

# Erweitertes Druckbogenmodell: Anwendungsbeispiel

A. Kolodziejczyk, R. Maurer

**ZUSAMMENFASSUNG** Die Nachrechnungen bestehender, älterer Brücken erfolgt im Allgemeinen auf Grundlage der Nachrechnungsrichtlinie für bestehende Straßenbrücken. Für die Nachweise der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit enthält die Richtlinie gegenüber dem aktuellen Regelwerk DIN EN 1992-2/NA modifizierte und erweiterte Bemessungsansätze die den Besonderheiten des Bestands Rechnung tragen. Dennoch ergeben sich häufig zum Teil starke Defizite in Bezug auf die Schubtragfähigkeit. Um in solchen Fällen den Umfang der Verstärkungsmaßnahmen zu reduzieren oder gar vorzeitige Ersatzneubauten zu vermeiden, erlaubt die Nachrechnungsrichtlinie auch die Anwendung von wissenschaftlichen ausreichend verifizierten Verfahren mit denen mögliche Tragreserven erfasst werden können, die bei stark idealisierten genormten Standardverfahren vernachlässigt werden.

Das aktuelle Nachweisformat für die Querkrafttragfähigkeit basiert auf einem parallelgurtigen Fachwerk mit Rissreibung und besitzt in Abhängigkeit vom Tragsystem, Querschnitt und Belastung insbesondere bei Spannbetontragwerken zum Teil erhebliche Tragreserven. Im folgenden Beitrag wird die Anwendung des Erweiterten Druckbogenmodells als wissenschaftliches Verfahren auf ein Bauwerk vorgestellt. Das Modell erfasst neben dem Fachwerktraganteil auch die Tragwirkung des Betondruckbogens, der sich infolge Vorspannung und Biegebeanspruchung als Betontraganteil einstellt.

## STICHWÖRTER

Bemessung, Brückenbau, Druckbogenmodell

## 1 Einleitung

Die Bewertung bestehender älterer Brücken erfolgt im Allgemeinen durch eine Nachrechnung gemäß der Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand [1], [2]. Dabei ergeben sich insbesondere im Hinblick auf die Schubtragfähigkeit aufgrund der deutlich angestiegenen Verkehrslasten und vor allem der Änderung der Bemessungsmodelle für Querkraft und Torsion häufig starke Defizite. Für den Nachweis der Schubtragfähigkeit von bestehenden Bauwerken enthält die Nachrechnungsrichtlinie modifizierte und zusätzliche Nachweisformate gegebenenfalls in Verbindung mit begrenzten Restnutzungsdauern. Mit den angepassten Regelungen der Stufe 2 können die Defizite nach Stufe 1 in der Regel deutlich reduziert werden. In vielen

## Application of the extended arch action model

**ABSTRACT** Old existing bridges are recalculated on the basis of the German Structural Assessment Provision for Existing Road Bridges. To determine the shear and torsional resistance the provision comprises modified and extended design approaches in comparison to the current regulations of DIN EN 1992-2/NA. These approaches take the characteristics of existing structures into account. However, high deficits in terms of the shear capacity often remain. In order to reduce the extent of strengthening measures or to avoid premature replacement by new structures in such cases, the structural assessment provision allows the use of verified scientific procedures which consider potential load bearing capacities not taken into account by the idealized standard design methods of the current design code.

The current design format for verifying shear capacity is based on a parallel truss model with aggregate interlock. Depending on the system, cross section and loading, this model may exhibit considerable load bearing reserves for prestressed beams. This article demonstrates the application of the Arch Action Model by example of one structure. In addition to the shear resistance of the truss model, the arching effect of the concrete due to prestressing and bending is taken into account.

Fällen kann die ausreichende Querkrafttragfähigkeit allerdings dennoch nicht vollständig in allen Bereichen nachgewiesen werden. Um die Anzahl der Verstärkungsmaßnahmen und Ersatzneubauten zu reduzieren, erlaubt die Nachrechnungsrichtlinie in Sonderfällen im Rahmen einer Nachrechnung nach Stufe 4 die Anwendung wissenschaftlicher Methoden. Ziel ist eine möglichst genaue Ermittlung der tatsächlichen Tragfähigkeit unter Berücksichtigung von möglichen Tragfähigkeitsreserven durch genauere wissenschaftliche Methoden bei Einhaltung des erforderlichen Sicherheitsniveaus. Im Folgenden wird das im Rahmen der Stufe 4 für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit angewendete Erweiterte Druckbogenmodell (EDBM) nach [5], [6] als genaueres Nachweisverfahren am Beispiel eines Bauwerks im Bremer Kreuz zwischen den Bundesautobahnen A1 und A27, vorgestellt.

