
Beurteilung aktueller Bemessungsansätze für Torsion mit Biegung und Querkraft anhand nationaler und internationaler Versuchsergebnisse

Fachveröffentlichung der
Bundesanstalt für
Straßenwesen

Beurteilung aktueller Bemessungsansätze für Torsion mit Biegung und Querkraft anhand nationaler und internationaler Versuchsergebnisse

von

Stephan Görtz, Patrick Widell
Fachhochschule Kiel

Birol Fitik
Hochschule für Technik Stuttgart

Thomas Zedler
OBERMEYER Infrastruktur GmbH, München

Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 89.0350
Beurteilung aktueller Bemessungsansätze für Torsion mit Biegung und Querkraft anhand nationaler und internationaler Versuchsergebnisse

Fachbetreuung:
Matthias Müller

Referat:
Betonbau

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/fv-b3>

Bergisch Gladbach, Oktober 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht. Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an verlag@bast.de zur Verfügung gestellt werden.

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.

Beurteilung aktueller Bemessungsansätze für Torsion mit Biegung und Querkraft anhand nationaler und internationaler Versuchsergebnisse

Kurzfassung

Eine Torsionsbeanspruchung stellt eine der grundsätzlichen Belastungsarten eines Balkenbauteils dar, wobei die Beanspruchung zumeist in Kombination mit einer ergänzenden Biege- bzw. Querkraftbeanspruchung einhergeht. Die Nachrechnung zahlreicher älterer Bestandsbrückenbauwerke infolge des gestiegenen Schwerlastverkehrs zeigt, dass gerade bei den Beanspruchungsarten Querkraft und Torsion vielfach rechnerische Defizite festzustellen sind, obwohl das äußere Erscheinungsbild oft noch keine Anzeichen einer Überbeanspruchung erkennen lässt.

Während die Bemessungsmodelle für Stahlbeton- bzw. Spannbetonbauteile für Querkraft durch zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten immer weiter verfeinert wurden, sind in den letzten 40 Jahren in Deutschland sowie international im Vergleich deutlich weniger Untersuchungen zu Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter Torsionsbelastung durchgeführt worden. Um einen ergänzenden Beitrag zur Forschung an torsionsbeanspruchten Bauteilen zu leisten und torsionsbeanspruchte Bauteile in gleichem Maße sicher und effizient auszunutzen, wie dieses unter Querkraftbeanspruchung möglich ist, wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes Folgendes erbracht:

1. Zusammenfassende Darstellung des Sachstandes bzw. aktueller Bemessungsmodelle zur Torsionstragfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen.
2. Erstellung einer Datenbank bestehend aus 1.527 Torsionsversuchen an Stahlbeton- und Spannbetonbalken in Kombination mit Beanspruchung infolge Biegung, Normalkraft und Querkraft. Der Aufbau der Datenbank erfolgte angelehnt an die international anerkannten ACI-DAfStb Shear Databases.
3. Überprüfung der Torsionstragfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen in Kombination mit Biegung, Normalkraft und Querkraft im Kontext des aktuellen Eurocode anhand der Datenbank. Basierend auf den Auswertungen wurden Sicherheitsdefizite bzw. Optimierungspotentiale aufgezeigt.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- (1) Mit dem Torsionsmodell der DIN EN 1992 werden die experimentellen Bruchlasten grundsätzlich gut erfasst. Sicherheitsdefizite bestehen lediglich bei der Druckstrebenragfähigkeit.
- (2) Bezüglich der Druckstrebenneigung zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass ausgehend von der Rissneigung im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine Rotation auf den Plastizitätswinkel möglich ist. Für Bauteile ohne Normalkraftbeanspruchung konnte anhand der Datenbank eine maximale Rotation von 20° festgestellt werden, mit steigender Normalkraftbeanspruchung und damit flacher werdendem Risswinkel nimmt das Rotationspotential ab.
- (3) Die Druckstrebenragfähigkeit unter Torsionsbeanspruchung liegt gemäß den durchgeführten Untersuchungen sowohl nach DIN EN 1992 als auch nach dem Rechenansatz der prN EN 1992 (Fassung Oktober 2021) auf der unsicheren Seite. Dieses wurde bereits in ZEDLER 2011 festgestellt und ist vor allem darin begründet, dass sich der äußere Teil der Betondeckung unter Torsionseinwirkung teilweise der Beanspruchung entzieht.
- (4) Die Datenbankauswertungen bestätigen die Untersuchungen von THÜRLIMANN 1975, ZEDLER 2011 bzw. STAKALIES 2021, nachdem auch Bewehrung im Inneren des idealisierten Hohlkastens einen Beitrag zur Torsionstragfähigkeit liefert und als Torsionslängsbewehrung ansetzbar ist.
- (5) Darüber hinaus zeigen die Auswertungen an der Datenbank vor allem unter kombinierter Beanspruchung (Torsion mit Biegung bzw. Querkraft), dass die rechnerischen Bruchmomente im Regelfall überschritten werden und daher offensichtlich noch Traglastreserven bestehen. Dieses wird im Wesentlichen auf Umlagerungen der Längsbewehrung innerhalb des Querschnittes sowie auf die Tragwirkung der ungerissenen Betondruckzone zurückgeführt.

