

**Gutachten zur Querkraftbemessung
von Verbundfugen unter
Berücksichtigung von
Umlagerungsschnittgrößen**

T 3105

T 3105

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2006, ISBN 3-8167-7031-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de



Beratende Ingenieure GbR
Schurzelter Straße 25
52074 Aachen

Tel. 0241/ 44 50 30
Fax. 0241/ 44 50 329
www.huping.de

Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Dr.-Ing. Rüdiger Beutel
Dr.-Ing. Naceur Kerkeni
Dr.-Ing. Wolfgang Roeser

GUTACHTEN ZUR QUERKRAFTBEMES- SUNG VON VERBUNDFUGEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON UMLAGE- RUNGSSCHNITTGRÖßEN

Auftraggeber: DIBt
Postfach 620229
10792 Berlin

Auftrag vom: 24.03.2005

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. J. Hegger
Sachbearbeiter: Dr.-Ing. N. Kerkeni
Dipl.-Ing. H.P. Doser

Gutachten: G05-24 und G05-25

Datum: 05.07.2005

Dieses Gutachten umfasst 51 Seiten. Jede Veröffentlichung, auch auszugsweise, sowie die Verwendung zu Werbezwecken bedarf in jedem Einzelfall der Zustimmung des Gutachters.

1 Veranlassung und Zielsetzung

Inhaltsverzeichnis

1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG	3
2 LÖSUNGSWEG	5
3 VERWENDETE UNTERLAGEN	8
4 BEZEICHNUNGEN	10
5 ERMITTLUNG DER ZEITABHÄNGIGEN UMLAGERUNGSSCHNITTGRÖßEN	12
5.1 Allgemeines	12
5.2 Durchgeführte FE-Berechnungen	16
5.2.1 Beschreibung des FE-Systems	16
5.2.2 Belastungen	17
5.2.3 Berechnungsablauf.....	17
5.2.4 Berechnungsumfang	18
5.3 Ergebnisse der FE-Berechnungen.....	18
5.3.1 Umlagerungsschnittgrößen aus Kriechen und Schwinden	18
5.3.2 Schubspannungen infolge Kriechen und Schwinden	22
6 QUERKRAFTBEMESSUNG IM GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT NACH DIN 1045-1	24
6.1 Allgemeines	24
6.2 Querkraftbemessung nach DIN 1045-1	24
6.2.1 Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung.....	24
6.2.2 Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung.....	28
6.2.3 Bemessung für Querkraft bei vorgespannten Elementdecken	31
6.3 Bemessung der Verbundfuge	34
6.3.1 Allgemeines.....	34
6.3.2 Ermittlung der einwirkenden Schubkraft.....	34
6.3.3 Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft in Fugen ohne Verbundbewehrung	36
6.3.4 Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft in Fugen mit Verbundbewehrung	39
6.3.5 Einschätzung der Konzepte für die Bemessung von vorgespannten Elementdecken.....	42
6.3.6 Vorschlag eines Bemessungskonzeptes für Verbundfugen in vorgespannten Elementdecken	43
6.4 Vergleich des vorgeschlagenen Bemessungskonzeptes mit DIN 1045-1, EC2, fib und DIN 1045(88).....	46
7 ZUSAMMENFASSUNG	51

1 VERANLASSUNG UND ZIELSETZUNG

Durch die Zulassungsumstellung von vorgespannten Elementdecken auf die neue Normengeneration muss deren Querkrafttragfähigkeit nach dem gegenüber der bisherigen Norm grundlegend geänderten Nachweiskonzept von DIN 1045-1 ermittelt werden. Für vorgespannte Elementdecken ergibt sich vor allem Klärungsbedarf hinsichtlich der Anrechenbarkeit der Normalspannung im Querschnitt σ_{cd} , welche sowohl die Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung nach Gl (70) von DIN1045-1 als auch die rechnerische Neigung θ der anzusetzenden Druckstrebe für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit nach den Gln. (77) und (78) sowie der Fugentragfähigkeit nach Gl (85) beeinflusst.

Das Bausystem „vorgespannte Elementdecke“ setzt sich aus einem vorgespannten Fertigteil und einer nachträglich ergänzten Ortbetonschicht zusammen. Infolge des unterschiedlichen zeitabhängigen Materialverhaltens beider Betone kommt es zu Spannungumlagerungen zwischen Fertigteil- und Ortbetonschicht. Diese Spannungumlagerungen führen zu zusätzlichen Schubspannungen in der Fuge. Zudem ergibt sich eine nicht-lineare Normalspannungsverteilung über die Querschnittshöhe. Diese Einflüsse bleiben bislang für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit und den Nachweis der Fuge nach DIN 1045-1 unberücksichtigt.

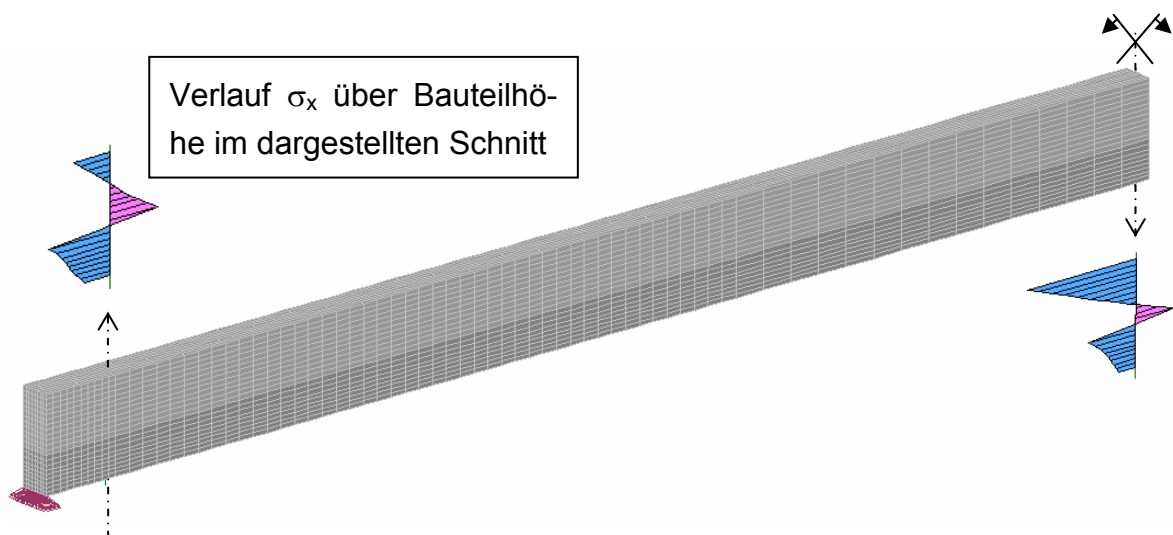


Bild 1-1: Normalspannungsverteilungen über die Bauteilhöhe bei einer vorgespannten Elementdecke am Auflager und in Feldmitte (Zeitpunkt $t = \infty$)

Für den Nachweis der Fugentragfähigkeit nach DIN 1045-1 wird die Längsdruckspannung im Bauteil σ_x traglaststeigernd angesetzt. Ein Vergleich mit dem bisherigen Lastniveau nach DIN 1045(88) bzw. DIN 4227 bei Berücksichtigung der Vorspan-

1 Veranlassung und Zielsetzung

nung und den sich ergebenden aufnehmbaren Fugenschubkräften nach Eurocode 2 sowie den Empfehlungen des fib zeigt, dass durch das Konzept von DIN 1045-1 der Erfahrungsbereich teilweise weit verlassen wird, wenn eine Längsdruckspannung im Bauteil herrscht (Bild 1-2).

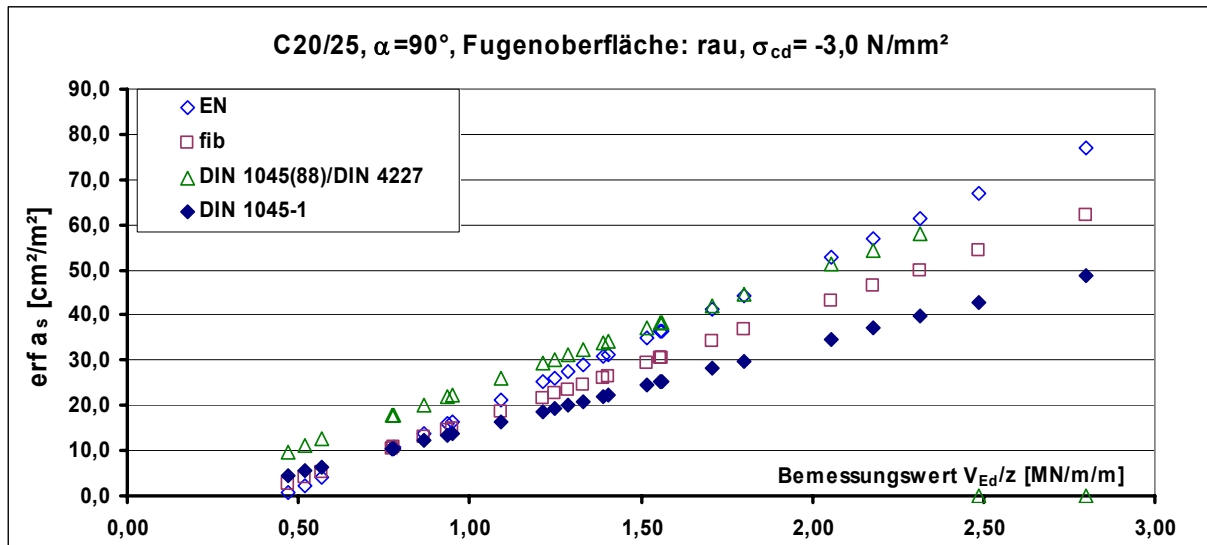


Bild 1-2: Vergleich der erforderlichen Verbundbewehrung nach DIN 1045-1, DIN 1045(88) mit DIN 4227, EC2 und fib

Ziel dieses Gutachtens ist die Erarbeitung eines Nachweiskonzeptes zur Querkraft- und Fugentragfähigkeit von vorgespannten Elementdecken auf Grundlage von DIN 1045-1. Die Einflüsse aus Spannungsumlagerungen werden bei diesem Nachweiskonzept indirekt berücksichtigt, so dass bei der Anwendung auf die explizite Berechnung der Umlagerungsschnittgrößen verzichtet werden kann. Zusätzlich wird von folgenden Randbedingungen ausgegangen:

- Das Traglastniveau der bisherigen Zulassungen soll beibehalten werden.
- Die Oberflächenbeschaffenheit der Fuge ist „rau“ nach DIN 1045-1 Abs. 10.3.6
- Die Betonfestigkeitsklasse des Fertigteils kann von C30/37 bis C60/75 gewählt werden. Die Mindestbetonfestigkeitsklasse des Aufbetons ist C20/25.
- Als Verbund- bzw. Querkraftbewehrung sind sowohl bauaufsichtlich zugelassenen Gitterträger zulässig als auch Schubzulagen, die nach DIN 1045-1, Abschn. 12.7 verankert sind.

2 LÖSUNGSWEG

Eine Auflistung der zu klärenden Punkte für die Nachweisführung von vorgespannten Elementdecken ist in nachfolgender Übersicht gegeben.

Nachweis der Querkrafttragfähigkeit	Ansatz bei vorgespannten Elementdecken / Erarbeitungskonzept
<p>Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung</p>	<p>Ansatz von σ_{cd}? /</p> <p>Ansatz kann über mechanische Erläuterung der Nachweisgleichung geklärt werden (Kap. 6.2.1)</p> <p>Ansatz der Schubspannungen aus Umlagerung? /</p> <p>Quantifizierung der maximal auftretenden Schubkräfte mithilfe von FE-Berechnungen (Kap. 5.3.1)</p>
<p>Gl. (70)</p>	
$V_{Rd,ct} = \left[0,1\kappa \cdot \eta_1 \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12\sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d$	
<p>Bauteile mit rechn. erf. Querkraftbewehrung</p>	<p>Ansatz von σ_{cd}? /</p> <p>Ermittlung der maximalen Zugspannungen im Nachweisbereich für Querkraft mithilfe von FE-Berechnungen (Kapitel 5.3), Ableitung modifizierter Nachweisgleichungen (Kapitel 6.2.3)</p>
<p>Ermittlung der mögl. Druckstrebenneigung nach</p>	
<p>Gl (73)</p>	
$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}}$	
<p>vertikaler Anteil Rissreibungskraft nach Gl(74)</p>	
$V_{Rd,c} = 0,24 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \left(1 + 1,2 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \cdot b_w \cdot z$	
<p>Bemessungswerte $V_{Rd,sy}$ und $V_{Rd,max}$</p>	<p>Hier sind keine Änderungen der Nachweisführung zu erwarten.</p>
$V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot (\cot \Theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$	
$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \Theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \Theta}$	<p>Eventuell könnten Bestimmungen analog zu den Zulassungen der Gitterträger zu beachten sein. [Begrenzung auf (0,3 bis 0,5) · $V_{Rd,max}$]</p>

Nachweis der Verbundfuge	Ansatz bei vorgespannten Elementdecken / Erarbeitungskonzept
<p>Ermittlung der einwirkenden Schubkraft</p> <p>Gl. (83)</p> $v_{Ed} = \frac{F_{cdj}}{F_{cd}} \cdot \frac{V_{Ed}}{z}$	<p>Ansatz von F_{cdj} und z? /</p> <p>Ansatz kann über mechanische Erläuterung der Nachweisgleichung geklärt werden (siehe Kapitel 6.3.2)</p>
<p>Bauteile ohne rechn. erf. Verbundbewehrung</p> <p>Gl (84)</p> $v_{Rd,ct} = \left[0,042 \cdot \beta_{ct} \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} - \mu \cdot \sigma_{Nd} \right] \cdot b$	<p>Hier sind keine Änderungen der Nachweisführung zu erwarten.</p>
<p>Bauteile mit rechn. erf. Verbundbewehrung</p> <p>Ermittlung der mögl. Druckstrebenneigung</p> <p>Gl (86)</p> $1,0 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2\mu - 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{v_{Rd,ct}}{v_{Ed}}}$ <p>Tragfähigkeit der Fuge mit Verbundbewehrung</p> $v_{Rd,sy} = a_s \cdot f_{yd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha - \mu \cdot \sigma_{Nd} \cdot b$ <p>Maximaltragfähigkeit</p> <p>Nachweis für die Druckstreben­tragfähigkeit der Querkraftbemessung unter Berücksichtigung der an­gesetzten Druckstreben­neigung der Fugen­bemessung</p>	<p>Ansatz von σ_{cd}? /</p> <p>Grundsatzüberlegungen zum Nachweiskonzept</p> <p>Erarbeitung des Nachweishintergrundes auch durch Vergleich mit weiteren Normen (Kapitel 6.3.4)</p> <p>Überprüfung des Tragfähigkeitsniveaus bei Ansatz von σ_{cd} mithilfe einer Datenbank.</p> <p>Ableitung eines schlüssigen Nachweiskonzeptes</p>

Die Ermittlung der Spannungsumlagerungen wird mit dem FE-Programm „LIMFES“ [12] in Kapitel 5 durchgeführt. Aus diesen Berechnungen können sowohl die Bandbreite der auftretenden Normalspannungen im querkraftbeanspruchten Bauteilbereich als auch die Maximalwerte der infolge Spannungsumlagerung auftretenden Schubkräfte in der Fuge ermittelt werden. Die Ergebnisse fließen in die anschließen-

2 Lösungsweg

de Betrachtung der Nachweiskonzepte für die Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit und der Fugentragfähigkeit ein.

In Kapitel 6 werden die mechanischen Hintergründe der Nachweise nach DIN 1045-1 getrennt für den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit und der Fugentragfähigkeit erläutert. Das Nachweiskonzept für die Fugentragfähigkeit nach DIN 1045-1 wird weiteren europäischen Nachweisformaten (EC2, fib-recommendations „Practical design of structural concrete“, 1996) gegenübergestellt. Abschließend wird eine Empfehlung für ein Nachweiskonzept in Verbindung mit konstruktiven Regeln für vorgespannte Elementdecken erarbeitet und den bestehenden Konzepten der DIN 1045-1, EC2, fib sowie DIN 1045(88) bzw. DIN 4227 gegenübergestellt. Ein Vergleich des Lastniveaus des vorgeschlagenen Konzepts mit den oben angegebenen Nachweisformaten belegen das ausreichende Sicherheitsniveau des Vorschlages.

3 VERWENDETE UNTERLAGEN

- [1] DIN 1045-1
"Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion", Juli 2001
1. Berichtigungsblatt zu DIN1045-1, Juni 2004

- [2] Heft 525 des DAfStb
Erläuterungen zu DIN 1045-1, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, September 2003

- [3] Comité Euro-international du Béton
CEB-FIP Model Code 1990 (CEB Bulletin d'information No. 213-213)", Thomas Telford, London, 1993

- [4] fib CEB-FIP
FIP Recommendations 1996 "Practical Design of structural concrete"

- [5] prEN 1992-1-1 Schlusssentwurf, Dezember 2003
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen

- [6] Hegger, J.; Görtz, S.
"Nachträglich ergänzte Querschnitte mit horizontaler Fuge nach DIN 1045-1"; Beton- und Stahlbetonbau 98, Heft 5, 2003, S. 277-284

- [7] Hegger, J.; Görtz, S.
"Querkrafttragfähigkeit von monolithischen und nachträglich ergänzten Bauteilen mit und ohne Querkraftbewehrung", Kapitel 6 als Teilbereich zum Abschlussbericht für das DIBt-Forschungsvorhaben IV 1-5-876/98: „Überprüfung und Vereinheitlichung der Bemessungsansätze für querkraftbeanspruchte Stahlbeton- und Spannbetonbauteile aus normalfesten und hochfesten Beton nach DIN 1045-1“, Dezember 1999

- [8] Zilch, K.
"Gutachterliche Stellungnahme im Zusammenhang mit der Überführung von bestehenden Zulassungen für vorgespannte Elementdecken auf das neue Normenwerk im Betonbau", mit Anhang A: „Vorschläge für künftige Zulassungsinhalte“; Februar 2004

3 Verwendete Unterlagen

- [9] Reineck, K.-H.
“Hintergründe zur Querkraftbemessung in DIN 1045-1 für Bauteile aus Konstruktionsbeton mit Querkraftbewehrung“; Bauingenieur, Band 76, Nr.4, 2001, S.168-179
- [10] König,G.; Dehn,F.; Kliver,J.; Schenk,G.
“Tragfähigkeit von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung nach DIN 1045-1“, Kapitel 5 als Teilbereich zum Abschlussbericht für das DIBt-Forschungsvorhaben IV 1-5-876/98: „Überprüfung und Vereinheitlichung der Bemessungsansätze für querkraftbeanspruchte Stahlbeton- und Spannbetonbauteile aus normalfesten und hochfesten Beton nach DIN 1045-1“, Dezember 1999
- [11] Daschner, F.
“Versuche zur notwendigen Schubbewehrung zwischen Betonfertigteilen und Ortbeton“ in Heft 372 des Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 1986
- [12] Kerkeni, N. : Limfes Dokumentation; Hegger + Partner 2005

4 BEZEICHNUNGEN

Kräfte

P_0	Vorspannkraft nach dem Ablassen
V_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Querkraft im Nachweisschnitt [kN]
v_{Ed}	Bemessungswert der in der Fuge zu übertragenden Schubkraft [kN/m]
$V_{Ed,K+S}$	Schubkraft infolge Kriechen und Schwinden im Plattenausschnitt [kN]
$V_{Rd,ct}$	Bemessungswert der ohne Querkraftbewehrung aufnehmbaren Querkraft [kN]
$v_{Rd,ct}$	Bemessungswert der von der Fuge ohne Verbundbewehrung aufnehmbaren Schubkraft [kN/m]
$V_{Rd,max}$	Bemessungswert der durch die Druckstrebenfestigkeit begrenzten aufnehmbaren Querkraft [kN]
$V_{Rd,sy}$	Bemessungswert der durch die Tragfähigkeit der Querkraftbewehrung begrenzten aufnehmbaren Querkraft [kN]
$v_{Rd,sy}$	Bemessungswert der von bewehrten Fugen aufnehmbaren Schubkraft [kN/m]

Spannungen

f_{yd}	Bemessungswert der Streckgrenze des Betonstahls [N/mm ²]
f_{cd}	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit [N/mm ²]
σ_{cd}	Normalspannung in Schwerachse des Bauteils (Druck negativ) [N/mm ²]
σ_{Nd}	Normalspannung senkrecht zur Fuge (Druck negativ) [N/mm ²]

Geometrie

α	Neigung der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse
θ	Neigung der Druckstrebe zur Bauteilachse
A_s	Querschnittsfläche des Betonstahls
A_p	Querschnittsfläche des Spannstahls
b	wirksame Bauteilbreite zur Übertragung von Querkraft

d	statische Nutzhöhe des Bauteils
l	Länge des Bauteils
z	Hebelarm der inneren Kräfte

Beiwerte

β_{ct}	Beiwert zur Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit der Fuge (nach /1/ Tabelle 13)
μ	Reibungsbeiwert in der Fuge (nach /1/ Tabelle 13)
η_1	Korrekturfaktor bei Verwendung von Leichtbeton
ρ_l	geometrischer Bewehrungsgrad der Biegelängsbewehrung zur Ermittlung von $V_{Rd,ct}$
ρ_w	geometrischer Bewehrungsgrad der die Fuge kreuzenden Bewehrung

5 ERMITTLUNG DER ZEITABHÄNGIGEN UMLAGERUNGSSCHNITTGRÖßEN

5.1 Allgemeines

Das System „vorgespannte Elementdecke“ besteht aus einem vorgespannten Fertigteil und einer Ortbetonschicht. Durch die Vorspannung im Fertigteil wird ein Spannungszustand aufgebracht, der neben den lastunabhängigen Schwindeffekten auch zu erhöhter Verformung infolge Kriechen führt. Das Fertigteil weist eine Betonfestigkeitsklasse C35/45 bis C60/75 auf, die im Vergleich zu den für die Ortbetonschicht üblicherweise verwendeten Betonfestigkeitsklassen C20/25 bis C35/45 eine höhere Kriech- und Schwindneigung aufweist.

Beim Aufbringen der Ortbetonschicht kann das Fertigteil ein Alter zwischen 7 und 90 Tagen aufweisen. Für die auftretenden Spannungsumlagerungen können grundsätzlich zwei Fälle unterschieden werden:

(1) Geringer Altersunterschied zwischen Fertigteil und Ortbeton:

Wird der Ortbeton früh aufgebracht, kann erwartet werden, dass die hohe Kriech- und Schwindverformung des Fertigteils im Vergleich zur Ortbetonschicht zu einer Verkürzung dieses Bereiches führt; bei behinderter Verformung werden dadurch Druckspannungen vom Fertigteilbereich in den Aufbetonbereich umgelagert. Durch diese Umlagerung werden Schubspannungen in der Verbundfuge erzeugt (siehe Bild 5-1 rechts).

(2) Großer Altersunterschied zwischen Fertigteil und Ortbeton:

Bei einem späten Aufbringen der Ortbetonschicht sind die Kriech- und Schwindverformungen des Fertigteils bereits weit fortgeschritten. Man kann davon ausgehen, dass mehr als 2/3 der gesamten zeitabhängigen Effekte abgeschlossen sind. Zwar hat der Ortbeton aufgrund der geringeren Betonfestigkeitsklasse eine geringere Neigung zu Kriech- und Schwindverformungen. Durch den Altersunterschied der Bauteilbereiche wird die Kriech- und Schwindneigung des Ortbetons in diesem Fall überwiegen. Hierdurch entstehen Zugspannungen im Ortbetonbereich und Druckspannungen im Fertigteil (siehe Bild 5-1 links).

5 Ermittlung der zeitabhängigen Umlagerungsschnittgrößen

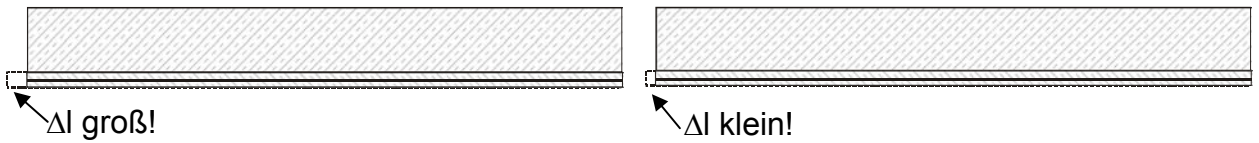
Großer Altersunterschied zwischen Fertigteileil und Ortbeton

Geringer Altersunterschied zwischen Fertigteileil und Ortbeton

Ausgangssystem Fertigteileil nach dem Vorspannen



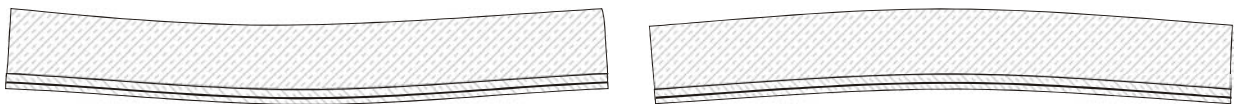
System beim Aufbringen des Ortbetons



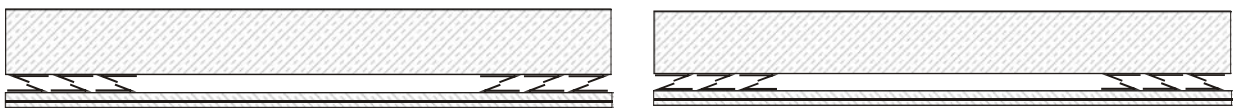
Verformungsfigur infolge Kriechen und Schwinden bei behinderter Krümmung



Verformungsfigur infolge Kriechen und Schwinden ohne Behinderung der Krümmung



Schubspannungen infolge Kriechen und Schwinden



Normalspannungen infolge Kriechen und Schwinden

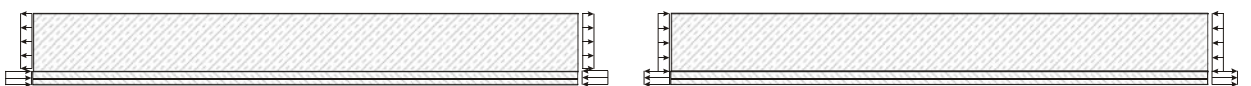


Bild 5-1: Unterschiede in Spannungsentwicklungen in Abhängigkeit des Altersunterschiedes der Bauteilbereiche

5 Ermittlung der zeitabhängigen Umlagerungsschnittgrößen

Die Längsspannung σ_{cd} hat wesentlichen Einfluss auf die Querkraftbemessung nach DIN 1045-1. Daher ist die Quantifizierung dieser Spannung für eine sichere Bemessung unabdingbar. Im folgenden werden diese Spannungen für extreme Randbedingungen ermittelt. In das Nachweiskonzept der Querkraft- und Fugentragfähigkeit von vorgespannten Elementdecken werden die ungünstigsten Werte eingearbeitet. Der so entwickelte Bemessungsansatz bedarf dann keiner expliziten Ermittlung der Umlagerungsschnittgrößen und deckt alle möglichen zeitlichen Szenarien ab.

Die Schubspannungen in der Verbundfuge infolge zeitabhängiger Effekte sind im Nachweisformat der Verbundfugenbemessung nach DIN 1045-1 nicht geregelt. Diese können sowohl entgegen, als auch in Richtung der Schubkraft aus äußerer Belastung wirken und somit die Tragfähigkeit der Fuge günstig bzw. ungünstig beeinflussen (siehe Bild 5-1). Diese Schubspannungen werden in den nachfolgenden FE-Berechnungen quantifiziert. Die ungünstigsten Werte werden bei der Bemessung berücksichtigt.

Die Grenzwerte der Spannungsumlagerungen werden für folgende Randbedingungen ermittelt:

	min	max
Betonfestigkeitsklasse Fertigteil	C30/37	C60/75
Betonfestigkeitsklasse Ortbeton	C20/25	C35/45
Altersunterschied Fertigteil / Ortbeton	t = 7d	t = 90d
Kriecherzeugende Dauerlast	EG + 0,75 kN/m ²	EG + 3,75 kN/m ²
Vorspannung	P ₀ =232 kN/m	P ₀ =1004 kN/m
Dicke Fertigteil	5 cm	12 cm
Dicke Ortbeton	7 cm	18 cm
Bauteillänge	5,0 m	8,0 m

Tabelle 5-1: Randbedingungen für Ermittlung der Umlagerungsschnittgrößen

5 Ermittlung der zeitabhängigen Umlagerungsschnittgrößen

Betonfestigkeitsklasse Fertigteil

Der Mindestwert der Betonfestigkeitsklasse C30/37 wird in [8] angegeben. Die Obergrenze nach [8] von C45/55 wird in der Untersuchung auf C60/75 erhöht.

Betonfestigkeitsklasse Ortbeton

Nach [8] muss der Ortbeton mindestens eine Festigkeitsklasse C20/25 aufweisen. Höhere Festigkeitsklassen als C35/45 können baupraktisch vernachlässigt werden.

Betonierzeitpunkt Ortbeton

Der untere Wert des Betonierzeitpunktes kann baupraktisch als frühestmöglicher Zeitpunkt angesehen werden. Andererseits ist es denkbar, dass die Ortbeton-schicht später als nach 90 Tagen aufgebracht wird; für die Ermittlung der Umlagerungsschnittgrößen sind die Auswirkungen hierfür jedoch vernachlässigbar.

Kriecherzeugende Dauerlast

Der Mindestwert stellt eine Dachdecke mit einer Ausbaulast von $0,75 \text{ kN/m}^2$ dar. Der obere Wert der Dauerlast setzt sich zusammen aus einer Ausbaulast von $0,75 \text{ kN/m}^2$ und einem Verkehrslastanteil von $\psi_2 \cdot q_k = 0,6 \cdot 5,0 \text{ kN/m}^2 = 3,0 \text{ kN/m}^2$. Das Eigengewicht (EG) wird stets hinzuaddiert. Höhere Verkehrslasten sind baupraktisch möglich; die Bauteillänge müsste entsprechend angepasst werden. Das kriecherzeugende Moment in Feldmitte bliebe jedoch annähernd konstant.

Vorspannung

Nach Herstellerangaben

Dicke Fertigteil und Ortbetonschicht

Nach Herstellerangaben

Bauteillänge

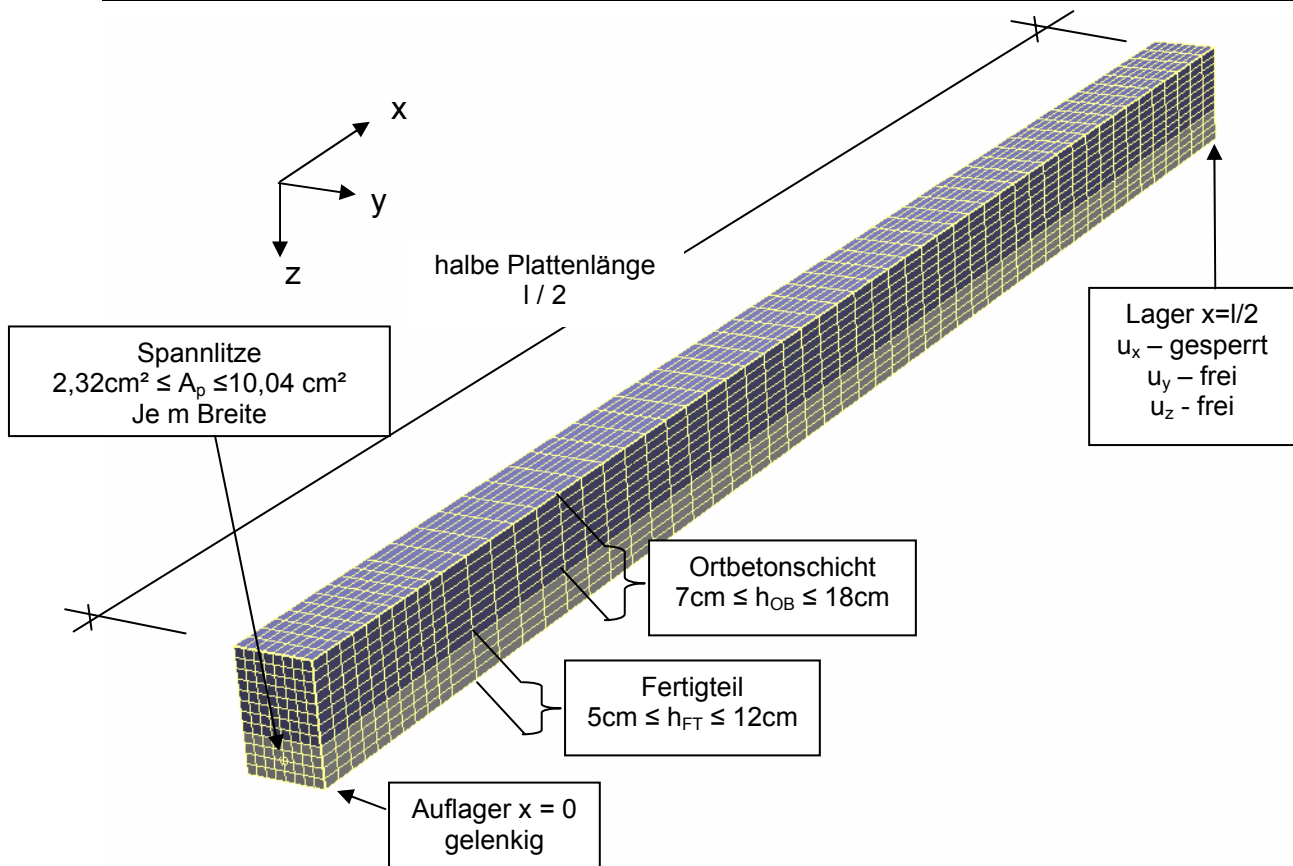
Die Wahl der Bauteillänge ist abhängig von der Verkehrslast und dem gewählten Vorspanngrad. Bei einer höheren Verkehrslast bliebe das kriecherzeugende Moment in Feldmitte etwa konstant, da die Bauteillänge entsprechend der Biegetragfähigkeit des Querschnitts reduziert werden müsste.

5.2 Durchgeführte FE-Berechnungen

5.2.1 Beschreibung des FE-Systems

Die Umlagerungsschnittgrößen, die sich aus dem unterschiedlichen zeitabhängigen Verhalten der beiden Betonschichten ergeben, werden mit dem Programmsystem LIMFES ermittelt. Die Berechnung erfolgt an einem 10 cm breiten Plattenstreifen. Aus Symmetriegründen wird nur die halbe Spannweite abgebildet (siehe Bild 5-2). Der Beton wird durch 8-Knoten-Volumenelementen modelliert. Diese weisen ein linearelastisches zeitabhängiges Materialverhalten auf. Die Vorspannung des Fertigteils wird durch Spanngliedsegmente mit vorgegebener Vordehnung aufgebracht. Die Vordehnung wird so eingestellt, dass sich eine Spannkraft von $P_0 \leq A_p \cdot 1000\text{N/mm}^2$ ergibt (etwa 5,0 – 5,8‰). Über die Übertragungslänge der abgebildeten Litzen wird die Vordehnung vom Bauteilende bis zum Ende der Übertragungslänge in 5 Stufen erhöht, was näherungsweise einer linearen Übertragung der Vorspannkraft auf den Beton entspricht. Bei dünnen Fertigteilenelementen ($h_{FT}=5\text{cm}$) wird die Vorspannung zentrisch aufgebracht, bei Elementen der Höhe $h_{FT}=12\text{cm}$ wird eine Spanngliedlage mit einem Achsabstand vom unteren Rand von $a=4,5\text{cm}$ angesetzt, was dem Abstand zur Einhaltung der Feuerwiderstandsklasse F90 entspricht.

In Längsrichtung weisen die Volumenelemente eine Länge zwischen 2,5 und 10 cm und Querrichtung Abmessungen zwischen 1,25 und 2 cm auf.

5 Ermittlung der zeitabhängigen Umlagerungsschnittgrößen**Bild 5-2: Übersicht FE-System****5.2.2 Belastungen**

Der Lastfall Vorspannung wird wie oben beschrieben durch vorgedehnte Spanngliedsegmente aufgebracht. Die Kriech- und Schwindbeiwerte werden nach den Angaben in Heft 525 des DAfStb [2] ermittelt. Das Betonalter bei Schwindbeginn infolge Austrocknung t_s wird mit 3 Tagen festgesetzt. Die äußere Belastung aus Ausbau und kriecherzeugendem Verkehrslastanteil wird als Flächenlast entsprechend den Werten nach Tabelle 5-1 angesetzt. Das Eigengewicht wird programmintern berücksichtigt.

5.2.3 Berechnungsablauf

Die Berechnung auf linear-elastischer Grundlage wird zeitabhängig durchgeführt. Das Fertigteil wird bis zum Zeitpunkt des Aufbringens der Ortbetonschicht ausschließlich durch die Vorspannung und den Lastfall Kriechen und Schwinden be-

5 Ermittlung der zeitabhängigen Umlagerungsschnittgrößen

lastet. Dieser Zeitpunkt wird innerhalb von 10 linearen Lastschritten erreicht. Nach dem Aufbringen der Ortbetonschicht wird die zeitliche Abfolge von einem Lastschritt zum nächsten verfeinert. Die Zeit weist eine logarithmische Verteilung auf.

Das Eigengewicht der Platte wird 3 Tage nach Aufbringen der Ortbetonschicht zusammen mit der äußeren Belastung aktiviert, um eine Belastung des sehr jungen Ortbetons zu verhindern. Die Berechnung berücksichtigt den Kriech- und Schwindverlauf bis zu einem Zeitpunkt $t=25\,000d$, was in etwa 70a entspricht.

5.2.4 Berechnungsumfang

Folgende Plattentypen werden berechnet:

System Nr	Fertigteil			Ortbeton			$\Delta g + \psi_2 p$		Länge [m]
	Dicke [cm]	Beton	P_0 [kN/m]	Dicke [cm]	Beton	t [d]	Größe [kN/m ²]	t_1 [d]	
0	5	C45/55	232	10	C20/25	90	1,25	93	5
1	5	C45/55	232	10	C20/25	7	3,75	10	5
2	5	C30/37	232	18	C35/45	7	3,75	10	5
3	12	C60/75	1004	18	C35/45	7	3,75	10	8
4	12	C45/55	416	18	C35/45	90	0,75	93	5
5	12	C60/75	1004	18	C20/25	90	0,75	93	8

Bild 5-3: Übersicht berechnete FE-Systeme

5.3 Ergebnisse der FE-Berechnungen

5.3.1 Umlagerungsschnittgrößen aus Kriechen und Schwinden

Am Beispiel von System 5 ist der Verlauf der Normalspannungen im Auflagerbereich und in Feldmitte zum Zeitpunkt kurz nach Aufbringen der äußeren Lasten in Bild 5-4 und zum Zeitpunkt der maximalen Spannungsumlagerungen in Bild 5-5 dargestellt. Die Längsspannungsverteilung über die Bauteilhöhe weist einen ausgeprägten nicht-linearen Verlauf auf. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Längsspannungen in den Teilquerschnitten infolge Spannungsumlagerungen deutliche Veränderungen mit der Zeit erfahren.

5 Ermittlung der zeitabhängigen Umlagerungsschnittgrößen

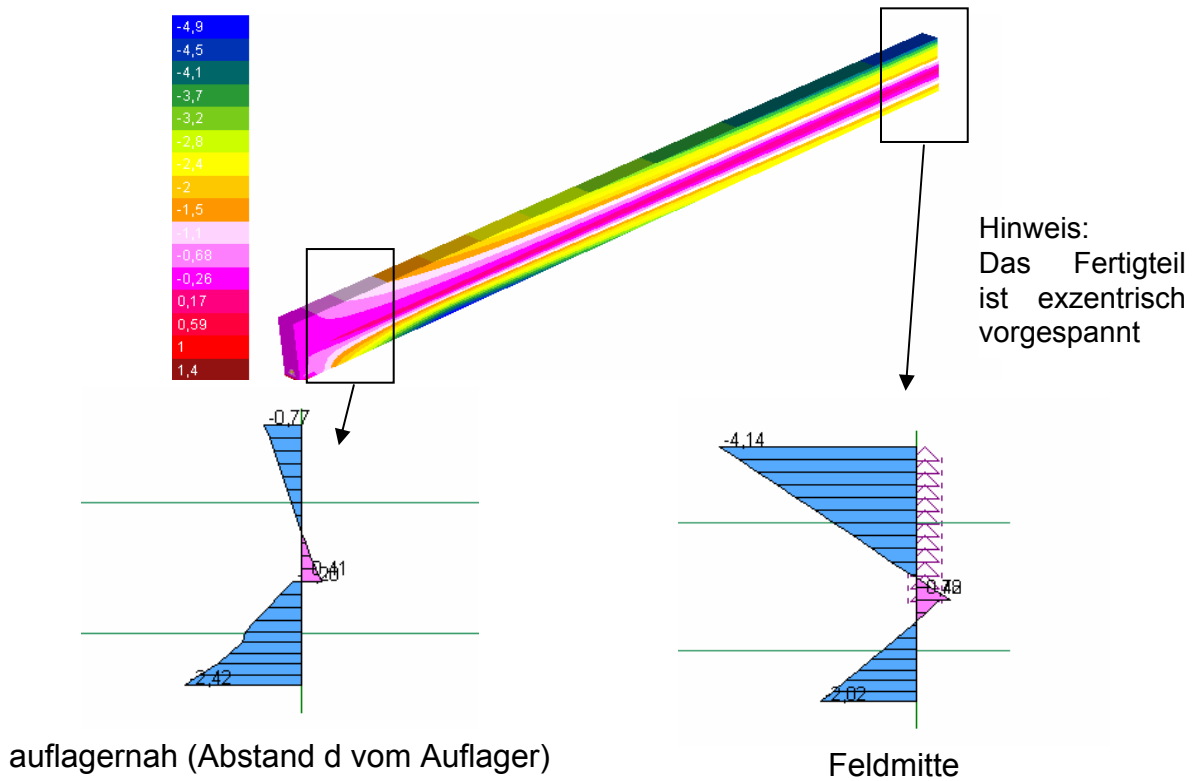


Bild 5-4: Verlauf σ_x in System 5 kurz nach Aufbringen der Belastung

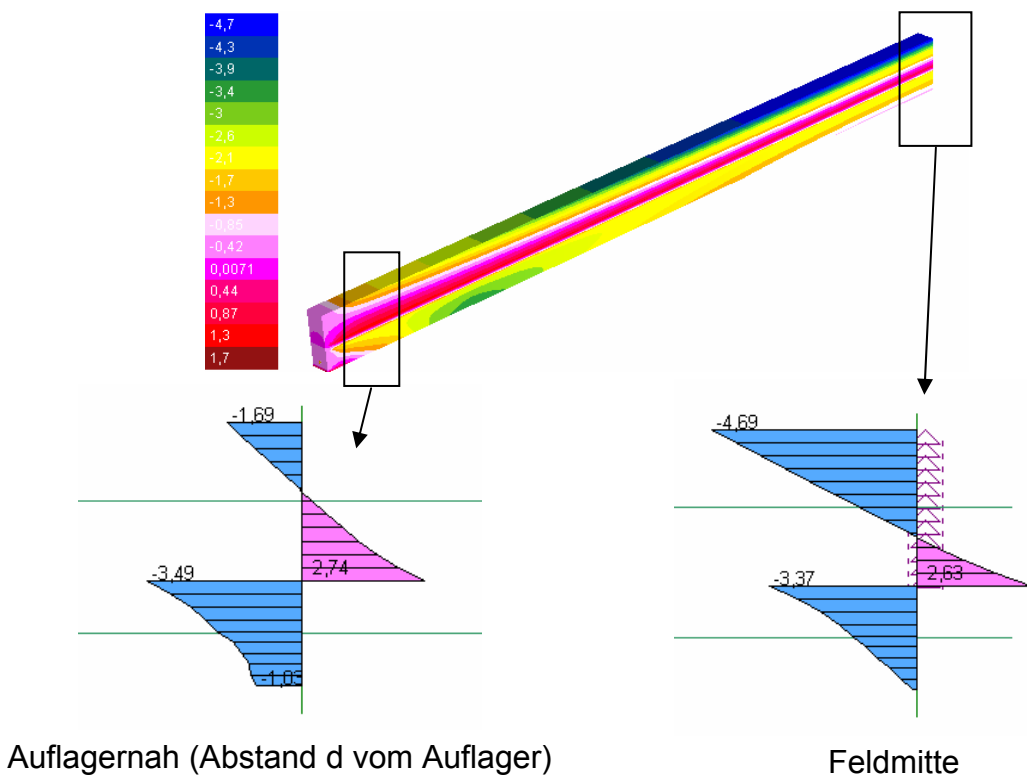


Bild 5-5: Verlauf σ_x in System 5 zum Zeitpunkt maximaler Spannungsumlagerungen

5 Ermittlung der zeitabhängigen Umlagerungsschnittgrößen

Die Normalkräfte in den Teilquerschnitten können durch Spannungsintegration des jeweiligen Querschnitts oder einfacher durch die Summe der Auflagerkräfte der Symmetrielager des jeweiligen Querschnittsbereiches ermittelt werden.

Die Umlagerungsschnittgrößen aus Kriechen und Schwinden können durch die Differenz der Normalkräfte eines Teilquerschnitts zwischen dem Zeitpunkt der Aktivierung der äußeren Belastung t_1 und einem späteren Zeitpunkt t_2 berechnet werden. Der Zeitpunkt t_2 bei dem die größten Umlagerungsschnittgrößen erreicht werden, liegt in der Regel nicht bei unendlich, sondern variiert je nach Randbedingung des Systems. Die Summe der Umlagerungsschnittgrößen beide Querschnittsteile ergibt sich aufgrund der statisch bestimmten Lagerung des Systems stets zu Null.

Aus Bild 5-6 ist die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Umlagerungsschnittgrößen aus Kriechen und Schwinden ersichtlich. Beim System 5 ergibt sich demnach eine Umlagerungsschnittgröße N_x von 69 kN je m Plattenbreite. Die Umlagerungsschnittgrößen für alle Systeme sind in den Tabellen 5-2 und 5-3 angegeben. Der zeitliche Verlauf der Normalkräfte im Ortbeton kann für die einzelnen Systeme Anhang A entnommen werden.

Bei der Anpassung der Querkraftbemessung nach DIN 1045-1 auf vorgespannte Elementdecken werden nur die ungünstig wirkenden Zugkräfte nach Tabelle 5-2 berücksichtigt.

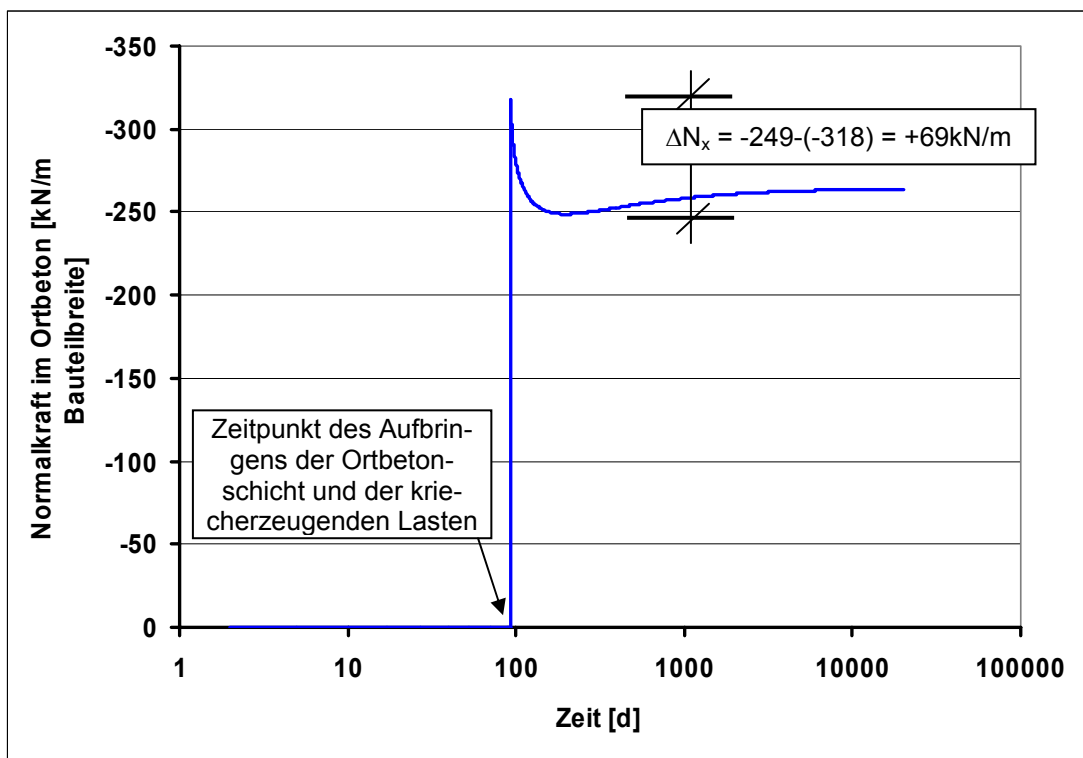


Bild 5-6: Zeitlicher Verlauf der Normalkraft im Ortbetonbereich, System 5 (Feldmitte)

5 Ermittlung der zeitabhängigen Umlagerungsschnittgrößen

System Nr	Bauteilhöhen			horizontale Auflagerkräfte Ortbeton				Umlagerung
	Fertigteil [cm]	Ortbeton [cm]	gesamt [cm]	$t=t_1$ [kN/10cm]	maßg t [kN/10cm]	Δt [d]	ΔA_x [kN/10cm]	ΔN [kN/m]
0	5	10	15	15,1	12,6	45	-2,5	+25,0
1	5	10	15	15,7	15,1	5	-0,6	+6,0
2	5	18	23	15,9	15,2	3	-0,7	+7,0
3	12	18	30	56,1	53,7	25000	-2,4	+24,0
4	12	18	30	11,8	4,76	110	-7,0	+70,4
5	12	18	30	31,8	24,9	110	-6,9	+69,0

Tabelle 5-2: Ergebnisse der FE-Berechnungen – maximale Zugkräfte im Ortbeton

System Nr	Bauteilhöhen			horizontale Auflagerkräfte Ortbeton				Umlagerung
	Fertigteil [cm]	Ortbeton [cm]	gesamt [cm]	$t=t_1$ [kN/10cm]	maßg t [kN/10cm]	Δt [d]	ΔA_x [kN/10cm]	ΔN [kN/m]
0	5	10	15	kein Aufbau von Druckkräften				
1	5	10	15	15,7	15,8	25000	+0,1	-1,0
2	5	18	23	15,9	19,3	25000	+3,4	-34,0
3	12	18	30	kein Aufbau von Druckkräften				
4	12	18	30	kein Aufbau von Druckkräften				
5	12	18	30	kein Aufbau von Druckkräften				

Tabelle 5-3: Ergebnisse der FE-Berechnungen – maximale Druckkräfte im Ortbeton

5.3.2 Schubspannungen infolge Kriechen und Schwinden

Die Umlagerung von Längsspannungen zwischen Fertigteil und Ortbetonschicht führen zu Schubspannungen in der Verbundfuge. Diese treten nicht über die gesamte Bauteillänge auf, sondern konzentriert am Plattenende. Die Länge des Bereiches in dem Schubspannungen aus Zwängung zwischen Fertigteil und Ortbeton herrschen, hängt hauptsächlich von der Oberflächenbeschaffenheit der Verbundfuge ab. Je rauer die Fuge desto kürzer der Bereich. Die Größe dieser Schubspannungen wird hier auf der sicheren Seite mit starrem Verbund ermittelt.

