

Dipl.-Ing. Michael Girmscheid und Prof. Dr.-Ing. Martin Empelmann

# 1 Zur Nachrechnung von Bestandsbrücken

## 1.1. Allgemeines

Mit dem Rundschreiben vom 26.05.2011 wurde die Richtlinie für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand eingeführt. Diese wurde zur Nachrechnung von Bestandsbauwerken erarbeitet, um eine bundeseinheitliche Handhabung und Bewertung der Ergebnisse bei der Nachrechnung sicherzustellen. Sie eröffnet dem erfahrenen Planer und Ingenieur durch spezielle Regelungen oder Vorgaben die Möglichkeit, die Reserven des Tragwerks und der Baustoffe stärker auszunutzen, ohne das nach DIN EN 1990 geforderte Zuverlässigkeitsniveau einzuschränken. In der 21. Auflage der Schneider Bautabellen wird in Abschnitt 5D „Straßenbrücken in Massivbauweise“ u. a. die Nachrechnung bestehender Brücken behandelt (Kapitel 6).

Die Auswertung von bislang durchgeführten Nachrechnungen von Spannbetonbrücken zeigt im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) häufig rechnerische Defizite beim

- Nachweis der Querkraft in Brückenlängsrichtung,
- Nachweis der Torsionslängsbewehrung,
- Nachweis der Gurtanschlüsse und
- Ermüdungsnachweis (an Koppelfugen und außerhalb der Koppelfugen).

Des Weiteren können im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) häufig die Nachweise der Dekompression und der Mindestbewehrung nicht vollständig eingehalten werden.

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus aktuellen Forschungsvorhaben wurde die Nachrechnungsrichtlinie weiterentwickelt. In einer ersten Ergänzung der Nachrechnungsrichtlinie (noch nicht veröffentlicht) werden dem Anwender alternative Nachweisformate zur Verfügung gestellt. Dabei werden folgende Aspekte behandelt:

- a) Einstufung eines „4+0 Verkehrs“
- b) Alternative Modelle zum Anprallnachweis auf Fahrzeugrückhaltesysteme
- c) Abminderung der Torsionssteifigkeit von Plattenbalken
- d) Nachweis der Querkrafttragfähigkeit im GZT in Längsrichtung bei erweiterter Berücksichtigung der Rissreibung
- e) Nachweis der Querkrafttragfähigkeit in Längsrichtung im GZT auf Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums
- f) Anrechenbarkeit von Spanngliedern auf die Torsionslängsbewehrung
- g) Ergänzende Regelungen zum Schub zwischen Balkensteg und Gurt
- h) Ermüdungsnachweis unter Vernachlässigung der Querkraftbewehrung auf der Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums
- i) Ergänzende Regelungen zum Ermüdungsnachweis der Querkraftbewehrung

Im Folgenden werden die Punkte d) bis f) kurz vorgestellt. Für weitere Details und Hintergründe zu diesen Punkten sowie den anderen oben aufgeführten Aspekten wird auf die zu Grunde liegenden Forschungsberichte [1] verwiesen.

## 1.2. Nachweis der Querkrafttragfähigkeit in Längsrichtung im GZT auf Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums

Das Nachweismodell darf nur bei Spannbetonbauteilen ohne Schubrisse (auch keine nachträglich verpressten Schubrisse) sowie in folgenden Bereichen angewendet werden:

- Querschnittsbereiche, in denen im Grenzzustand der Tragfähigkeit nur Längsdruckspannungen auftreten.
- Bereiche mit einem in der Zugzone liegenden Gurt (z. B. Hohlkasten oberer und unterer Querschnittsrand, Plattenbalken oberer Querschnittsrand), wenn die zugehörige Biegezugspannung im GZT den Wert  $f_{ctm}$  nicht überschreitet.

- Bereiche ohne einen in der Zugzone liegenden Gurt (z. B. Plattenbalken unterer Querschnittsrand), wenn die zugehörige Biegezugspannung im GZT den Wert  $f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk;0,05} / \gamma_c$  nicht überschreitet ( $\alpha_{ct}$  nach unten stehender Tabelle).

