

Begrenzung der Querkrafttragfähigkeit bei auflagnahen Lasten nach DIN 1045-1 und EN 1992-1-1 (EC2)

T 3097

T 3097

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

2005, ISBN 3-8167-6970-5

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

**Institut für
Baustoffe und
Konstruktion**

MPA Bau

Lehrstuhl für Massivbau
Univ.-Prof.
Dr.-Ing. K. Zilch

Arbeitsgruppe 3
Betonkennwerte

Schlussbericht

Forschungsvorhaben ZP52-5-7.244-1134/04 „Begrenzung der Querkrafttragfähigkeit bei auflagernahen Lasten nach DIN 1045-1 und EN 1992-1-1 (EC2)“

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch

Dipl.-Ing. Michael Cyllok

Ing. Civil María Noel Pereyra

Bericht Nr.: cy – 23054039

vom: 11.08.2005

**Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30L**

10829 Berlin

Der Untersuchungsbericht umfasst 56 Textseiten und 5 Seiten Anhang.

Der Bericht darf nur ungekürzt veröffentlicht werden.

Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen Genehmigung des Lehrstuhls

BRIEFANSCHRIFT: 80290 MÜNCHEN – TELEFON 089 / 289 – 23039 – TELEFAX 089 / 289 – 23046

HAUSANSCHRIFT: GEBÄUDE N6 THERESIENSTRASSE 90 80333 MÜNCHEN

IHR ANSPRECHPARTNER: DIPL.-ING. M. CYLLOK – TELEFON: +49 / 89 / 289 – 23036

E-MAIL: cyllok@massivbau.bauwesen.tu-muenchen.de

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Vergleich der Normenformulierungen für auflagernahe Lasten nach EN 1992-1-1 und DIN 1045-1	4
2.1	Allgemeines.....	4
2.2	Ansatz in DIN 1045-1	9
2.3	Ansatz in EN 1992-1-1.....	14
2.4	Vergleich der beiden Normen	20
3	Parameterstudie	27
3.1	Betrachtetes statisches System	27
3.2	Wahl der Parameter	28
3.2.1	Breite, Höhe und Länge	28
3.2.2	Betondruckfestigkeit	29
3.2.3	Längsbewehrungsgrad.....	29
3.2.4	Längskraft.....	29
3.2.5	Größe der Verkehrslast	30
3.2.6	Abstand der Einzellast vom Auflagerrand und Größe der Einzellast	30
3.3	Ergebnisse der Parameterstudie	30
3.3.1	Breite	31
3.3.2	Höhe	33
3.3.3	Längskraft.....	36
3.3.4	Größe der Verkehrslast	38
3.3.5	Abstand der Einzellast vom Auflagerrand und Größe der Einzellast	42
4	Vorschlag für den Nationalen Anhang zur EN 1992-1-1	46
4.1	Lösung mit Korrekturterm	47
4.2	Vereinfachte Näherungslösung	50
4.3	Empfehlung	51
5	Zusammenfassung.....	52
6	Unterschriften.....	54
7	Literatur	55
Anhang A	Zusammenfassung des Vorhabens „Auflagernahe Einzellasten“	57
Anhang B	Kurzzusammenfassungen.....	60

1 Einleitung

Ziel dieses vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) finanzierten Forschungsprojekt ist es, eine vergleichende Untersuchung zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit auflagnahen Lasten nach DIN 1045-1 [1] und EN 1992-1-1 (EC2) [2] durchzuführen.

In einem ersten Schritt, werden die Unterschiede zwischen beide Normen aufgezeigt. Im Anschluss wird ein Vorschlag zur Anpassung des EN 1992-1-1 (EC2) an die DIN 1045-1 erarbeitet.

Im Jahre 1992 wurde der Eurocode 2 Teil 1 [3] als erste europäische Norm des konstruktiven Ingenieurbaus in Deutschland als Vornorm eingeführt [4]. Die Bemessungsregeln nach Eurocode 2 sowie die Hintergründe für die Beanspruchungen von Stahlbeton- und Spannbetonquerschnitten infolge Biegung mit Längskraft, Querkraft und Torsion sind im Rahmen der Doktorarbeit von Feix [5] ausführlich dargestellt und analysiert worden.

Diese Analyse hat gezeigt, dass die Anwendung der Regelungen des Eurocode 2 in bestimmten Fällen zu Sicherheitsrisiken, in anderen Fällen zu unwirtschaftlichen Bemessungsergebnissen führt.

Bei auflagnahen Einzellasten kann sich bei direkter Lagerung ein Sprengwerk einstellen, bei dem sich die zugehörige Druckstrebe ganz oder teilweise direkt auf das Auflager abstützt. Für diesen Anteil der Querkraft ist dann keine Querkraftbewehrung bzw. bei großen Einzelkräften lediglich eine reduzierte Querkraftbewehrung zur Abdeckung der Zugstrebenkraft zu berücksichtigen.

Sowohl die europäische Norm EN 1992-1-1 wie auch die deutsche Norm DIN 1045-1 berücksichtigen diese günstige Tragwirkung von auflagnahen Lasten bei der Querkraftbemessung. Bei der Berechnung führen die zwei Normen aber zu unterschiedlichen Bewehrungsmengen. Um diesen Unterschied möglichst gering zu halten wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Vorschlag für das nationale Anwendungsdokument zum EN 1992-1-1 erarbeitet.

2 Vergleich der Normenformulierungen für auflagernahe Lasten nach EN 1992-1-1 und DIN 1045-1

2.1 Allgemeines

Beton ist ein sehr alter Baustoff, der schon in der Antike hergestellt worden ist. Seitdem hat es zahlreiche weitere Entwicklungen gegeben, die auch heute noch nicht abgeschlossen sind. Seit ca. 100 Jahre wurde versucht, Regelungen zu schaffen, die eine Beschreibung der Tragfähigkeit von Betonbauteilen ermöglichen.

Der Beton als Baustoff kennt aber keine Norm. Er ist ein Stoff der unabhängig von der Norm immer gleichen mechanischen Gesetzen folgt. Für die Bemessung werden Vereinfachungen nötig, um den Stahlbeton sicher und wirtschaftlich bemessen zu können. Alle Normen versuchen dies zu gewährleisten, verwenden ähnliche Grundlagen, kommen aber im Detail zu unterschiedliche Regelungen.

In dem Fall der Querkraftbemessung ist die Grundlage ein Fachwerkmodell. Die Bemessung wird dabei auf Zug- und Druckstreben zurückgeführt. Die Lastabtragung in den Druckstreben übernimmt dabei der Beton, während die Zugkräfte von Bewehrungseisen (Querkraftbewehrung) aufgenommen werden.

Für querkraftbewehrte Bauteile entwickelte Ritter schon 1899 die Fachwerkanalogie [1], die von Mörsch später fortgeführt wurde. Dieses Fachwerk besteht aus einem Obergurt, der die Betondruckzone eines Balkens darstellt und einem Untergurt, der von der Biegezugbewehrung gebildet wird. Dazu kommen geneigten Betondruckstreben sowie senkrechte Zugstreben (siehe Bild 2.1).

Kupfer [6] erweiterte das Modell nach dem Prinzip der Minimierung der Formänderungsarbeit auf flacher geneigte Druckstreben. Auch Leonhardt [7], durch die Einführung eines geneigten Druckgurtes und Kirmair [8], durch die Berücksichtigung der Rissverzahnungskräfte, haben das Modell weiterentwickelt. (Vgl. Bild 2.2).

