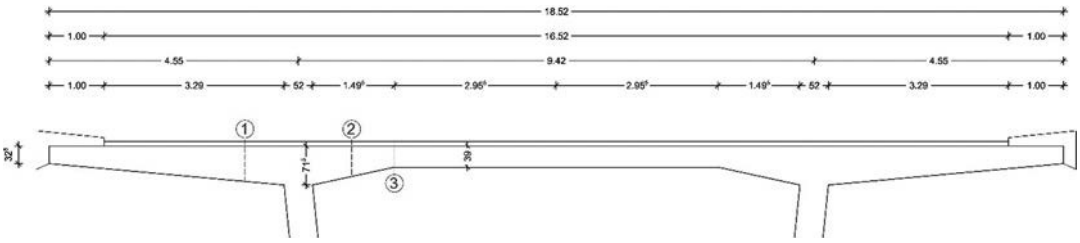


Bild 40. Darstellung der Nachweisschnitte 1 (1*d* außen), 2 (1*d* innen) und 3 (Knickpunkt)

- Bei Durchlaufträgern darf für das Längssystem ein repräsentativer Ersatzeinfeldträger in Feldmitte betrachtet werden.
- Die Querdehnzahl für den Beton beträgt 0,2.

2.4.5 Maßgebende Querkraftbeanspruchung

Bei der Ermittlung der maßgebenden Querkraftbeanspruchung $V_{\mathrm{Ed,FEM}}$ sind folgende Regelungen zu beachten:

- Auflagernahe Einzellasten dürfen gemäß DIN EN 1992-2 im Abstand ≤ 2,0 $d_{\mathrm{Anschnitt}}$ abgemindert werden.
- Es darf keine Lastausbreitung bis zur Plattenmitte angenommen werden, d. h. Belastungsfläche 40 cm × 40 cm.
- Bei üblichen Hohlkasten- und Plattenbalkenquerschnitten kann die maßgebende Laststellung für die Verkehrslasten vereinfachend im Abstand 2,0 $d_{\mathrm{Anschnitt}}$ vom jeweiligen Anschnitt bzw. im Abstand 1,0 d_{Knick} vom Knickpunkt am Ende der Voute angenommen werden (s. Bilder 41 bis 44).
- Die Nachweise werden im Abstand 1,0 $d_{\mathrm{Anschnitt}}$ vom Steg geführt (Schnitte 1 und 2, Bild 40). Dadurch werden numerisch bedingte Singularitäten im Bereich der direkten Lasteinleitung vermieden.
- Bei gevouteten Platten wird der Bereich der dünnen Platte neben der Voute zusätzlich im Knickpunkt nachgewiesen. Dabei steht die Radlast im Abstand 1,0 d_{Knick} vom Knickpunkt (Schnitt 3).

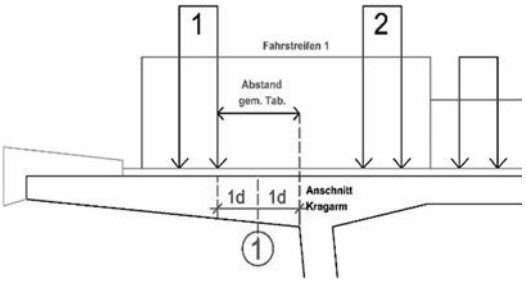


Bild 41. Maßgebende Laststellung im Schnitt 1 bei üblichen Kragarmen ($d \triangleq d_{\mathrm{Anschnitt}}$))

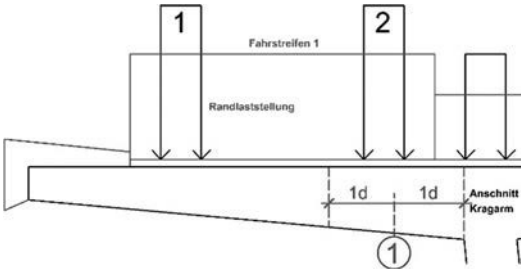


Bild 42. Maßgebende Laststellung im Schnitt 1 bei langen Kragarmen ($d \triangleq d_{\mathrm{Anschnitt}}$)

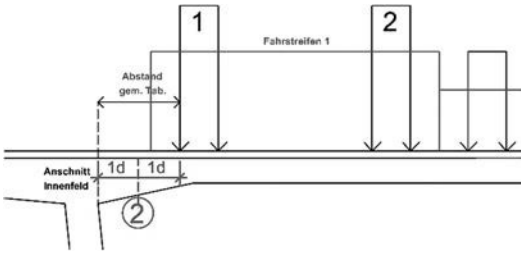


Bild 43. Maßgebende Laststellung im Schnitt 2 ($d \triangleq d_{\mathrm{Anschnitt}}$)

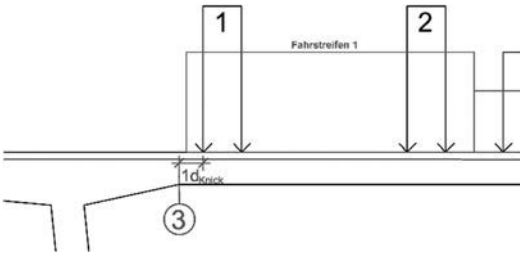


Bild 44. Maßgebende Laststellung im Schnitt 3 ($d \triangleq d_{\mathrm{Knick}}$)

- Die Ermittlung der Schnittgröße $v_{\mathrm{Ed,FEM}}$ erfolgt rechnergestützt mithilfe eines geeigneten FE-Programms mit dem Verkehrslastmodell gemäß DIN EN 1990 bzw. DIN EN 1991-2. Die Schnitt-

größe (Querkraft) ist im Bemessungsschnitt in der Lastachse abzulesen.

Im Rahmen des FE-Vorhabens der BASt [115] wurden für übliche Querschnitte von Plattenbalken- und Hohlkastenbrücken die maßgebenden Laststellungen und die Lage der maßgebenden Nachweisschnitte ermittelt, die in den Bildern 40 bis 44 dargestellt sind.

2.4.6 Experimentelle Ermittlung des Tragwiderstands

Der empirische Beiwert $C_{Rd,c}$ in Gleichung (6.2) von Eurocode 2 zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit bei Bauteilen ohne Querkraftbewehrung in DIN EN 1992-2 wurde an Versuchskörpern kalibriert, bei denen die Querkraftbeanspruchung über die Querschnittsbreite konstant war. Bei Platten mit konzentrierten Einzellasten sind die Plattenquerkräfte jedoch seitlich von der Einzellast deutlich geringer, sodass dort die Tragfähigkeit nicht voll ausgenutzt wird. Dadurch entstehen Tragreserven durch Lastumlagerungen von hoch beanspruchten Bereichen in weniger beanspruchte Bereiche.