Im folgenden wird exemplarisch das System 0 betrachtet. Die Schubspannungsverläufe der weiteren Systeme sind in Anhang B dargestellt.

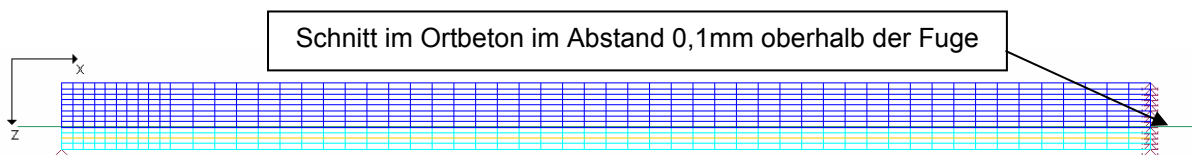


Bild 5-7: Darstellung der Schnittführung im FE-System

Nach Aufbringen der Belastung zum Zeitpunkt $t=93d$ ergibt sich entsprechend des Querkraftverlaufes aus äußere Belastung ein annähernd linearer Schubspannungsverlauf (Bild 5-8).

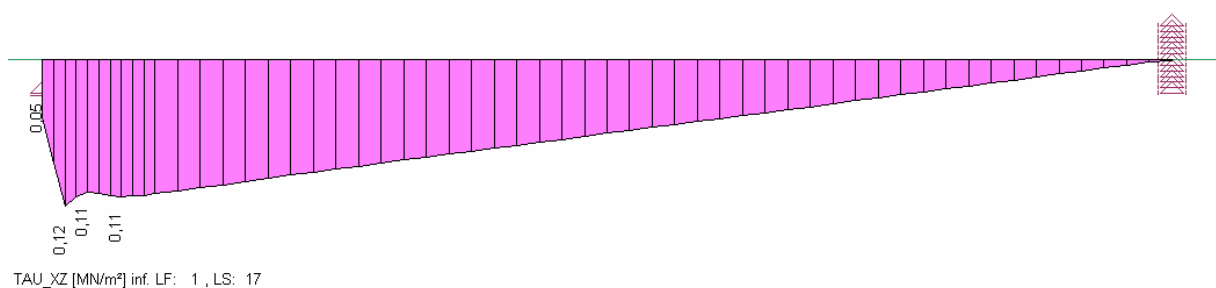
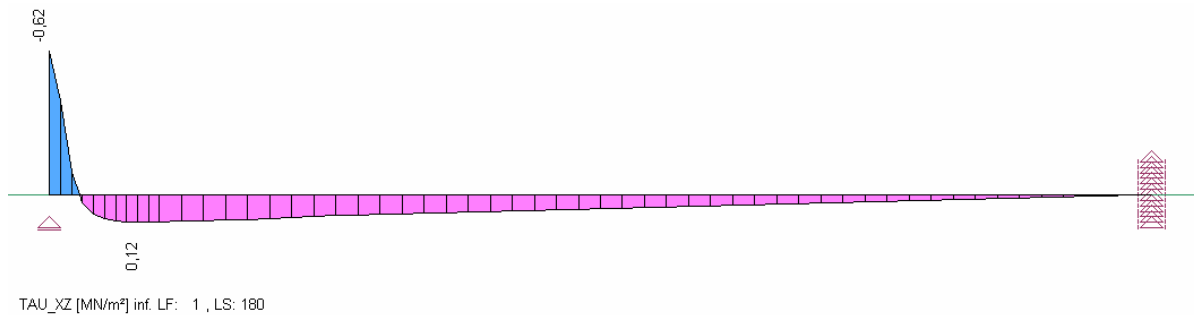


Bild 5-8: Verlauf der Spannung τ_{zx} im Schnitt nach Aufbringen der Belastung

Zum Zeitpunkt $t=135d$ mit maximalem ΔN ist der Spannungsverlauf im Endbereich der Platte deutlich verändert, während die Spannungen in übrigen Bereich unverändert bleiben (Bild 5-9).

5 Ermittlung der zeitabhängigen Umlagerungsschnittgrößen**Bild 5-9: Verlauf der Spannung τ_{zx} im Schnitt zum Zeitpunkt $t=180d$**

Die Schubspannungen infolge Kriechen und Schwinden treten aufgrund des starren Verbundes in einem Übertragungsbereich von etwa 10cm auf. Dieser Bereich ist unter Berücksichtigung des Verbundverhaltens der Fuge deutlich größer. Daher ist an den Plattenenden eine Mindestbewehrung in einem Bereich von 50 cm anzuordnen. Die Höhe der Mindestbewehrung wurde in [8] ermittelt und kann hier bestätigt werden. Der Berechnungsweise in [8] kann auch deshalb zugestimmt werden, da hierbei von einem abgeschlossenen Schwinden des Fertigteils ausgegangen wurde, was sich auf die Ermittlung der Abrissbewehrung ungünstig auswirkt.

Zilch stellt in [8] Kapitel 7.2.3.3 die Forderung, die Mindestbewehrung von $2,0\text{cm}^2/\text{m}$ in jedem Fall anzuordnen, „...auch für den Fall, dass aus äußerer Belastung bereits rechnerische Verbundbewehrung erforderlich werden sollte“. Aus den vorangegangenen Überlegungen muss diese Forderung erweitert werden. Da bei der Bemessung die Umlagerungsschnittgrößen nicht berücksichtigt werden, sollte die Mindestbewehrung hier nicht als Mindestbewehrung verstanden werden, sondern als Abrissbewehrung, die bei vorgespannten Elementdecken zur statisch erforderlichen Bewehrung aus äußerer Last zu addieren ist. Sollte aus äußerer Last keine Verbundbewehrung erforderlich sein, so ist die Abrissbewehrung als Mindestbewehrung anzuordnen.

6 QUERKRAFTBEMESSUNG IM GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT NACH DIN 1045-1

6.1 Allgemeines

Das Nachweisverfahren im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Querkraft von Stahl- und Spannbetonbauteilen ist in DIN 1045-1, Abschn. 10.3 geregelt. Neben der Querkraftbemessung nach den Abschnitten 10.3.1 bis 10.3.4 wird auch die Bemessung für Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten (Abschn. 10.3.5) sowie die Schubkraftübertragung in Fugen (Abschn. 10.3.6) behandelt. Für die Querkraftbemessung von vorgespannten Elementdecken müssen somit die Abschnitte 10.3.1 bis 10.3.4 sowie 10.3.6 beachtet werden. In diesem Kapitel werden die Hintergründe der Querkraftbemessung insbesondere hinsichtlich des Einflusses der Längsspannung σ_{cd} erläutert und die Auswirkungen auf die Bemessung von vorgespannten Elementdecken bewertet.

Der Übersicht in Kapitel 2 entsprechend, wird die Anwendbarkeit des Bemessungskonzeptes für Querkraft von DIN 1045-1 auf vorgespannte Elementdecken geprüft. Insbesondere wird der Ansatz der Längsspannung σ_{cd} unter Berücksichtigung der Besonderheiten vorgespannter Elementdecken untersucht. Die Erkenntnisse aus Kapitel 5 fließen in diese Überlegungen mit ein, so dass für die Querkraftbemessung ein konkreter Vorschlag für die Zulassung von vorgespannten Elementdecken angegeben werden kann.

Neben der Bemessung für Querkraft muss der Bemessung der Verbundfuge besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Das umstrittene Bemessungskonzept für Fugen nach DIN 1045-1 wird dem Konzept nach EC2 [5] und den Empfehlungen der CEB-FIP [4] gegenübergestellt und hinsichtlich der Anwendbarkeit für die Fugenbemessung bei vorgespannten Elementdecken bewertet. Für die Zulassung von vorgespannten Elementdecken wird wie beim Querkraftnachweis ein Vorschlag erarbeitet.

6.2 Querkraftbemessung nach DIN 1045-1

6.2.1 Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

DIN 1045-1 gibt zwei Gleichungen für die Bemessung von Bauteilen ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung an. In Gleichung (70) wird der allgemein gültige Bemessungswert der Tragfähigkeit dieser Bauteile angegeben, nach Gl.(72)

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

kann der Bemessungswert der Tragfähigkeit in Bereichen ermittelt werden, in denen die Betonzugspannungen kleiner $f_{ctk;0,05}/\gamma_c$ bleiben.

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit nach Gl.(70)

Der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit wird nach Gl.(70) wie folgt ermittelt:

$$V_{Rd,ct} = [0,1\kappa \cdot \eta_1 \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12\sigma_{cd}] \cdot b_w \cdot d$$

Somit gehen in die Bemessung neben den geometrischen Werten b_w , d und κ ein:

- die ungerissene Druckzonenhöhe über $(100\rho_l)^{1/3}$
- die Zugfestigkeit des Betons über $f_{ck}^{1/3}$
- die Längsspannung in der Bauteilachse über $0,12\sigma_{cd}$

Der Bemessung liegen neben den empirischen Vorfaktoren 0,1 sowie $-0,12$ das mechanische Konzept zugrunde, dass das Bauteil Biegerisse aufweist und die Querkraft über die ungerissene Biegedruckzone des Betonquerschnitts abgetragen wird. Die Betonzugfestigkeit ($f_{ck}^{1/3}$) in diesem Bereich sichert dabei den Bauteilwiderstand gegen die einwirkende Querkraft. Die Höhe der Biegedruckzone wird proportional zu $(100\rho_l)^{1/3}$ angesetzt. Bleibt der Querschnitt im auflagernahen Bereich ungerissen, liegt dieses Nachweisformat durch das ausschließliche Berücksichtigen der Biegedruckzone für die Querkraftübertragung auf der sicheren Seite.

Der Anteil aus Längsspannung $-0,12\sigma_{cd}$ erhöht die Querkrafttragfähigkeit des Bauteils als additiver Anteil. König et. al. stellen in [9] fest, dass dieser Ansatz die Tragfähigkeit eines vorgespannten Bauteils nur unzureichend abbildet. Dies liegt daran, dass der additive Anteil zur Querkrafttragfähigkeit $[-0,12\sigma_{cd} \cdot b_w \cdot d]$ die Betoneigenschaften nicht berücksichtigt. Diese Modellungenauigkeit wird durch den empirischen Vorfaktor von 0,12 kompensiert.

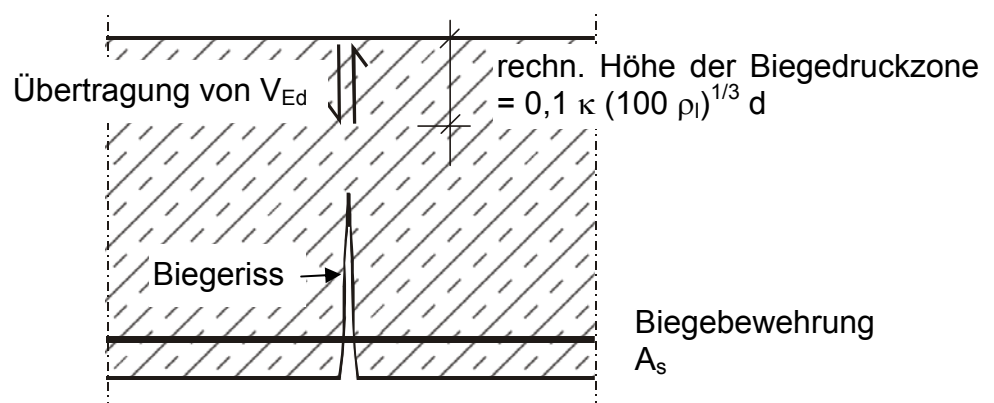


Bild 6-1: Querkraftübertragender Bereich in Bauteilen ohne Querkraftbewehrung und ohne Längsspannung ($\sigma_{cd} = 0$)

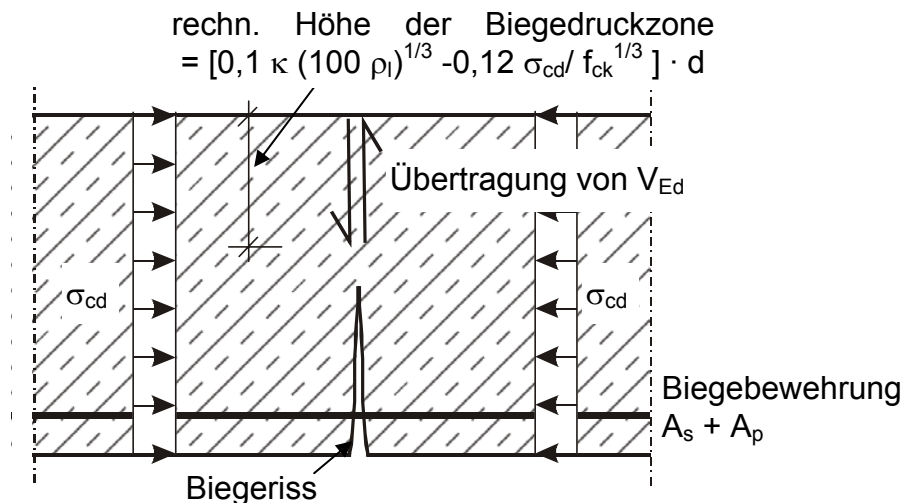


Bild 6-2: Querkraftübertragender Bereich in Bauteilen ohne Querkraftbewehrung mit Längsspannung ($\sigma_{cd} < 0$)

Ansatz von σ_{cd} bei vorgespannten Elementdecken

Der Querkraftbemessung für Bauteile ohne Querkraftbewehrung liegt die Dehnungs- bzw. Spannungsverteilung im Querschnitt im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Biegung zugrunde. Die Querkraft wird ausschließlich in der Biegedruckzone des Querschnitts übertragen. Vorgespannte Elementdecken werden im Grenzzustand der Tragfähigkeit für Biegung mit Längskraft wie monolithische Bauteile bemessen. Die Vorspannung wirkt im ungerissenen Zustand hauptsächlich auf das Fertigteil. Bei einer Rissbildung muss das Gleichgewicht der Normalkräfte im Querschnitt bestehen bleiben. Die Normalspannung im Fertigteil infolge Vorspannung „wandert“ so bei einer Rissbildung in den ungerissenen Bereich. Durch diese „Umlagerung“ werden innere Zwangsschnittgrößen bspw. aus Kriechen und Schwinden aufgehoben. Dadurch kann für die Bemessung der Ansatz für monolithische Bauteile genutzt werden. Die Normalspannung σ_{cd} kann folglich auch bei der Bemessung der Elementdecken nach

$$\sigma_{cd} = \frac{x}{l_{bpd}} \cdot \frac{P(t = \infty)}{A_c}$$

Gleichung 1

mit	x	Abstand des Nachweisschnittes vom Plattenende
	l_{bpd}	Bemessungswert der Übertragungslänge des Spannstahls
	x/l_{bpd}	= 1 für $x > l_{bpd}$
	$P(t = \infty)$	Vorspannkraft im Querschnitt zum Zeitpunkt $t = \infty$
	A_c	Querschnittsfläche des Gesamtquerschnitts

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

bestimmt werden. Dies entspricht auch dem Vorgehen, das auch Hegger und Görtz in [6] bei der Auswertung der Versuche angewandt haben.

Für die Ermittlung von ρ_1 kann gemäß der Legende zu Gl.(70) in DIN 1045-1 neben der vorhandenen Betonstahlbewehrung auch die Spannstahlfläche angesetzt werden. Können hierbei die Anforderungen an die Verankerung nach [1] Bild 32 nicht eingehalten werden, so kann die anrechenbare Stahlfläche ab dem Abstand d vom Bauteilende wie folgt ermittelt werden:

$$A_{sl} = \sum_i \alpha_{bp,i} \cdot A_{p,i} + \sum_j \alpha_{bs,j} \cdot A_{s,j} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$\text{mit } \alpha_{bp} = \frac{x - d}{l_{ba}} \leq 1,0 ;$$

$$\alpha_{bs} = \frac{x - d}{l_{bs}} \leq 1,0$$

x	Abstand des Nachweisschnittes vom Bauteilende
l_{ba}	Bemessungswert der Verankerungslänge des Spannstahls nach [1] Abs. 8.7.6(10)
l_{bs}	erforderliche Verankerungslänge des Betonstahls entsprechend [1] Bild 32 ($l_{b,s} = 2/3 l_{b,net}$ oder $l_{b,s} = l_{b,net}$)
d	statische Nutzhöhe des Gesamtquerschnitts
A_p, A_s	Fläche des Spann- bzw. Betonstahls

Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit nach Gl.(72)

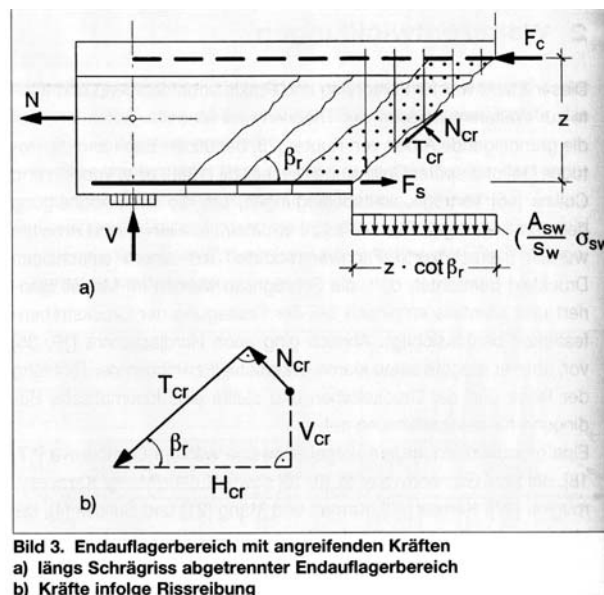
Der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit für ungerissene Querschnittsbereiche wird nach Gl.(72) wie folgt ermittelt:

$$V_{Rd,ct} = \frac{I \cdot b_w}{S} \sqrt{\left(\frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \right)^2 - \alpha_1 \cdot \sigma_{cd} \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c}}$$

Bei der Bemessung von vorgespannten Elementdecken sollte diese Gleichung nicht verwendet werden, da die Gleichung als Hauptspannungsformel nur für monolithische Bauteile Gültigkeit besitzt. Vorgespannte Elementdecken weisen mit der Verbundfuge eine Diskontinuität auf, welche die Anwendbarkeit der Gleichung ausschließt.

6.2.2 Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung

Der Querkraftbemessung von Bauteilen mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung liegt das Fachwerkmodell mit Rissreibung zugrunde (Bild 6-3). Dieses Fachwerkmodell besteht aus einer geneigten Betondruckstrebe, einem vertikalen Zugglied, das durch die Querkraftbewehrung gebildet wird, sowie der horizontalen Zugkomponente, welche durch die Biegelängsbewehrung abgedeckt wird. Die Neigung der Druckstrebe kann bei diesem Modell in gewissen Grenzen frei gewählt werden, wobei ein flacherer Druckstrebenwinkel eine geringere Tragfähigkeit der Druckstrebe zur Folge hat, jedoch weniger Querkraftbewehrung erfordert. Ein Druckstrebenwinkel von 45° entspricht einer vollen Schubdeckung nach DIN 1045(88). Flachere Winkel können als verminderte, steilere als „übertolle“ Schubdeckung betrachtet werden.

**Bild 6-3: Kraftfluss im Schubriss nach [9]****Rechnerische Neigung der Druckstrebe**

Die Neigung der Druckstrebe kann innerhalb der Grenzen nach [1], Gl.(73) frei gewählt werden:

$$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} \left\{ \begin{array}{l} \leq 3,0 \text{ für Normalbeton} \\ \leq 2,0 \text{ für Leichtbeton} \end{array} \right.$$

Der untere Grenzwert dieser Gleichung entspricht einer Neigung der Druckstrebe von etwa 60° . Nach Heft 525 [2] sollte eine Neigung $>45^\circ$ nur in Ausnahmefällen verwendet werden, bspw. wenn sich durch die rechnerische Ermittlung eine solche Neigung

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

einstellt. Die oberen Grenzwerte der Gleichung ($\theta = 18,5^\circ$ bzw. $26,5^\circ$) entsprechen in etwa der Neigung der Druckstrebe, die sich bei Anordnung der Mindestquerkraftbewehrung im Bauteil ergibt. Der rechnerische obere Grenzwert von $\cot \theta$ gibt nach Reineck [9] die Neigung der Druckstrebe unter Berücksichtigung einer Normalspannung im Querschnitt und der Kraftübertragung im Riss („Rissreibung“) wieder. Die Neigung des Schubrisses β_R wird als vereinfachtes Hauptspannungskriterium $\cot \beta_R = 1,2-1,4 \cdot \sigma_{cd} / f_{cd}$ ermittelt. Durch die angesetzte Rissreibungskraft T_{cr} kann die rechnerische Neigung der Druckstrebe gegenüber der Rissneigung weiter verringert werden.

Der Wert $V_{Rd,c}$ entspricht dem Querkraftanteil, der über Rissreibung abgetragen werden kann, und wird nach [1], Gl.(74) ermittelt:

$$V_{Rd,c} = \beta_{ct} \cdot 0,10 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \left(1 + 1,2 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \cdot b_w \cdot z$$

Neben den geometrischen Größen b_w und z und dem Beiwert für die Oberflächenbeschaffenheit des Risses $\beta_{ct} = 2,4$ sowie den Kennwerten des verwendeten Beton η_1 , f_{ck} und f_{cd} geht in die Ermittlung von $V_{Rd,c}$ die Längsspannung im Querschnitt σ_{cd} ein. Sie hat hier ähnlich wie in Gl.(73) aus [1] Einfluss für die Neigung des Schubrisses.

Die in Normalenrichtung zum Schubriss wirkende Kraft N_{cr} und die senkrecht dazu wirkende Kraft T_{cr} können durch das Kräftepaar H_{cr} und V_{cr} ersetzt werden. Aus obigem Krafteck (Bild 6-3) ist ersichtlich, dass sich bei einem geringeren Risswinkel β_r eine geringere Vertikalkomponente V_{cr} ergeben wird. Durch eine wirkende Längsdruckspannung σ_{cd} wird die Rissneigung vermindert. Diese Abminderung der durch Rissreibung übertragbare Querkraft infolge σ_{cd} bzw. des daraus resultierenden geringeren Rissneigungswinkels wird in Gl.(73) ($V_{cr} = V_{Rd,c}$) durch den Ausdruck $(1 + 1,2 \cdot \sigma_{cd} / f_{cd})$ berücksichtigt.

Ansatz von σ_{cd} bei vorgespannten Elementdecken

In den beiden genannten Gleichungen zur Ermittlung der Druckstrebenneigung hat die Längsspannung σ_{cd} Einfluss auf den unteren Grenzwert der wählbaren Druckstrebenneigung und wirkt sich somit auf die erforderliche Querkraftbewehrung aus:

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

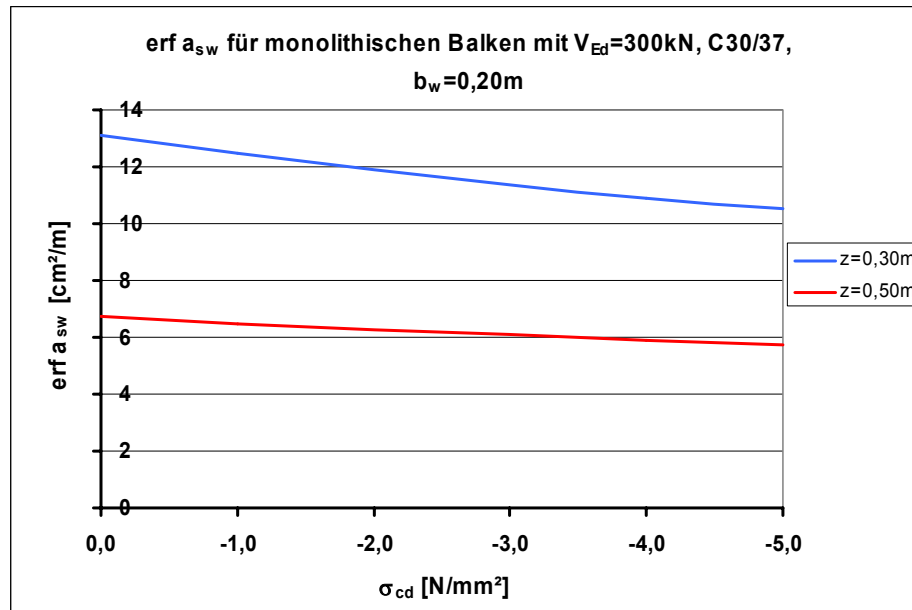


Bild 6-4: Einfluss der Längsdruckspannung σ_{cd} auf die erf. Querkraftbewehrung

Die Normalspannungsverteilung ist bei vorgespannten Elementdecken im Gegensatz zu monolithischen Bauteilen über die Bauteilhöhe nicht linear. Durch das Hauptspannungskriterium, welchem die Ermittlung der Neigung des Schubrisses zugrunde liegt, muss die Verteilung der Normalspannung in den beiden Bauteilbereichen Fertigteil und Ortbeton unterschieden werden. Da die Vorspannung hauptsächlich auf das Fertigteil wirkt, ergibt sich rechnerisch ein steilerer Risswinkel im Ortbeton als im Fertigteil (Bild 6-5).

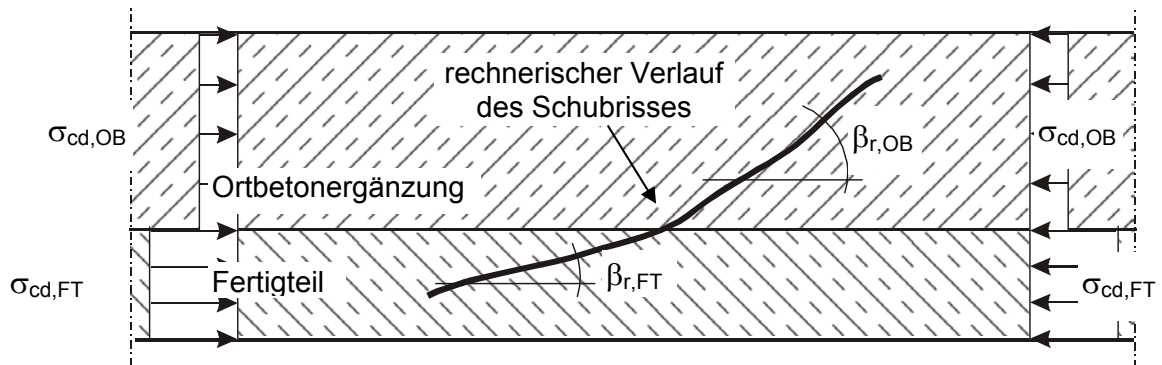


Bild 6-5: Rissneigung im Bauteil mit ungleichmäßiger Verteilung der Längsspannung σ_{cd}

Für die Ermittlung der zulässigen Druckstrebenneigung nach den Gleichungen (73) und (74) in [1] müsste demnach die Normalspannung in den einzelnen Bauteilbereichen unter Berücksichtigung der zeitabhängigen Spannungsumlagerungen angesetzt

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

werden. Da sich dies bei der Bemessung nach DIN 1045-1 nicht umsetzen lässt, wird auf der sicheren Seite liegend folgende Vorgehensweise gewählt:

Die in der Schwerachse der Ortbetonschicht maximal auftretende Zugspannungen infolge Kriechen und Schwinden betragen nach Tabelle 5-2:

$$\text{Systeme 4 und 5} \quad \max \sigma_{cd} = 70 \text{ kN} / (0,18 \cdot 1 \text{ m}^2) = 0,39 \text{ MN/m}^2 \leq 0,50 \text{ MN/m}^2$$

Für C20/25 mit $f_{cd} = 11,3 \text{ MN/m}^2$ ergibt sich der obere Grenzwert von $\cot \theta$ nach [1], Gl (73) zu:

$$\cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} = \frac{1,2 - 1,4 \cdot 0,50 / 11,3}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} = \frac{1,2 - 0,06}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} \approx \frac{1,1}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}}$$

$$\cot \theta \leq \frac{1,1}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}}$$

$$\text{mit} \quad V_{Rd,c} = \beta_{ct} \cdot 0,10 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot z$$

Mit diesem Ansatz sind auch äußere Zugspannungen von $\sigma_{cd} \leq 0,5 \text{ N/mm}^2$ für eine Betonfestigkeitsklasse von C20/25 und $\sigma_{cd} \leq 1,4 \text{ N/mm}^2$ bei C35/45 abgedeckt. Planmäßige äußere Zugspannungen wirken auf den Gesamtquerschnitt und werden somit mehrheitlich vom steiferen Fertigteil aufgenommen.

Ermittlung der Bemessungswerte $V_{Rd,sy}$ und $V_{Rd,max}$

Die Längsspannung σ_{cd} geht in die Bemessungswerte für den Bauteilwiderstand $V_{Rd,sy}$ und $V_{Rd,max}$ nur indirekt über die Neigung der Druckstrebe ein. Die Empfehlungen zur Berücksichtigung der Längsspannung σ_{cd} bei der Ermittlung der Druckstrebenneigung ist oben beschrieben.

Bei der Verwendung von Gitterträgern ist die Druckstreben Tragfähigkeit $V_{Rd,max}$ entsprechend der Zulassungen zu begrenzen.

6.2.3 Bemessung für Querkraft bei vorgespannten Elementdecken

Auf Grundlage der bisherigen Ausführungen wird folgendes Nachweiskonzept für die Querkrafttragfähigkeit von vorgespannten Elementdecken vorgeschlagen.

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1**6.2.3.1 Bemessungswert der einwirkenden Querkraft**

Der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft bei vorgespannten Elementdecken kann entsprechend den Ausführungen von DIN 1045-1 [1] Abs. 10.3.2 ermittelt werden.

6.2.3.2 Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

Die Ermittlung des Bemessungswertes der Querkrafttragfähigkeit von vorgespannten Elementdecken ohne Querkraftbewehrung kann analog zu [1] Gl(70) erfolgen:

$$V_{Rd,ct} = [0,1\kappa \cdot \eta_1 \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12\sigma_{cd}] \cdot b_w \cdot d$$

$$\text{mit } \kappa = 1 + (200 / d)^{1/2}$$

η_1 Beiwert zur Berücksichtigung von Leichtbeton nach DIN 1045-1

ρ_l geometrischer Längsbewehrungsgrad

$$= A_{sl} / (b_w \cdot d)$$

$$A_{sl} = \sum_i \alpha_{bp,i} \cdot A_{p,i} + \sum_j \alpha_{bs,j} \cdot A_{s,j}$$

$$\text{mit } \alpha_{bp} = \frac{x - d}{l_{ba}} \leq 1,0 ; \quad \alpha_{bs} = \frac{x - d}{l_{bs}} \leq 1,0$$

x Abstand des Nachweisschnittes vom Bauteilende

l_{ba} Bemessungswert der Verankerungslänge des Spannstahl

l_{bs} Bemessungswert der Verankerungslänge des Betonstahls
entsprechend [1] Bild 32

A_p, A_s Fläche des Spann- bzw. Betonstahls

f_{ck} charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit des Ortbetons
oder des Fertigteils (der kleinere Wert ist maßgebend)

$$\sigma_{cd} = \frac{x}{l_{bpd}} \cdot \frac{P(t = \infty)}{A_c}$$

mit x Abstand des Nachweisschnittes vom Plattenende

l_{bpd} Bemessungswert der Übertragungslänge des Spannstahls

$$x/l_{bpd} = 1 \quad \text{für } x > l_{bpd}$$

$P(t = \infty)$ Vorspannkraft im Querschnitt zum Zeitpunkt $t = \infty$

A_c Querschnittsfläche des Gesamtquerschnitts

b_w Bauteilbreite

d statische Nutzhöhe des Gesamtquerschnitts

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

6.2.3.3 Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung

Die Bemessungswerte der Querkrafttragfähigkeit bewehrter Bauteile $V_{Rd, sy}$ sowie $V_{Rd, max}$ werden entsprechend [1] Gln. (75) und (76) bei lotrechter Querkraftbewehrung bzw. Gln. (77) und (78) bei geneigter Bewehrung ermittelt. Die Grenzwerte der Druckstrebenneigung sind bei vorgespannten Elementdecken abweichend von DIN 1054-1 wie folgt zu ermitteln:

$$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,1}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}}$$

mit $V_{Rd,c} = \beta_{ct} \cdot 0,10 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot z$

V_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Querkraft

$\beta_{ct} = 2,4$

η_1 Beiwert zur Berücksichtigung von Leichtbeton nach DIN 1045-1

f_{ck} charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit des Ortbetons oder des Fertigteils (der kleinere Wert ist maßgebend)

b_w Bauteilbreite

z Hebelarm der inneren Kräfte nach DIN 1045-1 Abs. 10.3.4(2)

Bei der Verwendung von Gitterträgern als Querkraftbewehrung sind die Angaben der entsprechenden Zulassungen zusätzlich zu beachten.

6.3 Bemessung der Verbundfuge

6.3.1 Allgemeines

Analog zum Bemessungskonzept für Querkraft basiert die Bemessung der Verbundfuge nach **DIN 1045-1** [1] auf dem Konzept eines Fachwerkmodells mit veränderlicher Druckstrebenneigung. Im Vergleich zum Bemessungskonzept des **Eurocode 2** [5] oder den Empfehlungen der **fib** [3] zeigen sich deutliche Unterschiede für den Nachweis der Fugentragfähigkeit. Grund hierfür war das Bestreben, bei der Umstellung der Normenkonzepte von DIN 1045(88) auf DIN 1045-1 alle Querkraftnachweise innerhalb dieser Norm auf ein einheitliches Tragmodell zurückzuführen.

Im folgenden wird die Bemessung von Verbundfugen nach DIN 1045-1 erläutert und den Bemessungskonzepten nach Eurocode 2 und fib gegenübergestellt.

6.3.2 Ermittlung der einwirkenden Schubkraft

DIN 1045-1

Der Bemessungswert der über die Fuge zu übertragenden Schubkraft wird je Längeneinheit nach Gl(83) ermittelt.

$$v_{Ed} = \frac{F_{cdj}}{F_{cd}} \cdot \frac{V_{Ed}}{z}$$

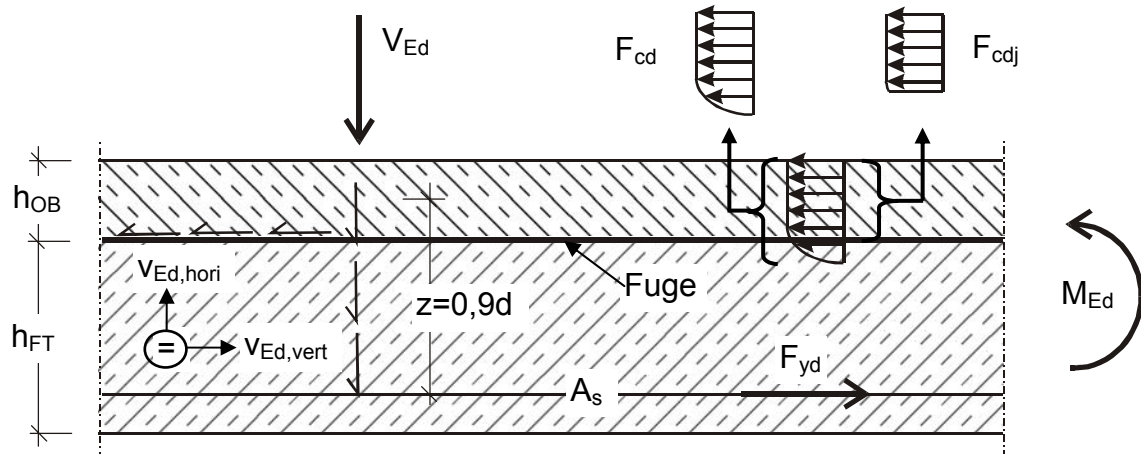
mit V_{Ed} = Bemessungswert der einwirkenden Querkraft

z = innerer Hebelarm der Biegebemessung, $z = 0,9 \cdot d$

F_{cdj} = Bemessungswert des über die Fuge zu übertragenden Längskraftanteils

F_{cd} = Bemessungswert des Gurtlängskraft infolge Biegung im betrachteten Querschnitt

Die einwirkende Querkraft V_{Ed} wird in eine Schubkraft umgerechnet, die über die Höhe des inneren Hebelarmes wirkt. Betrachtet man einen 1m breiten Bauteilausschnitt, so kann die ermittelte Schubkraft v_{Ed} je 1,0m als Schubspannung gedeutet werden.

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1**Bild 6-6: einwirkende Fugenschubkraft**

Eine Abminderung der wirkenden Schubkraft in der Fuge durch das Verhältnis F_{cdj} / F_{cd} wird nur maßgebend, wenn sich die Fuge in der Biegedruckzone des Gesamtquerschnitts befindet. F_{cdj} entspricht dem Anteil von F_{cd} , der über die Fuge übertragen werden muss (Bild 6-6).

Zu beachten ist hierbei der Ansatz des inneren Hebelarms von $z = 0,9 \cdot d$. Die Einschränkung für den inneren Hebelarm nach [1], Abschn. 10.3.4(2): $z = d - 2 c_{nom}$ greift hier nicht, da eine Umschnürung der Betondruckzone für die Wirksamkeit der Druckstrebe für die Bemessung der Verbundfuge nicht erforderlich ist.

EC2 und fib

Die einwirkende Schubkraft in der Verbundfuge wird nach den europäischen Nachweiskonzepten vergleichbar zu DIN 1045-1 ermittelt. Die einwirkende Querkraft wird durch den inneren Hebelarm z geteilt, eine Abminderung der resultierenden Fugenschubkraft durch die Ermittlung der anteiligen Druckkraft ist möglich. Sowohl in EC2 als auch nach fib wird die sich ergebende Schubkraft je Längeneinheit durch die Bauteilbreite geteilt, wodurch die Nachweisführung als Vergleich von einwirkender zu aufnehmbarer Schubspannung durchgeführt wird.

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1**6.3.3 Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft in Fugen ohne Verbundbewehrung****DIN 1045-1**

Im Gegensatz zu DIN 1045(88) ermöglicht DIN 1045-1 einen Nachweis der Fuge ohne Verbundbewehrung, solange der Betontraganteil $v_{Rd,ct}$ nicht überschritten wird.

In DIN 1045-1 [1] wird der Betontraganteil $v_{Rd,ct}$ nach Gl.(84) ermittelt:

$$v_{Rd,ct} = \left[0,042 \cdot \beta_{ct} \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} - \mu \cdot \sigma_{Nd} \right] \cdot b$$

Die Tragfähigkeit der unbewehrten Fuge setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

$$\text{Adhäsionsanteil:} \quad 0,042 \cdot \beta_{ct} \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b$$

$$\text{Reibungsanteil:} \quad - \mu \cdot \sigma_{Nd} \cdot b$$

Der so genannte Adhäsionsanteil oder Haftverbund ist nach Heft 525 [2] hergeleitet aus Gl(70) mit einem Längsbewehrungsgrad $\rho_l=1\%$. Dies ist jedoch nur bedingt nachvollziehbar:

$$\text{Gl (70):} \quad 0,1 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100\rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b \cdot d$$

mit $\rho_l = 0,01$

$$\Leftrightarrow \quad 0,1 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot b \cdot d$$

mit $\kappa = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$

$$\Leftrightarrow \quad 0,1 \cdot (1 + \sqrt{200/d}) \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b \cdot d$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{0,1}{\beta_{ct}} \cdot \beta_{ct} \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b \cdot (d + \sqrt{200d})$$

mit $\beta_{ct} = 2,4$ (monolithisch)

$$\Leftrightarrow \quad 0,042 \cdot \beta_{ct} \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b \cdot (d + \sqrt{200d})$$

$$\text{Gl (84):} \quad 0,042 \cdot \beta_{ct} \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b [z]$$

Es fällt auf, dass in der Herleitung von Gl(84) aus Gl(70) die Berücksichtigung des Maßstabeffektes vernachlässigt wurde. Dadurch ergibt sich ein Betontraganteil bei der Bemessung der Verbundfuge, der im Vergleich zur Querkraftbemessung in etwa halbiert ist. In [7] weisen Hegger und Görtz darauf hin, dass der beschriebene Bemessungsansatz die Ergebnisse der bisherigen Versuche zu dieser Problematik nicht befriedigend widerspiegelt, auch weil zu hohe Sicherheiten ausgewiesen werden.

Der Reibungsanteil der Fugentragfähigkeit wird nach dem Reibgesetz als Produkt aus Reibbeiwert μ und der Normalspannung σ_{Nd} senkrecht zur Reibkraft ermittelt.

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1**EC2 und fib**

Nach EC2 [5] wird die übertragbare Schubspannung ohne Verbundbewehrung wie folgt ermittelt:

$$V_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n$$

Der Adhäsionsanteil ist auch hier ein Produkt aus Adhäsionsbeiwert und einem Kennwert der Zugfestigkeit des Betons. Der Reibungsanteil folgt der Gesetzmäßigkeit des Reibgesetzes.

Nach den Empfehlungen zu Model Code 90 der fib [3], Abschn. 6.4.7 beträgt die Fugentragfähigkeit ohne Verbundbewehrung:

$$\tau_{fRd} = \beta f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_{cd}$$

Die drei Normenwerke basieren demnach auf dem selben mechanischen Hintergrund. Dennoch ergeben sich bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Adhäsions- und Reibungsbeiwerte dieser Regelwerke große Unterschiede in der Tragfähigkeit, wie nachfolgend dargestellt:

	DIN 1045-1			EC2				fib			
	$f_{ck}^{1/3} = 3,107 \text{ N/mm}^2$			$f_{ctd} = 1,33 \text{ N/mm}^2$				$f_{ctd} = 1,19 \text{ N/mm}^2$			
	β_{ct}	μ	$V_{Rd,ct}$	c	μ	V_{Rdi}	% von DIN	β	μ	τ_{fRd}	% von DIN
	[-]	[-]	[MN/m ²]	[-]	[-]	[MN/m ²]	[%]	[-]	[-]	[MN/m ²]	[%]
verzahnt	2,4	1	0,313	0,5	0,9	0,667	212,9	0,4	0,9	0,477	152,3
rau	2	0,7	0,261	0,45	0,7	0,600	229,9	0,4	0,9	0,477	182,8
glatt	1,4	0,6	0,183	0,35	0,6	0,467	255,4	0,2	0,6	0,239	130,6
sehr glatt	0	0,5	0,000	0,25	0,5	0,333	∞	0,1	0,6	0,119	∞

Tabelle 6-1: Tragfähigkeiten unbewehrter Fugen nach DIN 1045-1, EC2 und fib ohne Normalspannung auf Fuge ($\sigma_{Nd} = 0 \text{ N/mm}^2$); C30/37

	DIN 1045-1			EC2				fib			
	$f_{ck}^{1/3} = 3,107 \text{ N/mm}^2$			$f_{ctd} = 1,33 \text{ N/mm}^2$				$f_{ctd} = 1,19 \text{ N/mm}^2$			
	β_{ct}	μ	$V_{Rd,ct}$	c	μ	V_{Rdi}	% von DIN	β	μ	τ_{fRd}	% von DIN
	[-]	[-]	[MN/m ²]	[-]	[-]	[MN/m ²]	[%]	[-]	[-]	[MN/m ²]	[%]
verzahnt	2,4	1	2,313	0,5	0,9	2,467	106,6	0,4	0,9	2,277	98,4
rau	2	0,7	1,661	0,45	0,7	2,000	120,4	0,4	0,9	2,277	137,1
glatt	1,4	0,6	1,383	0,35	0,6	1,667	120,5	0,2	0,6	1,439	104,0
sehr glatt	0	0,5	1,000	0,25	0,5	1,333	133,3	0,1	0,6	1,319	131,9

Tabelle 6-2: Tragfähigkeiten unbewehrter Fugen nach DIN 1045-1, EC2 und fib mit Normalspannung auf Fuge ($\sigma_{Nd} = -2,0 \text{ N/mm}^2$); C30/37

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Tragfähigkeit der Fuge ohne Verbundbewehrung in DIN 1045-1 im Vergleich zu den betrachteten Normenwerken konservativ angesetzt wird. Insbesondere weist DIN 1045-1 im Gegensatz zu EC2 und fib „sehr

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

glatten“ Fugen keine Tragfähigkeit zu, wenn keine Druckspannung auf der Fuge wirkt. Da ein Haftverbund jedoch bei jeder Oberflächenbeschaffenheit vorliegt, scheint dieser Ansatz sehr konservativ. Der Adhäsionsanteil stellt den Nulldurchgang $\tau_{Rd,0}$ einer Geraden dar, die das Verhältnis aus aufgebrachtener Normalspannung σ_{Nd} zur aufnehmbaren Schubspannung τ_{Rd} abbildet mit

$$\tau_{Rd} = \tau_{Rd,0} + \mu \cdot \sigma_{Nd}$$

Diese Herleitung ist bspw. in Heft 372 des DAfStb von Daschner [11] für die Auswertung seiner Versuche zu finden.

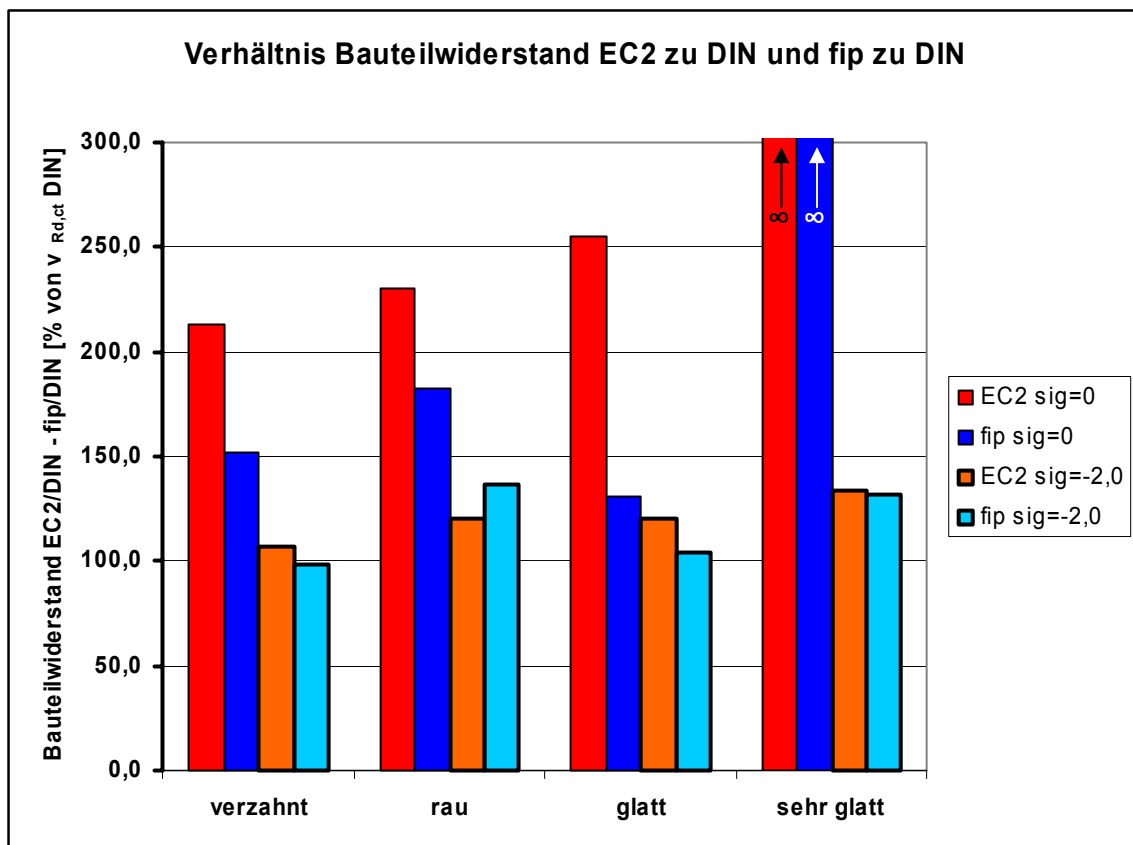


Bild 6-7: Verhältnis der Tragfähigkeit unbewehrter Fugen EC2 zu DIN 1045-1 sowie fib zu DIN 1045-1 für C30/37

6.3.4 Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft in Fugen mit Verbundbewehrung

Ist die einwirkende Schubkraft in der Fuge größer als der Betontraganteil $v_{Rd,ct}$, so ist eine Verbundbewehrung anzuordnen. Die Ermittlung der erforderlichen Verbundbewehrung nach DIN 1045-1 unterscheidet sich grundsätzlich von EC2 bzw. fib. Während die europäischen Regelwerke den Betontraganteil bei vorhandener Bewehrung als immer noch vollständig vorhanden ansehen und die durch die Verbundbewehrung aufnehmbare Schubkraft hinzuaddiert wird, geht DIN 1045-1 davon aus, dass die Schubkraft bei vorhandener Bewehrung analog zur Querkraftbemessung durch ein Fachwerk abgetragen wird. Der Adhäsionsanteil des Betontraganteils wird dann nicht mehr berücksichtigt.

Bemessung der Verbundfuge nach DIN 1045-1 [1]

Die erforderliche Bewehrungsmenge wird nach DIN 1045-1 analog zur Querkraftbemessung nach dem Prinzip der veränderlichen Druckstrebenneigung ermittelt. Innerhalb der nach Gl.(86) ermittelten Grenzen kann die Neigung der Druckstrebe frei gewählt werden. Daraus wird nach Gl.(85) die erforderliche Bewehrungsmenge errechnet. Nach Heft 525 [2] ist die Tragfähigkeit der Druckstrebe nach Abs. 10.3.4 mit der aus Querkraft- und Verbundbemessung maßgebenden Neigung zu überprüfen.