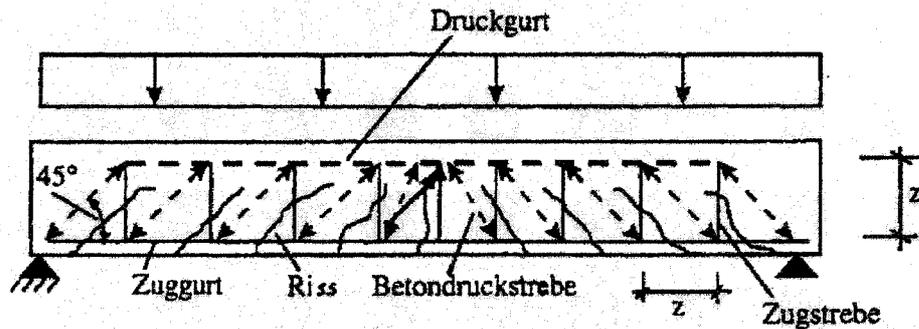


Bild 2.1 Fachwerkmodell nach der klassischen Fachwerkanalogie (Morsch) [9]

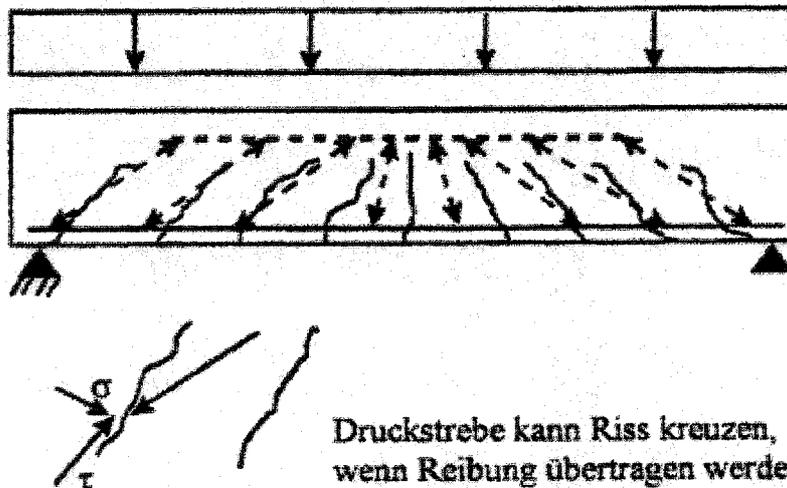


Bild 2.2 Erweiterten Fachwerkanalogie [9]

Es gibt zahlreiche Modelle für Bauteile ohne rechnerisch erforderlich Querkraftbewehrung. Eines davon ist das Kamm- bzw. Zahnmodell. Es beruht auf der Ausbildung eines kammartigen Rissbildes mit zahlreichen „Betonzähnen“, wie es im Bild 2.3 zu sehen ist. Dieses Modell wurde von Jungwirth [10], Moosecker [11] und Mallée [12] gründlich untersucht. Das Modell wurde aber nur für schubslanke Bauteile mit Querkraftbewehrung abgeleitet. Kani [13] betrachtete auch nicht querkraftbewehrte Bauteile. Reineck [14] stellte ein neues Modell dar, bei dem die Lasten über drei Traganteile aufgenommen werden: Rissreibung, Dübeltragwirkung der Biegezugbewehrung und Biegeeinspannung der Betonzähne.

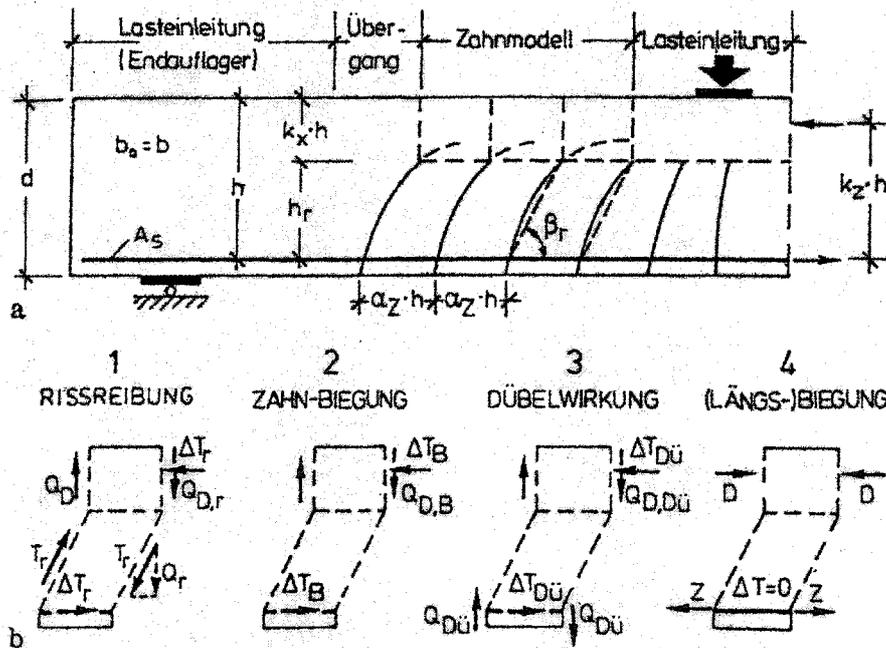


Bild 2.3 Zahnmodell nach Reineck [14]

Dieses kammartige Lastabtragungssystem liegt der Bemessung von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung nach DIN 1045-1 zugrunde, darf aber nur für plattenartige Bauteile angenommen werden.

Bei stabförmigen Bauteilen ist grundsätzlich eine Mindestquerkraftbewehrung einzulegen. In diesen Fällen liegt der Berechnung der aufnehmbaren Querkräfte wie in den Gleichungen (2.1) bis (2.5) gezeigt, ein Fachwerkmodellen zu Grunde. In Bild 2.4 ist das allgemeine Fachwerkmodell zur Querkrafttragwirkung dargestellt.

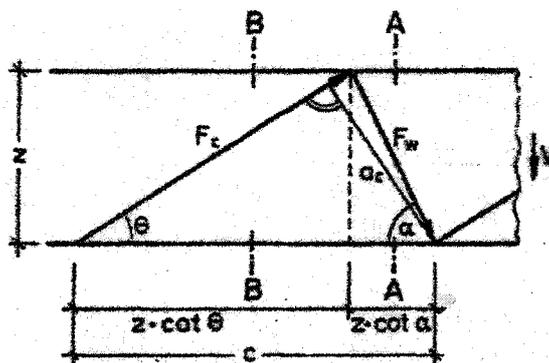


Bild 2.4 Allgemeines Fachwerkmodell zur Querkrafttragwirkung [2]

Die Zugkraft F_w ergibt sich aus dem Gleichgewicht der vertikalen Kräfte im Schnitt A-A:

$$F_w = \frac{V}{\sin \alpha} \quad \text{Gl. (2.1)}$$

Die bezogene Zugstrebenkraft F'_w pro Längeneinheit ist:

$$F'_w = \frac{F_w}{c} = \frac{F_w}{z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)} \quad \text{Gl. (2.2)}$$

Aus den Gleichungen (2.1) und (2.2) ergibt sich somit die durch die Querkraftbewehrung aufzunehmende Kraft zu:

$$V = F'_w \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad \text{Gl. (2.3)}$$

Aus dem Gleichgewicht der vertikalen Kräfte im Schnitt B-B, kann die Kraft F_c der unter dem Winkel θ geneigten Betondruckstrebe, wie folgt bestimmt werden:

$$F_c = \frac{V}{\sin \theta} = \sigma_c \cdot a_c \cdot b_w \quad \text{Gl. (2.4)}$$

Die Tragfähigkeit der Betondruckstrebe ist damit:

$$V = \sigma_c \cdot b_w \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin^2 \theta \quad \text{Gl. (2.5)}$$

mit $a_c = c \cdot \sin \theta = z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \theta$

Der Neigungswinkel der Druckstreben θ des Fachwerkmodells hat einen maßgebenden Einfluss auf die errechnete Menge der Querkraftbewehrung. Nach Mörsch wird der Winkel konstant zu $\theta = 45^\circ$ angenommen. Wie es bei zahlreichen Bauteilversuchen beobachtet wurde, ist in der Realität der Winkel der Druckstreben wesentlich flacher als 45° . Ein Winkel $\theta < 45^\circ$ führt zu einer deutlichen Reduzierung der erforderlichen Querkraftbewehrung.

Die Abhängigkeit des Druckstrebenwinkels von der Beanspruchung wird in beiden Normen durch verschiedene, vereinfachte Berechnungsansätze berücksichtigt.

