

ENTWERFEN UND KONSTRUIEREN VERBUNDSTRUKTUREN

Tobias Kosky

Entwicklung einer gezahnten
kraft- und formschlüssigen
Verbindungstechnologie für
die trockene Fügung von
Konstruktionsbetonbauteilen

Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen
Book Series of the Department of Civil Engineering
Technische Universität Berlin

Herausgeber:

Editors:

Prof. Dr.-Ing. Matthias Barjenbruch

Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Huhnt

Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz

Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich

Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid

Prof. Dr.-Ing. Matthias Sundermeier

Prof. Dr.-Ing. Frank U. Vogdt

Shaker Verlag

Düren 2021

Entwicklung einer gezahnten kraft- und formschlüssigen Verbindungstechnologie für die trockene Fügung von Konstruktionsbetonbauteilen

vorgelegt von
M.Sc.
Tobias Kosky
am 14.03.1989 in Berlin

von der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Martin Empelmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 01. 12. 2020

Berlin 2020

Hefreihe des Instituts für Bauingenieurwesen
Book Series of the Department of Civil Engineering
Technische Universität Berlin

Band 29

Tobias Kosky

**Entwicklung einer gezahnten kraft- und form-
schlüssigen Verbindungstechnologie für die trockene
Fügung von Konstruktionsbetonbauteilen**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2020

Entwicklung einer gezahnten kraft- und formschlüssigen Verbindungstechnologie für die trockene Fügung von Konstruktionsbetonbauteilen

Dissertationsschrift von Tobias Kosky
Fakultät VI – Planen, Bauen, Umwelt
der Technischen Universität Berlin

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid
Prof. Dr.-Ing. Martin Empelmann

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 01.12.2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7832-9

ISSN 1868-8357

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Infolge des Bestrebens der Bauindustrie nach kürzen Rohbauzeiten, gewinnt die industrielle Vorfertigung von großformatigen Bauteilen aus Konstruktionsbeton immer stärker an Bedeutung. Aufgrund von transportbedingten Bauteilabmessungen der Fertigteile rückt die Frage nach intelligenten, wirtschaftlichen und baupraktischen Fügetechniken stetig in den Vordergrund aktueller Forschungsvorhaben. Die bauaufsichtlich eingeführte DIN EN 1992-1-1: 2011-01 regelt in dem Abschnitt 6.2.5. den Bemessungsansatz für die Schubkraftübertragung in Fugen zwischen Bauteilen aus Konstruktionsbeton. Allerdings legt die Norm ihren Fokus hierbei auf die Übertragung von Schubkräften entlang Betonierfugen. Somit ist in der Norm ein Bemessungsansatz für die nasse Fügung von Betonbauteilen gegeben, welche im Kontaktverfahren hergestellt werden.

Der Nachweis der Schubkrafttragfähigkeit nach der DIN EN 1992-1-1: 2011-01 lässt sich hierbei in drei additive Anteile aufteilen. Der Bemessungsansatz setzt sich aus einem Kohäsionsanteil, welcher sich über die Zugkrafttragfähigkeit des Betons multipliziert mit einem Beiwert c definiert, einen Reibungsanteil, welcher abhängig von der in der Fuge wirkenden Normalkraft und dem Reibungsbeiwert μ ist, und einem Anteil der fugenkreuzenden Bewehrung zusammen. Bei der trockenen Fügung von Fertigteilen definiert der nationale Anhang von Deutschland, dass der Beiwert c aufgrund des nicht vorhandenen Haftverbundes zu null gesetzt werden muss. Zudem kann aus konstruktiven Gründen kein Anteil an fugenkreuzender Bewehrung angesetzt werden. Demnach darf in dem Nachweis der Schubkrafttragfähigkeit lediglich der reibungsbehaftete Anteil angesetzt werden. Daraus resultiert im Regelfall, aufgrund von hohen Schubbeanspruchungen in der nachzuweisenden Fuge, die Notwendigkeit von hohen Vorspannkräften in der Grenzfläche.