## 2 Anwendungsbeispiel

### 2.1 Bauwerksbeschreibung

Bei dem nachfolgenden Beispiel erfolgte der Nachweis der ausreichenden Querkrafttragfähigkeit im Rahmen einer Stufe 4 Nachrechnung mit dem Druckbogenmodell (DBM) nach [7] und dem Erweiterten Druckbogenmodell (EDBM) nach [5].

Die Brücke (Baujahr 1960) überführt die BAB A27 über die BAB A1 im Bremer Kreuz. Die Plattenbalkenbrücke wurde in Spannbetonbauweise als Durchlaufträger über 2 Felder mit Spannweiten von jeweils 29,10 m und einer Gesamtlänge von 58,20 m errichtet (Bild 1, Bild 2). Der Überbau besteht aus vier Teilbauwerken. In den Auflagerachsen sowie in den Feldmitten wurden jeweils Querträger angeordnet. Die Herstellung erfolgte auf einem konventionellen Traggerüst. Die Breite der 3-stegigen Plattenbalken beträgt 11,50 m, die der 4-stegigen Plattenbalken 15,25 m. Die Plattenbalken haben über die Brückenlänge eine konstante Konstruktionshöhe von 1,21 m. Die Stege wurden in den Feldbereichen mit einer konstanten Breite von 75 cm ausgebildet. Zu den Auflagern hin wurden die Stege auf 1,36 m beziehungsweise 1,40 m verbreitert. Die Stege sind im Abstand von maximal 3,92 m angeordnet.

Es wurde ein Beton der Festigkeitsklasse B 450 (C30/37) und Spannstähle der Güte St 150/170 (1470/1665) eingebaut. Die Stege wurden einheitlich mit Bügeln Ø16/20 (20,11 cm<sup>2</sup>/m) der Betonstahlgüte BSt II ( $f_{yk} = 360 \text{ N/mm}^2$ ) bewehrt. Seinerzeit wurde die Brücke für die BKL 60 nach DIN 1072 bemessen.

### 2.2 Ergebnisse der Nachrechnung nach Stufe 1 und 2 im Hinblick auf die Schubtragfähigkeit

Das Bauwerk wurde 2014 auf Grundlage der Nachrechnungsrichtlinie Ausgabe Mai 2011 [1] nachgerechnet. Die Nachrechnung [8] erfolgte für das Lastmodell 1 nach DIN EN 1991/NA.

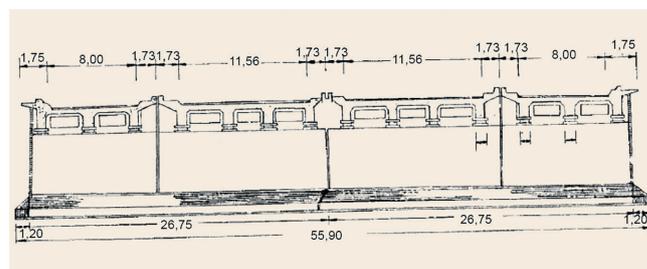
Bei den Nachweisen der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit ergaben sich insbesondere in den auflagnahen Bereichen erhebliche Defizite hinsichtlich der Bügelbewehrung. Die maximale Ausnutzung nach Stufe 1 lag im Bereich der Endauflager bei 150 % und im Bereich der Zwischenstützung bei 300 %. Bei Anwendung der Stufe 2 ergaben sich im Bereich der Endauflager deutlich geringere Defizite. Im Bereich der Zwischenstützung konnten die Defizite dagegen nur geringfügig reduziert werden. In Bild 3 sind exemplarisch die Ergebnisse der Nachrechnung nach Stufe 2 für einen Innenträger über die Bauwerkslänge dargestellt.

### 2.3 Anwendung des Druckbogenmodells

In Bereichen mit Defiziten erfolgte der Nachweis der Schubtragfähigkeit zunächst mit dem vereinfachten Druckbogenmodell (DBM) nach [7]. Der Nachweis kann damit allerdings nicht in allen Bereichen erbracht werden. Daher kommt das Erweiterte Druckbogenmodell (EDBM) nach [5] zur Anwendung. Im Folgenden wird der Nachweis auf Grundlage des EDBM exemplarisch für einen Nachweisschnitt geführt.

