

Kurzfassung

des Instituts für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen
und
des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau (IKI) der Hochschule Biberach (HBC)

in deutscher, englischer und französischer Sprache

Gegenstand: „Überprüfung der Zuverlässigkeit der für die nächste Generation von EN 1992-1-1 vorgesehenen neuen Bemessungsansätze gegen Durchstanzen ohne Durchstanzbewehrung und Querkraft ohne Querkraftbewehrung“

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik, DIBt
Geschäftszeichen: P 52-5-7.322.1-2032/18

10829 Berlin
Kolonnenstraße 30 L
P 52-5-7.322-2024/18

erstattet von: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Prof. Dr.-Ing. Marcus Ricker, M.Sc.
Dr.-Ing. Viviane Adam
Tânia Feiri, PDEng, M.Sc.
Konstantin Nille-Hauf, B.Eng.

Datum: Aachen und Biberach, den 13.10.2021

Projekt-Nr. IMB: F-2017-034

Projekt-Nr. IKI: P-18001

Diese Kurzfassung erfolgt in deutscher, englischer und französischer Sprache.

Kurzfassung

Im Zuge der Fortschreibung des Eurocode 2 (EC2) auf europäischer Ebene wurden für die Bestimmung des Durchstanzwiderstands ohne Durchstanzbewehrung und der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung von der aktuellen Norm abweichende Modelle vorgeschlagen, deren Herleitung auf Basis der *Critical Shear Crack Theory* (CSCT) erfolgte. Bei der Entwicklung der bisherigen Ansätze wurde in Deutschland der empirische Vorfaktor anhand von Versuchsergebnissen abgeleitet. Dabei wurde ein Zielwert von 1,0 für den 5 %-Quantilwert des Verhältnisses aus Versuchsbruchlast und rechnerischer Durchstanz- bzw. Querkrafttragfähigkeit zugrunde gelegt. Im Zuge des vorliegenden Forschungsprojekts wurden die Versagenswahrscheinlichkeiten für die vorgeschlagenen Bemessungsmodelle mit semi-probabilistischen Methoden quantitativ ermittelt. Dazu wurden die Zuverlässigkeitsindices β zur Validierung der Ergebnisse mit teilweise vier verschiedenen Berechnungsverfahren (*Mean Value First Order Second Moment Method*, *First Order Reliability Method*, *First Order Second Moment Method* und *Monte Carlo Simulation*) ermittelt. Der Zuverlässigkeitsindex β ist ein Maß für die Versagenswahrscheinlichkeit p_f ; je größer β , desto kleiner ist p_f . Der Zielwert für die Kalibrierungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit wurde gemäß DIN EN 1990 zu $\beta = 3,8$ festgelegt. Das entspricht dem Mindestwert der Zuverlässigkeitsklasse RC 2 für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren, die mit der Schadensfolgeklasse CC 2 verknüpft ist.

Die durchgeführten Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass das Sicherheitsniveau für die betrachteten Bemessungsgleichungen im Wesentlichen durch die Streuung der Modellunsicherheit bestimmt wird. Die statistischen Charakterisierungen der Betonfestigkeit und der statischen Nutzhöhe beeinflussen das Zuverlässigkeitsniveau ebenfalls, wohingegen die weiteren Zufallsvariablen lediglich eine untergeordnete Rolle spielen. Die statistische Charakterisierung der Modellunsicherheiten erfolgte auf Basis der Auswertung von Versuchsdatenbanken. Die statistischen Verteilungen der übrigen Zufallsvariablen wurden entsprechend der Angaben im *Probabilistic Model Code* festgelegt.

Für die untersuchten Bemessungsgleichungen können die Versagenswahrscheinlichkeiten hinreichend genau mit einer erweiterten *First-Order-Methode* ermittelt werden. Dies konnte durch Vergleichsberechnungen mit der Monte-Carlo-Methode bestätigt werden. Die *Mean Value First Order Second Moment Methode* (MVFOSM) sollte hingegen aufgrund ihrer Invarianz gegenüber der mathematischen Formulierung und der Nichtberücksichtigung des Verteilungstyps der Basisvariablen nicht verwendet werden. In den Parameterrechnungen lagen die mit der MVFOSM ermittelten Sicherheitsindices jeweils ca. 25 % unterhalb der übrigen Ergebnisse und wurden daher für die Bewertung des Sicherheitsniveau ausgeschlossen.

Für die Bemessungsansätze im Entwurf des neuen Eurocode 2 ergaben sich in den Parameterstudien Zuverlässigkeitsindices von ca. $\beta \approx 4,0$ für Durchstanzen ohne Durchstanzbewehrung und von $\beta \approx 3,8$ für Querkraft ohne Querkraftbewehrung. Die Gleichungen erreichen somit – mit Ausnahme von Betondruckfestigkeiten größer als etwa 40 MPa – das in EN 1990 geforderte Sicherheitsniveau.