Daher wurden die Versuchstraglasten F_u von Platten unter Einzellasten in systematischen Versuchsreihen bestimmt [12, 13]. Daraus wurden mit der FEM die zugehörigen Plattenquerkräfte $v_{u,FEM}$ im Abstand 1,0 d von der Lastplatte berechnet, um zunächst den Tragwiderstand $v_{Rm} = v_{um,FEM}$ abzuleiten. Die Versuchstraglasten entsprechen dem Mittelwert der Tragfähigkeit R_m. Mit den üblichen statistischen Methoden wurden daraus der charakteristische Wert v_{Rk} und der Bemessungswert v_{Rd} mit dem zugehörigen $C^*_{Rd,c}$ abgeleitet.

Für weitere Details wird auf [115] und [117] verwiesen.

2.4.7 Nachweisführung

Es ist sicherzustellen, dass die einwirkende Querkraft den Tragwiderstand $v_{Rd,c}$ nicht überschreitet:

$$v_{Ed,FEM} \leq v_{Rd,c}$$

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit $v_{Rd,c}$:

Der Nachweis ist im Abstand d von den Rändern der Radlast (Blocklast) zu führen. Bei gevouteten Trägern ist dabei die statische Nutzhöhe d am Längsträgeranschnitt maßgebend.

Alternativ zu Gleichung (6.2a) in DIN EN 1992-2 darf $v_{Rd,c}$ bei Anwendung des o. g. Vorgehens zur Ermittlung der Einwirkung $v_{Ed,FEM}$ wie folgt ermittelt werden.

$$v_{Rd,c} = \left[C^*_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot d > v_{Rdc,min}$$
$$= (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot d$$

mit

$C^*_{Rd,c}$ $= (0{,}195/\gamma_c) = 0{,}13$

f_{ck} charakt. Betonfestigkeit [N/mm²]

k $= \sqrt{1 + 200/d} \leq 2{,}0$ mit d [mm]

ρ_l $= A_{sl}/(b_w \cdot d) \leq 0{,}02$

d statische Nutzhöhe

A_{sl} Fläche der anrechenbaren Zugbewehrung, die mindestens (l_{bd} + d) über den betrachteten Querschnitt hinausgeführt wird (s. Bild 6.3 in EC 2/NA(D))

σ_{cp} $= N_{Ed}/A_c < 0{,}2 f_{cd}$ [N/mm²]

N_{Ed} Normalkraft im Querschnitt infolge Vorspannung ($N_{Ed} > 0$ für Druck)

A_c Betonquerschnittsfläche [mm²]

v_{min} $= (0{,}0525/\gamma_c)\, k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ für $d \leq 600$ mm

$v_{Rd,c}$ in [kN/m]

Mit dem Faktor $C^*_{Rd,c}$ darf, abweichend von der üblichen Bemessung für Neubauten mit dem Verkehrslastmodell nach DIN EN 1991-2, das hohe Radlasten mit entsprechenden Sicherheitsreserven enthält, nur der Querkraftwiderstand für vorwiegend durch konzentrierte Einzellasten (LM 1) beanspruchte Fahrbahnplatten ermittelt werden (nicht z. B. bei Wildbrücken mit vorwiegend gleichmäßig verteilten Lasten). Bei der Nachrechnung von Bestandsbrücken darf auch $C^*_{Rd,c} = 0{,}13$ angesetzt werden, obwohl in den Lastmodellen LM 1 (DIN-FB 101) und SLW 60 (DIN 1072) Sicherheitsreserven auf der Lastseite fehlen. Da beim Verkehrslastmodell 1 nach DIN EN 1991-2 aufgrund der sehr hoch angenommenen Radlasten Tragreserven auf der Lastseite vorhanden sind, darf in Abstimmung mit den obersten Straßenbaubehörden der Vorwert bei einer Nachrechnung zu $C^*_{Rd,c} = 0{,}15$ angesetzt werden. Der Ansatz von V_{ccd} ist bei gevouteten Platten und bei Ansatz der erhöhten Werte für $C^*_{Rd,c}$ nicht erlaubt, solange die günstige Wirkung von V_{ccd} nicht eindeutig nachgewiesen ist. Daher gilt:

NCI zu 6.2.1(3) nach DIN EN 1992-2 entfällt bei Anwendung von $C^*_{Rd,c} = 0{,}13$.

Außerdem sei darauf hingewiesen, dass der erhöhte Vorfaktor $C^*_{Rd,c}$ nur für den Querkraftnachweis im Abstand 1,0 d vom Rand der Lastplatte gilt, da er entsprechend kalibriert wurde.

2.5 Zug- und Druckgurtanschluss

2.5.1 Einleitung und Grundlagen

Die Beurteilung der Tragfähigkeit des schubfesten Anschlusses von Gurten gegliederter Querschnitte erfolgt in Deutschland derzeit analog zum Querkraftnachweis für Stegquerschnitte mit einem Fachwerkmodell unter Berücksichtigung eines zusätzlichen Betontraganteils infolge Rissreibung. Bei der Nachrechnung älterer Spannbetonhohlkastenbrücken werden auf dieser Grundlage insbesondere im Bereich von Zwischenstützungen häufig rechnerische Defizite beim Nachweis des schubfesten Anschlusses zwischen Hohlkastensteg und unter Längsdruckspannungen stehender Bodenplatte ermittelt [118]. Der Auslastungsgrad der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) liegt in diesem Bereich bei einem Groß-

teil ausgewerteter Nachrechnungen deutlich oberhalb von 200%. Diese hohen rechnerischen Defizite können nicht allein auf die Zunahme des Schwerverkehrsaufkommens seit Errichtung der Bauwerke zurückgeführt werden. Die Verkehrseinwirkungen liefern nur einen vergleichsweise geringen Beanspruchungsanteil an den gesamten Bemessungsschnittgrößen im GZT. In der Regel stellen die relativ hohen Eigengewichtsanteile bereits etwa 70% der Gesamtbeanspruchung [119]. Die Hauptursachen für die bei der Nachrechnung festzustellenden rechnerischen Defizite auf Querschnittsebene liegen daher in geänderten Bemessungsvorschriften und Konstruktionsregeln.