Die Grenzen des wählbaren Druckstrebenwinkels werden nach [1], Gl.(86) festgelegt.

$$1,0 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2\mu - 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{v_{Rd,ct}}{v_{Ed}}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \leq 3,0 \text{ für Normalbeton} \\ \leq 2,0 \text{ für Leichtbeton} \end{array} \right.$$

Die Ähnlichkeit der obigen Gleichung zu Gl.(73) nach DIN 1045-1 für die Ermittlung der Druckstrebenneigung bei der Querkraftbemessung, fällt direkt auf. Der mechanische Hintergrund ist jedoch nicht nachvollziehbar. Es liegt aufgrund der unklaren Ermittlung der Rissreibungskraft und des Zustandekommens der Hauptspannungsneigung unter Berücksichtigung von μ nahe, dass die angegebene Gleichung zur Ermittlung der möglichen Druckstrebenneigung vielmehr auf empirischen Vergleichen beruht. Dieser Verdacht wird auch in [7] bestätigt, wo versucht wird, ein Bemessungskonzept für die Verbundfuge herzuleiten. Hegger und Görtz vergleichen darin Versuchsergebnisse mit verschiedenen Ansätzen der Verbundbemessung, welchen das Modell der Fachwerkwirkung mit Rissreibung zugrunde liegt. Keiner der untersuchten Ansätze bildete die Versuchsergebnisse zufrieden stellend ab.

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

Die statisch erforderliche Verbundbewehrung wird nach [1], Gl.(85) ermittelt:

$$v_{Rd,sy} = a_s \cdot f_{yd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha - \mu \cdot \sigma_{Nd} \cdot b$$

Der Widerstand der Fuge wird ausschließlich über die Verbundbewehrung a_s und die auf die Fuge wirkenden Druckspannung σ_{Nd} bestimmt. Der Adhäsionsanteil wird im Gegensatz zu EC2 und fib bei bewehrten Fugen nicht berücksichtigt. Der Traganteil der Verbundbewehrung $a_s \cdot f_{yd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$ entspricht der Tragfähigkeit der Querkraftbewehrung nach Abschn. 10.3.4, Gl (77), wobei die verändert ermittelte Druckstrebenneigung $\cot \theta$ zu berücksichtigen ist.

Bemessung der Verbundfuge nach EC2 [5] bzw. fib [3]

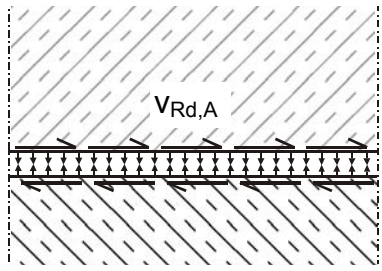
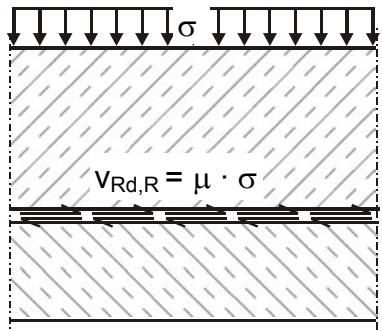
Eurocode 2 geht wie die Empfehlungen der fib bei der Bemessung von Verbundfugen von einem grundlegend unterschiedlichen Konzept als DIN 1045-1 aus. Die Tragfähigkeit der Fuge setzt sich demnach aus einem Betontraganteil und einem Traganteil der Bewehrung zusammen. Die einzelnen Traganteile lassen sich mechanisch anschaulich erklären (Tabelle 6-3).

Die Tragfähigkeit einer Fuge mit Verbundbewehrung wird wie folgt ermittelt:

EC2: $v_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)$

fib: $\tau_{fRd} = \beta \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_{cd} + (\mu \cdot \sin \alpha_j + \cos \alpha_j) \cdot \rho \cdot f_{yd}$

Die einzelnen Traganteile können nachfolgender Tabelle entnommen werden:

Traganteil		EC2	fib
Adhäsion oder Haftverbund		$c \cdot f_{ctd}$	$\beta \cdot f_{ctd}$
Reibung infolge Normalspannung aus äußeren Kräften		$\mu \cdot \sigma_n$	$\mu \cdot \sigma_{cd}$

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

<p>Bewehrung 1: Reibung aus Vertikalanteil der Bewehrungskraft</p>		$\mu \cdot \rho \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha$	$\mu \cdot \rho \cdot f_{yd} \cdot \sin \alpha_j$
<p>Bewehrung 2: Horizontalanteil der Bewehrungskraft</p>		$\rho \cdot f_{yd} \cdot \cos \alpha$	$\rho \cdot f_{yd} \cdot \cos \alpha_j$

Tabelle 6-3: Anteile der Fugentragfähigkeit nach EC2 und fib

Bei der Bemessung wird davon ausgegangen, dass durch eine Relativverschiebung in der Fuge die Bewehrung aktiviert wird. Diese Relativverschiebung bleibt jedoch klein; der „Adhäsionsanteil“ der Fugentragfähigkeit bleibt erhalten.

Sowohl EC2 [5] als auch fib [3] begrenzt die Tragfähigkeit der Fuge in Abhängigkeit des Bemessungswertes der Betondruckfestigkeit f_{cd} :

EC2: $v_{Rdi,max} = 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$ mit $v = 0,6(1 - f_{ck} / 250)$

fib: $\tau_{fRd,max} = 0,25 \cdot f_{1cd}$

Dadurch ergeben sich maximale Fugentragfähigkeiten von

	f_{cd} bzw. f_{1cd}	C20/25	C30/37	C45/55
EC2	$0,85 \cdot f_{ck} / 1,5$	3,128	4,488	6,273
fib	$0,85 \cdot f_{ck} / 1,5$	2,833	4,250	6,375

Tabelle 6-4: Maximaltragfähigkeit der Fuge nach EC2 bzw. fib in [MN/m²]

6.3.5 Einschätzung der Konzepte für die Bemessung von vorgespannten Elementdecken

Das Bemessungskonzept nach DIN 1045-1 kann aus verschiedenen Gründen für den Nachweis der Verbundfuge bei vorgespannten Elementdecken nicht empfohlen werden. Die Überführung des Fachwerkmodells mit Rissreibung auf die Bemessung einer Verbundfuge ist mechanisch nicht nachvollziehbar. Diese Problematik wird zur Zeit im Normenausschuss Bau diskutiert. Zudem werden nach dem vorliegenden Konzept bei vorhandenen Längsdruckspannungen sehr hohe Tragfähigkeiten für die Verbundbewehrung ausgewiesen, die den bisherigen Erfahrungshorizont teilweise weit verlassen. In Bild 6-8 ist die erforderliche Verbundbewehrung für verschiedene Einwirkungen für DIN 1045-1, DIN 1045(88), EC2 und fib bei einer Längsspannung $\sigma_{cd} = -3,0 \text{ N/mm}^2$ gegenübergestellt. Insbesondere für hohe Einwirkungen weist DIN 1045-1 eine sehr geringe erforderliche Verbundbewehrung aus. Dieses Sicherheitsdefizit wurde in den Zulassungen für Gitterträger behoben, indem bei Druckspannungen σ_{cd} stets zu Null zu setzen ist.

Die im EC2 [5] bzw. fib [3] angegebenen Bemessungskonzepte für Verbundfugen berücksichtigen ausschließlich Bauteilwiderstände, die in Richtung der einwirkenden Schubkraft wirken. Im Gegensatz zum Bemessungskonzept von DIN 1045-1 ist der mechanische Hintergrund der Bemessung nachvollziehbar. Das Konzept ist unabhängig von Längsspannungen im Bauteil und scheint daher eine geeignete Grundlage für die Bemessung von Verbundfugen in vorgespannten Elementdecken. Da zu erwarten ist, dass dieses Konzept zukünftig auch in DIN 1045-1 übernommen wird, ist eine Bemessung auf Grundlage dieses Nachweiskonzepts sinnvoll.

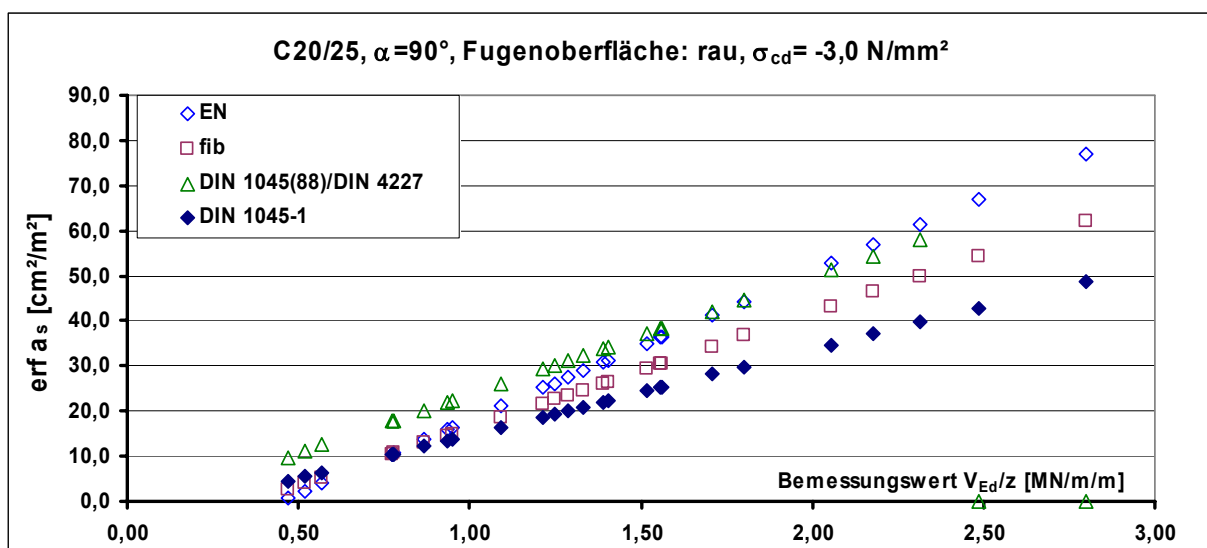


Bild 6-8: Vergleich der erforderlichen Verbundbewehrung nach DIN 1045-1, DIN 1045(88) mit DIN 4227, EC2 und fib

6.3.6 Vorschlag eines Bemessungskonzeptes für Verbundfugen in vorgespannten Elementdecken

Auf Grundlage der bisherigen Ausführungen wird folgendes Konzept für die Bemessung von Verbundfugen bei vorgespannten Elementdecken vorgeschlagen:

Ermittlung der einwirkenden Schubkraft v_{Ed}

Der Bemessungswert der einwirkenden Schubkraft sollte nach DIN 1045-1, Gl.(83) ermittelt werden:

$$v_{Ed} = \frac{F_{cdj}}{F_{cd}} \cdot \frac{V_{Ed}}{z}$$

F_{cd}, F_{cdj} nach DIN 1045-1

V_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Querkraft

$z = 0,9 \cdot d$

Ermittlung der aufnehmbaren Schubkraft v_{Rd}

Der Bemessung der Verbundfuge wird das Konzept des Eurocode bzw. fib zugrunde gelegt, wobei der Betontraganteil nach DIN 1045-1, Gl.(84) ermittelt wird. Die Auswertung von Versuchen ohne Querkraft- bzw. Verbundbewehrung im Bereich der rauhen und glatten Fuge in [6] zeigen, dass dieser Ansatz weit auf der sicheren Seite liegt. Den Empfehlungen in [7] folgend, wird die Tragfähigkeit von unbewehrten Fugen dennoch nach dieser Gleichung ermittelt. Aufgeführte Gründe sind bspw. die hohe Anfälligkeit der Fuge auf Verschmutzungen vor dem Betonieren oder der mangelnde Erfahrungsbereich für unbewehrte Verbundfugen (nach DIN 1045(88) ist Verbundbewehrung grundsätzlich erforderlich). Somit wird folgendes, auf der sicheren Seite liegendes Bemessungskonzept empfohlen:

$$v_{Rd} = \left[0,042 \cdot \eta_1 \cdot \beta_{ct} \cdot f_{ck}^{1/3} - \mu \cdot \sigma_{Nd} + \rho_w \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha) \right] \cdot b$$

mit η_1 Beiwert zur Berücksichtigung von Leichtbeton nach DIN 1045-1

$\beta_{ct} = 2,0$ für raue Fuge

Beiwert zur Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit nach DIN 1045-1, Tabelle 13

f_{ck} Charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit in $[MN/m^2]$ des Ortbetons oder des Fertigteils (der kleinere Wert ist maßgebend)

$\mu = 0,7$ für raue Fuge

Beiwert zur Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit nach DIN 1045-1, Tabelle 13

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

- σ_{Nd} Normalspannung senkrecht zur Fuge in $[\text{MN}/\text{m}^2]$ ($\sigma_{Nd} < 0$ als Betondruckspannung)
 $= n_{Ed} / b < -0,6 f_{cd}$ mit n_{Ed} als Bemessungswert der zusammen mit V_{Ed} wirkenden Normalkraft senkrecht zur Fuge
- ρ_w Geometrischer Bewehrungsgrad der die Fuge kreuzenden Bewehrung
- f_{yd} Bemessungswert der Streckgrenze der Verbundbewehrung in $[\text{MN}/\text{m}^2]$
- α Winkel der die Fuge kreuzenden Bewehrung mit $45^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$
- b Bauteilbreite in $[\text{m}]$

Die Maximaltragfähigkeit der Verbundfuge wird auf dem Niveau τ_{02} nach DIN 1045(88) festgesetzt. Dies kann durch den einfachen Nachweis

$$v_{Ed} \leq 0,2 \cdot f_{cd}$$

gewährleistet werden.

Es ergibt sich hier für eine raue Fuge ein maximales Bemessungsniveau, welches für niedrige Betonfestigkeitsklassen unter bzw. auf dem Niveau von DIN 1045(88) liegt. Für höhere Festigkeitsklassen übersteigt die Maximaltragfähigkeit das bisherige Niveau nach DIN 1045(88), was vor dem Hintergrund der restriktiv behandelten Schubtragfähigkeit höherfester Betone nach bisherigem Normenkonzept gerechtfertigt erscheint.

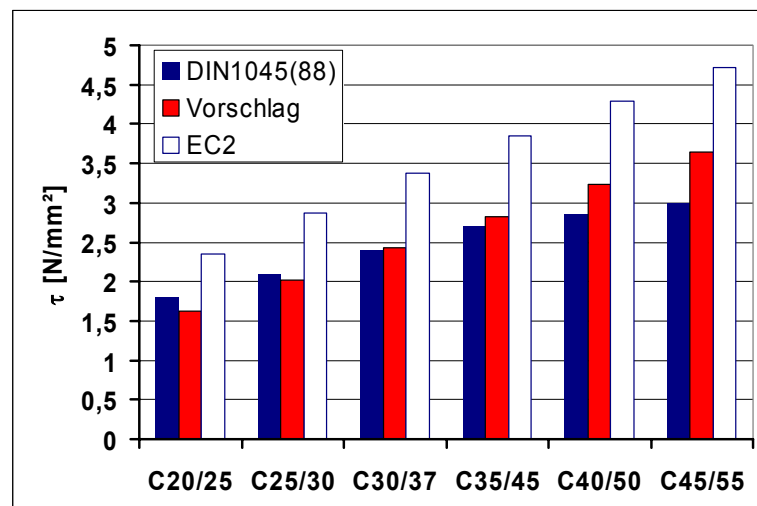


Bild 6-9: Vergleich der Maximaltragfähigkeit von EC2, DIN 1045(88) und Bemessungsvorschlag

Zusätzliche Anforderungen

Um die zusätzliche Beanspruchung der Fuge infolge zeitabhängigen Spannungsumlagerungen aufzunehmen, ist im Bauteil eine Verbundbewehrung von $2,0 \text{ cm}^2/\text{m}$ im Auflagerbereich auf einer Tiefe von 50 cm anzuordnen. Diese Bewehrung sollte stets der statisch erforderlichen Bewehrung hinzuaddiert werden. Wenn rechnerisch keine Verbundbewehrung erforderlich ist, so ist die oben genannte Bewehrung als Mindestbewehrung anzuordnen.

Ist im Bereich des Endauflagers der Platte keine Wandauflast vorhanden, dann sollte eine Mindestbewehrung von $6,0 \text{ cm}^2/\text{m}$ auf einer Breite von 75cm angeordnet werden (DIN 1045-1 Abs. 13.4.3(5)). Dieser Bewehrungsgrad ist erforderlich, um die Verbundsicherung im Brandfall zu gewährleisten (siehe Heft 525 des DAfStb [2] zu Abs 13.4.3(5)).

Die Oberfläche der Verbundfuge sollte analog zu den bisherigen Zulassungen von vorgespannten Elementdecken den Anforderungen an eine „raue“ Fuge entsprechend Heft 525 des DAfStb [2] genügen.

6.4 Vergleich des vorgeschlagenen Bemessungskonzepts mit DIN 1045-1, EC2, fib und DIN 1045(88)

Zur Bewertung der vorgeschlagenen Bemessungsansätze für Querkraft und Verbundfuge von vorgespannten Elementdecken wurde eine Datenbank erstellt. In diese Datenbank wurden die Betonfestigkeitsklasse, die Plattendicke, der Winkel der Querkraft- bzw. Verbundbewehrung, die Fugenrauigkeit und die Höhe der Einwirkung variiert. Die Normalspannung σ_{cd} wird zu Null gesetzt, weshalb die Nachweisführung nach DIN 4227 entfällt. Die ausgewiesene Bewehrung in den Bildern 6-10 bis 6-13 stellt die im Bauteil erforderliche Verbundbewehrung dar. Das Vorgehen und die Berechnungsgrundlagen für die Erstellung der Diagramme sind in Anhang C erläutert.

Wie aus den Bildern 6-10 bis 6-13 zu erkennen ist, liegt das vorgeschlagene Bemessungskonzept für Verbundfugen im Vergleich zu EC2 bzw. fib auf der sicheren Seite. Dies liegt an den niedrigen Betontraganteil $v_{Rd,ct}$ nach DIN 1045-1 bzw. nach Vorschlag im Vergleich zu EC2 bzw. fib. Der Vergleich zum Bemessungsniveau nach DIN 1045(88) geht aus den Bildern 6-10 bis 6-13 hervor. Hierbei soll der Vergleich für verzahnte und raue Fugen aufgezeigt werden. Die Bemessung von glatten Fugen, welche durch die Zulassung nicht abgedeckt sind, wird informativ ergänzt. Da die Fugenrauigkeit bei der Bemessung nach DIN 1045(88) keine Auswirkung auf die erforderliche Verbundbewehrung besitzt, ist bei verzahnten Fugen die Bemessung nach DIN 1045(88) sehr konservativ. Für vorgespannte Elementdecken ist eine raue Fuge vorgeschrieben. Der Vergleich des Bemessungsvorschlags mit DIN 1045(88) zeigt, dass sich die erforderliche Verbundbewehrung beider Konzepte je nach Betonfestigkeitsklasse nur geringfügig unterscheiden. Es ist zu beachten, dass die erforderliche Verbundbewehrung nach Vorschlag in den Diagrammen um die konstruktive Mindestbewehrung von $2 \text{ cm}^2/\text{m}$ zu erhöhen ist.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass der hier angegebenen Bemessungsvorschlag für die Verbundfuge wesentlich konservativer als das Konzept von DIN 1045-1 ist und im Mittel den Erfahrungsbereich der bisherigen Zulassungen gut abdeckt. Ein ausführlicher Vergleich der unterschiedlichen Bemessungskonzepte ist Anhang C zu entnehmen.

Aufgrund der geringen Änderungen im Bemessungsvorschlag für Querkraft gegenüber DIN 1045-1 sind die Ergebnisse beider Konzepte praktisch gleich. Aufgrund der Berücksichtigung von Zugspannungen aus zeitabhängigen Umlagerungen ergibt sich nach dem Vorschlag eine geringfügig höhere Bewehrungsmenge als nach DIN 1045-1. Ein ausführlicher Vergleich aller Regelwerke mit dem Vorschlag ist ebenfalls in Anhang C enthalten.

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

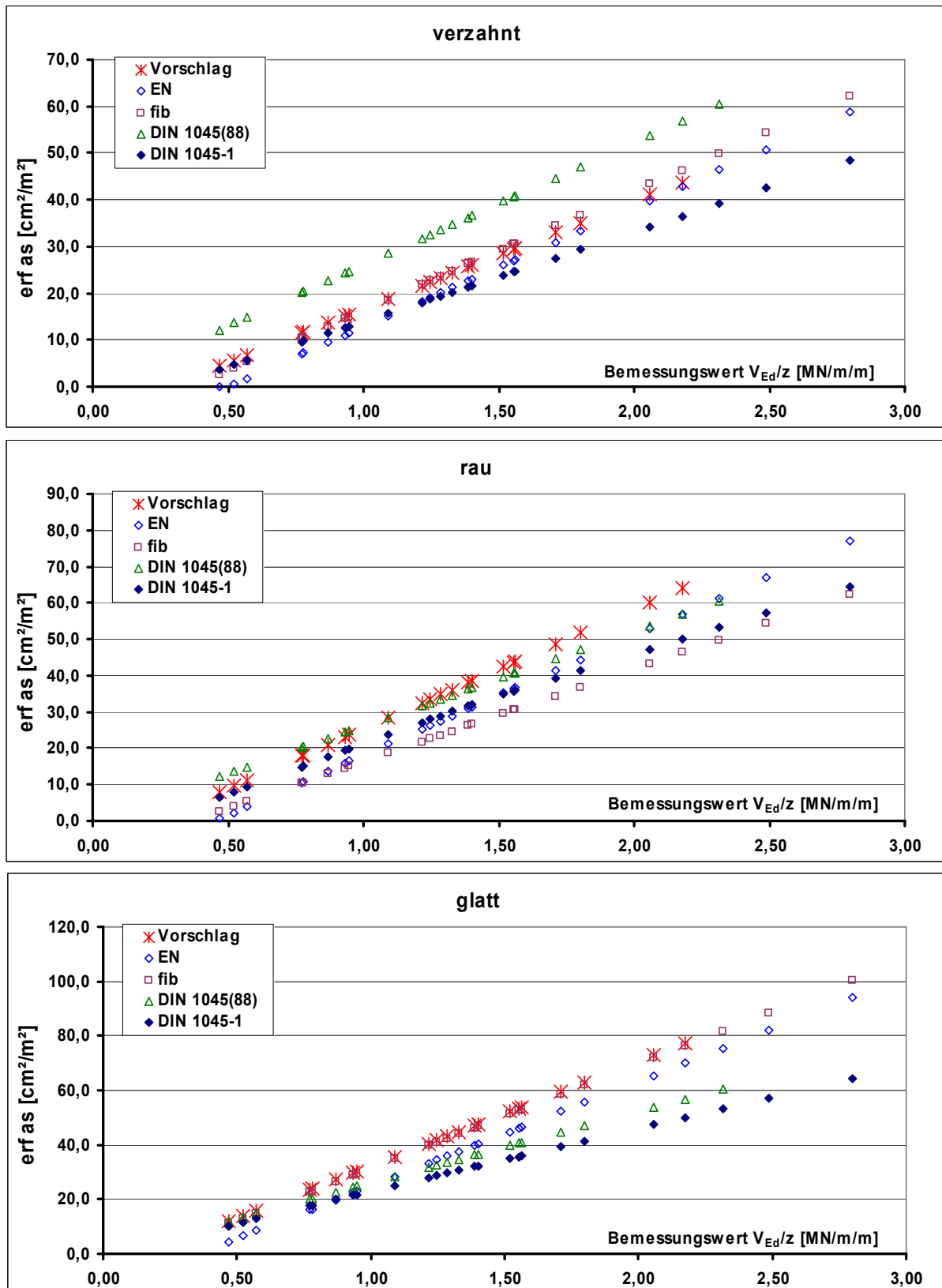


Bild 6-10: Vergleich der erforderlichen Verbundbewehrung für unterschiedliche Bemessungskonzepte für eine 1m breite Fuge, C20/25, $\alpha=90^\circ$, hohe Belastungen, ohne Ansatz der Mindestbewehrung

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

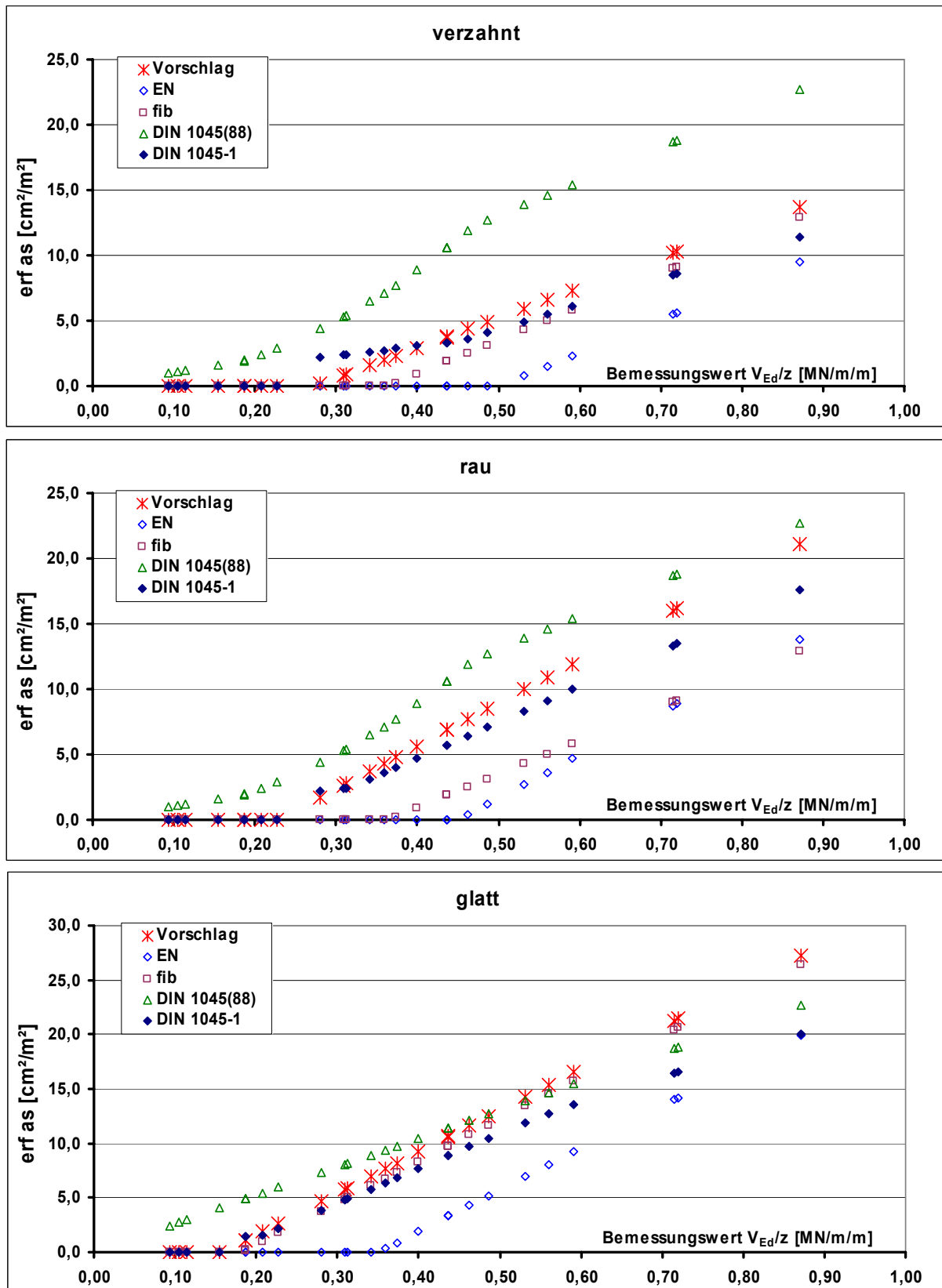


Bild 6-11: Vergleich der erforderlichen Verbundbewehrung für unterschiedliche Bemessungskonzepte für eine 1m breite Fuge, C20/25, $\alpha=90^\circ$, geringe Belastungen, ohne Ansatz der Mindestbewehrung

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

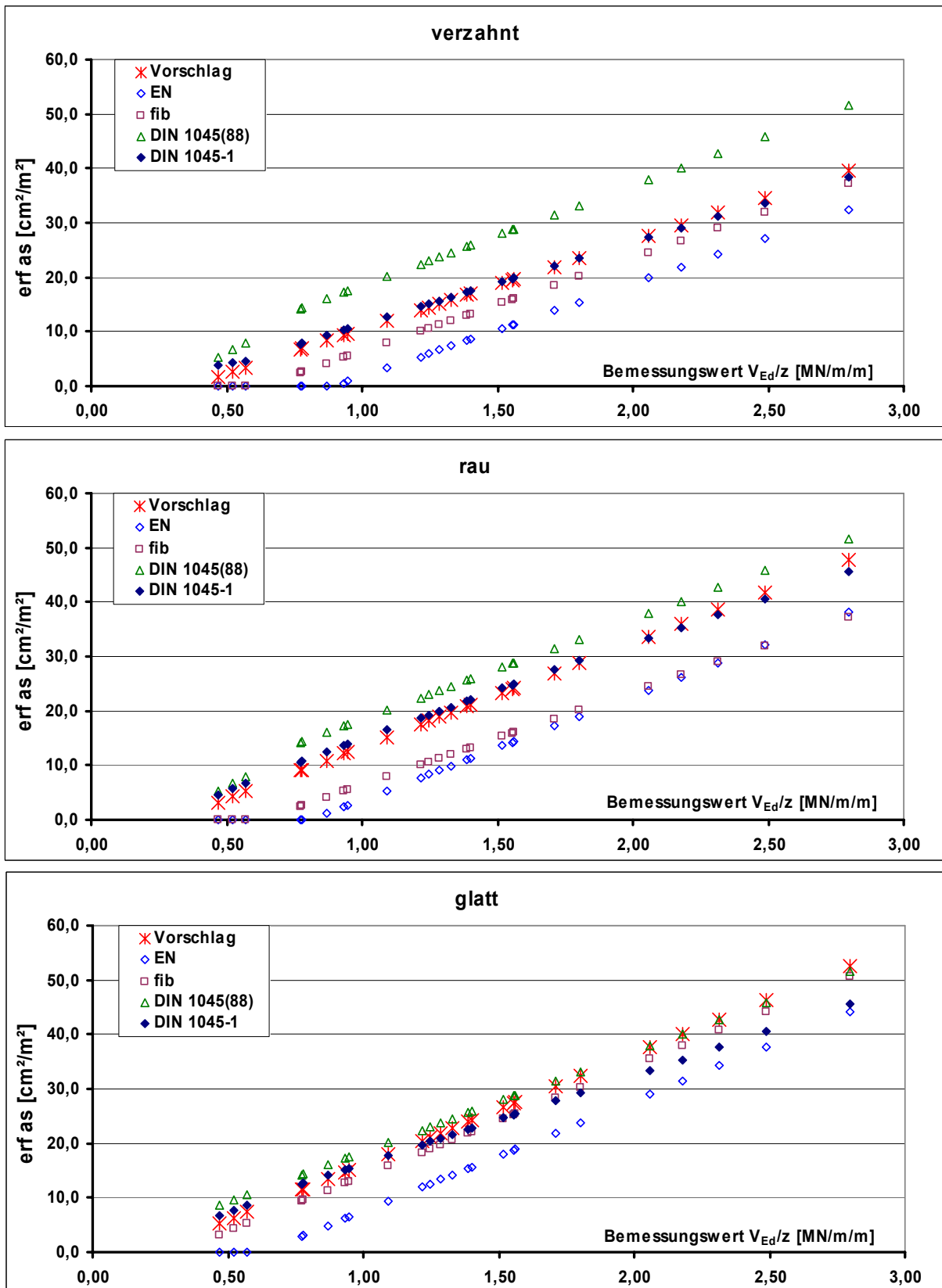


Bild 6-12: Vergleich der erforderlichen Verbundbewehrung für unterschiedliche Bemessungskonzepte für eine 1m breite Fuge, C45/45, $\alpha=45^\circ$, hohe Belastung, ohne Ansatz der Mindestbewehrung

6 Querkraftbemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1

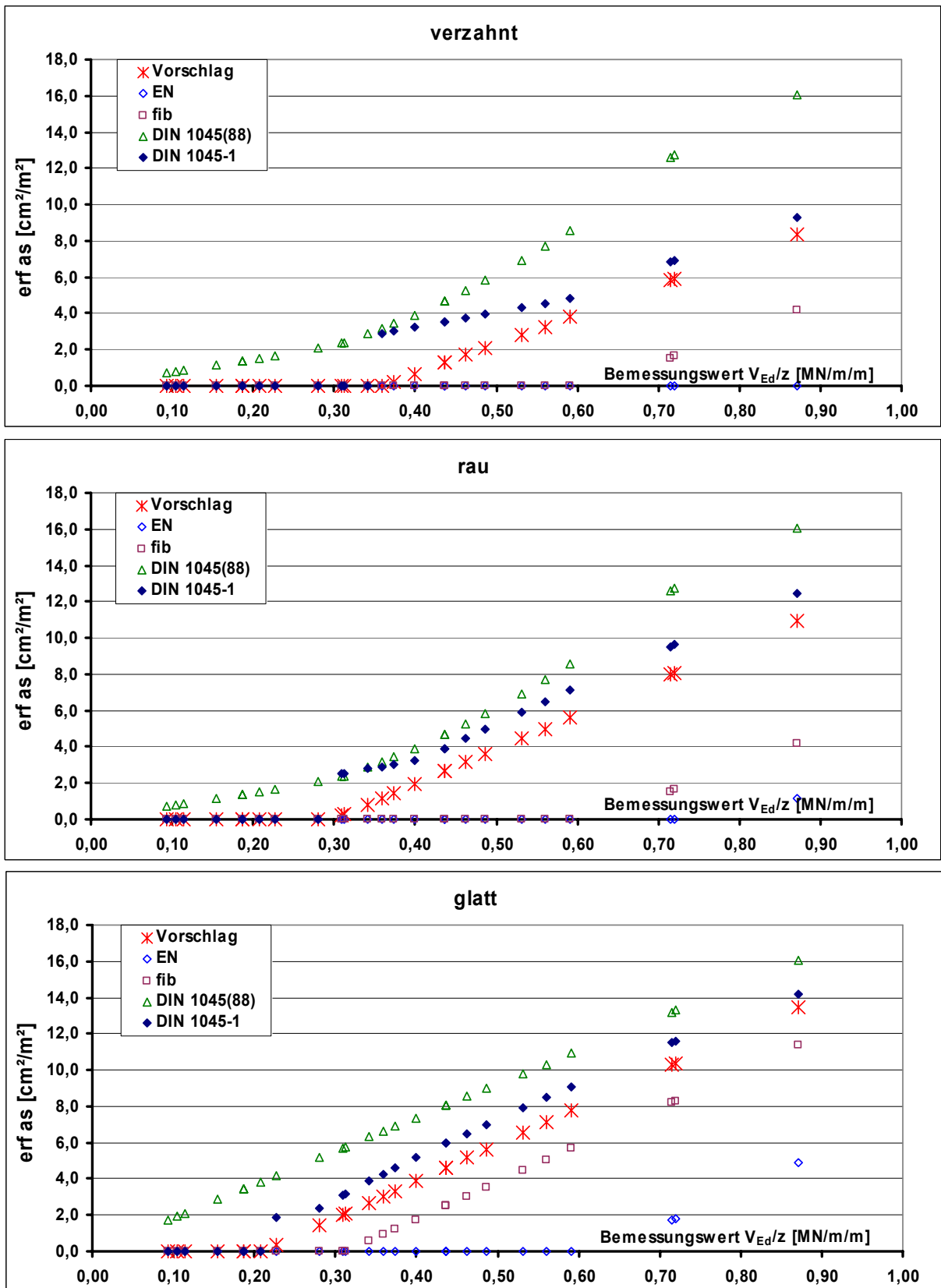


Bild 6-13: Vergleich der erforderlichen Verbundbewehrung für unterschiedliche Bemessungskonzepte für eine 1m breite Fuge, C45/45, $\alpha=45^\circ$, geringe Belastung, ohne Ansatz der Mindestbewehrung

7 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen der Zulassungsumstellung von vorgespannten Elementdecken auf die neue Normengeneration muss die Anwendung der nach dem gegenüber der bisherigen Norm grundlegend geänderten Nachweiskonzept für Querkraft von DIN 1045-1 überprüft werden. Für vorgespannte Elementdecken ergibt sich vor allem Klärungsbedarf hinsichtlich der Anrechenbarkeit der Normalspannung im Querschnitt σ_{cd} sowie der Nachweis Fugentragfähigkeit. Insbesondere sind die Einflüsse aus Spannungsumlagerungen infolge zeitabhängigem Betonverhalten auf die Bemessung zu untersuchen.

Durch dreidimensionale FE-Berechnungen konnten die Spannungsumlagerungen aus zeitabhängigem Betonverhalten quantifiziert werden. Diese Ergebnisse bedingten eine Anpassung der Bemessungskonzepte für Querkraft- und Fugentragfähigkeit. Eine explizite Berechnung der Spannungsumlagerungen ist bei der Anwendung nicht notwendig, da bei der Anpassung der Bemessungsgleichungen von den ungünstigsten Randbedingungen ausgegangen wurde.

Das in Kapitel 6.2.3 erarbeitete Bemessungskonzept für die Querkrafttragfähigkeit folgt weitestgehend DIN 1045-1. Um die Spannungsentwicklung im Querschnitt infolge zeitabhängigen Betonverhaltens einfach zu berücksichtigen, wurde die Ermittlung der zulässigen Druckstrebeneigung nach Gl (73) modifiziert. Alle weiteren Bemessungsgrundlagen von DIN 1045-1 können dann unverändert angewandt werden.

Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass das Nachweiskonzept von DIN 1045-1 für die Bemessung von Verbundfugen den bisherigen Erfahrungshorizont der aufnehmbaren Fugenschubkraft teilweise weit verlässt und in sich nicht stimmig ist. Aus diesem Grund wurde in Kapitel 6.3.6 ein Nachweisverfahren vorgeschlagen, das unter Beibehaltung der (konservativen) Beiwerte für die Oberflächenbeschaffenheit nach DIN 1045-1 dem Bemessungskonzept von EC2 (2003) bzw. FIP Recommendations 1996 "Practical Design of structural concrete" folgt.

Das vorgeschlagene Konzept wurde mit dem bisherigen Erfahrungsbereich nach DIN 1045(88) sowie der oben genannten Regelwerken verglichen. Es zeigte sich, dass für die zugelassene Oberflächenbeschaffenheit „rau“ das bisherige Bemessungsniveau in guter Näherung beibehalten wird. Der Vergleich mit den europäischen Konzepten zeigt eine konservativere Einschätzung der Fugentragfähigkeit durch das vorgeschlagene Bemessungskonzept.

GUTACHTEN G05-24 / G05-25 ANHANG A

Ermittlung der Umlagerungsschnittgrößen aus der Differenz der Auflagerkräfte

Inhaltsverzeichnis

1	VERLAUF DER NORMALKRÄFTE IM ORTBETON	3
1.1	Erläuterungen	3
1.2	Überblick berechnete Systeme	4
1.3	System 0	5
1.4	System 1	6
1.5	System 2	7
1.6	System 3	8
1.7	System 4	9
1.8	System 5	10

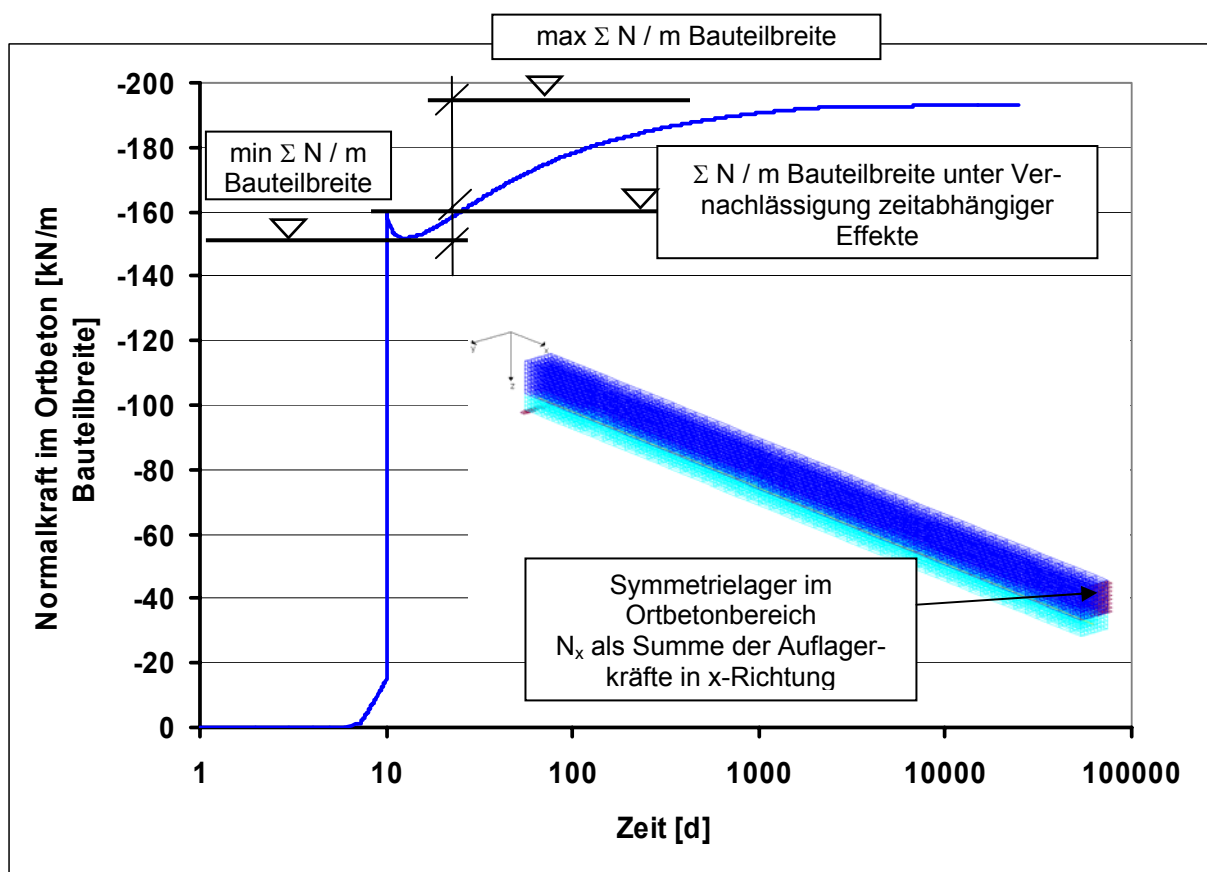
1 VERLAUF DER NORMALKRÄFTE IM ORTBETON

1.1 Erläuterungen

Der Verlauf der infolge zeitabhängiger Effekte erzeugten Normalkräfte im Ortbetonbereich wird den folgenden Diagrammen für die berechneten Systeme dargestellt. Dabei wird die horizontale Auflagerkraft in der Symmetrieachse in Feldmitte im Ortbetonbereich ermittelt und für eine Breite von 1,0m dargestellt.

Die Normalkräfte wachsen zum Zeitpunkt des Aufbringens der äußeren Belastung sprunghaft an. Werden die zeitabhängigen Effekte im Bauteil vernachlässigt, so wird bei der Bemessung dieses Lastniveau ermittelt werden. Der weitere Kurvenverlauf spiegelt die Auswirkungen von Kriechen und Schwinden des Betons auf die Entwicklung der Normalkräfte im Ortbetonbereich bei verschiedenen Randbedingungen wieder.

Angegeben werden die Differenzen zwischen ΣN direkt nach Aufbringen der Last sowie dem maximalen bzw. minimalen Werte der Auflagerkräfte, die sich nach Aufbringen der äußeren Last im System einstellen.