Basierend auf den o. g. Erkenntnissen wurden Empfehlungen für eine Weiterentwicklung des Torsionsmodells des Eurocode 2 abgeleitet, einmal im Hinblick auf die Bemessung von Neubauwerken und einmal im Hinblick auf die Nachrechnung von Bestandsbauwerken.

Evaluation of current design models for torsion with bending and shear force based on national and international test results

Abstract

Torsion is one of the basic types of loading on a beam element, which usually acts in combination of an additional bending moment and/or shear forces. With respect to the recalculation of existing bridges momentarily done as result of a significantly increased traffic loading over the past decades, the design checks for shear and torsion loading often cannot be fulfilled, while the structure itself doesn't present any visible evidence of excessive stress impact.

While intensive research studies have been conducted recently to determine the design provisions for the shear bearing capacity of RC and PC elements in a most accurate way, the research studies done with regard to the corresponding intention for a torsion loading have been rather limited in number in Germany and internationally over the last 40 years. In order to improve the knowledge of the load bearing capacity of torsion-stressed elements and utilize those as safely and efficiently as possible for shear loading, the following investigations were carried out as part of this project:

1. Summarizing presentation of the state of the art of current design models to determine the torsional load bearing capacity of reinforced and prestressed concrete members.
2. Creation of a database consisting of 1,527 tests on reinforced concrete and prestressed concrete beams subjected to torsion loading – pure and in combination with bending, normal force and/or shear force. The set up of the database is based on the internationally established standard of the ACI-DAfStb Shear Database.
3. Review of the current design provisions (e. g. Eurocode) with regard to the load bearing capacity of reinforced and prestressed concrete members subjected to torsion or combined loading with bending, normal force and/or shear force using the database. On the basis of these evaluations insufficient safety levels for particular design checks as well as potential optimization are identified.

The results can be summarized as follows:

- (1) For members with intended, ductile reinforcement failure mode the experimental failure loads are predicted by The torsion design model of DIN EN 1992 with acceptable accuracy. For members with a detected failure of the concrete strut the design provisions reveal an insufficient safety level
- (2) With regard to the strut inclination the investigations show, that starting with the crack angle a rotation in the direction of the angle of plasticity is possible. For girders without normal force a maximum rotation of 20° could be observed as result of the database analysis. With increasing normal force, and a corresponding flatter crack angle by this, the possible rotation decreases.
- (3) According to the investigations the failure of the concrete struts is predicted with insufficient safety according to both DIN 1992 as well as the design model of prN 1992 (draft version from October 2021). This was already identified by ZEDLER 2011 and is primarily due to the fact that the concrete cover does, depending on its relative thickness, not contribute to the torsional load bearing capacity.
- (4) The database evaluations confirm the investigations by THÜRLIMANN 1975, ZEDLER 2011 and STAKALIES 2021 with regard to the positive influence on the load bearing capacity of longitudinal reinforcement positioned inside the idealized hollow box section.
- (5) In addition, the database analysis identifies, that especially under combined loads (torsion with bending and/or shear force) the calculated failure load for torsion is usually exceeded. By further investigations the detected additional load bearing capacity in case of a combined loading to torsion and bending could be attributed to the redistribution of the longitudinal stresses within the cross-section respectively to the load-bearing capacity of the uncracked concrete compression zone.

