung schubfest anschließbare Gurtfläche kann in Anlehnung an [14] theoretisch nach (4.8) abgeschätzt werden. In Abhängigkeit vorhandener Vouten kann die schubfest anschließbare Gurtbreite $b_{\text{eff},i,\text{sy}}$ so ermittelt werden (Bezeichnungen siehe Bild 16).

$$A_{c,eff} = \frac{\sum_{i=1}^n v_{Rd,sy,i} \cdot l_i}{f_{cd}} \quad (4.8)$$

mit

$$v_{Rd,sy,i} = a_{s,GA,i} \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta$$

Diese Vorgehensweise führt zu einer vom Momentennullpunkt an zunehmenden Gurtfläche. Hierbei wird ein Umlagerungspotenzial auf Querschnittsebene (vom druckbeanspruchten Gurt auf den noch nicht voll ausgelasteten Steg) sowie auf Systemebene (von hoch zu weniger hoch ausgelasteten Abschnitten der Gurtanschlusslänge) unterstellt.

Bei den hier durchgeführten Validierungsrechnungen an Beispielbauwerken zeigte sich, dass diese Vorgehensweise insbesondere bei Systemen mit gering ausgelasteten Biegedruckzonen zu ungünstige Ergebnisse zur Folge hat und das insbesondere bei veränderlichen Querschnitten keine nennenswerten Vereinfachungen für die Berechnung erzielt werden. Darüber hinaus ist die Annahme des hierfür erforderlichen Umlagerungspotenzials auf Systemebene noch nicht hinreichend durch Versuche abgesichert.

Daher wird empfohlen die erforderliche Reduktion der mitwirkenden Gurtbreite in erster Näherung über die Auslastung der Anschlussbewehrung abzuschätzen und eine gleichmäßige Reduktion der rechnerischen Gurtbreite zu unterstellen. Eine weitere Optimierung sollte dann iterativ erfolgen.

5 Nachrechnung bestehender Bauwerke

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Bemessungsvorschläge auf zwei bestehende Spannbetonhohlkastenbrücken exemplarisch angewendet. Es handelt sich in beiden Fällen um Bauwerke, bei welchen die Tragfähigkeit des Druckgurtanschlusses in aktuell durchgeführten Nachrechnungen nach Nachrechnungsrichtlinie [16] nicht mit ausreichender Sicherheit nachgewiesen werden konnte. Grundlage für die hier durchgeführten Berechnungen sind die zur Verfügung gestellten Schnittgrößen der vorliegenden Brückennachrechnungen.

Die linear elastische Beanspruchungsermittlung und die Nachweisführung erfolgen durchgängig an Ersatzsystemen mit Balkenelementen. Zusätzlich werden zur Plausibilisierung einzelner Ergebnisse

Brückentyp	Spannbetonhohlkasten
Anzahl Felder	2
Stützweiten	66,4 m – 46,0 m
Brückenklasse	BK 60 nach DIN 1072
Beton	B 450 nach DIN 1045 bis 1972 → C30/37
Betonstahl	BSt IIIb nach DIN 488 $f_{yk} = 420$ MPa
Vorspannung	SIGMA St 145/160 oval 40
Koppelfugen	Nein

Tab. 1: Angaben zur Konstruktion Bauwerk 1

und Annahmen Berechnungen an Faltwerksystemen mit Schalenelementen teils unter Berücksichtigung des materialphysikalisch nichtlinearen Verhaltens durchgeführt.

5.1 Bauwerk 1

Beim vorliegenden Bauwerk handelt es sich um eine vorgespannte Hohlkastenbrücke aus dem Jahr 1968. Die als Zweifeldträger errichtete Brücke mit einer Gesamtlänge von 112 m wurde mit girlandenförmig geführten Längsspanngliedern in den Stegen im nachträglichen Verbund vorgespannt.

Angaben zur Konstruktion sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich ausschließlich auf die schubfeste Verbindung zwischen Druckgurt (Bodenplatte) und Steg. Weitere Defizite und potenzielle Schwachstellen (bspw. der verwendete spannungsrissskorrosionsgefährdete Spannstahl, siehe Tabelle 1) sind nicht Gegenstand der hier durchgeführten Untersuchungen.

5.1.1 Querschnitte und Beanspruchung

Der Überbau ist über die Brückenlänge gevoutet ausgebildet. Die Konstruktionshöhe variiert dabei zwischen 1,6 m im Feld und 3,3 m im Bereich der Mittelstütze. Die für die Nachrechnung des Gurtanschlusses im Stützbereich maßgebenden Querschnittabmessungen sind in Bild 17 dargestellt.

Die Änderung der Querschnittabmessungen über die Bauwerkslänge erstreckt sich neben der Gesamthöhe des Hohlkastens auch auf eine Aufweitung der Stege und der Bodenplatte mit zunehmender Nähe zum Mittelaufleger. In Tabelle 2 sind die für die Bemessung des Gurtanschlusses maßgebenden Beanspruchungen zusammengestellt. Hier-

bei wurden das Biegemoment $M_{y,d}$ und die Querkraft $V_{z,d}$ jeweils ohne den statisch bestimmten Anteil aus Vorspannwirkung angegeben.

Die Ermittlung der Längskräfte in der Bodenplatte erfolgt durch Auswertung der Dehnungsebenen in den Querschnitten 1 bis 7 für die gegebenen Gesamtbeanspruchungen im GZT unter der ständigen und vorübergehenden Bemessungskombination (Tabelle 2). Hierbei werden die Spannungs-Deh-

nungs-Linien für die Querschnittsbemessung gemäß DIN EN 1992-2 verwendet. Der statisch bestimmte Anteil der Vorspannwirkung wird in Form einer Vordehnung des Spannstahls in den einzelnen Querschnitten berücksichtigt.

Die Auswertung der Längsbeanspruchungen der Bodenplatte ist in Tabelle 3 zusammengestellt. Die mitwirkende Druckgurtbreite wurde gemäß DIN EN 1992-2 ermittelt. Im vorliegenden Fall kann die ganze geometrische Druckgurtbreite als mitwirkend in Ansatz gebracht werden.

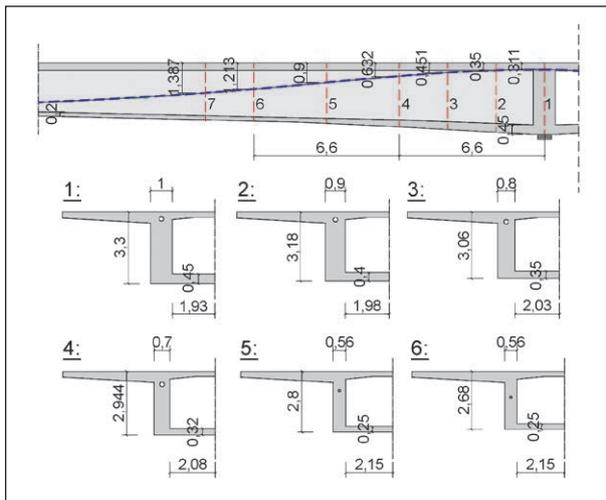


Bild 17: Querschnitte des Bauwerks 1 im Stützbereich und resultierende Höhenlage der Spannglieder

QS	$M_{y,d}$ [MNm]	$V_{z,d}$ [MN]	$M_{p,dir}$ [MNm]	$V_{p,dir}$ [MN]	N_p [MN]
1	-160	-17,30	44,63	0	-40,84
2	-124	-15,58	39,15	1,40	-40,82
3	-91,8	-13,87	30,53	2,65	-40,75
4	-63,2	-12,15	19,89	3,25	-40,71
5	-27,4	-9,58	3,02	3,56	-40,68
6	0	-7,00	-8,24	2,22	-28,50
7	13,5	-5,28	-12,85	1,65	-28,54

Tab. 2: Beanspruchungen in den Schnitten 1 bis 7

5.1.2 Nachweis des Druckgurtanschlusses

Der Nachweis der Tragfähigkeit des Druckgurtanschlusses erfolgt nachfolgend auf Basis des aktuell gültigen Nachweisformats der DIN EN 1992-2/NA sowie der in Kapitel 4 beschriebenen Nachweisformate. Insbesondere für das Nachweisformat, das die Tragfähigkeit des ungerissenen Betonquerschnitts zur Übertragung der Gurtanschlusskräfte in Anspruch nimmt, ist eine möglichst realitätsnahe Ermittlung der vorhandenen Spannungsverhältnisse im Gurtanschnitt von Bedeutung, da Umlagerun-

QS	$\epsilon_{BP,u}$ [‰]	$\epsilon_{BP,o}$ [‰]	$\sigma_{BP,u}$ [MPa]	$\sigma_{BP,o}$ [MPa]	N_{BP} [MN]
1	-1,922	-1,361	-16,97	-15,26	-28,39
2	-1,408	-1,090	-15,51	-13,48	-23,07
3	-1,071	-0,904	-13,33	-11,89	-17,95
4	-0,851	-0,755	-11,39	-10,41	-14,52
5	-0,61	-0,557	-8,79	-8,15	-9,11
6	-0,342	-0,324	-5,31	-5,06	-5,57
7	-0,204	-0,206	-3,29	-3,22	-3,55

BP: Bodenplatte
o, u: Oberer Rand, Unterer Rand

Tab. 3: Dehnungen, Spannungen und resultierende Kräfte im Druckgurt

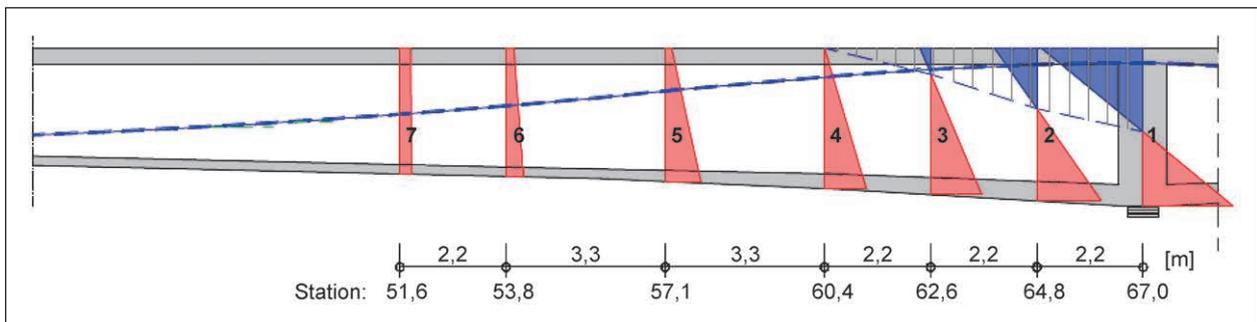


Bild 18: Dehnungsverteilung im GZT in verschiedenen Schnitten in Bauwerkslängsrichtung

gen wie sie in gerissenen Querschnitten möglich sind hier nicht unterstellt werden können. Daher werden hier auch unterschiedliche Arten der Beanspruchungsermittlung in den Gurtanschlussfugen vergleichend untersucht, um die möglichen Auswirkungen einer Biegerissbildung des Gesamtquerschnitts aus Längstragwirkung im Stützbereich (Rissbildung in Fahrbahnplatte und Steg) auf die Beanspruchungen im Druckgurt (Bodenplatte) zu untersuchen und geeignete Empfehlungen zur Ermittlung der Beanspruchungen abzuleiten.

5.1.3 Vereinfachtes Fachwerkmodell nach DIN EN 1992-2/NA

Für den Nachweis des schubfesten Anschlusses von Druckgurten an die Stege gegliederter Querschnitte darf gemäß DIN EN 1992-2/NA der Neigungswinkel der Betondruckstreben im Fachwerkmodell vereinfachend zu $\cot \theta = 1,20$ angenommen werden. In Bild 19 sind die maximal zulässigen Längen der Nachweisabschnitte sowie das vereinfachte Fachwerkmodell mit einwirkenden Längsdruckkräften schematisch dargestellt.

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Die Ermittlung der erforderlichen Gurtanschlussbewehrung erfolgt nach Gleichung (5.1):

$$erf. a_s = \frac{(\Delta F_d / 2) / \Delta x}{f_{yd} \cdot \cot \theta} = \frac{v_{Ed}}{f_{yd} \cdot \cot \theta} \quad (5.1)$$

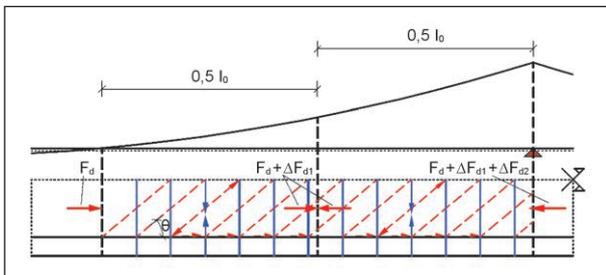


Bild 19: Biegemoment (oben) und vereinfachtes Fachwerkmodell für den Druckgurt nach DIN EN 1992-2/NA (unten)

	Δx [m]	F_d [MN]	$F_d + \Delta F_d$ [MN]	v_{Ed} [MN/m]	$\cot \theta$ [-]	erf. a_s [cm ² /m]
1	6,60	-5,6	-14,5	0,67	1,2	15,4
2	6,60	-14,5	-28,4	1,05	1,2	24

Tab. 4: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt gem. vereinfachtem Verfahren nach DIN EN 1992-2/NA

Die auf diese Weise ermittelte Bewehrung ist je Steganschnitt erforderlich. Auf die Darstellung des Nachweises der Betondruckstreben wird hier verzichtet.

5.1.4 Fachwerkmodell mit Rissreibung nach DIN EN 1992-2/NA

Bei diesem Nachweisformat erfolgt die Ermittlung des Druckstrebenwinkels analog zum Nachweis der Querkrafttragfähigkeit schubbewehrter Stegquerschnitte nach Gleichung (5.2).

$$1,0 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 + 1,4 \cdot \sigma_{cp} / f_{cd}}{1 - v_{Rd,cc} / v_{Ed}} \leq 1,75 \quad (5.2)$$

mit

$$v_{Rd,cc} = 0,24 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot \left(1 - 1,2 \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}}\right) \cdot b_w.$$

Für die Übertragung dieser Gleichungen zur Ermittlung des Druckstrebenwinkels auf den Druckgurt ist $b_w = h_f$ zu setzen. Da im hier vorliegenden Beispiel die Ermittlung des Widerstands pro laufenden Meter Gurtanschlusslänge erfolgt, wurde $z = \Delta x = 1,0$ in der Gleichung für $v_{Rd,cc}$ bereits berücksichtigt. Die tatsächliche Länge des betrachteten Gurtabschnitts sowie die Anzahl der Gurtanschnitte geht in die Ermittlung der Beanspruchung v_{Ed} je laufenden Meter gemäß Gleichung (4.4) ein. Für σ_{cp} wird gemäß DIN EN 1992-2/NA die mittlere Betonlängsspannung $\sigma_{cp,m} = N_{BP} / (h_f \cdot b_{eff})$ im anschließenden Gurtabschnitt mit der Länge Δx angesetzt. Durch die zunehmend größeren Längsdruckspannungen im Gurt sind somit immer flacher werdende Neigungswinkel für die Druckstreben möglich. Um die Auswirkungen der zur Mittelstützung hin größer werdenden Längsdruckspannungen in der Gurtscheibe zu berücksichtigen, erfolgt die Nachweisführung daher anders als zuvor beim vereinfachten Verfahren nach DIN EN 1992-2/NA in kürzeren Gurtabschnittslängen. Für die konkrete Nachrechnungspraxis ist es darüber hinaus empfehlenswert eine möglicherweise abgestufte Gurtanschlussbewehrung bei der Festlegung der Abschnittslängen zu berücksichtigen. Die erforderliche Gurtanschlussbewehrung nach DIN EN 1992-2/NA ist in Tabelle 5 zusammengestellt.

5.1.5 Anwendung des Vorschlags zur Nachrechnung von Druckgurtanschlüssen mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung

In Kapitel 2 wurden die Unterschiede im Tragverhalten zwischen Gurt- und Stegquerschnitten ausführlich beschrieben und es wurde gezeigt, dass die Übertragung des für Stegquerschnitte hergeleiteten Fachwerkmodells mit Rissreibung auf die unter hohen Längsdruckspannungen stehenden Bereiche von Druckgurten nicht ohne Weiteres sinnvoll ist. Die sehr niedrigen Werte für den Rissreibungsanteil $v_{Rd,cc}$ in Tabelle 5 im Bereich der Mittelstützung sind ein weiterer Beleg für den geringen Einfluss dieses Traganteils unter diesen Randbedingungen. Nachfolgend wird die erforderliche Gurtanschlussbewehrung daher auf Basis des in Kapitel 4.2 beschriebenen Bemessungsansatzes ermittelt. Hierbei erfolgt die Festlegung des Neigungswinkels der Druckstreben im Fachwerkmodell unter Berücksichtigung der vorhandenen Hauptspannungsrichtungen im Druckgurt im Bereich der Mittelstütze (Abstand h vom Zwischenauflager) nach Gleichung (5.3).

$$15^\circ \leq \theta = 0,5 \cdot \arctan\left(\frac{-2\tau_{xy}}{\sigma_x}\right) \leq 35^\circ$$

$$1,4 \leq \cot\theta = \frac{\frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}}{\tau_{xy}} \leq 3,7 \quad (5.3)$$

Die Berechnung des Winkels nach Gleichung (5.3) erfolgt auf Grundlage der mittleren Spannungen im Gurtanschnitt im Abstand h von der Mittelstützung.

Abstand $h = 3,30$ m

Für die Längs- und Schubspannung im Abstand $h = 3,3$ m werden die mittleren Spannungen zwischen Q2 (Abstand 2,2 m) und Q3 (Abstand 4,4 m) verwendet (siehe Tabelle 6). Zum Vergleich sind die maßgebenden Beanspruchungen in den Bildern 26 und 27 dargestellt.

$$\text{Längsspannung} \quad \sigma_{x,Ed} = \sigma_{cp,m} = -13,6 \text{ MPa}$$

$$\text{Schubspannung (im Gurtanschnitt)} \quad \tau_{GA,Ed} = v_{Ed}/h_f = 3,1 \text{ MPa}$$

$$\theta = 0,5 \cdot \arctan\left(\frac{-2 \cdot 3,1}{-13,6}\right) = 12,3^\circ < 15^\circ$$

$$\rightarrow \cot\theta = 3,7$$

Momentennulldurchgang

Die vorhandene Längsspannung im Momentennulldurchgang entspricht der Spannung infolge des zentrisch wirkenden Anteils der Vorspannung auf den Gesamtquerschnitt.

$$\text{Längsspannung} \quad \sigma_{x,Ed} = N_p/A_c = -3,6 \text{ MPa}$$

$$\cot\theta = 1,2 + 1,4 \cdot \frac{3,6}{17} = 1,5 \geq 1,40$$

$$\rightarrow \theta = 33^\circ$$

Alle Berechnungsergebnisse sind für die verschiedenen Gurtabschnitte in Tabelle 6 zusammengefasst.