An dieser Stelle knüpft die vorliegende Dissertation an und stellt einen Bemessungsansatz für die trockene kraft- und formschlüssige Fügung von Konstruktionsbetonbauteilen auf. In einem ersten Schritt wird die aktuell genormte Verzahnungsgeometrie hinsichtlich ihrer Effizienz untersucht. Die daraus gewonnen Erkenntnisse werden für die Entwicklung einer neuartigen kraft- und formschlüssigen Verzahnungsgeometrie herangezogen. Die Herleitung der Zahngeometrie wird sowohl mithilfe von Stabwerkmodellen und finiten Elemente Berechnungen, als auch durch begleitenden experimentellen Untersuchungen zu einzelnen Fragestellungen vorangetrieben. Die darüber gewonnene Verzahnungsgeometrie weist zum einen eine maximale Tragfähigkeit auf und zum anderen ist diese baupraktisch leicht realisierbar.

Bei der Ausführung einer trockenen Fügung im Konstruktionsbetonbau kommt es maßgeblich auf die Passgenauigkeit der verzahnten Grenzflächen an. Geringste Fertigungs- oder Montageungenauigkeiten können einen erheblichen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Verbindung aufweisen. Aus diesem Grund werden ausgewählte prismatische Probekörper mit gezahnter Fugenausführung mithilfe eines Streifenlichtscanners digitalisiert und hinsichtlich ihrer Passgenauigkeit untersucht. Ziel dieser Untersuchung ist es, Rückschlüsse anhand der

Effektiven zur Verfügung stehenden realen Kontaktfläche auf die Reduktion der Traglast zu ziehen. Anhand dieser Überlegungen werden Toleranzkriterien für die verzahnte Fugengeometrie aufgestellt.

Im Anschluss an die theoretische und experimentelle Herleitung der neuartigen kraft- und formschlüssigen Verzahnungsgeometrie werden großformatige Bauteilversuche mit gezahnten Trockenfugen durchgeführt. Zum einen werden modulare Stahlbetonkonsolen verschiedenster Dimensionen experimentell untersucht und zum anderen wird ein Knotenpunkt aus einem Stahlbetonfachwerkträger getestet. Diese beiden Versuchsreihen sind aufgrund ihrer unterschiedlichen unmittelbar vor der Verzahnung resultierenden Druckfeldern ausgewählt worden. So weist das Druckfeld der Konsole eine fächerartige Verteilung der Hauptdruckstrebenneigungen in einem Bereich von etwa $20^\circ - 70^\circ$ gegenüber der Horizontalen auf. Im Gegensatz dazu ist die Neigung der Hauptdruckstreben in dem Fachwerkknotenversuch annähernd konstant über die gesamte Verzahnungslänge. Demnach kann anhand dieser beiden Großversuche die Leistungsfähigkeit der entwickelten Verzahnungsgeometrie gezeigt werden.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird ein empirischer Bemessungsansatz aufgestellt, welcher die Grundlage für die Nachweisführung der Verzahnung im konstruktiven Ingenieurbau liefert. Der Bemessungsansatz wird für die Versuchsnachrechnung der Großversuche herangezogen. Zur Validierung des hergeleiteten empirischen Bemessungsmodells werden die Ergebnisse der Versuchsnachrechnung mit den experimentell bestimmten Tragfähigkeiten verglichen.

Abschließend werden die in der Arbeit gesammelten Erkenntnisse zu der entwickelten kraft- und formschlüssigen Verzahnungsgeometrie zusammengefasst und kritisch hinsichtlich der gestellten Anforderungen an die Verzahnung hinterfragt. Schlussendlich wird der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt und offene Fragestellungen erörtert.

Abstract

As a result of the construction industry's efforts to shorten shell construction times, the industrial prefabrication of large-format structural concrete components is becoming increasingly important. Due to transport-related component dimensions of the precast elements, the question of intelligent, economical and practical joining techniques is becoming increasingly important in current research projects. In Section 6.2.5. of DIN EN 1992-1-1: 2011-01, which was introduced by the building authorities, the design approach for the transmission of shear forces in joints between structural concrete components is regulated. However, the standard focuses on the transmission of shear forces along concrete joints. Thus, the standard provides a design approach for the wet joining of concrete components that are manufactured by the Match Casting method.