Bis zur Einführung der DIN-Fachberichte für den Brückenbau im Jahr 2003, die auf europäischen Vornormen basierten und eine nationale Übergangslösung bis zur Herausgabe der endgültigen europäischen EN-Normen mit zugehörigen nationalen Anhängen darstellten, erfolgte der Nachweis des schubfesten Anschlusses von Gurten an die Stege gegliederter Spannbetonquerschnitte nach den Regeln der Spannbetonnorm DIN 4227 [18]. Hiernach wurden die Querschnitte für die Bemessung in zwei das Schubtragverhalten kennzeichnende Zonen unterteilt. In die Zone a durften jene Querschnitte eingruppiert werden, bei denen aufgrund betragsmäßig begrenzter Biegezugspannungen unter der maßgebenden Einwirkungskombination keine Biegerissbildung zu erwarten ist. Schubrisse entstehen hier in der Regel schlagartig in Form von Schubzugrissen. In der Zone b hingegen ist mit einer Biegezugrissbildung zu rechnen. Die Risse knicken hier oberhalb der Biegezugbewehrung ab und wachsen als geneigte Biegeschubrisse weiter in den Querschnitt. Für die gedrückten Bodenplattenbereiche von Hohlkastenbrücken galt seinerzeit eine besondere Regelung. So wurden die in Längsrichtung vollständig überdrückten Gurtbereiche als Teilquerschnitte losgelöst vom Gesamtquerschnitt betrachtet und es galten die deutlich günstigeren Bemessungsvorgaben der Zone a.

Eine Unterteilung der Querschnitte in Abhängigkeit ihres zu erwartenden Schubrissverhaltens sehen die derzeitigen Bemessungsnormen nicht mehr vor. Die Ermittlung der Tragfähigkeit des schubfesten Anschlusses von Gurten gegliederter Querschnitte an die Stege erfolgt in Analogie zum Querkraftnachweis für Balkenstege auf Grundlage eines Fachwerkmodells unter der Annahme gerissener Querschnitte. Das in Deutschland verwendete Fachwerkmodell mit Rissreibung wurde für die Querkraftbemessung von Stegquerschnitten entwickelt und wird ohne nennenswerte Modifikationen auch für den Nachweis schubfester Gurtanschlüsse angewendet. Die Druckstrebenneigung wird hierbei auf Grundlage eines theoretischen Schubrisswinkels, der durch einen Betontraganteil infolge Rissverzahnung modifiziert wird, ermittelt. Die Gleichungen zur Ermittlung des theoretischen Risswinkels erfordern die Berücksichtigung des Bemessungswerts der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunkts des Querschnitts. Die gleichzeitig im Querschnitt wirkende Schubspannung geht jedoch nicht in die Berechnung ein. Stattdessen berücksichtigt das Verfahren implizit eine fiktive Schubspannung, durch die in Kombination mit der tatsächlich vorhandenen Betonlängsspannung die resultierende Hauptzugspannung die Betonzugfestigkeit gerade erreicht [53, 120]. Die mit diesem Verfahren ermittelte Richtung der Hauptdruckspannung entspricht dem theoretischen Risswinkel β bei Erreichen der Betonzugfestigkeit unter ansteigender Schubbeanspruchung, allerdings konstant gehaltener Längsspannung [120].

Die beschriebenen Änderungen der Regelwerke führen insbesondere für die Anschlussbereiche von unter hohen Längsdruckspannungen stehenden Bodenplatten, die nach DIN 4227 noch der für die Schubbemessung günstigen Zone a zugeordnet wurden, zu sehr ungünstigen Ergebnissen bei der Nachrechnung. Gleichzeitig vernachlässigt das Nachweiskonzept wesentliche den Tragwiderstand erhöhende Einflüsse.

2.5.2 Optimierungspotenzial des Nachweisformats

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 Biegerissen. 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 45 entnommen werden.

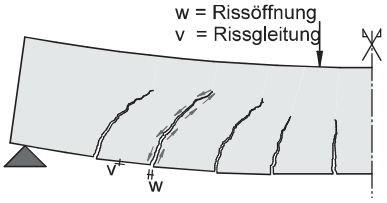


Bild 45. Verschiebungen und Kräfte am idealisierten Biegeschubrissbild eines Balkens

Im Gegensatz zu Balkenstegen, die die Biegedruck- und die Biegezugzone eines Querschnitts schubfest miteinander verbinden und bei welchen die vorhandene Längsspannung in der Schwerachse weitgehend unabhängig von der einwirkenden Querkraft ist, stellen die Gurte eine Erweiterung der jeweiligen Biegedruck- bzw. Biegezugzone dar. Die Einleitung der Längsspannungen vom Steg in die daran anschließenden Gurte wird durch die Schubspannungen im Anschnitt zwischen Gurt und Steg bewirkt. Folglich sind die vorhandenen Längskräfte in den Gurten direkt abhängig von den Schubspannungen im Anschnitt zwischen Steg und Gurt. Die Verlaufscharakteristiken der Längs- und Schubspannungen entsprechen den Biegemoment- und Querkraftverläufen in Bauwerkslängsrichtung. Der Anstieg der Längsspannungen wird somit immer durch ein Polynom höheren Grads beschrieben als der Verlauf der zugehörigen Schubbeanspruchung im Gurtanschnitt (vgl. Bild 46, Mitte). Die beschriebene Entkopplung von Schub- und Längsspannung bei der Anwendung des Fachwerkmodells mit Rissreibung zur Tragfähigkeitsermittlung von Gurtanschlüssen stellt daher eine grobe Vereinfachung dar, durch welche insbesondere die positive Wirkung einer mit größerer werdender Schubbeanspruchung ansteigenden Längsdruckkraft nicht berücksichtigt wird.

Die mit steigender Schubbeanspruchung im Gurtanschnitt anwachsende Längsdruckkraft hat einen günstigen Einfluss auf die Höhe der zur Erstrissbildung führenden Hauptzugspannungen, auf die Risswinkel und deren Verlauf über die Bauwerkslängsrichtung (vgl. Bild 46, unten). So geht mit größer werdendem Längsdruck eine flachere Rissneigung in den Druckgurten einher. Dieser Zusammenhang gilt unabhängig davon, ob es sich um den Druckgurtanschluss der Fahrbahnplatte einer Plattenbalken- oder Hohlkastenbrücke handelt, oder ob der Druckgurtanschluss einer Bodenplatte in einer Hohlkastenbrücke betrachtet wird. Dennoch unterscheidet sich letztgenannter hinsichtlich des Zusammenwirkens von Schub- und Längsbeanspruchung ganz wesentlich vom Tragverhalten in den übrigen Bereichen. In den Druckgurtanschlüssen der Bodenplatten mehrfeldriger Hohlkastenbrücken treten die betragsmäßig maximalen Schub- und die maximalen Längsdruckspannungen in den gleichen Querschnitten auf. Die positive Wirkung der hohen Längsdruckspannungen auf den Schubtragwiderstand kann hier genutzt werden. In Fahrbahnplatten treten die maximalen Längsdruckspannungen im Bereich des maximalen Feldmoments des Längstragsystems auf. Hier sind die zugehörigen Schubbeanspruchungen minimal. Darüber hinaus stellen die Querbiegemomente in Fahrbahnplatten aus der unmittelbaren Verkehrsbeanspruchung eine maßgebende Bemessungsgröße dar.