Q	N_{BP} [MN]	Δx [m]	$h_{f,M}$ [m]	$\sigma_{cp,m}$ [MPa]	$v_{Rd,cc}$ [MN/m]	v_{Ed} [MN/m]	$\cot\theta$ [-]	erf. as [cm ² /m]	erf. as** [cm ² /m]
1	-28,39								
2	-23,07	2,2	0,425	-15,45	0,00	1,21	2,47>1,75	18,9	13,4
3	-17,95	2,2	0,375	-13,6	0,011	1,16	2,30>1,75	18,2	13,8
4	-14,52	2,2	0,335	-11,8	0,042	0,78	2,30>1,75	12,2	9,3
5	-9,11	3,3	0,285	-9,7	0,067	0,82	2,15>1,75	12,8	10,4
6	-5,57	3,3	0,25	-6,7	0,098	0,54	2,15>1,75	8,5	6,9
7	-3,55	2,2	0,25	-4,12	0,132	0,46	2,15>1,75	7,2	5,9

** erf. as ohne Berücksichtigung des Grenzwinkels von $\cot\theta = 1,75$

Tab. 5: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. DIN EN 1992-2/NA (Fachwerkmodell mit Rissreibung)

Q	N_{BP} [MN]	Δx [m]	$h_{f,M}$ [m]	$\sigma_{cp,m}$ [MPa]	V_{Ed} [MN/m]	θ [°]	$\cot \theta$ [-]	$V_{Rd,max}$ [MN/m] (4.6)	erf. as [cm ² /m]
1	-28,39								
2	-23,07	2,2	0,425	-15,45	1,21	15	3,73	1,35	8,9
3	-17,95	2,2	0,375	-13,6	1,16	15	3,73	1,19	8,6
4	-14,52	2,2	0,335	-11,8	0,78	18	3,0	1,26	7,1
5	-9,11	3,3	0,285	-9,7	0,82	22	2,5	1,26	8,9
6	-5,57	3,3	0,25	-6,7	0,54	27	2,0	1,29	7,4
7	-3,55	2,2	0,25	-4,12	0,46	31	1,73	1,40	7,3

Tab. 6: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung

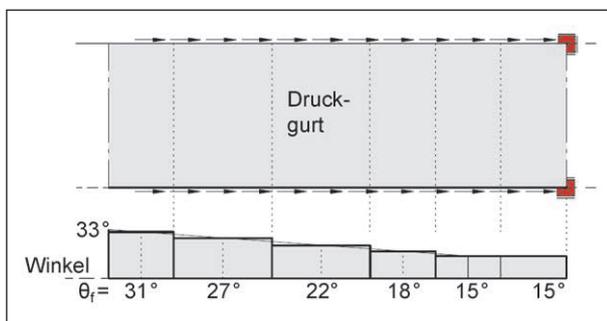


Bild 20: Wahl der Druckstrebenwinkel in den verschiedenen Druckgurtabschnitten

In Bild 20 ist die Wahl der in Tabelle 6 aufgeführten Druckstrebenwinkel skizziert. Für jeden Abschnitt wird analog zum Vorgehen nach DIN EN 1992-2/NA ein konstanter Winkel angenommen. Die Ermittlung der beiden Grenzwinkel im Abstand h vom Mittelauflager und im Momentennulldurchgang erfolgte nach den Gleichungen (4.7) und (4.2). Zur Plausibilisierung der mit diesem Verfahren gewählten Druckstrebenwinkel erfolgt zusätzlich die Auswertung der Neigungswinkel der schiefen Betondruckstreben bzw. der numerisch am Faltwerkmodell mit Schalenelementen ermittelten Risswinkel. Hierbei wird das materialphysikalisch nichtlineare Verhalten des Betons berücksichtigt. Die Betonzugfestigkeit wird mit dem 5%-Quantilwert eines C30/37 von 2,0 MPa berücksichtigt. Da der Druckgurt unter Bemessungslasten ungerissen ist (Hauptzugspannungen $< 1,0$ MPa) erfolgt eine weitere Berechnung mit um den Faktor 1,25 erhöhten Bemessungslasten sowie unter Ansatz der Bemessungszugfestigkeit. Um diese Laststufe erreichen zu können, wurde hierbei rechnerisch die Druckfestigkeit eines C50/60 in Ansatz gebracht.

Bild 21 enthält die Darstellung der Hauptdruckspannungswinkel im Druckgurt unter Bemessungslasten (obere Darstellung). Die Veränderung der Neigungswinkel bei weiterer Laststeigerung im FE-Modell ist in der unteren Darstellung zu erkennen. Die Druckstrebenwinkel im Gurtanschnitt im FE-Modell sind durch rote Linien oberhalb der Gurtdarstellungen ausgewertet. In der unteren Darstellung sind zusätzlich die rechnerischen Druckstrebenwinkel des hier angewendeten Bemessungsvorschlags aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Entwicklung der Druckstrebenneigung im FE-Modell gut mit der des Bemessungsvorschlags angenähert wird. Dabei führt der Bemessungsvorschlag mit in Summe größeren Winkeln im Vergleich zu den rechnerischen Risswinkeln in der FE-Berechnung zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen.

5.1.6 Anwendung des Vorschlags zur Ermittlung der mit der vorhandenen Anschlussbewehrung aktivierbaren Gurtbreite

Da der Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen Balkensteg und Druckgurt auch unter Berücksichtigung der im Vergleich zum Ansatz nach DIN EN 1992-2/NA deutlich flacheren Riss- und damit Druckstrebenwinkel mit dem hier vorgeschlagenen Bemessungsansatz noch nicht ohne rechnerische Bewehrungsdefizite erbracht werden kann, wird nachfolgend die mitwirkende Gurtbreite soweit reduziert, dass die übrigen Nachweise am Gesamtquerschnitt noch erbracht werden können.

Bei einer maximalen Reduktion der rechnerischen Druckgurtbreite um 0,85 m kann der Nachweis der

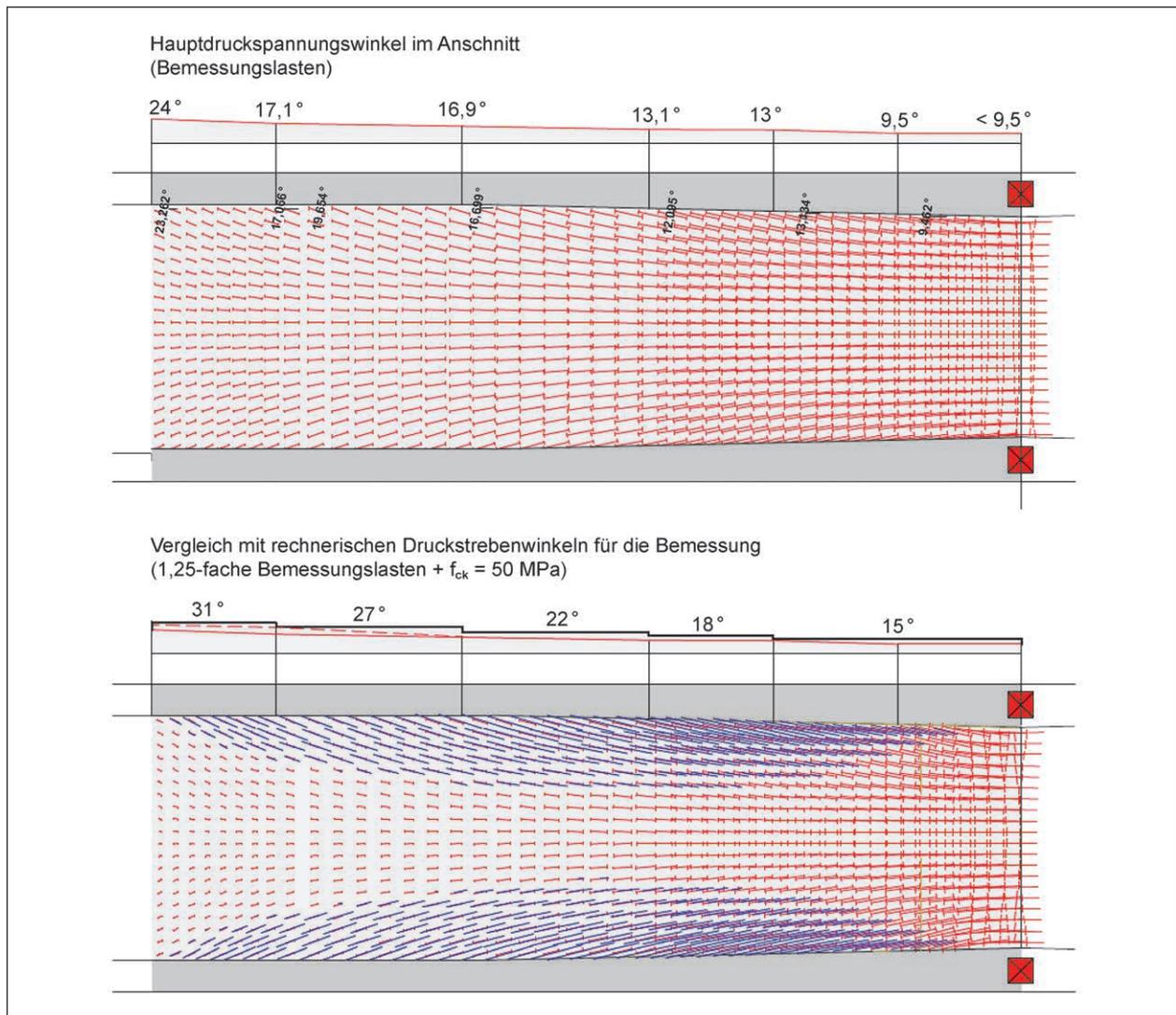


Bild 21: Hauptdruckspannungen (rot) , zugehöriger Winkel θ sowie rechnerisch gerissene Bereiche im Gurt (blau) inkl. Vergleich mit Winkeln des Bemessungsvorschlags

Tragfähigkeit für Biegung mit Längskraft noch erbracht werden. Die Grenzdehnung in Gurtmitte wurde hierbei gemäß DIN EN 1992-2/NA auf 2 ‰ festgesetzt. In Bild 22 ist die so ermittelte resultierende Druckspannungsverteilung im Querschnitt dargestellt.

Die auf Basis der reduzierten Gurtbreite ermittelten resultierenden Längsdruckkräfte wurden durch Auswertung der Dehnungsebenen in den verschiedenen Schnitten ermittelt und sind ebenso wie die erforderliche Anschlussbewehrung in Tabelle 7 zusammengestellt. Die rechnerische Riss- bzw. Druckstrebenneigung bleibt unverändert.

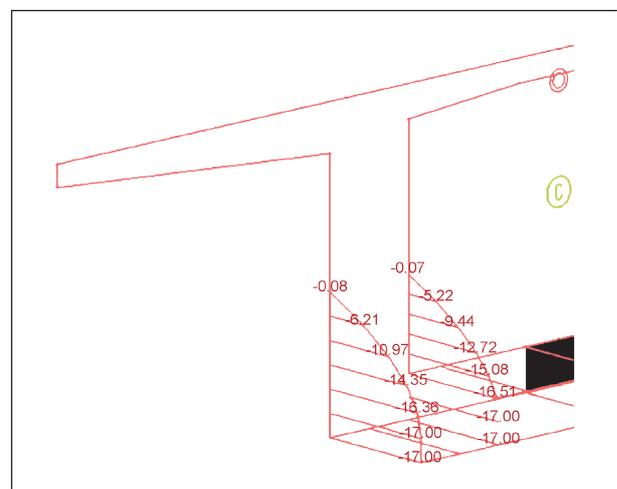


Bild 22: Biegedruckspannungsverteilung im Bereich des Zwischenauflagers bei reduzierter mitwirkender Breite

Q	N_{BP} [MN]	Δx [m]	$h_{f,M}$ [m]	$\sigma_{cp,m}$ [MPa]	V_{Ed} [MN/m]	θ [°]	$\cot \theta$ [-]	$v_{Rd,max}$ [MN/m] (4.6)	erf. as [cm ² /m]
1	-22,95	2,2	0,425	-16,1	0,9	15	3,73	1,35	6,6
2	-18,97								
3	-15,0	2,2	0,375	-14,3	0,9	15	3,73	1,19	6,6
4	-12,06								
5	-7,62	3,3	0,285	-10,1	0,67	22	2,5	1,26	7,3
6	-4,67	3,3	0,25	-7,1	0,45	27	2,0	1,29	6,1
7	-2,98	2,2	0,25	-4,4	0,38	31	1,73	1,40	6,1

Tab. 7: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit reduzierter Gurtbreite

5.1.7 Anwendung des Vorschlags zur Nachrechnung von ungerissenen Druckgurtanschlüssen mit geringer Anschlussbewehrung

Die Druckgurtscheiben des hier betrachteten 50 Jahre alten Bauwerks weisen bis zum heutigen Tag keine erkennbare Rissbildung auf. Die Schubkraftübertragung zwischen Balkensteg und Druckgurt kann folglich gewährleistet werden, ohne dass die Hauptzugspannungen die vorhandene Betonzugfestigkeit erreichen bzw. überschreiten. Aus dieser Beobachtung lässt sich jedoch noch kein Rückschluss auf die vorhandene Sicherheit im Hinblick auf ein Aufreißen des Anschlussbereichs ableiten, da das Bauwerk zum einen tatsächlich nur den Gebrauchsbeanspruchungen ausgesetzt ist und zum anderen nicht bekannt ist wie hoch die vorhandenen Zugspannungen im Beton sind.

Das nachfolgende Nachweisformat dient der Einschätzung, ob der in der Beobachtung vor Ort festgestellte Bauteilzustand (ungerissener Zustand I) auch im GZT unter Bemessungslasten mit ausreichender Sicherheit zu erwarten ist.

In Bild 18 sind die ermittelten Dehnungsebenen in verschiedenen Schnitten des Längssystems qualitativ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Gesamtquerschnitt im Bereich der Mittelstütze auf der Biegezugseite (Fahrbahnplatte) bereits infolge Biegung gerissen ist. Je nach vorhandener Auslastung der Biegedruckzone (Beton) und der Biegezugzone (Spannstahl bzw. Betonstahl) kommt es zu einer Einschnürung der Druckzone. Dies führt dazu, dass die Längsspannungen im Druckgurt verglichen mit einer linear elastischen Rechnung am ungerissenen Gesamtquerschnitt schneller ansteigen. Ent-

sprechend ändert sich auch der Schubfluss im Anschnitt vom Steg an den Gurt.

Für die Ermittlung der Beanspruchungen werden im vorliegenden Beispiel unterschiedliche Verfahren angewandt.

Verfahren 1

Hierbei wird das materialphysikalisch nichtlineare Verhalten von Beton und Bewehrung zur Ermittlung der Beanspruchungen im Druckgurt auf Querschnittsebene durchgängig berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt an einem Stabsystem.

Ablauf:

- Iteration der Dehnungsebenen zur Berechnung der Spannungsverläufe im Querschnitt zur Sicherstellung des Gleichgewichts für Biegung mit Normalkraft in äquidistanten Schnitten auf Basis der Bemessungsarbeitslinien für Beton und Spannstahl bzw. Betonstahl.
- Ermittlung der resultierenden Kraft im mitwirkenden Bereich der Druckgurtscheibe (ohne Stegbereich).
- Berechnung der mittleren Betonlängsspannung im Druckgurt je Schnitt.
- Ermittlung des Schubflusses durch Bildung der Differenzdruckkräfte zwischen 2 Schnitten geteilt durch die zugehörige Gurtanschlusslänge.
- Umrechnung des Schubflusses in Schubspannungen in allen Nachweischnitten (in Abhängigkeit von der Dicke des Gurtanschnitts) und Addition einer ggf. vorhandenen Schubspannung infolge Torsion.

- Mit den mittleren Längsdruckspannungen und den Schubspannungen erfolgt die Ermittlung der Hauptzugspannungen nach (5.5).

Anmerkung: Die Genauigkeit der beschriebenen Vorgehensweise ist in hohem Maße abhängig von der Diskretisierung des Systems, da der Schubfluss zwischen zwei Schnitten rechnerisch als konstant angenommen wird.

Verfahren 2

Bei diesem Verfahren wird das materialphysikalisch nichtlineare Materialverhalten vernachlässigt. Die Ermittlung der Spannungen im Druckgurtanschnitt erfolgt vollständig auf Basis der linear elastischen Schnittgrößenermittlung und der Querschnittswerte im ungerissenen Zustand I nach Technischer Biegelehre.

Für die Ermittlung der Schubspannungen in der Gurtanschlussfuge ist es erforderlich, die maßgebenden Querkräfte unter Berücksichtigung des Einflusses der gevouteten Bereiche des Längssystems zu ermitteln.

In Bild 23 ist der Einfluss einer Voute auf die Beanspruchung in der Gurtanschlussfuge exemplarisch skizziert. Im Beispiel korrespondiert die Änderung des Biegemoments mit der Änderung des inneren Hebelarms, die durch die Steigung der Voute bedingt ist. In der Folge ist die Aufnahme des Moments ohne Änderung der Gurtkraft möglich. Es treten somit keine Scheibenschubspannungen in der

Gurtanschlussfuge auf. Zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Hauptzugspannungen ist dieser Effekt zu berücksichtigen.

Der Hinweis zur Beanspruchungsermittlung gilt grundsätzlich bei der Schubbemessung gevouteter Träger. Bei einer EDV-gestützten Bemessung eines Stabsystems werden die Auswirkungen dieses Effekts in einigen Programmsystemen bei einer hierfür geeigneter Modellierung des gevouteten Bereichs im Zuge der Bemessung (im Post-Processing) abgeschätzt. Die auf den Verlauf der Schwerachse bezogenen Stabschnittgrößen erfassen diesen Effekt nicht. Die Modellannahmen und Programmresultate sollten hier besonders sorgfältig geprüft werden.

Allgemein gilt:

$$V_{GA,Ed} = V_{Ed,0} - V_{ccd} - V_{pd} - V_{td} \quad (5.4)$$

mit

$V_{GA,Ed}$ Bemessungswert der einwirkenden Querkraft zur Ermittlung des Schubflusses im Gurtanschnitt

$V_{Ed,0}$ Grundbemessungswert der auf den Querschnitt einwirkenden Querkraft

V_{ccd} Bemessungswert der Querkraftkomponente in der Druckzone

V_{pd} Querkraftkomponente der Spannstahlkraft

V_{td} Bemessungswert der Querkraftkomponente in der Zugzone

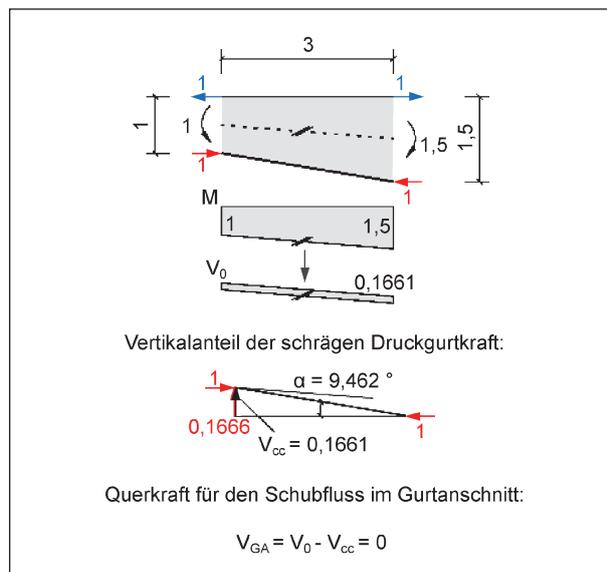


Bild 23: Darstellung des Einflusses einer Voute auf die maßgebende Querkraft zur Ermittlung des Schubflusses im Gurtanschnitt

Ergebnisse Verfahren 1

Die Beanspruchungsermittlung erfolgt an einem Stabquerschnitt mit einem Knotenabstand von 55 cm ($\leq h/4$). Der geringe Abstand der Auswertequerschnitte zueinander wird gewählt, um die Ungenauigkeit, die durch die Vergleichmäßigung des Schubflusses zwischen zwei Schnitten entsteht, vernachlässigbar gering zu halten.