The verification of the shear force load-bearing capacity according to DIN EN 1992-1-1: 2011-01 can be divided into three additive parts. The design approach consists of a cohesive component, which is defined by the tensile force-bearing capacity of the concrete multiplied by a coefficient c , a friction component, which is dependent on the normal force acting in the joint and the friction coefficient μ , and a component of the joint crossing reinforcement. For the dry jointing of precast elements, the national Annex of Germany defines that the coefficient c must be set to zero due to the non-existent bond. In addition, for design reasons, no proportion of joint crossing reinforcement can be applied. Therefore, only the frictional part may be used in the shear strength verification. As a rule, this results in the necessity of high prestressing forces in the interface due to high shear loads in the joint to be verified.

This is where the present dissertation comes in and presents a design approach for the dry non-positive and positive-locking joining of structural concrete components. In a first step, the currently standardized gearing geometry is examined with regard to its efficiency. The knowledge gained from this will be used for the development of a new type of non-positive and positive-locking gearing geometry. The derivation of the tooth geometry will be advanced by means of truss models and finite element calculations as well as by accompanying experimental investigations on individual issues. The gear geometry thus obtained has a maximum load-bearing capacity on the one hand, and on the other hand it is easy to erect in practice.

When carrying out a dry joint in structural concrete construction, the accuracy of fit of the interlocked interfaces is of decisive importance. The slightest manufacturing or assembly inaccuracies can have a significant influence on the coupling's load-bearing capacity. For this reason, selected prismatic test specimens with toothed joint design are digitized with the aid of a strip light scanner and examined with regard to their accuracy of fit. The aim of this investigation is to draw conclusions on the reduction of the load-bearing capacity based on the effectively available real contact area. Based on these considerations, tolerance criteria for the interlocked joint geometry are established.

Following the theoretical and experimental derivation of the novel force and form-fit gearing

geometry, large-format component tests with serrated dry joints are carried out. On the one hand, modular reinforced concrete consoles of different dimensions are experimentally investigated and on the other hand a junction of a reinforced concrete truss is tested. These two test series have been selected due to their different pressure fields resulting immediately before the toothing. Thus, the pressure field of the console shows a fan-like distribution of the main compression strut inclinations in a range of about $20^\circ - 70^\circ$ with respect to the horizontal. In contrast, the main strut inclination in the truss node test is approximately constant over the entire length of the spline. Therefore, the performance of the developed gearing geometry can be shown by means of these two large-scale tests.

Based on the knowledge gained, an empirical design approach will be developed, which will provide the basis for the verification of interlocking in structural engineering. The design approach is used for the test recalculation of the large-scale tests. For the validation of the derived empirical design model, the results of the test recalculation are compared with the experimentally determined load capacities.

Finally, the findings collected in the thesis are summarized and critically questioned with regard to the developed frictional and positive-locking gear geometry and the demands made on the gear teeth. Finally, further research needs are identified and open questions are discussed.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Bauingenieurwesen am Lehrstuhl Entwerfen und Konstruieren – Verbundstrukturen der Technischen Universität Berlin.

Anregungen zu dieser Arbeit lieferte Herr Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid, dem mein besonderer Dank für die fachliche Unterstützung und die Übernahme des Hauptberichtes gilt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Empelmann danke ich für die Übernahme des Mitberichtes und das für meine Arbeit entgegengebrachte Interesse. Herrn Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich danke ich für sein Interesse und die Bereitschaft, den Vorsitz im Promotionsverfahren zu übernehmen.

Allen Mitgliedern des Instituts bin ich für die kollegiale und freundschaftliche Unterstützung sowie vielfältigen fachlichen Diskussionen dankbar. Insbesondere möchte ich mich bei Jonas Schmidt für die produktive Zusammenarbeit im gemeinsamen Forschungsprojekt und die tolle Zeit während der umfangreichen experimentellen Untersuchungen und den wertvollen fachlichen Austausch bedanken.

Nicht zuletzt sei auch den studentischen Hilfskräften, Bachelorranden und Masterranden Robert Kull, Maximilian Schubert, Kai Hofmann, Anne Sur, Irfan Čustović, Max Bochmann und Niklas Petersen gedankt, die wichtige Grundlagen für diese Arbeit beigesteuert haben.