Sowohl in EN 1992-1-1 als auch in DIN 1045-1 ist das Verfahren mit veränderlicher Druckstrebenneigung aufgenommen. Der Druckstrebenwinkel θ ist in gewissen Grenzen frei wählbar. Grenzwerte des Druckstrebenwinkels können dem EN 1992-1-1 entnommen werden. DIN 1045-1 enthält deutlich andere Grenzwerte, was zu deutlich unterschiedlichen Bewehrungsmengen führt.

Für die Ermittlung der Querkraftbewehrung darf nach beide Normen der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft V_{Ed} , bei vorwiegend gleichmäßig verteilter Last, in der Entfernung d vom Auflagerrand herangezogen werden.

Die Begründung dafür ist eine direkte Abtragung der Last in das Auflager über eine geneigte Druckstrebe. Man kann diese Lastabtragung in Bild 2.5 sehen.

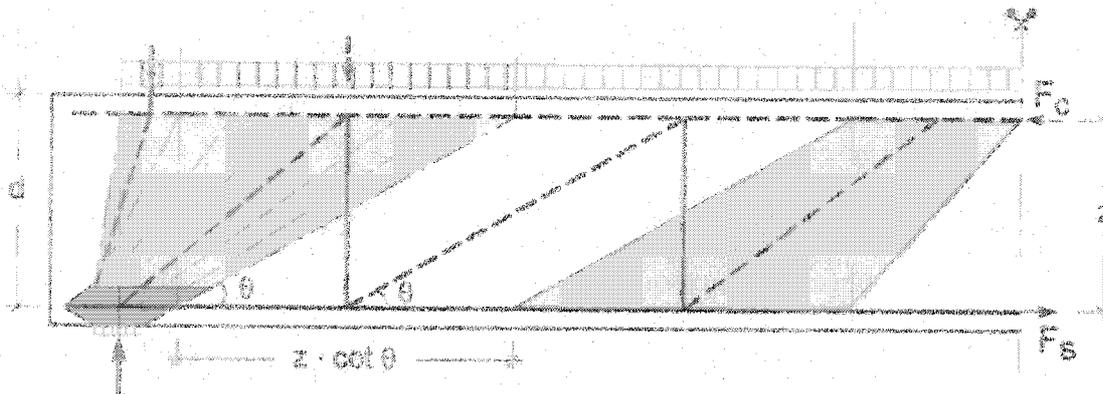


Bild 2.5 Lasteinleitung im Auflagerbereich bei direkter Auflagerung [15]

Wenn eine Einzellast F nahe am Auflager eingeleitet wird, darf gemäß beider Normen für die Ermittlung der Querkraftbewehrung der Querkraftanteil der Einzellast V_F mit einem Beiwert β , nach Gleichung (2.6) abgemindert werden. Grund dafür ist auch hier wieder, eine direkte Abtragung der Last ins Auflager. (Bild 2.6).

$$F_1 = \beta \cdot F$$

Gl. (2.6)

Der Abminderungsfaktor β unterscheidet sich in den betrachteten Normen. In Folgenden werden die unterschiedlichen Nachweise zur Querkrafttragfähigkeit im Grenzzustand der Tragfähigkeit aufgezeigt und die Unterschiede beide Normen analysiert. Dabei werden auflager-nahen Lasten besonders berücksichtigt.

Eine auflagernahe Einzellast liegt nach der Definition der DIN 1045-1 vor, wenn ihr Abstand vom Auflagerrand x kleiner $2,5 \cdot d$ ist.

Wenn die Einzellast in einem größeren Abstand eingeleitet wird, ist eine direkte Einleitung der Last oder eines Teiles davon in das Auflager nicht mehr möglich. In diesem Fall, wenn x größer $2,5 \cdot d$ ist, ist die Abminderung nicht mehr durchzuführen, das heißt β ist gleich eins zu setzen. Die Abtragung der Lasten in das Auflager erfolgt in diesem Fall durch die Zusammenwirken der Bügelbewehrung als Zugstreben und dem Beton als Druckstreben. Dies entspricht einem Fachwerkmodell.

Die Nachweise für die Querkraftbewehrung erfolgen dann mit dem in der Gleichung (2.8) dargestellten Bemessungswert.

$$V_{Ed} = V_{Ed}(g + q) + \beta \cdot V_{Ed}(F) \quad \text{Gl. (2.8)}$$

Da in dem Fall einer auflagernahe Einzellast eine Lastabtragung nach Art eines Sprengwerks über eine Druckstrebe direkt ins Auflager statt findet, darf die oben genannte Abminderung der Querkraft nicht bei dem Nachweis der Druckstrebe $V_{Rd,max}$ angesetzt werden. Dieser Nachweis ist daher für die einwirkende Querkraft unmittelbar an der rechnerischen Auflagerlinie zu führen.

Der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,ct}$ von biegebeanspruchten Bauteilen ohne Querkraftbewehrung darf nach Gleichung (2.9) ermittelt werden.

$$V_{Rd,ct} = \left[0,10 \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Gl. (2.9)}$$

Für Bauteilen bei denen $V_{Ed} \leq V_{Rd,ct}$ ist, wird rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich. Dieser Nachweis ist jedoch nur für Platten relevant, da bei Balken immer eine Mindestquerkraftbewehrung anzuordnen ist. Die Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne Schubbewehrung beruht auf der Ausnutzung der Zugfestigkeit des Betons. Die Zugfestigkeit ist eine sehr stark schwankende Größe. Entsteht eine Lokale Schwachstelle mit geringer Zugfestigkeit, kann es auf Grund der fehlenden Umlagerungsmöglichkeit, bei einem Balken beim Versagen der Schwachstelle, zum Bauteilversagen kommen.

Die Rissreibungskräfte zwischen den Betonzähnen sowie die Biegeeinspannung der Betonzähne in den Druckgurt (vgl. Kapitel 2.1) sind in der Festlegung der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,ct}$ von Bauteilen ohne Querkraftbewehrung berücksichtigt. Dies geschieht durch eine näherungsweise proportionale Beziehung zur Betonzugfestigkeit. Dieser Einfluss wird nach Versuchsergebnisse in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit mit folgendem Zusammenhang berücksichtigt.

$$f_{ct} \sim f_{ck}^{1/3} \quad \text{Gl. (2.10)}$$

Die Dübeltragwirkung der Biegezugbewehrung wird für die Ermittlung von $V_{Rd,ct}$ mit dem Längsbewehrungsgrad ρ_1 berücksichtigt.

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \quad \text{Gl. (2.11)}$$

Der Faktor η_1 in der Formel berücksichtigt die geringere Querkrafttragfähigkeit von Leichtbeton auf Grund des spröderen Materialverhaltens.

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho / 2200 \quad \text{Gl. (2.12)}$$

Die Berücksichtigung der Bauteilhöhe (Maßstabeffekt) ist durch den Faktor κ gegeben.

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{Gl. (2.13)}$$

Der multiplikative Faktor 0,10 ist empirisch ermittelt worden.

Die Einwirkung einer planmäßigen Betonlängsspannung σ_{cd} wird in dem Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,ct}$ durch den Faktor $0,12 \cdot \sigma_{cd}$ mit

$$\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \quad \text{Gl. (2.14)}$$

berücksichtigt.

N_{Ed} Bemessungswert der Längskraft infolge äußerer Einwirkungen oder Vorspannung
($N_{Ed} < 0$ als Längsdruckkraft)

Der Beiwert 0,12 ist ein empirisch ermittelter Wert, basierend auf zahlreichen Versuchsreihen [16].