In Bild 24 ist die Entwicklung der resultierenden Druckkraft in der Gurtscheibe dargestellt. Deutlich zu erkennen ist ein Versatz bei etwa 57 m. In diesem Abschnitt befindet sich die Verankerung eines Längsspannglieds im Steg. Die einsetzende Biege- rissbildung auf der Oberseite des Gesamtquerschnitts (Fahrbahnplatte) führt darüber hinaus zu einem erkennbar schnelleren Anstieg der Kraft in der Druckgurtscheibe (ab etwa 61 m).

Der Schubfluss innerhalb des Gurtanschnitts ergibt sich aus den Differenzkräften zwischen zwei Schnitten geteilt durch die Gesamtgurtanschlusslänge zwischen den betrachteten Schnitten. Durch die Berechnung am Stabmodell kommt es aufgrund der Verankerung einzelner Spannglieder im Steg zu einer Unstetigkeitsstelle im Verlauf der Längsdruckkraft (siehe Bild 24). Bei der Ermittlung des Schubflusses zwischen zwei Schnitten resultiert aus der Längskraftänderung im Unstetigkeitsbereich rechnerisch keine Beanspruchung. Tatsächlich erfolgt die Änderung der Gurtkraft als Folge des zwischenverankerten Spannglieds über eine Einleitungslänge. Das gewählte Modell ist nicht dazu in der Lage diese Beanspruchung automatisch zu erfassen. Um die hieraus resultierenden Spannungen im Gurtanschnitt auf der sicheren Seite liegend zu ermitteln, sind ergänzende Betrachtungen erforderlich. In Bild 25 ist der Vergleich der resultierenden Längsdruckkraft in der Bodenplatte ermittelt am Stabquerschnitt mit einer materialphysikalisch nichtlinearen Vergleichsrechnung an einem Schalenmodell im Bereich der Unstetigkeitsstelle dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der in der Vergleichsrechnung ermittelte Verlauf außerhalb des Einflussbereichs der Spanngliedverankerung qualitativ und quantitativ gut mit den Ergebnissen der Rechnung am Stabsystem übereinstimmt. Im Bereich der Spanngliedverankerung ist der Verlauf der am Faltwerk mit nichtlinearen Schalenelementen ermittelten Längsdruckkraft in der Druckgurtscheibe (grüne Linie, Bild 25) jedoch erwartungsgemäß stetig. Dabei erfolgt der überwiegende Teil der Gurtkraftänderung infolge der Verankerung in einem etwa 3,40 m langen Abschnitt hinter der Verankerung. Ein geringer

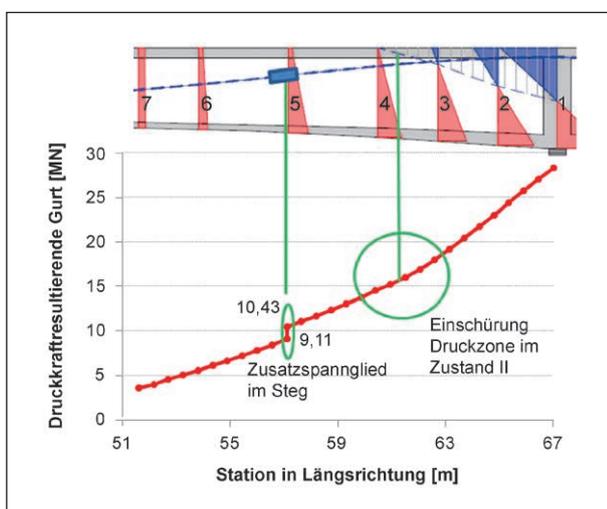


Bild 24: Resultierende Längsdruckkraft in der Bodenplatte im Bereich der Zwischenstützung

Teil der Vorspannkraft hängt sich im System zurück und führt bereits vor dem Querschnitt mit der Spanngliedverankerung zu einem Anstieg der Gurtkraft. Diese Beobachtung in der nichtlinearen Systemanalyse ist durchaus plausibel und wird in der heutigen Bemessungspraxis durch eine entsprechend dimensionierte Rückhängebewehrung im Bereich der Verankerung berücksichtigt.

Die numerisch ermittelte Lastausbreitungslänge von etwa 3,40 m vor und hinter dem Querschnitt mit Spanngliedverankerung entspricht einem Lastausbreitungswinkel von etwa 30° innerhalb der Bodenplatte bei analytischer Ermittlung der Einflusslänge.

Für die Ermittlung des Schubflusses und der Schubspannungen im Gurtanschnitt sowie der mittleren Betonlängsspannungen wird im Bereich der Spanngliedverankerung von folgenden Annahmen für die Berechnung ausgegangen:

- Ein Wirkungsbereich von $l_{\text{Einl}} = 3,4 \text{ m}$ vor und hinter der Verankerung wird berücksichtigt
- Der Schubfluss wird im Wirkungsbereich hinter der Verankerung um $\Delta F_U / l_{\text{Einl}}$ vergrößert.
- Die Längsdruckspannung hinter der Verankerung wird infolge des Verankerungsschubflusses modifiziert. Die auf der unsicheren Seite liegende positive Wirkung der zusätzlichen Drucknormalkraft infolge des Spannungssprungs am Stabsystem wird auf diese Weise rechnerisch entfernt (siehe gestrichelte rote Linie in den Bildern 25 und 27).

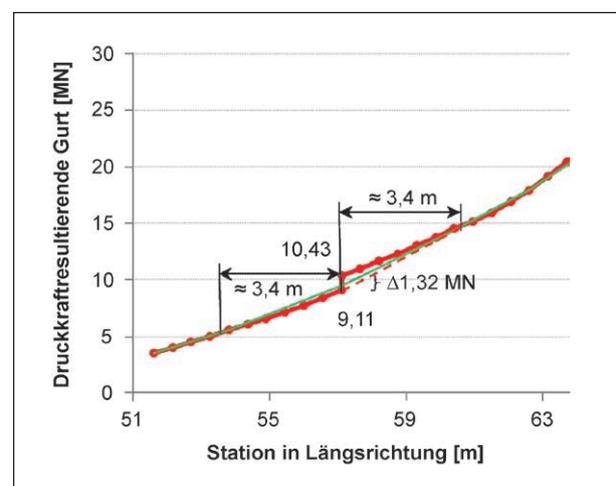


Bild 25: Vergleich der resultierenden Längsdruckkraft in der Bodenplatte aus der Ermittlung am Stab (rot) und einer nichtlinearen Vergleichsrechnung am Schalenmodell (grün)

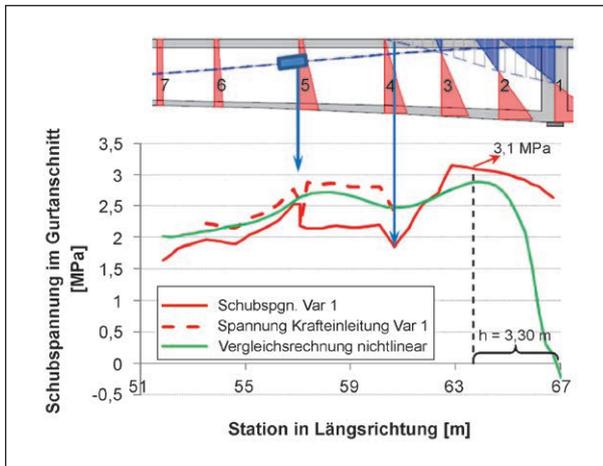


Bild 26: Verlauf der Schubspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell verglichen mit den Schubspannungen am nichtlinearen Schalenmodell

- Der Schubfluss wird im Wirkungsbereich vor der Verankerung um $1/3 \cdot \Delta F_U / l_{\text{Einl}}$ vergrößert.

ΔF_U Längskraftunterschied in der Bodenplatte im Querschnitt der Zwischenverankerung des Spannglieds

l_{Einl} Einleitungslänge von ΔF_U in die Bodenplatte gem. Zusatzbetrachtung am Falwerk

Die Schubspannungen im Gurtanschnitt sind in Bild 26 sowohl mit als auch ohne Berücksichtigung der Zusatzspannungen infolge des Zusatzspannglieds dargestellt. Zum Vergleich sind die Ergebnisse denen der nichtlinearen Systemanalyse gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die am Stabmodell ermittelten Schubbeanspruchungen im Gurtanschnitt unter Berücksichtigung der erweiterten Überlegungen zu den Beanspruchungen aus der Zwischenverankerung eines Spannglieds gut mit den Ergebnissen der Vergleichsrechnung am materialphysikalisch nichtlinearen Schalenmodell übereinstimmen. Überdies ist zu erkennen, dass der Einfluss der Zwischenverankerung des Spannglieds (bei $l = 57\text{m}$) großen Einfluss hat und im Hinblick auf eine möglichst wirklichkeitsnahe Ermittlung der Spannungsverhältnisse im Gurtanschnitt nicht vernachlässigbar ist.

Die mittleren Betonlängsdruckspannungen im Druckgurt sind in Bild 27 dargestellt.

Mit den Schubbeanspruchungen nach Bild 26 und den zugehörigen Betonlängsdruckspannungen nach Bild 27 lassen sich die Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt nach Gleichung (5.5) ermitteln.

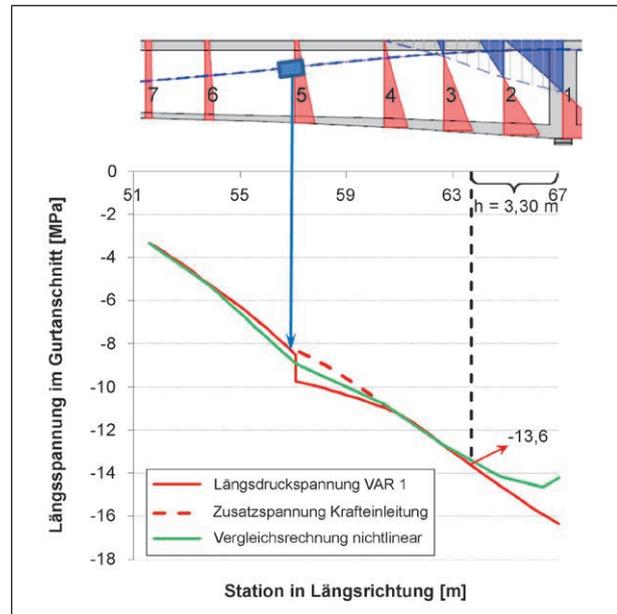


Bild 27: Verlauf der Längsdruckspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell verglichen mit den Längsdruckspannungen am nichtlinearen Schalenmodell

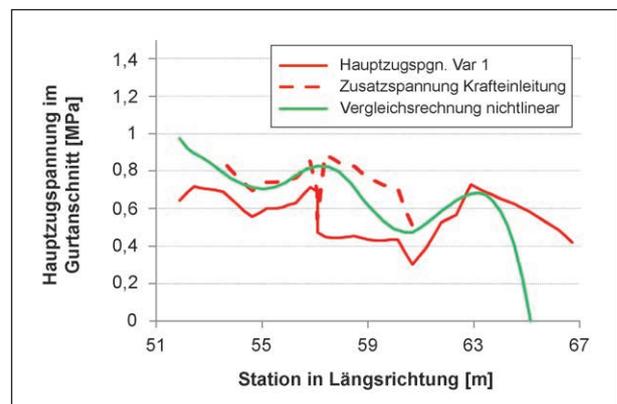


Bild 28: Verlauf der Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell verglichen mit den Hauptzugspannungen am nichtlinearen Schalenmodell

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x}{2} + 0,5 \cdot \sqrt{\sigma_x^2 + 4 \cdot \tau_{xy}^2} \quad (5.5)$$

Aus Gleichung (5.5) ergibt sich der in Bild 28 dargestellte Hauptzugspannungsverlauf in der Gurtanschnittsfuge.

Vergleich der Ergebnisse mit Verfahren 2

Nachfolgend sind die Ergebnisse der linear-elastischen Spannungsermittlung im Gurtanschnitt vollständig ohne Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens im Druck- und Zugsbereich des Querschnitts zusammengestellt.

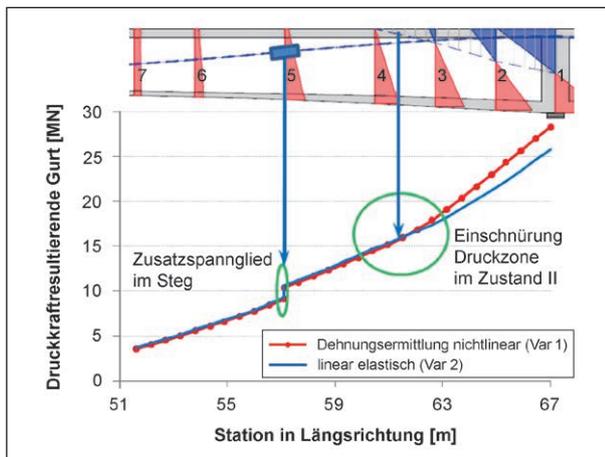


Bild 29: Vergleich der resultierende Längsdruckkraft in der Bodenplatte im Bereich der Zwischenstützung nach Rechenverfahren 1 und 2

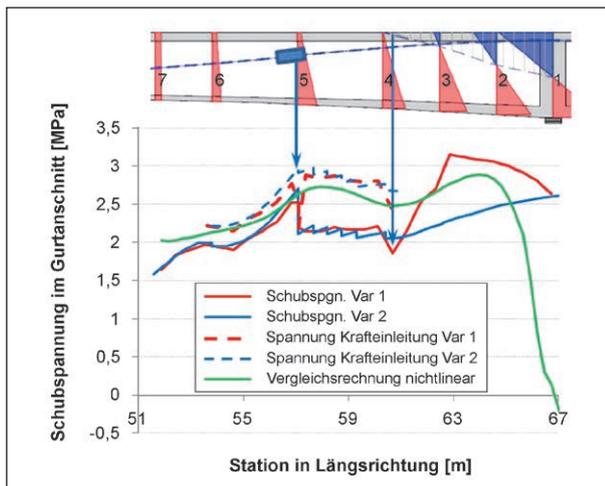


Bild 30: Vergleich der Schubspannungsverläufe im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 und 2 am Stabmodell sowie am nichtlinearen Schalenmodell

Durch die Vernachlässigung der Rissbildung und der damit verbundenen Verringerung der Druckzonenhöhe, kommt es im Bereich zwischen etwa 61 m und 67 m zu einem geringeren Druckkraftanstieg in der Bodenplatte (siehe Bild 29). In der Folge sind auch die Schubspannungen im Gurtanschnitt in diesem Bereich deutlich geringer (siehe Bild 30). In den Bereichen des Systems, in denen sich der Querschnitt im ungerissenen Zustand I befindet (51 m bis etwa 61 m), sind die Ergebnisse nach beiden Berechnungsverfahren erwartungsgemäß vergleichbar.

In Bild 31 ist zu erkennen, dass die Rechenverfahren 1 (Beanspruchungsermittlung durch Iteration der Dehnungsebene mit Bemessungsarbeitslinien) und 2 (linear elastische Spannungsermittlung ohne Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens)

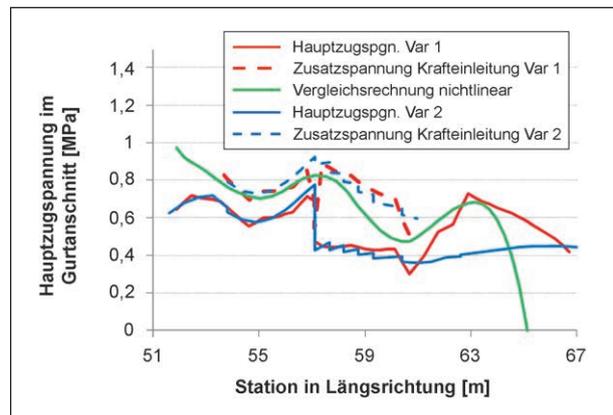


Bild 31: Verlauf der Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 und 2 am Stabmodell verglichen mit den Hauptzugspannungen am nichtlinearen Schalenmodell

die Beanspruchungen im Druckgurt zwischen 51 m und 61 m gleichwertig abbilden und zufriedenstellende Ergebnisse beim Vergleich mit der nichtlinearen Simulationsrechnung am Schalenmodell liefern.

Mit dem Übergang des Gesamtquerschnitts in den gerissenen Zustand II führt die Vernachlässigung der Rissbildung bei der linear elastischen Spannungsermittlung (Verfahren 2) zu auf der unsicheren Seite liegenden Ergebnissen (siehe Bild 31 zwischen 61 m und 67 m). Die Auswirkungen einer Rissbildung innerhalb der Zugzone des Gesamtquerschnitts sind folglich nicht vernachlässigbar.

5.1.8 Zusammenstellung der Ergebnisse

Nachweisführung auf Grundlage gerissener Querschnitte

In Bild 32 sind die nach den unterschiedlichen Verfahren ermittelten erforderlichen Gurtanschlussbewehrungsmengen der vorhandenen Bewehrung gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass das vereinfachte Nachweisformat der DIN EN 1992-2/NA, in dem der Druckstrebenneigungswinkel im Fachwerkmodell für die Berechnung des Druckgurtanschlusses pauschal zu $\cot \theta = 1,20$ angesetzt werden darf, zu sehr konservativen Bemessungsergebnissen führt. Die genauere Berechnung nach DIN EN 1992-2/NA auf Basis des Fachwerkmodells mit Rissreibungsanteil führt zu deutlich geringeren erforderlichen Bewehrungsmengen im Vergleich zum vereinfachten Verfahren. Jedoch wird in der zweiten Hälfte des Druckgurtes (zwischen ~ 60 m und 67 m) die positive Wirkung der vorhandenen hohen Längsdruckspannung durch das Fachwerkmodell mit

Rissreibung, selbst unter Berücksichtigung eines verringerten zulässigen Grenzwinkels für die Druckstrebenneigung von $\cot \theta \leq 3,0$, nicht hinreichend berücksichtigt. Der minimal mögliche Druckstrebenneigungswinkel errechnet sich hierbei im betrachteten Beispiel zu $\cot \theta = 2,47$ und die Rissreibungskomponente geht mit zunehmender Längsdruckkraft allmählich gegen Null (siehe Tabelle 5). Dies ist auf die in Kapitel 2.2.1 und 2.2.2 beschriebenen Zusammenhänge zurückzuführen.

Durch den vorgeschlagenen Bemessungsansatz unter Berücksichtigung der tatsächlichen Hauptspannungsrichtungen zur Ermittlung des Riss- bzw. Druckstrebenwinkels wird trotz der Vernachlässigung einer etwaigen Rissreibungskomponente eine deutlich flachere Druckstrebenneigung in der zweiten Hälfte des Druckgurtes, die unter besonders hohen Längsdruckspannungen steht, rechnerisch möglich (siehe Tabelle 6). In der Folge kann der Nachweis der Schubkraftübertragung mit einer deutlich reduzierten Gurtanschlussbewehrung erfolgen.