Das Sekretariat, vertreten durch Frau Senske, war freundlicherweise stets hilfreich bei der schnellen Überwindung aller nicht fachlichen Schwierigkeiten.

Meiner Familie danke ich für die stete Unterstützung und das Vertrauen. Besonderen Dank gilt meinem Sohn Gustav und Sarah, die mir in den zurückliegenden Jahren durch ihre unverwechselbare Art immer Kraft und Zuversicht geschenkt haben.

Bonn, Mai 2020

Tobias Kosky

Bezeichnungen

Kleinbuchstaben

a_i	Abstand zwischen zwei korrespondierenden Facetten	[mm]
\bar{a}_i	Normierte Kennzahl des Abstandes zwischen zwei korrespondierenden Facetten	[–]
a_c	Hebelarm der vertikalen Konsolauflast bezüglich der verzahnten Grenzfläche	[mm]
b	Fugenbreite der verzahnten Grenzfläche	[mm]
b_z	Zahnflankenlänge	[mm]
$b_{z,1}$	verschattete Zahnflankenlänge	[mm]
$b_{z,2}$	lastabtragende Zahnflankenlänge	[mm]
c	Beiwert zur Bestimmung des Adhäsionswiderstand nach DIN EN 1992-1-1/NA: (2011-01)	[–]
d_c	Hebelarm der horizontalen Vorspannkraft der Konsole bezüglich der Konsolunterkante	[mm]
f	Skalierungsfaktor zur Erfassung der Schubtragfähigkeit der Normprofilierung nach Oettel und Empelmann (2013)	[–]
f_a	Haftreibungswiderstand der verzahnten Grenzfläche	[–]
f_b	biaxiale Betondruckfestigkeit	[N/mm ²]
f_c	experimentell ermittelte Druckfestigkeit der Referenzprobekörper	[N/mm ²]
f_{cd}	Bemessungswert der uniaxialen Druckfestigkeit von Beton nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[N/mm ²]
f_{cm}	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit der jeweiligen Betondruckfestigkeitsklasse	[N/mm ²]
$f_{c,dry,cube}$	Der Stoffraumrechnung zugrundeliegende Zieldruckfestigkeit der Würfeldruckversuche	[N/mm ²]
f_{ck}	Charakteristischer Wert der Druckfestigkeit von Beton nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[N/mm ²]
$f_{ck,eff}$	Charakteristischer Wert der anrechenbaren Druckstrebenfestigkeit für Einzelstäbe von Stabwerkmodellen	[N/mm ²]
f_{ctd}	Bemessungswert der Zugfestigkeit von Beton nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[N/mm ²]
f_s	Haftwiderstand der verzahnten Grenzfläche	[N/mm ²]
f_t	uniaxiale Betonzugfestigkeit	[N/mm ²]
f_y	Mindestwert der oberen Streckgrenze von Baustahl nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[N/mm ²]

f_{yd}	Bemessungswert der oberen Streckgrenze von Baustahl nach DIN EN 1992-1-1/NA: (2011-01)	[N/mm ²]
h_z	Zahnhöhe senkrecht zur Fugenebene	[mm]
l_{β_z}	Zahnrücktenlänge	[mm]
$l_{\beta_z,1}$	mitwirkende Zahnrücktenlänge	[mm]
l_{θ}	Betondruckstrebenbreite je Einzelzahn	[mm]
$l_{\theta,1}$	eingeschnürte Betondruckstrebenbreite je Einzelzahn	[mm]
δl_{θ}	nicht wirksamer Bereich der ungestörten Betondruckstrebenbreite je Einzelzahn	[mm]
l_z	Zahngrundlänge	[mm]
s	Fugenspalt gemessen senkrecht zur Fugenachse	[mm]
\tilde{s}	empirische Standardabweichung	[N/mm ²]
w	relative Fugenverschiebung parallel zur Fugenachse	[mm]
v	relative Fugenverschiebung senkrecht zur Fugenachse	[mm]
ν	Variationskoeffizient	[%]
ν_{Rdi}	Bemessungswert der Verbundfugentragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[N/mm ²]
$\nu_{Rdi,max}$	Maximal anrechenbare Verbundfugentragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[N/mm ²]