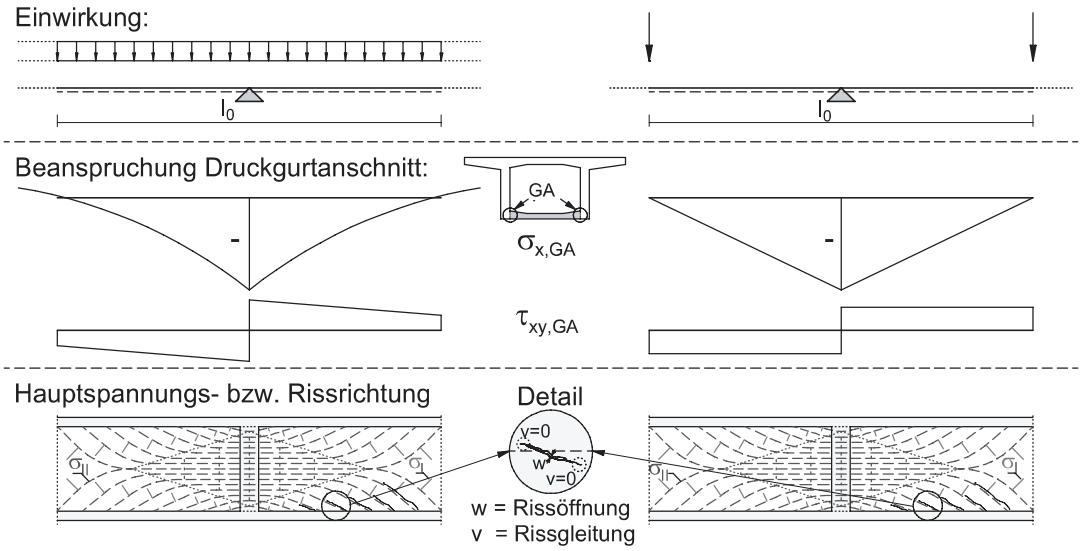


Bild 46. Idealisierte Spannungsverläufe im Druckgurt in Abhängigkeit der Belastungsart

2.5.3 Nachweisformate für die Nachrechnung

Die nachfolgend beschriebenen Nachweisformate sind speziell für die Ermittlung der Tragfähigkeit des schubfesten Anschlusses von unter Biegedruckspannungen stehenden Bodenplatten in Hohlkastenbrücken aufgestellt worden. Sie berücksichtigen die Interaktion von Schub- und zugehörigen Längsspannungen aus äußeren Einwirkungen. Hierbei werden in Anlehnung an die Vorgehensweise der ersten Ergänzung der Nachrechnungsrichtlinie [4] für die Ermittlung des Querkraftwiderstands von Balkenstegen zwei Nachweisformate angegeben.

Das erste Nachweisformat basiert auf dem Hauptzugspannungskriterium. Es darf nur in ungerissenen Bereichen eingesetzt werden und berücksichtigt den günstigen Einfluss hoher Längsdruckspannungen auf die Größe der zur Erstrissbildung führenden Hauptzugspannungen. Beim zweiten Nachweisformat wird der Gurtanschluss als gerissener Querschnitt berücksichtigt. Grundlage ist das Fachwerkmodell im DIN-Fachbericht 102. Die rechnerisch anzunehmenden Druckstrebenwinkel werden jedoch auf Basis der tatsächlichen Spannungsverhältnisse und den zu erwartenden Risswinkeln senkrecht zur Hauptzugspannung modifiziert. Zusätzliche Betontraganteile infolge Rissreibung, Sprengwerk- oder Druckbogenwirkung treten nicht auf.

Ein Traganteil infolge Rissreibung wird aus den folgenden Gründen ausgeschlossen. Zum einen handelt es sich bei den möglichen Schubrissen im Druckgurtanschnitt um reine Schubzugrisse, die nicht den Verlauf bereits vorhandener Biegerisse fortsetzen. Die zu erwartenden Schubrisse sind daher in ihrer Ausdehnung innerhalb des Druckgurts begrenzt und haben kein zu einem Bauteilrand hin offenes Rissende. Aus Verträglichkeitsgründen folgt, dass die gegenseitige Verschiebung der Rissufer zu den Rissenden hin gegen null gehen muss. Daher sind über die Risslänge ebenfalls keine nennenswerten Gleitungen zu erwarten (vgl. Bild 46, unten). Durch die behinderte gegenseitige Verschiebung der Rissufer kann keine Reibungskomponente im Riss aktiviert werden. Zum anderen wird der Einfluss des Traganteils infolge Rissreibung mit zunehmender vorhandener Längsdruckspannung und flacher werdender Rissneigung vernachlässigbar.

Traganteile aus Druckbogen- oder Sprengwerkwirkung entstehen durch die Interaktion von Längsbiegung und Querkraft im betrachteten Querschnitt. Um aus dem geneigten Verlauf der Druckkraft eine entlastende Wirkung im Hinblick auf eine erforderliche Gurtanschlussbewehrung ableiten zu können, ist überdies eine unmittelbare Lasteinleitung in der Gurtebene zur Umlenkung der resultierenden Bogen- bzw. Sprengwerkkraft erforderlich. Diese Voraussetzungen treffen auf Gurtquerschnitte nicht zu. Aus diesem Grund werden derartige Traganteile in Gurtscheiben ausgeschlossen.

2.5.3.1 Nachweisführung in ungerissenen Bereichen

Der Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen Gurt und Steg darf in ungerissenen Bereichen der Bodenplatten von Hohlkastenbrücken (auch keine verpressten Risse) auf der Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums mit den Spannungen $\sigma_{cx,Ed}$ und τ_{Ed} unter folgenden Voraussetzungen erfolgen:

Die Gurte müssen infolge Biegung mit Längskraft unter Längsdruckspannungen stehen.

Die Gurte befinden sich nicht im unmittelbaren Wirkungsbereich von Spanngliedverankerungen, da durch die Einleitung der hohen konzentrierten Vorspannkräfte eine örtliche Rissbildung nicht ausgeschlossen werden kann.

Die Biegezugspannungen im Gurtanschnitt dürfen infolge Querbiegung aus dem Eigengewicht der Bodenplatte am Querschnittsrand den Wert f_{ctd} nicht überschreiten. Hierdurch wird die Anwendung auf Bodenplatten mit großen Spannweiten in Querrichtung ausgeschlossen und der Querbiegeeinfluss begrenzt.