Aufgrund der äußerst geringen tatsächlich vorhandenen Gurtanschlussbewehrung, die mit $6,03 \text{ cm}^2/\text{m}$ einem Bewehrungsgrad von zwischen $0,13 \%$ und $0,24 \%$ in Abhängigkeit von der veränderlichen Gurtbreite entspricht, kann der Nachweis der schub-

festen Verbindung zwischen Gurt und Steg mit keinem der Verfahren ganz ohne rechnerisches Defizit erbracht werden. Die maximalen rechnerischen Ausnutzungsgrade der Nachweisformate sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Das Potenzial des Bemessungsvorschlags im Vergleich zum derzeit normativ geregelten Verfahren ist dennoch gut erkennbar. Die rechnerischen Tragfähigkeitsüberschreitungen werden bei Anwendung des Verfahrens in weiten Teilen des hier betrachteten Gurtanschnitts auf unter 10% reduziert (max. 20% unmittelbar im Bereich hinter der Zwischenverankerung einzelner Spannglieder).

Nachweisführung unter Ansatz der Betonzugfestigkeit

Gemäß der Bedingung (4.1) ist nachzuweisen, dass die rechnerischen Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt an keiner Stelle die Bemessungszugfestigkeit überschreitet. Diese errechnet sich im untersuchten Bauwerk zu:

$$\sigma_{I,GA,Rd} \leq k_1 \cdot f_{ctd} = 0,8 \cdot 0,85 \cdot \frac{2,0}{1,5} = 0,91 \text{ MPa}$$

In Bild 33 sind die ermittelten Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt dem Bemessungswider-

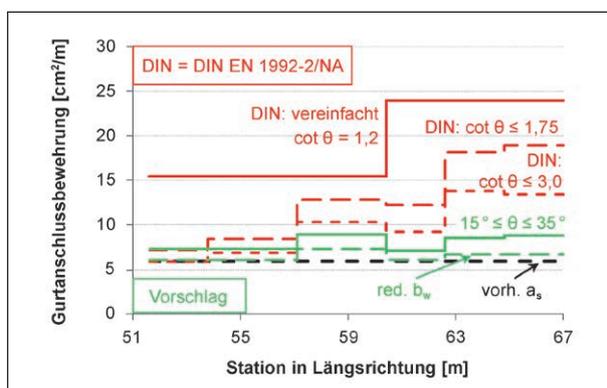


Bild 32: Vergleich der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung mit der nach verschiedenen Nachweisverfahren rechnerisch erforderlichen Bewehrung

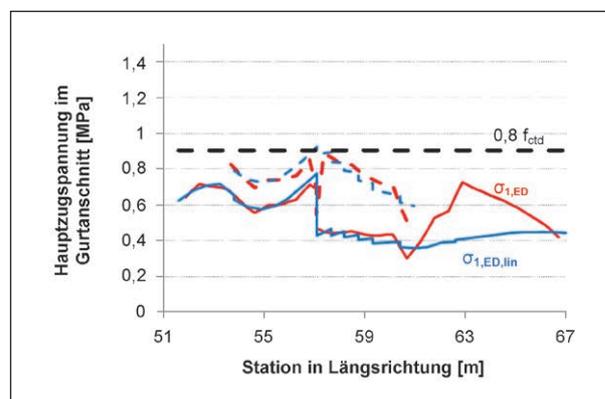


Bild 33: Vergleich des abgeminderten Bemessungswerts der Betonzugfestigkeit mit den ermittelten Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt im GZT

Verfahren	erf. a_s [cm^2/m]	vorh. a_s [cm^2/m]	Ausl. [%]
DIN EN 1992-2/NA vereinfacht $\cot \theta = 1,2$	24	6,03	398
DIN EN 1992-2/NA Fachwerkmodell mit Rissreibung und $\cot \theta \leq 1,75$	18,9	6,03	313
DIN EN 1992-2/NA Fachwerkmodell mit Rissreibung und $\cot \theta \leq 3,0$	13,8	6,03	229
Bemessungsvorschlag $15^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$	8,9	6,03	147
Bemessungsvorschlag mit reduzierter Gurtbreite	7,3	6,03	121

Tab. 8: Maximale rechnerische Auslastung der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung

stand über die Länge des Anschnitts gegenübergestellt.

Durch Anwendung des Hauptzugspannungskriteriums kann die schubfeste Verbindung zwischen Druckgurt und Stegquerschnitt über die Gurtlänge mit ausreichender Sicherheit nachgewiesen werden.

5.2 Bauwerk 2

Beim vorliegenden Bauwerk handelt es sich um eine vorgespannte Hohlkastenbrücke, die Anfang der 1970er Jahre gebaut wurde. Die über 7 Felder spannende Brücke mit einer Gesamtlänge von 170 m wurde mit girlandenförmig geführten Längspanngliedern in den Stegen im nachträglichen Verbund vorgespannt. Angaben zur Konstruktion sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

5.2.1 Querschnitte und Beanspruchung

In Bild 34 sind ein Stützbereich des Bauwerks mit qualitativer Darstellung der Dehnungsebenen und

Beanspruchungen im GZT sowie die Geometrie des über die gesamte Überbaulänge konstant durchlaufenden Querschnitts zu sehen. In der Querschnittsskizze sind zusätzlich die rechnerisch angesetzten mitwirkenden Gurtbreiten im Stützbereich hervorgehoben und bemaßt. Die mitwirkende Druckgurtbreite wurde gemäß DIN EN 1992-2 ermittelt.

Die Ermittlung der Längskräfte in der Bodenplatte erfolgt durch Auswertung der Dehnungsebenen in äquidistanten Schnitten für die gegebenen Gesamtbeanspruchungen der Querschnitte unter der ständigen und vorübergehenden Bemessungskombination. Hierbei werden die Spannungs-Dehnungs-

Brückentyp	Spannbetonhohlkasten
Anzahl Felder	7
Stützweiten	22,5 m – 5 x 25 m – 22,5 m
Brückenklasse	BK 60 nach DIN 1072
Beton Überbau	B 450 nach DIN 1045 bis 1972 → C30/37
Betonstahl	BSt IIIb nach DIN 488 $f_{yk} = 420$ MPa
Vorspannung	St 150/170 und St 80/105

Tab. 9: Angaben zur Konstruktion Bauwerk 2

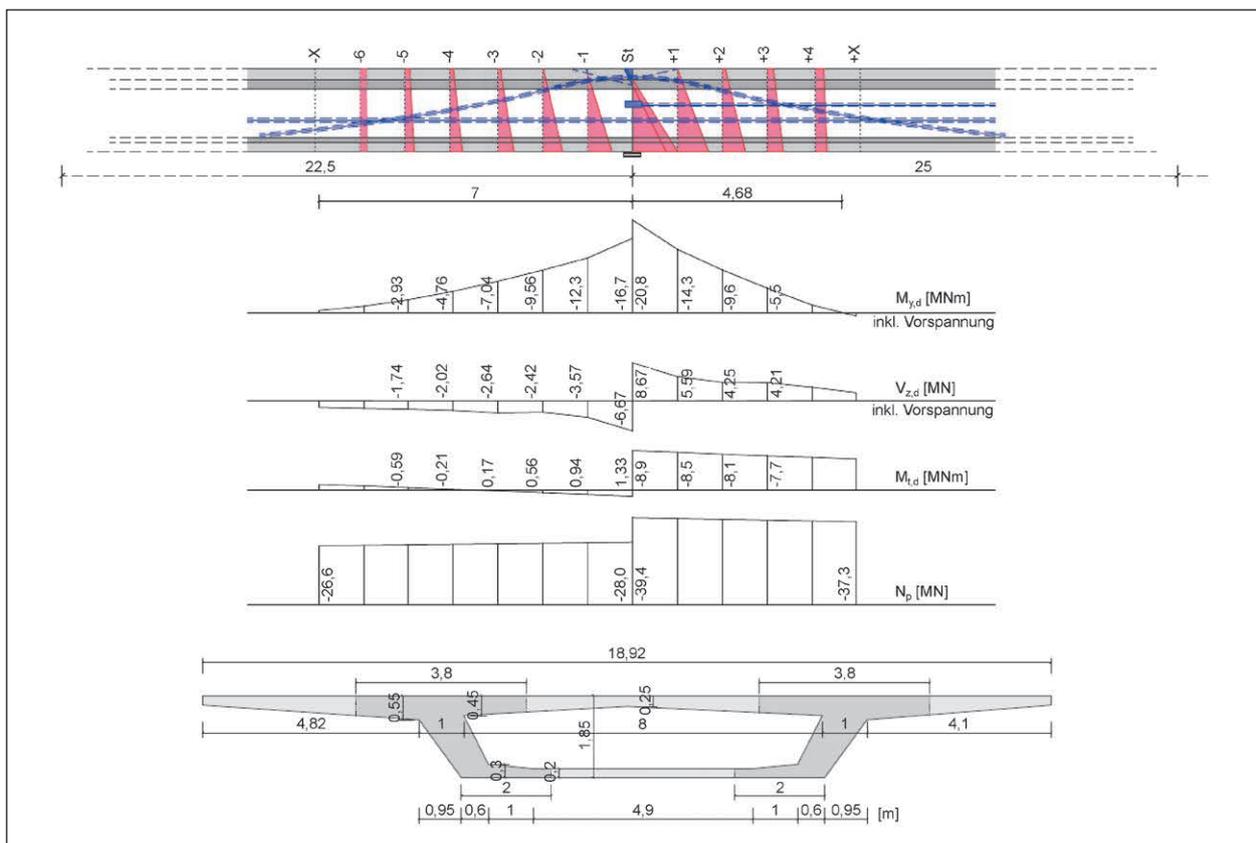


Bild 34: Bauwerk 2, System mit Dehnungsverteilung (oben) und Beanspruchungen im GZT inkl. Vorspannung (mittig) sowie Querschnitt mit mitwirkender Breite im Stützbereich (unten)

QS	$\epsilon_{BP,u}$ [‰]	$\epsilon_{BP,o}$ [‰]	$\epsilon_{BP,Voute}$ [‰]	$\sigma_{BP,u}$ [MPa]	$\sigma_{BP,o}$ [MPa]	$\sigma_{BP,Voute}$ [MPa]	N_{BP} [MN]
-7	-0,118	-0,123	-0,125	-1,95	-2,02	-2,05	1,31
-6	-0,158	-0,156	-0,155	-2,58	-2,55	-2,53	1,69
-5	-0,207	-0,197	-0,192	-3,34	-3,18	-3,10	2,14
-4	-0,268	-0,248	-0,238	-4,25	-3,96	-3,81	2,69
-3	-0,346	-0,314	-0,298	-5,37	-4,92	-4,69	3,37
-2	-0,436	-0,390	-0,367	-6,60	-5,97	-5,67	4,11
-1	-0,538	-0,467	-0,446	-7,92	-7,13	-6,73	4,92
-St	-0,774	-0,644	-0,594	-10,30	-9,18	-8,59	6,36
+ST	-1,002	-0,878	-0,816	-12,77	-11,65	-11,04	7,99
+1	-0,694	-0,620	-0,582	-9,75	-8,90	-8,46	6,10
+2	-0,515	-0,467	-0,444	-7,63	-7,02	-6,71	4,79
+3	-0,365	-0,341	-0,329	-5,64	-5,30	-5,13	3,58
+4	-0,263	-0,255	-0,251	-4,18	-4,05	-3,99	2,71
+4,5	-0,240	-0,235	-0,233	-3,86	-3,76	-3,73	2,50

Lage der ausgewerteten Dehnungs- und Spannungspunkte im Querschnitt:

Tab. 10: Spannungen und resultierende Kräfte im Druckgurt (Bauwerk 2)

Linien für die Querschnittsbemessung gemäß DIN EN 1992-2 verwendet. Der statisch bestimmte Anteil der Vorspannwirkung wird in Form einer Vordehnung des Spannstahls in den einzelnen Querschnitten berücksichtigt.

Die Auswertung der Längsbeanspruchungen der Bodenplatte ist in Tabelle 10 zusammengestellt.

5.2.2 Nachweis des Druckgurtanschlusses

Der Nachweis der Tragfähigkeit des Druckgurtanschlusses erfolgt nachfolgend auf Basis des aktuell gültigen Nachweisformats der DIN EN 1992-2/NA sowie der in Kapitel 4 beschriebenen Nachweisformate. Insbesondere für das Nachweisformat, das die Tragfähigkeit des ungerissenen Betonquerschnitts zur Übertragung der Gurtanschlusskräfte in Anspruch nimmt, ist eine möglichst realitätsnahe Ermittlung der vorhandenen Spannungsverhältnisse im Gurtanschnitt von Bedeutung, da Umlagerungen wie sie in gerissenen Querschnitten möglich sind hier nicht unterstellt werden können. Daher werden hier analog zur Vorgehensweise bei Bauwerk 1 in Kapitel 5.1 unterschiedliche Arten der Beanspruchungsermittlung in den Gurtanschlussfugen vergleichend untersucht, um die möglichen Auswirkungen einer Biegerissbildung des Gesamtquerschnitts im Stützbereich (Rissbildung in Fahrbahnplatte und Steg) auf die Beanspruchungen im Druckgurt (Bodenplatte) zu untersuchen und geeig-

	Δx [m]	F_d [MN]	$F_d + \Delta F_d$ [MN]	v_{Ed} [MN/m]	$\cot \theta$ [-]	erf. a_s [cm ² /m]
L1	3,50	1,31	3,00	0,24	1,2	5,5
L2	3,50	3,0	6,36	0,48	1,2	10,95
R1	2,25	7,99	4,50	0,78	1,2	17,81
R2	2,25	4,50	2,50	0,44	1,2	10,04

Tab. 11: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt gem. vereinfachtem Verfahren nach DIN EN 1992-2/NA für Bauwerk 2

nete Empfehlungen zur Ermittlung der Beanspruchungen abzuleiten.

5.2.3 Vereinfachtes Fachwerkmodell nach DIN EN 1992-2/NA

Für den Nachweis des schubfesten Anschlusses von Druckgurten an die Stege gegliederter Querschnitte darf gemäß DIN EN 1992-2/NA der Neigungswinkel der Betondruckstreben im Fachwerkmodell vereinfachend zu $\cot \theta = 1,20$ angenommen werden. In Bild 19 sind die maximal zulässigen Längen der Nachweisabschnitte sowie das vereinfachte Fachwerkmodell mit einwirkenden Längsdruckkräften schematisch dargestellt.

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 11 zusammengestellt. Die Ermittlung der erforderlichen Gurtanschlussbewehrung erfolgt nach Gleichung (5.1).

Die auf diese Weise ermittelte Bewehrung ist je Steganschnitt erforderlich. Auf die Darstellung des Nachweises der Betondruckstreben wird hier verzichtet.

5.2.4 Fachwerkmodell mit Rissreibung nach DIN EN 1992-2/NA

Für den Nachweis erfolgt die Ermittlung des Druckstrebenwinkels analog zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit schubbewehrter Stegquer-schnitte nach Gleichung (5.2).

Für die Übertragung dieser Gleichungen zur Ermittlung des Druckstrebenwinkels auf den Druckgurt ist $b_w = h_f$ zu setzen. Da im hier vorliegenden Beispiel die Ermittlung des Widerstands pro laufenden Meter Gurtanschlusslänge erfolgt, wurde $z = \Delta x = 1,0$ in der Gleichung für $v_{Rd,cc}$ bereits berücksichtigt. Die tatsächliche Länge des betrachteten Gurtabschnitts sowie die Anzahl der Gurtanschnitte geht in die Ermittlung der Beanspruchung v_{Ed} je laufenden Meter gemäß Gleichung (4.4) ein. Für σ_{cp} wird gemäß DIN

EN 1992-2/NA die mittlere Betonlängsspannung im anzuschließenden Gurtabschnitt mit der Länge Δx angesetzt. Durch die zunehmend größeren Längsdruckspannungen im Gurt sind somit immer flacher werdende Neigungswinkel für die Druckstreben möglich. Um die Auswirkungen der zur Mittelstützung hin größer werdenden Längsdruckspannungen in der Gurtscheibe zu berücksichtigen, erfolgt die Nachweisführung daher anders als zuvor beim vereinfachten Verfahren nach DIN EN 1992-2/NA in kürzeren Gurtabschnittslängen. Für die konkrete Nachrechnungspraxis ist es darüber hinaus empfehlenswert eine möglicherweise abgestufte Gurtanschlussbewehrung bei der Festlegung der Abschnittslängen zu berücksichtigen.

Die erforderliche Bewehrung und die für die Berechnung erforderlichen Eingangswerte sind in den Tabellen 12 und 13 zusammengestellt. Wie bereits beim Bauwerk 1 ist auch hier der mit zunehmender Längsdruckkraft abnehmende Einfluss der Rissreibungskraft $v_{Rd,cc}$ deutlich zu erkennen.

Q	N_{BP} [MN]	Δx [m]	$h_{f,M}$ [m]	$\sigma_{cp,m}$ [MPa]	$v_{Rd,cc}$ [MN/m]	v_{Ed} [MN/m]	$\cot \theta$ [-]	erf. as [cm ² /m]	erf. as** [cm ² /m]
-7	1,31	1	0,3	-2,26	0,188	0,188	3,0>1,75	2,94	1,72
-6	1,69	1	0,3	-2,89	0,177	0,225	3,0>1,75	3,52	2,05
-5	2,14	1	0,3	-3,62	0,166	0,273	3,0>1,75	4,29	2,50
-4	2,69	1	0,3	-4,55	0,151	0,339	2,85>1,75	5,30	3,24
-3	3,37	1	0,3	-5,68	0,133	0,373	2,59>1,75	5,85	3,93
-2	4,11	1	0,3	-6,77	0,116	0,400	2,48>1,75	6,27	4,42
-1	4,92	1	0,3	-8,32	0,09	0,720	2,16>1,75	11,27	9,12
-St	6,36	1	0,3	-8,32	0,09	0,720	2,16>1,75	11,27	9,12

** erf. as ohne Berücksichtigung des Grenzwinkels von $\cot \theta = 1,75$

Tab. 12: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. DIN EN 1992-2/NA (Fachwerkmodell mit Rissreibung), Bauwerk 2, Druckgurt links

Q	N_{BP} [MN]	Δx [m]	$h_{f,M}$ [m]	$\sigma_{cp,m}$ [MPa]	$v_{Rd,cc}$ [MN/m]	v_{Ed} [MN/m]	$\cot \theta$ [-]	erf. as [cm ² /m]	erf. as** [cm ² /m]
+St	7,99	1	0,3	-10,48	0,058	0,944	2,19>1,75	14,77	11,76
+1	6,10	1	0,3	-8,20	0,094	0,654	2,19>1,75	10,23	8,17
+2	4,79	1	0,3	-6,35	0,123	0,603	2,16>1,75	9,44	7,62
+3	3,58	1	0,3	-4,53	0,152	0,440	2,40>1,75	6,87	5,00
+4	2,70	0,5	0,3	-3,79	0,163	0,206	3,00>1,75	3,12	1,88

** erf. as ohne Berücksichtigung des Grenzwinkels von $\cot \theta = 1,75$

Tab. 13: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. DIN EN 1992-2/NA (Fachwerkmodell mit Rissreibung), Bauwerk 2, Druckgurt rechts

Insbesondere links von der Stützung ist der Querschnitt im GZT nur verhältnismäßig gering ausgelastet. Wie in Bild 34 zu erkennen ist, ist infolge Biegung mit Längskraft im Gesamtquerschnitt nur in sehr kleinen Bereichen eine Biegerissbildung wahrscheinlich. Die Auslastung des Druckgutes ist gleichzeitig in weiten Teilen sehr gering. In der Folge ist in großen Abschnitten des Gurtanschlusses auch der Schubfluss mit Werten im Bereich um $V_{Rd,cc}$ sehr gering, was theoretisch zu sehr geringen rechnerisch möglichen Druckstrebenwinkeln führt. Diese werden jedoch nach DIN EN 1992-2/NA auf $\cot \theta = 1,75$ begrenzt (siehe Tabelle 12).