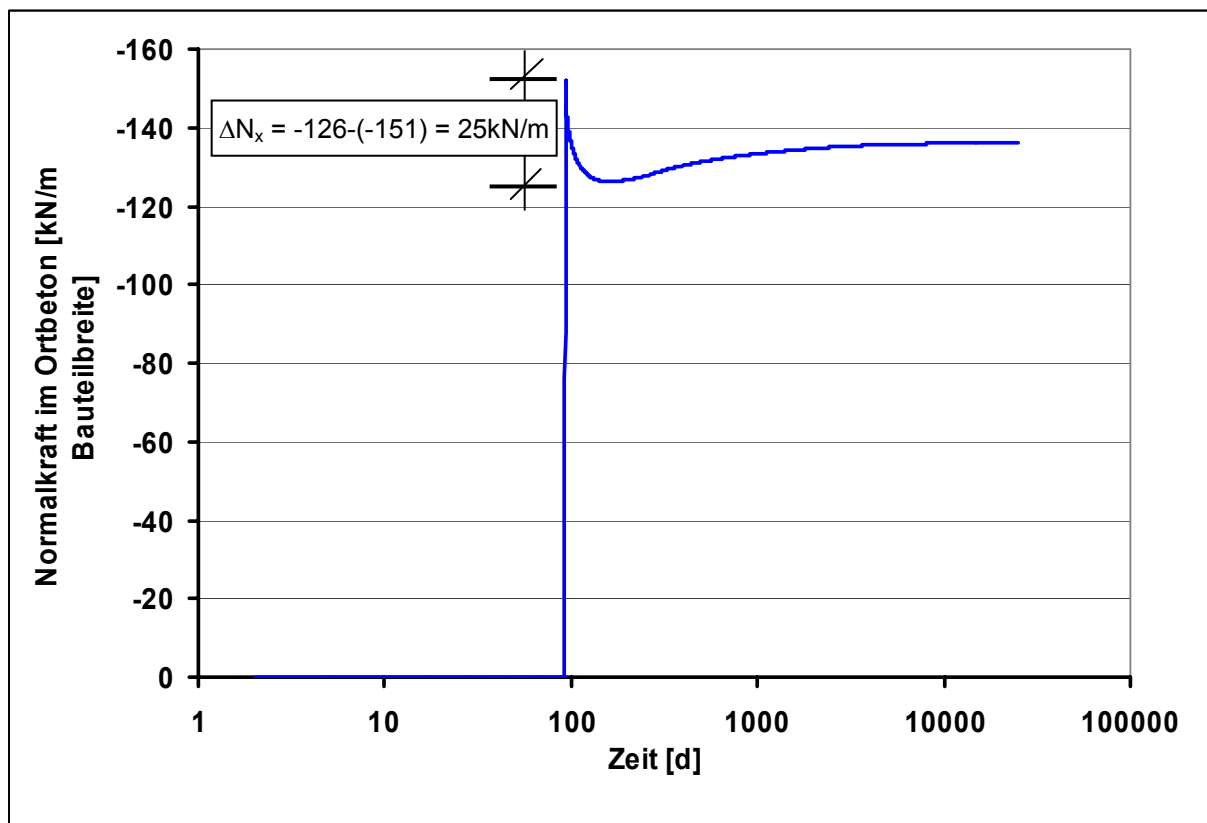


1 Verlauf der Normalkräfte im Ortbeton**1.2 Überblick berechnete Systeme**

System Nr	Fertigteil			Ortbeton			$\Delta g + \psi_2 p$		Länge [m]
	Dicke [cm]	Beton	P_0 [kN/m]	Dicke [cm]	Beton	t [d]	Größe [kN/m ²]	t_1 [d]	
0	5	C45/55	232	10	C20/25	90	1,25	93	5
1	5	C45/55	232	10	C20/25	7	3,75	10	5
2	5	C30/37	232	18	C35/45	7	3,75	10	5
3	12	C60/75	1004	18	C35/45	7	3,75	10	8
4	12	C45/55	416	18	C35/45	90	0,75	93	5
5	12	C60/75	1004	18	C20/25	90	0,75	93	8

1 Verlauf der Normalkräfte im Ortbeton**1.3 System 0**

Dicke des Fertigteils	5 cm
Dicke der Ortbetonschicht	10 cm
Betonfestigkeitsklasse Fertigteil	C45/55
Betonfestigkeitsklasse Ortbeton	C20/25
Vorspannkraft im Fertigteil	$P_0 = 232 \text{ kN/m}$
Alter des Fertigteils beim Aufbringen der Ortbetonschicht	90 d



1 Verlauf der Normalkräfte im Ortbeton**1.4 System 1**

Dicke des Fertigteils 5 cm

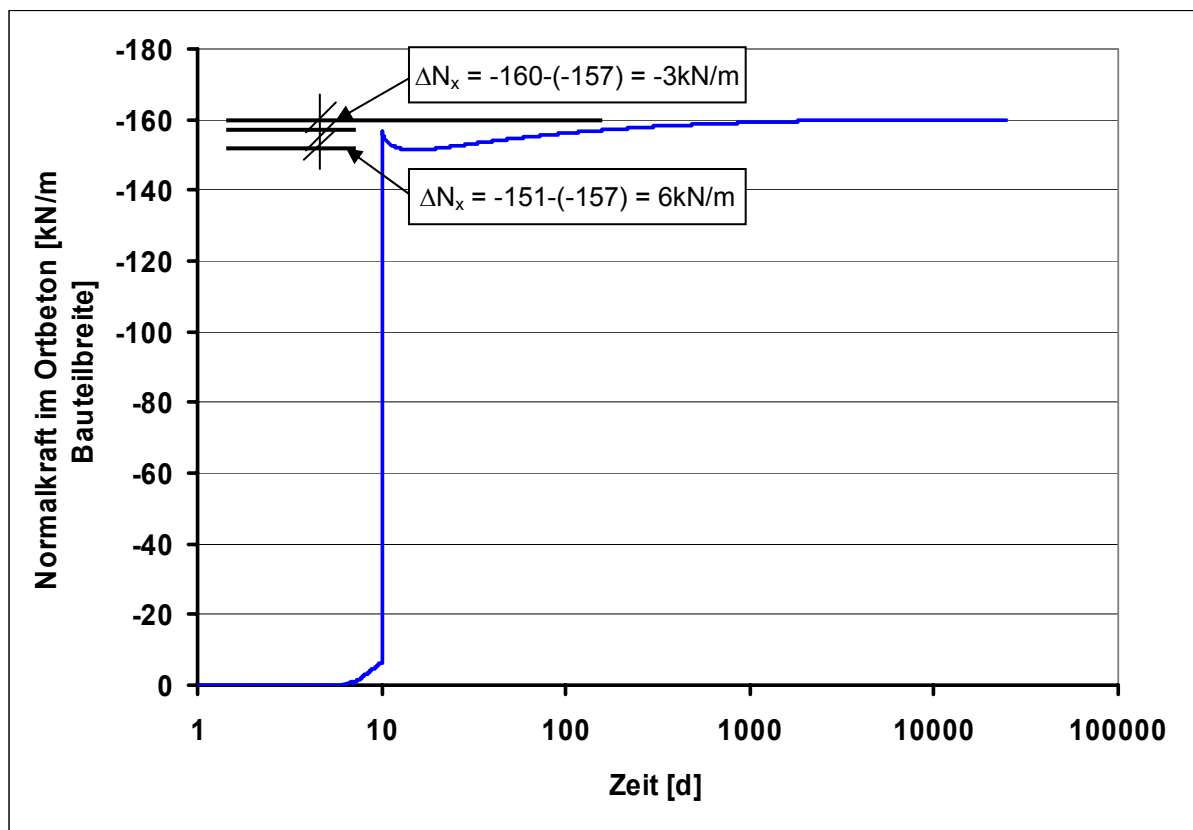
Dicke der Ortbetonschicht 10 cm

Betonfestigkeitsklasse Fertigteil C45/55

Betonfestigkeitsklasse Ortbeton C20/25

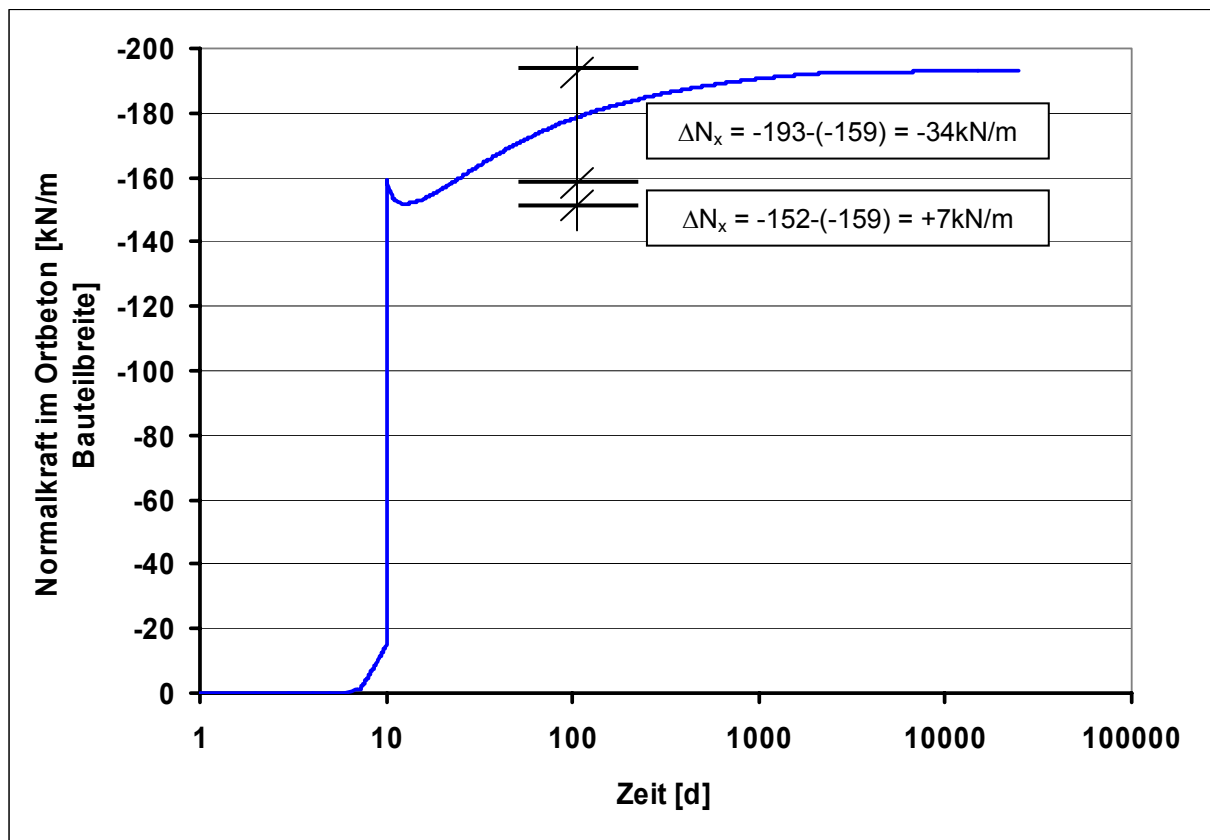
Vorspannkraft im Fertigteil $P_0 = 232 \text{ kN/m}$

Alter des Fertigteils beim Aufbringen der Ortbetonschicht 7 d



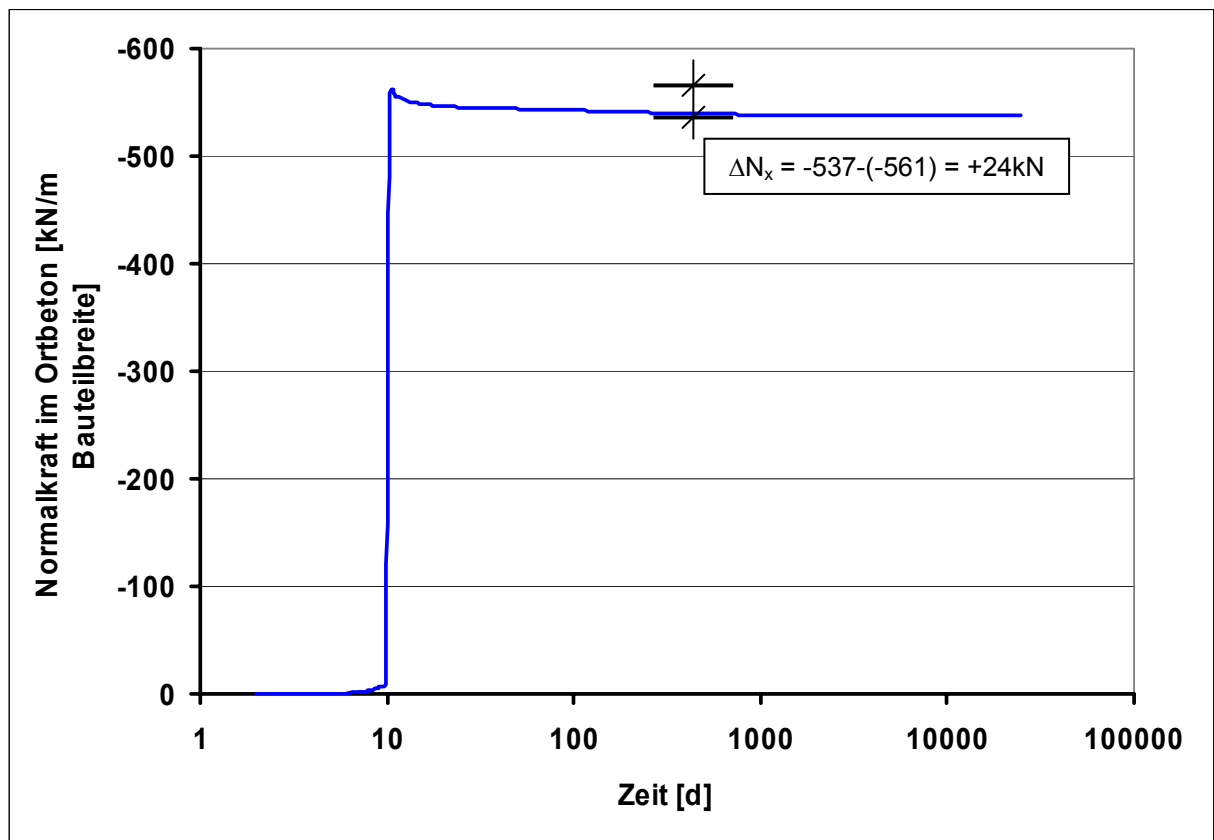
1 Verlauf der Normalkräfte im Ortbeton**1.5 System 2**

Dicke des Fertigteils	5 cm
Dicke der Ortbetonschicht	18 cm
Betonfestigkeitsklasse Fertigteil	C30/37
Betonfestigkeitsklasse Ortbeton	C35/45
Vorspannkraft im Fertigteil	$P_0 = 232 \text{ kN/m}$
Alter des Fertigteils beim Aufbringen der Ortbetonschicht	7 d



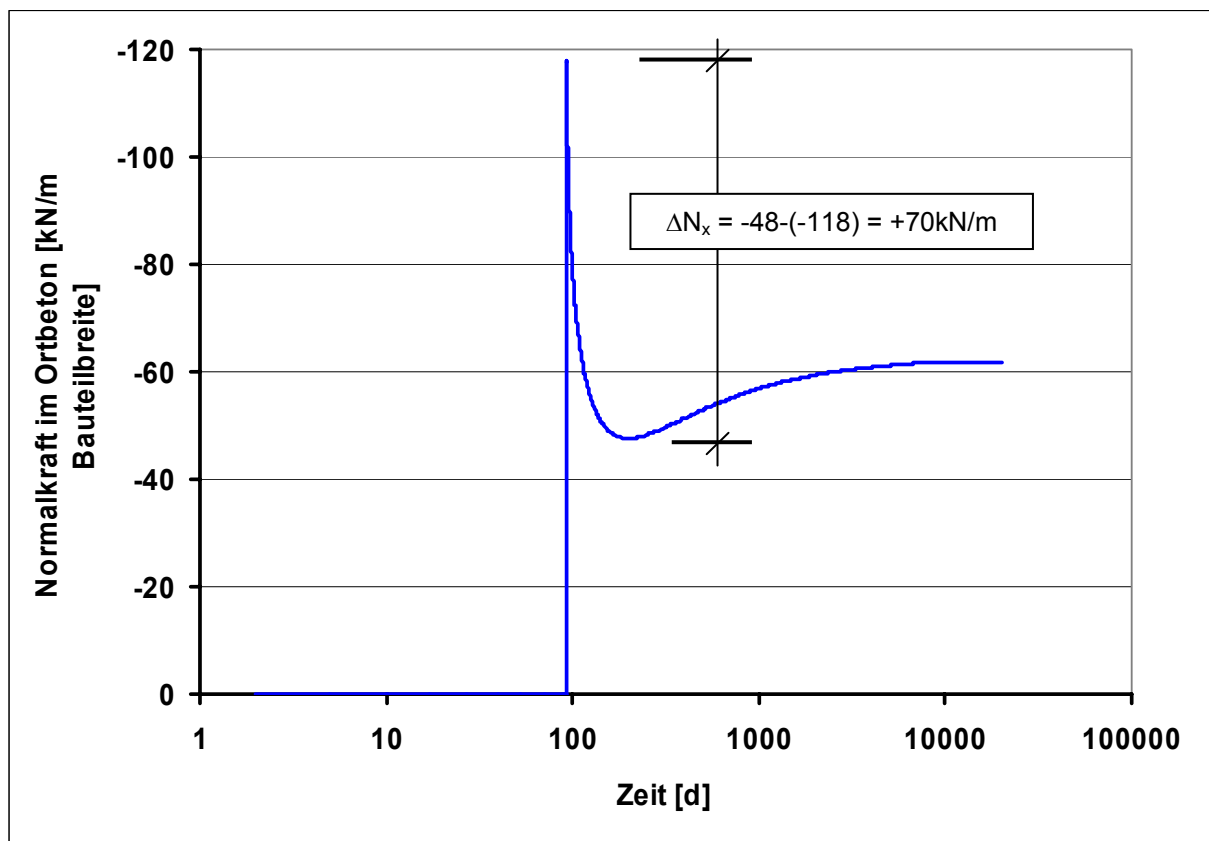
1 Verlauf der Normalkräfte im Ortbeton**1.6 System 3**

Dicke des Fertigteils	12 cm
Dicke der Ortbetonschicht	18 cm
Betonfestigkeitsklasse Fertigteil	C60/75
Betonfestigkeitsklasse Ortbeton	C35/45
Vorspannkraft im Fertigteil	$P_0 = 1004 \text{ kN/m}$
Alter des Fertigteils beim Aufbringen der Ortbetonschicht	7 d



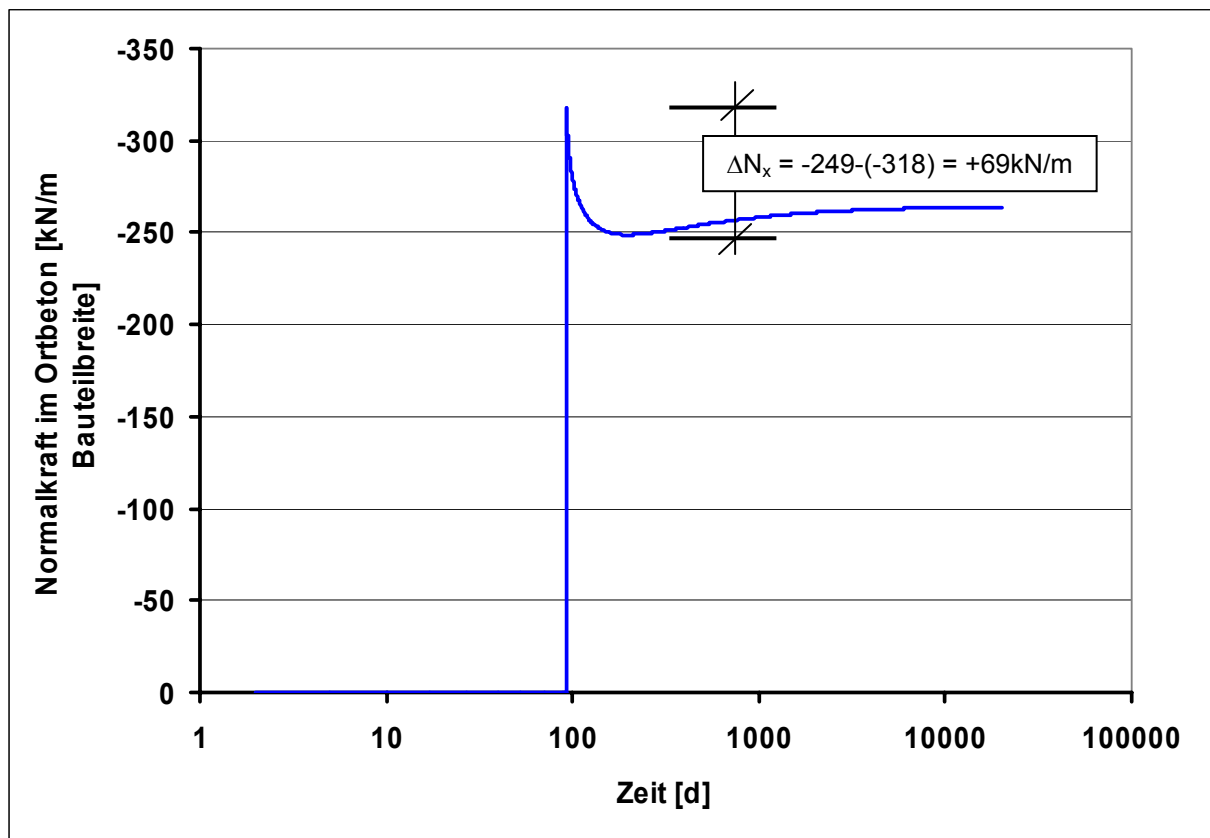
1 Verlauf der Normalkräfte im Ortbeton**1.7 System 4**

Dicke des Fertigteils	12 cm
Dicke der Ortbetonschicht	18 cm
Betonfestigkeitsklasse Fertigteil	C45/55
Betonfestigkeitsklasse Ortbeton	C35/45
Vorspannkraft im Fertigteil	$P_0 = 416 \text{ kN/m}$
Alter des Fertigteils beim Aufbringen der Ortbetonschicht	90 d



1 Verlauf der Normalkräfte im Ortbeton**1.8 System 5**

Dicke des Fertigteils	12 cm
Dicke der Ortbetonschicht	18 cm
Betonfestigkeitsklasse Fertigteil	C60/75
Betonfestigkeitsklasse Ortbeton	C20/25
Vorspannkraft im Fertigteil	$P_0 = 1004 \text{ kN/m}$
Alter des Fertigteils beim Aufbringen der Ortbetonschicht	90 d



GUTACHTEN G05-24 / G05-25

ANHANG B

Verlauf der Schubspannungen in der Verbundfuge für die berechneten FE-Systeme

Beratende Ingenieure GbR

Schurzelter Strasse 25

52074 Aachen

Tel. 0241/ 44 50 30

Fax. 0241/ 44 50 329

e-mail: info@huping.de

Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger

Dr.-Ing. Rüdiger Beutel

Dr.-Ing. Naceur Kerkeni

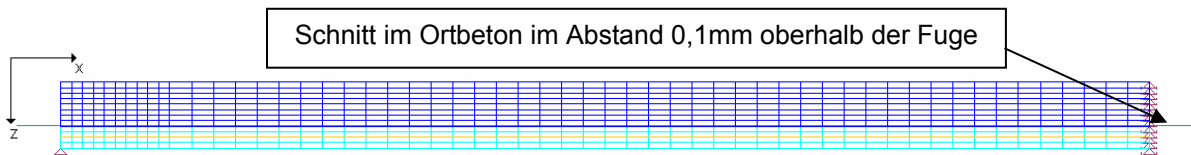
Dr.-Ing. Wolfgang Roeser

Inhaltsverzeichnis

1 ERLÄUTERUNGEN.....	3
2 SYSTEM 0	4
3 SYSTEM 1	5
4 SYSTEM 2	6
5 SYSTEM 3	7
6 SYSTEM 4	8
7 SYSTEM 5	9

1 ERLÄUTERUNGEN

Auf den folgenden Seiten werden die Schubspannungsverläufe in den Fugen der berechneten FE-Systeme dargestellt. Die Darstellung erfolgt in einem Schnitt, 0,1mm oberhalb der Fuge in der Ortbetonschicht.

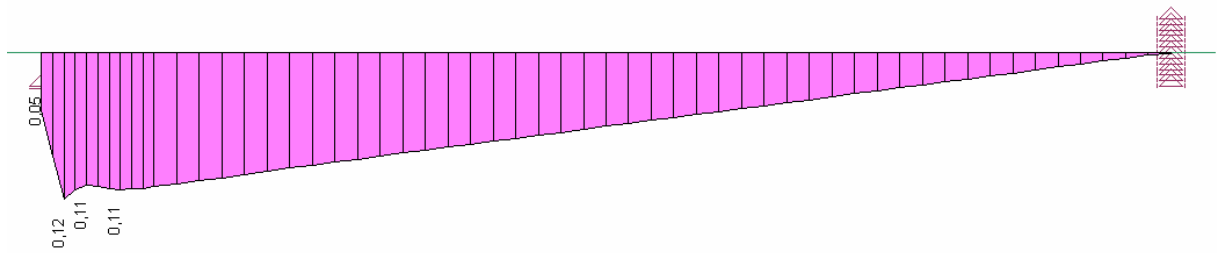


Für die Darstellung wurden die relevanten Zeitpunkte gewählt:

1. Der Zeitpunkt kurz nach Aktivierung der äußeren Belastung. Der Ortbeton hat zu diesem Zeitpunkt bereits ein Alter von 3d
2. Der maßgebende Zeitpunkt zur Ermittlung der maximalen Zugkräfte infolge Kriechen und Schwinden im Ortbeton nach Anhang A.
3. Gegebenenfalls wird eine dritte Schubspannungsverteilung angegeben, wenn infolge Kriechen und Schwinden Druckkräfte in der Ortbetonschicht aufgebaut werden. Dies ist der Fall für die Systeme 1 und 2.

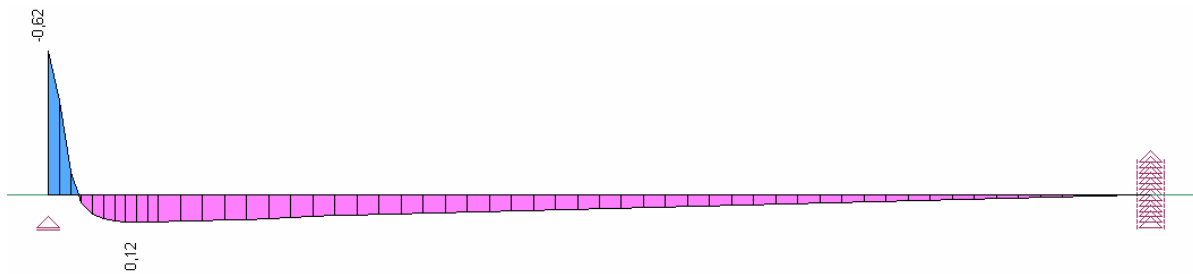
2 System 0**2 SYSTEM 0**

t = 93d Aktivierung der äußeren Lasten



TAU_XZ [MN/m²] inf. LF: 1 , LS: 17

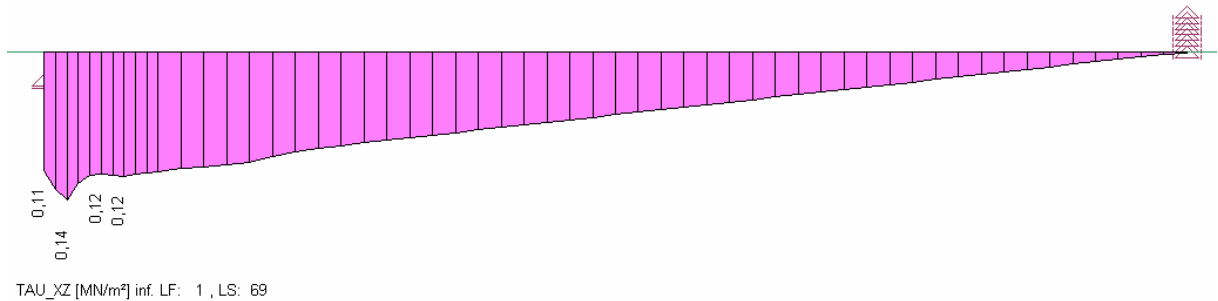
t=115d maßgebender Zeitpunkt zur Ermittlung der max. Zugkräfte in der Ortbetonschicht



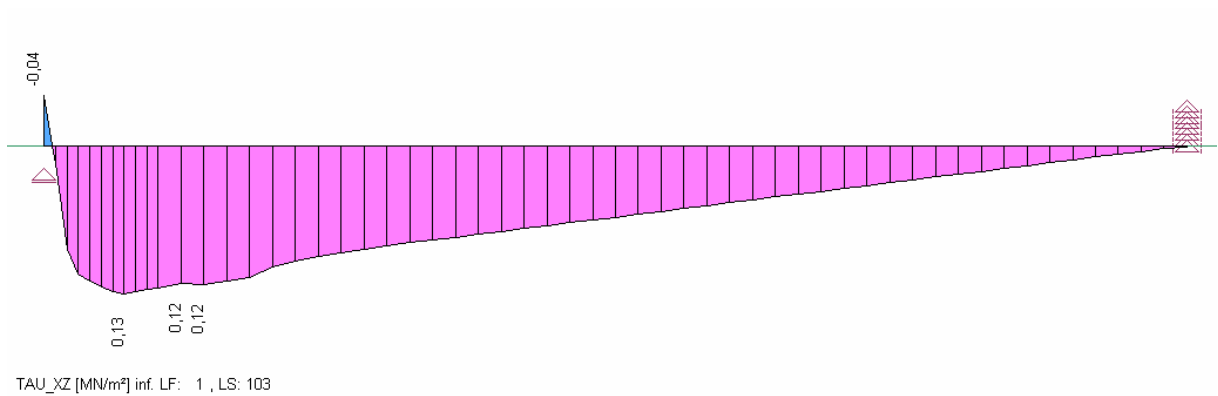
TAU_XZ [MN/m²] inf. LF: 1 , LS: 180

3 SYSTEM 1

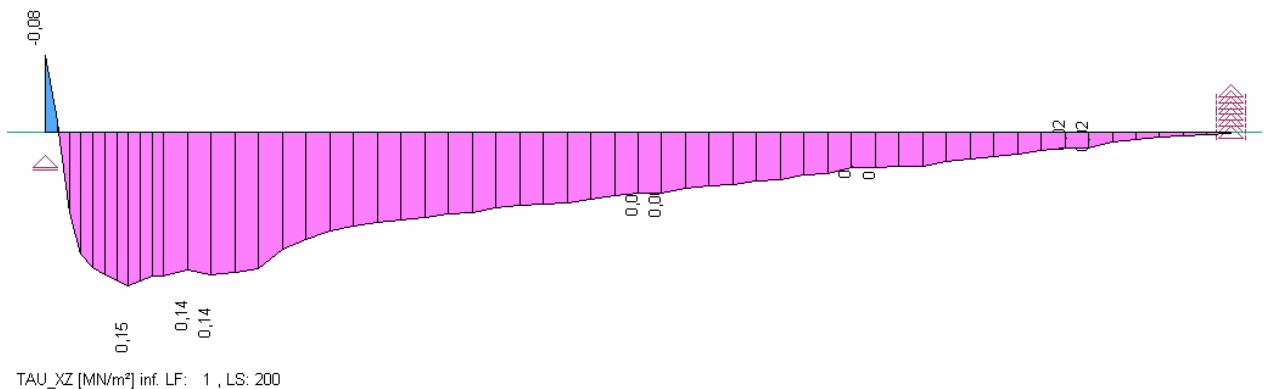
t = 10d Aktivierung der äußeren Lasten



t=15d maßgebender Zeitpunkt zur Ermittlung der max. Zugkräfte in der Ortbetonschicht

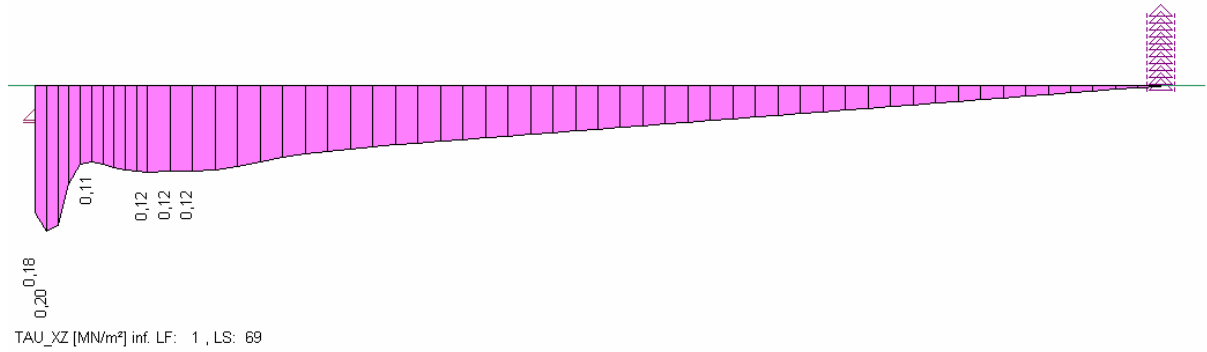


t=90d maßgebender Zeitpunkt zur Ermittlung der max. Druckkräfte in der Ortbetonschicht

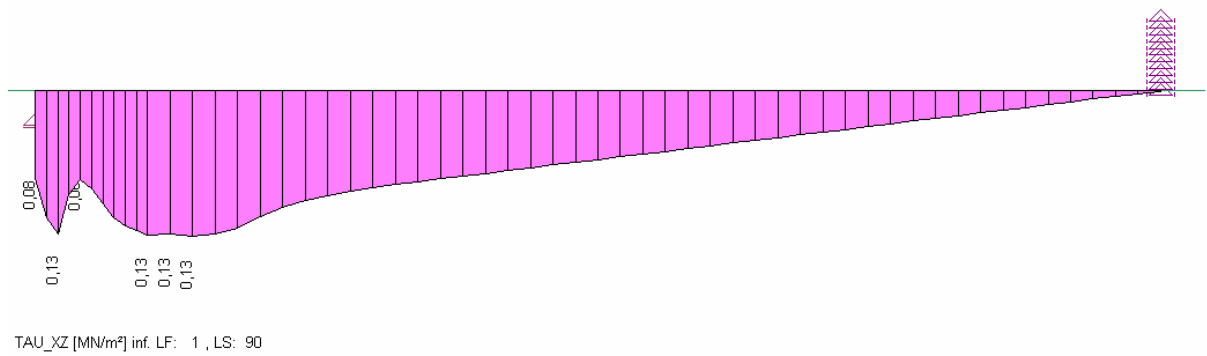


4 SYSTEM 2

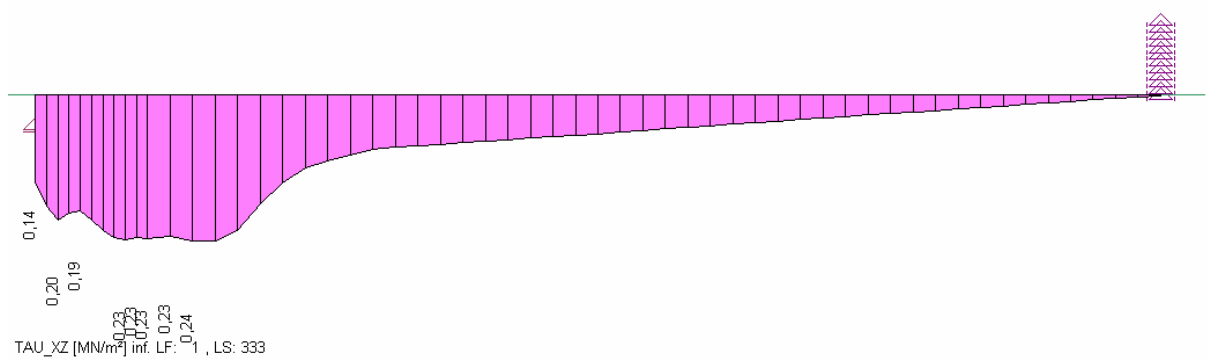
t = 10d Aktivierung der äußeren Lasten



t=13d maßgebender Zeitpunkt zur Ermittlung der max. Zugkräfte in der Ortbetonschicht

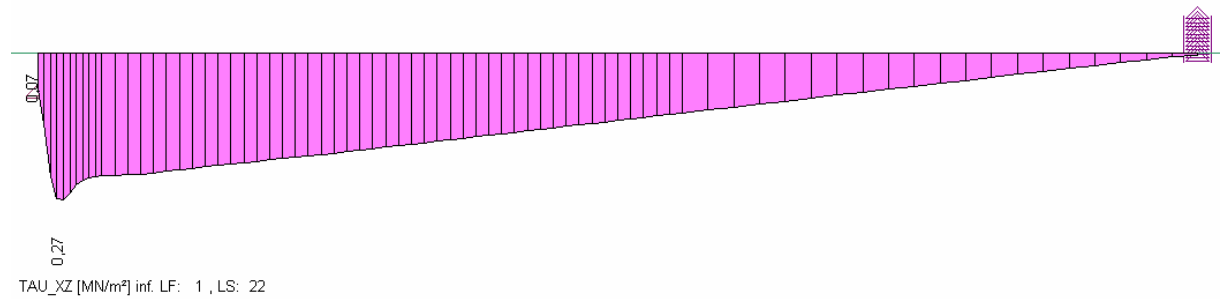


t=1800d maßgebender Zeitpunkt zur Ermittlung der max. Druckkräfte in der Ortbetonschicht

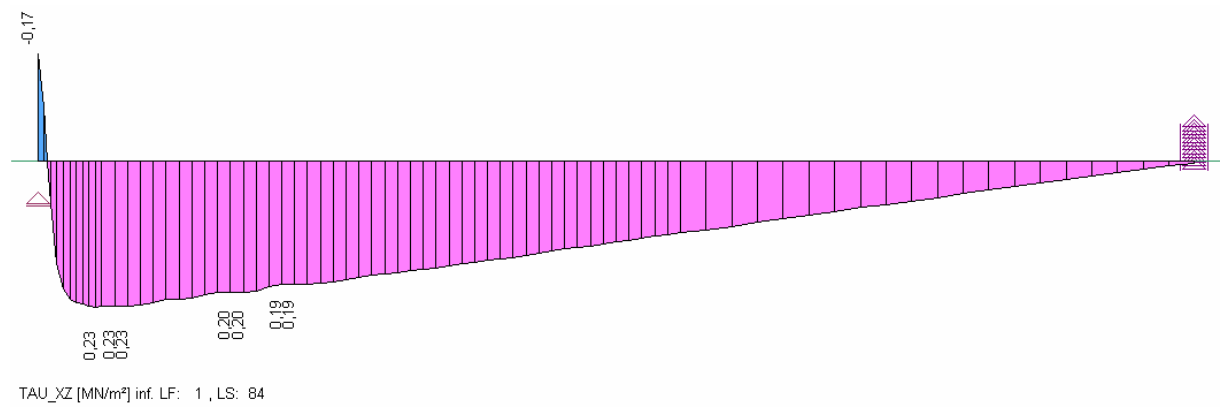


5 SYSTEM 3

t = 10d Aktivierung der äußeren Lasten

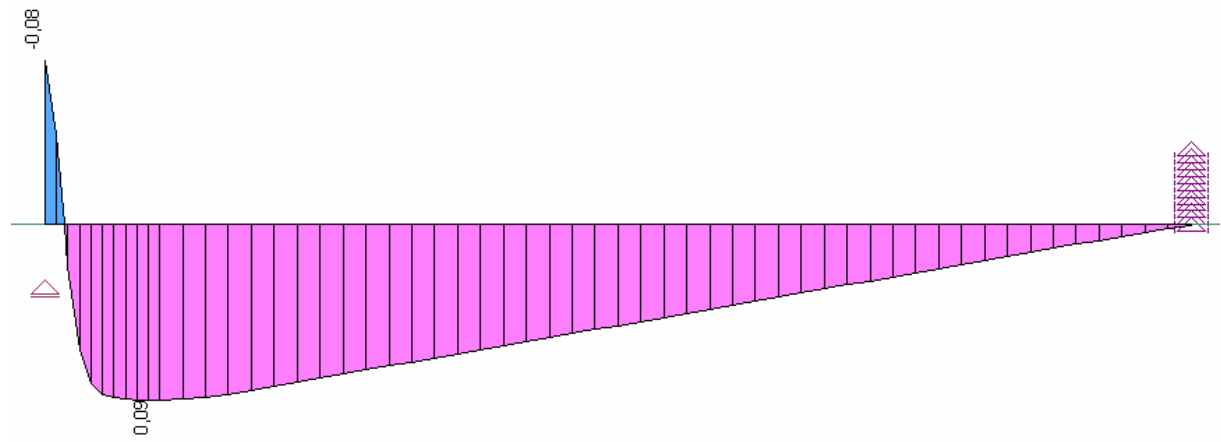


t=1100d maßgebender Zeitpunkt zur Ermittlung der max. Zugkräfte in der Ortbetonschicht



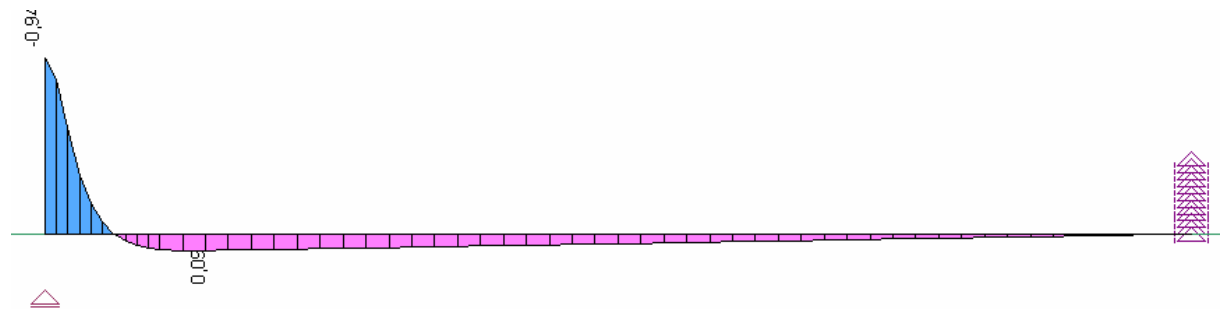
6 SYSTEM 4

t = 93d Aktivierung der äußeren Lasten



TAU_XZ [MN/m²] inf. LF: 1 , LS: 59

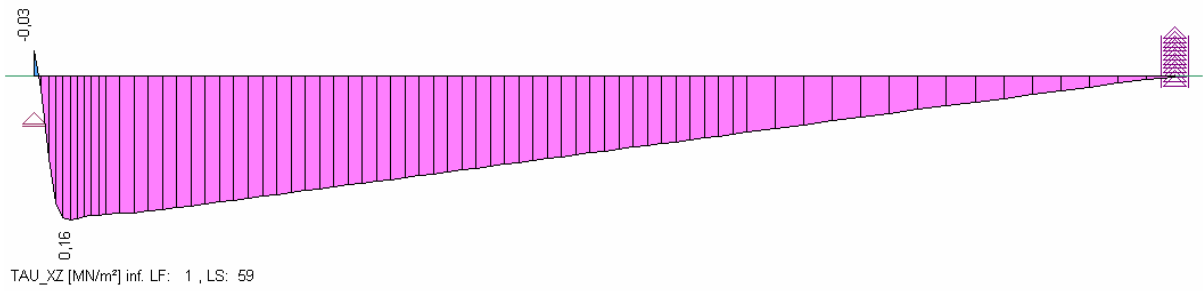
t=200d maßgebender Zeitpunkt zur Ermittlung der max. Zugkräfte in der Ortbetonschicht



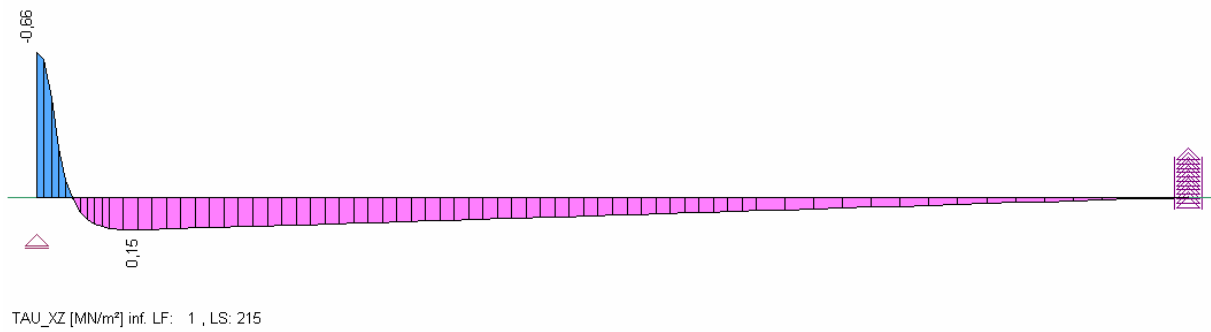
TAU_XZ [MN/m²] inf. LF: 1 , LS: 215

7 SYSTEM 5

t = 93d Aktivierung der äußeren Lasten



t=200d maßgebender Zeitpunkt zur Ermittlung der max. Zugkräfte in der Ortbetonschicht



GUTACHTEN G05-24 / G05-25 ANHANG C

**Erstellung der Datenbank zur Vergleichsbe-
rechnung der Bemessungskonzepte nach
verschiedenen Normen**

Inhaltsverzeichnis

1 AUFBAU DER DATENBANK.....	3
2 BEMESSUNGSKONZEPTE	4
2.1 EC2 4	
2.1.1 Bemessung für Querkraft	4
2.1.2 Bemessung der Verbundfuge.....	6
2.2 fib – Bemessung nach FIP-Recommendations 1996.....	8
2.2.1 Bemessung für Querkraft	8
2.2.2 Bemessung der Verbundfuge.....	9
2.3 DIN 1045(88)	10
2.3.1 Bemessung für Querkraft	10
2.3.2 Bemessung der Verbundfuge.....	11
2.4 DIN 1045-1	12
2.4.1 Bemessung für Querkraft	12
2.4.2 Bemessung der Verbundfuge.....	15
2.5 Bemessungsvorschlag.....	16
2.5.1 Bemessung für Querkraft	16
2.5.2 Bemessung der Verbundfuge.....	17
3 ERGEBNISSE DER BEMESSUNGEN.....	18
3.1 Erforderliche Querkraftbewehrung	19
3.1.1 Betonfestigkeitsklasse C20/25	19
3.1.2 Betonfestigkeitsklasse C30/37	21
3.1.3 Betonfestigkeitsklasse C45/55	23
3.2 Erforderliche Verbundbewehrung	25
3.2.1 Betonfestigkeitsklasse C20/25	25
3.2.2 Betonfestigkeitsklasse C30/37	33
3.2.3 Betonfestigkeitsklasse C45/55	41

1 AUFBAU DER DATENBANK

Für die Erstellung der Datenbank wurden Plattenstreifen von 1m Breite bemessen. Die Bemessung umfasst sowohl die Bemessung für Querkraft als auch die Bemessung der Verbundfuge. Es wird somit die im Bauteil maßgebende Bewehrungsmenge ermittelt, die die Verbundfuge kreuzt.

Es werden die im Gutachten angesprochenen Bemessungskonzepte verfolgt. Im einzelnen sind dies:

- EC2 in der Version prEN1992-1-1: 2003 (noch nicht bauaufsichtlich eingeführt)
- fib – FIP-Recommendations 1996 „Practical Design of Structural Concrete“ 11/1997
- DIN 1045(88)
- DIN 1045-1:2001
- Bemessungsvorschlag nach Gutachten

Bei der Bemessung wird davon ausgegangen, dass Querkraftbewehrung nur dann angesetzt wird, wenn diese rechnerisch erforderlich ist. Ausgewiesen wird nur die rechnerisch erforderliche Bewehrung unter Vernachlässigung des konstruktiv erforderlichen Mindestbewehrungsgrades.

2 BEMESSUNGSKONZEPTE

2.1 EC2

2.1.1 Bemessung für Querkraft

Die Bemessung für Querkraft erfolgt nach Kapitel 6.2 von prEN1992-1-1:2003. Hierbei werden die landesspezifischen Werte soweit möglich nach DIN 1045-1 angesetzt. Fehlt in DIN der entsprechende Wert, wird der in prEN empfohlene Wert herangezogen.

2.1.1.1 Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung

Die Querkrafttragfähigkeit für Bauteile ohne Querkraftbewehrung nach Abs. 6.2.2 ergibt sich zum größeren der Werte aus den beiden Gleichungen

$$\text{Gl (6.2.a)} \quad V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d$$

$$\text{Gl (6.2.b)} \quad V_{Rd,c} = (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$$

$$\text{mit} \quad C_{Rd,c} = 0,10 \text{ (nach DIN, gleichzeitig in prEN empfohlener Wert)}$$

$$k = 1 + (200 / d)^{0,5} \leq 2,0$$

$$\rho_l = A_{sl} / (b_w \cdot d) \leq 0,02$$

Ermittlung A_{sl} nach Kapitel 2.4.1.1

$$k_1 = 0,12 \text{ (nach DIN)}$$

$$b_w \quad \text{kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone}$$

$$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c \leq 0,2 f_{cd}$$

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{Gl (6.3N)}$$

Die maximale Querkrafttragfähigkeit ist begrenzt nach Gleichung

$$\text{Gl (6.5)} \quad V_{Ed} \leq 0,5 \cdot b_w \cdot d \cdot v \cdot f_{cd}$$

$$\text{mit} \quad v = 0,6 \cdot (1 + f_{ck} / 250) \quad \text{Gl (6.6N)}$$

Überschreitet der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft V_{Ed} den Wert $V_{Rd,c}$, so ist Querkraftbewehrung im Bauteil anzuordnen.

2.1.1.2 Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung

Die Querkrafttragfähigkeit für Bauteile mit Querkraftbewehrung wird nach den Angaben in Abs. 6.2.3 ermittelt.

Die Neigung des Winkels θ kann frei gewählt werden innerhalb der Grenzen nach Gleichung

$$\text{Gl (6.7N)} \quad 1 \leq \cot \theta \leq 2,5$$

Die Querkrafttragfähigkeit des Bauteils wird nun berechnet als kleinerer der beiden Werte:

$$\text{Gl (6.13)} \quad V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

$$\text{Gl (6.14)} \quad V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v \cdot f_{cd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) / (1 + \cot^2 \theta)$$

mit A_{sw} / s Querkraftbewehrung je Längeneinheit

$z =$ 0,9 d

α Neigung der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse

$\alpha_{cw} = 1$ für $\sigma_{cp} = 0$ Gl(6.11.aN)

$= 1 + \sigma_{cp} / f_{cd}$ für $0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 f_{cd}$ Gl(6.11.bN)

$= 1,25$ für $0,25 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,5 f_{cd}$ Gl(6.11.cN)

$= 2,5(1 - \sigma_{cp} / f_{cd})$ für $0,5 f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 1,0 f_{cd}$ Gl(6.11.dN)

$v = 0,6 \cdot (1 + f_{ck} / 250)$ Gl (6.6N)

Wobei die Wirksamkeit der Querkraftbewehrung überprüft werden muss:

$$\text{Gl (6.15)} \quad \frac{A_{sw,max} \cdot f_{ywd}}{b_w \cdot s} \leq \frac{\frac{1}{2} \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} \cdot \sin \alpha}{1 - \cos \alpha}$$

Exemplarisch für die Berechnung innerhalb der Datenbank wird die Nachweisführung für ein System mit

$$h = 0,20 \text{ m}; \quad c_{nom} = 2,5 \text{ cm}; \quad V_{Ed} = 200 \text{ kN/m} \quad \text{angegeben.}$$

Die Neigung θ wird innerhalb der Grenzen so gewählt, dass bei minimalem erforderlichen Bewehrungsgrad die Tragfähigkeit $V_{Rd,max}$ gegeben ist.

2 Bemessungskonzepte**Bauteilbemessung nach EN1992-1-1:2003****Querkraftbemessung nach Abs. 6.2.3**

innerer Hebelarm	$z = 0,9 \cdot d$		0,153 m
Tragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung		Gl(6.2.b) $V_{Rd,c} =$	0,113 MN
	wie DIN 1045-1	Gl(6.2.a) $V_{Rd,c} =$	0,104 MN
Abminderungswerte	$v = 0,6 \cdot (1-45/250) =$	0,492	
	$\alpha_{cw} =$	1,000	
	mit $\sigma_{cp} =$	0 N/mm ²	
Neigung Druckstrebe	$1 \leq \cot \theta \leq 2,5$	gewählt: $\cot \theta =$	2,5
Tragfähigkeit der Druckstrebe:			
	$V_{Rd,max} = 1 \cdot 0,15 \cdot 1 \cdot 0,49 \cdot 25,5 \cdot (2,5+0) / (1+2,5^2) =$		0,662 MN
erf. Querkraftbewehrung			
	$erf.a_{sw} = 200 / (434,8 \cdot 0,15 \cdot (2,5+0) \cdot 1) \cdot 10 =$		12,03 cm ² /m
Bedingung Gl (6-15)	$12,03 \cdot 400 / 10 / 1 = 481 \text{ kN}$		
	$< 0,5 \cdot 1 \cdot 0,49 \cdot 25,5 \cdot 1 / (1-0) = 6273 \text{ kN}$		

2.1.2 Bemessung der Verbundfuge

Die Verbundfuge wird nach Abs. 6.2.5 „Schubkraftübertragung in Fugen“ bemessen.

Der Bemessungswert der einwirkenden Schubkraft wird ermittelt zu

$$Gl (6.24) \quad v_{Edi} = \beta \cdot V_{Ed} / (z \cdot b_i)$$

mit	β	Verhältnis der Normalkraft in der Betonergänzung zur Gesamtnormalkraft in der Druckzone
	V_{Ed}	Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
	$z =$	Hebelarm des Gesamtquerschnitts = 0,9 d
	$b_i =$	anrechenbare Breite der Fuge = 1,0m

Der Bemessungswert der Schubkrafttragfähigkeit der Fuge ergibt sich zu

$$Gl (6.25) \quad v_{Rd} = c \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \leq 0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$$

mit	c, μ	Beiwerte zur Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit der Fuge
	$f_{ctd} =$	$f_{ctk;0,05} / 1,5$ Bemessungswert der Zugfestigkeit
	$\sigma_n =$	Normalspannung auf der Fuge

2 Bemessungskonzepte

$\rho =$ Bewehrungsgrad der die Fuge kreuzenden und ausreichend verankerten Bewehrung

$$v = 0,6 \cdot (1 + f_{ck} / 250) \quad \text{GI (6.6N)}$$

Die Beiwerte für die Oberflächenbeschaffenheit sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst:

Oberfläche	c	μ
verzahnt	0,50	0,9
rau	0,45	0,7
glatt	0,35	0,6
sehr glatt	0,25	0,5

Innerhalb der Datenbank wird die Bemessung für das in Kapitel 2.1.1.2 beschriebene System unter der Annahme einer „rauen“ Oberflächenbeschaffenheit der Fuge wie folgt durchgeführt:

Bemessung der Verbundfuge nach Abs. 6.2.5

Ansatz: Verhältnis der Normalkräfte = 1; dadurch $\beta = 1,0$

Schubkraft in Fuge $V_{Ed} = 1307,2 \text{ kN/m}^2$

Beiwerte der Oberflächenbeschaffenheit $c = 0,45$

$\mu = 0,7$

Bem-Wert Betonzugfestigkeit $f_{ctd} = f_{ctk;0,05} / 1,5 = 1,8$

Normalspannung auf Fuge $\sigma_N = 0 \text{ N/mm}^2$

Tragfähigkeit der Fuge

$$V_{Rd,ct,i} = (0,45 \cdot 1,8 + 0,7 \cdot 0) \cdot 10^3 = 810 \text{ kN/m}^2$$

Druckstrebentragfähigkeit

$$V_{Rd,max} = (0,5 \cdot 0,49 \cdot 25,5) \cdot 10^3 = 6273,0 \text{ kN/m}^2$$

erf. Querkraftbewehrung

$$\text{erf. } a_{sw} = (1307,2 - 810) / (434,8 \cdot (0,7 \cdot 1 + 0)) \cdot 1 \cdot 10 = 16,34 \text{ cm}^2/\text{m}$$

maßgebend:

erforderliche Querkraftbewehrung: $\text{erf } a_{sw} = 16,34 \text{ cm}^2/\text{m}$

2.2 fib – Bemessung nach FIP-Recommendations 1996

2.2.1 Bemessung für Querkraft

Die Bemessung für Querkraft erfolgt nach Kapitel 6.4.3.2 der FIP-Recommendations 1996, welche im folgenden nach dem Herausgeber fib benannt werden. Diese Empfehlungen beruhen weitestgehend auf dem Model Code 90.