Die Querkraftbemessung für Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung erfolgt im Gegensatz dazu auf der Grundlage eines Fachwerkmodells. Dabei wird die Neigung θ der Druckstreben des Fachwerks berücksichtigt und in der Norm nach Absatz (3) in 10.3.4 begrenzt. Die Grenzwerte sind in der Gleichung (2.15) zu sehen. Die untere Grenze ist von der Rissreibungskraft und der einwirkenden Längskraft abhängig, s. Gleichung (2.15)

$$0,58 \leq \cot \theta \leq \begin{cases} 1,2 - 1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \leq 3,0 & \text{für NB} \\ 1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}} \leq 2,0 & \text{für LB} \end{cases} \quad \text{Gl. (2.15)}$$

Die aufgeführte Grenzwerte entsprechen folgenden Druckstrebenwinkeln:

$$\begin{aligned} 18,4^\circ & \text{ für NB} \leq \theta \leq 59,9^\circ \\ 26,6^\circ & \text{ für LB} \leq \theta \end{aligned} \quad \text{Gl. (2.16)}$$

Der Betontraganteil $V_{Rd,c}$ berücksichtigt den Einfluss des Vertikalanteils der Rissreibungskraft und ist nach Gleichung (2.17) zu ermitteln:

$$V_{Rd,c} = \left[\beta_{ct} \cdot \eta_1 \cdot 0,10 \cdot f_{ck}^{1/3} \cdot \left(1 + 1,2 \cdot \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}} \right) \right] \cdot b_w \cdot z \quad \text{Gl. (2.17)}$$

z ist der innere Hebelarm aus der Biegebemessung.

Der Beiwert β_{ct} ist aus der Tabelle 13 der Norm zu entnehmen und stellt einen Rauigkeitsbeiwert für Fugen dar.

Der Faktor η_1 ist wie in der Gleichung (2.12) zu ermitteln, er berücksichtigt die geringere Querkrafttragfähigkeit von Leichtbeton.

Die Berücksichtigung der Rissreibungskraft ist nur in querkraftbewehrten Bauteilen sinnvoll. Hier wird die Breite der Schubrissse durch die Bewehrung begrenzt.

Die untere Begrenzung des Druckstrebenwinkels auf $\cot \theta \leq 3,0$ bzw. $\cot \theta \leq 2,0$ dient der Sicherstellung des Traganteiles der Rissreibung. Dieser Druckstrebenwinkel entspricht dem bei Bauteilen mit Mindestquerkraftbewehrung.

Die obere Grenze des Druckstrebenwinkels ist, gemäß DIN 1045-1, $\theta \leq 60^\circ$ ($\cot \theta \geq 0,58$).

Winkeln größer als 45° ($\cot \theta < 1$) sollten aber nur in Ausnahmefällen verwendet werden.

Bei Längszugbelastung ist der Wert 45° für θ empfohlen [18]. Größere Druckstrebenneigungen können zum Beispiel zur Reduzierung des Versatzmaßes beim Nachweis der Zugkraftdeckung (Verankerung der Biegezugbewehrung) sinnvoll sein; siehe (2.18)

Die Neigung der Druckstrebe und die daraus resultierenden Horizontalzugkraft, ist bei der Zugkraftdeckungslinie nach Gleichung (2.18) zu berücksichtigen

$$a_l = \frac{z}{2} \cdot (\cot \theta - \cot \alpha) \geq 0 \quad \text{Gl. (2.18)}$$

α ist der Winkel zwischen Querkraftbewehrung und Bauteilachse. Es werden in dieser Arbeit nur Bauteile mit senkrechter Querkraftbewehrung betrachtet, d.h. $\cot \alpha = 0$.

Die Ermittlung der Bewehrungsmenge erfolgt dann, in Abhängigkeit des Druckstrebenwinkels, nach Gleichung (2.19).

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot \cot \theta \quad \text{Gl. (2.19)}$$

A_{sw} ist die gesuchte Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung

s_w ist der Abstand der Querkraftbewehrung in Bauteillängsrichtung

f_{yd} ist die Streckgrenze des Betonstahls

Die folgenden Vereinfachungen dürfen für den Wert $\cot \theta$ angesetzt werden:

Für durch reine Biegung oder Biegung und Längsdruckkraft beanspruchten Bauteile darf der Wert $\cot \theta = 1,2$ angesetzt werden. Dies entspricht einem Druckstrebenwinkel von $39,8^\circ$. Für

den Fall von Biegung mit Längszugkraft darf vereinfachend $\cot\theta$ gleich eins ($\theta = 45^\circ$) angesetzt werden.

Die übertragbare Querkraft ist auch durch die Druckstreben­tragfähigkeit des Betons begrenzt.

Deswegen muss V_{Ed} auch nach Gleichung (2.20) nachgewiesen werden.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} = \frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad \text{Gl. (2.20)}$$

Die Abminderung der Druckstreben­tragfähigkeit auf Grund der Betonrissbildung wird mit dem Faktor α_c berücksichtigt. Dieser Abminderungsfaktor wird konstant und gleich 0,75 genommen (0,75 η_1 für Leichtbeton).

2.3 Ansatz in EN 1992-1-1

Die Nachweise zur Querkraft­tragfähigkeit sind im EN 1992-1-1 [5] im Kapitel 6.2 geregelt.

Ähnlich wie in DIN 1045-1 wird auch hier zwischen Bauteilen mit und ohne Querkraftbewehrung unterschieden.

Die aufnehmbare Querkraft in Bauteilen ohne Querkraftbewehrung ist in EN 1992-1-1 mit den zwei Beiwerten $C_{Rd,c}$ und k_1 , wie in der Gleichung (2.21) zu sehen ist, zu ermitteln. Für diese Beiwerte ist in EN 1992-1-1 ein Vorschlag angegeben (Gleichungen (2.21) und (2.22)); die Werte dürfen aber auch durch einen nationalen Anhang festgelegt werden.

$$V_{Rd,ct} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Gl. (2.21)}$$

$$k_1 = 0,15 \quad \text{Gl. (2.22)}$$

$$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c = 0,12 \quad \text{Gl. (2.23)}$$

γ_c ist der Teilsicherheitsbeiwert für den Beton. Dieser Beiwert wird in dieser Arbeit mit 1,5 angenommen.

Damit ergibt sich der Rechenwert der aufnehmbare Querkraft in Bauteilen ohne Querkraftbewehrung zu:

$$V_{Rd,ct} = \left[0,12 \cdot k \cdot (100\rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,15 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Gl. (2.24)}$$

Die Beiwerte k und ρ_1 sind wie in der DIN 1045-1 definiert.

Bei der Einwirkung einer Betonlängsspannung σ_{cd} ist im Unterschied zu DIN 1045-1 $N_{Ed} > 0$ als Längsdruckkraft definiert.

$$\sigma_{cd} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \quad \text{Gl. (2.25)}$$

In EN 1992-1-1 wird ein Mindestwert der aufnehmbaren Querkraft ohne Querkraftbewehrung gefordert. Dieser errechnet sich nach Gleichung (2.26).

$$V_{Rd,ct} = (v_{\min} + k_1 \cdot \sigma_{cd}) \cdot b_w \cdot d \quad \text{Gl. (2.26)}$$

mit dem folgenden Vorschlag für den Wert v_{\min} :

$$v_{\min} = 0,035 \cdot k^{1/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{Gl. (2.27)}$$

Leichtbeton wird im EN 1992-1-1 in einem eigenen Kapitel gesondert behandelt. Der Rechenwert der aufnehmbare Querkraft in Bauteilen ohne Querkraftbewehrung ergibt sich nach Gleichung (2.28).

$$V_{Rd,ct} = \left[C_{IRd,c} \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100\rho_1 \cdot f_{lck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Gl. (2.28)}$$

Der Wert η_1 ist wie nach DIN 1045-1 nach Gleichung (2.12) zu berechnen.

f_{lck} ist die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Leichtbetons nach 28 Tagen und ist aus der Tabelle 11.3.1 des EN 1992-1-1 zu entnehmen.