5.2.5 Anwendung des Vorschlags zur Nachrechnung von Druckgurtanschlüssen mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung

Die erforderliche Gurtanschlussbewehrung wird nachfolgend auf Basis des in Kapitel 4.2 beschriebenen Bemessungsansatzes ermittelt. Hierbei erfolgt die Festlegung des Neigungswinkels der Druckstreben im Fachwerkmodell unter Berücksichtigung der vorhandenen Hauptspannungsrichtungen im Druckgurt im Bereich der Mittelstütze nach Gleichung (5.3). Für die Berechnung des Winkels nach Gleichung (5.3) werden die mittleren Spannungen im Gurtanschnitt im Abstand h von der Mittelstützung zugrundegelegt.

Abstand $h = 1,85$ m (links)

Längs- und Schubspannungen im Abstand h siehe Bilder 42 und 43.

Längsspannung $\sigma_{x,Ed} = \sigma_{cp,m} = -6,50$ MPa

Schubspg. aus V (im Gurtanschnitt) $\tau_{v,GA,Ed} = v_{Ed}/h_f = 1,2$ MPa

Schubspg. aus T (im Gurtanschnitt) $\tau_{T,GA,Ed} = 0,1$ MPa

$$\theta = 0,5 \cdot \arctan\left(\frac{-2 \cdot 1,3}{-6,50}\right) = 11^\circ < 15^\circ$$

$$\rightarrow \cot \theta = 3,7$$

Momentennulldurchgang (links)

Die vorhandene Längsspannung im Momentennulldurchgang entspricht der Spannung infolge des zentrisch wirkenden Anteils der Vorspannung auf den Gesamtquerschnitt.

Längsspannung $\sigma_{x,Ed} = N_p/A_c = -2,44$ MPa

$$\cot \theta = 1,2 + 1,4 \cdot \frac{2,44}{17} = 1,4 \geq 1,40$$

$$\rightarrow \theta = 35^\circ$$

Abstand $h = 1,85$ m (rechts)

Längs- und Schubspannungen im Abstand h siehe Bilder 42 und 43.

Längsspannung $\sigma_{x,Ed} = \sigma_{cp,m} = -7,73$ MPa

Schubspg. aus V (im Gurtanschnitt) $\tau_{v,GA,Ed} = v_{Ed}/h_f = 2,08$ MPa

Schubspg. aus T (im Gurtanschnitt) $\tau_{T,GA,Ed} = 1,14$ MPa

$$\theta = 0,5 \cdot \arctan\left(\frac{-2 \cdot 3,22}{-7,73}\right) = 19,9^\circ > 15^\circ$$

$$\rightarrow \cot \theta = 2,75$$

Momentennulldurchgang (rechts)

Die vorhandene Längsspannung im Momentennulldurchgang entspricht der Spannung infolge des zentrisch wirkenden Anteils der Vorspannung auf den Gesamtquerschnitt.

Längsspannung $\sigma_{x,Ed} = N_p/A_c = -3,42$ MPa

$$\cot \theta = 1,2 + 1,4 \cdot \frac{3,42}{17} = 1,48 \geq 1,40$$

$$\rightarrow \theta = 34^\circ$$

Alle Berechnungsergebnisse sind für die verschiedenen Gurtabschnitte in Tabellen 14 und 15 zusammengefasst.

In Bild 35 ist die Wahl der in Tabellen 14 und 15 aufgeführten Druckstrebenwinkel skizziert. Für jeden Abschnitt wird analog zum Vorgehen nach DIN EN 1992-2/NA ein konstanter Winkel angenommen. Die Ermittlung der beiden Grenzwinkel im Abstand h vom Mittelaufleger und im Momentennulldurchgang erfolgte nach den Gleichungen (4.7) und (4.2).

Zur Plausibilisierung der mit diesem Verfahren gewählten Druckstrebenwinkel erfolgt zusätzlich die Auswertung der Neigungswinkel der schiefen Betondruckstreben bzw. der numerisch am Faltwerkmodell mit Schalenelementen ermittelten Risswinkel. Hierbei wird das materialphysikalisch nichtline-

Q	N_{BP} [MN]	Δx [m]	$h_{f,M}$ [m]	$\sigma_{cp,m}$ [MPa]	V_{Ed} [MN/m]	θ [°]	$\cot \theta$ [-]	$v_{Rd,max}$ [MN/m]	erf. as [cm ² /m]
-7	1,31								
-6	1,69	1	0,3	-2,26	0,188	33	1,54	1,74	3,34
-5	2,14	1	0,3	-2,89	0,225	29	1,80	1,62	3,43
-4	2,69	1	0,3	-3,62	0,273	25	2,14	1,46	3,51
-3	3,37	1	0,3	-4,55	0,339	21	2,61	1,27	3,55
-2	4,11	1	0,3	-5,68	0,373	17,5	3,17	1,09	3,23
-1	4,92	1	0,3	-6,77	0,400	15	3,7	0,96	2,97
-St	6,36	1	0,3	-8,32	0,720	15	3,7	0,96	5,33

Tab. 14: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung Bauwerk 2, Druckgurt links

Q	N_{BP} [MN]	Δx [m]	$h_{f,M}$ [m]	$\sigma_{cp,m}$ [MPa]	V_{Ed} [MN/m]	θ [°]	$\cot \theta$ [-]	$v_{Rd,max}$ [MN/m]	erf. as [cm ² /m]
+St	7,99								
+1	6,10	1	0,3	-10,48	0,944	20	2,75	1,23	9,40
+2	4,79	1	0,3	-8,20	0,654	20	2,75	1,23	6,51
+3	3,58	1	0,3	-6,35	0,603	23	2,35	1,38	7,03
+4	2,70	1	0,3	-4,53	0,440	29	1,80	1,62	6,68
+4,5	2,50	0,5	0,3	-3,79	0,206	33	1,54	1,74	3,65

Tab. 15: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung, Bauwerk 2, Druckgurt rechts

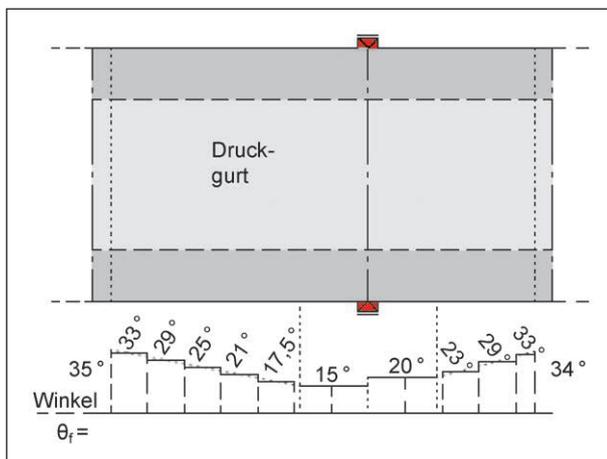


Bild 35: Wahl der Druckstrebenwinkel in den verschiedenen Druckgurtabschnitten

are Verhalten des Betons berücksichtigt. Die Betonzugfestigkeit wird mit dem 5%-Quantilwert eines C30/37 von 2,0 MPa angesetzt. Da der Druckgurt unter Bemessungslasten ungerissen ist (Hauptzugspannungen < 2,0 MPa) und der Gesamtquerschnitt infolge Biegung mit Längskraft noch Reserven aufweist, erfolgt eine weitere Berechnung mit um den Faktor 1,5 erhöhten Bemessungslasten.

Bild 36 enthält eine Darstellung der Hauptdruckspannungswinkel im Druckgurt unter Bemessungslasten (obere Darstellung). Zur Überprüfung der Änderung der Neigungswinkel bei weiterer Laststeigerung bis zur Rissbildung im FE-Modell ist die untere Aufsicht mit Lastfaktor 1,5 dargestellt. Die Druckstrebenwinkel im Gurtanschnitt im FE-Modell sind durch rote Linien oberhalb der Gurtdarstellungen ausgewertet. In der unteren Darstellung sind zusätzlich die rechnerischen Druckstrebenwinkel des hier angewendeten Bemessungsvorschlags aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Entwicklung der Druckstrebenneigung im FE-Modell gut mit der des Bemessungsvorschlags übereinstimmt. Auch der Einfluss der Torsion ist im FE-Modell sehr anschaulich erkennbar. Der Bemessungsvorschlag mit in Summe größeren Winkeln im Vergleich zum FE-Modell führt zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen.

Hinweis: Die ermittelte und in den Tabellen 14 und 15 aufgeführte erforderliche Gurtanschlussbewehrung wurde auf Grundlage des wahrscheinlichen Risswinkels ermittelt. Maßgebend hierfür ist die kombinierte Beanspruchung infolge Längskraft,

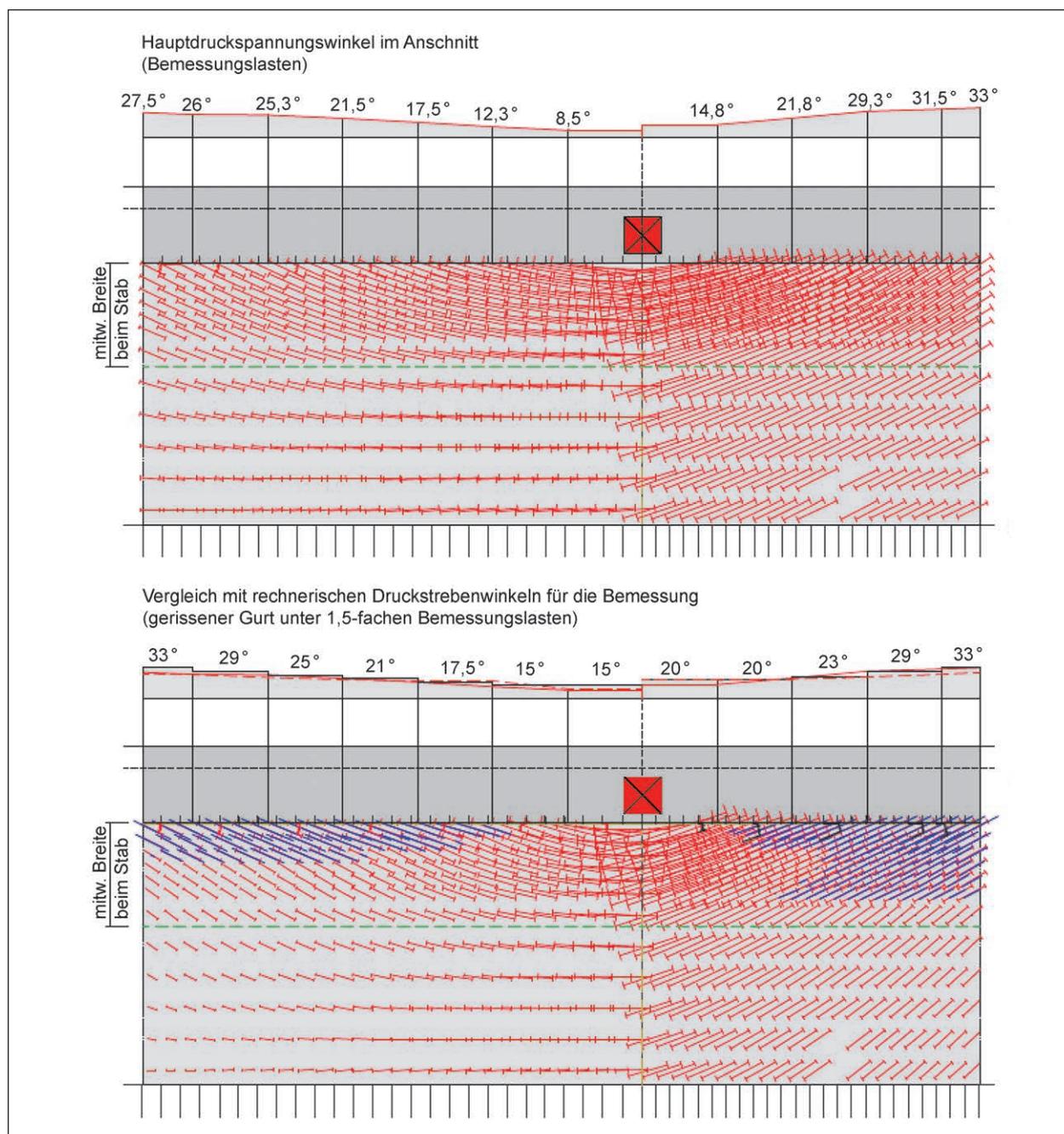


Bild 36: Hauptdruckspannungen und deren Winkel im Gurt unter Bemessungslasten (oben) und unter 1,5-fachen Bemessungslasten inkl. Vergleich mit Winkeln des Bemessungsvorschlags (unten)

Schubspannungen im Gurtanschnitt infolge der Längskraftdifferenz im betrachteten Gurtanschnitt und der Schubbeanspruchung infolge Torsion. Die erforderliche Bewehrung wurde zur besseren Vergleichbarkeit nur für die Schubbeanspruchung infolge der Längskraftdifferenz im betrachteten Gurtabschnitt (Schulterschub) ermittelt. Der Nachweis der Querbewehrung für Torsion ist zusätzlich zu erbringen.

5.2.6 Anwendung des Vorschlags zur Ermittlung der mit der vorhandenen Anschlussbewehrung aktivierbaren Gurtbreite

Da der Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen Balkensteg und Druckgurt auch unter Berücksichtigung der im Vergleich zum Ansatz nach DIN EN 1992-2/NA deutlich flacheren Riss- und damit Druckstrebenwinkel mit dem hier vorgeschlagenen Bemessungsansatz noch nicht ohne rechneri-

sche Bewehrungsdefizite erbracht werden kann, wird die mitwirkende Gurtbreite soweit reduziert, dass der Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen Balkensteg und Druckgurt gerade erbracht werden kann. Für den Nachweis wird die rechnerisch mitwirkende Gurtbreite von 2,80 m auf 1,0 m reduziert.

Da der Querschnitt für den Nachweis der Biegung mit Längskraft noch deutliche Tragreserven aufweist und die Druckzone nur relativ gering ausgelastet ist, ist theoretisch noch eine weitere Reduktion der rechnerisch mitwirkenden Gurtfläche möglich, ohne dass dies zu Einschränkungen der geforderten Sicherheit beim Nachweis der Restquerschnitts für Biegung mit Längskraft im GZT führen würde (siehe Bild 37).

Die auf Basis der reduzierten Gurtbreite ermittelten resultierenden Längsdruckkräfte wurden durch Auswertung der Dehnungsebenen in den verschiedenen Schnitten ermittelt und sind ebenso wie die erforderliche Anschlussbewehrung in Tabelle 16 zusammengestellt. Die rechnerische Riss- bzw. Druckstrebenneigung bleibt unverändert.

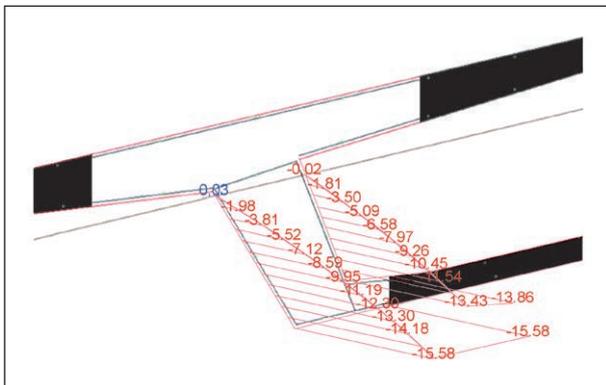


Bild 37: Biegedruckspannungsverteilung im Bereich des Zwischenauflegers bei reduzierter mitwirkender Breite

5.2.7 Anwendung des Vorschlags zur Nachrechnung von ungerissenen Druckgurtanschlüssen mit geringer Anschlussbewehrung

Die Druckgurtscheiben des hier betrachteten nahezu 50 Jahre alten Bauwerks weisen bis zum heutigen Tag keine erkennbare Rissbildung auf. Die Schubkraftübertragung zwischen Balkensteg und Druckgurt kann folglich gewährleistet werden, ohne dass die Hauptzugspannungen die vorhandene Betonzugfestigkeit erreichen bzw. überschreiten. Aus dieser Beobachtung lässt sich jedoch noch kein Rückschluss auf die vorhandene Sicherheit im Hinblick auf ein Aufreißen des Anschlussbereichs ableiten, da das Bauwerk zum einen tatsächlich nur den Gebrauchsbeanspruchungen ausgesetzt ist und zum anderen nicht bekannt ist wie hoch die vorhandenen Zugspannungen im Beton sind.

Das nachfolgende Nachweisformat dient der Einschätzung, ob der in der Beobachtung vor Ort festgestellte Bauteilzustand (ungerissener Zustand I) auch im GZT unter Bemessungslasten mit ausreichender Sicherheit zu erwarten ist.

In Bild 34 sind die ermittelten Dehnungsebenen in verschiedenen Schnitten des Längssystems qualitativ dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Gesamtquerschnitt im Bereich der Mittelstütze infolge Biegung mit Längskraft im GZT in weiten Teilen überdrückt ist und auf der Biegezugseite (Fahrbahnplatte) nur in sehr kleinen Abschnitten mit Rissbildung gerechnet werden muss. Es ist daher wahrscheinlich, dass die Ermittlung der Schub- und Längsspannungen, anders als beim Bauwerk 1 (Kapitel 5.1), nicht nennenswert von der Rissbildung im Gesamtquerschnitt beeinflusst werden.

Für die Ermittlung der Beanspruchungen werden auch für Bauwerk 2 die gleichen Verfahren angewandt wie bereits für Bauwerk 1.

Q	N_{BP} [MN]	Δx [m]	$h_{f,M}$ [m]	$\sigma_{cp,m}$ [MPa]	v_{Ed} [MN/m]	θ [°]	$\cot \theta$ [-]	$v_{Rd,max}$ [MN/m]	erf. as [cm ² /m]
+St	4,03								
+1	2,91	1	0,3	-11,17	0,556	20	2,75	1,23	5,54
+2	2,26	1	0,3	-8,54	0,327	20	2,75	1,23	3,25
+3	1,66	1	0,3	-6,55	0,299	23	2,35	1,38	3,48
+4	1,10	1	0,3	-4,57	0,280	29	1,80	1,62	4,26
+4,5	0,88	0,5	0,3	-3,30	0,225	33	1,54	1,74	4,00

Tab. 16: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit reduzierter Gurtbreite, Bauwerk 2, Druckgurt rechts

Verfahren 1

Hierbei wird das materialphysikalisch nichtlineare Verhalten von Beton und Bewehrung zur Ermittlung der Beanspruchungen im Druckgurt auf Querschnittsebene durchgängig berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt an einem Stabsystem.

Ablauf: (siehe Kapitel 5.1.7).

Verfahren 2

Bei diesem Verfahren wird das materialphysikalisch nichtlineare Materialverhalten vernachlässigt. Die Ermittlung der Spannungen im Druckgurtanschnitt erfolgt vollständig auf Basis der linear elastischen Schnittgrößenermittlung und der Querschnittswerte im ungerissenen Zustand I.

Für weitere Erläuterungen siehe Kapitel 5.1.7.

Ergebnisse Verfahren 1

Die Beanspruchungsermittlung erfolgt an einem Stabquerschnitt mit einem Knotenabstand von 50 cm. Der geringe Abstand der Auswertequerschnitte zueinander wird gewählt, um die Ungenauigkeit, die durch die Vergleichmäßigung des Schubflusses zwischen zwei Schnitten entsteht, möglichst gering zu halten.