Based on the above results, recommendations were derived for further development of the torsion model of Eurocode 2 - with regard to the design of new structures as well as with regard to the recalculation of existing buildings.

Beurteilung aktueller Bemessungsansätze für Torsion mit Biegung und Querkraft anhand nationaler und internationaler Versuchsergebnisse

Kurzbericht

Eine Torsionsbeanspruchung stellt eine der grundsätzlichen Belastungsarten eines Balkenbauteils dar, wobei die Beanspruchung zumeist in Kombination mit einer ergänzenden Biege- bzw. Querkraftbeanspruchung einhergeht. Die Nachrechnung zahlreicher Bestandsbrückenbauwerke zeigt, dass gerade bei den Beanspruchungsarten Querkraft und Torsion infolge des gestiegenen Schwerlastverkehrs vielfach rechnerische Defizite festzustellen sind, obwohl sich aus dem äußeren Erscheinungsbild oft noch keine Anzeichen einer Überbeanspruchung ableiten lassen.

Während die Bemessungsmodelle für Stahlbeton- und Spannbetonbauteile für Querkraft durch zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten immer weiter verfeinert wurden, sind in den letzten 40 Jahren in Deutschland sowie international nur wenige Untersuchungen zur Torsion durchgeführt worden.

Um torsionsbeanspruchte Bauteile in gleichem Maße sicher und effizient auszunutzen, wie dieses unter Querkraftbeanspruchung möglich ist, wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes folgendes erbracht:

1. Zusammenstellung des Sachstandes bzw. aktueller Bemessungsmodelle zur Torsionstragfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen.
2. Erstellung einer Datenbank bestehend aus 1.527 Torsionsversuchen an Stahlbeton- und Spannbetonbalken in Kombination mit Beanspruchung infolge Biegung, Normalkraft und Querkraft. Der Aufbau der Datenbank erfolgte angelehnt an die international anerkannte ACI-DAfStb Shear Database, die in REINECK / FITIK 2022 veröffentlicht ist.
3. Überprüfung der Torsionstragfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen in Kombination mit Biegung, Normalkraft und Querkraft im Kontext des Eurocode anhand der Datenbank, um hieraus Sicherheitsdefizite bzw. Optimierungspotentiale abzuleiten.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- (1) Mit dem Torsionsmodell der DIN EN 1992 werden die experimentellen Bruchlasten grundsätzlich gut erfasst. Sicherheitsdefizite bestehen lediglich bei der Druckstreben­tragfähigkeit (siehe Punkt (3)). Darüber hinaus liegt das Bemessungsmodell tendenziell leicht auf der sicheren Seite.
- (2) Bezüglich der Druckstreben­neigung zeigen die durchgeführten Untersuchungen, dass – innerhalb gewisser Grenzen – ausgehend von der Riss­neigung im Grenzzustand der Tragfähigkeit eine Rotation auf den Plastizitätswinkel möglich ist. Für Bauteile ohne Normalkraftbeanspruchung konnte anhand der Datenbank eine maximale Rotation von 20° festgestellt werden, mit steigender Normalkraftbeanspruchung und damit flacher werdendem Risswinkel nimmt die maximale Rotation entsprechend ab. Basierend auf den Datenbankauswertungen ist das Verfahren bis zu folgendem Grenzwinkel θ_{Grenz} abgesichert:

Für Bauteile ohne Normalkraft bzw. mit Drucknormalkraft:

$$\theta_{\text{Grenz}} = \theta^I \pm \Delta\theta$$

mit: θ^I Druckstreben­neigung, die nach Zustand I ermittelt wird

$\Delta\theta$ maximaler Rotationswinkel gegenüber θ^I

$$= \theta^I - 15^\circ \geq 0^\circ, \leq 20^\circ$$

Für Bauteile mit Zugnormalkraft sind keine Torsionsversuche bekannt. Hier wird vorgeschlagen, die Druckstreben­neigung innerhalb der folgenden Grenzen zu wählen:

$$45^\circ \leq \theta \leq \theta^I$$

- (3) Die Druckstreben­tragfähigkeit unter Torsionsbeanspruchung liegt gemäß den durchgeführten Untersuchungen sowohl nach DIN EN 1992 als auch nach dem Rechenansatz der prN EN 1992 (Fassung Oktober 2021) auf der unsicheren Seite. Dieses wurde bereits in ZEDLER 2011 festgestellt und ist vor allem darin begründet, dass sich der äußere Teil der Betondeckung unter Torsionseinwirkung teilweise der Beanspruchung entzieht. Basierend auf den Untersuchungen von Zedler wurde im Rahmen des vorliegenden Berichtes ein vereinfachter und weitestgehend auf der sicheren Seite liegender Rechenansatz vorgeschlagen, der für die Torsionsbeanspruchung von einer verminderten Tragwirkung der Betondeckung ausgeht. Sollte dieser Rechenansatz im Zuge von

Brückennachrechnungen keine ausreichende Tragfähigkeit liefern, wird vorgeschlagen, einen Nachweis mit dem genaueren Ansatz nach ZEDLER 2011 zu führen, der allerdings rechenaufwendiger ist.

- (4) Die Datenbankauswertungen bestätigen die Untersuchungen von THÜRLIMANN 1975, ZEDLER 2011 bzw. STAKALIES 2021, nachdem auch Längsbewehrung im Inneren des idealisierten Hohlkastens einen Beitrag zur Torsionstragfähigkeit leistet und daher als Torsionsbewehrung ansetzbar ist. Die Auswertungen an der Datenbank weisen für den Rechenansatz nach STAKALIES 2021 eine ausreichende Sicherheit aus. Hiernach wird das Torsionsmoment in eine Längszugkraft umgerechnet, für die dann eine Bemessung unter Mitwirkung der Bewehrung im Inneren des idealisierten Hohlkastens durchgeführt werden kann. Dieser Ansatz bringt gerade bei der Nachrechnung vieler älterer Plattenbalkenbrücken erhebliche Vorteile, da bei diesen Bauwerken vielfach nur eine geringe Längsbewehrung vorhanden ist, aber oft eine große Spannbewehrung, die aber im Regelfall im Inneren des idealisierten Torsionshohlkastens angeordnet ist und daher rechnerisch bislang nicht angesetzt werden darf.
- Allerdings sollten hierzu nochmals zielgerichtete experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden, ob die Bewehrung auch bei allen Beanspruchungs- bzw. Bewehrungskonstellationen bis zur Streckgrenze gedehnt bzw. am Lastabtrag beteiligt wird (siehe unter (8)).
- (5) Darüber hinaus zeigen die Auswertungen an der Datenbank vor allem unter kombinierter Beanspruchung (Torsion mit Biegung bzw. Querkraft), dass die rechnerischen Bruchmomente im Regelfall überschritten werden und daher offensichtlich noch Traglastreserven bestehen. Dieses wird im Wesentlichen auf die beiden folgenden Effekte zurückgeführt:
- Offensichtlich besteht hinsichtlich der Anordnung der Längsbewehrung eine gewisse Flexibilität bzw. Umlagerungsmöglichkeit innerhalb des Querschnittes. Wenn unter kombinierter Beanspruchung infolge Biegung und Torsion die Biegezugbewehrung ausgenutzt ist, kann bis zu einem gewissen Grad die darüber hinaus vorhandene Längsbewehrung zum Nachweis der Torsionstragfähigkeit herangezogen werden, auch wenn diese ungleichmäßig über den Querschnitt verteilt ist.
 - Solange die Druckzone ungerissen bleibt, kann diese vor allem bei geringen Bügelbewehrungsgraden und geringer Torsionsbeanspruchung einen nennenswerten Anteil an Querkraft übertragen (siehe GÖRTZ 2004 u.a.), ggf. kann diese auch einen gewissen Torsionstraganteil ableiten. Dieses ist allerdings in weiteren Untersuchungen zielgerichtet zu untersuchen.
- (6) Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen werden die beiden folgenden Bemessungsansätze für Torsionsbeanspruchung vorgeschlagen, wenngleich zur Absicherung in Teilbereichen noch ergänzende Untersuchungen erforderlich sind (siehe Punkt (8)):
- a) Vorschlag zur Konkretisierung des Torsionsmodells des Eurocode 2
Für die Bemessung von Neubauwerken werden die folgenden Konkretisierungen des bestehenden Eurocode vorgeschlagen:
- Frei wählbare Druckstrebenneigung, wobei die unter (2) definierten Grenzwerte einzuhalten sind.
 - Kompensation von Sicherheitsdefiziten durch Abminderung der Druckstrebentragfähigkeit nach dem vereinfachten Ansatz nach Punkt (3).
- b) Potentiale im Hinblick auf die Nachrechnung von Bestandsbauwerken
Um bei den vielen Bestandsbauwerken, die augenscheinlich in einem akzeptablen Zustand sind, aber ein rechnerisches Defizit beim Nachweis der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit aufweisen, einen Ersatzneubau oder aufwendige Ertüchtigungsmaßnahmen zu vermeiden, ist es sinnvoll, entsprechende Traglastpotentiale auszunutzen, die im Rahmen der Auswertungen mit der Torsionsdatenbank aufgezeigt werden konnten:
- Rechnerische Berücksichtigung der Spannglieder im Inneren des idealisierten Hohlkastens gemäß dem Ansatz von STAKALIES.
 - Heranziehen der vorhandenen Längsbewehrung für die Torsionstragfähigkeit, unabhängig, wo diese innerhalb des Querschnittes angeordnet ist.
 - Additive Berücksichtigung der Querkrafttragfähigkeit der ungerissenen Betondruckzone gemäß dem Rechenansatz nach GÖRTZ 2004 bzw. ergänzend die Torsionstragfähigkeit der ungerissenen Betondruckzone.

