

8 Folgerungen und Ausblick

8.1 Folgerungen

Um den Stegdruckbruch bei Stahl- und Spannbetonträgern mit Bügelbewehrung erforschen zu können, müssen sowohl die Widerstandsseite, d.h. die effektive Druckfestigkeit des Stegbetons, als auch die Tragmechanismen bekannt sein.

Die Untersuchung von zahlreichen Versuchen aus der Literatur lässt den Schluss zu, dass der Verzerrungszustand im Steg, d.h. die Rissbildung durch die Schubverformung, die Stegfestigkeit reduziert. Dieser Effekt ist intensiv erforscht worden. Die bisher entwickelten Beziehungen sind für die praktische Bemessung jedoch ungeeignet oder erlauben nur eine pauschale Abminderung.

Bei Spannbetonträgern kann die Präsenz von geneigten Spanngliedern im Steg die Schubtragfähigkeit zwar erhöhen. Gleichzeitig führt aber die Spanngliedpräsenz im Steg zu einer Behinderung des Spannungsflusses und erzeugt eine innere Spaltrissbildung im Steg. Für diesen Effekt fehlt bisher ein physikalisches Modell.

Die Effekte des Verzerrungszustands und der Spanngliedpräsenz im Steg werden in der aktuellen Schweizer Norm SIA 262 multipliziert. Ein theoretisches Modell hierfür fehlt. Und auch experimentell ist dieses Problem nur sehr wenig an Schubversuchen im Massstab 1:1 ohne Beeinträchtigung durch Massstabeffekte untersucht worden.

Verschiedene analytische Modelle zur Beschreibung der Schubtragwirkung bei Trägern mit Bügelbewehrung berücksichtigen die Verträglichkeit der Verformungen, aber generell keine Variation der Grössen entlang der Balkenachse. Die Schubtragwirkung von parallelen Gurten wird generell vernachlässigt. Zur Auswirkung der Rissuferverzahnung bestehen Unklarheiten.

Das Ziel dieser Arbeit war es, ein einheitliches theoretisches Bruchkriterium für Stegdruckbruch zu entwickeln, das für die praktische Anwendung vereinfacht werden kann.

Für diese Arbeit wurden daher zunächst Schubversuche an ausgebauten Spannbetonbrückenträgern im Massstab 1:1 [65] und dann Prismenversuche zur isolierten Betrachtung der Spanngliedpräsenz unternommen [66]. Die Versuchsmessungen und -erfahrungen dienen als Grundlage für den theoretischen Teil der Arbeit. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Versuchen sind die folgenden:

1. Die Effekte des Verzerrungszustands und der Spanngliedpräsenz sind beide am Stegdruckbruch bei Spannbetonträgern beteiligt und konnten durch Dehnungsmessungen nachgewiesen werden.
2. Die Schubtragwirkung des Druckflanschs (parallele Gurte) konnte durch Dehnungsmessungen nachgewiesen werden.

3. Der Spannungsaufbau im Spannglied erfolgt bei grossen Längsdruckkräften durch eine teilweise Verankerung der Bügelkräfte auf Spanngliedhöhe.
4. Die mittlere Verbundfestigkeit fällt bei Spanngliedern aus Drähten um etwa 50 % geringer aus als üblicherweise angenommen, trotz korrekter Injektion.
5. Der Effekt der Spanngliedpräsenz in Prismen führt bei injizierten Kunststoffhüllrohren zu einer stärkeren Abminderung als bei Stahlhüllrohren.
6. Für die untersuchten Prismen deutet sich eine Multiplikativität mit dem Effekt des Verzerrungszustands an.

Im theoretischen Teil wird zuerst ein physikalisches Modell für die Schubtragwirkung von Stahl- und Spannbetonträgern entwickelt. Dieses Modell ist generell einsetzbar. Es wird hier in erster Linie verwendet, um die Bruchspannungen von Balkenversuchen nachzurechnen. Diese können dann mit dem im Anschluss entwickelten Bruchkriterium für Stegbeton verglichen werden.

Das entwickelte physikalische Modell berücksichtigt die Verträglichkeit der Verformungen und die Variation insbesondere des Druckstrebenwinkels entlang der Balkenachse und -höhe. Für Spannbetonbalken wird die Schubtragwirkung des Druckgurts berücksichtigt. Die Druckstrebenneigung wird unter Berücksichtigung des Spanngliedverbunds ermittelt.

Für den Effekt des Verzerrungszustands im Steg auf die effektive Druckfestigkeit wird ein Kriterium entwickelt, das der Nachrechnung einer Vielzahl von Balkenversuchen mit dem physikalischen Modell mit guter Genauigkeit gegenübergestellt wird.