Der Bemessungswert der Betonzugfestigkeit ergibt sich wie folgt:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \tag{83}$$

mit

$\gamma_c = 1{,}5$ und $\alpha_{ct} = 0{,}85$

Die Nachweisführung darf unter Einhaltung der genannten Voraussetzungen in der Mittelfläche des Gurtquerschnitts im Anschnitt zum Steg erfolgen. Aufgrund der über die Länge der Gurtanschlussfuge veränderlichen Hauptspannungen sind die Bemessungswerte der Hauptzugspannungen $\sigma_{I,GA,Ed,i}$ über die volle Gurtanschlusslänge in verschiedenen Schnitten „i“ zu ermitteln. Für den Bemessungswert der Hauptzugspannung ist die folgende Bedingung nachzuweisen.

$$\sigma_{I,GA,Ed,i} \le k_1 \cdot f_{ctd} = k_1 \cdot \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \tag{84}$$

mit

$k_1 = 0{,}8$

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

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

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

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

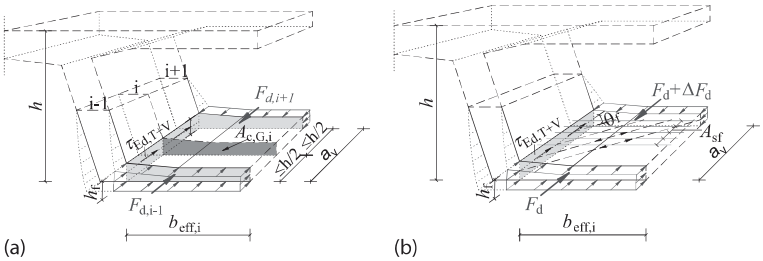


Bild 47. Bezeichnungen für den Anschluss der Bodenplatte an den Hohlkastensteg; (a) für den Nachweis in ungerissenen Bereichen, (b) für den Nachweis unter Berücksichtigung der Gurtanschlussbewehrung

$F_{d,i}$ 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 $h/2$ in Bauwerkslängsrichtung nicht überschreiten. Durch den geringen Abstand werden die Ungenauigkeiten der Annahme eines konstanten Schubflusses zwischen zwei Nachweisschnitten begrenzt. Darüber hinaus sind Querschnittsänderungen und Spanngliedverankerungen, die sich im Querschnitt außerhalb des Gurts befinden, bei der Wahl der Nachweisschnitte und der Ermittlung der Beanspruchungen zu berücksichtigen. Der Ansatz einer verminderten rechnerisch mitwirkenden Gurtbreite ist bei dieser Nachweisführung nicht zulässig, da die hierbei unterstellte Beanspruchungsumlagerung eine Rissbildung erforderlich macht. Die verwendeten Formelzeichen sind zum besseren Verständnis in Bild 47 dargestellt.

2.5.3.2 Nachweisführung in gerissenen Bereichen

Nachweisführung auf Grundlage eines Fachwerkmodells mit modifizierten Druckstrebenwinkeln:

Der Nachweis des schubfesten Anschlusses der Bodenplatten darf bei Spannbetonhohlkastenbrücken auf Grundlage der nach Gl. (85) im Nullpunkt der Biegemomentenlinie bzw. (86) im Abstand h von der Zwischenunterstützung ermittelten Druckstrebenwinkel cot θ_f geführt werden. Ein Anteil infolge einer Rissreibung tritt nicht auf (s. Abschnitt 2.5.3). Der Verlauf über die Gurtanschlusslänge darf zwischen den Punkten näherungsweise linear veränderlich angenommen werden.

$$\cot\theta_f = \cot\beta = 1{,}2 - 1{,}4 \cdot \frac{\sigma_{cx,Ed}}{f_{cd}} \geq 1{,}4 \tag{85}$$

$$1{,}4 \leq \cot\theta_f = \left| \frac{\frac{\sigma_{cx,Ed}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{cx,Ed}}{2}\right)^2 + \tau_{Ed,T+V}^{\;2}}}{\tau_{Ed,T+V}} \right| \leq 3{,}7 \tag{86}$$

Dabei sind

$\sigma_{cx,Ed}$ mittlere Längsspannung in Gurtmitte

$\tau_{Ed,V} = \dfrac{\Delta F_d}{h_f \cdot a_v}$ 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

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

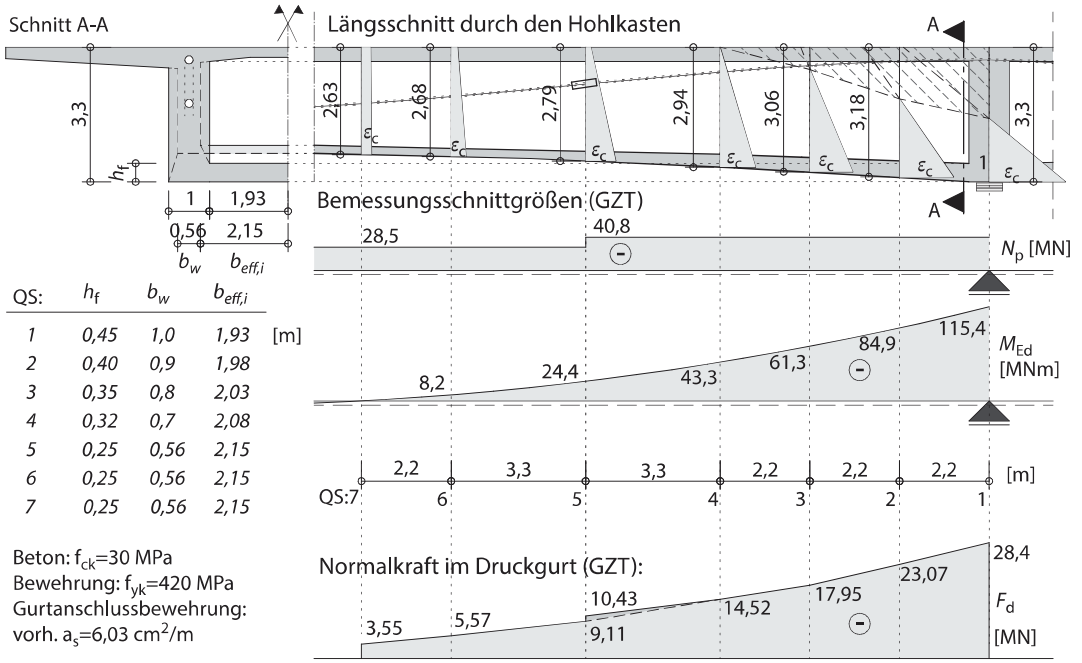
Daraus resultiert die max. Schubspannung zu

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

Kann der Nachweis der schubfesten Verbindung zwischen Balkensteg und Gurt nicht auf Grundlage der mitwirkenden Gurtbreite nach DIN-Fachbericht 102 erbracht werden, darf der Nachweis im GZT unter Berücksichtigung einer verminderten rechnerisch mitwirkenden Gurtbreite erfolgen. Alle Nachweise im GZT sind hierbei unter Berücksichtigung der reduzierten mitwirkenden Gurtbreite zu führen.