- Genauerer Nachweis der Druckstreben­tragfähigkeit gemäß dem Ansatz von ZEDLER 2011.

Hingewiesen sei jedoch, dass für eine abschließende Empfehlung noch ergänzende Untersuchungen erforderlich sind.

- (7) Abschließend ist die Torsionsdatenbank nach den Rechenansätzen aus Punkt (6a) und (6b) ausgewertet und die Versagenssicherheit mit der des bestehenden Eurocode verglichen worden. Hier­nach ergeben sich folgende Ergebnisse:
- Grundsätzlich werden sowohl durch den Ansatz nach (6a) als auch nach (6b) die Torsionstragfähigkeit unter alleiniger Wirkung und auch in Kombination mit Biegung und Querkraft vergleichsweise trendfrei erfasst.
 - Unter kombinierter Beanspruchung (Torsion mit Biegung und/oder Querkraft) sind höhere Versagenssicherheiten T_{exp}/T_{calc} feststellbar als unter reiner Torsion. Während die Mittelwerte T_{exp}/T_{calc} nach den vorgeschlagenen Ansätzen unter reiner Torsion im Mittel bei etwa 1,15 liegen, steigen diese unter kombinierter Beanspruchung etwa um 20% auf ca. 1,4 an. Der Variationskoeffizient liegt bei allen Auswertungen durchgängig zwischen 0,2 und 0,25, so dass letztlich jede Beanspruchungsart gleichermaßen zufriedenstellend erfasst wird.
 - Im Vergleich zu den o.g. Ansätzen liegt das vereinfachte Verfahren der DIN EN 1992, nach dem für die Torsionsbemessung – unabhängig von der Querkraftbemessung – eine Druckstreben­neigung von 45° verwendet wird, teilweise deutlich auf der sicheren Seite. Dieses ist darin begründet, dass die Datenbank viele Versuche enthält, bei denen der Bügelbewehrungsgrad geringer als der Längsbewehrungsgrad ist, hier treten nach der Rissbildung hohe Rotationen der Druckstreben­neigung auf, so dass die Bruchlasten bei Ansatz einer 45°-Druckstreben­neigung unterschätzt werden. Dieses ist im Falle der Bemessung eines neuen Bauwerks unerheblich, da hier in solchen Fällen dann sowohl die Längs- als auch die Bügelbewehrung auf die 45°-Druckstreben­neigung ausgelegt werden; bei der Nachrechnung von Bestandsbauwerken kann dieses Vorgehen allerdings zu ungünstigen Ergebnissen führen, wenn der Bügel- und Längsbewehrungsgrad nicht in gleicher Größenordnung liegen.
 - Wenn bei dem Ansatz der DIN EN 1992 eine variable Druckstreben­neigung verwendet wird, ergeben sich im Vergleich zu dem vorgenannten vereinfachten Ansatz des Eurocode durchweg bessere Übereinstimmungen zwischen rechnerischem und experimentellen Torsions-Bruchmoment T_{exp} bzw. T_{calc} . Im Vergleich zu dem unter Punkt (6) vorgeschlagenen Ansatz sind die Mittelwerte T_{exp}/T_{calc} und vor allem die Variationskoeffizienten allerdings um etwa 30% größer. Damit stellt der unter (6) vorgeschlagene Ansatz im Hinblick auf eine wirtschaftlichere Ausnutzung durchaus eine Verbesserung dar, dieses gilt vor allem für Bestandsbauwerke.
- (8) Zur Absicherung der unter (6b) aufgezeigten Potentiale bedarf es allerdings in den folgenden Punkten noch ergänzender Untersuchungen:
- Die Auswertungen an der Datenbank weisen für den Rechenansatz nach STAKLIES 2021, nachdem die Spannglieder im Inneren des idealisierten Hohlkastens angesetzt werden dürfen, eine ausreichende Sicherheit aus. Bislang ist allerdings nicht nachgewiesen, ob sich unter Torsionsbeanspruchung wirklich in allen Fällen eine Dehnungsverteilung einstellt, bei der im Querschnittsinneren die Bewehrung umfänglich bis zur Streckgrenze beansprucht wird. Zur Überprüfung sollten Bauteilversuche mit hohem Torsionsanteil und einem hohen Anteil an innenliegender Längsbewehrung bei zugleich geringer (Torsions- und Bügel-) Bewehrung im idealisierten Hohlkasten durchgeführt werden.
 - Weiterhin konnten durch die Datenbankauswertungen Umlagerungspotentiale im Hinblick auf die Anordnung bzw. Verteilung der Längsbewehrung im Querschnitt aufgezeigt werden. Die Grenzen der Umlagerungspotentiale sind allerdings zu überprüfen, da in Versuchen in der Literatur sehr wohl eine Abhängigkeit der Torsionstragfähigkeit von der Lage der Bewehrung feststellbar ist (siehe z.B. LAMPERT / THÜRLIMANN 1968).
 - Weiterhin konnte anhand der Datenbankauswertungen ein über die Fachwerk­wirkung hinausgehender Querkrafttraganteil bestätigt werden, der allerdings mit zunehmender Torsionsbeanspruchung an Bedeutung verliert. Gerade im Hinblick auf die Nachrechnung von Bestandsbauwerken mit geringer Bügelbewehrung wäre eine tatsächliche Bestimmung dieses Betontraganteils unter kombinierter Beanspruchung wünschenswert.

Evaluation of current design models for torsion with bending and shear force based on national and international test results

Summary

Torsion is one of the basic types of loading on a beam element, which usually acts in combination of an additional bending moment and/or shear forces. With respect to the recalculation of existing bridges momentarily done as result of a significantly increased traffic loading over the past decades, the design checks for shear and torsion loading often cannot be fulfilled, while the structure itself doesn't present any visible evidence of excessive stress impact.

While intensive research studies have been conducted recently to determine the design provisions for the shear bearing capacity of RC and PC elements in a most accurate way, the research studies done with regard to the corresponding intention for a torsion loading have been rather limited in number in Germany and internationally over the last 40 years. In order to improve the knowledge of the load bearing capacity of torsion-stressed elements and utilize those as safely and efficiently as possible for shear loading, the following investigations were carried out as part of this project:

1. Summarizing presentation of the state of the art of current design models to determine the torsional load bearing capacity of reinforced and prestressed concrete members.
2. Creation of a database consisting of 1,527 tests on reinforced concrete and prestressed concrete beams subjected to torsion loading – pure and in combination with bending, normal force and/or shear force. The set up of the database is based on the internationally established standard of the ACI-DAfStb Shear Database.
3. Review of the current design provisions (e. g. Eurocode) with regard to the load bearing capacity of reinforced and prestressed concrete members subjected to torsion or combined loading with bending, normal force and/or shear force using the database. On the basis of these evaluations insufficient safety level for particular design checks as well as potential optimization are identified.