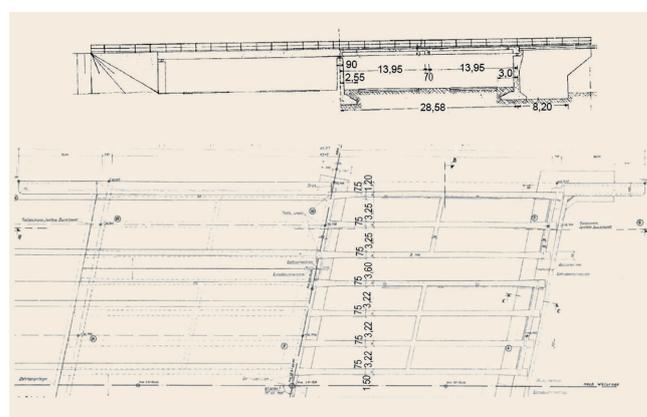
#### 2.3.1 Ermittlung des Druckbogenverlaufs

Der Nachweis erfolgt für einen Innenträger im Abstand  $d$  vom Auflager im Bereich der Achse 2. Der Verlauf des Druckbogens



**Bild 1.** Regelquerschnitt des Überführungsbauwerks im Bremer Kreuz  
Abb.: Straßenverwaltung, Freie Hansestadt Bremen, Amt für Straßen und Verkehr  
Fig. 1. Regular cross section of the overpass at the intersection "Bremer Kreuz"

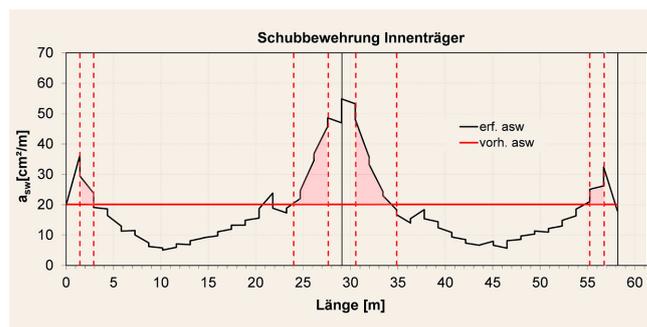
Source: Straßenverwaltung, Freie Hansestadt Bremen, Amt für Straßen und Verkehr



**Bild 2.** Ansicht und Grundriss des Überführungsbauwerks im Bremer Kreuz

Abb.: Straßenverwaltung, Freie Hansestadt Bremen, Amt für Straßen und Verkehr  
Fig 2. View and floor plan of the overpass at the intersection "Bremer Kreuz"

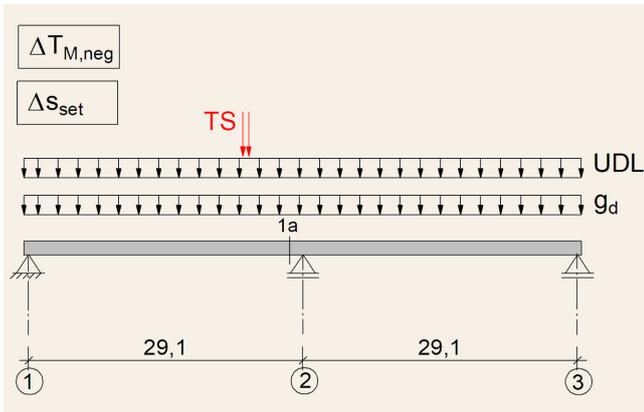
Source: Straßenverwaltung, Freie Hansestadt Bremen, Amt für Straßen und Verkehr



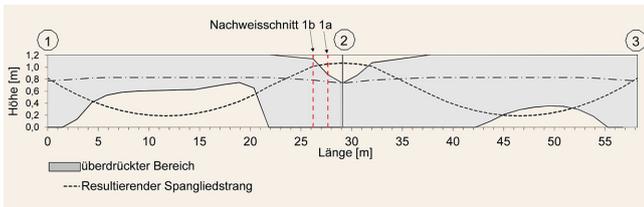
**Bild 3.** Nachweis der Querkrafttragfähigkeit für einen Innenträger nach Stufe 2 [8] Abb.: A. Kolodziejczyk

Fig. 3. Verification of shear capacity for a middle beam according to level 2 [8] Source: A. Kolodziejczyk

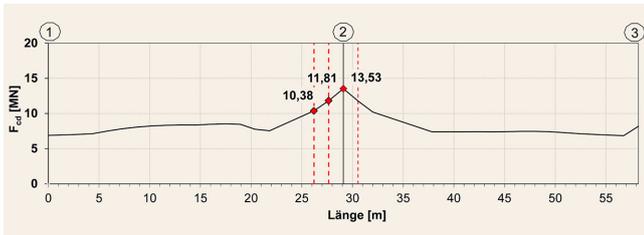
wird für die im betrachteten Nachweisschnitt zur maximalen Querkraft führende Laststellung ermittelt. Der zugehörige Druckbogenverlauf und die Querkraftkomponente der geneigten Biegedruckkraft als Betontraganteil werden maßgeblich durch die Lage und Ausbreitung der gerissenen Bereiche bestimmt. Die maßgebende Laststellung für die maximale Querkraft in einem Nachweisschnitt ist nicht zwingend die ungünstigste Laststellung mit der höchsten Ausnutzung. Für den betrachteten Nachweisschnitt