In Bild 38 ist die Entwicklung der resultierenden Druckkraft in der Gurtscheibe dargestellt. Deutlich zu erkennen ist ein Versatz im Bereich der Mittelstützung. Dieser ist auf die Spannliedgeometrie und den Spannkraftverlauf zurückzuführen.

Der Schubfluss innerhalb des Gurtanschnitts ergibt sich aus den Differenzkräften zwischen zwei Schnitten geteilt durch die Gesamtgurtanschlusslänge

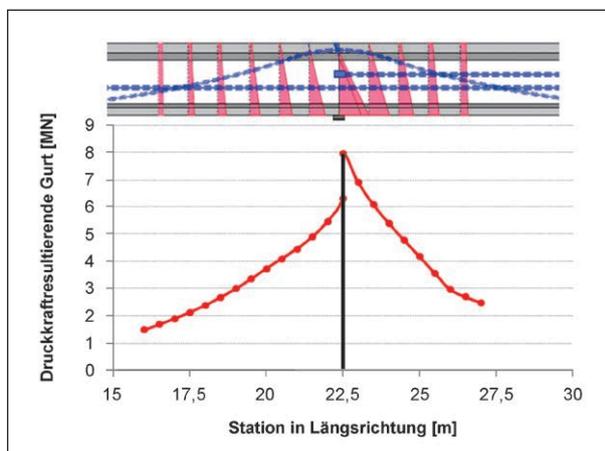


Bild 38: Entwicklung der Längsdruckkraft im mitwirkenden Teil des Gurtquerschnitts

zwischen den betrachteten Schnitten. Durch den über die Länge gleichbleibenden Querschnitt und den stetigen Spannkraftverlauf zwischen Biegemomentennulldurchgang und minimalem Stützmoment, ist die Spannungsermittlung ohne besondere Maßnahmen am Stabmodell möglich.

Die Schubspannungen im Gurtanschnitt sind in Bild 39 dargestellt.

System- und lagerungsbedingt kommt es zu nicht unerheblichen Torsionsbeanspruchungen im Feld 2 rechts der Auflagerung. Die resultierenden Schubspannungen sind in Bild 39 sowohl mit als auch ohne die Berücksichtigung der Torsionsbeanspruchung dargestellt. Der Einfluss der Torsion auf den Schubspannungsverlauf ist gut zu erkennen und nicht vernachlässigbar.

Die mittleren Betonlängsdruckspannungen im Druckgurt sind in Bild 40 dargestellt.

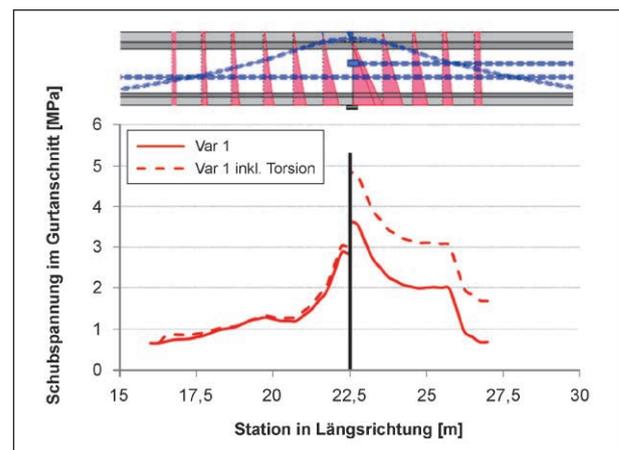


Bild 39: Schubspannungen im Gurtanschnitt mit und ohne Berücksichtigung der Torsion (Var. 1)

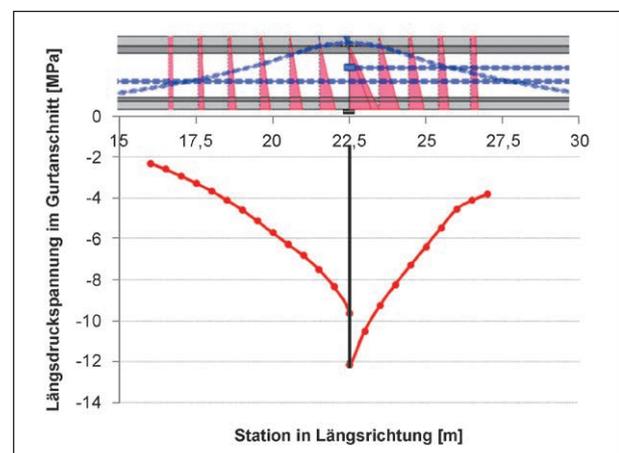


Bild 40: Verlauf der Längsdruckspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell verglichen mit den Längsspannungen am nichtlinearen Schalenmodell

Mit den Schubbeanspruchungen nach Bild 39 und den zugehörigen Betonlängsspannungen nach Bild 40 lassen sich die Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt nach Gleichung (5.5) ermitteln. Hieraus ergibt sich der in Bild 41 dargestellte Hauptzugspannungsverlauf in der Gurtanschlussfuge.

Vergleich der Ergebnisse mit Verfahren 2

Nachfolgend sind die Ergebnisse der linear-elastischen Spannungsermittlung im Gurtanschnitt vollständig ohne Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens im Druck- und Zugbereich des Querschnitts zusammengestellt.

Durch die vergleichsweise geringe Ausnutzung der Betondruckzone und den vernachlässigbar geringen Einfluss der Biegerissbildung im Zuggurt, sind die mittleren Längsdruckspannungen im Gurtan-

schnitt über die komplette Druckgurtlänge nach beiden Verfahren erwartungsgemäß nahezu gleich (siehe Bild 42).

Dementsprechend führen auch die Ermittlungen der Schubspannungen und der Hauptzugspannungen zu vergleichbaren Ergebnissen, wie in den Bildern 43 und 44 zu erkennen ist. Ergänzend sind in Bild 43 auch die am Faltwerk mit nichtlinearen Schalenelementen ermittelten Schubspannungen im Anschnitt zum Gurt im zusätzlich stark durch Torsion beanspruchten rechten Gurtanschnitt dargestellt. Im Abstand $\geq h$ stimmen die Ergebnisse der Berechnungen sehr gut überein. Mit zunehmender Nähe zum Auflager werden die rechnerischen Beanspruchungen im Gurtanschnitt bei der Rechnung am Faltwerk deutlich geringer. Dies kann auf die Möglichkeit der Berücksichtigung der direkten Lasteinleitung in die Lager bei gleichzeitig nur gering ausgenutzter Betondruckzone zurückgeführt werden. Die in der Praxis übliche Modellierung mittels

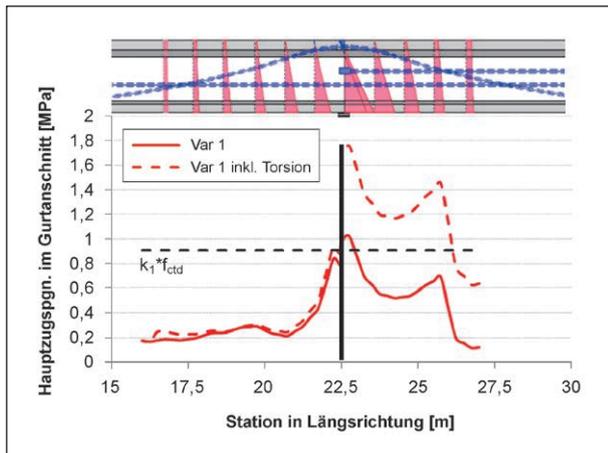


Bild 41: Verlauf der Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell mit und ohne Berücksichtigung der Torsion

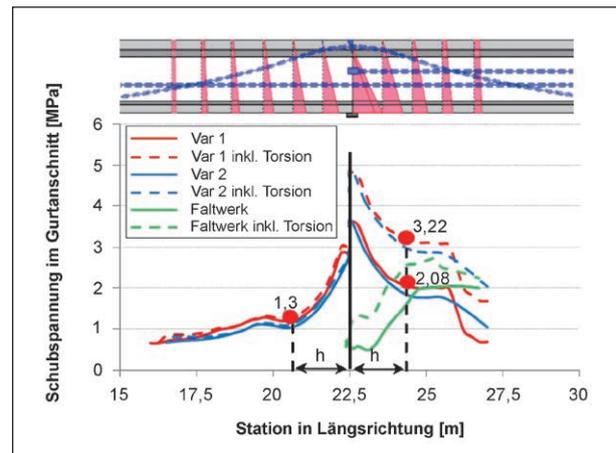


Bild 43: Vergleich der Schubspannungsverläufe im Gurtanschnitt nach den Rechenverfahren 1 und 2

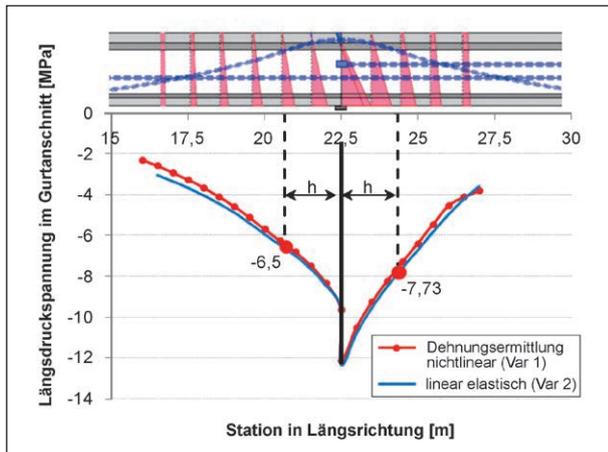


Bild 42: Vergleich der resultierenden Längsdruckkraft in der Bodenplatte im Bereich der Zwischenstützung nach Rechenverfahren 1 und 2

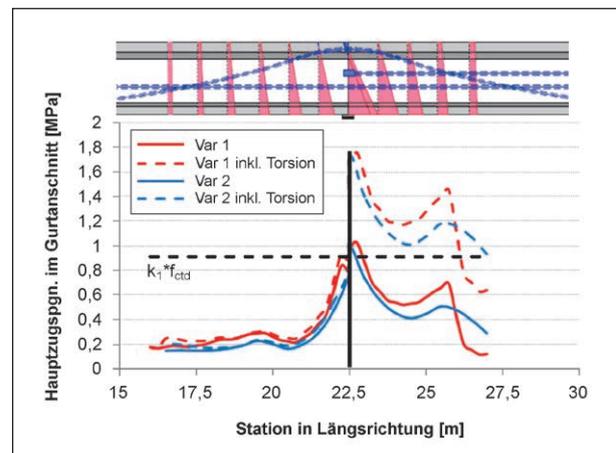


Bild 44: Vergleich der Hauptzugspannungsverläufe im Gurtanschnitt nach den Rechenverfahren 1 und 2

Stabmodell führt zu auf der sicheren Seite liegenden Ergebnissen und bildet das Tragverhalten in den Regelbereichen gut ab.

5.2.8 Zusammenstellung der Ergebnisse

Nachweisführung auf Grundlage gerissener Querschnitte

In Bild 45 sind die nach den unterschiedlichen Verfahren ermittelten erforderlichen Gurtanschlussbewehrungsmengen der vorhandenen Bewehrung gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass das vereinfachte Nachweisformat der DIN EN 1992-2/NA, in dem der Druckstrebenneigungswinkel im Fachwerkmodell für die Berechnung des Druckgurtanschlusses pauschal zu $\cot \theta = 1,20$ angesetzt werden darf, zu sehr konservativen Bemessungsergebnissen führt. Die genauere Berechnung nach DIN EN 1992-2/NA auf Basis des Fachwerkmodells mit Rissreibrungsanteil führt zu deutlich geringeren erforderlichen Bewehrungsmengen im Vergleich zum vereinfachten Verfahren. Die rechnerische Auslastung der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung von über 300 % sind jedoch ein deutlicher Hinweis

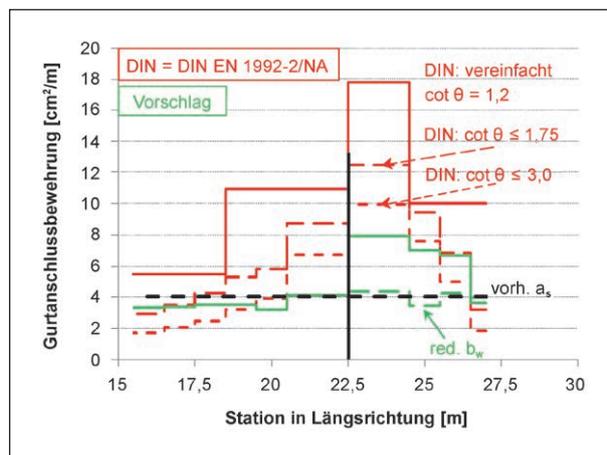


Bild 45: Vergleich der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung mit der nach verschiedenen Nachweisverfahren rechnerisch erforderlichen Bewehrung

darauf, dass das tatsächliche Tragverhalten nur unzureichend durch das Nachweisformat erfasst wird, da derartig hohe rechnerische Defizite nicht mehr durch die eingerechneten Sicherheiten gedeckt werden und das Tragwerk keine Schäden im Bereich des Druckgurtanschlusses aufweist.

Durch die Anwendung des Bemessungsvorschlags aus [14] kann der Nachweis der Druckgurtanschlusses links von der Stützung ohne Defizite erbracht werden. Rechts der Stützung werden die rechnerischen Defizite deutlich reduziert.

Anders als beim Bauwerk 1 ist der Druckgurt infolge Biegung mit Längskraft im vorliegenden Fall nur gering ausgenutzt. Dies hat zur Folge, dass die vorgeschlagenen Nachweisformate hier nur geringere Tragfähigkeitssteigerungen im Vergleich zum Nachweis nach DIN EN 1992-2 zur Folge haben. Gleichzeitig hat die geringe Druckgurtausnutzung jedoch zur Folge, dass eine deutliche Reduktion der rechnerisch mitwirkenden Gurtbreite möglich wird, ohne die Tragfähigkeit des verbleibenden Restquerschnitts zu stark einzuschränken. Der Nachweis des Gesamtquerschnitts für Biegung mit Längskraft kann mit einer deutlich reduzierten Gurtbreite erbracht werden. In der Folge konnte der Nachweis des schubfesten Gurtanschlusses mit der vorhandenen Bewehrung unter Anwendung des Bemessungsvorschlags mit gleichzeitig reduzierter mitwirkender Gurtbreite in allen Bereichen erbracht werden.

In Tabelle 17 sind die jeweils maximalen rechnerischen Auslastungsgrade der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung nach den unterschiedlichen Bemessungsverfahren zusammengestellt.

Durch den vorgeschlagenen Bemessungsansatz unter Berücksichtigung der tatsächlichen Hauptspannungsrichtungen zur Ermittlung des Riss- bzw. Druckstrebenwinkels und unter Vernachlässigung einer etwaigen Rissreibrungskomponente wird eine flachere Druckstrebenneigung in der zweiten Hälfte

Verfahren	erf. a_s [cm ² /m]	vorh. a_s [cm ² /m]	Ausl. [%]
DIN EN 1992-2/NA vereinfacht $\cot \theta = 1,2$	17,8	4,07	437
DIN EN 1992-2/NA Fachwerkmodell mit Rissreibung und $\cot \theta \leq 1,75$	12,5	4,07	307
DIN EN 1992-2/NA Fachwerkmodell mit Rissreibung und $\cot \theta \leq 3,0$	9,97	4,07	245
Bemessungsvorschlag $15^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$	7,96	4,07	195
Bemessungsvorschlag mit reduzierter Gurtbreite	4,40	4,07	108

Tab. 17: Maximale rechnerische Auslastung der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung

des Druckgurtes, die unter höheren Längsdruckspannungen steht, rechnerisch möglich.

In der ersten Hälfte des Druckgurtes (siehe Abschnitt 15 m bis 17,5 m in Bild 45) kann die im Vergleich zum Nachweis nach DIN EN 1992-2/NA fehlende Berücksichtigung eines Traganteils infolge Rissreibung zu geringfügig höheren erforderlichen Bewehrungsmengen führen. Bei Begrenzung des Druckstrebenwinkels auf $\cot \theta = 1,75$ nach DIN EN 1992.2/NA kommt dieser Effekt jedoch nicht zur Wirkung.

In der Folge kann der Nachweis der Schubkraftübertragung mit einer in Summe deutlich reduzierten Gurtanschlussbewehrung erfolgen.

Hinweis: Hier wurde ausschließlich die erforderliche Bewehrung zur Übertragung der Schubbeanspruchung infolge der Längskraftdifferenz im betrachteten Gurtabschnitt aus Biegung ermittelt. Der Nachweis der Querbewehrung für Torsion ist zusätzlich zu erbringen.

Nachweisführung unter Ansatz der Betonzugfestigkeit

Gemäß der Bedingung (4.1) ist nachzuweisen, dass die rechnerischen Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt an keiner Stelle die Bemessungszugfestigkeit überschreitet. Diese errechnet sich im untersuchten Bauwerk zu:

$$\sigma_{1,GA,Rd} \leq k_1 \cdot f_{ctd} = 0,8 \cdot 0,85 \cdot \frac{2,0}{1,5} = 0,91 \text{ MPa}$$

In Bild 46 sind die ermittelten Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt dem Bemessungswiderstand über die Länge des Anschnitts gegenübergestellt.

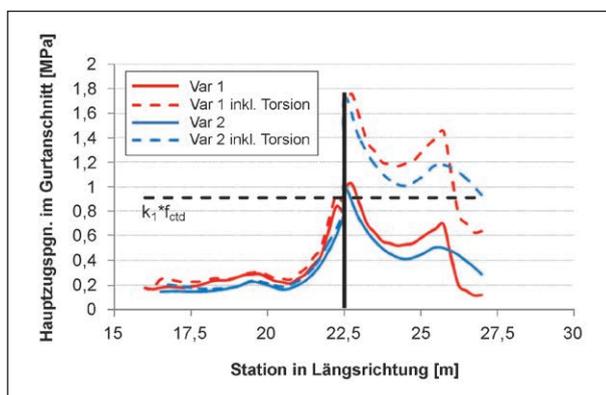


Bild 46: Vergleich des abgeminderten Bemessungswerts der Betonzugfestigkeit mit den ermittelten Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt im GZT

Es ist zu erkennen, dass die schubfeste Verbindung zwischen Druckgurt und Stegquerschnitt links der Stützung auch durch Anwendung des Hauptzugspannungskriteriums nachgewiesen werden kann. Infolge der vergleichsweise niedrigen absoluten Längsdruckspannungen im Gurt bei gleichzeitig großer Torsionsbeanspruchung im Feld rechts der Stützung gelingt der Nachweis über das Hauptzugspannungskriterium hier nicht. In diesem Bereich kann eine Rissbildung im Gurtanschnitt nicht mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden.

5.3 Fazit

In den Kapiteln 5.1 und 5.2 wurden unterschiedliche Bemessungsvorschläge zum Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen Druckgurt (Bodenplatte) und Steg in Hohlkastenbrücken angewandt und vergleichend den Ergebnissen derzeit normativ geregelter Bemessungsansätze gegenübergestellt.