Sind die genannten Bedingungen erfüllt, darf der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit durch den Nachweis der schiefen Hauptzugspannungen gemäß folgender Gleichung geführt werden:

$$\sigma_{l,Ed} = 0,5 \cdot \sigma_{cd} + \sqrt{0,25 \cdot \sigma_{cd}^2 + \left( \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot b_w} + \frac{T_{Ed}}{W_T} \right)^2} \leq k_1 \cdot f_{ctd}$$

- mit
- I           Flächenträgheitsmoment
  - $b_w$        die Querschnittsbreite in der jeweiligen Steghöhe unter Berücksichtigung etwaiger Hüllrohre
  - S           Flächenmoment 1. Grades
  - $\sigma_{cd}$      Betonspannung im Bemessungspunkt infolge äußerer Lasten
  - $f_{ctd}$        =  $\alpha_{ct} \cdot f_{ctk;0,05} / \gamma_c$  Bemessungswert der Betonzugfestigkeit
  - $W_T$        Torsionswiderstandsmoment
  - $T_{Ed}$        Bemessungswert des einwirkenden Torsionsmoments
  - $V_{Ed}$        Bemessungswert der einwirkenden Querkraft

Hierbei ist zu beachten, dass der Nachweis in verschiedenen Querschnittshöhen geführt werden muss. Der Abzug für Hüllrohre bei der Querschnittsbreite  $b_w$  erfolgt analog der Vorgehensweise nach DIN FB bzw. EC2.

Die Ermittlung der Hauptzugspannung darf in der Mittelfläche der Stege erfolgen (d. h. ohne die Berücksichtigung von Effekten aus Querbiegung). Es sind jeweils die Leiteinwirkungen  $N_{Ed}$ ,  $M_{Ed}$ ,  $V_{Ed}$ ,  $T_{Ed}$  mit den jeweils zugehörigen Schnittgrößen zu untersuchen.

Zur Sicherstellung eines duktilen Bauteilverhaltens ist die im Hauptzugspannungsnachweis rechnerisch berücksichtigte Vorspannung so zu begrenzen, dass die resultierende Betondruckspannung in Schwerpunkthöhe  $\sigma_{cp} = P_{m,t} / A_c$  in Abhängigkeit des vorhandenen Querkraftbewehrungsgrades  $\rho_{w,prov}$  den in Tafel 1 angegebenen Wert nicht übersteigt. Auch die Werte für  $k_1$  und  $\alpha_{ct}$  richten sich am vorhandenen Querkraftbewehrungsgrad und können Tafel 1 entnommen werden.

**Tafel 1        Beiwerte  $k_1$  und  $\alpha_{ct}$  sowie zulässige Betondruckspannungen  $\sigma_{cp}$**

Vorhandener Querkraftbewehrungsgrad $\rho_{w,prov}$	$k_1$	zulässige Betondruckspannung $\sigma_{cp}$	$\alpha_{ct}$
$\rho_{w,prov} \geq \rho_{w,min}$	1,0	$0,20 \cdot f_{ck}$	1,0
$0,5\rho_{w,min} < \rho_{w,prov} < \rho_{w,min}$	1,0	$(1 + \rho_{w,prov} / \rho_{w,min}) \cdot 0,10 \cdot f_{ck}$	1,0
$\rho_{w,prov} \leq 0,5\rho_{w,min}$	0,8	$0,15 \cdot f_{ck}$	0,85

Der Querkraftnachweis darf für jene Querschnitte entfallen, die näher am Auflager liegen als der Schnittpunkt zwischen der im ungerissenen Zustand I berechneten Schwerachse und einer vom Auflager im Winkel von 45° geneigten Linie.

### 1.3. Nachweis der Querkrafttragfähigkeit im GZT in Längsrichtung bei erweiterter Berücksichtigung der Rissreibung

Der Druckstrebenwinkel  $\theta$  wird bei erweiterter Berücksichtigung der Rissreibung durch die rechnerische Beziehung

$$\frac{4}{7} \leq \cot \theta \leq \cot \beta_r + \frac{V_{Rd,c}}{(A_{sw} / s_w) \cdot z \cdot f_{yd}} \leq 2,5$$

eingegrenzt, wobei der Schubrisswinkel  $\beta_r$  mit der folgenden Formulierung berechnet werden darf:

$$\cot \beta_r = 1,2 + \frac{f_{cd}}{70 \cdot \rho_{w,prov} \cdot f_{yd}} - 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cp}}{f_{cd}} \leq 2,25$$

mit  $\rho_{w,prov}$  vorhandener geometrischer Querkraftbewehrungsgrad  
 $\sigma_{cp}$  Bemessungswert der Betonlängsspannung in Höhe des Schwerpunktes des Querschnitts (Druckspannung negativ)