2.5.4 Berechnungsbeispiel

Die exemplarische Nachweisführung zur Ermittlung der Tragfähigkeit des schubfesten Anschlusses der Bodenplatte einer Hohlkastenbrücke im Stützbereich erfolgt an dem in Bild 48 dargestellten System. Das Bauwerk der Brückenklasse 60 wurde in den 1960er-Jahren mit einem Beton B450; Betonstahl der Güte BSt IIIb nach DIN 488 und Sigma St 145/160 oval Spannstahl errichtet. Neben dem Längs- und Querschnitt im betrachteten Bereich des Hohlkastens sind die maßgebenden Bemessungsschnittgrößen inklusive Vorspannung sowie der Normalkraftverlauf im mitwirkenden Teil der Bodenplatte dargestellt. Die Ermittlung der Normalkraftbeanspruchung im Druckgurt erfolgte durch die Auswertung der Dehnungsebenen in den dargestellten Schnitten auf Grundlage der Materialarbeitslinien für die Quer-



QS:	h_f	b_w	$b_{eff,i}$	
1	0,45	1,0	1,93	[m]
2	0,40	0,9	1,98	
3	0,35	0,8	2,03	
4	0,32	0,7	2,08	
5	0,25	0,56	2,15	
6	0,25	0,56	2,15	
7	0,25	0,56	2,15	

Beton: f_{ck}=30 MPa
Bewehrung: f_{yk}=420 MPa
Gurtanschlussbewehrung:
vorh. a_s=6,03 cm²/m

Bild 48. System und maßgebende Beanspruchungen als Eingangswerte für den Nachweis des Druckgurtanschlusses der Bodenplatte

schnittsbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT).

2.5.4.1 Nachweisführung auf Grundlage des Fachwerkmodells

Zunächst erfolgt die Nachweisführung auf Grundlage des Fachwerkmodells mit modifizierten Druckstrebenwinkeln. Für den Ergebnisvergleich wird die erforderliche Gurtanschlussbewehrung zusätzlich auf Grundlage des DIN-Fachberichts 102 (Nachrechnung Stufe 1) ermittelt.

Der Eingangswert $\sigma_{cx,Ed}$ für die Ermittlung des Druckstrebenwinkels im Momentennulldurchgang (QS 7) nach Gl. (85) entspricht dem zentrischen Anteil der Vorspannung:

$$\sigma_{cx,Ed,7} = \frac{N_{p,7}}{A_{c,7}} = \frac{-28{,}5\ \text{MN}}{7{,}93\ \text{m}^2} = -3{,}6\ \text{MPa}$$

Durch Einsetzen in Gl. (85) folgt:

$$\cot\theta_f = \cot\beta = 1{,}2 - 1{,}4 \cdot \frac{-3{,}6\ \text{MPa}}{17\ \text{MPa}}$$
$$= 1{,}5 \geq 1{,}4 \rightarrow \cot\theta_f = 1{,}5$$

Die Eingangswerte $\sigma_{cx,Ed}$ und τ_{Ed} im Abstand h = 3,3 m vom Zwischenauflager werden aus der mittleren Längsdruckkraft sowie der Längskraftänderung zwischen den Schnitten QS 2 und QS 3 je Steganschnitt (2 vorhanden) wie folgt ermittelt:

$$\sigma_{cx,Ed,2-3} = \frac{\frac{F_{d,2} + F_{d,3}}{2}}{h_f \cdot b_{eff} \cdot 2} = \frac{-\frac{17{,}95\ \text{MN} + 23{,}07\ \text{MN}}{2}}{0{,}375\,\text{m} \cdot 2{,}0\,\text{m} \cdot 2}$$
$$= -13{,}6\ \text{MPa}$$

$$\tau_{Ed,T+V,2-3} = \tau_{Ed,V,2-3} = \frac{\Delta F_{d,2-3}}{h_f \cdot a_v \cdot 2}$$
$$= \frac{23{,}07\ \text{MN} - 17{,}95\ \text{MN}}{0{,}375\,\text{m} \cdot 2{,}2\,\text{m} \cdot 2} = 3{,}1\ \text{MPa}$$

Durch Einsetzen in Gl. (86) folgt:

$$1{,}4 \leq \cot\theta_f = \left| \frac{\frac{-13{,}6}{2} - \sqrt{\left(\frac{13{,}6}{2}\right)^2 + 3{,}1^2}}{3{,}1} \right|$$
$$= 4{,}6 \nleq 3{,}7 \rightarrow \cot\theta_f = 3{,}7$$

Die Druckstrebenneigung im Modell über die Anschlusslänge des Druckgurts wird durch einen linearen Verlauf zwischen den beiden errechneten Winkeln angenähert. Innerhalb der gewählten rechnerischen Gurtabschnittslängen wird hierbei jeweils der konstante Mittelwert angesetzt (s. Bild 49). Zum Vergleich sind

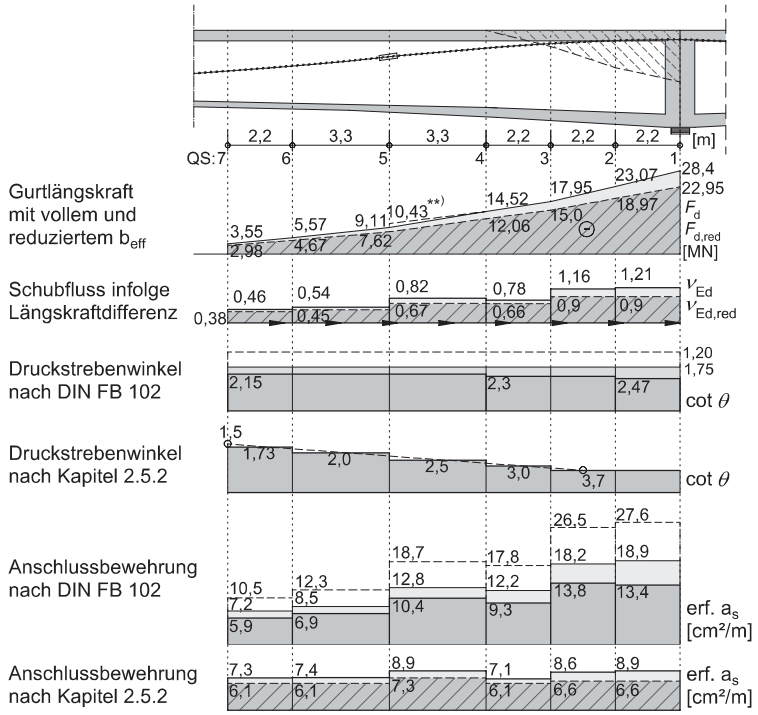


Bild 49. Beanspruchung, rechnerische Druckstrebenwinkel und erforderliche Gurtanschlussbewehrung nach DIN-Fachbericht 102 sowie modifiziertem Druckstrebenwinkel und reduzierter mitwirkender Gurtbreite