Großbuchstaben

A_i	Fläche einer einzelnen Facette in der Bestimmung der realen Kontaktfläche	[mm ²]
A_{Nocke}	Querschnittfläche der verzahnten Normprofilierung im Zahngrund nach Oettel und Empelmann (2013)	[mm ²]
A_{Fuge}	Gesamte verzahnte Fugenfläche der Normprofilierung nach Oettel und Empelmann (2013)	[mm ²]
A_{real}	Reale Kontaktflächen zwischen zwei Grenzflächen	[mm ²]
C	Konstante zur Skalierung des Bruchversagens einer verzahnten Grenzfläche	[-]
E	experimentell ermitteltes stabilisiertes Elastizitätsmodul	[N/mm ²]
E_{cm}	Elastizitätsmodul des Werkstoffes Beton nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[N/mm ²]
E_s	Elastizitätsmodul des Werkstoffes Baustahl nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[N/mm ²]
F_a	obere Prüflast zur Bestimmung des Elastizitätsmodul nach DIN EN 12390-13: 2012-04	[kN]
F_p	untere Prüflast zur Bestimmung des Elastizitätsmodul nach DIN EN 12390-13: 2012-04	[kN]

F_c	zu erwartene Bruchlast	[kN]
$\bar{F}_{prog,k}$	prognostizierte Traglast der entwickelten verzahnten Fugenausführung	[kN]
$\bar{F}_{\theta,k}$	maximale Druckstrebenkraft je Einzelzahn	[kN]
$\bar{F}_{\alpha_z \perp, k}$	maximale Druckstrebenkraft senkrecht zur Zahnflanke	[kN]
$\bar{F}_{\alpha_z \parallel, k}$	maximale Druckstrebenkraft parallel zur Zahnflanke	[kN]
$\bar{F}_{\theta, R}$	resultierende Reibungsbehaftete Kraftübertragung an der Zahnrückenneigung aus der eingeschnürten Betondruckstrebe je Einzelzahn	[kN]
$\bar{F}_{\theta, R, \perp}$	rechtwinklig zur Zahnrückenneigung resultierende Druckkraft	[kN]
$\bar{F}_{\theta, R, \parallel}$	parallel zur Zahnrückenneigung resultierende Reibungskraft	[kN]
H	Horizontal aufgebrachte Versuchslast	[kN]
K_i	Kontaktindex zur Bestimmung der realen Kontaktfläche	[-]
P	Vorspannkraft	[kN]
R_p	maximale Profilkuppenhöhe nach Kaufmann (1971)	[-]
R_t	mittlere Rautiefe nach Kaufmann (1971)	[-]
V	Vertikale aufgebrachte Versuchslast	[kN]

Griechische Buchstaben

α	Fugenneigung gegenüber der Horizontalen	[°]
α_{cc}	Faktor zur Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[-]
α_{crit}	kritischer Fugenwinkel zur Abgrenzung zwischen dem Druck- und Gleitversagen von verzahnten Grenzflächen	[°]
α_{Kon}	Wichtungsfaktor in der Bestimmung der realen Kontaktfläche	[-]
α_{sig}	Signifikanzniveau der angenommenen statistischen Verteilungsfunktion	[-]
α_z	Zahnflankenneigung	[°]
β_i	Winkeldifferenz zwischen den beiden Normalenvektoren zweier korrespondierender Facetten	[°]
$\bar{\beta}_i$	Normierte Kennzahl der Winkeldifferenz zwischen den beiden Normalenvektoren zweier korrespondierender Facetten	[-]
β_z	Zahnrückenneigung	[°]
ε_u	Betonstauchung unter Bruchspannung	[$\mu\text{m}/\text{m}$]
ρ	anrechenbarer Bewehrungsgehalt im Stahlbeton	[-]
μ_H	Haftreibungsbeiwert	[-]
μ_{Gl}	Gleitreibungsbeiwert	[-]
μ_{erw}	Erwartungswert der angenommenen statistischen Verteilungsfunktion	[N/mm ²]