Der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit ergibt sich zu

$$\text{Gl (6.6)} \quad V_{Rd,web} = V_{swd} + V_{fd}$$

$$\text{mit } V_{swd} = (A_{sw} / s_w) \cdot f_{ywd} \cdot z \cdot \cot \beta_r \quad \text{Gl (6.8)}$$

$$\text{und } V_{fd} = 0,070 (b_w z f_{cwd}) \quad \text{für } \sigma_{xd} = 0 \quad \text{Gl(6.10.a)}$$

$$= 0,10 (1 - \cot \beta_r / 4) \cdot (b_w z f_{cwd}) \geq 0 \quad \text{für } \sigma_{xd} < 0 \quad \text{Gl(6.10.b)}$$

$$= 0,10 (1 - 0,36 / \cot \beta_r) \cdot (b_w z f_{cwd}) \geq 0 \quad \text{für } \sigma_{xd} > 0 \quad \text{Gl(6.10.c)}$$

$$\text{wobei } \cot \beta_r = 1,2 \quad \text{für } \sigma_{xd} = 0 \quad \text{Gl(6.9.a)}$$

$$= 1,2 - 0,2 \sigma_{xd} / f_{ctm} \quad \text{für } \sigma_{xd} < 0 \quad \text{Gl(6.9.b)}$$

$$= 1,2 - 0,9 \sigma_{xd} / f_{ctm} \quad \text{für } \sigma_{xd} > 0 \quad \text{Gl(6.9.c)}$$

$$\sigma_{xd} = N_{Sd} / A_c = \text{Spannung in der Schwerachse}$$

$$f_{cwd} = 0,8 \cdot f_{1cd} = 0,8 \cdot 0,85 \cdot f_{ck} / \gamma_c$$

Für die Ermittlung der Maximaltragfähigkeit ist die Neigung der Druckstrebe erforderlich. Diese wird aus dem Neigungswinkel des Schubrisses berechnet.

$$\text{Gl (6.11a)} \quad \cot \theta = \frac{\cot \beta_r}{1 - V_{fd} / V_{sd,web}}$$

Der Bemessungswert der Tragfähigkeit der Druckstrebe ergibt zu:

$$\text{Gl (6.13)} \quad V_{Rd,max,web} = b_w \cdot z \cdot f_{cwd} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$$

Exemplarisch für die Berechnung innerhalb der Datenbank wird die Nachweisführung für ein System mit

$$h = 0,20 \text{ m}; \quad c_{nom} = 2,5 \text{ cm}; \quad V_{Ed} = 200 \text{ kN/m} \quad \text{angegeben.}$$

2 Bemessungskonzepte

Bauteilbemessung nach FIP Recommendations 1996

Querkraftbemessung nach Abs. 6.4.3.2

Beiwert	$v =$	0,8 (konstruktive Anforderung sw/z einzuhalten!)		
mittlere Zugfestigkeit	$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} =$	3,80 N/mm ²		
	$f_{ctd} = 0,7 \cdot f_{ctm} / 1,7 =$	1,56 N/mm ²		
Rissneigung	aus $\sigma_{xd} =$	0 N/mm ² folgt		
	$\cot \beta_r =$	1,200	maßgebend:	1,200
	$V_{fd} = 0,07 \cdot 1 \cdot 0,15 \cdot 0,8 \cdot 25,5 =$		218,5	maßg: 218,5
Neigung Druckstrebe	$\cot \theta = 1,2 / (1 - 218,5/200) =$	-12,984		$\sin \theta = 0,316$
	$1 \leq \cot \theta \leq 3$	$\cot \theta = 3,000$		$\cos \theta = 0,949$
Tragfähigkeit der Druckstrebe:	$V_{Rd,max} =$	$1 \cdot 0,15 \cdot 0,8 \cdot 25,5 \cdot 0,316 \cdot 0,949 \cdot 10^3 =$		936,4 MN
erf. Querkraftbewehrung	nach MC90[6.4-14] erf. a_{sw}	KEINE Querkraftbewehrung erf., da $V_{fd} > V_{Ed}$!		0,00 cm ² /m

2.2.2 Bemessung der Verbundfuge

Die Verbundfuge wird nach Abs. 6.4.7 bemessen.

Der Bemessungswert der Schubkrafttragfähigkeit der Fuge ergibt sich zu

Gl (6.29) $\tau_{fRd} = \beta \cdot f_{ctd} + \mu \cdot \sigma_{cd} + \rho \cdot f_{yd} \cdot (\mu \sin \alpha_j + \cos \alpha_j)$

- mit β, μ Beiwerte zur Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit der Fuge
- $f_{ctd} =$ 0,7 $f_{ctm} / 1,7$ Bemessungswert der Zugfestigkeit
- $\sigma_{cd} =$ Normalspannung auf der Fuge
- $\rho =$ Bewehrungsgrad der die Fuge kreuzenden und ausreichend verankerten Bewehrung

Die Beiwerte für die Oberflächenbeschaffenheit sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst. fib unterscheidet nicht zwischen rau und verzahnt!

Oberfläche	c	μ
verzahnt	0,40	0,9
rau	0,40	0,9
glatt	0,20	0,6
sehr glatt	0,10	0,6

2 Bemessungskonzepte

Die Maximaltragfähigkeit der Verbundfuge wird berechnet zu

$$\text{Gl (6.29)} \quad \tau_{fRd} \leq 0,25 \cdot f_{1cd}$$

Innerhalb der Datenbank wird die Bemessung für das in Kapitel 2.1.1.2 beschriebene System wie folgt durchgeführt:

Bemessung der Verbundfuge nach Abs. 6.4.7

Ansatz: Die Schubspannung in der Fuge ergibt sich aus $V_{Ed} / (b_w \cdot z)$

$$\text{Schubspannung in Fuge} \quad \tau_{Ed} = \quad 1,31 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Beiwerte der Oberflächenbeschaffenheit} \quad \beta = \quad 0,4$$

$$\mu = \quad 0,9$$

$$\text{Normalspannung auf Fuge} \quad \sigma_N = \quad 0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{vom Beton aufn. } \tau \quad \tau_{Rd,c} = 0,4 \cdot 1,56 + 0,9 \cdot 0 = \quad 0,63 \text{ N/mm}^2$$

Tragfähigkeit der Druckstrebe:

$$\tau_{fRd} = 0,25 \cdot 25,5 = \quad 6,38 \text{ N/mm}^2$$

erf. Querkraftbewehrung

$$\text{erf. } a_{sw} = (1,31 - 0,63) / (434,8 \cdot (0,9 \cdot 1 + 0)) \cdot 1 \cdot 10^4 = \quad 17,43 \text{ cm}^2/\text{m}$$

$$\text{maßgebend:} \quad \text{erforderliche Querkraftbewehrung:} \quad \text{erf } a_{sw} = \quad 17,43 \text{ cm}^2/\text{m}$$

2.3 DIN 1045(88)

2.3.1 Bemessung für Querkraft

Der Vergleich der semi-probabilistischen Sicherheitskonzepte von fib, EC2 oder DIN 1045-1 mit dem globalen Ansatz nach DIN 1045(88) bedarf der Umrechnung der Einwirkenden. Hierfür wird die Einwirkende V_{Ed} bzw. V_{Sd} der neueren Konzepte durch einen Sicherheitsbeiwert von

$$\gamma_F = 1,42$$

geteilt, um auf ein 1,0-faches Lastniveau zu gelangen. Die einwirkende Schubspannung τ_0 wird demnach ermittelt zu

$$\tau_0 = \frac{V_{Ed} / 1,42}{b \cdot z}$$

2 Bemessungskonzepte

$$\text{mit } z = 0,85 \cdot d$$

Grundlage für die Bemessung bildet Abs. 17.5.5 der DIN 1045(88).

Unter Berücksichtigung der Grenzwerte der Schubspannung nach Tabelle 13 sowie der möglichen Abminderungsfaktoren k_1 und k_2 wird die Bemessung der Querkrafttragfähigkeit durchgeführt. Das System nach Kapitel 2.1.1.2 wird nach DIN 1045(88) wie folgt bemessen:

Bauteilbemessung nach DIN1045(88)**Querkraftbemessung nach Abs. 17.5.5**

Eingangswerte		$\gamma_S =$	1,75	
	innerer Hebelarm $z = z_{neu} / 0,9 \cdot 0,85 =$		0,145 m	
	Sicherheitsbeiwert Einwirkung neue Norm	$\gamma_E =$	1,42	
Materialwertewerte:	$\beta_R =$	$\tau_{011,a} =$	$\tau_{011,b} =$	$\tau_{02} =$
	N/mm ² 30	0,55	0,8	3
				$\beta_S / \gamma_S =$
				285,7
Einwirkende Querkraft	$Q_s =$	$= 200 / 1,42 =$		140,85 kN
Bemessung für Querkraft	mit $d = h =$	0,200 m	folgt:	
	$k_1 = 0,2 / 0,2 + 0,33 =$	1,330	maßgebend:	1,000
	$k_2 = 0,12 / 0,2 + 0,6 =$	1,200	maßgebend:	1,000
	$\tau_0 =$	$= 140,8 / (0,145 \cdot 1) / 10^3 =$		0,97 N/mm ²
	$> k_2 \cdot \tau_{011b} =$	0,8	\Rightarrow	Schubbewehrung erforderlich!
	$< \tau_{02}$		\Rightarrow	Schubbemessung möglich
	$\tau = \tau_0^2 / \tau_{02} > 0,4 \tau_0 =$	$= 0,97^2 / 3 > 0,4 \cdot 0,97 =$		0,39 N/mm ²
	Neigung der Schubbewehrung $\alpha =$	90 °		
	Abweichung von 45° $\Delta\alpha =$	45 °		
	erf. $a_s = b \cdot \tau \cdot \gamma / (\beta_S \cdot (\cos \Delta\alpha) \cdot \text{Wurzel}(2)) =$			13,65 cm ² /m ²

2.3.2 Bemessung der Verbundfuge

Die Bemessung von Verbundfugen wird in DIN 1045(88) in den Abs. 19.4 und 19.7.2 geregelt. Die Bemessung kann grundsätzlich wie bei monolithischen Bauteilen erfolgen, wenn die Oberfläche der Fuge mindestens „rau“ ist. Ein Bemessungskonzept für Fugen mit glatter Oberfläche („glatt“ bzw. „sehr glatt“ nach DIN 1045-1) ist nicht vorgesehen. Die Abminderung für die verminderte Schubdeckung nach Gl(17) wird bei der Bemessung der Verbundfuge in Gl(31) modifiziert.

2 Bemessungskonzepte**Bemessung der Verbundfuge nach Abs. 19.4 und 19.7.2**

Oberflächenbeschaffenheit	rau				
einw. Schubspannung:	$\tau_0 =$	0,97 N/mm ²	>	$0,7 t_{011b} =$	0,56 N/mm ²
	\Rightarrow	Bemessung mit voller Schubdeckung erforderlich		$\tau =$	0,97 N/mm ²
	verminderte Schubdeckung	$\tau = \tau_0^2 / (0,7 \tau_{011b}) > 0,4 \tau_0 =$			1,70 N/mm ²
	volle Schubdeckung	$\tau = \tau_0 =$			0,97 N/mm ²
	erf. $a_s = b \cdot \tau \cdot \gamma / (\beta_S \cdot (\cos \Delta\alpha) \cdot \text{Wurzel}(2)) =$				34,11 cm ² /m ²

2.4 DIN 1045-1**2.4.1 Bemessung für Querkraft**

Die Bemessung für Querkraft erfolgt nach Kapitel 10.3 von DIN 1045-1.

2.4.1.1 Ermittlung der Längsbewehrung

Für die Berechnung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung ist die Kenntnis des Längsbewehrungsgrades erforderlich. Da für die Erstellung der Datenbank nicht komplette Deckensysteme bemessen wurden, sondern ausschließlich die Bemessung für Querkraft im Mittelpunkt stand, wird die statisch erforderliche Längsbewehrung unter folgender Annahme ermittelt:

$$M_{Ed} \geq 2,5 \cdot d \cdot V_{Ed} + 10 \text{ kNm}$$

Es wird also angenommen, dass der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft in einem Abstand von $2,5 \cdot d$ als äußere Last aufgebracht wird. Um einer weiteren, gleichmäßigen Belastung der Platte Rechnung zu tragen, wird pauschal ein Wert von 10kNm hinzuaddiert. Der sich daraus ergebende Längsbewehrungsgrad wird unter dem Wert liegen, der sich bei der Bemessung eines üblichen Deckensystems ergeben würde, das mit der angesetzten einwirkenden Querkraft belastet wird.

Durch diesen Ansatz liegt der Übergang zum Bauteil mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung auf der sicheren Seite.

2.4.1.2 Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung

Die Querkrafttragfähigkeit für Bauteile ohne Querkraftbewehrung nach Abs. 10.3.3 ergibt sich zu

$$\text{Gl (70)} \quad V_{Rd,ct} = \left[0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d$$

mit

$$\kappa = 1 + (200 / d)^{0,5}$$

$$\eta_1 = 1,0 \quad (\text{Beiwert zur Berücksichtigung von Leichtbeton})$$

$$\rho_l = A_{sl} / (b_w \cdot d) \leq 0,02$$

Ermittlung A_{sl} nach Kapitel 2.4.1.1

b_w kleinste Querschnittsbreite innerhalb der Zugzone

$$\sigma_{cd} = N_{Ed} / A_c \leq 0,2 f_{cd}$$

Überschreitet der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft V_{Ed} den Wert $V_{Rd,ct}$, so ist Querkraftbewehrung im Bauteil anzuordnen.

2.4.1.3 Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung

Die Querkrafttragfähigkeit für Bauteile mit Querkraftbewehrung wird nach den Angaben in Abs. 10.3.4 ermittelt.

Die Neigung des Winkels θ kann frei gewählt werden innerhalb der Grenzen nach Gleichung

$$\text{Gl (73)} \quad 0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \cdot \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,c} / V_{Ed}} \leq 3,0$$

mit

$$V_{Rd,c} = 2,4 \cdot 0,10 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot \left(1 + 1,2 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \cdot b_w \cdot z \quad \text{Gl (74)}$$

Die Querkrafttragfähigkeit des Bauteils wird nun berechnet als kleinerer der beiden Werte:

$$\text{Gl (77)} \quad V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

$$\text{Gl (78)} \quad V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) / (1 + \cot^2 \theta)$$

mit A_{sw} / s Querkraftbewehrung je Längeneinheit

2 Bemessungskonzepte

$$z = \text{MIN} \{ 0,9 d; d - 2 c_{\text{nom}} \}$$

$$\alpha_c = 0,75 \cdot \eta_1$$

α Neigung der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse

Exemplarisch für die Berechnung innerhalb der Datenbank wird folgender Nachweis dargestellt:

Systemwerte:

Bauteilangaben	Bauteilbreite	b =	1 m					
	Bauteilhöhe	h =	0,2 m					
	<i>Betondeckung</i>	$c_{\text{nom}} =$	2,5 cm					
	statische Nutzhöhe	d =	0,17 m					
	Bewehrungsgrad	$\rho_1 =$	0,64 %	rechn:			0,64 %	
	Oberflächenbeschaffenheit Fuge		rau					
Material	Betonfestigkeit	$f_{\text{ck}} =$	45 N/mm ²	$f_{\text{cd}} =$		25,50 N/mm ²		
	Betonstahlbewehrung	$f_{\text{yk}} =$	500 N/mm ²	$f_{\text{yd}} =$		434,8 N/mm ²		
	Neigung Bewehrung	$\alpha =$	90 °	sin α	cos α	cot α		
				1,000	0,000	0,000		
Einwirkungen:	Querkraft	$V_{\text{Ed}} =$	200,0 kN					
	Normalspannung	auf Fuge	$\sigma_{\text{Nd}} =$			0 N/mm ²		
		auf Bauteilachse	$\sigma_{\text{cd}} =$			0 N/mm ²		

Bauteilbemessung nach DIN 1045-1**Querkraftbemessung nach Abs. 10.3.4**

innerer Hebelarm	für Querkraft	$z_Q =$	Min { 0,9 * d; d - 2 c _{nom} } =	0,120 m
	für Verbundfuge	$z_V =$	0,9 * d =	0,153 m
Tragfähigkeit der Platte ohne Querkraftbewehrung				
	$V_{\text{Rd,ct}} =$	$= [0,1 * 2 * (100 * 0,006 * 45)^{(1/3)} - 0,12 * 0] * 1 * 0,17 =$ mit $\kappa = 1 + (200/170)^{(1/2)} = 2,00$		0,104 MN
Tragfähigkeit der Platte mit Querkraftbewehrung				
Betontraganteil	$V_{\text{Rd,c}} =$	$= 0,24 * 1,0 * 45^{(1/3)} (1 + 1,2 * 0/25,5) * 1 * 0,12 =$		0,102 MN
Neigung Druckstrebe	max cot θ	$= (1,2 - 1,4 * 0/25,5) / (1 - 102,4/200) =$ gewählt: cot $\theta =$		2,460 2,460
Tragfähigkeit der Druckstrebe:				
	$V_{\text{Rd,max}}$	$= 1 * 0,12 * 0,75 * 25,5 * (2,46 + 0) / (1 + 2,46^2) =$		0,801 MN
erf. Querkraftbewehrung	erf. a_{sw}	$= 200 / (434,8 * 0,12 * (2,46 + 0) * 1) * 10 =$		15,58 cm ² /m

2 Bemessungskonzepte**2.4.2 Bemessung der Verbundfuge**

Die Verbundfuge wird nach Abs. 10.3.6 „Schubkraftübertragung in Fugen“ bemessen.

Der Bemessungswert der einwirkenden Schubkraft wird ermittelt zu

$$\text{Gl (83)} \quad v_{Edi} = \frac{F_{cdj}}{F_{cd}} \cdot \frac{V_{Ed}}{z}$$

mit F_{cdj}/F_{cd} Verhältnis der Normalkraft in der Betonergänzung zur Gesamtnormalkraft in der Druckzone

V_{Ed} Bemessungswert der einwirkenden Querkraft

$z =$ Hebelarm des Gesamtquerschnitts = 0,9 d

Der Bemessungswert der Schubkrafttragfähigkeit der Fuge ohne Verbundbewehrung ergibt sich zu

$$\text{Gl (84)} \quad v_{Rd,ct} = \left[0,042 \cdot \eta_1 \cdot \beta_{ct} \cdot f_{ck}^{1/3} - \mu \cdot \sigma_{Nd} \right] \cdot b$$

mit β_{ct}, μ Beiwerte zur Berücksichtigung der Oberflächenbeschaffenheit der Fuge

$\eta_1 =$ 1,0 (Beiwert zur Berücksichtigung von Leichtbeton)

$\sigma_{cd} =$ Normalspannung auf der Fuge

Die Beiwerte für die Oberflächenbeschaffenheit sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst (Tabelle 13, DIN 1045-1)

Oberfläche	β_{ct}	μ
verzahnt	2,4	1,0
rau	2,0	0,7
glatt	1,4	0,6
sehr glatt	0	0,5

Für Bauteil mit rechnerisch erforderlicher Verbundbewehrung ($v_{Ed} > v_{Rd,ct}$) beträgt der Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft

$$\text{Gl (85)} \quad v_{Rd,sy} = a_s \cdot f_{yd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha + \mu \cdot \sigma_{Nd} \cdot b$$

Die Neigung des Druckstrebenwinkels kann gewählt werden innerhalb der Grenzen:

2 Bemessungskonzepte

$$\text{Gl (86)} \quad 1 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 \cdot \mu - 1,4 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,ct}}{V_{Ed}}} \leq 3,0$$

Ergeben sich rechnerisch kleinere Werte als 1,0, so wird $\cot \theta = 1,0$ gesetzt.

Innerhalb der Datenbank wird die Bemessung für das im vorangegangenen Kapitel beschriebenen System wie folgt durchgeführt:

Bemessung der Verbundfuge nach Abs. 10.3.6

Ansatz: Die Fuge befindet sich in der Biegezugzone; dadurch $F_{cdj} = F_{cd}$.

$$\text{Schubkraft in Fuge } V_{Ed} = 1,0 \cdot 200 / 0,153 + 0 = 1307,2 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwerte der Oberflächenbeschaffenheit} \quad \beta_{ct} &= 2 \\ \mu &= 0,7 \end{aligned}$$

$$\text{Tragfähigkeit der Fuge} \quad V_{Rd,ct} = [0,042 \cdot 1,0 \cdot 2 \cdot 45^{1/3} - 0,7 \cdot 0] \cdot 1 = 298,78 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} \text{Neigung Druckstrebe } \max \cot \theta &= (1,2 \cdot 0,7 - 1,4 \cdot 0/25,5) / (1 - 298,8/1307,2) = 1,089 \\ \text{gewählt: } \cot \theta &= 1,089 \end{aligned}$$

$$\text{Tragfähigkeit der Druckstrebe:} \quad V_{Rd,max} = 1 \cdot 0,15 \cdot 0,75 \cdot 25,5 \cdot (1,09 + 0) / (1 + 1,09^2) = 1,458 \text{ MN}$$

$$\text{erf. Querkraftbewehrung} \quad \text{erf. } a_{sw} = (1307,2 + 0,7 \cdot 0 \cdot 1 \cdot 10^3) / (434,8 \cdot (1,09 + 0) \cdot 1) \cdot 10 = 27,61 \text{ cm}^2/\text{m}$$

2.5 Bemessungsvorschlag**2.5.1 Bemessung für Querkraft**

Die Bemessung der Querkrafttragfähigkeit basiert auf dem Konzept von DIN 1045-1. Die Nachweisführung bleibt hier unverändert. Einzige Ausnahme bildet die Ermittlung der möglichen Druckstrebenneigung. Für vorgespannte Elementdecken ist θ innerhalb folgender Grenzen zu wählen:

$$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,1}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} \leq 3,0$$

$$\text{mit } V_{Rd,c} = \beta_{ct} \cdot 0,10 \cdot \eta_1 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot b_w \cdot d$$

2 Bemessungskonzepte

Die Bemessung der Querkrafttragfähigkeit des Bauteils mit den Randbedingungen der Berechnung nach Kapitel 2.4.1.3 ergibt im Vergleich zu DIN 1045-1 einen leicht erhöhten, erforderlichen Grad der Querkraftbewehrung.

Bauteilbemessung nach Vorschlag

Querkraftbemessung nach Vorschlag

nach DIN 1045-1, einzige Änderung: Ermittlung $\cot \theta$:

Tragfähigkeit der Platte ohne Querkraftbewehrung

$$V_{Rd,ct} = [0,1 \cdot 2 \cdot (100 \cdot 0,006 \cdot 45)^{1/3} - 0,12 \cdot 0] \cdot 1 \cdot 0,17 = 0,104 \text{ MN}$$

Tragfähigkeit der Platte mit Querkraftbewehrung

$$\text{Betontraganteil } V_{Rd,c} = 0,24 \cdot 1,0 \cdot 45^{1/3} \cdot 1 \cdot 0,12 = 0,102 \text{ MN}$$

$$\text{Neigung Druckstrebe } \max \cot \theta = 1,1 / (1 - 102,4/200) = 2,255$$

gewählt: $\cot \theta = 2,255$

Tragfähigkeit der Druckstrebe:

$$V_{Rd,max} = 1 \cdot 0,12 \cdot 0,75 \cdot 25,5 \cdot (2,25 + 0) / (1 + 2,25^2) = 0,850 \text{ MN}$$

erf. Querkraftbewehrung

$$\text{erf. } a_{sw} = 200 / (434,8 \cdot 0,12 \cdot (2,25 + 0) \cdot 1) \cdot 10 = 17,00 \text{ cm}^2/\text{m}$$

2.5.2 Bemessung der Verbundfuge

Die Bemessung der Verbundfuge wird wie folgt vorgeschlagen:

Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft ohne Verbundbewehrung:

$$\text{Gl (84)} \quad v_{Rd,ct} = [0,042 \cdot \eta_1 \cdot \beta_{ct} \cdot f_{ck}^{1/3} - \mu \cdot \sigma_{Nd}] \cdot b$$

Bemessungswert der aufnehmbaren Schubkraft mit Verbundbewehrung

$$v_{Rd,sy} = [0,042 \cdot \eta_1 \cdot \beta_{ct} \cdot f_{ck}^{1/3} - \mu \cdot \sigma_{Nd} + \rho_w \cdot f_{yd} \cdot (\mu \cdot \sin \alpha + \cos \alpha)] \cdot b$$

Bemessung der Verbundfuge nach Vorschlag

Tragfähigkeit der Fuge ohne Verbundbewehrung

$$V_{Rd,ct} = [0,042 \cdot 1,0 \cdot 2 \cdot 45^{1/3} - 0,7 \cdot 0] \cdot 1 = 298,78 \text{ kN/m}$$

Tragfähigkeit der Druckstreben:

$$0,2 \text{ fcd} = 0,2 \cdot 25,5 = 5,100 \text{ MN}$$

erf. Querkraftbewehrung

$$\text{erf. } a_{sw} = (1307,2 - 298,8) / (434,8 \cdot (0,7 \cdot 1 + 0)) \cdot 1 \cdot 10 = 33,13 \text{ cm}^2/\text{m}$$

maßgebend:

$$\text{erforderliche Querkraftbewehrung: } \text{erf } a_{sw} = 33,13 \text{ cm}^2/\text{m}$$

3 ERGEBNISSE DER BEMESSUNGEN

Berechnungsumfang

Plattenhöhe		$h = 16 \text{ cm}$
		$h = 18 \text{ cm}$
		$h = 20 \text{ cm}$
		$h = 30 \text{ cm}$
		$h = 40 \text{ cm}$
Betonfestigkeitsklassen		C20/25
		C30/37
		C45/55
Neigungswinkel der Querkraftbewehrung		$\alpha = 90^\circ$
		$\alpha = 45^\circ$
Belastung	geringe Lasten	$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 0,3 \text{ in [kN]}$
		$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 0,6 \text{ in [kN]}$
		$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 0,9 \text{ in [kN]}$
		$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 1,15 \text{ in [kN]}$
		$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 1,4 \text{ in [kN]}$
	hohe Lasten	$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 1,5 \text{ in [kN]}$
		$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 2,5 \text{ in [kN]}$
		$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 3,5 \text{ in [kN]}$
		$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 4,0 \text{ in [kN]}$
		$V_{Ed} = (h[\text{cm}])^{3/2} \cdot 4,5 \text{ in [kN]}$
Oberflächenbeschaffenheit		verzahnt
		rau
		glatt
		sehr glatt

3 Ergebnisse der Bemessungen

3.1 Erforderliche Querkraftbewehrung

3.1.1 Betonfestigkeitsklasse C20/25

3.1.1.1 Neigung der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 90^\circ$

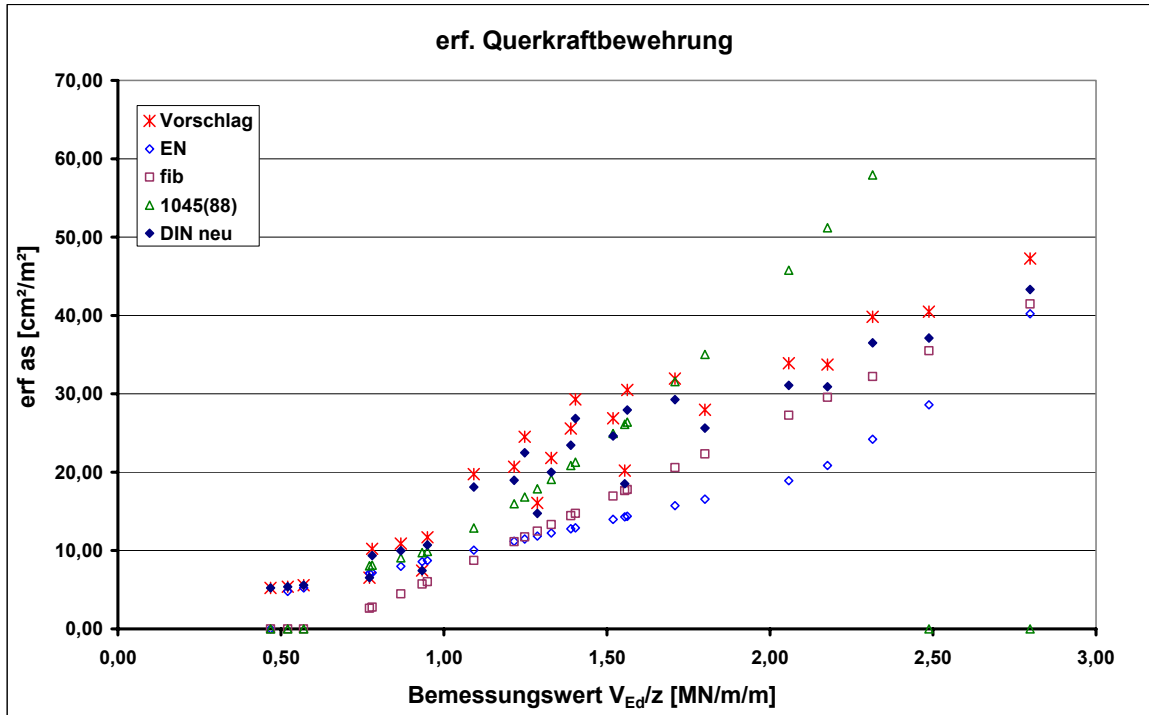


Abbildung 1: erforderliche Querkraftbewehrung, C20/25, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau;

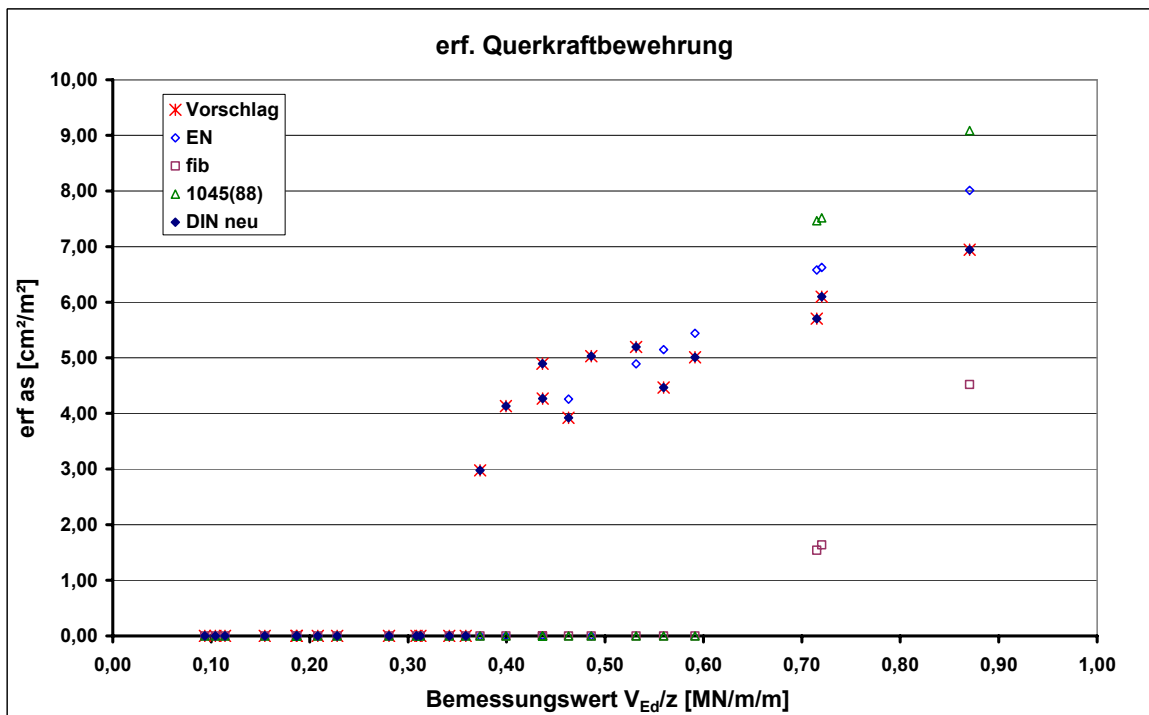


Abbildung 2: erforderliche Querkraftbewehrung, C20/25, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

3.1.1.2 Neigung der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 45^\circ$

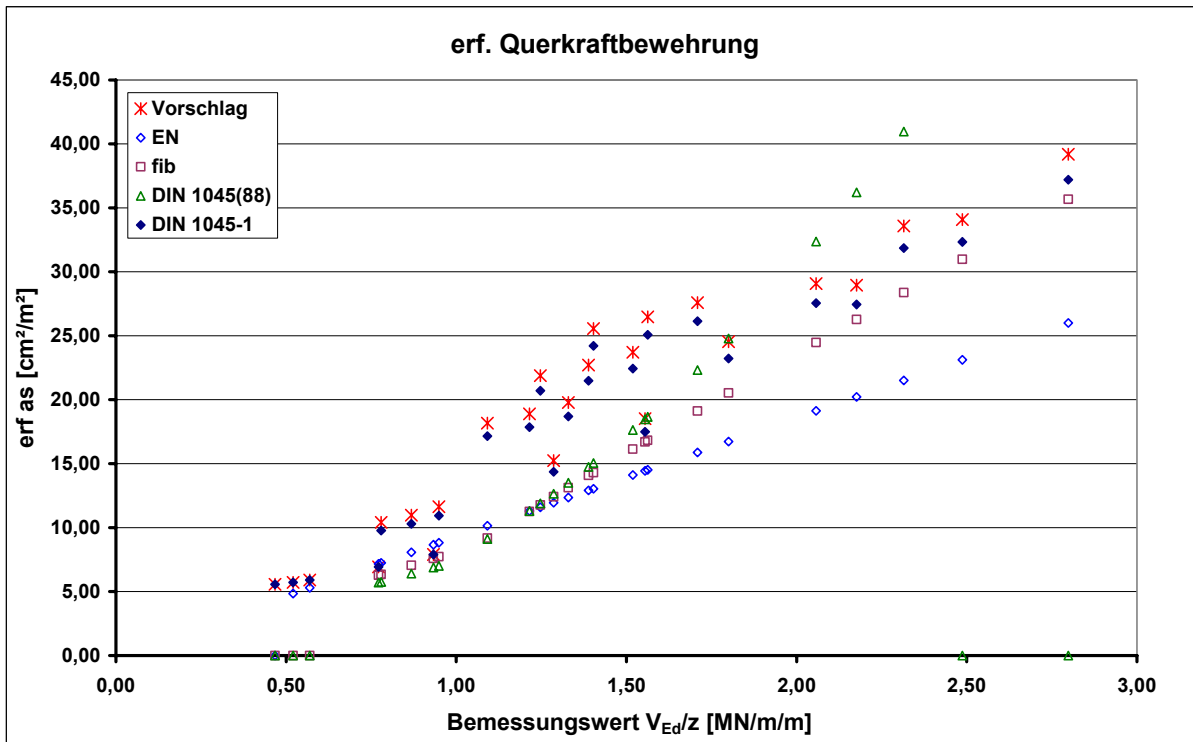


Abbildung 3: erforderliche Querkraftbewehrung, C20/25, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau;

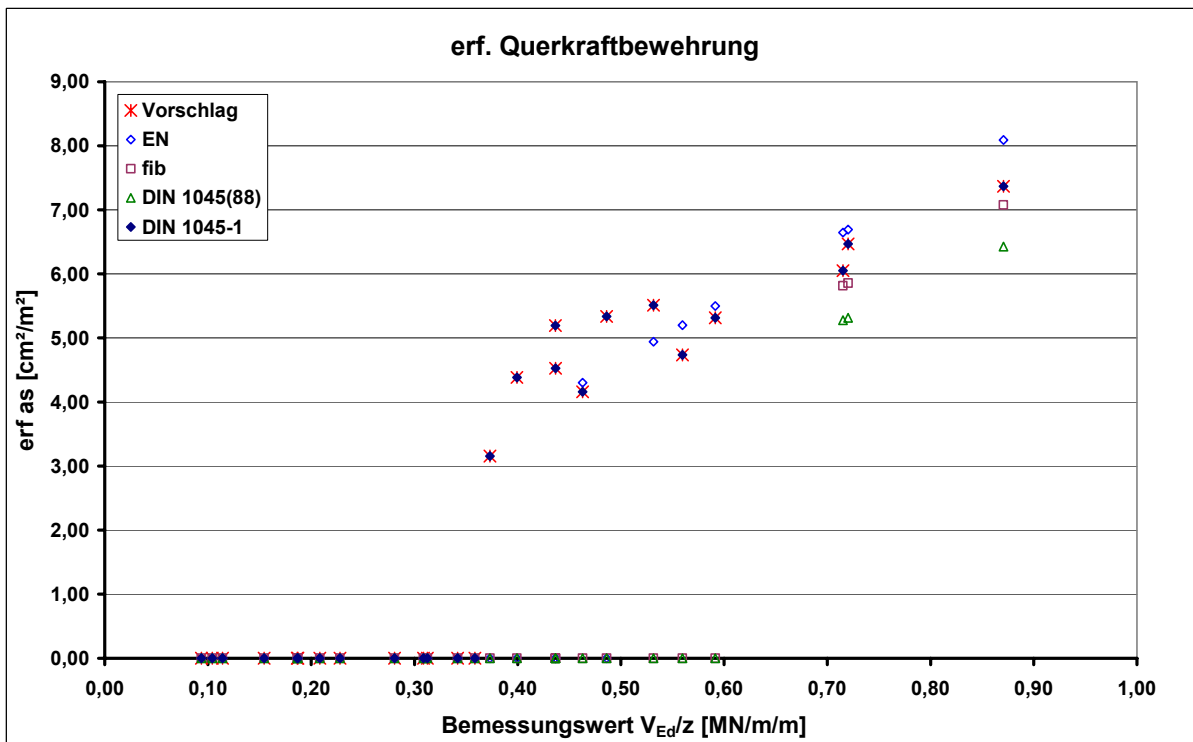


Abbildung 4: erforderliche Querkraftbewehrung, C20/25, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau;

3 Ergebnisse der Bemessungen

3.1.2 Betonfestigkeitsklasse C30/37

3.1.2.1 Neigung der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 90^\circ$

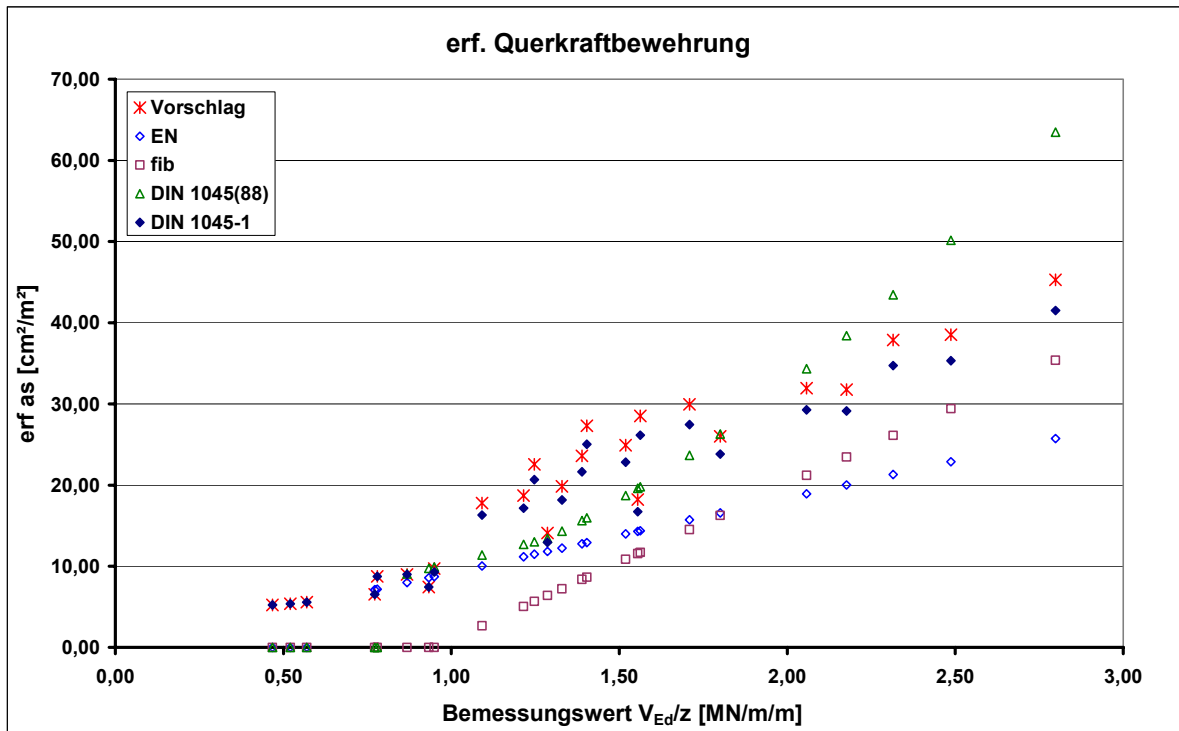


Abbildung 5: erforderliche Querkraftbewehrung, C30/37, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau;

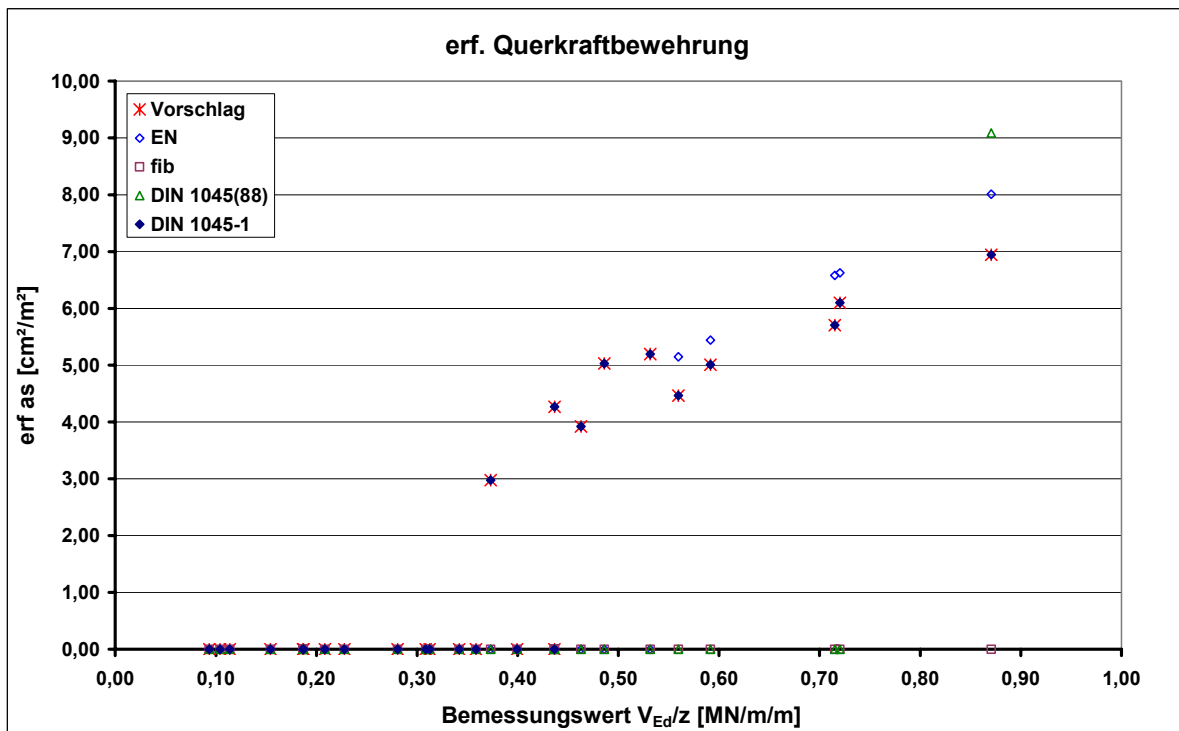


Abbildung 6: erforderliche Querkraftbewehrung, C30/37, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

3.1.2.2 Neigung der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 45^\circ$

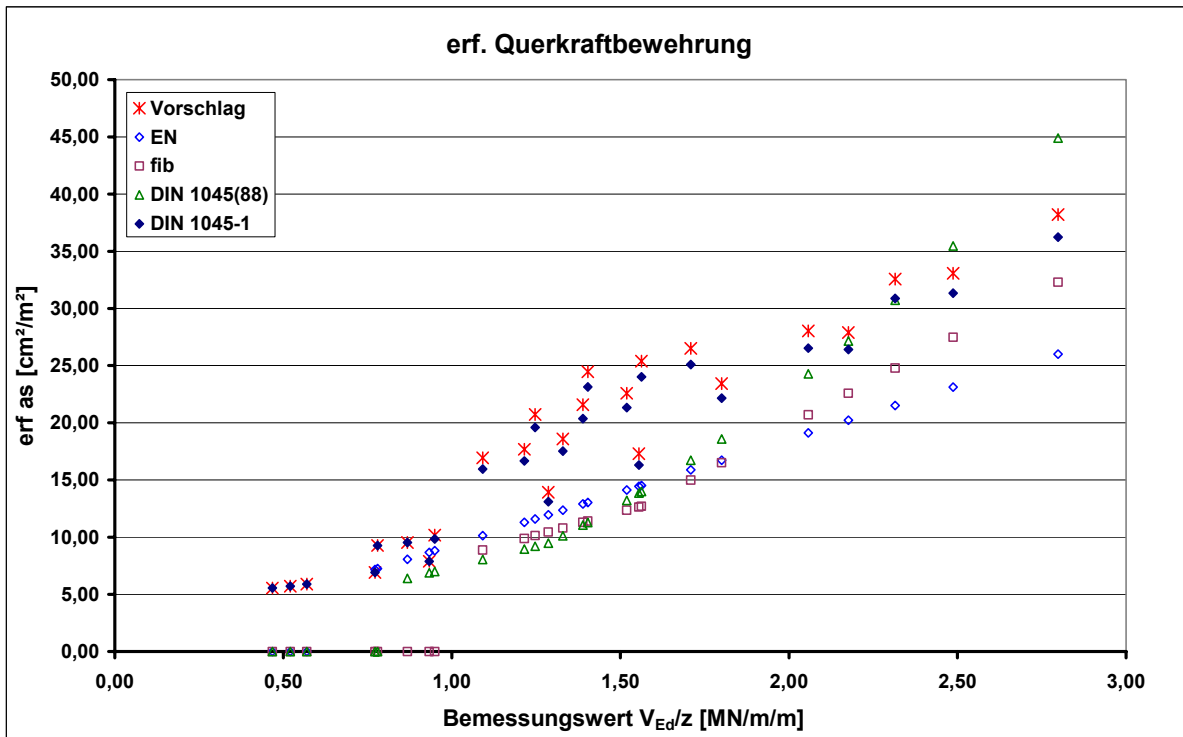


Abbildung 7: erforderliche Querkraftbewehrung, C30/37, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

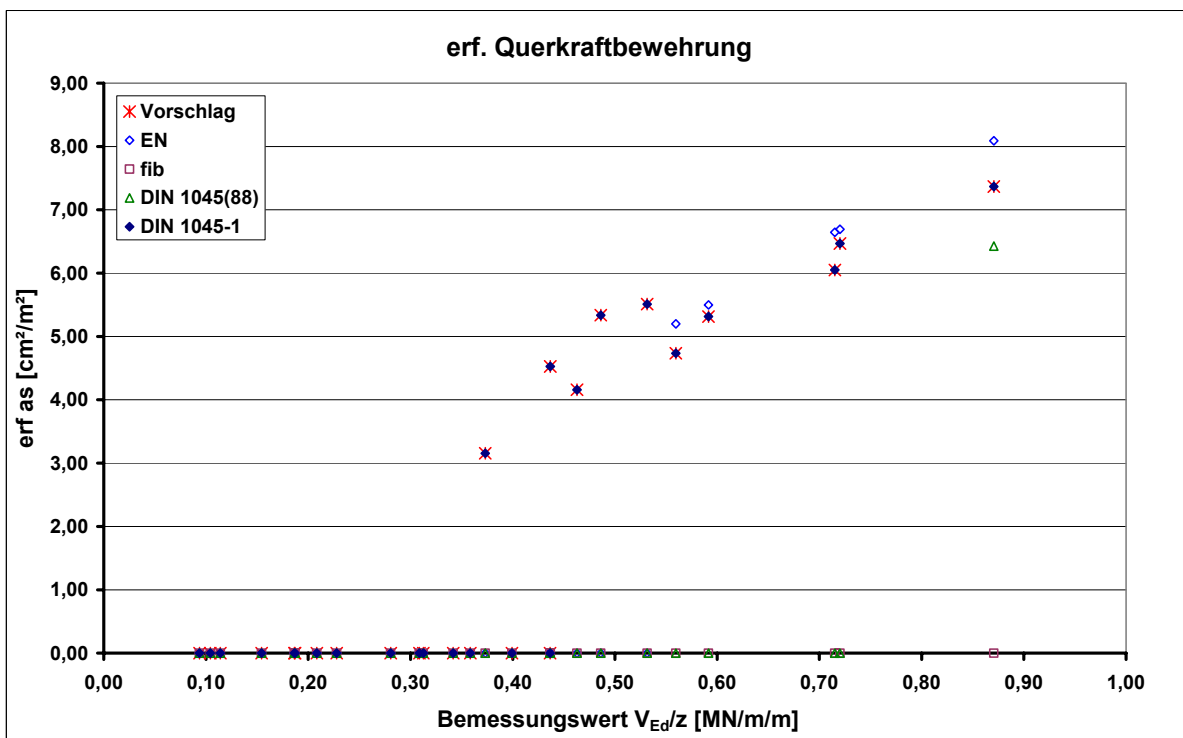


Abbildung 8: erforderliche Querkraftbewehrung, C30/37, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