**) Der durch die Spanngliedverankerung im Steg verursachte Längskraftsprung in der Bodenplatte (QS 5) ist eine Folge der Berechnung mit Stabelementen und wird als Lasteinleitung über eine Länge von 3,3 m zwischen QS 4 und 5 berücksichtigt.

darüber hinaus die möglichen rechnerischen Druckstrebenwinkel nach DIN-Fachbericht 102 dargestellt. Hier greift die Begrenzung cot $\theta_f \leq 1{,}75$ über die komplette Anschlusslänge. Daher werden zusätzlich die rechnerisch möglichen Neigungswinkel der Druckstreben nach DIN-FB 102 ohne diese Begrenzung in den verschiedenen Gurtabschnitten untersucht und in Bild 49 dargestellt.

Die zum Nachweis des Gurtanschlusses erforderlichen Berechnungen werden exemplarisch für den Gurtabschnitt zwischen den Querschnitten QS 1 und QS 2 angegeben. Die Ergebnisse sowie alle für die Berechnung erforderlichen Eingangswerte für die übrigen Abschnitte können Bild 49 entnommen werden. Zunächst erfolgt die Ermittlung des Schubflusses je Stegabschnitt (2 vorhanden) aus der Längskraftdifferenz $\Delta F_{d,i}$ in der Gurtscheibe für die Gurtabschnitte der Länge a_v.

Schubfluss v_{Ed} für die volle mitwirkende Gurtbreite b_{eff} nach DIN-Fachbericht 102:

$$v_{Ed,1-2} = \frac{\Delta F_{d,1-2}}{a_{v,1-2}} = \frac{28{,}4\ \text{MN} - 23{,}07\ \text{MN}}{2{,}2\,\text{m} \cdot 2} = 1{,}21\,\frac{\text{MN}}{\text{m}}$$

Bei einer maximalen Reduktion der rechnerischen Druckgurtbreite um 0,85 m kann der Nachweis der Tragfähigkeit für Biegung mit Längskraft noch erbracht werden. Die Grenzdehnung in Gurtmitte wird hierbei gemäß DIN-Fachbericht 102 auf 2‰ festgesetzt. Der Schubfluss v_{Ed} für die um 0,85 m reduzierte mitwirkende Gurtbreite $b_{eff,red}$ beträgt:

$$v_{Ed,1-2,red} = \frac{\Delta F_{d,1-2,red}}{a_{v,1-2}} = \frac{22{,}95\ \text{MN} - 18{,}97\ \text{MN}}{2{,}2\ \text{m} \cdot 2} = 0{,}9\,\frac{\text{MN}}{\text{m}}$$

Die Eingangswerte für die Ermittlung der erforderlichen Gurtanschlussbewehrung sind der Schubfluss $v_{Ed,i}$, der Druckstrebenwinkel cot θ_f in den einzelnen Gurtabschnitten sowie der Bemessungswert der Streckgrenze der vorhandenen Gurtanschlussbewehrung f_{yd}. Der Nachweis der Tragfähigkeit der schiefen Betondruckstrebe erfolgt exemplarisch für den minimalen Druckstrebenwinkel:

$\text{erf. } a_s = \frac{v_{Ed,1-2}}{f_{yd} \cdot \cot\theta_{f,1-2}} = \frac{1{,}21\frac{MN}{m}}{\frac{420\text{ MPa}}{1{,}15\text{ m}} \cdot 3{,}7} \cdot 10^4 = 27{,}6\frac{cm^2}{m}$	DIN-FB 102, vereinfachter Ansatz: $\cot\theta_f = 1{,}2$
$\text{erf. } a_s = \frac{v_{Ed,1-2}}{f_{yd} \cdot \cot\theta_{f,1-2}} = \frac{1{,}21\frac{MN}{m}}{\frac{420\text{ MPa}}{1{,}15\text{ m}} \cdot 3{,}7} \cdot 10^4 = 18{,}9\frac{cm^2}{m}$	DIN-FB 102, Fachwerkmodell mit Rissreibung $\cot\theta_f \leq 1{,}75$
$\text{erf. } a_s = \frac{v_{Ed,1-2}}{f_{yd} \cdot \cot\theta_{f,1-2}} = \frac{1{,}21\frac{MN}{m}}{\frac{420\text{ MPa}}{1{,}15\text{ m}} \cdot 3{,}7} \cdot 10^4 = 13{,}4\frac{cm^2}{m}$	DIN-FB 102, Fachwerkmodell mit Rissreibung $\cot\theta_f \leq 3{,}0$
$\text{erf. } a_s = \frac{v_{Ed,1-2}}{f_{yd} \cdot \cot\theta_{f,1-2}} = \frac{1{,}21\frac{MN}{m}}{\frac{420\text{ MPa}}{1{,}15\text{ m}} \cdot 3{,}7} \cdot 10^4 = 8{,}9\frac{cm^2}{m}$	modifizierter Druckstrebenwinkel nach Abschnitt 2.5.3.2
$\text{erf. } a_s = \frac{v_{Ed,1-2}}{f_{yd} \cdot \cot\theta_{f,1-2}} = \frac{0{,}9\frac{MN}{m}}{\frac{420\text{ MPa}}{1{,}15\text{ m}} \cdot 3{,}7} \cdot 10^4 = 6{,}6\frac{cm^2}{m}$	modifizierter Druckstrebenwinkel nach Abschnitt 2.5.3.2 und reduzierte mitwirkende Gurtbreite

$$v_{Rd,max,1-2} = \frac{h_{f,1-2} \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot\theta_f + \tan\theta_f} = \frac{0{,}425 \cdot 0{,}75 \cdot 17}{3{,}7 + \frac{1}{3{,}7}} = 1{,}36\frac{MN}{m}$$

$$> v_{Ed,1-2} = 1{,}21\frac{MN}{m}$$

Bereits das Ausschöpfen der Möglichkeiten des DIN-FB 102 führt zu einer nennenswerten Reduktion der rechnerisch erforderlichen Gurtanschlussbewehrung. Der vereinfachte Ansatz mit einem pauschalen Druckstrebenwinkel von $\cot\theta_f = 1{,}2$ in Druckgurten gemäß DIN-FB 102, II-4-3-2-5 (3) ist für die Nachrechnung bestehender Brückenbauwerke erwartungsgemäß deutlich zu konservativ und sollte grundsätzlich nicht herangezogen werden. Durch die wirklichkeitsnahe Berücksichtigung der Interaktion von Schub- und Längsspannung bei der Ermittlung der Druckstrebenwinkel kann die rechnerisch erforderliche Gurtanschlussbewehrung insbesondere in der dem Zwischenauflager zugewandten Hälfte des Druckgurts, die unter besonders hohen Längsdruckspannungen steht, deutlich reduziert werden. Ausgehend von einer vorhandenen Gurtanschlussbewehrung von $a_s = 6{,}03\,cm^2/m$ werden die rechnerischen Auslastungsgrade von über 200 bis 400 % nach DIN-Fachbericht 102 auf im Mittel etwa 110 % reduziert.