Hierbei ist zu beachten, dass die Ermittlung der erforderlichen Schubbewehrung ( $a_{s,erf}$ ) iterativ erfolgen muss, da der Schubbrisswinkel  $\beta_r$  von dem Schubbewehrungsgrad  $\rho_{w,prov}$  abhängig ist.

Bei Betonbrücken ohne Schrägrisse oder mit vorhandenen Schrägrissen  $w \leq 0,2\text{mm}$  (Spannbeton) bzw.  $w \leq 0,3\text{mm}$  (Stahlbeton) und einer vorläufig eingeschränkten Nutzungsdauer von bis zu 20 Jahren (Nachweisklasse C) darf der Wertebereich des Druckstrebenwinkels etwas vergrößert werden und wie folgt angesetzt werden:

$$\frac{4}{7} \leq \cot \theta \leq \cot \beta_r + \frac{V_{Rd,c}}{(A_{sw} / s_w) \cdot z \cdot f_{yd}} \leq 3,0$$

## 1.4. Anrechenbarkeit von Spanngliedern auf die Torsionslängsbewehrung

In Stufe 2 der Nachrechnung darf der Spannstahl auf die vorhandene Torsionslängsbewehrung angerechnet werden, wenn

- sich die Spannglieder innerhalb der im Torsionsnachweis verwendeten effektiven Wanddicke  $t_{eff}$  befinden, und
- die Spannglieder regelmäßig über die nachzuweisende Wand verteilt sind.

Außerdem ist sicherzustellen, dass

- der Spannstahl infolge Biegung und Torsion nicht über seine Streckgrenze hinaus beansprucht wird, und
- sich das zugrunde gelegte Tragmodell (räumliches Fachwerk) mit dem in Ansatz gebrachten Beton- und Spannstahl einstellen kann.

Der Spannungszuwachs im Spannstahl darf dabei nicht größer als die Streckgrenze der im Nachweis in Ansatz gebrachten Betonstahlbewehrung sein. Die Spannglieder dürfen im Abstand von 350mm um den Spanngliedmittelpunkt auf die in diesem Bereich erforderliche Torsionslängsbewehrung angerechnet werden.

In jedem Fall sollten bereits in Stufe 1 der Nachrechnung bei der Ermittlung der erforderlichen Torsionslängsbewehrung in Druckgurten die vorhandenen Druckspannungen angesetzt werden, da sich diese günstig auswirken.

## 1.5. Erste Erfahrungen aus der Anwendung

Erste Anwendungen zeigen, dass insbesondere der Querkraftnachweis auf der Grundlage des Hauptzugspannungskriteriums bei Brücken, die bereits durch externe Vorspannung verstärkt wurden, zu einer deutlichen Verbesserung der Nachweise führt.

Folgendes Beispiel zeigt zur Veranschaulichung die Ergebnisse des Nachweises der Querkrafttragfähigkeit im GZT einer repräsentativen, durch externe Vorspannung verstärkten Spannbetonbrücke mit einem Hohlkastenquerschnitt. In Abb. 1 wird die erforderliche und vorhandene Schubbewehrung exemplarisch in einem Rand- und Innenfeld dargestellt.

Im Bereich der Stützen und der Widerlager ist die vorhandene Schubbewehrung größer als die erforderliche Schubbewehrung und damit ausreichend dimensioniert (grün markierte Bereiche). In den Übergangsbereichen (Momentennullpunkte) kommt es zu einer in Stufe 1 der Nachrechnung unzulässigen Einschneidung der Querkraftdeckungsline. Beim Vergleich der erforderlichen Querkraftbewehrung nach Stufe 1 (grau gestrichelte Linie) mit der nach Stufe 2 (schwarze Linie), kann eine Verbesserung der Ergebnisse erzielt werden. Die erweiterte Berücksichtigung der Rissreibung gemäß 1. Ergänzung der Nachrechnungsrichtlinie (schwarz gestrichelte Linie) führt in diesem Beispiel zu einer unwesentlichen Verbesserung der Ergebnisse.