Folgende Schlussfolgerungen können aus den Nachrechnungen der Druckgurtanschlüsse der bestehenden Hohlkastenbrücken gezogen werden:

Die Berücksichtigung der vorhandenen Längsdruckspannungen und der korrespondierenden Schubspannungen zur Ermittlung der wahrscheinlichen Schubrissneigung im Fachwerkmodell führt auch ohne additiven Betontraganteil, z. B. infolge Rissreibung, zu erheblich flacheren Neigungswinkeln der Betondruckstreben in den unter hohen Längsdruckspannungen stehenden Bereichen des Druckgurtes. In Summe wird hierdurch eine gleichmäßigere Spannungsverteilung über die Gurtanschlusslänge erreicht und es werden deutlich geringere erforderliche Bewehrungsquerschnitte ermittelt als nach DIN EN 1992-2/NA. Das Potenzial des Ansatzes wird besonders in Gurtbereichen, die unter hohen Längsdruckspannungen stehen und in diesen Bereichen eine rechnerische Auslastung von um 200 % nach aktuellen Regelwerken aufweisen, gesehen. Bei hohen rechnerischen Auslastungen können ggf. weitergehende Betrachtungen (reduzierte mitwirkende Gurtbreite oder Hauptzugspannungskriterium) zielführend sein.

Hohe Längsdruckspannungen wirken sich bei der Beurteilung der schubfesten Verbindung zwischen Balkensteg und Druckgurt über den Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen im ungerissenen Gurtanschnitt besonders günstig aus. Es muss allerdings beachtet werden, dass vorhandene Quer-

schnittsänderungen über die Bauwerkslänge sowie Spannungsänderungen infolge der Zwischenverankerung einzelner Spannglieder im Steg (zwischen Momentennulldurchgang und betragsmäßig maximalem Biegemoment) erheblichen Einfluss auf die rechnerischen Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt haben und bei der Berechnung berücksichtigt werden müssen. Insbesondere bei der Ermittlung der Beanspruchungen am Stabsystem sind hier Sonderbetrachtungen erforderlich, um die Beanspruchungen möglichst realitätsnah ermitteln zu können (siehe Kapitel 5.1.7). Das Verfahren des Gurtanschlussnachweises über die Begrenzung der schiefen Hauptzugspannungen kann in bereits gerissenen Bereichen und in unmittelbaren Wirkungsbereichen von Spanngliedverankerungen nicht angewandt werden.

In den Kapiteln 5.1.7 und 5.2.7 kamen unterschiedlichen Verfahren zur Berechnung der Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt zur Anwendung. Der Einfluss einer Biegerissbildung im Gesamtquerschnitt infolge Haupttragwirkung in Brückenlängsrichtung konnte hierbei sehr deutlich und anschaulich dargestellt werden.

Beim Verfahren 1 wurden zunächst die Dehnungsebenen in verschiedenen Querschnitten unter der maßgebenden Bemessungslastkombination mit Arbeitslinien für die Querschnittsbemessung ermittelt und die resultierenden Längsspannungen und Längskräfte im mitwirkenden Gurtquerschnitt berechnet. Im Anschluss wurden der Schubfluss bzw. die Schubspannungen zwischen 2 benachbarten Schnitten aus deren Längskraftdifferenz ermittelt. Dieses Verfahren ist ohne größeren Aufwand anwendbar und berücksichtigt sowohl Auswirkungen infolge einer möglichen Biegerissbildung innerhalb des Gesamtquerschnitts als auch die Auswirkungen der Voutenneigung von Querschnitten mit in Längsrichtung veränderlicher Höhe. Jedoch sollten die Abschnittslängen zwischen zwei Schnitten nicht zu groß gewählt werden, da der Schubflussverlauf in diesen Abschnitten rechnerisch vereinfacht konstant angenommen wird. Es wird daher empfohlen, dass der Abstand der Rechenquerschnitte nicht größer angesetzt werden sollte als die halbe Querschnittshöhe. Darüber hinaus müssen Unstetigkeitsstellen im Querschnitts- und Vorspannungsverlauf bei der Wahl der Rechenquerschnitte Berücksichtigung finden.

Beim Verfahren 2 erfolgte die Ermittlung der Normal- und Schubspannungen, die die Grundlage zur

Berechnung der Hauptzugspannungen darstellen, nach Technischer Biegelehre am Balkenelement nach Zustand I. Die für die Ermittlung der Schubbeanspruchungen im Gurtanschnitt maßgebende Bemessungsquerkraft ist hierbei unter Berücksichtigung geneigter Gurt- und Vorspannkkräfte zu ermitteln. Darüber hinaus ist das Verfahren in Bereichen, in denen mit einer Rissbildung infolge Biegung infolge Haupttragwirkung in Brückenlängsrichtung zu rechnen ist nicht anwendbar (siehe Kapitel 5.1.7). Verfahren 2 setzt einen unter Bemessungsschnittgrößen ungerissenen Querschnitt voraus.

Bei dem vorgestellten Ansatz handelt es sich um ein Näherungsverfahren, das die Realität unter Berücksichtigung von Vereinfachungen beschreibt. Der tatsächliche Spannungszustand einer Spannbetonbrücke, beeinflusst durch Eigenspannungen, Schnittgrößenumlagerungen durch Kriechen des Betons nach Systemwechseln, etc. lässt sich im Rahmen einer Nachrechnung nicht bestimmen. Das Verfahren dient daher primär der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit einer Schubrissbildung in den Druckgurtanschlüssen bestehender älterer Bauwerke, die bislang keine Risse aufweisen.

Die das Tragverhalten von Druckgurtanschlüssen beeinflussende Interaktion von Längsdruckkraft und Schubspannung ist unabhängig davon, ob es sich um den Anschluss einer Fahrbahnplatte eines Hohlkasten- oder Plattenbalkenquerschnitts handelt oder von der Bodenplatte eines Hohlkastens. Dennoch unterscheidet sich die Bodenplatte, für welche die hier beschriebenen vereinfachten Nachweisformate entwickelt wurden, hinsichtlich des Zusammenwirkens von Schub- und Längsdruckspannung ganz wesentlich vom Tragverhalten in den übrigen Bereichen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in Mehrfeldsystemen im Bereich von Zwischenstützungen die maximalen Längsdruckspannungen und die maximalen Schubbeanspruchungen in den Bodenplatten von Hohlkästen im gleichen Querschnitt in Längsrichtung auftreten. Hierdurch treten die hohen Längsdruckspannungen, die den Schubwiderstand signifikant vergrößern, in denselben Querschnitten wie die zu übertragenden hohen Schubbeanspruchungen auf. Dieser Zusammenhang ist für die Druckgurtbereiche von Fahrbahn- und Bodenplatte einer Hohlkastenbrücke anschaulich in Bild 47 dargestellt. Die Biegedruckspannungen steigen mit betragsmäßig größer werdendem Biegemoment sowohl in der Bodenplatte im Stützbereich als auch in der Fahrbahnplatte im Feldbereich an. Die im Verhältnis zu den Schubbe-

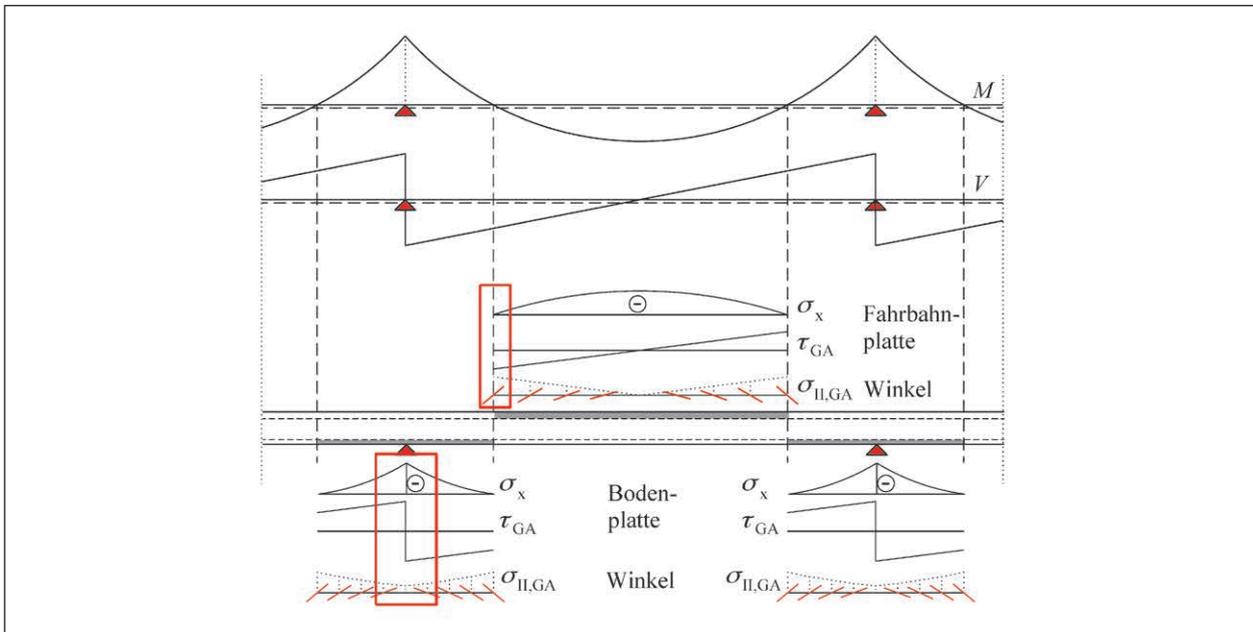


Bild 47: Interaktion der Beanspruchungen infolge Biegung im Bereich der Druckgurtanschlüsse einer Hohlkastenbrücke

anspruchungen in den Gurtanschlüssen stärker anwachsenden Längsdruckspannungen in den Gurten führen dabei mit zunehmender Längsdruckspannung zu flacher werdenden Neigungswinkeln der resultierenden Hauptdruckspannung, die der theoretischen Rissrichtung beim Übergang in den Zustand II entspricht. Von diesem positiven Einfluss der Längsdruckspannungen infolge Biegung profitiert insbesondere der Tragwiderstand der schubfesten Verbindung zwischen Bodenplatte und Steg in den Stützbereichen des Hohlkastens, da nur hier die betragsmäßigen Maximalwerte von Schub- und Längsdruckspannung im selben Querschnitt auftreten.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Schubtragverhalten der Gurt- und Stegquerschnitte von Spannbetonbrücken unterscheidet sich in mehreren Punkten voneinander. Direkte Druckstreben, Sprengwerk- oder Druckbogentrageanteile und damit vergleichbare Mechanismen, die zum Tragwiderstand von Stegquerschnitten beitragen, sind auf die Gurtscheiben gegliederter Querschnitte nicht übertragbar. Darüber hinaus wird das Rissverhalten maßgeblich vom sich stetig über die Bauwerkslänge ändernden Längsspannungszustand beeinflusst. Im Unterschied zum Steg handelt es sich bei der Schubbeanspruchung τ_{xy} im Gurtan-

schnitt um eine mit der Längsbeanspruchung σ_x der Gurtscheibe korrespondierende Größe. Beim derzeit in Deutschland für die Bemessung des schubfesten Anschlusses eingeführten Nachweisverfahren wird dieser Umstand nicht berücksichtigt. Damit liegen die Bemessungs- bzw. Nachrechnungsergebnisse einerseits auf der sicheren Seite, sind jedoch andererseits unter Umständen sehr konservativ. Diese konservative Herangehensweise bei der Bemessung ist für die Planung von Neubauten durchaus sinnvoll, da sie zu einer robusten Tragwerksauslegung führt und sich die Mehrkosten durch die so ermittelte Bewehrung gleichzeitig in Grenzen halten. Allerdings sind für die Bewertung bestehender Bauwerke genauere Verfahren notwendig, da nachträgliche Verstärkungen in diesem Bereich sehr aufwändig und oft technisch fragwürdig sind.

Auf Basis von durchgeführten Nachrechnungen experimenteller Untersuchungen und weiteren Simulationsrechnungen an Bauteilen mit für den Brückenbau relevanten Abmessungen wurden daher einfache Handrechenverfahren abgeleitet. Mit diesen ist es möglich, den Tragwiderstand von Gurten im Biegedruckbereich wirklichkeitsnäher zu ermitteln.

Durch die exemplarische Anwendung der vorgeschlagenen Nachweisformate auf zwei bestehende ältere Spannbetonbrückenbauwerke und den Vergleich der Ergebnisse mit denen nach aktuellen Regelwerken, konnte das Potenzial der Nachweisformate gezeigt werden.

Gleichzeitig sind die hohen rechnerischen Defizite (> 200 %), die teilweise bei der Nachrechnung nach aktuellen Regelwerken errechnet werden, ein deutlicher Hinweis darauf, dass die aktuellen Nachweisformate das Tragverhalten nichtzutreffend und zu konservativ erfassen. Diese konservativen Nachweisformate sind für den Neubau im Hinblick auf eine robuste und zukunftsfähige Tragwerksauslegung auch durchaus sinnvoll. Jedoch sind sie für eine Nachrechnung bestehender Brückenbauwerke nicht geeignet.

Die bereichsweise sehr geringen Druckstrebenneigungswinkel nach dem hier vorgeschlagenen Berechnungsansatz sollten vor diesem Hintergrund nur für die Tragfähigkeitsbewertung bestehender Bauwerke herangezogen werden. Nichtsdestotrotz erscheint im Hinblick auf zukünftige Regelwerksbearbeitungen eine Differenzierung zwischen Gurt- und Stegquerschnitten bei der Festlegung der Grenzwinkel der Druckstrebenneigung auch für den Neubau sinnvoll.

Der vorgestellte Ansatz zur Ermittlung der Tragfähigkeit über den Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen ist für ungerissene Gurte hilfreich. Hierdurch soll nicht nur die augenscheinliche Rissfreiheit rechnerisch bestätigt werden, sondern durch die Nachweisführung auf Bemessungslastniveau und die Festlegung einer abgeminderten Bemessungszugfestigkeit als Nachweisgrenze soll vielmehr gezeigt werden, dass der betrachtete Gurt mit einer ausreichenden Sicherheit ungerissen ist und auch weiterhin keine Rissbildung zu erwarten ist.

In den durchgeführten Untersuchungen wurde jedoch auch deutlich, dass die derzeit vorhandene Versuchsdatengrundlage sehr gering ist. So existieren insgesamt nur sehr wenige Versuche zum Tragverhalten von Druckgurten. Bei einem überwiegenden Teil der Versuche trat der Bruch im Experiment darüber hinaus nicht als Folge eines Versagens des Gurtanschlusses ein.

Weitere experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten des schubfesten Anschlusses der Gurte gegliederter Querschnitte an die Stege sind daher zur Verifikation genauerer Bemessungsverfahren erforderlich.

Bei der Planung solcher Versuche ist insbesondere darauf zu achten, dass die Auswirkungen des sich ändernden Längsspannungszustandes in möglichst großen ungestörten Bereichen des Versuchsträgers untersucht werden können. Diskontinuitätsbe-

reiche sollten im Verhältnis zur Gesamtlänge der Versuchsbalken daher auf möglichst kleine Bereiche begrenzt bleiben (vergleiche auch die Bilder 7 und 8).

Darüber hinaus sollten die Auswirkungen unterschiedlicher Anschlussbewehrungsgrade untersucht werden. Im Hinblick auf die Beurteilung älterer Bauwerke sind hierbei auch die Mindestbewehrung unterschreitende Bewehrungsgrade von Bedeutung, um deren Einfluss auf das Tragverhalten experimentell abzusichern. Balken ohne zusätzliche Gurtbereiche können als Referenzsystem dienen. Hierdurch kann der Einfluss der Gurte mit unterschiedlichen Bewehrungsgraden experimentell sehr gut erfasst werden.

Literatur

- [1] BACCHETTA, A. und BACHMANN, H.: Versuche zur teilweisen Vorspannung für Längsschub und Querbiegung in Druckplatten von Betonträgern. Bericht Nr. 6504-9. Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, 1977
- [2] BACCHETTA, A. und BACHMANN, H.: Versuche über Längsschub, Querbiegung und Quervorspannung in Zugplatten von Betonträgern. Bericht Nr. 6504-10. Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, 1979
- [3] BADAWY, M. und BACHMANN, H.: Versuche über Längsschub und Querbiegung in Druckplatten von Betonträgern. Bericht Nr. 6504-8. Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, 1977
- [4] EIBL, J. und KÜHN, E.: Versuche an Stahlbetonplattenbalken mit gezogener Platte. In: Beton- und Stahlbetonbau 74 (7/1979), S. 176–181
- [5] EIBL, J. und KÜHN, E.: Versuche an Stahlbetonplattenbalken mit gezogener Platte. In: Beton- und Stahlbetonbau 74 (8/1979), S. 204–209
- [6] GÖRTZ, S.: Zum Schubrisssverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normal- und aus Hochleistungsbeton. Dissertation. RWTH Aachen, 2004
- [7] HEGGER, J. und GÖRTZ, S.: Querkrafttragfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbeton-

- balkenaus Normal- und Hochleistungsbeton, DAfStb Heft 557. Beuth Verlag, Berlin, 2007
- [8] HUBER, P., KROMOSER, B., HUBER, T., KOLLEGER, J.: Experimentelle Untersuchung zum Querkrafttragverhalten von Spannbetonträgern mit geringer Schubbewehrung. In: Bauingenieur 91 (6/2016); S. 238–247
- [9] KIZILTAN, H.: Zum Einfluss des Druckbogens auf den Schubwiderstand von Spannbetonbalken. Dissertation. Technische Universität Dortmund, 2012
- [10] MARZAHN, G. et al.: Die Nachrechnung von Betonbrücken – Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie. In: Beton Kalender 2015 (2015), S. 821–904
- [11] MAURER, R.; ARNOLD, A. und MÜLLER, M.: Auswirkungen aus dem neuen Verkehrslastmodell nach DIN EN 1991-2/NA bei Betonbrücken. In: Beton- und Stahlbetonbau 106 (11/2011), S. 747–759
- [12] MAURER, R. et al.: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes, Teil 2: Anpassung des DIN-Fachberichts 102 „Betonbrücken“ an Eurocodes. BASt Heft B 77, Bergisch Gladbach, 2011
- [13] MAURER, R. et al.: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger. BASt Heft B 120, Bergisch Gladbach, 2015
- [14] MÜLLER, M.: Zum schubfesten Anschluss von Druckgurten in Hohlkastenbrücken. Dissertation. Technische Universität Dortmund, 2016
- [15] Nachrechnungsrichtlinie: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie) Ausgabe 05/2011. BMVBS, 2011
- [16] Nachrechnungsrichtlinie: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie) Ausgabe 05/2011, 1. Ergänzung Ausgabe 04/2015. BMVI, 2015
- [17] REINECK, K.-H.: Hintergründe zur Querkraftbemessung in DIN 1045-1 für Bauteile aus Konstruktionsbeton mit Querkraftbewehrung. In: Bauingenieur 76 (4/2001), S. 168–179
- [18] SCHIEFERSTEIN, M.: Der Zugflansch von Stahlbetonplattenbalken unter Längsschub und Querbiegung bei kritischer Druckbeanspruchung des Betons. Dissertation. Universität Karlsruhe (TH), 1985
- [19] SCHLAICH, J. und SCHÄFER, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau. In: Beton Kalender 2001(2001), S. 311–492
- [20] SOFiSTiK: ASE Allgemeine Statik Finiter Element Strukturen, ASE Manual, Version 2014-8. SOFiSTiK AG, 2014