3.1.3 Betonfestigkeitsklasse C45/55

3.1.3.1 Neigung der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 90^\circ$

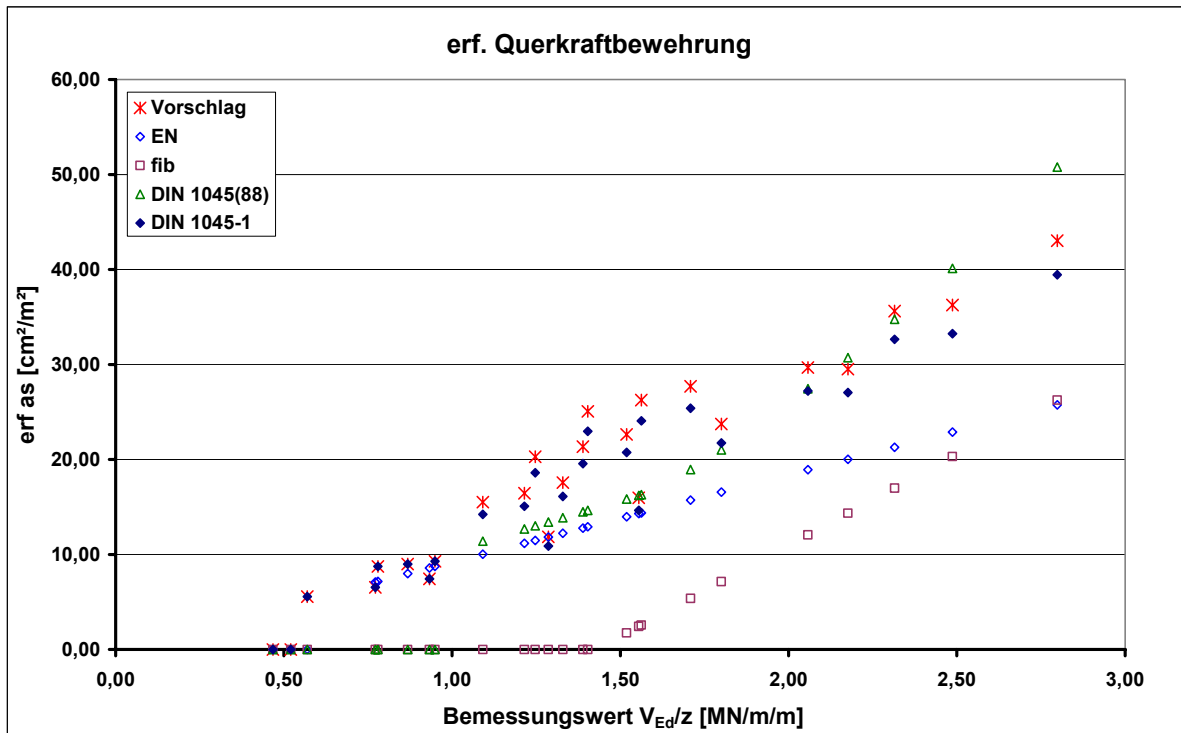


Abbildung 9: erforderliche Querkraftbewehrung, C45/55, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

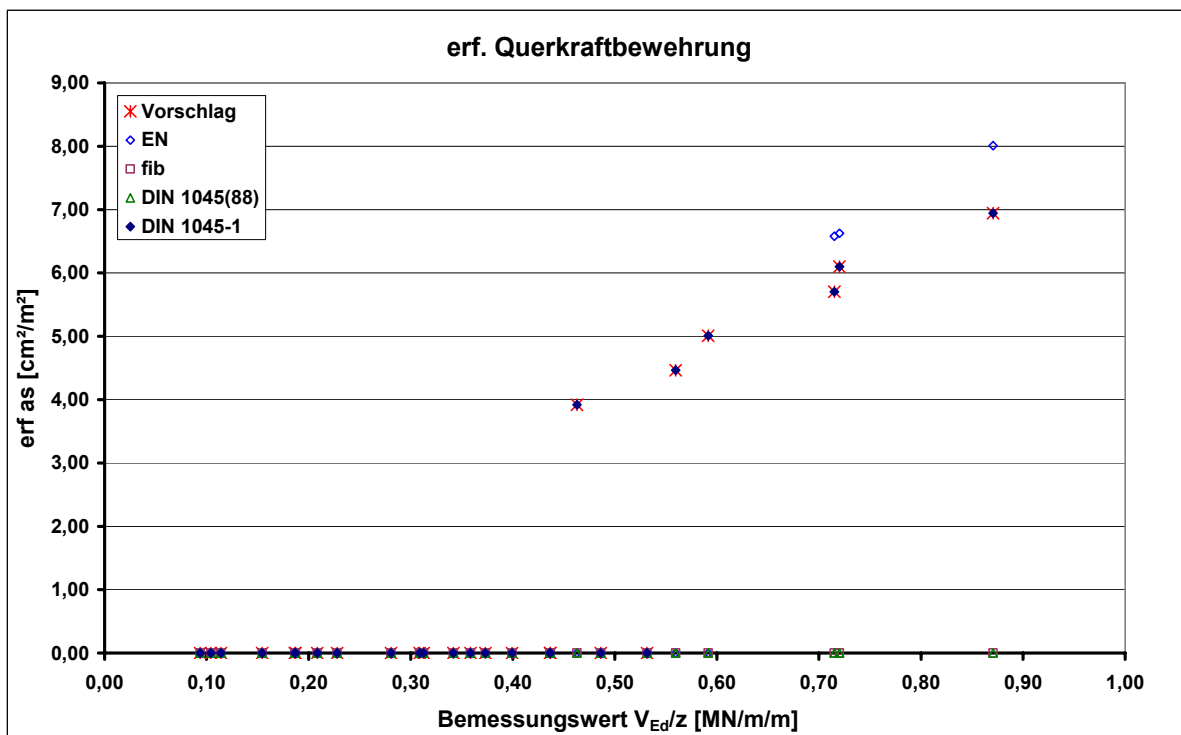


Abbildung 10: erforderliche Querkraftbewehrung, C45/55, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

3.1.3.2 Neigung der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 45^\circ$

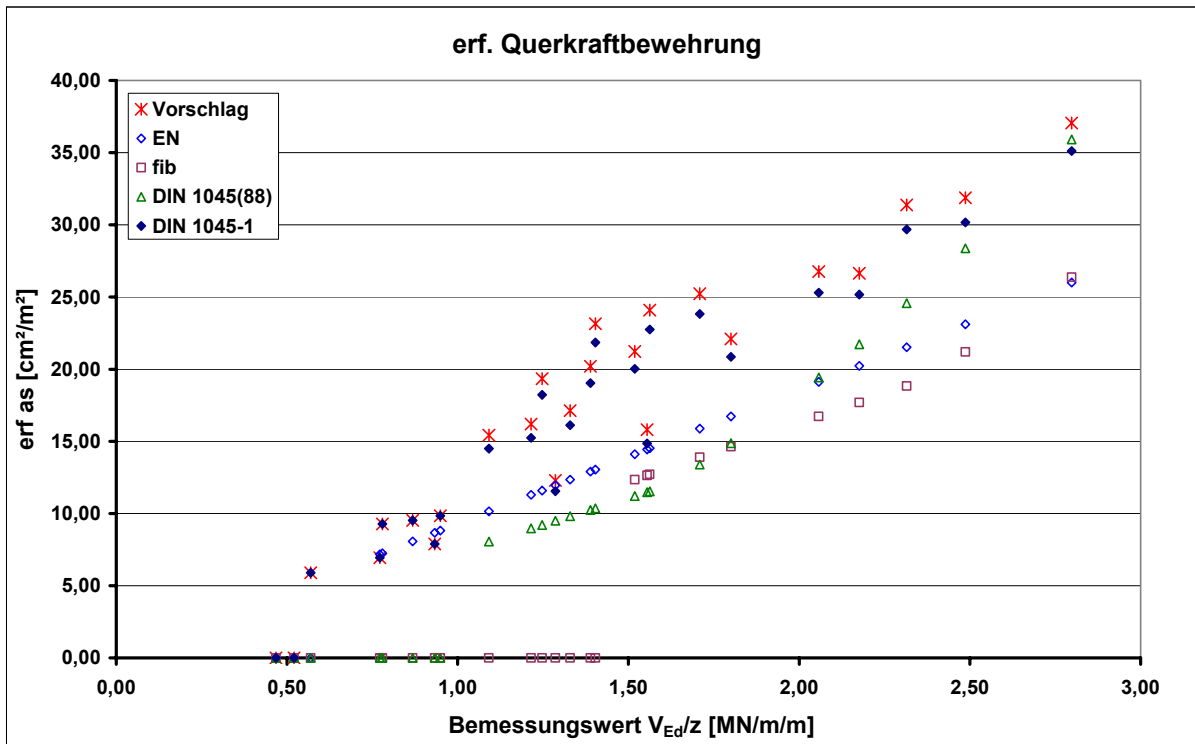


Abbildung 11: erforderliche Querkraftbewehrung, C45/55, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

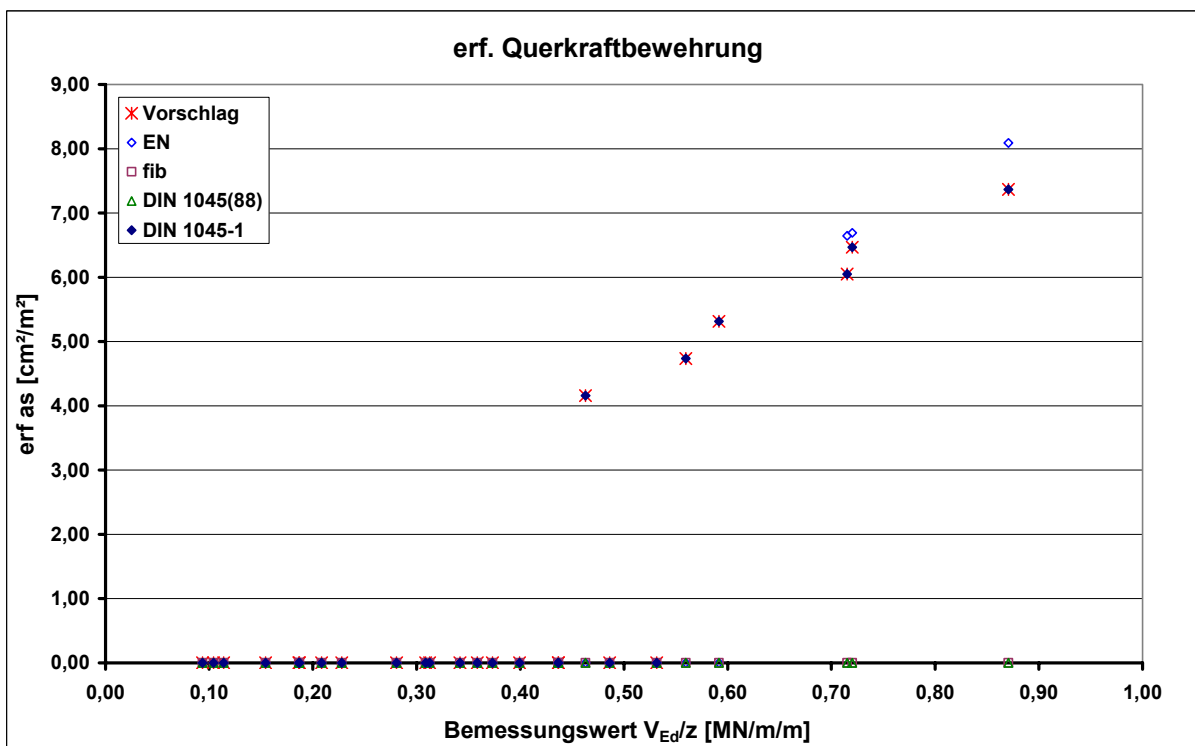


Abbildung 12: erforderliche Querkraftbewehrung, C45/55, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

3.2 Erforderliche Verbundbewehrung

3.2.1 Betonfestigkeitsklasse C20/25

3.2.1.1 Neigung der Verbundbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 90^\circ$

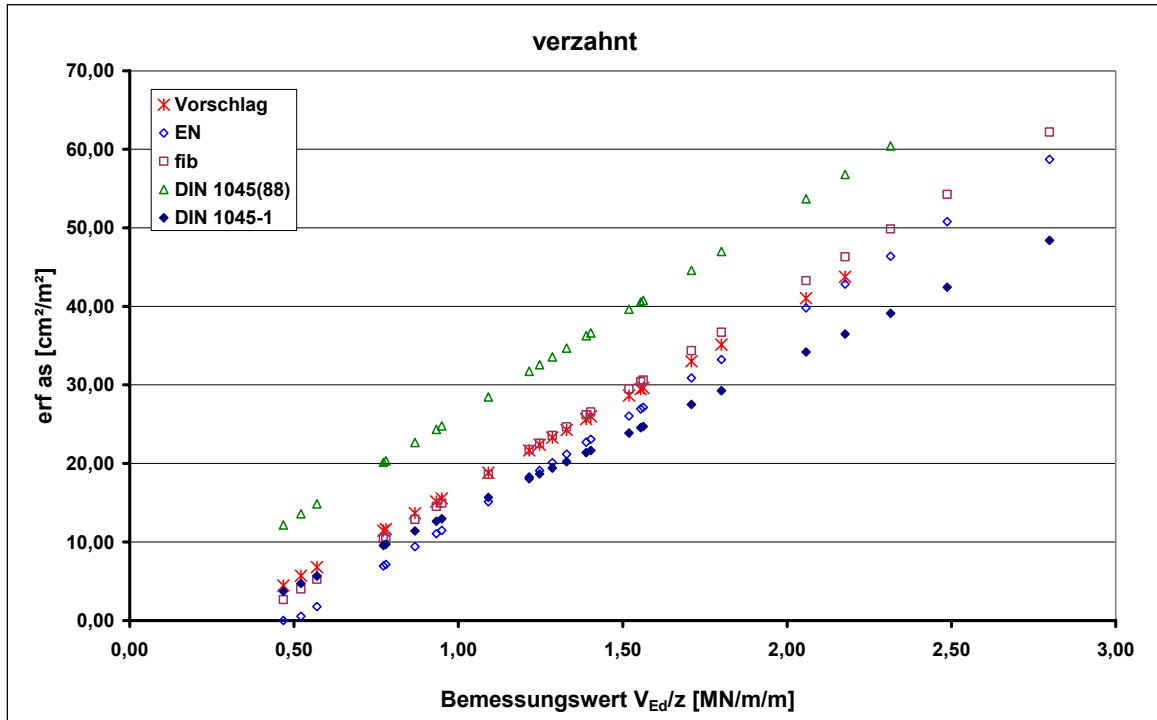


Abbildung 13: erforderliche Verbundbewehrung - verzahnt, C20/25, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau;

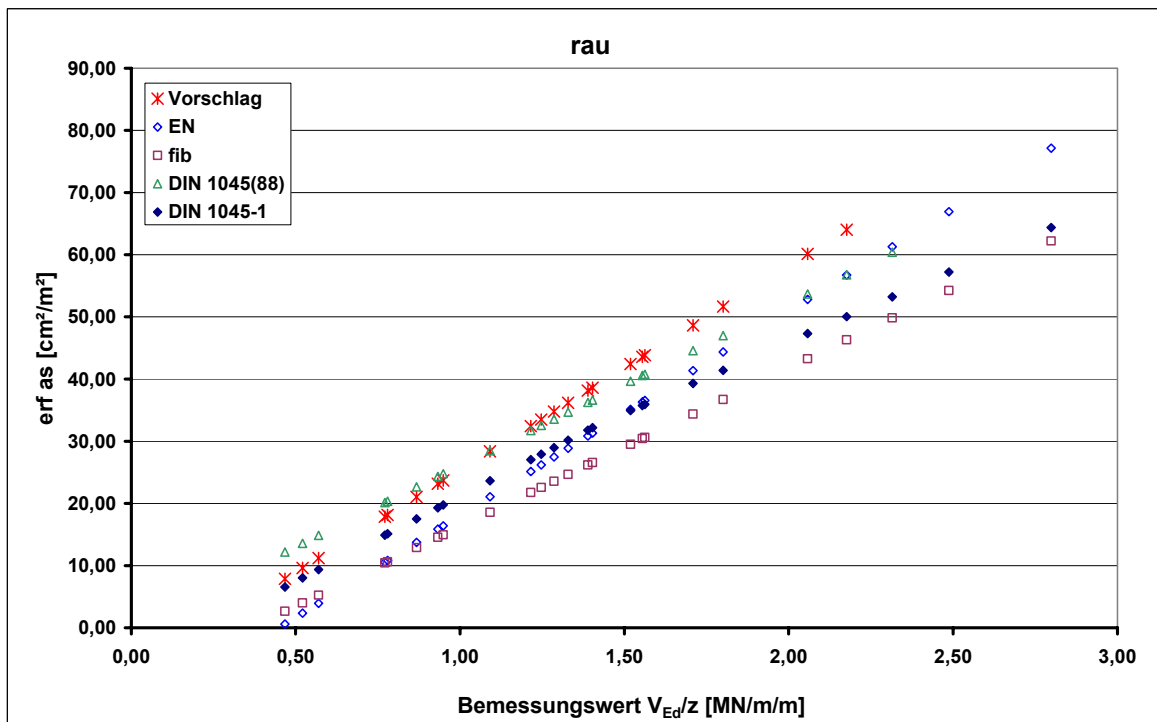


Abbildung 14: erforderliche Verbundbewehrung - rau, C20/25, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

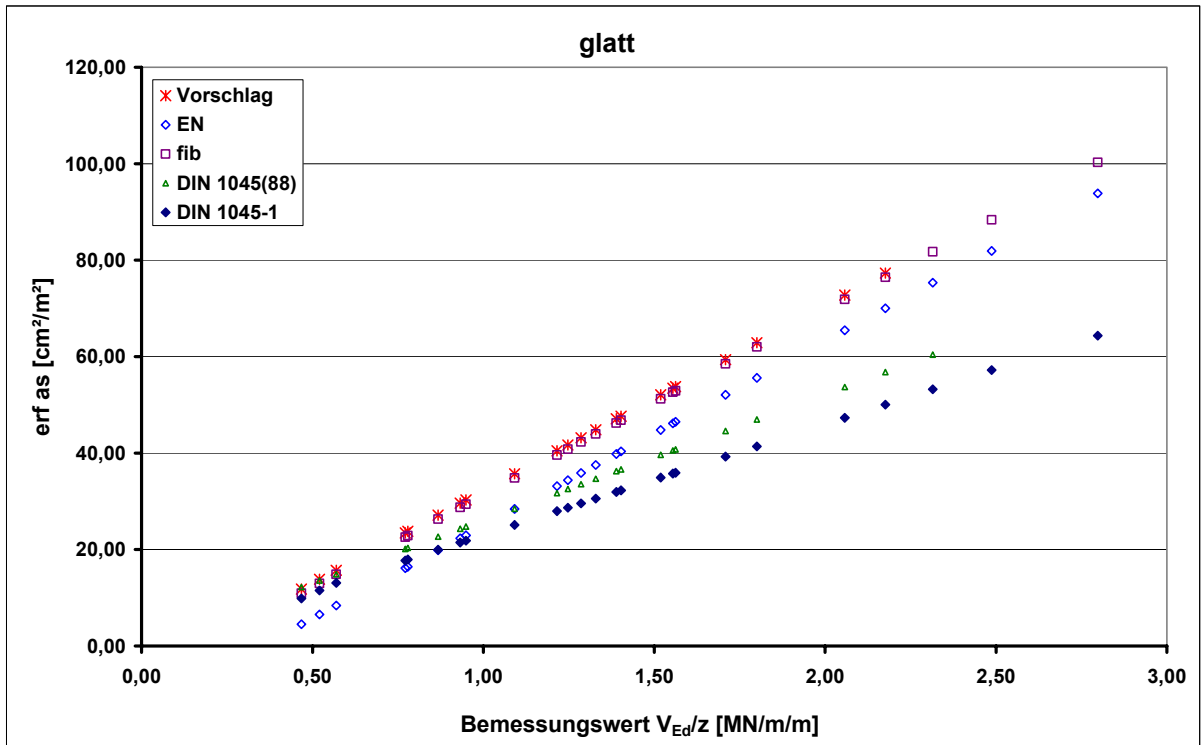


Abbildung 15: erforderliche Verbundbewehrung - glatt, C20/25, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

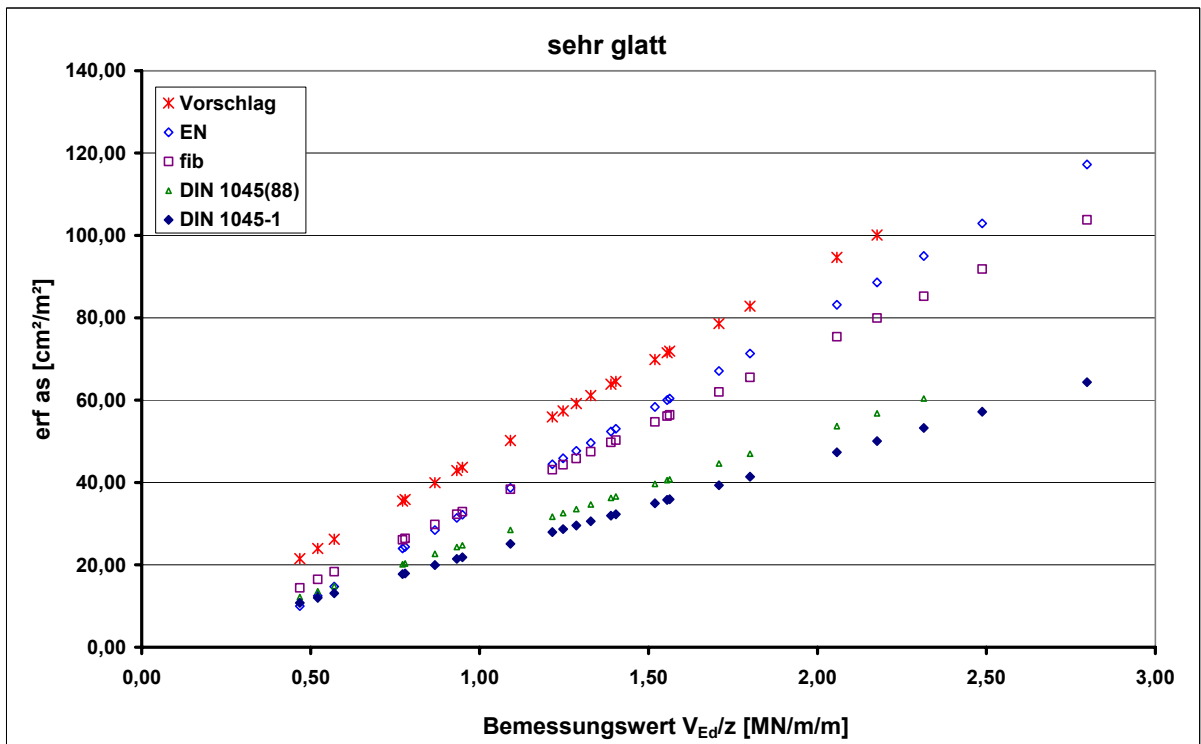


Abbildung 16: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C20/25, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

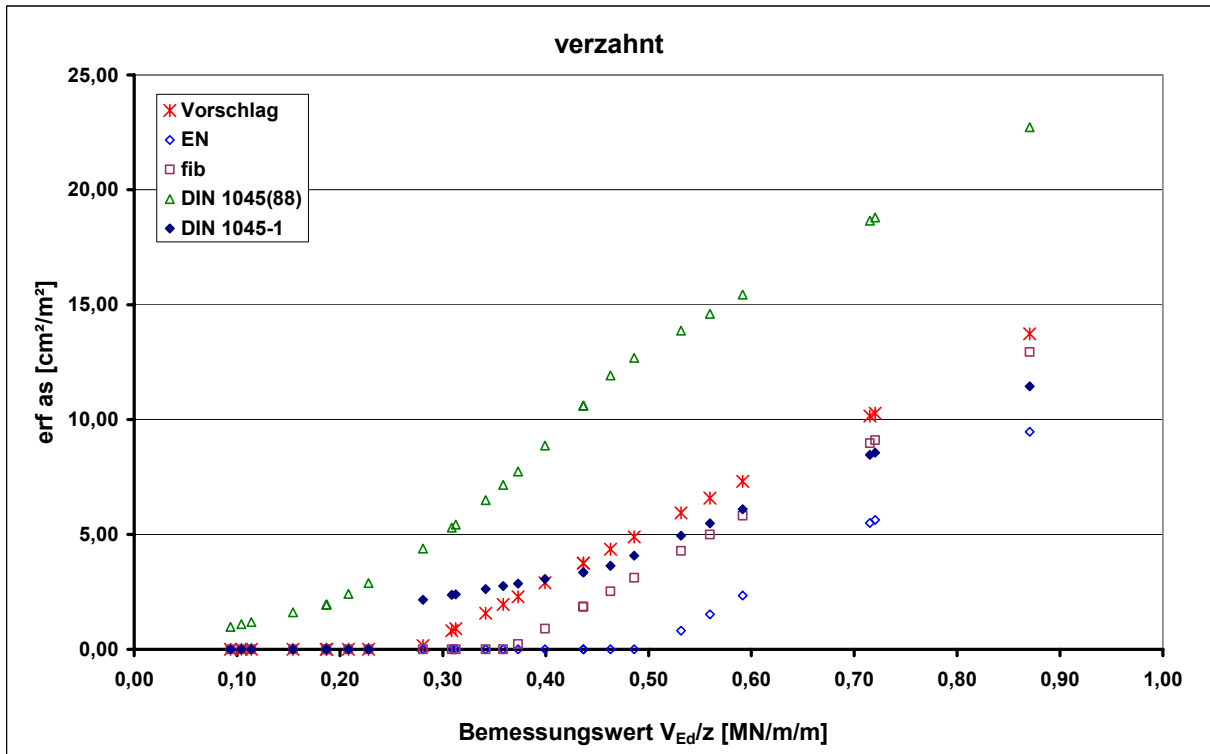


Abbildung 17: erforderliche Verbundbewehrung - verzahnt, C20/25, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau;

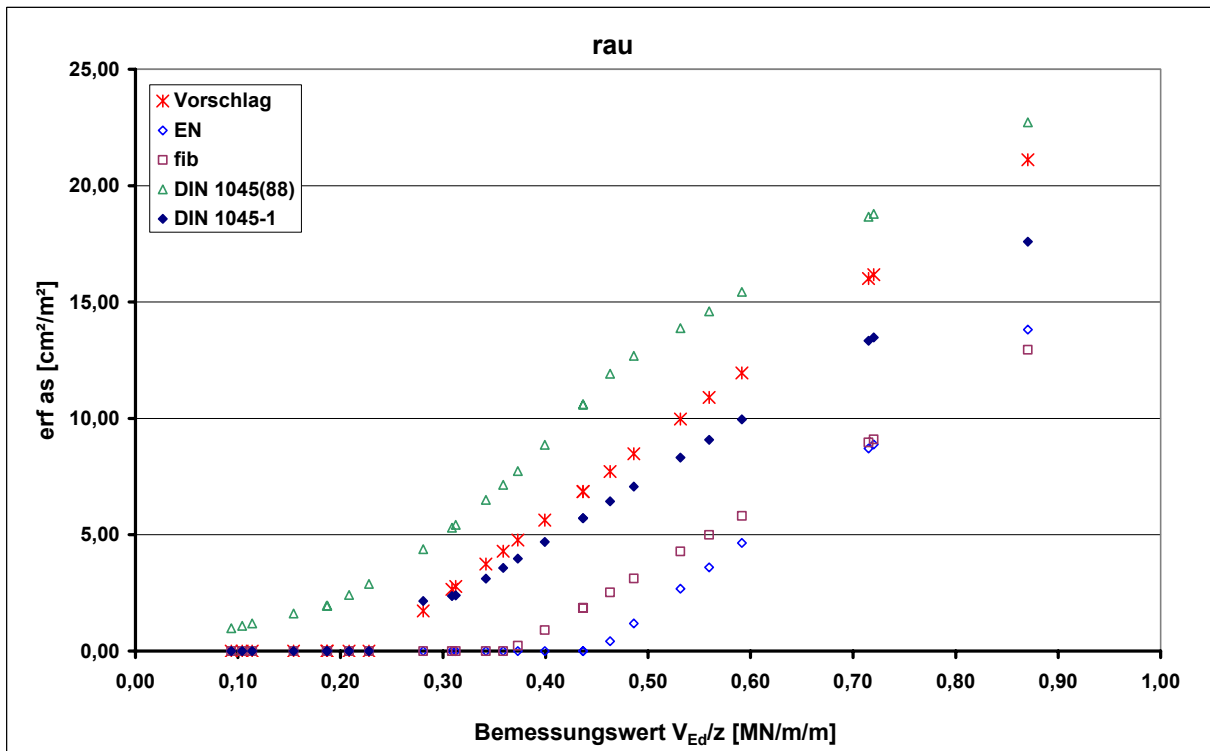


Abbildung 18: erforderliche Verbundbewehrung - rau, C20/25, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

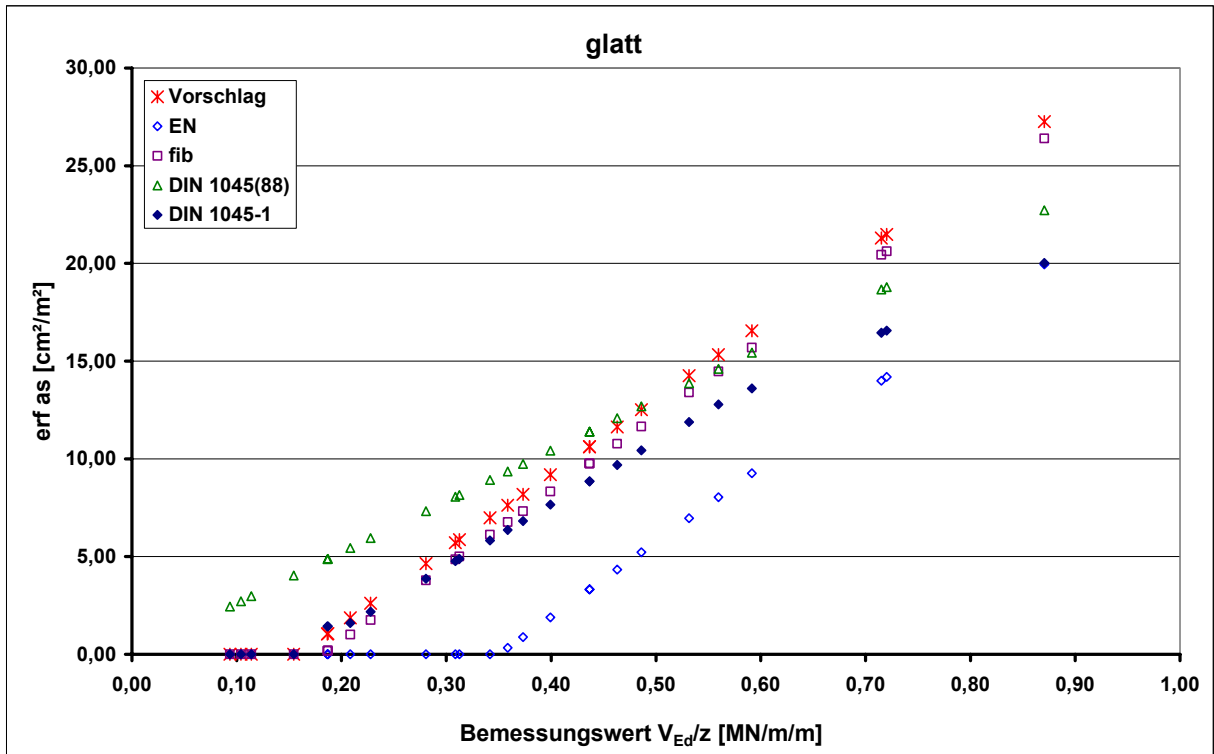


Abbildung 19: erforderliche Verbundbewehrung - glatt, C20/25, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

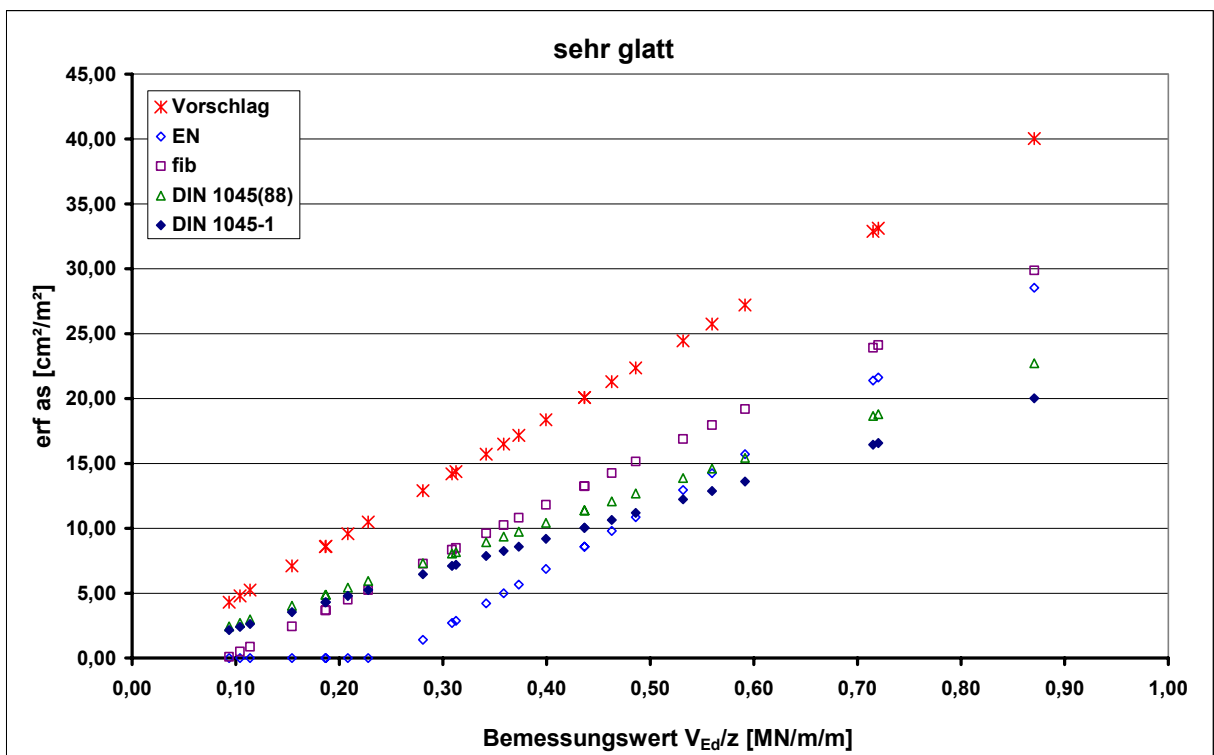


Abbildung 20: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C20/25, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

3.2.1.2 Neigung der Verbundbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 45^\circ$

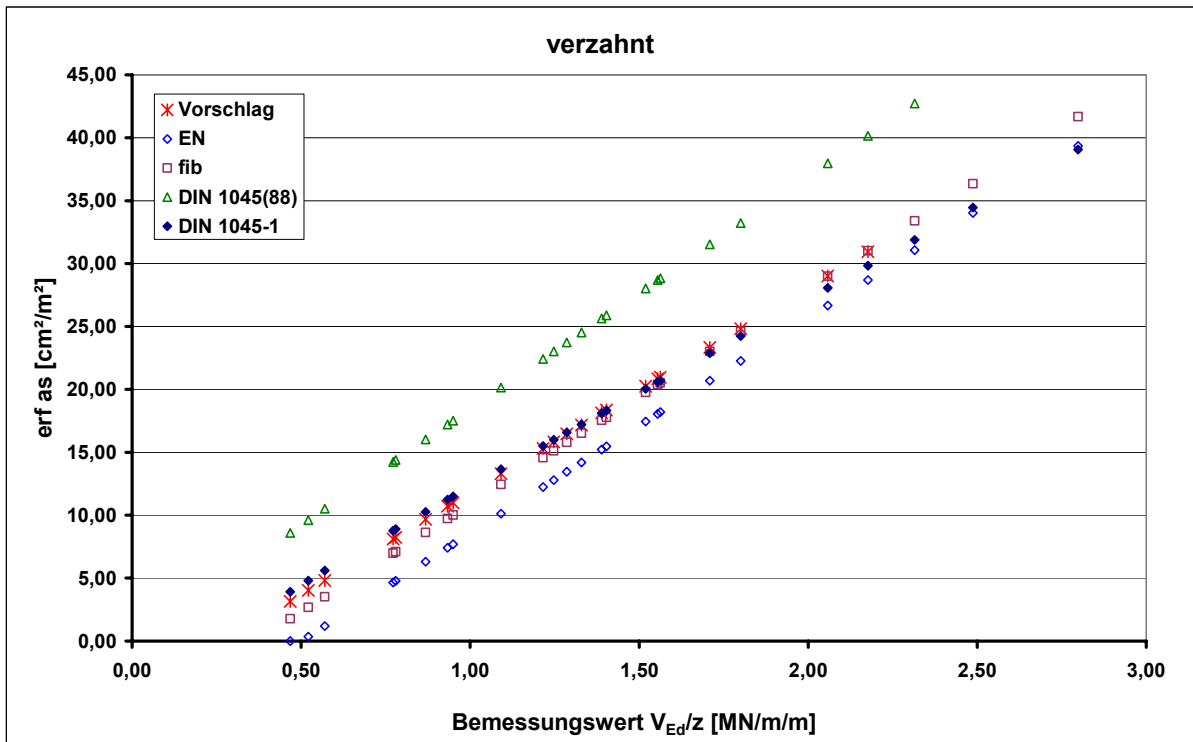


Abbildung 21: erforderliche Verbundbewehrung - verzahnt, C20/25, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

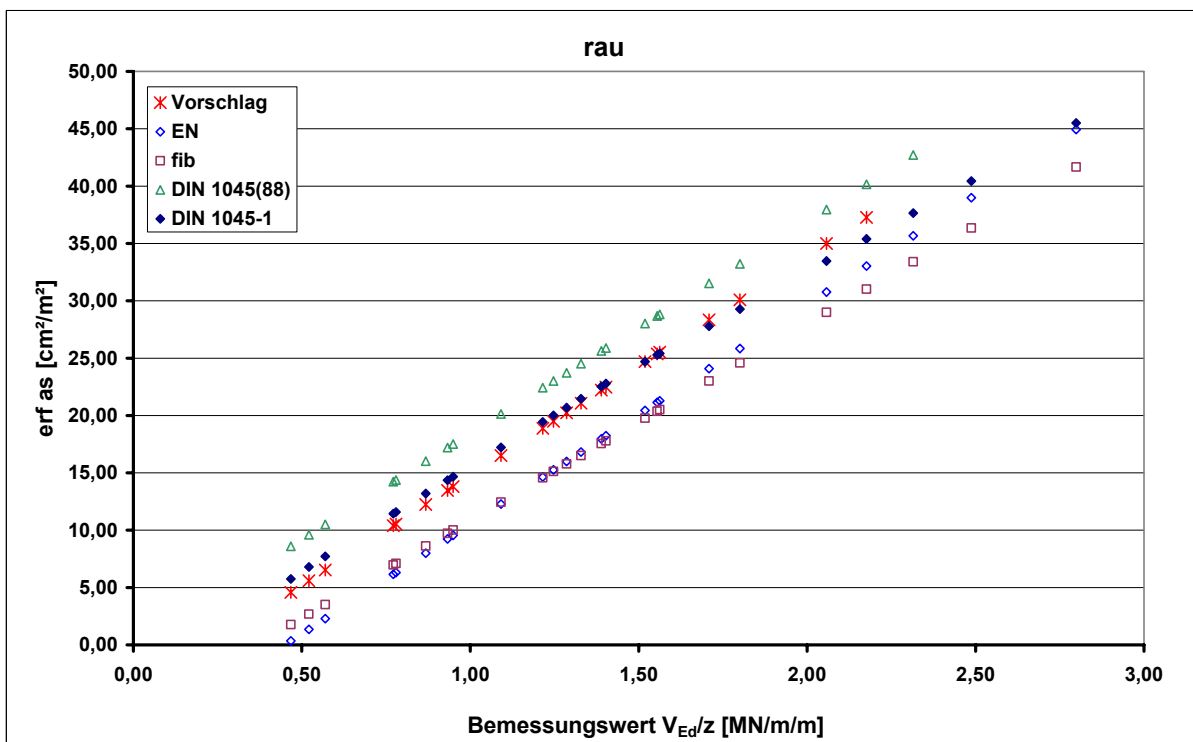


Abbildung 22: erforderliche Verbundbewehrung - rau, C20/25, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

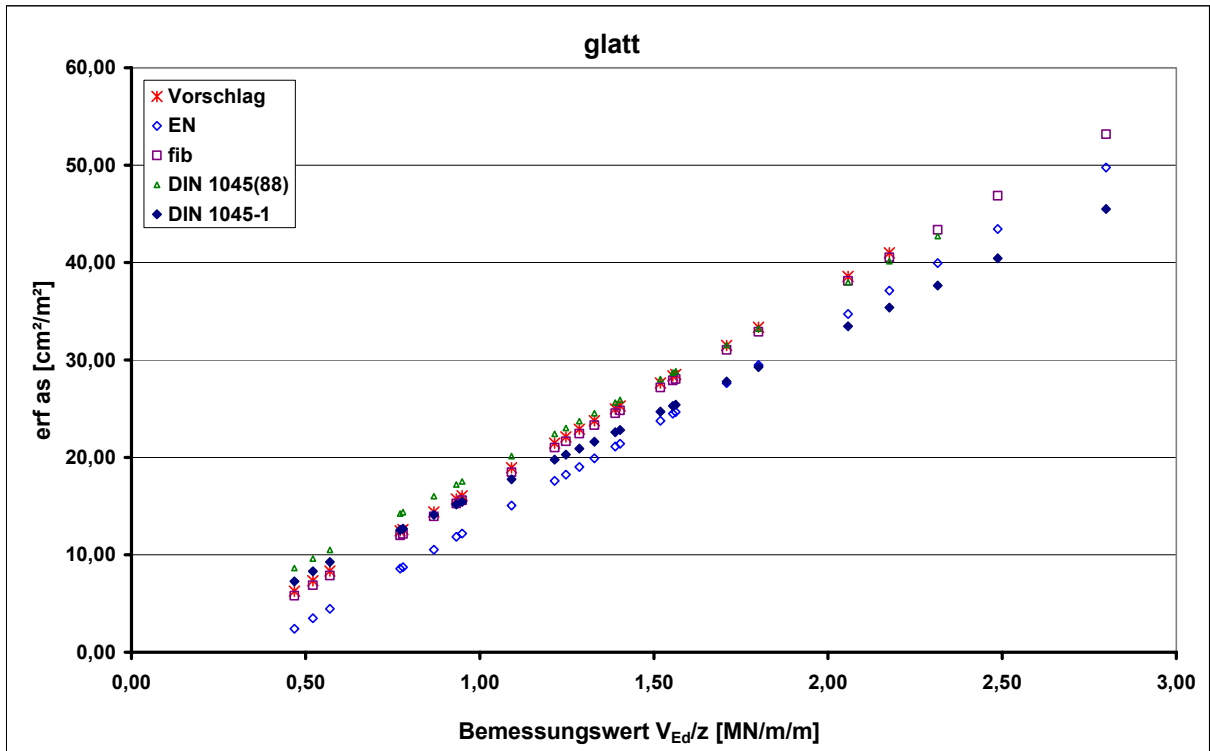


Abbildung 23: erforderliche Verbundbewehrung - glatt, C20/25, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

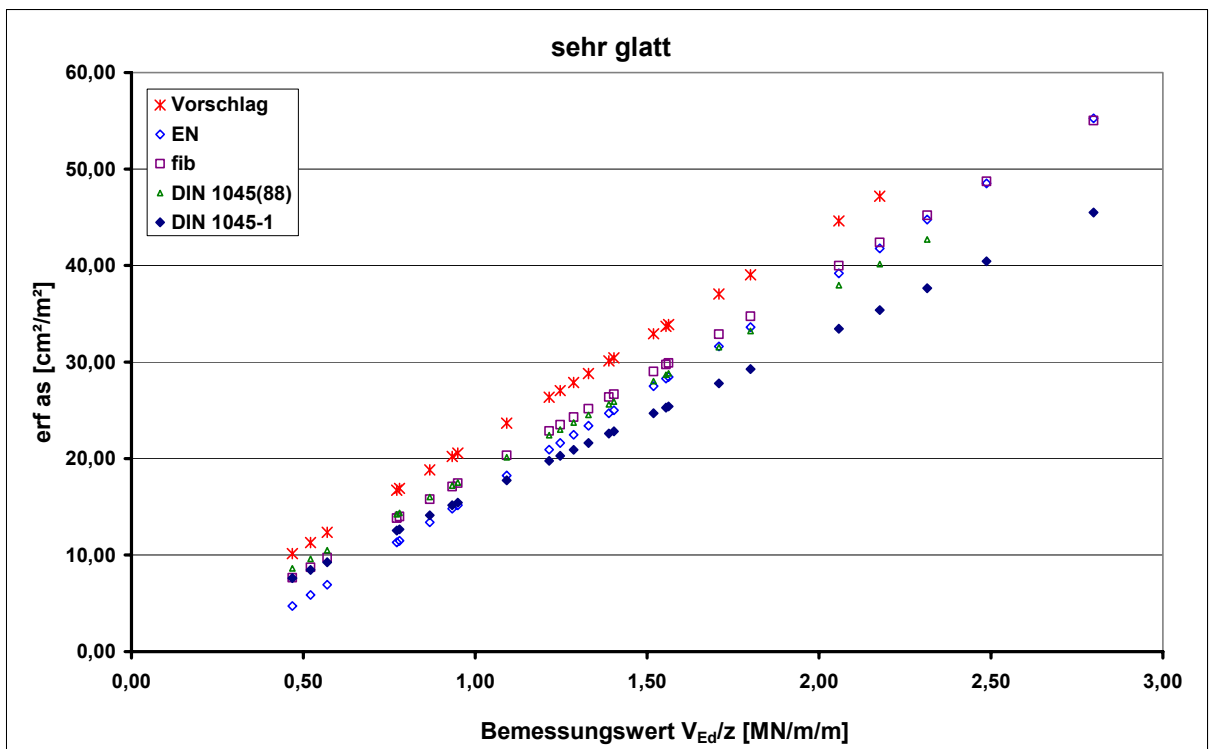


Abbildung 24: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C20/25, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

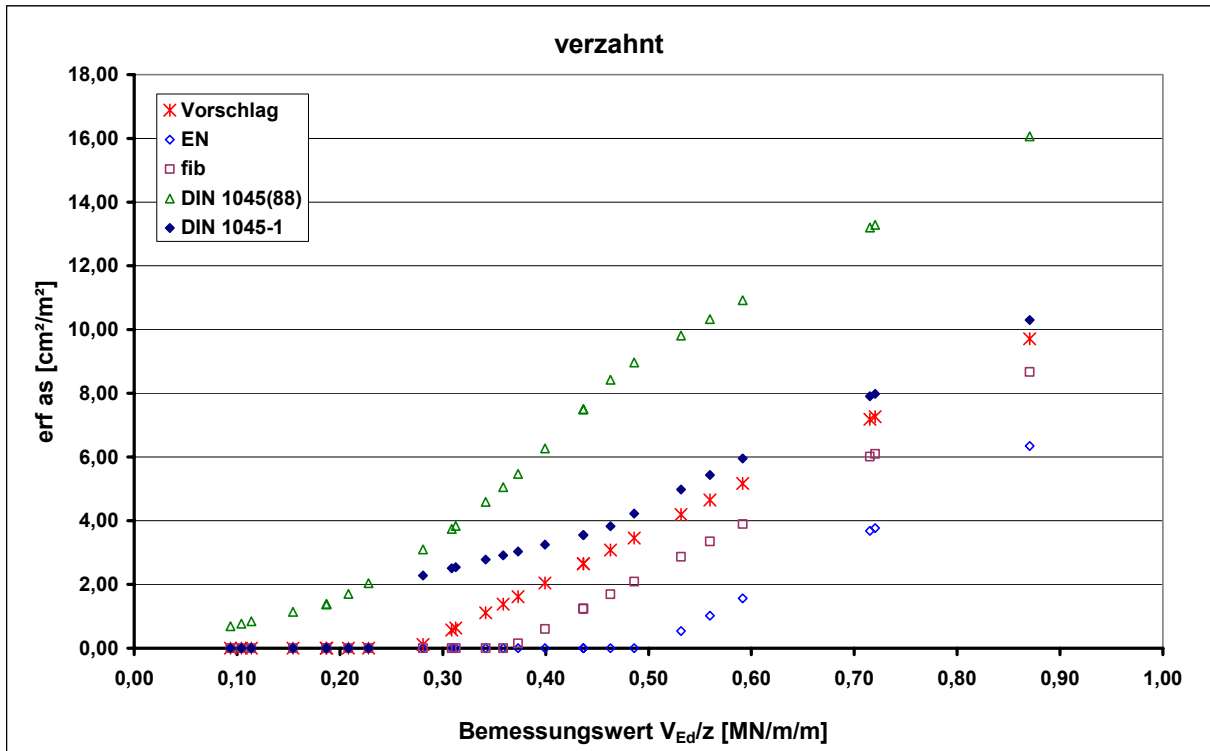


Abbildung 25: erforderliche Verbundbewehrung – verzahnt, C20/25, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

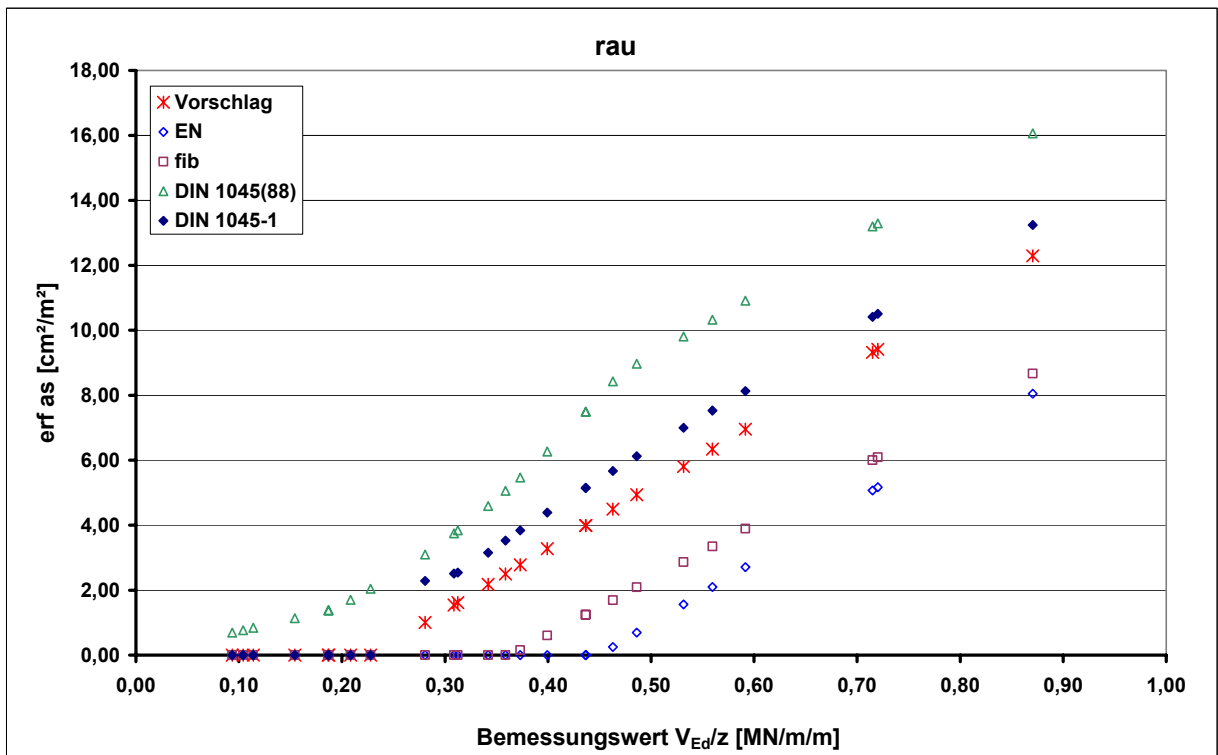


Abbildung 26: erforderliche Verbundbewehrung – rau, C20/25, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