Für den Effekt der Spanngliedpräsenz wird ein physikalisches Bruchmodell entwickelt, mit dem einheitlich alle Hüllrohrtypen beschrieben werden können. Die Übereinstimmung mit einer Vielzahl von Prismenversuchen aus der Literatur sowie den Laborversuchen ist sehr gut. Schliesslich wird ein physikalischer Ansatz zur Berücksichtigung beider Effekte und eine für die Bemessung geeignete, vereinfachte Beziehung entwickelt.

Mit dem entwickelten Modell sowie dem Bruchkriterium konnten Grossversuche mit guter Genauigkeit detailliert nachgerechnet werden, darunter die eigenen Laborversuche im Massstab 1:1.

Aus dem theoretischen Teil der Arbeit können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Die Effekte aus Verzerrungszustand und Spanngliedpräsenz im Steg können tatsächlich durch einen multiplikativen Ansatz beschrieben werden.
2. Für die Bemessung kann ein Bruchkriterium aufgestellt werden, das den Effekt des Verzerrungszustands im Steg allein in Abhängigkeit vom gewählten Druckstrebenwinkel oder dem mechanischen Bewehrungsgrad und den Effekt der Spanngliedpräsenz allein in Abhängigkeit vom Hüllrohrtyp und -durchmesser berücksichtigt.
3. Das Bruchkriterium ist direkt für die praktische Anwendung geeignet, auch für Fälle $\theta < 25^\circ$.
4. Die Anwendung der Schweizer Norm auf Fälle $\theta < 25^\circ$ kann mit dem Faktor k_c zu unkonservativen Bemessungen führen.

5. Der Reibbeiwert für die Kontaktfläche Beton-Hüllrohr ist ein entscheidender Parameter beim Effekt der Spanngliedpräsenz.
6. Die Schweizer Norm ist diesbezüglich bei injizierten Kunststoffhüllrohren unkonservativ.
7. Die Rissuferverzahnung im Stegbeton ist für die Modellannahme frei rotierender Risse ausreichend, wenn bei deren zunehmender Aktivierung, d.h. bei zunehmenden Verzerrungen im Steg die effektive Stegfestigkeit abgemindert wird, was durch das Kriterium zur Berücksichtigung des Verzerrungszustands gelingt.
8. Die Schubtragwirkung paralleler Gurte kann bei profilierten Stahlbetonträgern realer Ausmasse ohne Längsdruckkraft vernachlässigt werden.
9. Die Schubtragwirkung des Druckgurts (parallele Gurte) beträgt bei den untersuchten Stahlbetonträgern mit Längsdruckkraft und den Spannbetonträgern etwa 10% der Schubbruchlast. Bei Spannbetonbrücken dürfte dieser Wert wegen der deutlich breiteren Flansche (etwa die Fahrbahnplatte) höher ausfallen.
10. Eine geringe Verbundfestigkeit der Spannglieder im Bereich maximalen Moments wirkt sich positiv auf die Schubtragwirkung geneigter Spannglieder aus, da dann im Bereich maximalen Schubs die Spanngliedkraft noch nicht so stark abgebaut ist (ausreichende Verankerung vorausgesetzt).

8.2 Ausblick

Wichtige Aspekte sind im Rahmen dieser Arbeit nur teilweise berührt worden. Insbesondere folgende Punkte benötigen eingehende Untersuchungen:

1. Entwicklung eines physikalischen Modells für Spannbetonträger, dass die Verträglichkeit der Verformungen berücksichtigt.
2. Entwicklung eines verträglichen Ansatzes zur Berücksichtigung der Schubtragwirkung des Druckgurts, sowie die Anpassung dieses Ansatzes für die Bemessung.
3. Schubtragfähigkeit bei einer Zylinderdruckfestigkeit grösser als 60 MPa. Es existieren für diesen Fall nur sehr wenige Balkenversuche, bei denen die Bügelbewehrung ausreichend war, um die Lokalisierung der Stegverformungen in einem kritischen Riss zu vermeiden.
4. Der Einfluss der Verbundwirkung von Spanngliedern auf den Effekt der Spanngliedpräsenz ist zu untersuchen.
5. Diese Arbeit beschäftigt sich in erster Linie mit Stegdruckbruch. Die Rolle der Stegbewehrung bedarf einer genaueren Untersuchung. Dabei sind die Wechselwirkung zwischen Zylinderdruckfestigkeit bzw. -zugfestigkeit und Mindestbewehrung, zwischen dem Bewehrungsgehalt und der Bruchart sowie die Verbundwirkung der Bügel über die Balkenhöhe zu berücksichtigen, insbesondere bei Spannbetonträgern auf Spanngliedhöhe.
6. Bei Stegdruckbruch entlang der Spannglieder ist die Bruchzone klein im Vergleich zur Steghöhe. Das entfestigende Verhalten an dieser Stelle beeinflusst die mögliche Erhöhung der Bruchlast durch zusätzliche Aktivierung der Schubtragwirkung der Flansche. Dadurch ergeben sich eventuell Massstabeffekte.