v	Beiwert zur Bestimmung der maximalen Schubtragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1/NA: (2011-01)	[–]
$\sigma_{5\%}$	5 – %-Quantil der zugrundegelegte statistischen Verteilungsfunktion	[N/mm ²]
σ_n	Normalkraft senkrecht zur Fugenebene	[N/mm ²]
$\sigma_{n,zul}$	maximal anrechenbare Normalkraft senkrecht zur Fugenebene nach DIN EN 1992-1-1/NA: 2011-01	[N/mm ²]
σ_u	experimentell ermittelte Bruchspannung bezogene auf die Lasteinleitungsfläche	[N/mm ²]
σ'_u	experimentell ermittelte Normalspannung senkrecht zur Fugenachse	[N/mm ²]
σ_θ	Druckfeldspannung	[N/mm ²]
$\sigma_{\theta,1}$	unmittelbar vor der Verzahnung eingeschnürte Druckfeldspannung	[N/mm ²]
$\sigma_{\theta,k}$	Charakteristischer Widerstand der Druckstrebe	[N/mm ²]
$\sigma_{\alpha_z,\perp}$	Druckfeldspannung senkrecht zur Zahnflanke	[N/mm ²]
$\sigma_{\alpha_z,\parallel}$	Druckfeldspannung parallel zur Zahnflanke	[N/mm ²]
σ_{max}	maximal aufnehmbare Spannungserhöhung infolge der Druckstrebeneinschnürung unmittelbar vor der Verzahnung	[N/mm ²]
$\sigma_{\bar{x}}$	arithmetischer Mittelwert	[N/mm ²]
τ	Schubkraft parallel zur Fugenebene	[N/mm ²]
τ'_u	experimentell ermittelte Schubspannung parallel zur Fugenachse	[N/mm ²]
τ_{adh}	Schubspannungsanteil aus Adhäsion in der Fuge	[N/mm ²]
τ_R	Schubspannungsanteil aus Reibkräften in der Fuge	[N/mm ²]
θ	Druckstrebenneigung gemessen zur Fugenneigung	[°]
φ	Winkeldifferenz zwischen Druckstrebenneigung θ und Zahnrückenneigung β_z	[°]
$\varphi_{grenz,Flanken}$	Grenzgleitwinkel zur Differenzierung zwischen dem Haftreibungs- und Gleitreibungszustand an den Zahnflanken	[°]
$\varphi_{grenz,Rücken}$	Grenzgleitwinkel zur Differenzierung zwischen dem Haftreibungs- und Gleitreibungszustand an den Zahnrückenden	[°]
$V_{Verz,d}$	Bemessungswert des Traglastreduktionsfaktors zur Erfassung des Einflusses der verzahnten Fugenausführung	[–]
$V_{Verz,m}$	Mittelwert des Traglastreduktionsfaktors zur Erfassung des Einflusses der verzahnten Fugenausführung	[–]

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	III
Danksagung	V
Bezeichnungen	VI
1. Einleitung	1
1.1. Einordnung der Arbeit	1
1.2. Gliederung der Arbeit	4
2. Entwicklung der kraft- und formschlüssigen Verzahnungsgeometrie	7
2.1. Tragverhalten der verzahnten Fugenausbildung nach DIN EN 1992-1-1	8
2.1.1. Vergleich unterschiedlicher Berechnungsansätze für die Bestimmung der Schubtragfähigkeit	8
2.1.2. Bemessungsansatz nach DIN EN 1992-1-1	18
2.1.3. Auswertung der verzahnten Normfugenausführung	20
2.2. Anforderungen an die neue Verzahnungsgeometrie	23
2.2.1. Konstruktiv-Statistische Anforderungen	24
2.2.2. Baupraktische Anforderungen	26
2.3. Tragverhalten der lastaffinen Verzahnungsgeometrie	27
2.3.1. Belastungsfall 1 Druckfeldneigung flacher als die Normale auf die Zahnflanke	35
2.3.2. Belastungsfall 2 Druckfeldneigung steiler oder gleich der Normalen auf die Zahnflanke	40
2.3.3. Tragfähigkeit einer unendlich langen, ungestörten Verzahnungsreihe	45
2.3.4. Einfluss der Randbereiche einer verzahnten Fugenausführung	49
2.3.5. Numerische Simulationen an Einzelzähnen	50
3. Experimentelle Untersuchungen an prismatischen Versuchskörpern	61
3.1. Vergleichbare bereits durchgeführte Untersuchungen	61
3.1.1. Der Einfluss von Fugen auf die Festigkeit von Fertigteilschalen	62
3.1.2. Versuche zum Tragverhalten von segmentären Spannbetonträgern	63