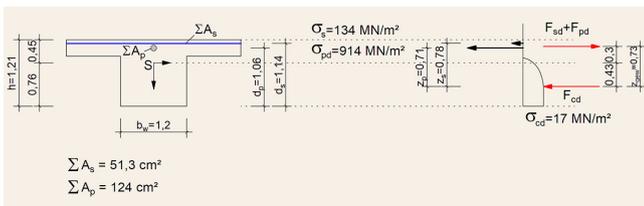
**Bild 4.** Maßgebende Laststellung für den Nachweisschnitt 1a  
 Abb.: A. Kolodziejczyk  
 Fig 4. Decisive load combination for the verification in section 1a  
 Source: A. Kolodziejczyk



**Bild 5.** Überdrückte Bereiche unter der untersuchten Laststellung  
 Abb.: A. Kolodziejczyk  
 Fig 5. Compressed areas for the decisive load combination  
 Source: A. Kolodziejczyk



**Bild 6.** Verlauf der Biegedruckkraft  $F_{cd,M}$  bei der untersuchten Laststellung  
 Abb.: A. Kolodziejczyk  
 Fig. 6. Bending compressive force  $F_{cd,M}$  for the decisive load combination  
 Source: A. Kolodziejczyk



**Bild 7.** Resultierende Biegedruckkraft  $F_{cd}$  und Zugkräfte  $F_{sd} + F_{pd}$  unter  $M_{Ed}$  im Nachweisschnitt 1a  
 Abb.: A. Kolodziejczyk  
 Fig. 7. Bending compressive force  $F_{cd}$  and the tensile forces  $F_{sd} + F_{pd}$  due to  $M_{Ed}$  in section 1a  
 Source: A. Kolodziejczyk

1a im Bereich der Stützachse 2 führt die Laststellung in **Bild 4** zu den ungünstigsten Verhältnissen. Dabei werden der Temperaturlastfall und die Stützensenkung jeweils ungünstig wirkend ange setzt.

Bei der Anwendung des EDBM wird zunächst analog zum DBM verfahren. Für die maßgebende Laststellung auf Bemessungslastniveau werden zunächst auf Grundlage der zugehörigen Dehnungsebenen im Zustand I und II über die gesamte Trägerlänge die überdrückten Bereiche (**Bild 5**) sowie die Biegedruckkraft  $F_{cd,M}$  (**Bild 6**) mit ihrem Abstand zum Querschnittsrand (**Bild 7**) ermittelt und grafisch aufgetragen. Für den eigentlichen Nachweis ist die Ermittlung der Neigungswinkel von  $F_{cd,M}$  in den jeweils benachbarten Schnitten im Abstand  $\Delta x$  beidseits des Nachweisschnittes erforderlich. Für eine Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse wird die Darstellung des Druckbogens über die gesamte Trägerlänge empfohlen.

Auf Grundlage der Dehnungsebene und der zugehörigen Spannungen im Nachweisschnitt 1a (**Bild 7**) wird im Folgenden exemplarisch der gewichtete Hebelarm  $z_{gew}$  ermittelt.

$$z_{gew} = \frac{F_{sd} \cdot z_s + \Delta F_{pd} \cdot z_p}{F_{sd} + \Delta F_{pd}}$$

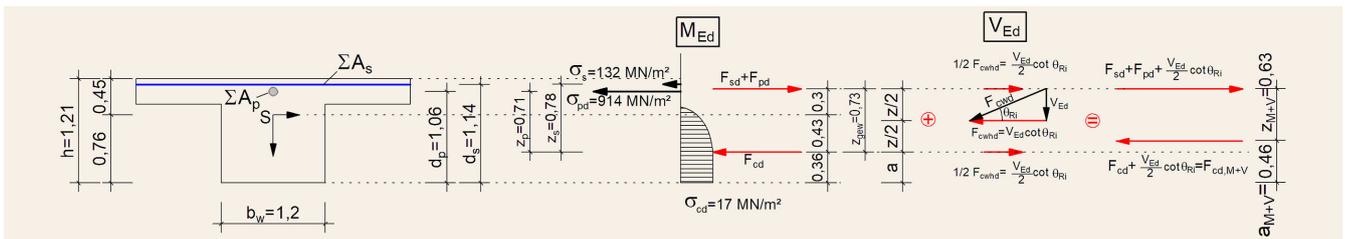
mit  $F_{sd} = A_s \cdot \sigma_s = 51,3 \cdot 10^{-4} \cdot 134 = 0,69 \text{ MN}$

$$\begin{aligned} \Delta F_{pd} &= A_p \cdot \Delta \sigma_{pd} \\ &= A_p \cdot (\sigma_{pd} - \sigma_{pm\phi}) \\ &= 124 \cdot 10^{-4} \cdot (914 - 766) = 1,84 \text{ MN} \end{aligned}$$

$$z_{gew} = \frac{0,69 \cdot 0,78 + 1,84 \cdot 0,71}{0,69 + 1,84} = 0,73 \text{ m}$$