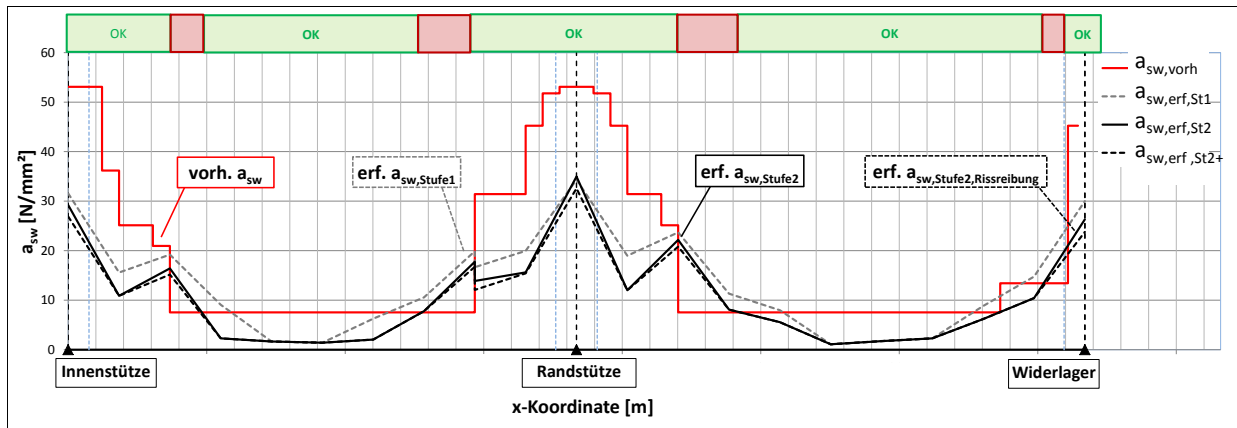


Abb. 1 Querkräftenachweis nach 1. Ergänzung der NRR (vorh.  $a_{sw}$  und erf.  $a_{sw}$ )

Der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit kann nicht in allen Querschnitten erbracht werden (Defizite in den rot gekennzeichneten Bereichen in Abb. 1). Daher wird zusätzlich der Hauptzugspannungsnachweis gemäß 1. Ergänzung der NRR geführt.

Zunächst wird geprüft, ob der Hauptzugspannungsnachweis gemäß 1. Ergänzung der NRR anwendbar ist (Abb. 2). Dies ist nicht der Fall, wenn die schwarz gestrichelte Linie (vorhandene Randspannung) oberhalb der rot gestrichelten Linie (zulässige Randspannung) liegt. In den kritischen Bereichen gemäß Abb. 1 kann der Hauptzugspannungsnachweis überall angewendet werden. Nur im Randfeld kann der Nachweis nicht angewendet werden, da die Biegezugspannungen  $\sigma_x$  im GZT größer als  $f_{ctm}$  sind. Dieser Bereich wurde aber bereits durch den Vergleich von vorhandener zu erforderlicher Bewehrung nachgewiesen.