3.1.3.	Versuche zur notwendigen Schubbewehrung zwischen Betonfertigteilen und Ortbeton	65
3.1.4.	Feinprofilierter UHPFRC-Trockenfugen für Segmentbauteile	68
3.1.5.	Zusammenfassung zurückliegender Untersuchungen	71
3.2.	Vorbereitung der eigenen Prismenversuchsreihe	73
3.2.1.	Versuchsaufbau	73
3.2.2.	Probekörpergeometrie und Probenherstellung	76
3.2.3.	Versuchsdurchführung	79
3.2.4.	Versuchsprogramm	81
3.2.5.	Prinzipielle Vorgehensweise zur Versuchsauswertung	83
3.3.	Aufbereitung der Versuchsergebnisse	86
3.3.1.	Festbetoneigenschaften	86
3.3.2.	Prismenkörper mit 20°-Zahnrückenneigung	90
3.3.3.	Prismenkörper mit 45°-Zahnrückenneigung	97
3.4.	Beschreibung des Bruchverhaltens der Prismenkörper	103
3.4.1.	Druckbruch	104
3.4.2.	Gleitbruch	106
3.5.	Vergleich der eigenen Ergebnisse mit vorhergehenden Untersuchungen	109
3.6.	Bestimmung der Passgenauigkeit der verzahnten Grenzflächen	111
3.6.1.	Vorgehensweise zur Bestimmung der realen Kontaktfläche	112
3.6.2.	Auswertung der realen Kontaktfläche	117
4.	Nachrechnung der Druckversuche an prismatischen Versuchskörpern	121
4.1.	Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit den theoretischen Überlegungen	121
4.1.1.	Nachrechnung mit Hilfe der hergeleiteten Traglastgleichungen	121
4.1.2.	Verbesserung des Rechenansatzes	124
4.2.	Erstellung eines physikalisch und geometrisch nichtlinearen FE-Modells	129
4.2.1.	Materialmodell und Materialkennwerte	129
4.2.2.	Kontaktelemente	132
4.2.3.	Bestimmung der Materialparameter	134
4.2.4.	Nachrechnung der Prismenversuche	140
4.2.5.	Schlussfolgerungen	149
5.	Versuche an großformatigen Probekörpern	151
5.1.	Gezahnter Fachwerkknotenpunkt	151
5.1.1.	Versuchsaufbau	151
5.1.2.	Probekörpergeometrie und -herstellung	153
5.1.3.	Versuchsdurchführung und Messtechnik	156
5.1.4.	Auswertung	157

5.2. Betonkonsole mit gezahnter Fugenausführung	163
5.2.1. Versuchsaufbau	163
5.2.2. Probekörpergeometrie und -herstellung	165
5.2.3. Versuchsdurchführung und Messtechnik	170
5.2.4. Tragverhalten modularer Betonkonsolen	171
5.2.5. Auswertung	178
6. Entwicklung eines empirischen Bemessungsansatzes	189
6.1. Traglastreduktion in Abhängigkeit der Druckstrebenneigung	189
6.2. Überführung des empirischen Bemessungsansatzes auf Bemessungsniveau . .	194
6.3. Versuchsnachrechnung der Großversuche	199
6.3.1. Fachwerkknoten	199
6.3.2. Modulare Betonkonsolen	201
7. Zusammenfassung und Ausblick	207
Literaturverzeichnis	210
A. Anhang - Prismenversuchsreihe	215
B. Anhang - FE-Simulationen	233
C. Anhang - Konsolversuche	247