Abstract

In the current process of updating Eurocode 2 (EC2) at European level, alternative models were proposed for the design against punching without punching shear reinforcement and one-way shear without shear reinforcement, the derivation of which was based on the *Critical Shear Crack Theory* (CSCT). In Germany, when developing the previous models, the empirical coefficient was derived using test results. This was based on a target value of 1.0 for the 5 %-quantile value of the ratio of the experimental failure load to the theoretical load in the case of punching or shear failure. In the course of this research project, the failure probabilities for the proposed design models were determined semi-probabilistically. For this purpose, the reliability index β was determined using up to four different calculation methods (*Mean Value First Order Second Moment Method*, *First Order Reliability Method*, *First Order Second Moment Method* und *Monte Carlo Simulation*). The reliability index β is a measure for the failure probability p_f ; the larger the reliability index, the smaller p_f . The target value for the calibrations in the ultimate limit state was set at $\beta = 3.8$ in accordance with DIN EN 1990. This refers to the minimum value for the reliability class RC 2, which corresponds to the consequence class CC 2 for a reference period of 50 years.

The sensitivity analyses carried out have shown that the safety level for the considered design equations essentially depends on the model uncertainty. While the statistical characterization of the concrete strength and the effective depth still play a minor role, the influence of the other basic variables of the limit state function is very small. The statistical characterization of the model uncertainties was based on the evaluation of experimental databases. For the remaining random variables, the mean values and the scattering were determined according to the specifications in *Probabilistic Model Code*.

Comparable results were obtained for all the investigated limit state functions with a *First Order Reliability Method*, a *First Order Second Moment Method* (Level II method with approximation of the limit state function in the design point) and with a *Monte Carlo Method* (Level III method). In this respect, the safety index determined using a *Mean Value First Order Second Moment Method* (approximation of the limit state function based on the mean value) was, in each case, approx. 25 % below the other results. Therefore, it was excluded for further safety level evaluations.

In the parametric studies for the design approaches in the draft of the new EC2, the reliability indices obtained were approximately $\beta \approx 4.0$ for punching shear without punching shear reinforcement and $\beta \approx 3.8$ for one-way shear without shear reinforcement. Thus, the safety level required in EN 1990 is attained, except for concrete compressive strengths above approximately 40 MPa.

Abrégé

Dans le processus actuel de mise à jour de l'Eurocode 2 (EC2) au niveau européen, des modèles alternatifs ont été proposés pour la conception contre le poinçonnement sans armature de cisaillement de poinçonnement et le cisaillement unidirectionnel sans armature transversale, dont la dérivation était basée sur la *Critical Shear Crack Theory* (CSCT). En Allemagne, lors du développement des modèles précédents, le coefficient empirique a été dérivé à partir des résultats d'essais. Il était basé sur une valeur cible de 1,0 pour la valeur du quantile 5 % du rapport entre la charge de rupture expérimentale et la charge théorique dans le cas d'une rupture par poinçonnement ou par cisaillement. Au cours de ce projet de recherche, les probabilités de défaillance pour les modèles de conception proposés ont été déterminées de manière semi-probabiliste. À cette fin, l'indice de fiabilité a été déterminé en utilisant jusqu'à quatre méthodes de calcul différentes (*Mean Value First Order Second Moment Method*, *First Order Reliability Method*, *First Order Second Moment Method* und *Monte Carlo Simulation*). L'indice de fiabilité est une mesure de la probabilité de défaillance p_f ; plus l'indice de fiabilité est élevé, plus p_f est faible. La valeur cible pour les calibrations dans l'état limite ultime a été fixée à $\beta = 3,8$ conformément à la norme DIN EN 1990. Il s'agit de la valeur minimale pour la classe de fiabilité RC 2, qui correspond à la classe de conséquences CC 2 pour une période de référence de 50 ans.

Les analyses de sensibilité effectuées ont montré que le niveau de sécurité pour les équations de conception considérées dépend essentiellement de l'incertitude du modèle. Alors que la caractérisation statistique de la résistance du béton et de la profondeur effective continue à jouer un rôle mineur, l'influence des autres variables de base de la fonction d'état limite est très faible. La caractérisation statistique des incertitudes du modèle est basée sur l'évaluation des bases de données expérimentales. Pour les variables aléatoires restantes, les valeurs moyennes et la dispersion ont été déterminées conformément aux spécifications de *Probabilistic Model Code*.

Pour le niveau de fiabilité, des résultats comparables ont été obtenus pour toutes les fonctions d'état limite étudiées avec la *First Order Reliability Method*, *First Order Second Moment Method* (méthode de niveau II avec approximation de la fonction d'état limite au point de conception) et la *Monte Carlo Method* (méthode de niveau III). À cet égard, l'indice de sécurité déterminé à l'aide de la méthode de la valeur moyenne du premier ordre et du second moment (approximation de la fonction des états limites sur la base de la valeur moyenne) était dans chaque cas inférieur d'environ 25 % aux autres résultats et a donc été exclu de l'évaluation du niveau de sécurité.

Dans les études paramétriques concernant les approches de conception du projet de la nouvelle EC2, les indices de fiabilité obtenus étaient environ $\beta \approx 4,0$ pour le cisaillement par poinçonnement sans renforcement du cisaillement par poinçonnement et $\beta \approx 3,8$ pour le cisaillement unidirectionnel sans renforcement du cisaillement. Ainsi, le niveau de sécurité requis dans l'EN 1990 est atteint, à l'exception des résistances à la compression du béton pour les valeurs supérieures à environ 40 MPa.