Für die Beiwerte $C_{lRd,c}$ und k_1 ist im EN 1992-1-1, wie auch bei Normalbeton, ein Vorschlag angegeben (Gleichungen (2.29) und (2.30)). Die Werte dürfen aber auch durch einen nationalen Anhang abgeändert werden.

$$k_1 = 0,15 \quad \text{Gl. (2.29)}$$

$$C_{lRd,c} = 0,15/\gamma_c = 0,10 \quad \text{Gl. (2.30)}$$

Damit ergibt sich bei der Anwendung von Leichtbeton der Rechenwert der aufnehmbare Querkraft in Bauteilen ohne Querkraftbewehrung zu:

$$V_{Rd,ct} = \left[0,10 \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100\rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,15 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d \quad \text{Gl. (2.31)}$$

Der geforderte Mindestwert der aufnehmbare Querkraft ohne Querkraftbewehrung wird in diesem Fall nach Gleichung (2.32) errechnet.

$$V_{Rd,ct} = (v_{l,min} + k_1 \cdot \sigma_{cd}) \cdot b_w \cdot d \quad \text{Gl (2.32)}$$

$$v_{l,min} = 0,030 \cdot k^{1/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{Gl. (2.33)}$$

Wenn eine Einzellast auf einen Träger ohne Querkraftbewehrung im Abstand $0,5d \leq a_v \leq 2d$ vom Auflagerrand einwirkt, ist auch in EN 1992-1-1 eine Abminderung des Bemessungswerts der Querkraft V_{Ed} zulässig. Anders als in DIN ist dieser Abminderungsfaktor:

$$\beta = \frac{a_v}{2,0 \cdot d} \quad \text{Gl. (2.34)}$$

mit $0,5 \cdot d \leq a_v \leq 2,0 \cdot d$

Dabei ist a_v der Abstand der Einzellast vom Auflagerrand und d die statische Nutzhöhe des Trägers.

Die obere Grenze für a_v stellt wie bei DIN 1045-1 die maximal Entfernung der Last vom Auflager dar, bei der diese noch direkt in das Auflager abgetragen werden kann. In EN 1992-1-1 wird zusätzlich eine untere Grenze für a_v angegeben. Wenn a_v kleiner als $0,5d$ ist, wird für die Berechnung von β ein Wert von $a_v = 0,5d$ angesetzt.

Der Bemessungswert der einwirkenden Querkraft V_{Ed} muss jedoch immer ohne die Abminderung β in Bauteilen ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung die folgende Bedingung erfüllen:

$$V_{Ed} \leq 0,5 \cdot b_w \cdot d \cdot v \cdot f_{cd} \quad \text{Gl. (2.35)}$$

Für den Beiwert v ist im EN 1992-1-1 ein Vorschlag angegeben (vgl. Gleichung (2.36)). Der Wert dürfte aber auch aus einem nationalen Anhang entnommen werden.

$$v = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad \text{Gl. (2.36)}$$

Damit wird eine Grenze für die Druckstreben­tragfähigkeit festgesetzt, da die Lastabtragung eines Teiles der Einzellast in das Auflager über eben diese Druckstrebe erfolgt.

Die Querkraftbemessung für Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung erfolgt auch nach EN 1992-1-1 auf der Grundlage eines Fachwerkmodells. Dabei wird die Neigung θ der Druckstreben des Fachwerks berücksichtigt und in der Norm nach Absatz (2) in 6.2.3 begrenzt (vgl. Gleichung 2.37). Für die Grenzwerte sind in EN 1992-1-1 Vorschläge angegeben (Gleichung (2.37)), die Werte dürfen aber auch dem nationalen Anhang entnommen werden.

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad \text{Gl. (2.37)}$$

Die aufgeführte Grenzwerte entsprechen folgenden Druckstrebenwinkeln:

$$21,8^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \quad \text{Gl. (2.38)}$$

Die Festlegung der Bewehrungsmenge erfolgt dann, ähnlich wie nach DIN, nach Gleichung (2.39). Es werden in dieser Arbeit nur Bauteile mit senkrechter Querkraftbewehrung betrachtet.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,sy} = \frac{A_{sw}}{s_w} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot \cot \theta \quad \text{Gl. (2.39)}$$

A_{sw} ist die gesuchte Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung

s_w ist der Abstand der Querkraftbewehrung in Bauteillängsrichtung

f_{yd} ist die Streckgrenze des Betonstahls

Die einwirkende Querkraft ist auch wie bei DIN 1045-1 von der Druckstrebentragfähigkeit des Betons begrenzt. Diese muss nach Gleichung (2.40) nachgewiesen werden.

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad \text{Gl. (2.40)}$$

Der Abminderungsbeiwert α_{cw} berücksichtigt den Einfluss einer Betonlängsspannung infolge einer Normalkraft. v_1 ist ein Abminderungsfaktor für die Festigkeit infolge der Rissbildung des Betons. Werte für α_{cw} (vgl. Gleichung (2.41) bis (2.44)) und v_1 werden in dem EN 1992-1-1 vorgeschlagen, dürfen aber auch aus dem nationalen Anhang entnommen werden.

$$\alpha_{cw} = 1 \quad \text{Für nicht vorgespannten Bauteile} \quad \text{Gl. (2.41)}$$

$$\alpha_{cw} = (1 + \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{für } 0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd} \quad \text{Gl. (2.42)}$$

$$\alpha_{cw} = 1,25 \quad \text{für } 0,25 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,50 \cdot f_{cd} \quad \text{Gl. (2.43)}$$

$$\alpha_{cw} = 2,5 \cdot (1 - \sigma_{cp} / f_{cd}) \quad \text{für } 0,50 < \sigma_{cp} \leq 1,00 \cdot f_{cd} \quad \text{Gl. (2.44)}$$

Für den Abminderungsfaktor v_1 darf der Wert v nach Gleichung (2.36) zu verwendet werden.

In EN 1992-1-1 wird eine obere Grenze für die ansetzbare Querschnittsfläche der Querkraftbewehrung $A_{sw,max}$ festgelegt. Diese Grenze ist nach der Gleichung (2.42) zu ermitteln.

$$\frac{A_{sw,max}}{s_w} \leq \frac{\frac{1}{2} \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} \cdot b_w}{f_{ywd}} \quad \text{Gl. (2.42)}$$

Im Fall eines Bauteils mit Querkraftbewehrung bei dem eine auflagernahe Last vorhanden ist, muss der mit dem Abminderungsfaktor β berechnete Bemessungswert der einwirkenden Querkraft V_{Ed} , die folgende Bedingung erfüllen:

$$V_{Ed} \leq A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha \quad \text{Gl. (2.43)}$$

Der Wert $A_{sw} \cdot f_{ywd}$ stellt dabei den Widerstand der Querkraftbewehrung dar (in diesem Fall werden Bügel senkrecht zur Bauteilachse angenommen, d.h. $\sin \alpha = 1$). Für die Festlegung von A_{sw} wird gemäß EN 1992-1-1 die im Bereich von $0,75 \cdot a_v$ vorhandene Querkraftbewehrung berücksichtigt (siehe Bild 2.7).

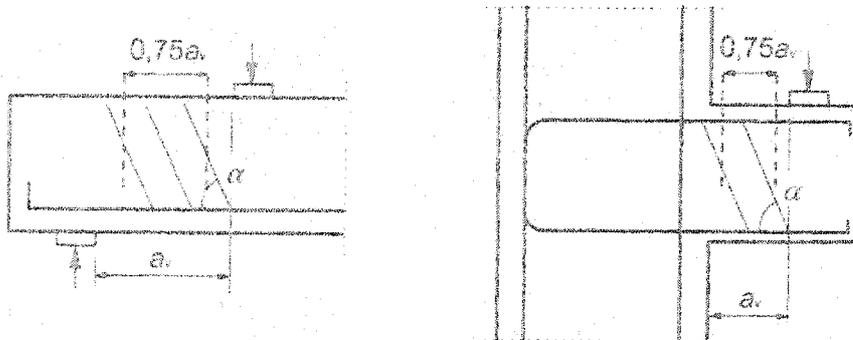


Bild 2.7 Bereich zur Berücksichtigung der Querbewehrung im Fall einer auflagernahen Einzellast gemäß EN 1992-1-1

Der Bemessungswert V_{Ed} , der ohne die Abminderung β berechnet wird, muss gleichwohl auch die Bedingung der Gleichung (2.35) erfüllen.

2.4 Vergleich der beiden Normen

In der folgenden Tabelle ist ein Vergleich der unterschiedlichen Nachweise zur Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung.