The results can be summarized as follows:

- (1) For members with intended, ductile reinforcement failure mode the experimental failure loads are predicted by the torsion design model of DIN EN 1992 with acceptable accuracy. For members with a detected failure of the concrete strut the design provisions reveal an insufficient safety level
- (2) With regard to the strut inclination the investigations show, that starting with the crack angle a rotation in the direction of the angle of plasticity is possible. For girders without normal force a maximum rotation of 20° could be observed as result of the database analysis. With increasing normal force, and a corresponding flatter crack angle by this, the possible rotation decreases. Based on the database analysis a plasticity based approach does result in a sufficient design safety up to a critical strut inclination θ_{crit} of:

For members either with additional normal force or without axial compression force respectively prestressing:

$$\theta_{crit} = \theta^I \pm \Delta\theta$$

with: θ^I strut inclination according to state I

$\Delta\theta$ maximum rotation against θ^I

$$= \theta^I - 15^\circ \geq 0^\circ, \leq 20^\circ$$

For members with normal tensile force no torsion test are known. A reasonable suggestion is to choose the strut inclination within the following limits:

$$45^\circ \leq \theta \leq \theta^I$$

- (3) According to the investigations the failure of the concrete struts is predicted with insufficient safety, according to both DIN 1992 as well as the design model to prN 1992 (draft version from October 2021). This was already identified by ZEDLER 2011 and is primarily due to the fact that the concrete cover does, depending on its relative thickness, not contribute to the torsional load bearing capacity. Based on the investigations of ZEDLER a simplified and safe design equation was derived in this report. In case the approach given here does not result in a sufficient load-bearing capacity

while recalculating an existing bridge, reference is made to the more precise but also complex design provisions given in ZEDLER 2011.

- (4) The database evaluations confirm the investigations by THÜRLIMANN 1975, ZEDLER 2011 and STAKALIES 2021 with regard to the positive influence on the load bearing capacity of longitudinal reinforcement positioned inside the idealized hollow box section. The database analysis show a sufficient failure safety for the design approach according to STAKALIES 2021 In case of members with combined loading to torsion and bending. According to this approach the required longitudinal reinforcement for the torsion loading is converted into a longitudinal tensile force, which is further taken into account in the design for bending. The design checks are possibly conducted with the participation of the reinforcement inside the idealized hollow box section. This approach implies definite advantages with special regard to the recalculation of older T-beam bridges, since these structures often have just a small amount of longitudinal reinforcement but a significant amount of prestressing tendons, of which the last are usually arranged inside the idealized hollow box section and therefore currently cannot be taken into account for the torsional bearing capacity . In order to take advantages of this design approach, further experimental studies should be conducted to investigate whether the reinforcement positioned inside the hollow box section does reach the yield limit in relation to its position and the ratio of combined loading (T / M) (see under (8)).
- (5) Additionally the database analysis shows, that especially under combined stress (torsion with bending and/or shear force), the calculated failure load for torsion is usually exceeded. By further detailed examination of a number of tests being part of the database the detected additional capacity could be attributed to the following two effects:
- Due to the additional bending loading a kind of capacity of a possible redistribution of the longitudinal stresses within the cross section is being generated. If the flexural reinforcement is utilized under combined stress due to bending and torsion, the additional longitudinal reinforcement in the cross-section can be used for the torsional load-bearing capacity, even if this is very unevenly distributed across the cross-section.
 - As long as the compression zone remains uncracked, it can transmit a significant proportion of shear force, especially in case of girders with low shear reinforcement and low torsional stress (see GÖRTZ 2004, etc.). In addition, a torsional load-bearing component of the uncracked concrete pressure zone is also conceivable. However, this must be specifically examined and quantified in further investigations.
- (6) Based on the investigations, the following two design models for torsion are proposed, although additional investigations are still required to ensure certain areas (see point (8)):
- a) Proposal to specify the torsion model of Eurocode 2
The following specifications of the existing Eurocode are proposed for the design of new buildings:
- Truss model with variable strut inclination, whereby the limit values defined under (2) are to be met.
 - To compensate safety deficits: reducing the concrete strut failure according to the simplified approach according to point (3).
- b) Possible utilization of load bearing capacity reserves with regard to the recalculation of existing structures
In order to avoid demolition and reconstruction of many existing structures that are in an acceptable condition but have a computational deficit in shear or torsion capacity, it is reasonable to use load bearing capacity reserves, that have been identified by the database analysis:
- Use of the tendons inside the idealized hollow box section in case of combined loading according to the design approach given in STAKALIES 2021.
 - In case of combined loading, taking the existing longitudinal reinforcement for the torsional load capacity into account, independently to its position in relation to the idealized hollow box section.
 - Additional consideration of the shear load-bearing capacity of the uncracked concrete compression zone according to the design model according to GÖRTZ 2004 or additionally the torsional load-bearing capacity of the uncracked concrete compression zone.