Der hier betrachtete Nachweisschnitt 1a liegt im unmittelbaren Stützbereich mit einem großen negativen Stützmoment. Aufgrund der maximalen Zuwächse von  $\Delta F_{pd}$  und eines geringen Bewehrungsgrades der schlaffen Bewehrung entspricht hier der gewichtete Hebelarm  $z_{gew}$  daher nahezu dem Hebelarm  $z$  der inneren Kräfte mit der resultierenden Biegezugkraft unter dem einwirkenden Biegemoment  $M_{Ed}$ . Der gewichtete Hebelarm  $z_{gew}$  wirkt sich insbesondere in Bereichen um die Momentennullpunkte mit geringen Zuwächsen von  $\Delta F_{pd}$  im Spannstahl aus. In diesen Bereichen sind die Abweichungen gegenüber dem Hebelarm  $z$  aus der Biegebemessung am größten.

Während sich beim DBM die Neigung  $\psi$  des Druckbogens aus der Verbindungslinie der Lage der resultierenden Biegedruckkraft  $F_{cd,M}$  in den einzelnen Schnitten ergibt, wird bei Anwendung des EDBM bei der Ermittlung des Druckbogenverlaufs außer der Biegedruckkraft  $F_{cd,M}$  zusätzlich die horizontale Komponente  $F_{cwhd}$  der um den Winkel  $\theta_B$  beziehungsweise im Fächerbereich  $\theta_{Ri}$  geneigten Druckstreben im Steg  $F_{cwh}$  berücksichtigt. Der resultierende Angriffspunkt  $a_{M+V}$  der horizontalen Druckkraft  $F_{cd,M+V}$  ergibt sich nach [5] Gleichung 5 (**Bild 8**).



**Bild 8.** Ermittlung von  $z_{M+V}$  im Nachweisschnitt 1a *Abb.: A. Kolodziejczyk*  
**Fig. 8.** Evaluation of  $z_{M+V}$  in section 1a *Source: A. Kolodziejczyk*

**Tabelle 1.** Ermittlung der Druckbogenneigung  $\psi$  im Nachweisschnitt 1a aus der Lage der Druckkraftresultierenden  $F_{cd,M+V}$   
**Table 1.** Evaluation of the inclination angle  $\psi$  of the compressive strut in section 1a resulting from the position of the bending compressive force  $F_{cd,M+V}$

Nachweisschnitt	x [m]	$V_{Ed}$ [MN]	a [m]	$z_{gew}$ [m]	$F_{cd}$ [MN]	$\cot \theta$ [-]	$0,5 F_{cdwh}$ [MN]	$F_{cd} + 0,5 F_{cdwh}$ [MN]	$a_{M+V}$ [m]	Diff.-quotient [-]	Neigung Res. $\psi$ [°]
1b	26,20	1,61	0,46	0,70	10,38	2,00	1,61	11,98	0,55		
1a	27,65	1,95	0,36	0,73	11,81	1,90	1,85	13,67	0,46	0,086	4,91
Achse 2	29,10	0,00	0,31	0,78	13,53	0,00	0,00	13,53	0,31		

$$a_{M+V} = \frac{F_{cd} \cdot a + 0,5 \cdot F_{cwhd} \cdot (z_{gew} + a)}{F_{cd} + 0,5 F_{cwhd}}$$

$$= \frac{11,81 \cdot 0,36 + 0,5 \cdot 3,69 \cdot (0,73 + 0,36)}{11,81 + 0,5 \cdot 3,69} = 0,46 \text{ m}$$

mit

$$F_{cwhd} = V_{Ed} \cdot \cot \theta_{Ri}$$

Die resultierende Druckstrebenneigung im Fächer berechnet sich zu:

$$\cot \theta_{Ri} = (0,76x^3 - 2,41x^2 + 2,65x) \cdot \cot \theta_B$$

$$= (0,76 \cdot 0,75^3 - 2,41 \cdot 0,75^2 + 2,65 \cdot 0,75) \cdot \cot \theta_B$$

$$= 0,95 \cdot \cot \theta_B$$

$$= 0,95 \cdot 2,0 = 1,90$$

mit  $\cot \theta_B = 2,0$  (gewählt)

$$\text{mit } x = \frac{x_l}{z \cdot \cot \theta_B} = \frac{x_l}{0,8 \cdot h \cdot \cot \theta_B} = \frac{1,45}{0,8 \cdot 1,21 \cdot 2,0} = 0,75$$