Tabelle 1. Nachweise der Querkrafttragfähigkeit der Unterschiedlichen Normen für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

	DIN 1045-1	EN 1992-1-1	Anmerkungen
β	$\frac{x}{2,5 \cdot d}$	$\frac{a_v}{2,0 \cdot d}$	$x = a_v$
Abstand zum Auflagerrand	$x \leq 2,5 \cdot d$	$0,5 \cdot d \leq a_v \leq 2,0 \cdot d$	Bei DIN 1045-1 wird keine untere Grenze festgelegt
$V_{Rd,ct}$	$\left[0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,12 \cdot \sigma_{cd} \right] \cdot b_w \cdot d$	$\left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d$	$\kappa = k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$ $\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b_w \cdot d}$
$V_{Rd,ct \min}$	-	$(v_{\min} + k_1 \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d$	Wird nach DIN 1045-1 nicht gefordert
η_1	1,0 für NB Tabelle 10 ⁽¹⁾ für LB	-	Wird in EN 1992-1-1 in einem neuen Kapitel behandelt
$C_{Rd,c}$	-	$\frac{0,18}{\gamma_c}$	In DIN 1045-1 wird ein konstanter Beiwert unabhängig vom Teilsicherheitsbeiwert für Beton festgelegt
k_1	-	0,15	
v_{\min}	-	$0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ für NB $0,030 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$ für LB	
$V_{Ed, \max}$ Bei Auftreten von auflagenahen Lasten	-	$0,5 \cdot b_w \cdot d \cdot v \cdot f_{cd}$	Der Wert V_{Ed} ist hier ohne die Abminderung von β zu berücksichtigen
v	-	$0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung von Schubrissen im Beton

¹ Tabelle 10 – Festigkeits- und Formänderungskennwerte von Leichtbeton, Seite 67 DIN 1045-1

Die Tabelle 2 enthält einen Vergleich der Querkrafttragfähigkeit für Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung. Es werden hier nur die Nachweise für senkrecht angeordnete Querkraftbewehrung dargestellt.

Tabelle 2. Nachweise der Querkrafttragfähigkeit der unterschiedlichen Normen für Bauteile mit rechnerisch erforderlichen Querkraftbewehrung

	DIN 1045-1	EN 1992-1-1	Anmerkungen
$V_{Rd,max}$	$\frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$	$\frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$	
α_c	$0,75\eta_1$	-	
α_{cw}	-	1 nicht vorgespannten Bauteil $(1 + \sigma_{cp}/f_{cd})$ $0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd}$ 1,25 $0,25 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,50 \cdot f_{cd}$ $2,5 \cdot (1 - \sigma_{cp}/f_{cd})$ $0,50 < \sigma_{cp} \leq 1,00 \cdot f_{cd}$	
v_1	-	v	
θ	$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} \leq 3,0$ für NB $\leq 2,0$ für LB	$1 \leq \cot \theta \leq 2,5$	In beiden Normen wird $\cot \theta = \frac{1,2 - 1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}}$ vorgeschrieben. Unterschiedlich sind nur die absoluten unteren Grenzwerte für θ
$\frac{A_{sw,max}}{s_w}$	-	$\frac{\frac{1}{2} \cdot \alpha_c \cdot v \cdot f_{cd} \cdot b_w}{f_{ywd}}$	
$V_{Ed,max}$ Bei Auftreten von auflagnahen Einzellasten		$A_{sw} \cdot f_{ywd} \cdot \sin \alpha$	Der Wert V_{Ed} ist hier mit dem Abminderungsfaktor β zu berechnen
$V_{Ed,max}$ Bei Auftreten von auflagnahen Einzellasten		$0,5 \cdot b_w \cdot d \cdot v \cdot f_{cd}$	Der Wert V_{Ed} ist hier ohne den Abminderungsfaktor β zu berechnen.

Wie schon im Kapitel 2.1 erwähnt, darf gemäß beider Normen der Querkraftanteil einer auflagnahen Einzellast V_F mit einem Beiwert β abgemindert werden. Dies gilt für die Ermitt-

lung der Querkraftbewehrung. Der Grund dafür ist eine direkte Abtragung der Last in das Auflager. Dieser Abminderung darf aber nicht beim Nachweis der Druckstreben angesetzt werden.

Der Abminderungsfaktor wird, wie in Tabelle 1 dargestellt, in beiden Normen unterschiedlich berücksichtigt:

$$\beta_{EN1992-1-1} = \frac{a_v}{2,0 \cdot d} \quad \text{und} \quad \beta_{DIN1045-1} = \frac{x}{2,5 \cdot d}$$

Bild 2.8 zeigt den Vergleich der Abminderungsfaktoren beider Normen, in Abhängigkeit vom Abstand der auflagnahen Last zum Auflagerrand. Die Abmessungen des Trägers und die eingesetzten Lasten sind in der Legende rechts oben angegeben.

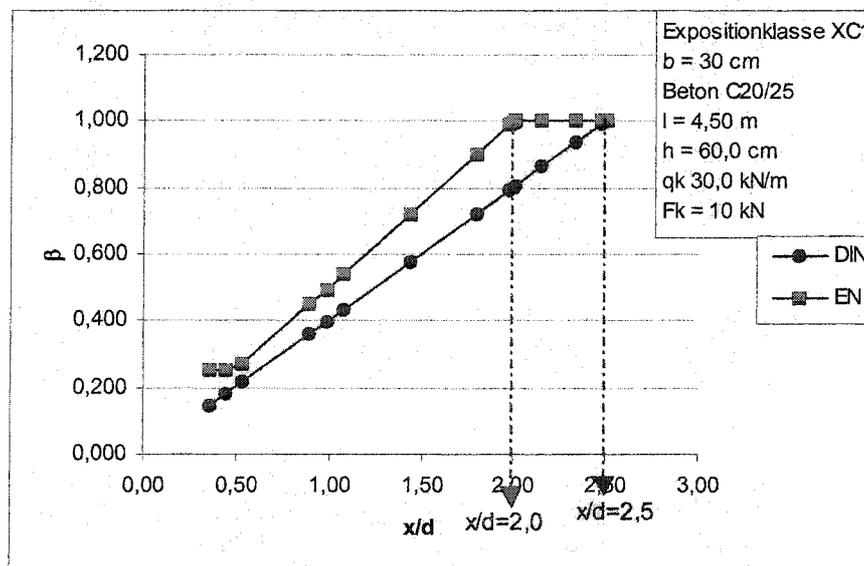


Bild 2.8: Abminderungsfaktoren der Querkrafttragfähigkeit nach DIN 1045-1 und EN 1992-1-1

Die deutsche Norm DIN 1045-1 lässt grundsätzlich eine um 25% höhere Abminderung der auflagnahen Einzellast zu. Diese höhere Abminderung führt zu einem kleineren Bemessungswert der einwirkenden Querkraft V_{Ed} wie es in Gleichung (2.44) zu sehen ist:

$$V_{Ed} = V_{Ed,g+q} + \beta \cdot V_{Ed,F} \quad \text{Gl. (2.44)}$$

$$\beta_{DIN} < \beta_{EN} \quad \Rightarrow \quad V_{Ed}^{DIN} < V_{Ed}^{EN}$$

Der Bereich, in dem eine Einzellast als auflagenah gilt, reicht in DIN 1045-1 ebenfalls weiter als im EN 1992-1-1. Wenn die Einzellast näher als $0,5 \cdot d$ am Auflager liegt, so ist gemäß EN 1992-1-1 ein Wert von $0,5 \cdot d$ für die untere Grenze des Einflussintervalls anzunehmen. Dies führt nach EN 1992-1-1 in diesem Bereich zu einem konstanten Beiwert $\beta = 0,25$ (siehe Bild 2.8). Für den Bemessungswert der einwirkenden Querkraft V_{Ed} werden damit für β im Bereich $0 \leq x \leq 0,5 \cdot d$, nach EN 1992-1-1, größere Werte errechnet als nach DIN 1045-1. Dadurch ist natürlich auch die nach EN 1992-1-1 einzulegende Querkraftbewehrung größer.