- More precise verification of the compression strut load capacity according to ZEDLER 2011.

However, it should be noted that further studies are required for a final recommendation.

- (7) Finally, the torsion database was evaluated according to the approaches from points (6a) and (6b) and the failure safety was compared with that of the existing Eurocode. The results are as follows:
- In principle, the load-bearing capacity under pure torsion as well as in combination with bending and shear force is recorded well and trend-free using the approaches according to (6a) and (6b).
 - Under combined stress (torsion with bending and/or shear force) an increased failure safety T_{exp}/T_{calc} can be determined than under pure torsion.
 - While T_{exp}/T_{calc} is in average around 1.15 according to the proposed design approaches, the failure safety increases by around 20% to 1.4 under combined stress.
 - The coefficient of variation in all evaluations is consistently between 0.2 and 0.25, so that ultimately every type of stress is recorded equally satisfactorily.
 - In comparison to the above-mentioned approaches, the simplified procedure of DIN EN 1992, according to which a compression strut inclination of 45° is used for torsion design - independent of the shear force design - is sometimes considerably on the safe side. This is due to the fact that the database contains many tests in which the stirrup reinforcement ratio is lower than the longitudinal reinforcement ratio. Here, after crack formation, high rotations of the compression strut inclination occur, so that the calculated failure loads using a 45° strut inclination underestimate the load-bearing capacity. In case of designing a new structure, this is irrelevant, here both the longitudinal and the stirrup reinforcement are designed for the 45° strut inclination, but when recalculating existing structures this can lead to unfavorable results if the stirrup and longitudinal reinforcement ratio are not in the same range.
 - If a variable strut inclination is used in the DIN EN 1992 design model, there is consistently a better match between the calculated and experimental torsional failure moment T_{exp} and T_{calc} compared to the simplified approach of the Eurocode before. However, compared to the approach proposed under point (6), the mean values T_{exp}/T_{calc} and, above all, the coefficients of variation are around 30% larger. The proposed approach therefore represents an improvement in terms of more economical utilization; this particularly applies to the recalculation of existing structures.
- (8) In order to prove the potential approaches given by (6b), additional investigations are required with regard to the subjects as follows:
- The database analysis implies a sufficient failure safety for the design approach according to STAKALIES 2021, taking the tendons inside the idealized hollow box section into account.
 - However, it still remains to be proven whether the required strain is actually achieved in all cases under torsional stress, at which the reinforcement inside the idealized hollow box section also reaches the yield limit. Hence, in addition to those conducted by ZEDLER 2011 further tests should be conducted with a variation of the longitudinal reinforcement position and ratio of torsion to bending loading.
 - Furthermore, the database analysis implies a redistribution potential with regard to the arrangement or distribution of the longitudinal reinforcement in the cross section in case of a combined loading. The limits of the rearrangement potentials must be checked, as in other experiments in the literature a dependence of the torsional load capacity on the position of the reinforcement can be determined (see e. g. LAMPERT / THÜRLIMANN 1968).
 - Finally, based on the database analysis of tests with combined loading, it was possible to confirm a shear capacity beside the truss model, although this becomes less important as the torsional load increases. Especially with regard to the recalculation of existing structures with low stirrup reinforcement, an accurate determination of this concrete load-bearing proportion under combined loads makes sense.