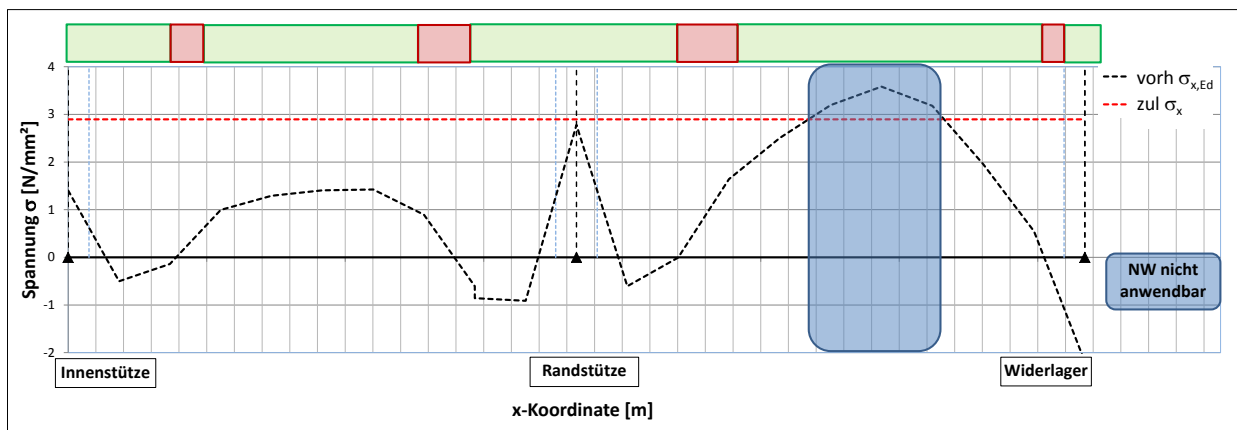


Abb. 2 Hauptzugspannungsnachweis nach 1. Ergänzung der NRR, Überprüfung der Randzugspannungen

Im zweiten Schritt wird der Hauptzugspannungsnachweis geführt. Abb. 3 zeigt die vorhandene Hauptzugspannung (schwarze Linie) und die zulässige Hauptzugspannung (rote Linie). In den kritischen Bereichen sind die vorhandenen Hauptzugspannungen überall kleiner als die zulässigen Hauptzugspannungen. Somit kann der Nachweis im GZT für Querkraft durch eine Kombination des Querkraftnachweises mit erweiterter Berücksichtigung der Rissreibung ( $a_{sw,vorh} > a_{sw,erf,St2+}$ ) und des Hauptzugspannungsnachweises für den vorliegenden Fall erbracht werden.

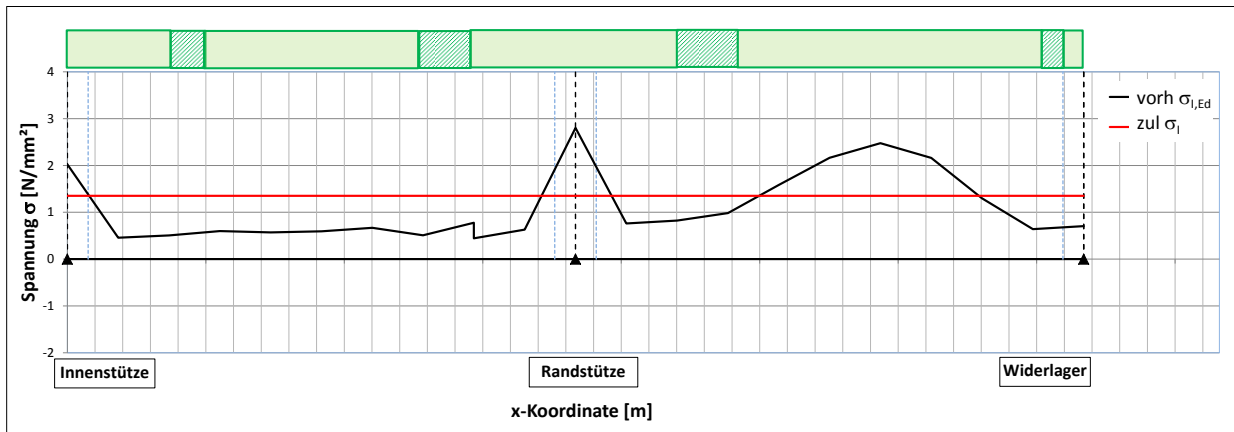


Abb. 3 Hauptzugspannungsnachweis nach 1. Ergänzung der NRR

## 1.6. Literatur

- [1] Hegger, J.; Maurer, R.; Zilch, K.; Rombach, G.: Beurteilung der Querkraft- und Torsions tragfähigkeit von Brücken im Bestand – Kurzfristige Lösungsansätze. Schlussbericht für die Bundesanstalt für Straßenwesen, Projekt-Nr. FE 15.0482/2009/FRB, Institutsbericht-Nr. IMB 317/2013, RWTH Aachen, Mai 2014
- [2] Marzahn, G., Hegger, J., Maurer, R., Zilch, K., Dunkelberg, D., Kolodziejczyk, A., Teworte, F.: Die Nachrechnung von Betonbrücken – Fortschreibung der Nachrechnungsrichtlinie, Beton-Kalender 2015, Verlag Ernst & Sohn