Die Querkraftbewehrung ist gemäß den beiden Normen wie in Gleichung (2.45) gezeigt zu ermitteln. Damit ergeben sich bei DIN 1045-1 kleinere Bewehrungsmenge A_{sw}/s_w als bei EN 1992-1-1.

$$A_{sw}/s_w = \frac{V_{Ed}}{f_{yd} \cdot z \cdot \cot \theta} \quad \text{Gl. (2.45)}$$

$$(A_{sw}/s_w)_{\min} = \rho_w \cdot b_w \cdot \sin \alpha \quad \text{Gl. (2.45b)}$$

Für Bügel senkrecht zur Bauteilachse gilt $\sin \alpha = 1$, da $\alpha = 90^\circ$ ist.

Dieser Unterschied führt bei der EN 1992-1-1 zu einer unwirtschaftlicheren Querkraftbemessung als bei der DIN 1045-1.

In den Fällen, in denen die Mindestbewehrung überwiegt, stimmt diese Aussage nicht unbedingt. Bei niedrigeren Betondruckfestigkeiten, ist die Mindestbewehrung nach EN 1992-1-1 größer als nach DIN 1045-1, der Unterschied ist aber nicht maßgebend. Bei höheren Betondruckfestigkeiten kehrt sich die Situation um, es werden nach DIN 1045-1 deutlich höheren Mindestbewehrungsmengen erforderlich als nach EN 1992-1-1. Diese Differenz kommt aus den unterschiedlich festgelegten Grundwerten ρ für die Ermittlung der Mindestbewehrung. In der DIN 1045-1 ist der Wert ρ , wie in der Gleichung (4.46) definiert, vom Mittelwert der Zugfestigkeit f_{ctm} des Betons und vom charakteristischen Wert der Streckgrenze f_{yk} des Betonstahls abhängig:

$$\rho_{w,\min}^{DIN} = 0,16 f_{ctm} / f_{yk} \quad \text{Gl. (2.46)}$$

Bei EN 1992-1-1 wird der Wert ρ in Abhängigkeit von der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen f_{ck} und vom charakteristischen Wert der Streckgrenze f_{yk} des Betonstahls definiert:

$$\rho_{w,\min}^{EN} = (0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}) / f_{yk} \quad \text{Gl. (2.47)}$$

Sowohl den Regelungen nach DIN 1045-1-1 als auch denen nach EN 1992-1-1 liegen empirische Ansätze zu Grunde. Der Unterschied beider Gleichungen ergibt sich aus der Tatsache, dass ihnen verschiedene Untersuchungen als Grundlage dienen.

Nach EN 1992-1-1 ist der Nachweis der Betondruckstrebe aufwendiger als nach DIN 1045-1. Dies kommt dadurch dass, nach EN 1992-1-1 dieser Nachweis in drei Teile aufgeteilt ist. In Bauteilen in denen keine rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung benötigt wird, darf beim Auftreten einer auflagernahe Einzellast die Querkraft V_{Ed} ohne Abminderung einen Grenzwert nicht überschreiten (siehe Gl. (2.35)). Für Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung, muss auch der Grenzwert der Querkraft ohne die Abminderung überprüft werden. Noch dazu muss der Nachweis auch mit dem Abminderungsfaktor β geführt werden. Damit wird der Traganteil der Schubbewehrung berücksichtigt.

Zusätzlich zu den oben genannten Nachweisen muss nach der EN 1992-1-1, genau so wie nach DIN 1045-1, der Nachweis der Druckstrebe durch die Begrenzung der aufnehmbaren Querkraft des Bauteils $V_{Rd,\max}$ geführt werden. Hierbei unterscheiden sich die beiden Normen durch die Verwendung der folgenden, von einander verschiedenen Beiwerte.

$$V_{Rd,\max}^{DIN} = \frac{b_w \cdot z \cdot \alpha_c \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad \text{Gl. (2.48)}$$

$$V_{Rd,\max}^{EN} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad \text{Gl. (2.49)}$$

Diese für DIN 1045-1 führen zu einer größeren, maximal aufnehmbaren Querkraft des Bauteils. Dies kommt dadurch, dass nach EN 1992-1-1 der vorgeschlagene Faktor $v_1 = v$, infolge der Rissbildung des Betons und der Betonfestigkeit, maximal den Wert 0,6 erreicht.

Dieser Effekt wird nach DIN 1045-1 mit dem konstanten Abminderungsfaktor α_c berücksichtigt. Diese wurde aus zahlreichen Versuchen abgeleitet und beträgt für den Normalbeton 0,75. In EN 1992-1-1 ist auch ein Beiwert α_{cw} wegen des Einflusses einer Betonlängsspannung infolge einer Normalkraft zu berücksichtigen. Damit werden nach EN 1992-1-1 bei der Berechnung von $V_{Rd,max}$ kleinere Werte erreicht.

Die Berücksichtigung des Einflusses einer Normalkraft bei der Querkrafttragfähigkeit wird in beiden Normen behandelt aber mit verschiedene Abminderungsfaktoren, was zu unterschiedlichen Bemessungswerten der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,ct}$ führt, und damit zu unterschiedlichen Grenzen für die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung. In dem Fall, dass keine Querkraftbewehrung erforderlich ist, ist für Balken immer die Mindestquerkraftbewehrung zu setzen, die in beiden Normen, wie schon erwähnt wurde, unterschiedlich ist.

Wenn rechnerisch Querkraftbewehrung erforderlich ist, so muss der Einfluss einer Normalkraft für die Bestimmung der Bewehrungsmenge berücksichtigt werden. Dies erfolgt durch die Berechnung von $\cot \theta$.

In beiden Normen wird $\cot \theta$ wie in Gleichung (2.50) vorgeschrieben berechnet.

$$\cot \theta = \frac{1,2 - 1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} \quad \text{Gl. (2.50)}$$

Unterschiedlich sind nur die absoluten unteren Grenzwerte für θ .

In EN 1992-1-1 sind die Grenzen der Druckstrebenneigung θ nach Gleichung (2.51) zu verwenden. Der zulässige Bereich für θ ist in DIN 1045-1 größer, wie die Gleichung (2.52) zeigt. Die untere Grenze entspricht dem Druckstrebenneigungswinkel bei Bauteilen mit Mindestquerkraftbewehrung. Da diese nach den beiden Normen unterschiedlich ist, sind die untere Grenzwerte der Neigung θ ebenfalls verschieden. Die kleinere untere Grenze der Neigung nach DIN 1045-1, wird sich für die Querkraftbemessung wirtschaftlich günstig auswirken, da deswegen kleinere Bewehrungsmenge errechnet werden.

$$1 \leq \cot \theta \text{ (EN)} \leq 2,5 \quad \text{Gl. (2.51)}$$

$$0,58 \leq \cot \theta \text{ (DIN)} \leq 3 \quad \text{Gl. (2.52)}$$

Da in EN 1992-1-1 kein Rechenwert für $\cot \theta$ vorgeschlagen wird, ist der Wert aus der DIN übernommen worden, s. Gl. (2.53). Diese Annahme führt dazu, dass die nach beiden Normen errechnete Querkraftbewehrung annähernd gleich ist, wenn der Winkel zwischen den Grenzwerten der EN 1992-1-1 liegt.

$$\cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} \quad \text{Gl. (2.53)}$$

3 Parameterstudie

3.1 Betrachtetes statisches System

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der nach den Normen zu berechnenden Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit auflagernahen Einzellasten. Das gewählte System soll möglichst einfach und baupraktisch relevant sein, um diesen Vergleich optimal durchführen zu können. Als System wird deshalb ein gelenkig gelagerter Einfeldträger, nach Bild 3.1, gewählt.