Bilder

- Bild 1: Verschiebungen und Kräfte am idealisiertem Biegeschubrissbild (a) unverformt (b) verformt aus [14]
- Bild 2: Idealisierter Rissbild eines Plattenbalkens mit Druckgurt aus [14] in Anlehnung an die dokumentierten Rissbilder von Versuchsträgern aus [3]
- Bild 3: Entwicklung der Hauptdruckspannungsrichtung im Bodenplattenanschnitt (GA) einer Hohlkastenbrücke in Abhängigkeit der Belastungsart im Zustand I (o), Idealisierter Hauptspannungstrajektorienverlauf (u); I0: Bereich zwischen den Momentennullpunkten [14]
- Bild 4: System und Gurtanschlussbewehrung der Versuchsträger Q1 und Q2 nach [3] aus [14]
- Bild 5: Dehnungen der Gurtanschlussbewehrung und Stauchungen der Gurtplatte des Balkens Q2 in Versuch und Simulation aus [14]
- Bild 6: Last-Verformungsverhalten des Balkens Q2 in der Simulation im Vergleich zu Träger Q4 im Versuch aus [14]
- Bild 7: Versuchsträger von BADAWY und BACHMANN [3] mit Diskontinuitätsbereichen (grau) in Anlehnung an [19] aus [14]
- Bild 8: Hohlkasten Referenzsystem mit Querschnittsabmessungen, Belastung, D-Bereichen und schematischer Darstellung der Strukturmodellierung aus [14]

- Bild 9: Hauptspannungs- und schematische Rissentwicklung innerhalb eines Bodenplattenausschnitts im FE-Modell aus [14]
- Bild 10: Rechnerische Druckstrebenwinkel im Modell unter Gleichlast p_i ($p_2 < p_3 < p_4$) aus [14]
- Bild 11: Rechnerische Druckstrebenwinkel im Modell unter Einzellast P_i ($P_1 < P_2 < P_3 < P_4$) aus [14]
- Bild 12: Entwicklung eines Stabwerkmodells für die Bodenplatte nach Abschluss der Rissentwicklung aus [14]
- Bild 13: Vergleich numerisch und experimentell ermittelter Erstrisslasten mit dem Bemessungsvorschlag nach (4.1) aus [14]
- Bild 14: Vorschlag zur Ermittlung der Druckstrebenneigung und der Verankerungsbereiche der Gurtanschlussbewehrung in Anlehnung an [14]
- Bild 15: Qualitativer Vergleich des Vorschlags zur Ermittlung der Druckstrebenwinkel mit Ergebnissen nichtlinearer Simulationsrechnungen aus [14]
- Bild 16: Reduzierte mitwirkende Gurtfläche in Abhängigkeit der vorhandenen Bewehrung
- Bild 17: Querschnitte des Bauwerks 1 im Stützbereich und resultierende Höhenlage der Spannglieder
- Bild 18: Dehnungsverteilung im GZT in verschiedenen Schnitten in Bauwerkslängsrichtung
- Bild 19: Biegemoment (oben) und vereinfachtes Fachwerkmodell für den Druckgurt nach DIN EN 1992-2/NA (unten)
- Bild 20: Wahl der Druckstrebenwinkel in den verschiedenen Druckgurtabschnitten
- Bild 21: Hauptdruckspannungen (rot), zugehöriger Winkel θ_f sowie rechnerisch gerissene Bereiche im Gurt (blau) inkl. Vergleich mit Winkeln des Bemessungsvorschlags
- Bild 22: Biegedruckspannungsverteilung im Bereich des Zwischenauflegers bei reduzierter mitwirkender Breite
- Bild 23: Darstellung des Einflusses einer Voute auf die maßgebende Querkraft zur Ermittlung des Schubflusses im Gurtanschnitt
- Bild 24: Resultierende Längsdruckkraft in der Bodenplatte im Bereich der Zwischenstützung
- Bild 25: Vergleich der resultierenden Längsdruckkraft in der Bodenplatte aus der Ermittlung am Stab (rot) und einer nichtlinearen Vergleichsrechnung am Schalensystem (grün)
- Bild 26: Verlauf der Schubspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell verglichen mit den Schubspannungen am nichtlinearen Schalenmodell
- Bild 27: Verlauf der Längsdruckspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell verglichen mit den Längsdruckspannungen am nichtlinearen Schalenmodell
- Bild 28: Verlauf der Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell verglichen mit den Hauptzugspannungen am nichtlinearen Schalenmodell
- Bild 29: Vergleich der resultierenden Längsdruckkraft in der Bodenplatte im Bereich der Zwischenstützung nach Rechenverfahren 1 und 2
- Bild 30: Vergleich der Schubspannungsverläufe im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 und 2 am Stabmodell sowie am nichtlinearen Schalenmodell
- Bild 31: Verlauf der Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 und 2 am Stabmodell verglichen mit den Hauptzugspannungen am nichtlinearen Schalenmodell
- Bild 32: Vergleich der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung mit der nach verschiedenen Nachweisverfahren rechnerisch erforderlichen Bewehrung
- Bild 33: Vergleich des abgeminderten Bemessungswerts der Betonzugfestigkeit mit

den ermittelten Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt im GZT

- Bild 34: Bauwerk 2, System mit Dehnungsverteilung (oben) und Beanspruchungen im GZT inkl. Vorspannung (mittig) sowie Querschnitt mit mitwirkender Breite im Stützbereich (unten)
- Bild 35: Wahl der Druckstrebenwinkel in den verschiedenen Druckgurtabschnitten
- Bild 36: Hauptdruckspannungen und deren Winkel im Gurt unter Bemessungslasten (oben) und unter 1,5-fachen Bemessungslasten inkl. Vergleich mit Winkeln des Bemessungsvorschlags (unten)
- Bild 37: Biegedruckspannungsverteilung im Bereich des Zwischenauflegers bei reduzierter mitwirkender Breite
- Bild 38: Entwicklung der Längsdruckkraft im mitwirkenden Teil des Gurtquerschnitts
- Bild 39: Schubspannungen im Gurtanschnitt mit und ohne Berücksichtigung der Torsion (Var. 1)
- Bild 40: Verlauf der Längsdruckspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell verglichen mit den Längsdruckspannungen am nichtlinearen Schalenmodell
- Bild 41: Verlauf der Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt ermittelt nach Verfahren 1 am Stabmodell mit und ohne Berücksichtigung der Torsion
- Bild 42: Vergleich der resultierenden Längsdruckkraft in der Bodenplatte im Bereich der Zwischenstützung nach Rechenverfahren 1 und 2
- Bild 43: Vergleich der Schubspannungsverläufe im Gurtanschnitt nach den Rechenverfahren 1 und 2
- Bild 44: Vergleich der Hauptzugspannungsverläufe im Gurtanschnitt nach den Rechenverfahren 1 und 2
- Bild 45: Vergleich der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung mit der nach verschiedenen Nachweisverfahren rechnerisch erforderlichen Bewehrung

Bild 46: Vergleich des abgeminderten Bemessungswerts der Betonzugfestigkeit mit den ermittelten Hauptzugspannungen im Gurtanschnitt im GZT

Bild 47: Interaktion der Beanspruchungen infolge Biegung im Bereich der Druckgurtanschlüsse einer Hohlkastenbrücke

Tabellen

- Tab. 1: Angaben zur Konstruktion Bauwerk 1
- Tab. 2: Beanspruchungen in den Schnitten 1 bis 7
- Tab. 3: Dehnungen, Spannungen und resultierende Kräfte im Druckgurt
- Tab. 4: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt gem. vereinfachtem Verfahren nach DIN EN 1992-2/NA
- Tab. 5: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. DIN EN 1992-2/NA (Fachwerkmodell mit Rissreibung)
- Tab. 6: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung
- Tab. 7: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit reduzierter Gurtbreite
- Tab. 8: Maximale rechnerische Auslastung der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung
- Tab. 9: Angaben zur Konstruktion Bauwerk 2
- Tab. 10: Spannungen und resultierende Kräfte im Druckgurt (Bauwerk 2)
- Tab. 11: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt gem. vereinfachtem Verfahren nach DIN EN 1992-2/NA für Bauwerk 2
- Tab. 12: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. DIN EN 1992-2/NA (Fachwerkmodell mit Rissreibung), Bauwerk 2, Druckgurt links

-
- Tab. 13: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. DIN EN 1992-2/NA (Fachwerkmodell mit Rissreibung), Bauwerk 2, Druckgurt rechts
- Tab. 14: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung Bauwerk 2, Druckgurt links
- Tab. 15: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit vorhandener Gurtanschlussbewehrung, Bauwerk 2, Druckgurt rechts
- Tab. 16: Erforderliche Anschlussbewehrung für den Druckgurt je Steganschnitt gem. Berechnungsvorschlag für Druckgurtanschlüsse mit reduzierter Gurtbreite, Bauwerk 2, Druckgurt rechts
- Tab. 17: Maximale rechnerische Auslastung der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung

Anhang

Textvorschläge für die Nachrechnungsrichtlinie:

(Als Basis dient der Text der 2. Ergänzung zur Nachrechnungsrichtlinie; als Bezugsnorm hinsichtlich Vorzeichenregeln und Notation dient der DIN Fachbericht 102)

12.4.3.3

„...“

Nachweis der Schubkräfte zwischen Balkensteg und Druckgurten unter Berücksichtigung der Gurtanschlussbewehrung

(16) Der Nachweis des Anschlusses von unter Längsdruckspannungen stehenden Bodenplatten in Hohlkastenbrücken darf auf der Grundlage der nach Gleichungen (12.28) im Nullpunkt der Biegemomentenlinie bzw. (12.29) im Abstand h von der Zwischenunterstützung ermittelten Druckstrebenwinkel θ_f geführt werden. Ein Anteil infolge einer Rissreibung tritt nicht auf. Der Verlauf über die Gurtanschlusslänge darf zwischen den Punkten linear veränderlich angenommen werden (siehe Bild 12.9).

$$\cot \theta_f = \cot \beta = 1,2 - 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cx,Ed}}{f_{cd}} \geq 1,4 \quad (12.28)$$

$$1,4 \leq \cot \theta_f = \frac{\frac{\sigma_{cx,Ed}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx,Ed}}{2}\right)^2 + \tau_{Ed,T+V}^2}}{\tau_{Ed,T+V}} \leq 3,7 \quad (12.29)$$

Dabei sind

$\sigma_{cx,Ed}$ mittlere Längsspannung in Gurtmitte (Druckspannungen mit negativem Vorzeichen)

$\tau_{Ed,V} = \frac{\Delta F_d}{h_f \cdot a_v}$ Schubspannung aus der Längskraftdifferenz im Gurt infolge Biegung mit Längskraft. Für die Ermittlung der Schubspannung $\tau_{Ed,V}$ darf die Längskraftdifferenz ΔF_d in über die Länge $a_v \leq h$ konstant angenommen werden (Bild 12.10)

$\tau_{Ed,T} = \frac{T_{Ed}}{W_T}$ Schubspannung infolge Torsion (mit $W_T = 2A_k \cdot h_f$)

$\tau_{Ed,T+V} = \tau_{Ed,T} + \tau_{Ed,V}$

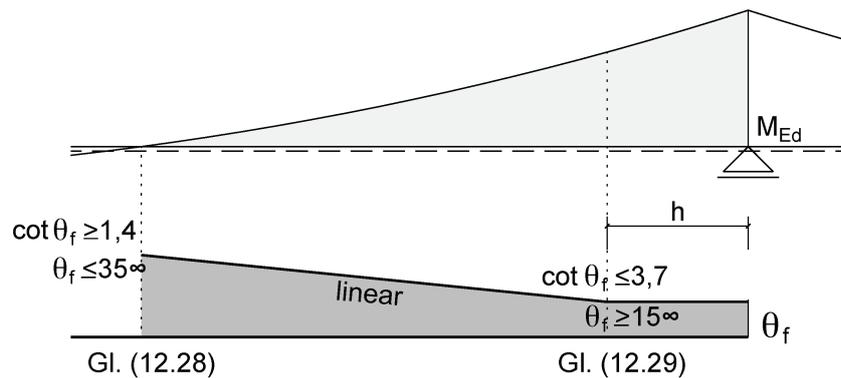


Bild 12.9: Verlauf der Druckstrebenneigung über die Länge des Druckgurtanschlusses im Bereich von Stützmomenten

Für den Nachweis der erforderlichen Anschlussbewehrung und der Tragfähigkeit der Betondruckstrebe darf die Länge des betrachteten Gurtabschnitts a_v bis zum Maximalwert entsprechend DIN Fachbericht 102, Abschnitt II-4.3.2.5 (2) höchstens der halbe Abstand zwischen Momentennullpunkt und Momentenhöchstwert angenommen werden. Bei nennenswerten Einzellasten sollten die jeweiligen Abschnittslängen nicht über die Querkraftsprünge hinausgehen. Über die Länge a_v darf jeweils der Mittelwert der Druckstrebenneigung angesetzt werden (Bild 12.10). In der Regel kann die Nachweisführung durch die Wahl kürzerer Gurtabschnittslängen optimiert werden.

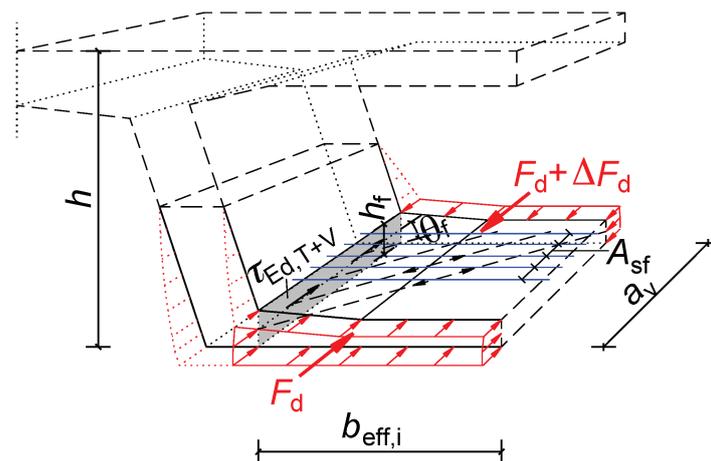


Bild 12.10: Bezeichnungen für den Anschluss der unter Längsdruckspannungen stehenden Bodenplatte an den Hohlkastensteg beim Nachweis unter Berücksichtigung der Gurtanschlussbewehrung

- (17) „...“ (bestehender Absatz mit geänderter Nummerierung)
- (18) „...“ (bestehender Absatz mit geänderter Nummerierung)
- (19) Kann der Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen Balkensteg und Gurt nach 12.4.3.3, Absatz (16) nicht erbracht werden, darf der Nachweis im GZT unter Berücksichtigung einer verminderten rechnerisch mitwirkenden Gurtbreite erfolgen. Die resultierenden Gurtbeanspruchungen sind hierbei vollständig auf Grundlage der reduzierten mitwirkenden Gurtbreite zu ermitteln. Alle Nachweise im GZT sind unter Berücksichtigung der reduzierten mitwirkenden Gurtbreite zu führen.
- (20) Bei einer Kombination der Regelungen in den Absätzen (16) und (19) beträgt die vorläufig eingeschränkte Nutzungsdauer des Bauwerks 20 Jahre (Nachweisklasse C).

Nachweis der Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurt unter Vernachlässigung der Gurtanschlussbewehrung

- (21) In Bodenplatten von Hohlkastenbrücken darf in ungerissenen Bereichen (auch keine verpressten Risse) der Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen Gurt- und Stegquerschnitt unter Vernachlässigung der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung auf der Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums in folgenden Bereichen angewendet werden:
- Querschnittsbereiche, die infolge Biegung mit Längskraft unter Längsdruckspannungen stehen.
 - Querschnittsbereiche, die nicht im unmittelbaren Wirkungsbereich von Spann- gliedverankerungen liegen.
 - Gurtbereiche, in denen die Biegezugspannungen infolge Querbiegung aus Eigengewicht am Querschnittsrand den Wert f_{ctd} nicht überschreiten.

Der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit ergibt sich hierbei zu:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c}$$

Mit

$$\gamma_c = 1,5$$

$$\alpha_{ct} = 0,85$$

- (22) In Bereichen nach Absatz (21) darf der Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen Druckgurt und Steg durch den Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen in der Mittelfläche des Gurtquerschnitts erbracht werden. Aufgrund der über die Länge der Gurtanschlussfuge veränderlichen Hauptzugspannungen sowie des Einflusses einer etwaigen Biegerissbildung am gezogenen Rand des Gesamtquerschnitts sind die maximalen Bemessungswerte der Hauptzug-

spannungen $\sigma_{I,GA,Ed}$ über die volle Gurtanschlusslänge in verschiedenen Schnitten „i“ zu ermitteln.

$$\sigma_{I,GA,Ed,i} \leq k_1 \cdot f_{ctd} = k_1 \cdot \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \quad (12.31)$$

Mit

$$k_1 = 0,8$$

$$\sigma_{I,GA,Ed,i} = 0,5 \cdot \sigma_{cx,Ed,i} + 0,5 \cdot \sqrt{\sigma_{cx,Ed,i}^2 + 4 \cdot (\tau_{Ed,V,i} + \tau_{Ed,T,i})^2} \quad (12.32)$$

$$\sigma_{cx,Ed,i} = \frac{F_{d,i}}{A_{c,G,i}}$$

$$\tau_{Ed,V,i} = \frac{F_{d,i+1} - F_{d,i-1}}{h_f \cdot a_v}$$

$$\tau_{Ed,T,i} = \frac{T_{Ed,i}}{W_T} = \frac{T_{Ed,i}}{2 \cdot A_k \cdot h_f}$$

$F_{d,i}$ Resultierende Längsdruckkraft im mitwirkenden Teil des Druckgurts im betrachteten Schnitt

$A_{c,G,i}$ mitwirkende Gurtfläche im betrachteten Schnitt mit $b_{eff,i}$ gem. DIN FB 102, II-2.5.2.2.1

Der Abstand der Nachweisschnitte „i“ darf $h/2$ nicht überschreiten (Bild 12.11). Darüber hinaus sind Querschnittsänderungen und Spanngliedverankerungen (außerhalb des Gurts) bei der Wahl der Nachweisschnitte zu berücksichtigen. Effekte infolge Spanngliedverankerungen (außerhalb des Gurts) sind bei der Ermittlung der Beanspruchungen in geeigneter Weise zu berücksichtigen. Der Ansatz einer verminderten rechnerisch mitwirkenden Gurtbreite ist bei dieser Nachweisführung nicht zulässig.

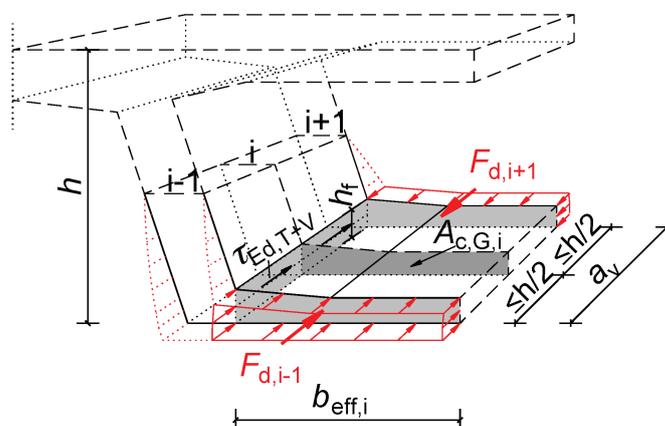


Bild 12.11: Bezeichnungen für den Anschluss der unter Längsdruckspannungen stehenden Bodenplatte an den Hohlkastensteg beim Nachweis in ungerissenen Bereichen

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, Knauf, 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, Brennberger, 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**

in Vorbereitung

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

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack
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.

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

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