Der Hebelarm der inneren Kräfte infolge  $M_{Ed}$  und  $V_{Ed}$  ergibt sich wie folgt:

$$z_{M+V} = \frac{M_{Ed}}{F_{cd} + \frac{V_{Ed}}{2} \cdot \cot \theta}$$

$$= \frac{8,54}{11,81 + \frac{1,94}{2} \cdot 1,9} = 0,63 \text{ m}$$

mit

$$M_{Ed} = 1,35 M_{gk} + 1,5 \cdot M_{qk} + 1,0 \cdot M_{p,ind} +$$

$$1,35 \cdot 0,4 \cdot 0,8 M_{Temp} + 1,0 \cdot 0,4 M_{set} = -8,54 \text{ MNm}$$

Für die benachbarten Schnitte erfolgt die Ermittlung des Angriffspunkts  $a_{M+V}$  der Druckkraft-resultierenden  $F_{cd,M+V}$  analog. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 1** zusammengestellt.

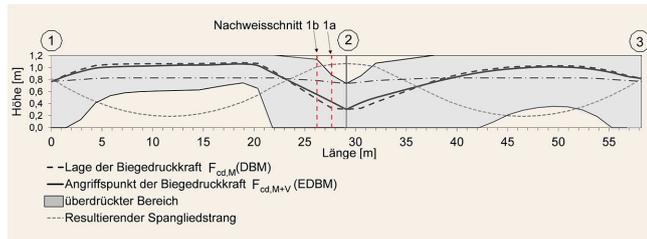
Der Verlauf des Druckbogens ergibt sich durch die Verbindungslinie der Höhenlage  $a_{M+V}$  der horizontalen Druckstrebenkomponente  $F_{cd,M+V}$  in den diskreten Schnitten. Im Gegensatz hierzu ergibt sich der Verlauf des Druckbogenmodells auf Grundlage des DBM aus der Verbindungslinie der Biegedruckkräfte  $F_{cd,M}$ . In **Bild 9** werden die Druckbogenverläufe für das DBM und EDBM gegenübergestellt. Durch die Modifikation des EDBM ergibt sich insbesondere in Bereichen von Zwischenstützen ein deutlich steilerer Druckbogenverlauf gegenüber dem DBM (**Bild 10 b**). Bei Anwendung des EDBM stützt sich der Druckbogen direkt ins Auflager ab während sich bei Anwendung der DBM i.A. eine Gegenkrümmung im Druckbogenverlauf einstellt. Mit zunehmender Rissbildung und entsprechend großen Stützmomenten können sich bei Anwendung des DBM in Bereichen von Zwischenstützen nahezu horizontale Druckbogenverläufe einstellen.

In **Bild 10** sind die Biegedruckkraft  $F_{cd,M}$  infolge reiner Biegung und  $F_{cd,M+V}$  unter zusätzlicher Berücksichtigung der Horizontalkomponente der geneigten Druckstreben  $0,5 \cdot V_{Ed} \cdot \cot \theta$  sowie die Neigung des jeweiligen Druckbogenverlaufs gegenübergestellt.

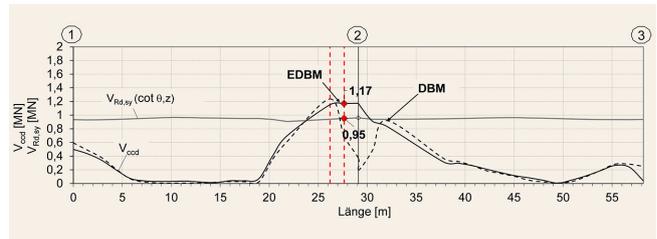
### 2.3.2 Ermittlung der einzelnen Querkrafttraganteile

#### Betonttraganteil $V_{ccd}$

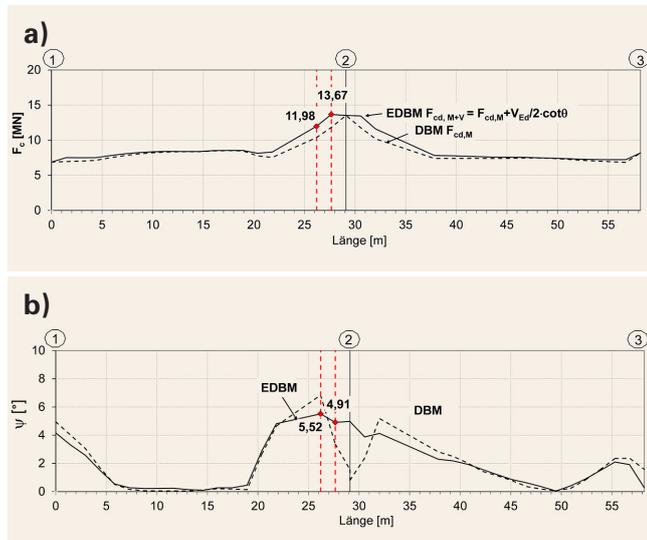
Auf Grundlage des Druckbogenverlaufes mit der Neigung  $\psi$  wird der Betonttraganteil als Vertikalkomponente  $V_{ccd}$  im betrachteten Nachweisschnitt ermittelt:



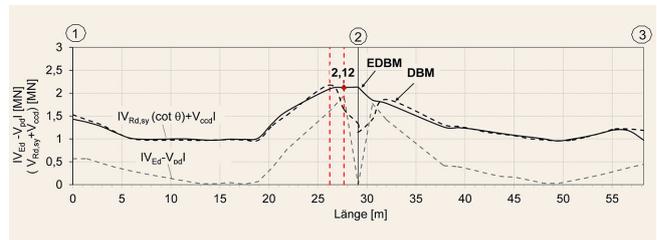
**Bild 9.** Gegenüberstellung der Druckbogenverläufe für die maßgebende Laststellung im bei Anwendung des DBM und EDBM Abb.: A. Kolodziejczyk Fig. 9. Compressive arch for the decisive load combination. Comparison of the simple and extended Arch Acting Model Source: A. Kolodziejczyk



**Bild 11.** Traganteil der geneigten Biegedruckkraft  $V_{ccd}$  und Traganteil der Querkraftbewehrung  $V_{Rd,sy}$  Abb.: A. Kolodziejczyk Fig. 11. Load bearing capacity of the inclined compressive force  $V_{ccd}$  and load bearing capacity of the shear reinforcement  $V_{Rd,sy}$  Source: A. Kolodziejczyk



**Bild 10.** Gegenüberstellung der Biegedruckkräfte  $F_{cd,M}$  bzw.  $F_{cd,M+V} = F_{cd,M} + 0,5 \cdot V_{Ed} \cdot \cot \theta$  und der Neigungswinkel  $\psi$  bei Anwendung des DBM und EDBM Abb.: A. Kolodziejczyk Fig. 10. Comparison of the simplified and the extended Arch Action Model, bending compressive force  $F_{cd,M}$  or  $F_{cd,M+V} = F_{cd,M} + 0,5 \cdot V_{Ed} \cdot \cot \theta$  and inclination angle  $\psi$  of the compressive strut Source: A. Kolodziejczyk



**Bild 12.** Einwirkende und aufnehmbare Querkraft Abb.: A. Kolodziejczyk Fig. 12. Acting and absorbable shear force Source: A. Kolodziejczyk

$$V_{Rd,sy} = (v_{orh} a_{sw} - erf a_{sw,T}) \cdot f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \theta = (20,1 - 0,4) \cdot 10^{-4} \cdot 360 / 1,15 \cdot 0,77 \cdot 2,0 = 0,95 \text{ MN}$$

mit  $\cot \theta = 2,0$

In Bild 11 sind beide Querkrafttraganteile  $V_{ccd}$  und  $V_{Rd,sy}$  für die untersuchte Laststellung aufgetragen.

**2.3.3 Nachweis**

Der Nachweis erfolgt durch die Gegenüberstellung der einwirkenden betragsmäßigen Querkraft  $|V_{Ed}|$  unter Berücksichtigung des Querkraftanteils der geneigten Spannglieder  $V_{pd}$  und der Summe der beiden Traganteile  $V_{Rd,sy}$  und  $V_{ccd}$  (Bild 12).

Eine ausreichende Querkrafttragfähigkeit ist gegeben, wenn folgende Bedingung erfüllt ist.

$$|V_{Ed}| \leq V_{Rd} = V_{Rd,sy} + V_{ccd} + V_{pd}$$

Nachfolgend wird die Gleichung umgestellt und der Verhältniswert  $\eta$  betrachtet:

$$\eta = \frac{|V_{Ed} - V_{pd}|}{V_{Rd,sy} + V_{ccd}} \leq 1,0$$

Die aufnehmbare Querkraft im GZT ergibt sich im Nachweisschnitt 1a wie folgt:

EDBM:

$$V_{Rd,sy} + V_{ccd,EDBM} = 0,95 + 1,17 = 2,12 \text{ MN}$$

DBM:

$$V_{Rd,sy} + V_{ccd,DBM} = 0,95 + 0,69 = 1,64 \text{ MN}$$

EDBM

$$V_{ccd,EDBM} = F_{cd,M+V} \cdot \tan \psi = 13,67 \cdot \tan 4,9 = 1,17 \text{ MN}$$

DBM

$$V_{ccd,DBM} = F_{cd} \cdot \tan \psi = 11,81 \cdot \tan 3,36 = 0,69 \text{ MN}$$

Die Betontraganteile  $V_{ccd}$  des EDBM und DBM sind in Bild 11 dargestellt.