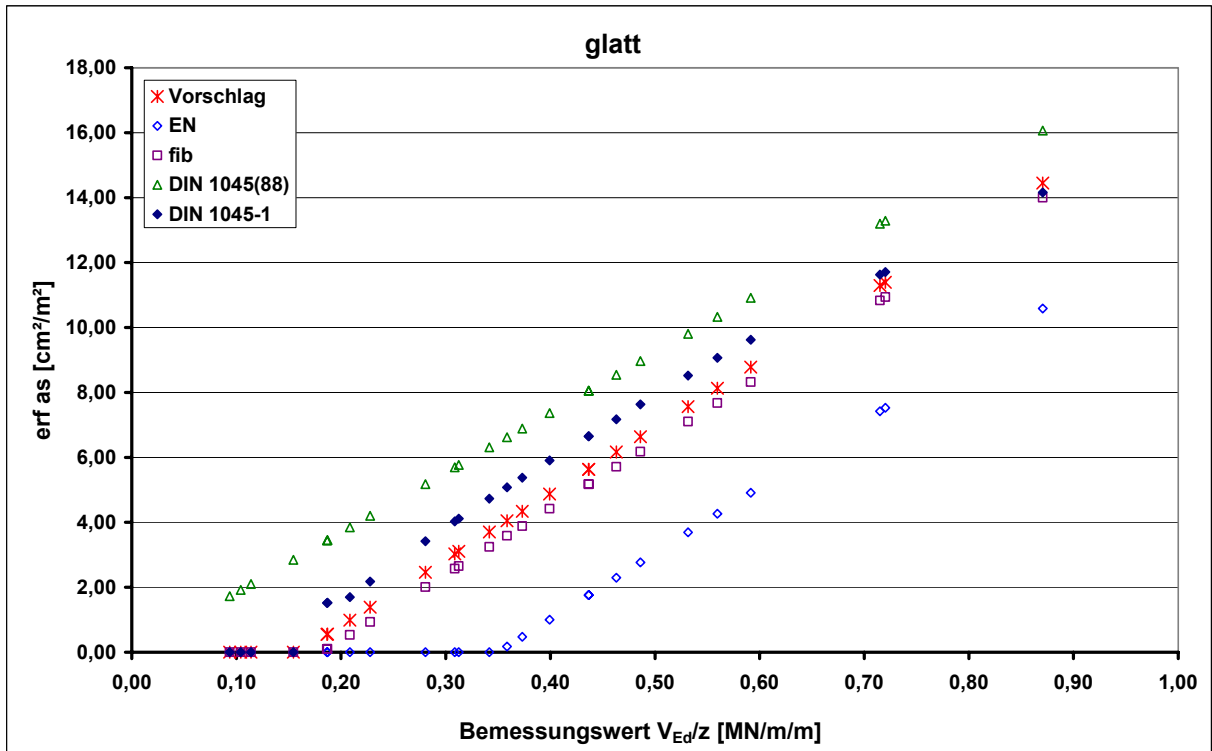


Abbildung 27: erforderliche Verbundbewehrung - glatt, C20/25, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

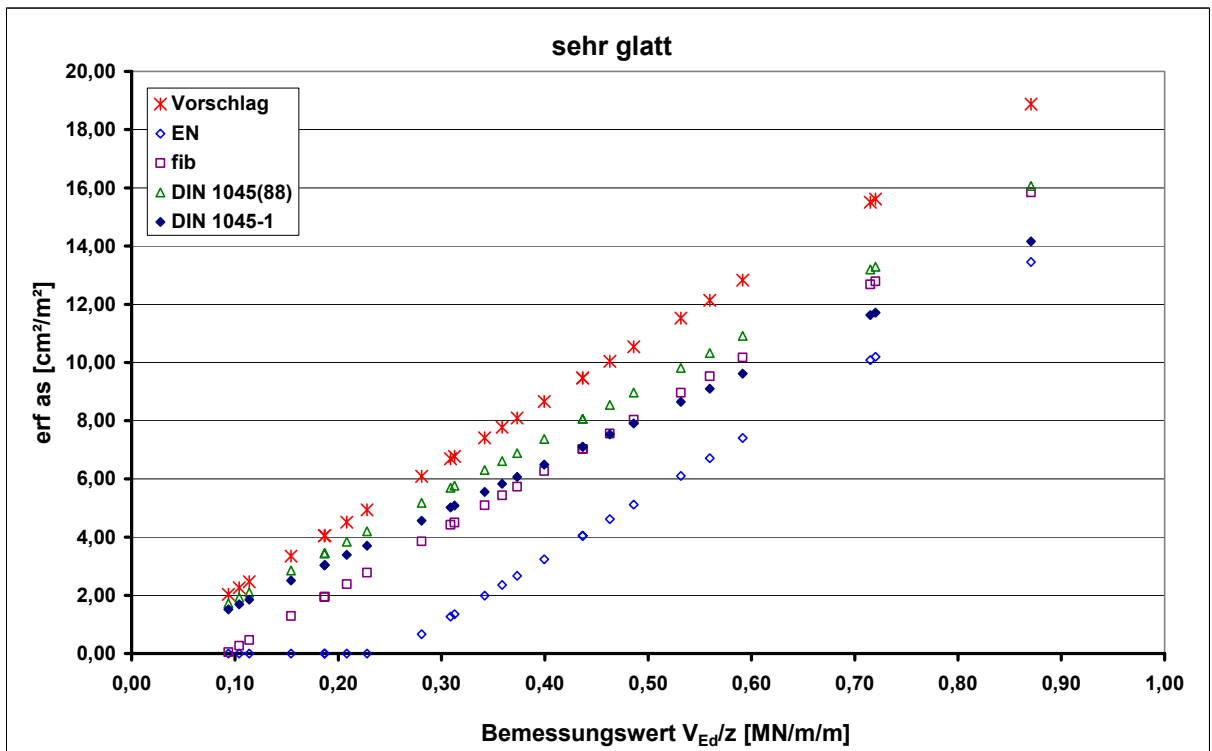


Abbildung 28: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C20/25, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

3.2.2 Betonfestigkeitsklasse C30/37

3.2.2.1 Neigung der Verbundbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 90^\circ$

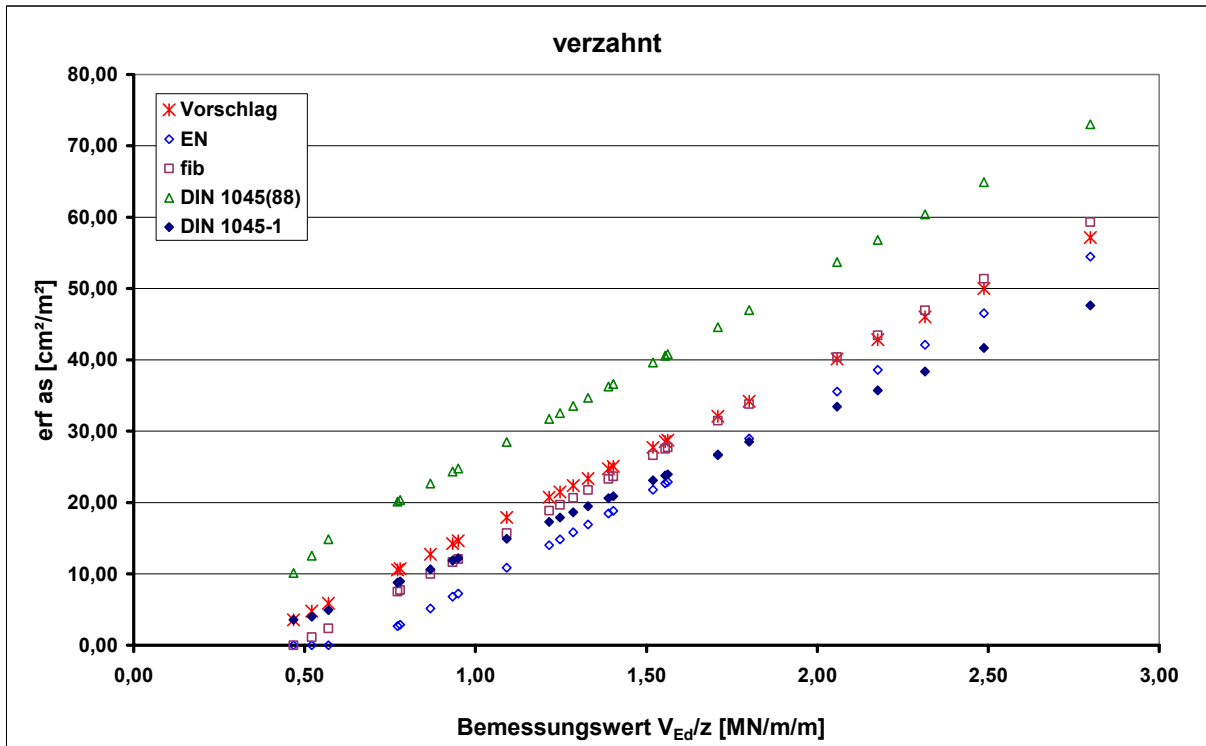


Abbildung 29: erforderliche Verbundbewehrung – verzahnt, C30/37, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

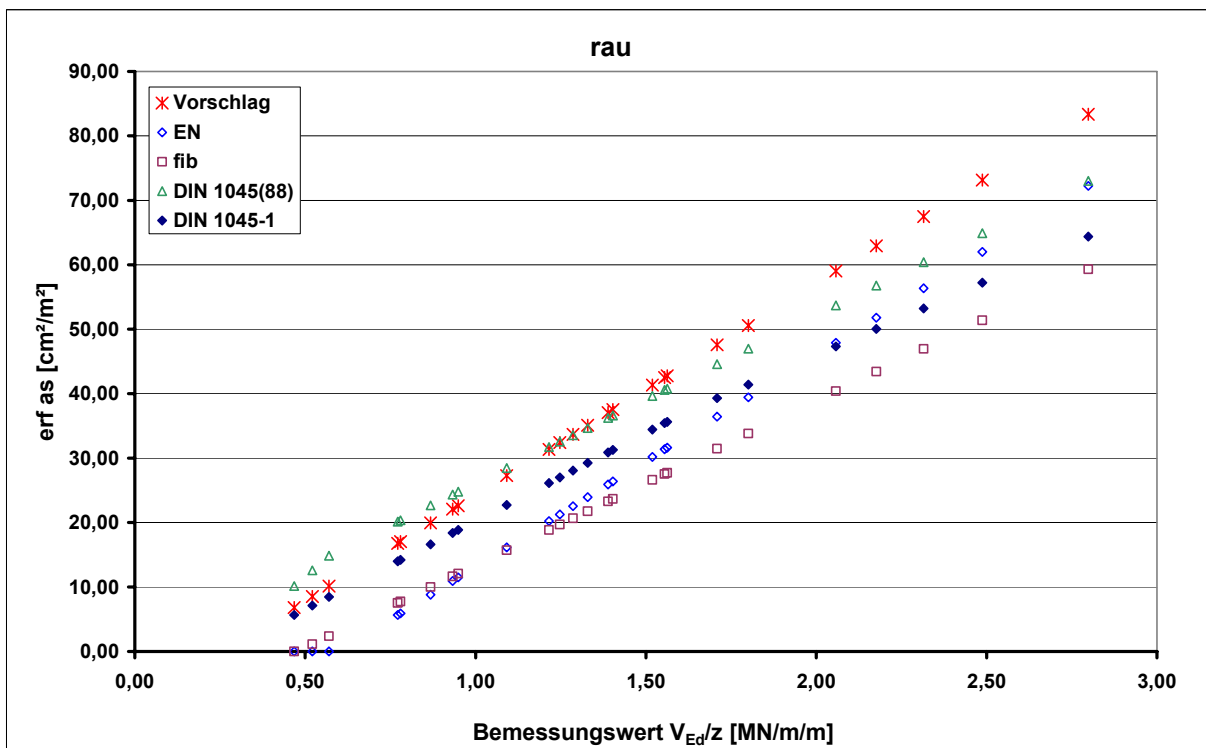


Abbildung 30: erforderliche Verbundbewehrung – rau, C30/37, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

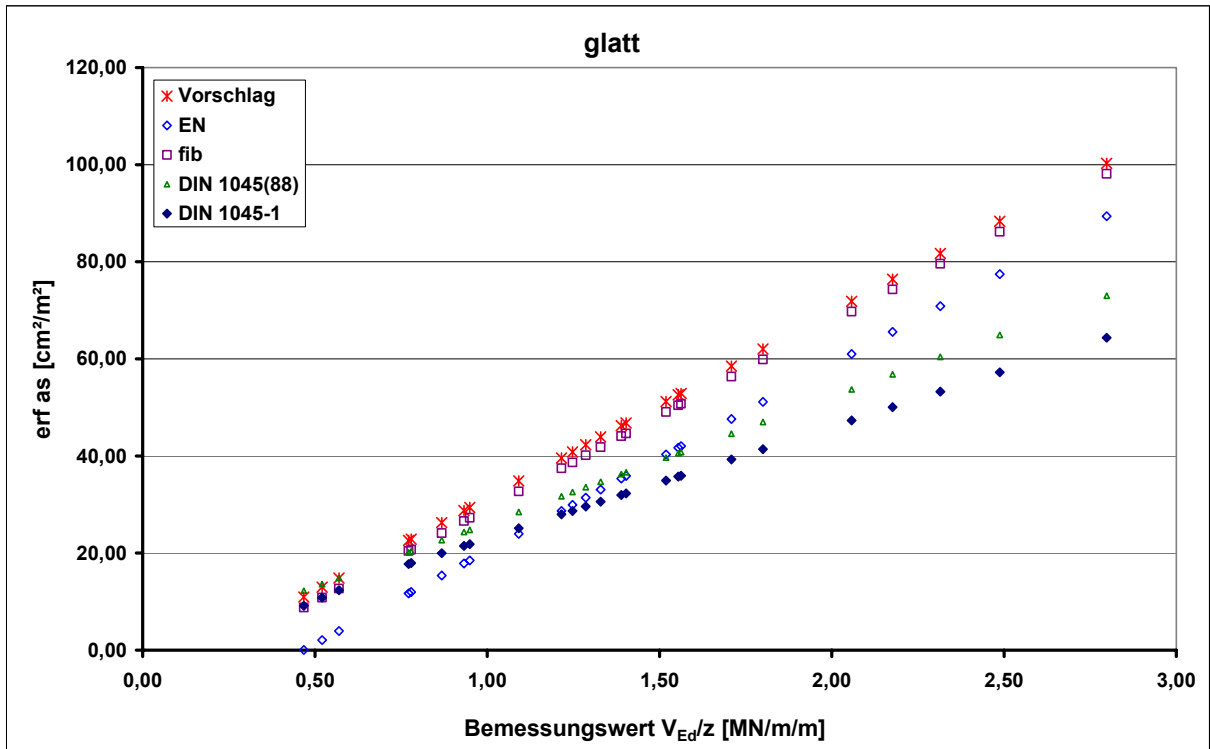


Abbildung 31: erforderliche Verbundbewehrung – glatt, C30/37, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

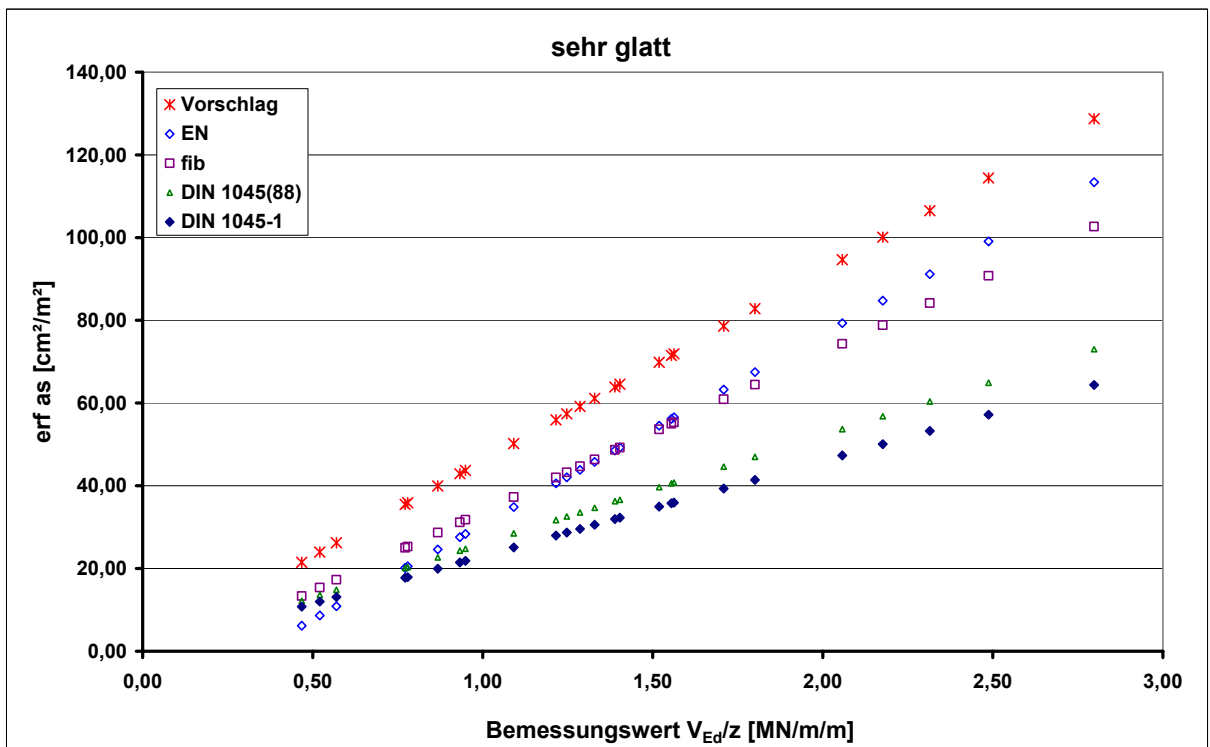


Abbildung 32: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C30/37, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

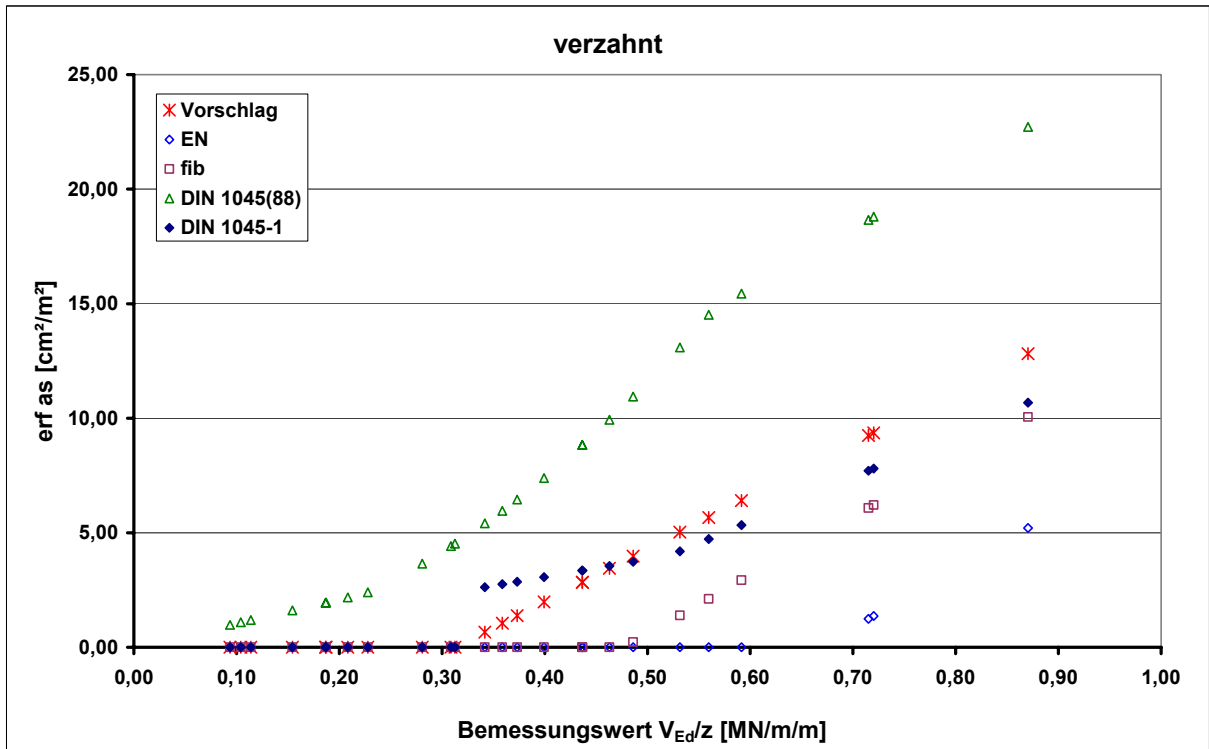


Abbildung 33: erforderliche Verbundbewehrung – verzahnt, C30/37, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

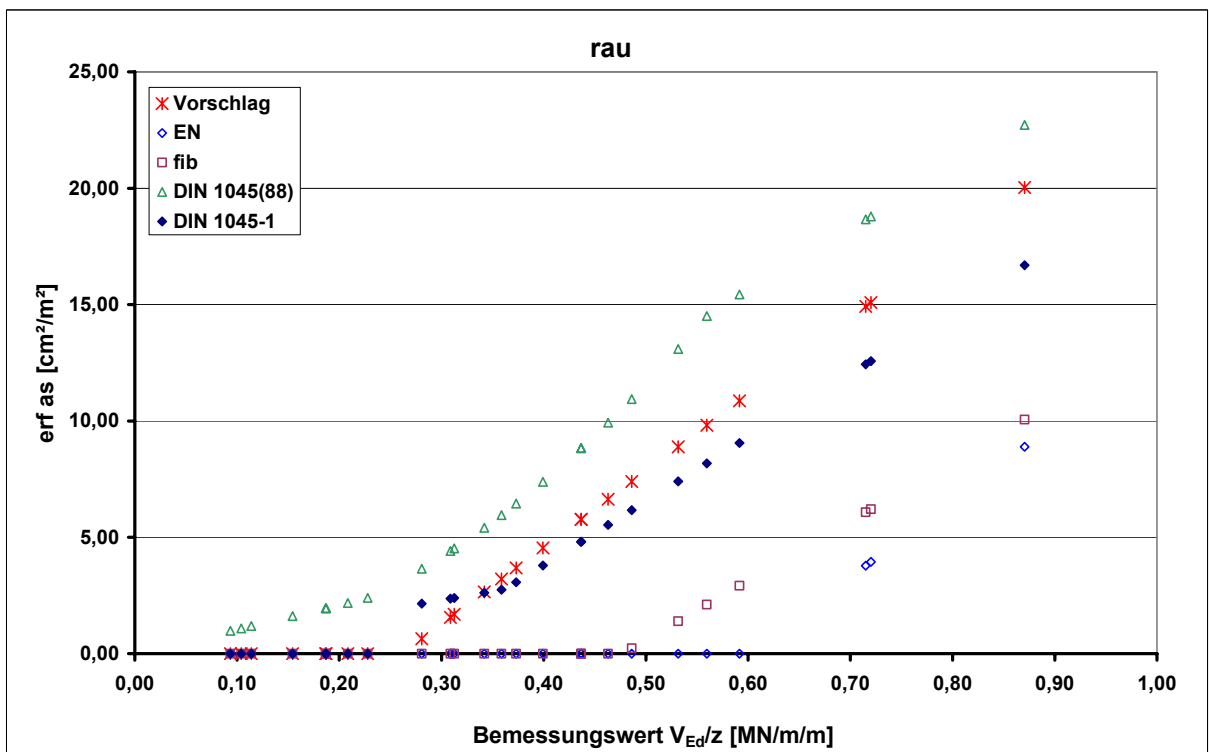


Abbildung 34: erforderliche Verbundbewehrung – rau, C30/37, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

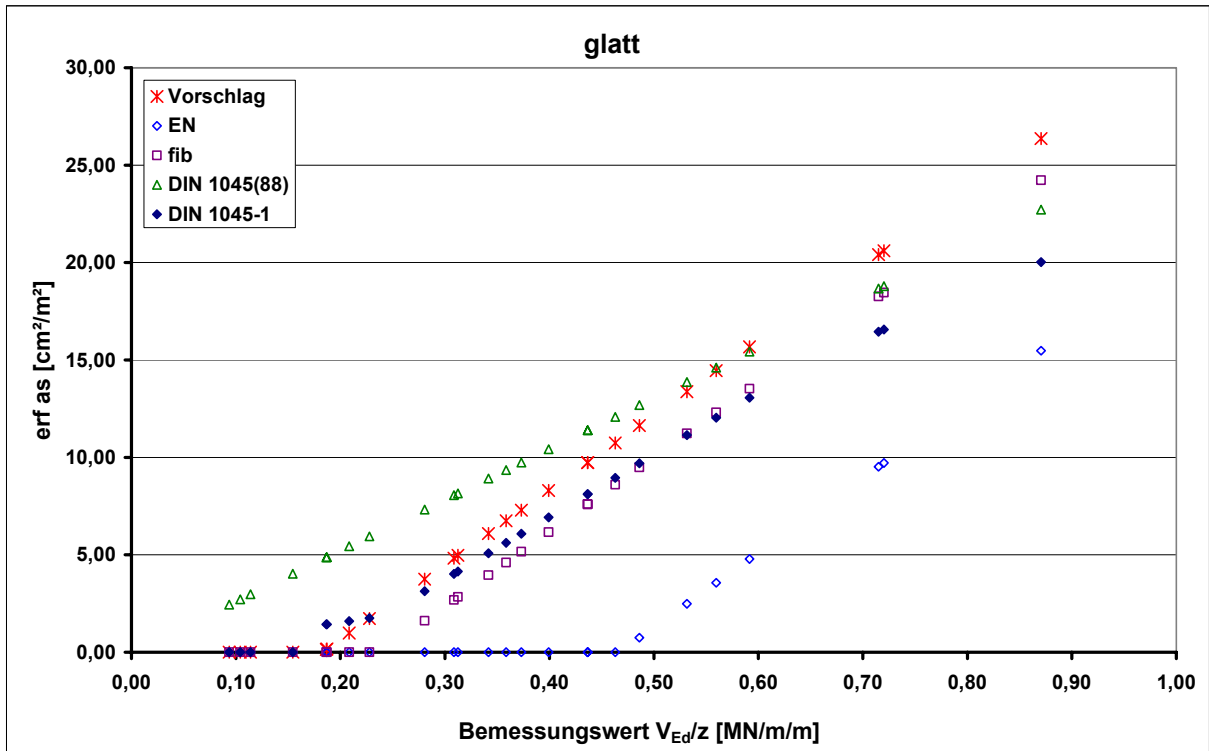


Abbildung 35: erforderliche Verbundbewehrung – glatt, C30/37, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

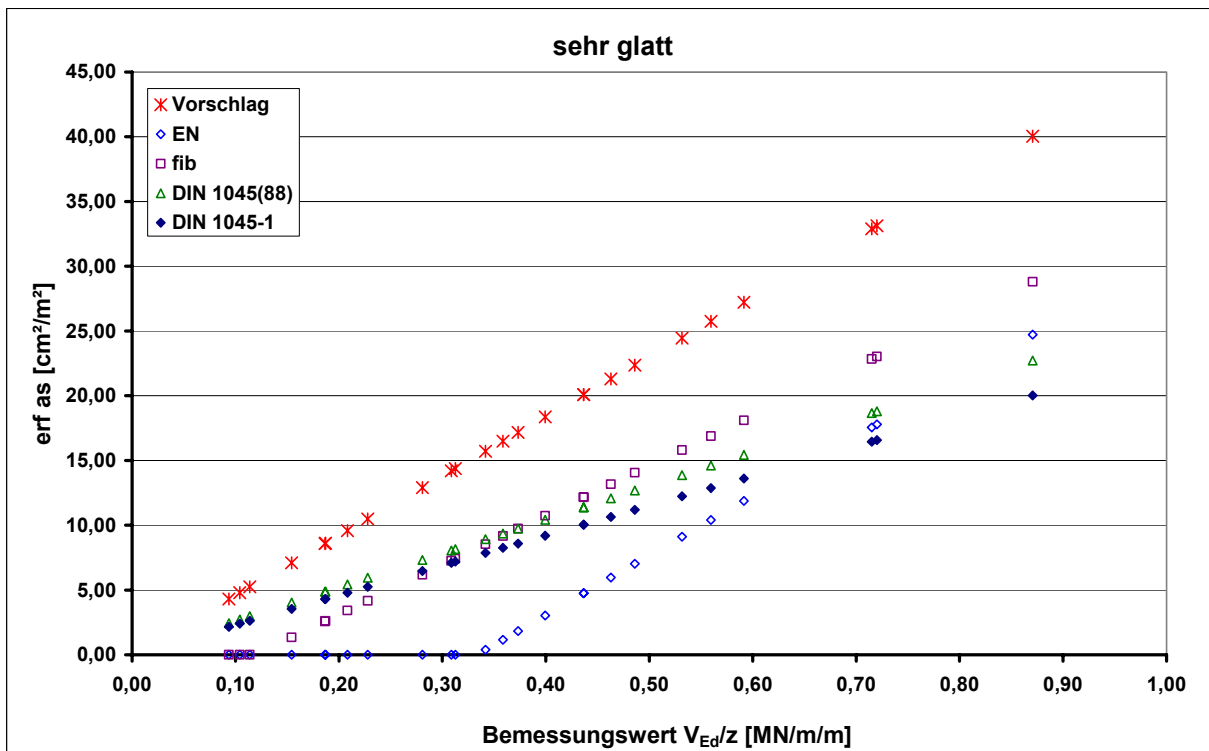


Abbildung 36: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C30/37, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

3.2.2.2 Neigung der Verbundbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 45^\circ$

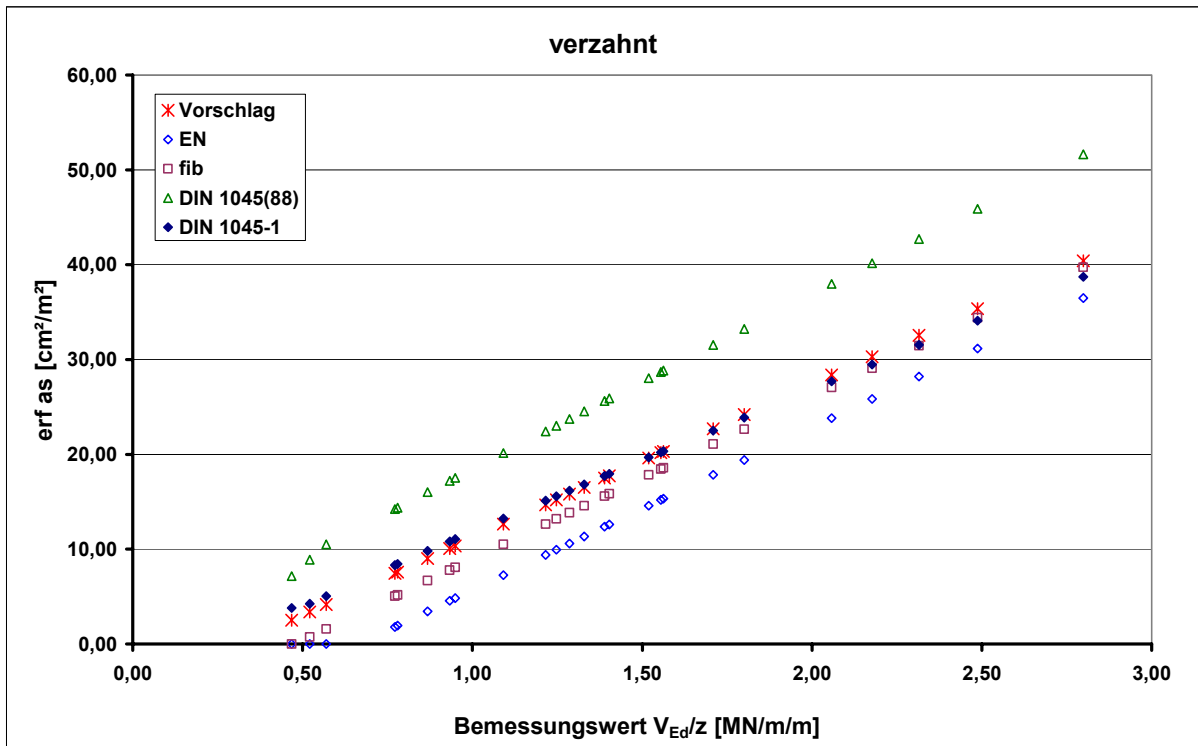


Abbildung 37: erforderliche Verbundbewehrung – verzahnt, C30/37, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

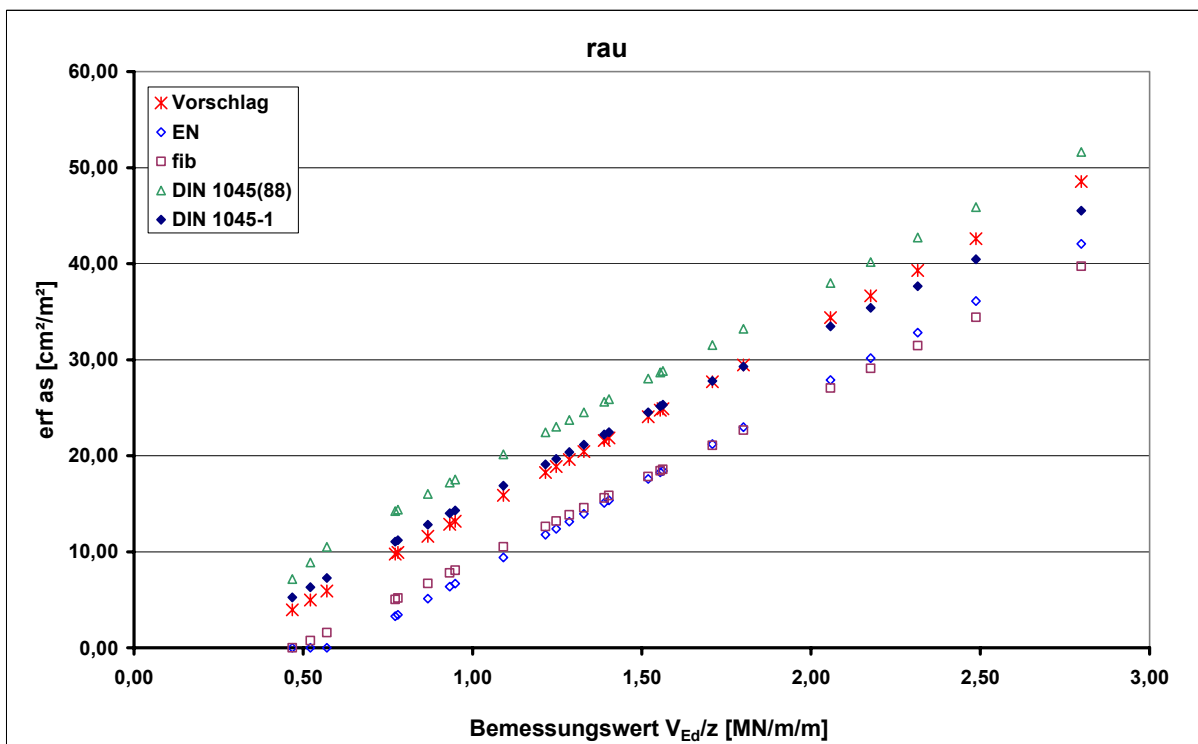


Abbildung 38: erforderliche Verbundbewehrung – rau, C30/37, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

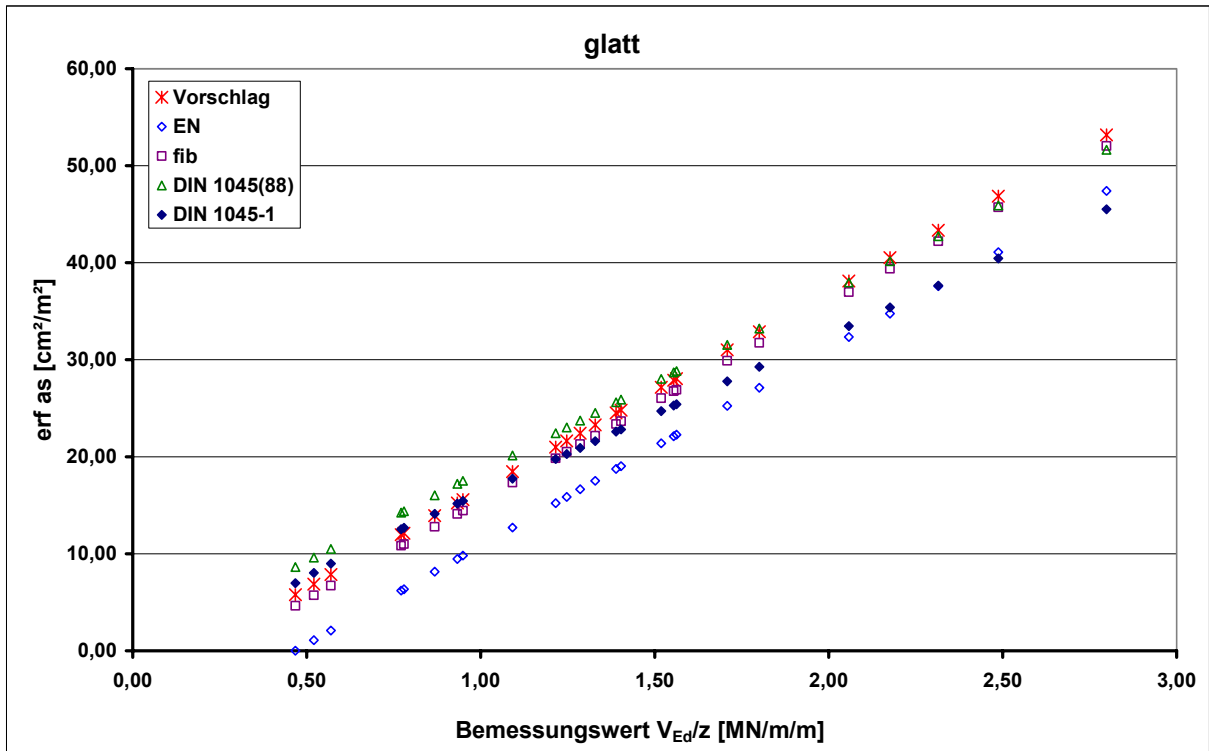


Abbildung 39: erforderliche Verbundbewehrung – glatt, C30/37, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

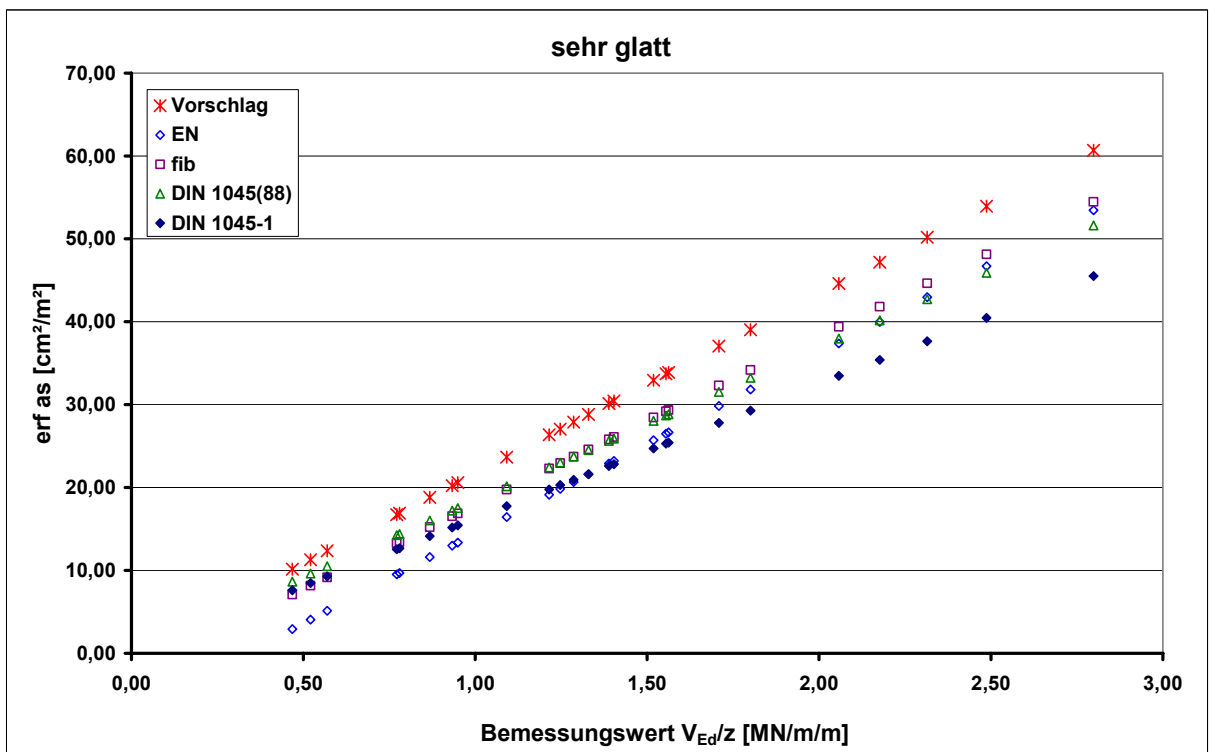


Abbildung 40: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C30/37, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

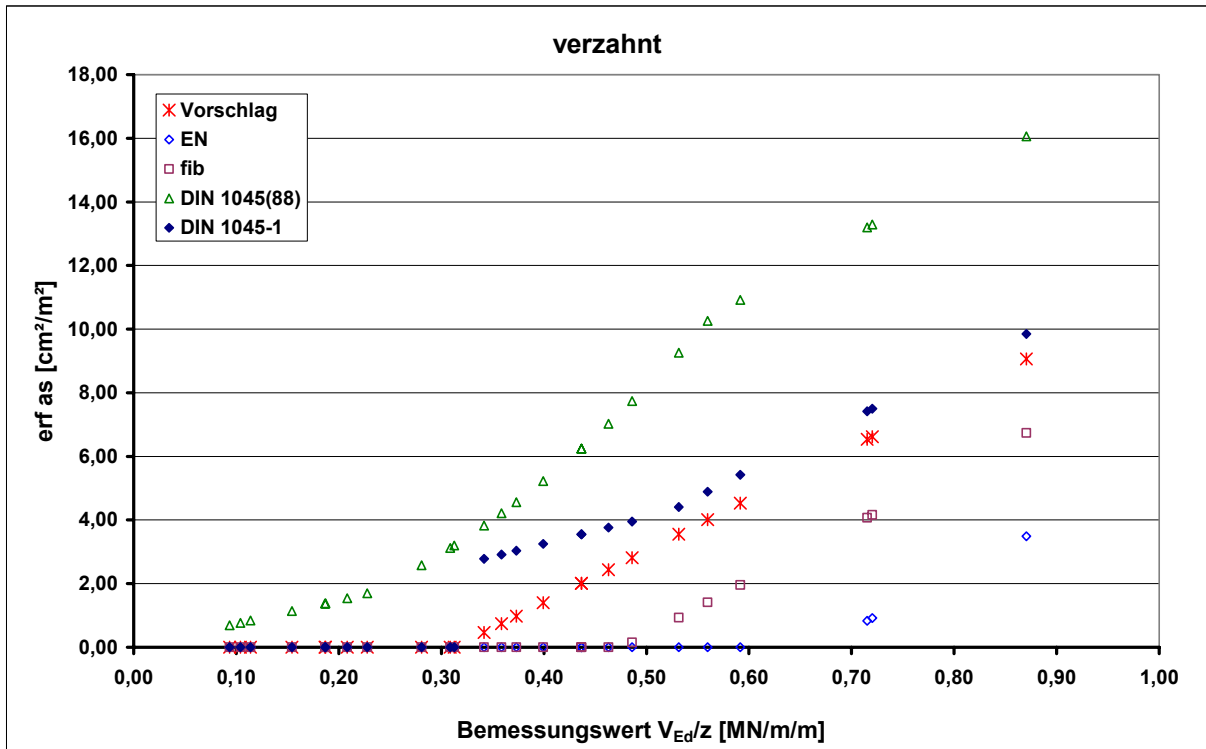


Abbildung 41: erforderliche Verbundbewehrung – verzahnt, C30/37, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

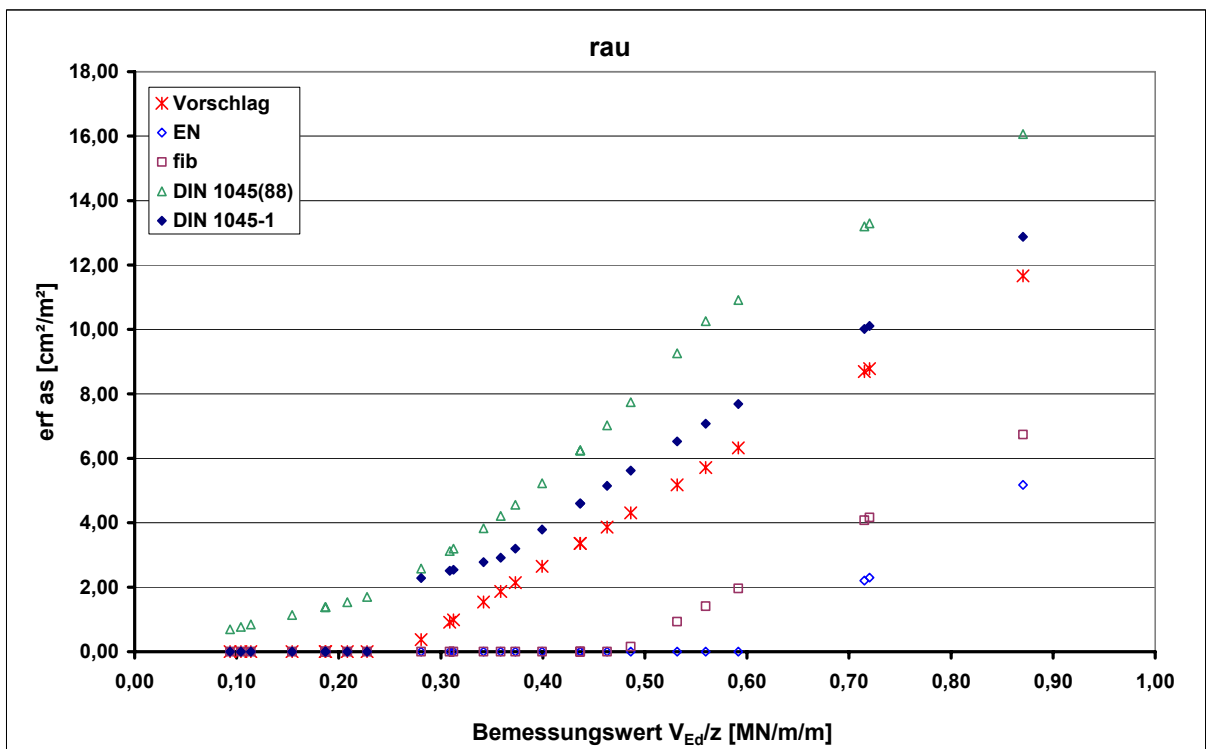


Abbildung 42: erforderliche Verbundbewehrung – rau, C30/37, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

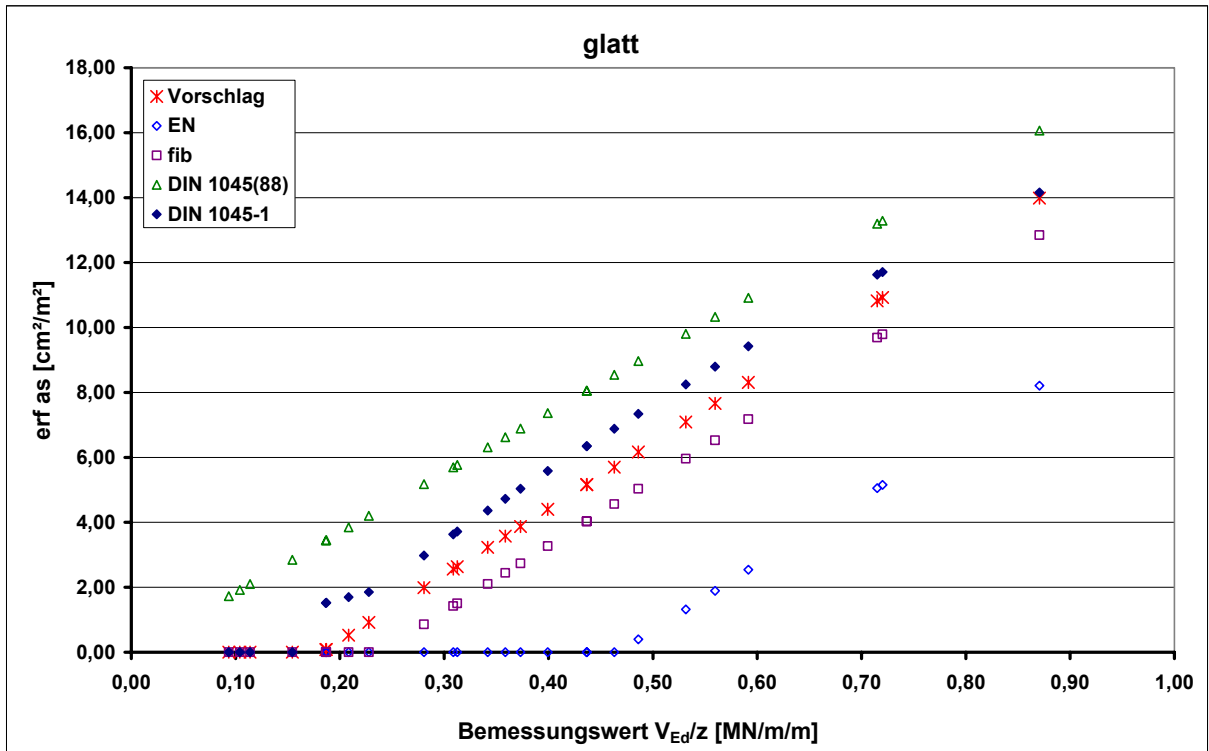


Abbildung 43: erforderliche Verbundbewehrung – glatt, C30/37, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