2.5.4.2 Nachweisführung auf Basis des Hauptzugspannungskriteriums

Die Bodenplatte im Innenstützenbereich des hier betrachteten über 50 Jahre alten Bauwerks weist 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 tatsächlich vorhandenen Zugspannungen im Beton sind. Die Nachweisführung auf Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums 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.

Da Umlagerungen infolge einer Rissbildung innerhalb des Druckgurts bei diesem Nachweisformat nicht unterstellt werden können, kommt der Beanspruchungsermittlung eine höhere Bedeutung zu. Die Längskraftentwicklung innerhalb des Druckgurts wird unter

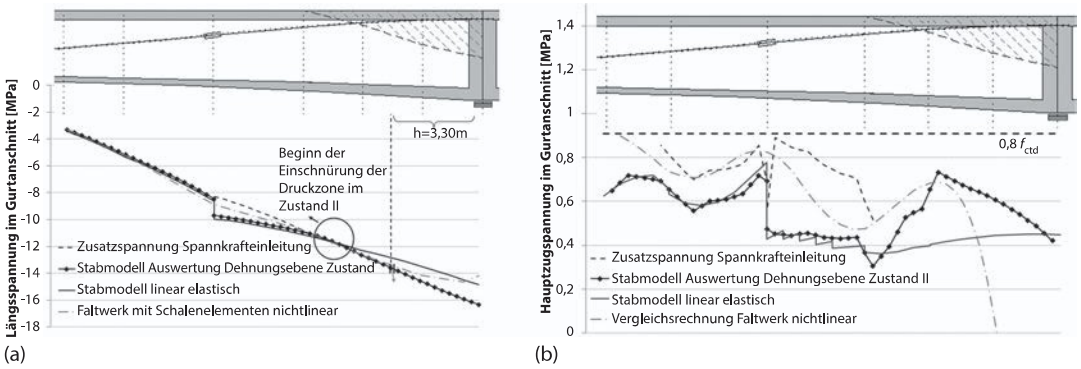


Bild 50. (a) Längsspannungsverlauf im Druckgurt, (b) Hauptzugspannungen im Druckgurtanschluss

Berücksichtigung der Rissbildung infolge Biegung mit Längskraft im Gesamtquerschnitt in verschiedenen Nachweisschnitten i mit $i \leq h/2$ ermittelt. Da die Spanngliedverankerung im oberen Stegbereich in QS 5 bei der Berechnung mit Stabelementen zu einem Normalkraftsprung innerhalb der Bodenplatte führt (s. Bild 48), der sich so im realen Bauwerk nicht einstellt, wird die Einleitungslänge und die damit verbundene Zusatzbeanspruchung der Spannkraft innerhalb des Druckgurts durch eine Zusatzbetrachtung an einem Faltwerkmodell bestimmt.

In Bild 50 ist zu erkennen, dass die Biegerissbildung im Gesamtquerschnitt einen Einfluss auf den Verlauf der Spannungen in der ungerissenen Bodenplatte hat. Eine eventuelle Biegerissbildung im Gesamtquerschnitt infolge Biegung mit Längskraft im GZT ist daher bei der Ermittlung der Beanspruchungen des Druckgurtanschlusses zu berücksichtigen. Die Auswirkungen der örtlichen Lasteinleitung im Steg sind ebenfalls deutlich zu erkennen. Durch die Zusatzbetrachtung am Faltwerkmodell wurden Zusatzbeanspruchungen für die Modifikation der Berechnungsergebnisse am Stabmodell ermittelt (Einleitungslänge, Schubfluss, geänderte Längsspannungen). Die Ergebnisse und ein Vergleich mit einer nichtlinearen Berechnung an einem Schalenmodell können Bild 50 entnommen werden. Der Nachweis kann auf Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums erbracht werden.

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.

3 Erweiterte Berechnungsansätze nach Stufe 4

3.1 Einleitung

Bei der Nachrechnung von Bestandsbrücken in Stufe 2 der Nachrechnungsrichtlinie lässt sich, trotz der verfeinerten Berechnungsansätze, nicht immer eine ausreichende rechnerische Querkraft- und Torsionstragfähigkeit nachweisen. Zur Sicherstellung der Tragfähigkeit des Bauwerks werden nicht selten aufwendige Verstärkungsmaßnahmen oder frühzeitig ein Ersatzneubau erforderlich.

Generell ist eine Nachrechnung auf Basis aktuell gültiger Nachweisverfahren kritisch zu hinterfragen. Die Nachweisverfahren wurden für die Bemessung von Neubauten entwickelt. Hierbei werden zugunsten einer vereinfachten Anwendung sinnvolle Idealisierungen und Vereinfachungen getroffen, die zu einer robusten und sicheren Bemessung führen, jedoch Traglastreserven auf der sicheren Seite liegend nicht ansetzen. Vergleiche in [118] zeigen, dass die Nachweisverfahren in DIN-Fachbericht 102 besonders bei den Querkraft- und Torsionsnachweisen teilweise sehr konservative Ergebnisse liefern. Der Vorteil der Nachweisverfahren in den Normen besteht darin, dass eine Bemessung auf Querschnittsebene getrennt für die verschiedenen Schnittgrößen (Biegemoment, Querkraft und Torsion) möglich ist. Im Gegensatz zum Brückenneubau geht es bei einer Nachrechnung bestehender Bauwerke darum, die tatsächliche Tragfähigkeit möglichst zutreffend genau zu ermitteln. Alternativ zu den Verfahren nach Stufe 1 und Stufe 2 kann eine genauere rechnerische Untersuchung der Brücke in Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie erfolgen.

Eine Nachrechnung in Stufe 4 ist insbesondere sinnvoll, wenn aufgrund der verkehrlichen Bedeutung des Bauwerks im Straßennetz kompensatorische Einschränkungen bis zur Fertigstellung der Verstärkungsmaßnahme (z. B. Spursperrung, Gewichtsbeschränkung, Sperrung für Schwertransporte) nicht vertretbar