**Bügeltraganteil  $V_{Rd,sy}$**

Bei der Ermittlung des Bügeltraganteils  $V_{Rd,sy}$  wird die vorhandene Bügelbewehrung abzüglich der erforderlichen Torsionsbügelbewehrung  $a_{sw,T}$  zugrunde gelegt. Für den inneren Hebelarm  $z$  kann für den gesamten zugehörigen Querkraftbereich der Hebelarm für das Moment über der Innenstütze verwendet werden.

Damit ergibt sich der Verhältniswert wie folgt:

EDBM:

$$\eta = \frac{|V_{Ed} - V_{pd}|}{V_{Rd, sy} + V_{ccd, EDBM}} = \frac{1,95}{2,12} = 0,92$$

DBM:

$$\eta = \frac{|V_{Ed} - V_{pd}|}{V_{Rd, sy} + V_{ccd}} = \frac{1,95}{1,64} = 1,19$$

Für den Nachweisschnitt 1a ergab sich bei Anwendung des Erweiterten Druckbogenmodells eine Ausnutzung von 92 % gegenüber einer Ausnutzung von knapp 120 % mit dem DBM und von 220 % bei der Nachrechnung nach Stufe 2.

Im Rahmen der Nachrechnung nach Stufe 4 konnte auf Grundlage des EDBM für die Überbauten im Bremer Kreuz für das Ziellastniveau LM1 nach DIN EN 1991/NA auch ohne eine zusätzliche Schubverstärkung eine ausreichende Querkrafttragfähigkeit nachgewiesen werden.

### 3 Resümee

Am Beispiel einer bestehenden älteren Spannbetonbrücke wurde der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit mit dem Erweiterten Druckbogenmodell (EDBM) auf Systemebene geführt und für einen Nachweisschnitt im Detail vorgestellt. Im Rahmen des Beispiels wurden das Druckbogenmodell (DBM) nach [7] und das EDBM nach [5] gegenübergestellt. Gegenüber dem DBM werden mit den Modifikationen des EDBM die Betontraganteile des Druckbogens in Bereichen von Zwischenstützungen von Durchlaufträgern in guter Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen zutreffender erfasst. Bei Anwendung des EDBM ergeben sich in Bereichen von Zwischenstützungen im Allgemeinen deutlich höhere Betontraganteile gegenüber dem DBM.

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem Druckbogenmodell im Rahmen einer Nachrechnung nach Stufe 4 durch die Aktivierung von Tragreserven eine ausreichende Querkrafttragfähigkeit nachgewiesen werden konnte, was mit dem Nachweis nach Stufe 2 nicht möglich war. Damit konnten im vorliegenden Fall aufwendige Verstärkungsmaßnahmen vermieden werden.

#### Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), 2011.
- [2] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: 1. Ergänzung zur Richtlinie zur Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand (Nachrechnungsrichtlinie), 2015.
- [3] DIN EN 1992-2:2010-12: Bemessungs- und Konstruktionsregeln von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln, 2010.
- [4] DIN EN 1992-2/NA:2013-04: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 2: Betonbrücken – Bemessungs- und Konstruktionsregeln, 2013.
- [5] Gleich, P.; Maurer, R.: Das Erweiterte Druckbogenmodell für die Nachrechnung von Spannbetonbrücken – Theoretische Hintergründe. In: Bauingenieur 95 (2020), Heft 11, S. 430-439.
- [6] Gleich, P.: Das Erweiterte Druckbogenmodell zur Beschreibung des Betontraganteils bei Querkraft. TU Dortmund, Dissertation, 2019.
- [7] Maurer, R.; Kiziltan, H.: Zum Einfluss des Druckbogens auf den Querkraftwiderstand von Spannbetonbalken. In: Bauingenieur 88 (2013), Heft 4, S. 165-176.
- [8] Nachrechnung A1/A27, AK Bremer Kreuz BW.-Nr.: 2919 634. König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH Dortmund. Februar 2014.



**Dr. - Ing.  
Agnieszka Kolodziejczyk**

kolodziejczyk@khp-dortmund.de  
König und Heunisch Planungsgesellschaft  
mbH Dortmund  
Heinrich-Hertz-Str. 2, 44227 Dortmund

Abb.: M. Schweinoch



**Prof. Dr. - Ing. Reinhard Maurer**

reinhard.maurer@tu-dortmund.de  
Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl Betonbau  
August-Schmidt-Straße 8, 44227 Dortmund

Abb.: Detlef Podehl