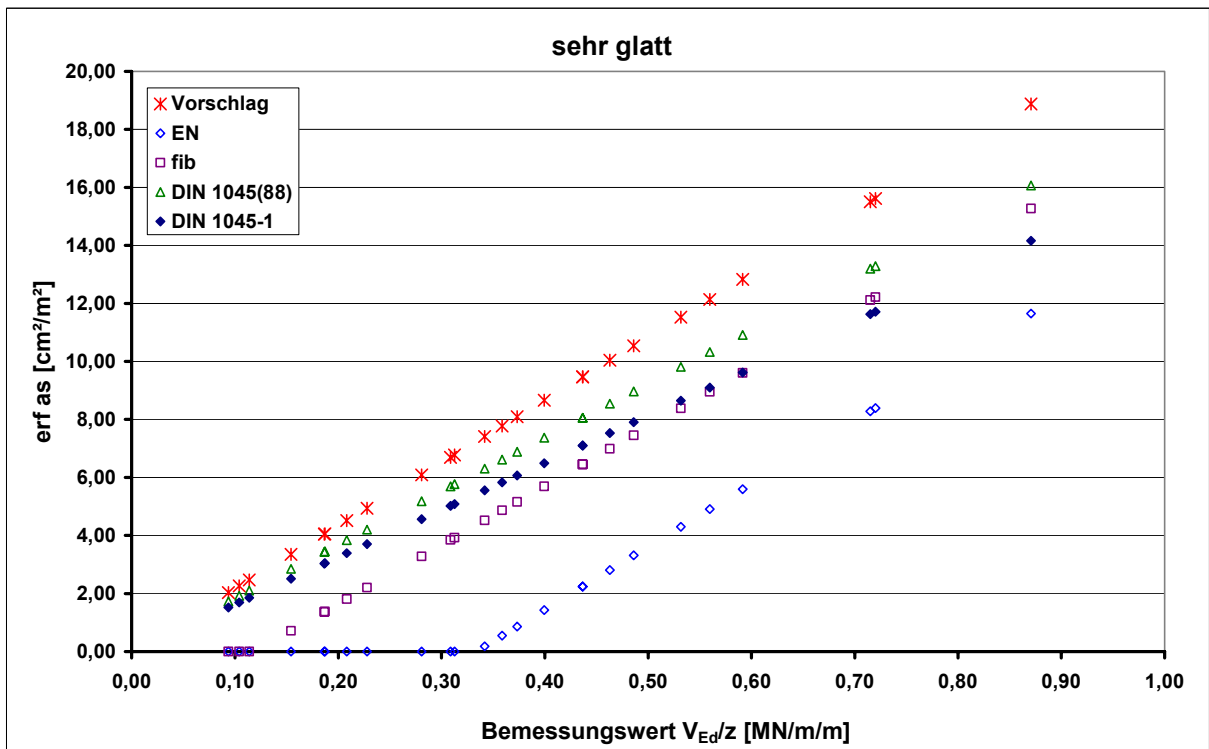


Abbildung 44: : erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C30/37, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

3.2.3 Betonfestigkeitsklasse C45/55

3.2.3.1 Neigung der Verbundbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 90^\circ$

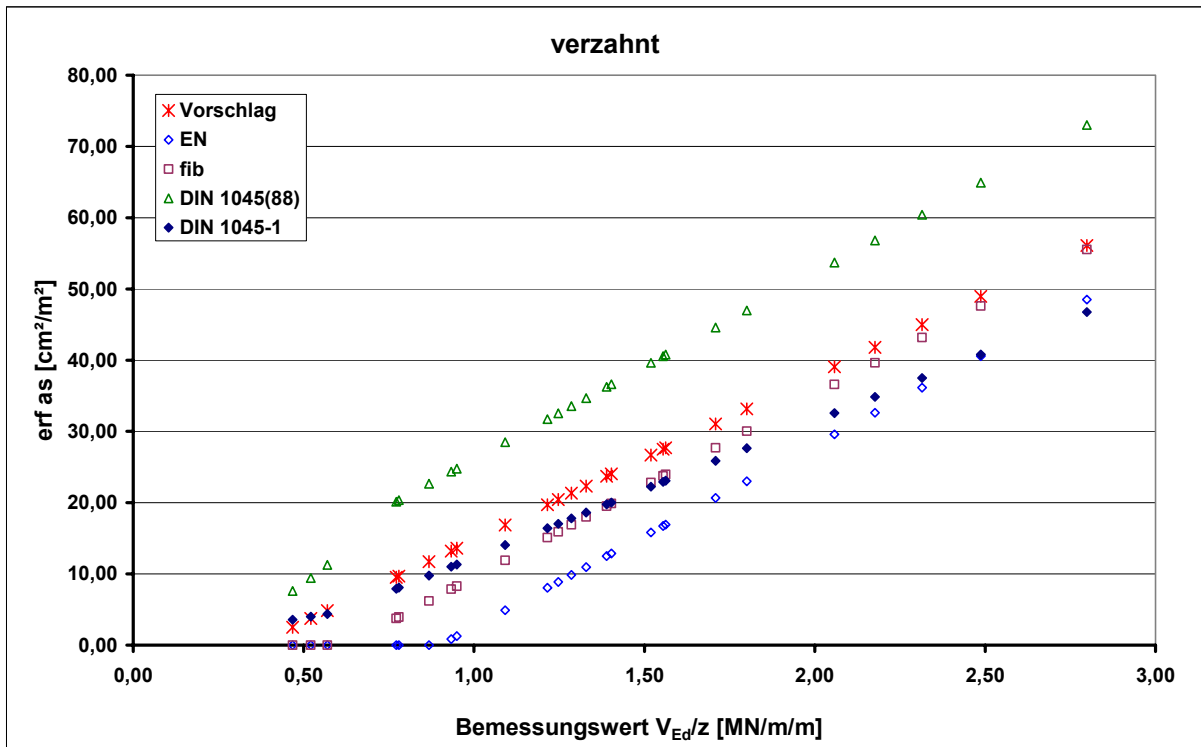


Abbildung 45: erforderliche Verbundbewehrung – verzahnt, C45/55, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

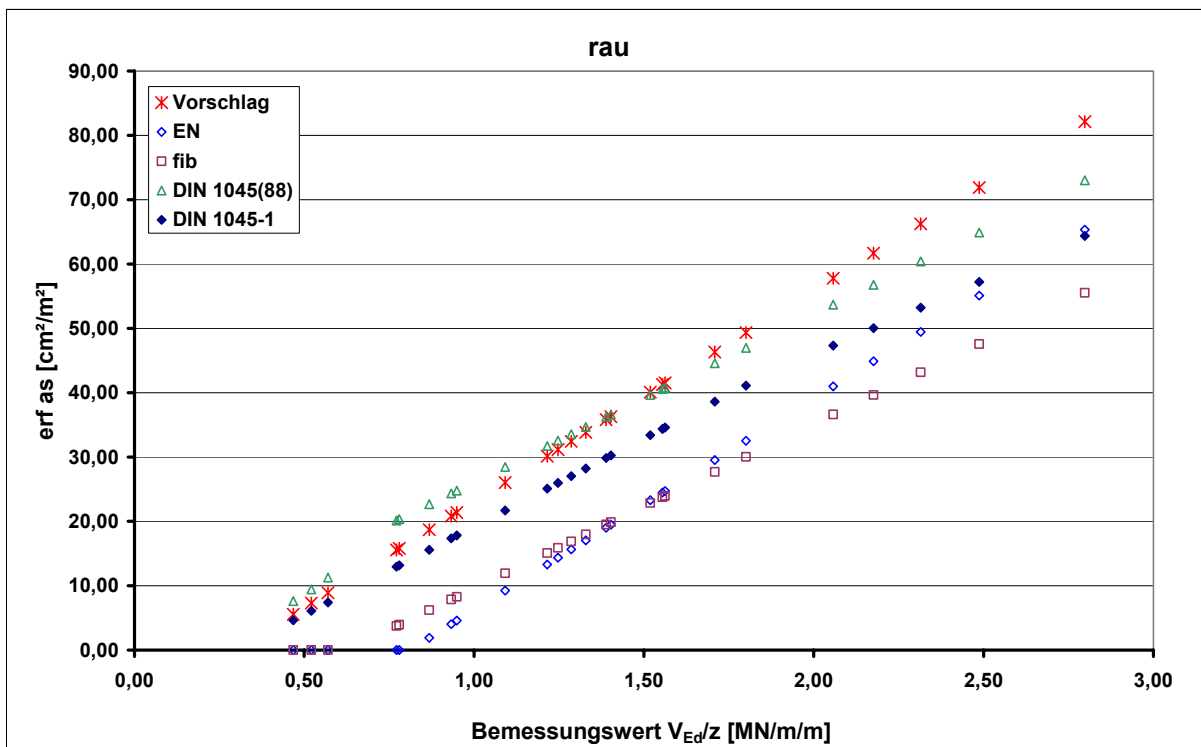


Abbildung 46: erforderliche Verbundbewehrung – rau, C45/55, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

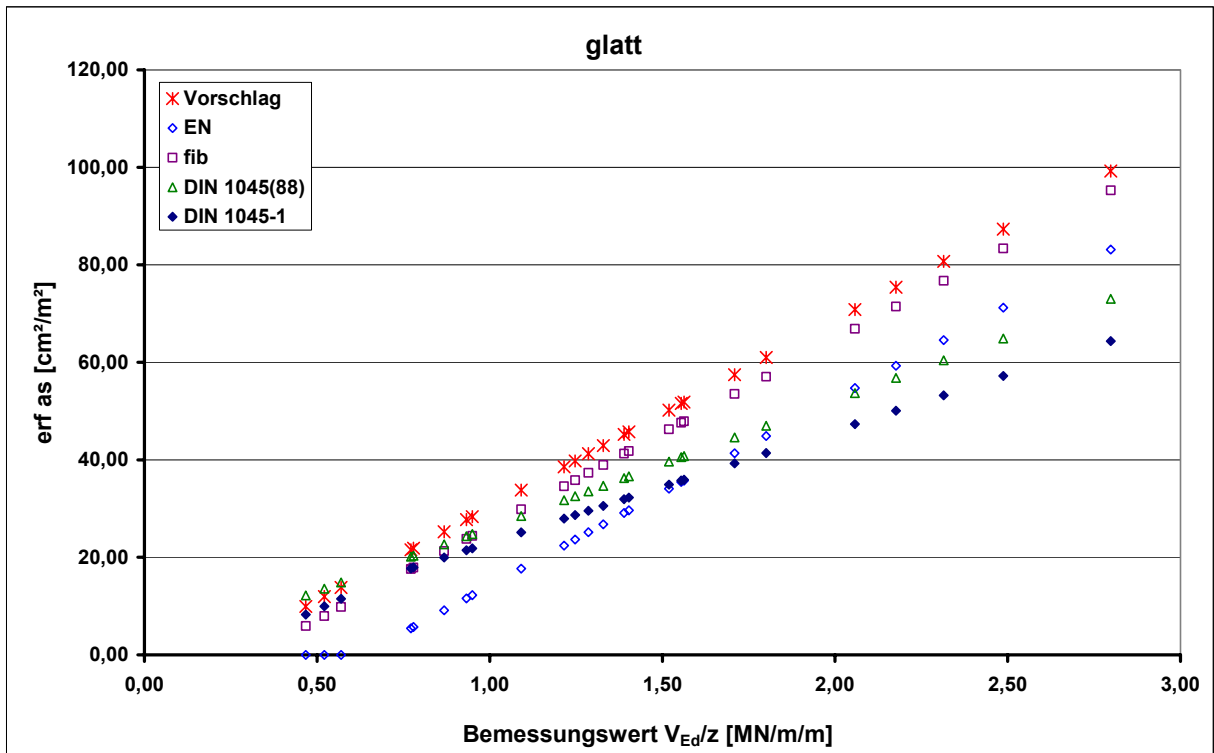


Abbildung 47: erforderliche Verbundbewehrung – glatt, C45/55, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

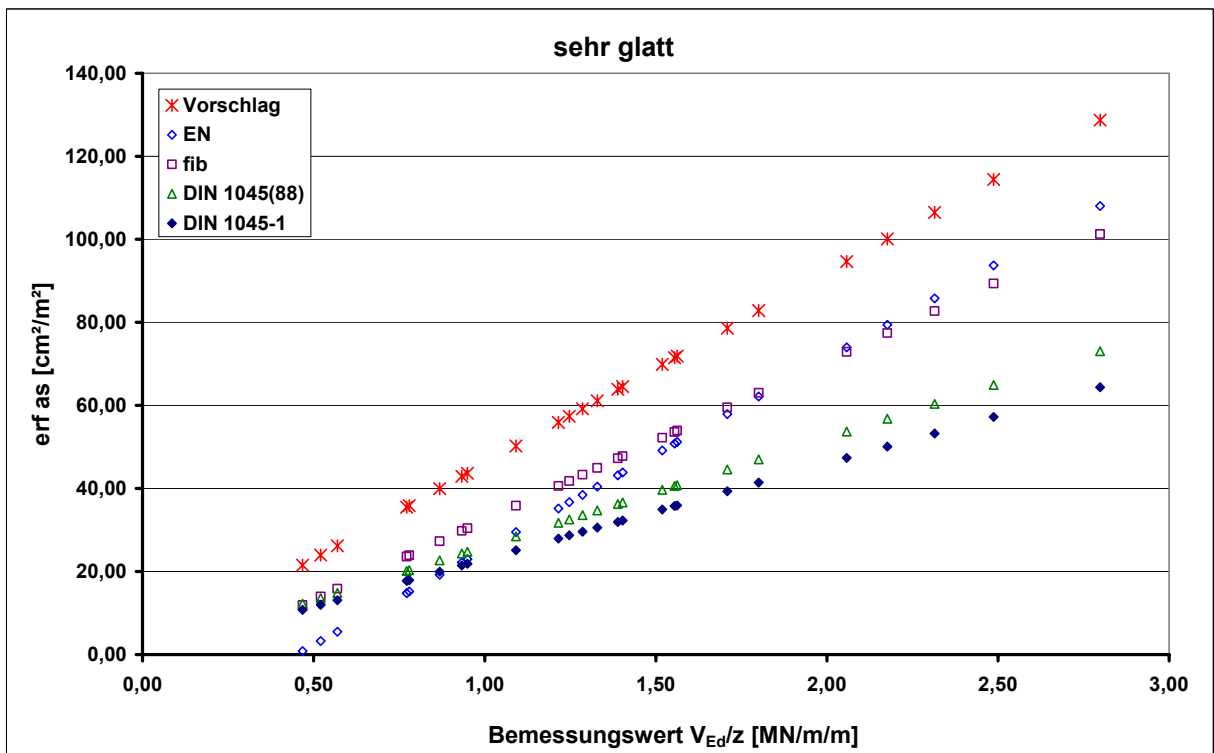


Abbildung 48: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C45/55, $\alpha=90^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

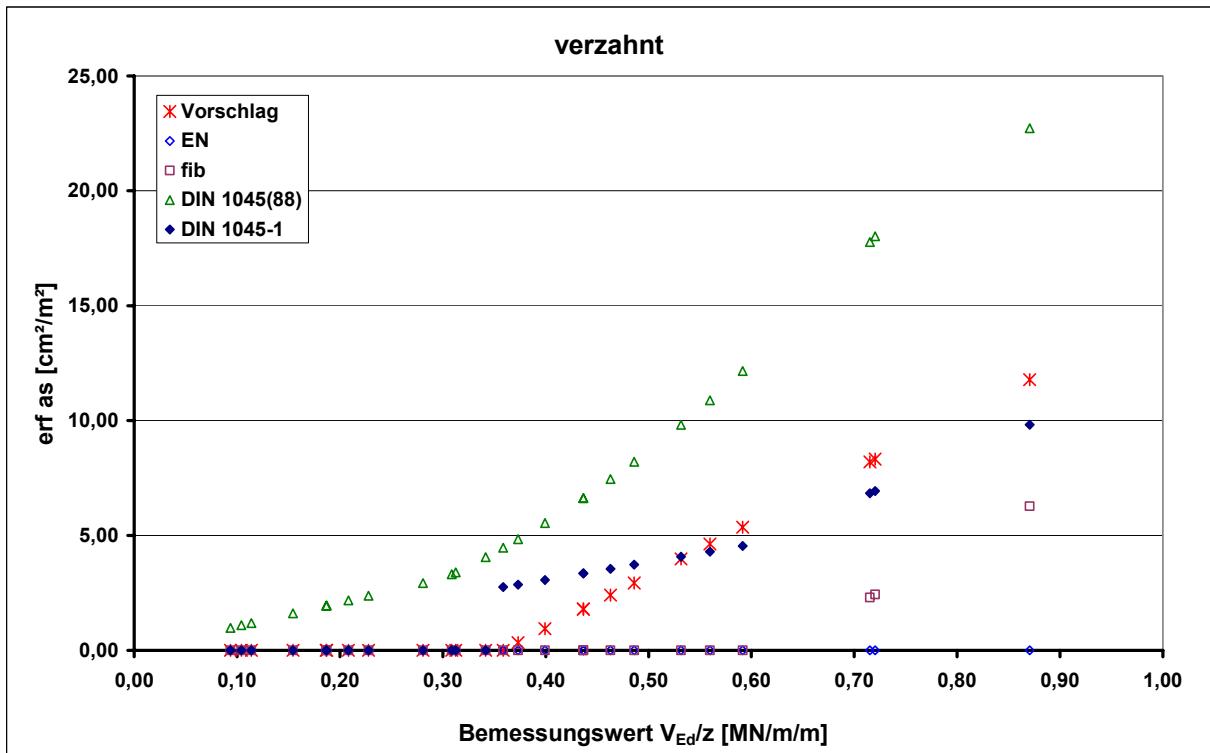


Abbildung 49: erforderliche Verbundbewehrung – verzahnt, C45/55, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

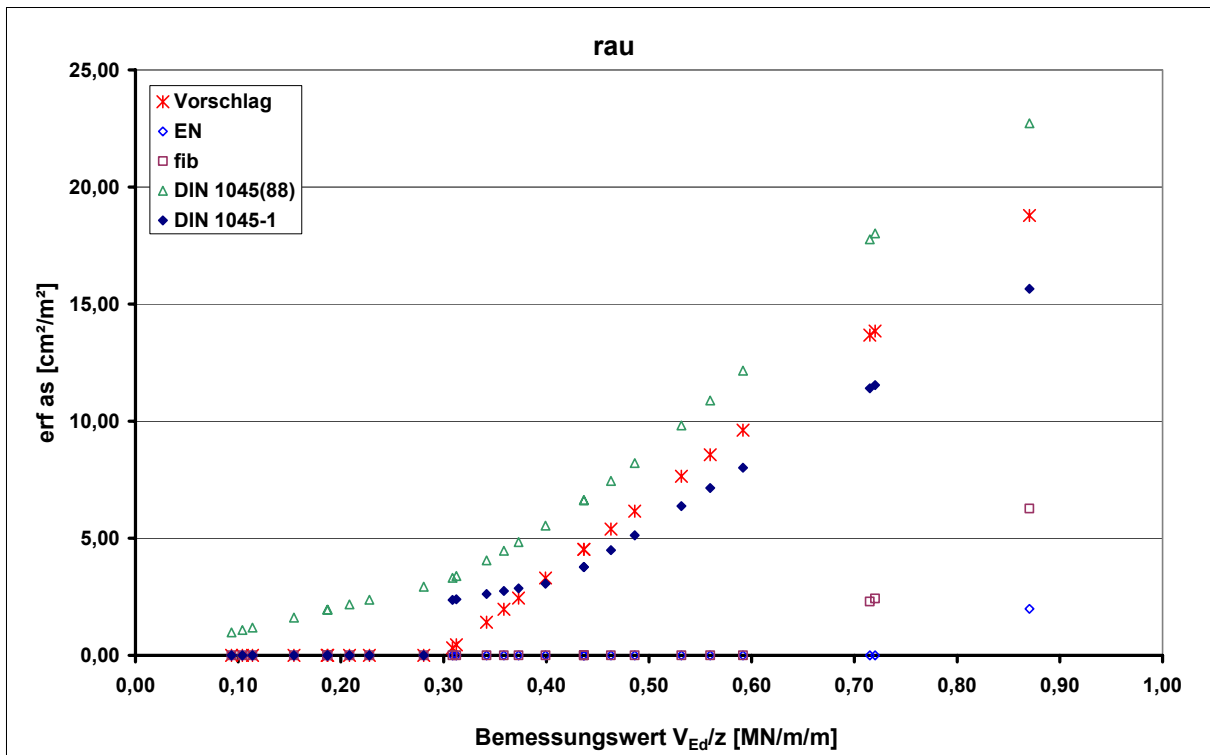


Abbildung 50: erforderliche Verbundbewehrung – rau, C45/55, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

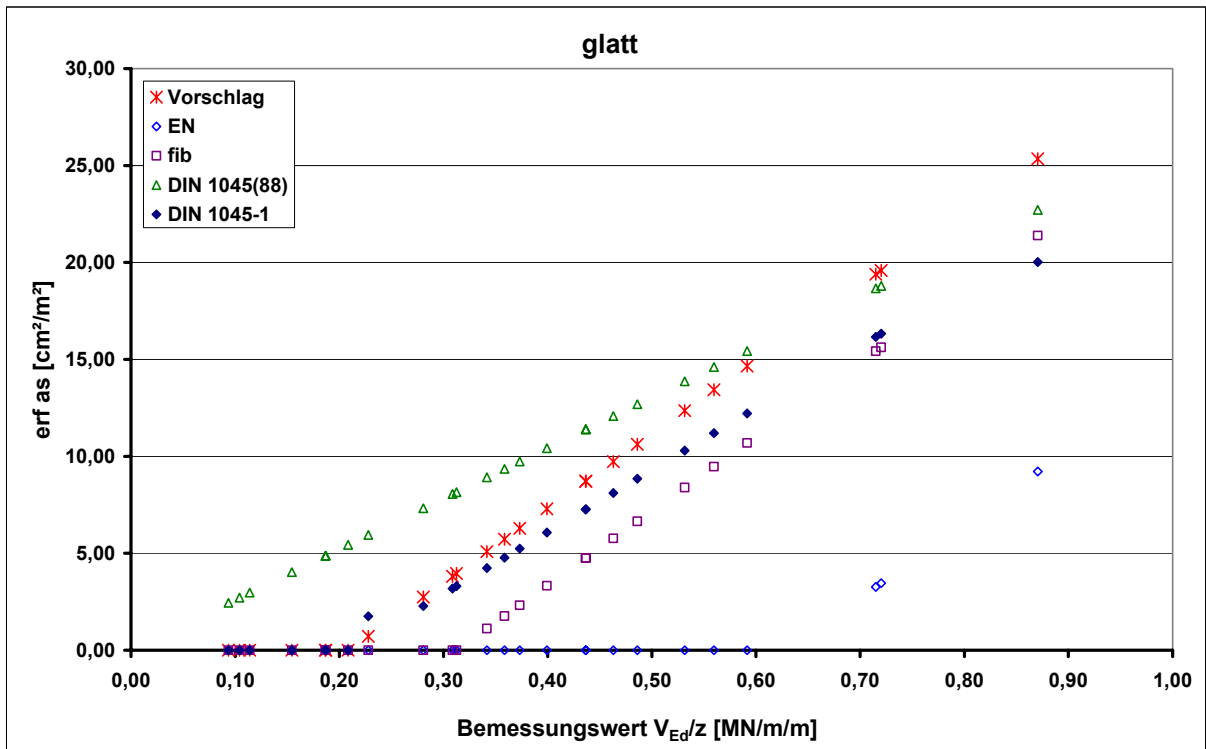


Abbildung 51: erforderliche Verbundbewehrung – glatt, C45/55, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

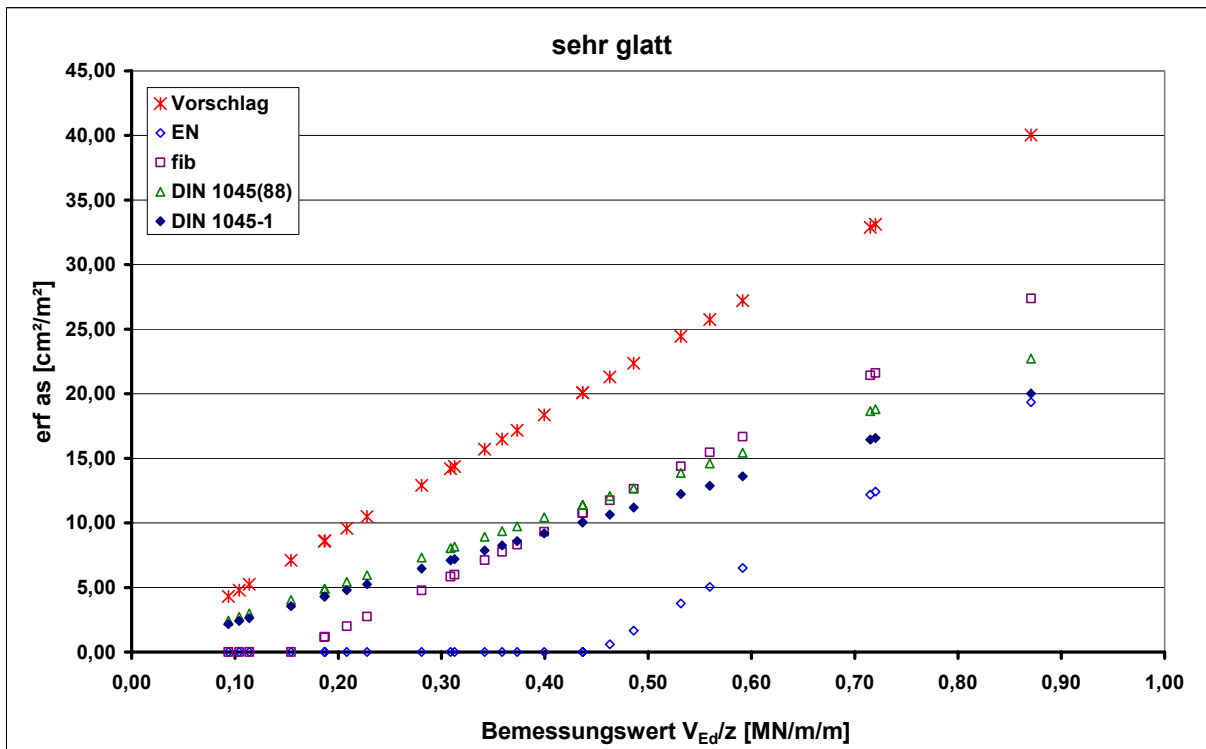


Abbildung 52: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C45/55, $\alpha=90^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

3.2.3.2 Neigung der Verbundbewehrung zur Bauteilachse $\alpha = 45^\circ$

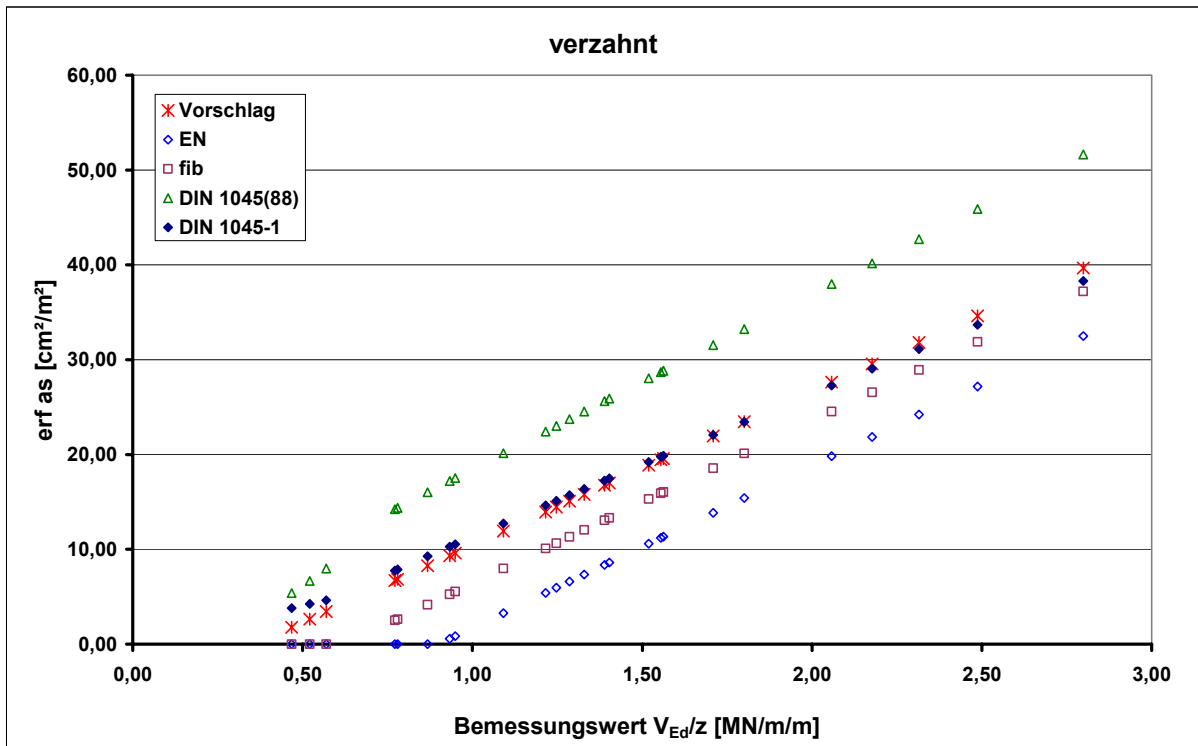


Abbildung 53: erforderliche Verbundbewehrung – verzahnt, C45/55, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

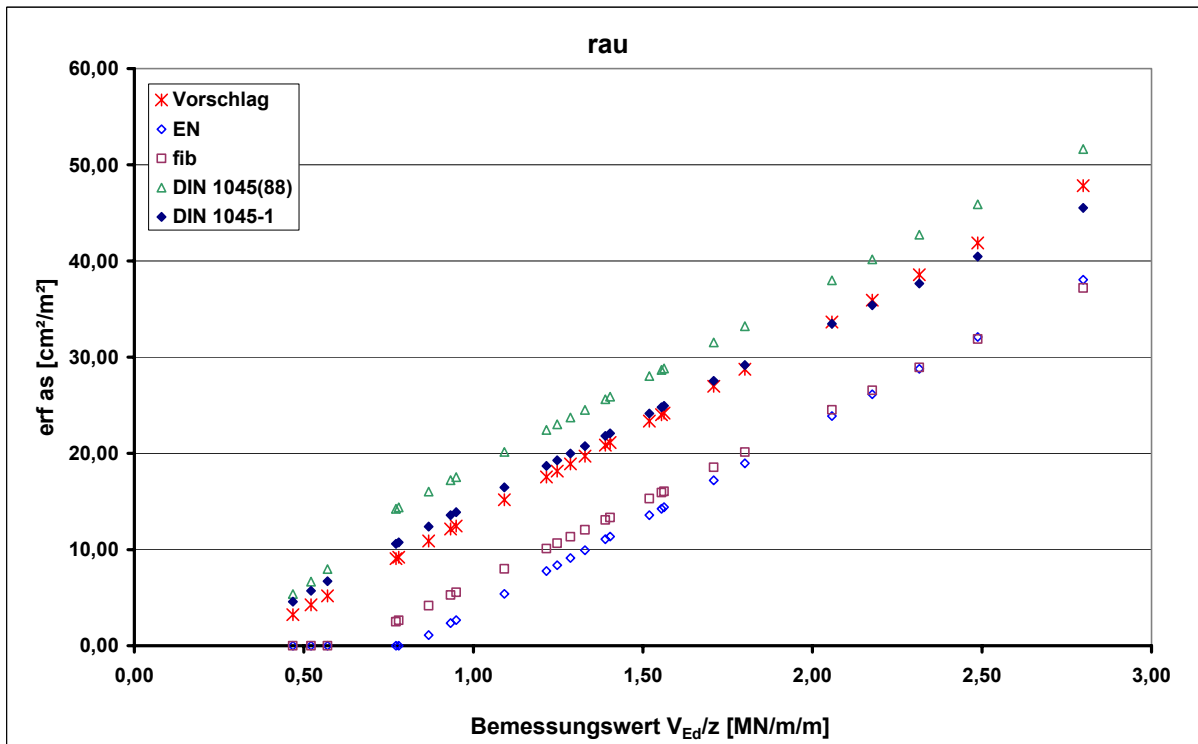


Abbildung 54: erforderliche Verbundbewehrung - rau, C45/55, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

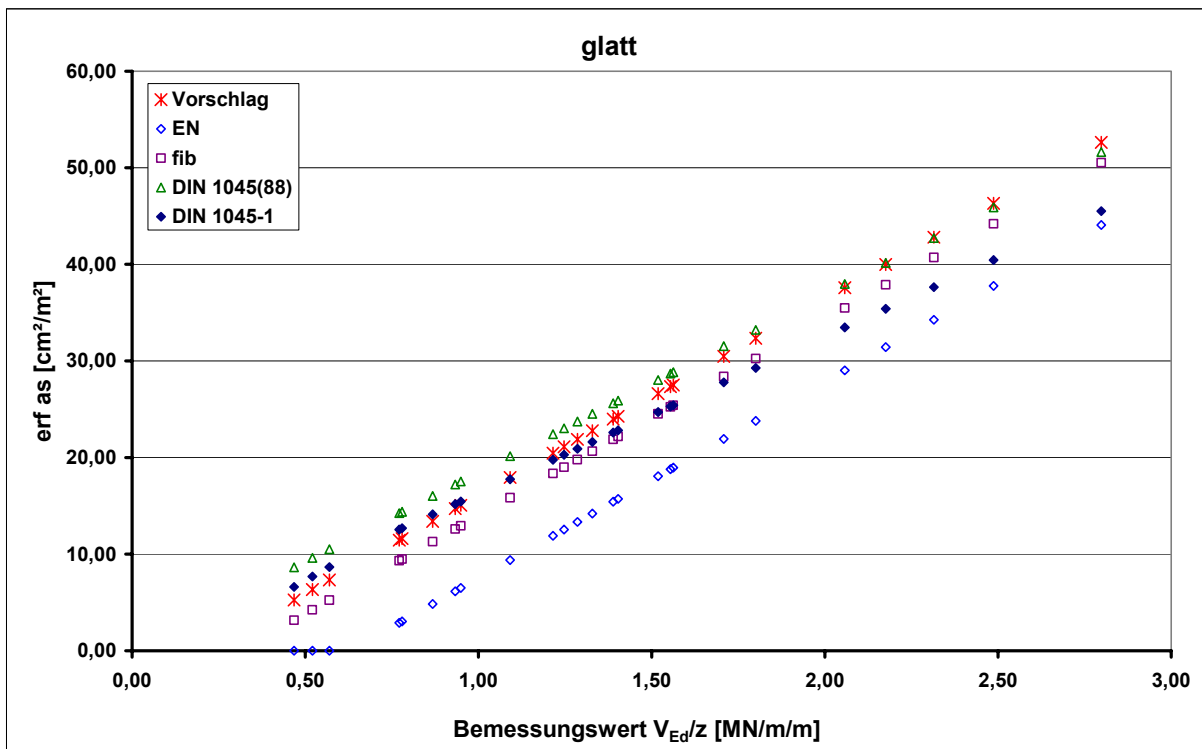


Abbildung 55: erforderliche Verbundbewehrung - glatt, C45/55, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

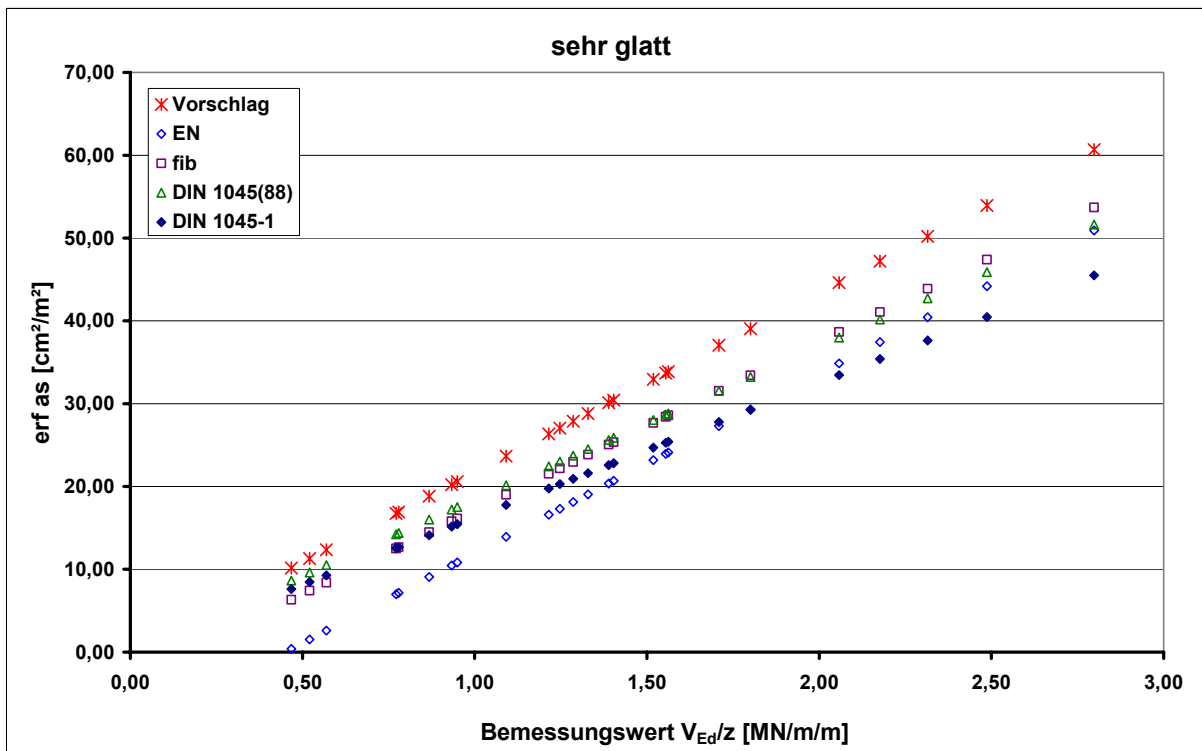


Abbildung 56: erforderliche Verbundbewehrung - sehr glatt, C45/55, $\alpha=45^\circ$, hohes Lastniveau

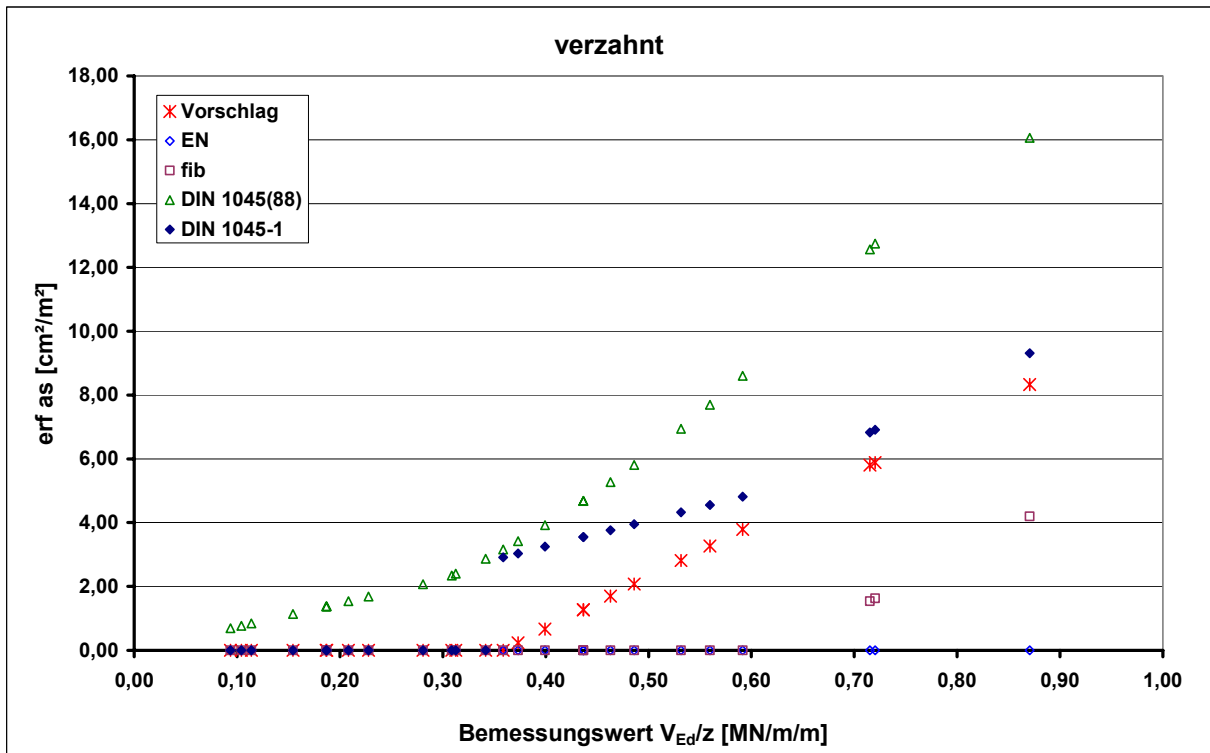


Abbildung 57: erforderliche Verbundbewehrung - verzahnt, C45/55, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

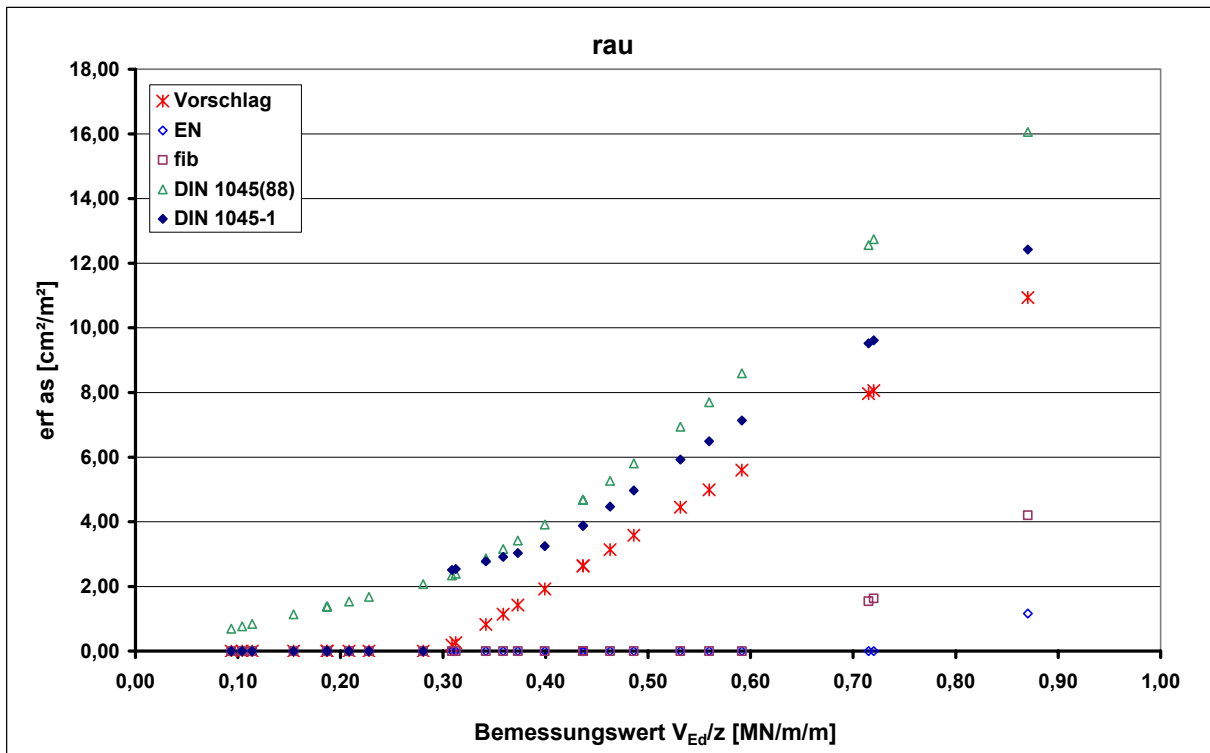


Abbildung 58: erforderliche Verbundbewehrung - rau, C45/55, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

3 Ergebnisse der Bemessungen

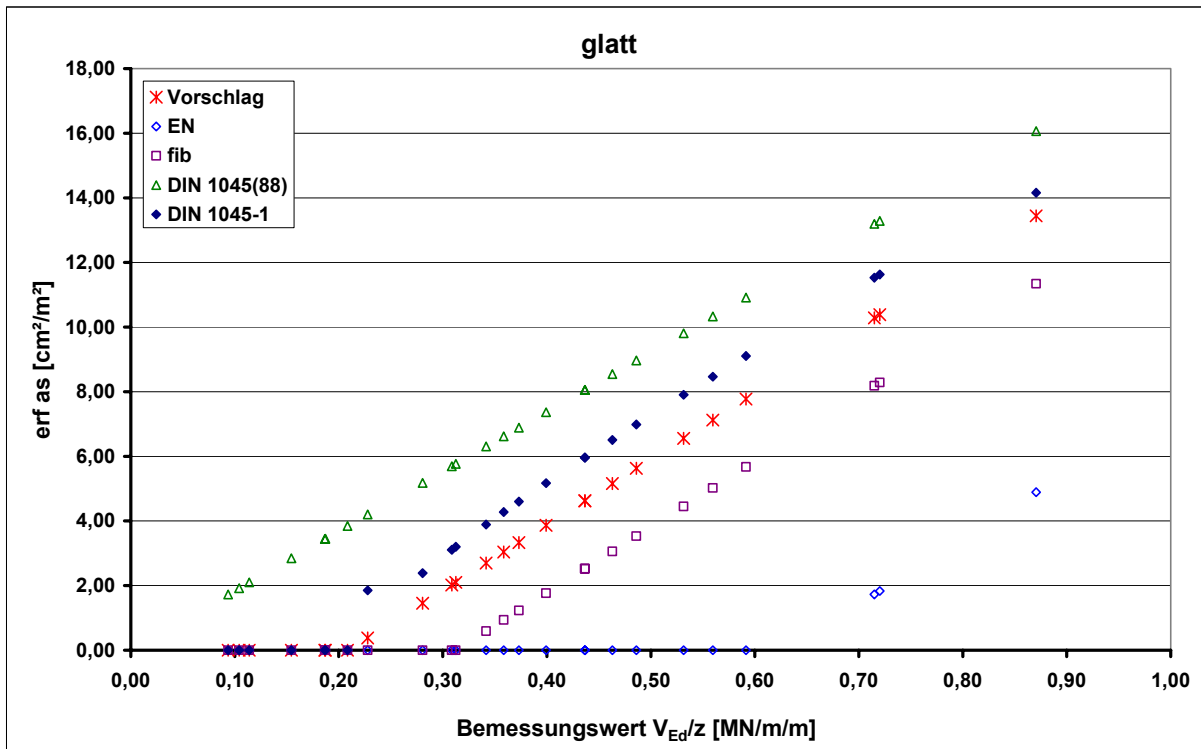


Abbildung 59: erforderliche Verbundbewehrung - glatt, C45/55, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau

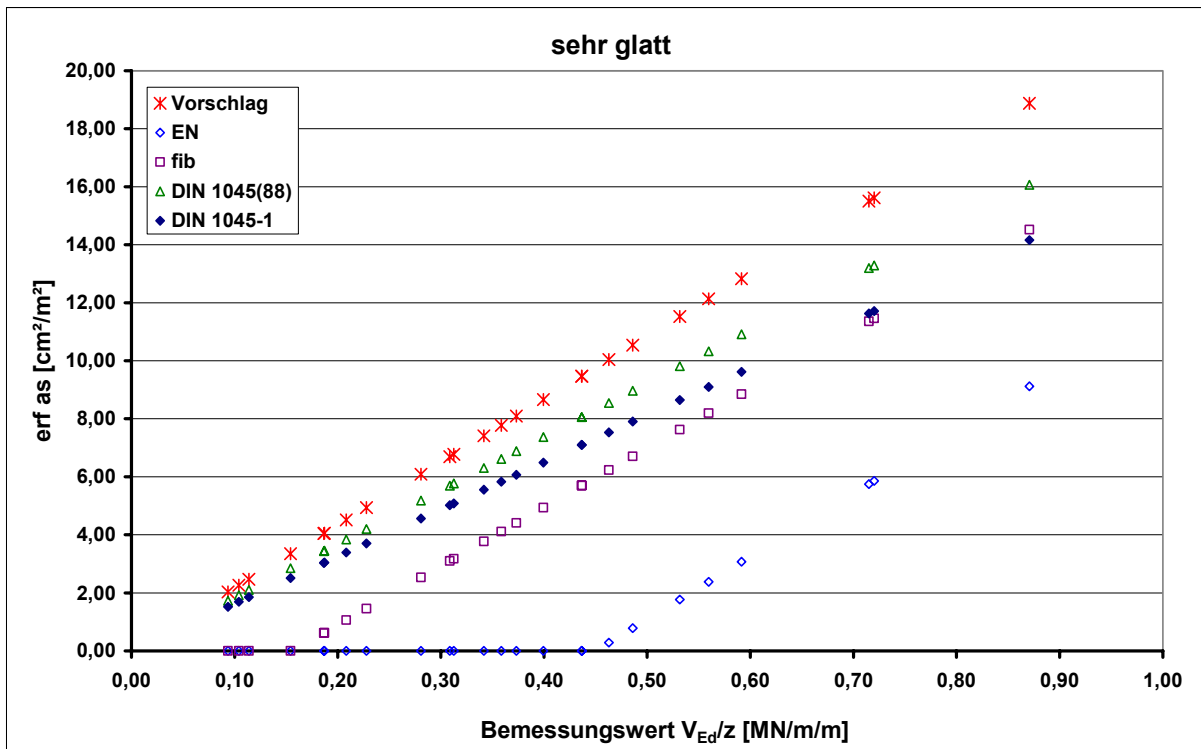


Abbildung 60: erforderliche Verbundbewehrung – sehr glatt, C45/55, $\alpha=45^\circ$, geringes Lastniveau