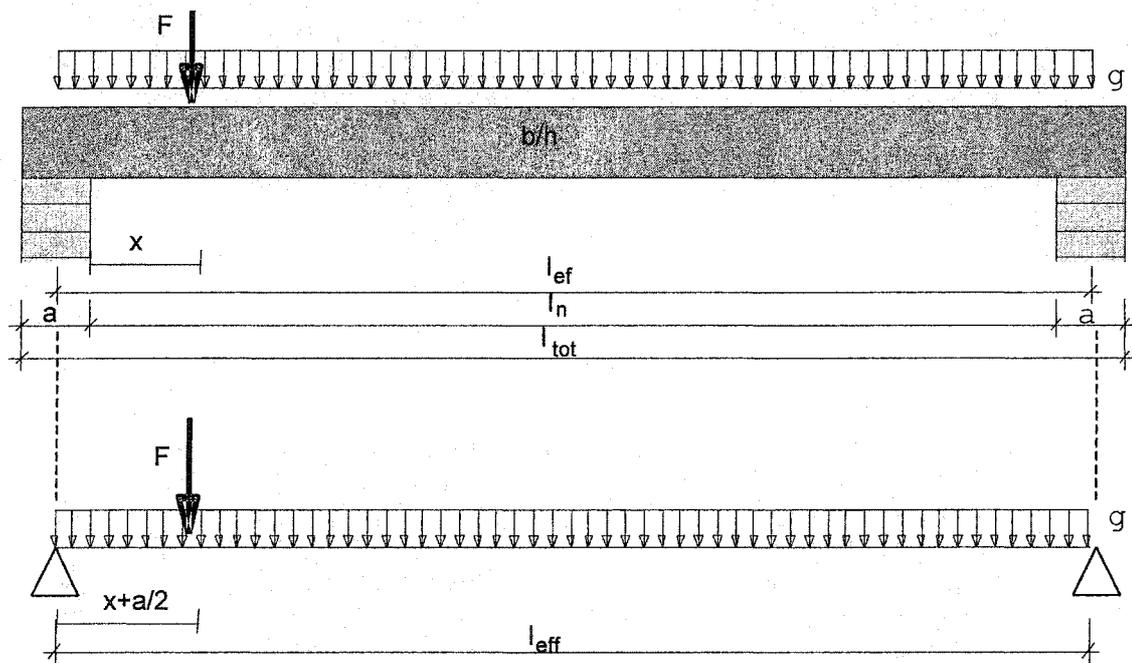


Bild 3.1 Gewähltes statisches System

3.2 Wahl der Parameter

Die Wahl der Parameter erfolgt unter Berücksichtigung der Problemstellung, die in Kapiteln 1 und 2 dargestellt wurde. Alle Einflussgrößen die zu einer Variation der Querkrafttragfähigkeit des gewählten Systems führen, werden im Weiteren näher analysiert. Diejenige Einflussgrößen, die eine entscheidende Rolle in der Bemessung für die Querkrafttragfähigkeit haben, werden als Parameter für die weiter Untersuchung genommen. Folgenden Parameter wurden hierzu betrachtet: Bauteilabmessungen, Betondruckfestigkeit, Längsbewehrungsgrad, Längskräfte, Abstand der Einzellast vom Auflagerrand, Größe der Einzellast, Größe der Verkehrslast.

3.2.1 Breite, Höhe und Länge

Wenn die Breite b des Trägers vergrößert wird, tritt eine lineare Zunahme des Bemessungswerts der Querkrafttragfähigkeit $V_{Rd,ct}$ ein. Die Breite ist bei Platten nicht entscheidend.

In dem Fall, dass eine Querkraftbewehrung rechnerisch erforderlich ist, spielt die Abmessung b des Trägers keine Rolle für die Ermittlung der Querkraftbewehrungsmenge. Entscheidend ist sie jedoch für die Ermittlung der maximalen Druckstrebentragfähigkeit des Betons.

Im Weiteren werden mehrere Balkenbreiten untersucht. Darüber hinaus wird auch eine Platte betrachtet.

Die Höhe spielt eine wichtige Rolle, sowohl bei der Bestimmung ob für ein Bauteil Querkraftbewehrung erforderlich ist als auch für die Ermittlung der Querkraftbewehrung und für die Bemessung der Betondruckstreben.

Deshalb wird auch die Höhe des Trägers als Parameter für diese Arbeit berücksichtigt. Das Intervall, in dem h und b variiert werden, wurde so gewählt, dass Abmessungen des üblichen Hochbaus berücksichtigen wurden.

Die Länge des Trägers ist für die Berücksichtigung von auflagnahen Einzellasten kein entscheidender Parameter. Von der Definition her ist eine Einzellast als auflagnah zu betrachten, wenn ihr Abstand vom Auflagerrand x , kleiner oder gleich der statischen Nutzhöhe d ist. Der Abminderungsfaktor β ist von der Länge unabhängig. Das bedeutet, dass die Länge des

Trägers keine Rolle spielt. Für die Bemessung der Querkrafttragfähigkeit hat sie natürlich einen Einfluss, da sie direkt in den Bemessungswert, der für ein gewähltes statisches System ermittelt wurde, eingeht. Deswegen wurde die Länge des Balkens nicht als Parameter betrachtet.

3.2.2 Betondruckfestigkeit

Wie erwähnt, wurden in dieser Arbeit nur im normalen Hochbau übliche Abmessungen betrachtet. Aus diesem Grund werden auch keine hochfesten Betone berücksichtigt.

Die Betondruckfestigkeit wurde konstant mit C20/25 angenommen.

3.2.3 Längsbewehrungsgrad

Der Längsbewehrungsgrad ist von der Biegebemessung abhängig, dass heißt er wird ständig wegen der anderen Parameteränderungen variiert. Es ist aber nicht direkt als Parameter in dieser Arbeit berücksichtigt worden.

3.2.4 Längskraft

Es sind beide Fälle (Druck- und Zuglängskraft) betrachtet worden. Die maximal Höhe der Drucklängskraft war dabei die Kraft, die gerade noch eine Berechnung nach Theorie I Ordnung zulässt. Betrachtungen nach Theorie II Ordnung werden in Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde die maximale Längsdruckkraft so gewählt, dass die Schlankheit des Trägers kleiner als die maximal zulässige Schlankheit λ_{\max} ist. Diese Schlankheit ist nach DIN 1045-1 nach der Gleichung (3.2) zu berechnen.

$$\lambda_{\max} = \frac{25}{\sqrt{|v_{Ed}|}} \quad \begin{array}{l} \text{für } |v_{Ed}| \geq 0,41 \\ \text{für } |v_{Ed}| < 0,41 \end{array} \quad \text{Gl. (3.2)}$$

3.2.5 Größe der Verkehrslast

Die Verkehrslast wird in allen Fällen konstant mit 20 kN/m angenommen während andere Parameter bearbeitet werden. Die Verkehrslast ist zu variieren, um den Einfluss an der Querkraftbewehrung zu analysieren. Für die verschiedenen Verkehrslasten wird der Abstand der Einzellast - deren Wert konstant gehalten wird - vom Auflagerrand variiert, um die Interaktion der Verkehrslast mit der auflagnahen Last sehen zu können.

3.2.6 Abstand der Einzellast vom Auflagerrand und Größe der Einzellast

Die Bemessung für die Querkrafttragfähigkeit wurde für verschiedene Größen der Einzellast durchgeführt. Der Abstand der Einzellast vom Auflagerrand x wurde so gewählt, dass er einen Einfluss auf den Abminderungsbeiwert β hatte. Der Abstand x ist in den beiden Normen wie folgt definiert (vgl. 2.1; 2.2):

$$0,5 \cdot d \leq x^{EN} = a_v \leq 2,0 \cdot d \quad \text{Gl. (3.3)}$$

$$x^{DIN} \leq 2,5 \cdot d \quad \text{Gl. (3.4)}$$

Die Norm DIN 1045-1 lässt einen größeren Spielraum für β zu. Wie im Kapitel 2.4 schon analysiert, werden für β im Bereich $0 \leq x \leq 0,5 \cdot d$ zur Ermittlung der einwirkenden Querkraft V_{Ed} nach EN 1992-1-1 größere Werte errechnet als nach DIN 1045-1. Dadurch ist natürlich auch die nach EN 1992-1-1 einzulegende Querkraftbewehrungsmenge größer.

3.3 Ergebnisse der Parameterstudie

Als Parameter für die weitere Untersuchung sind diejenigen Einflussgrößen gewählt, die eine entscheidende Rolle in der Bemessung für die Querkrafttragfähigkeit haben. Folgenden Parameter wurden hierzu beschrieben: Bauteilbreite, Bauteilhöhe, Größe der Verkehrslast, Längskräfte, Abstand der Einzellast vom Auflagerrand und Größe der Einzellast.

3.3.1 Breite

3.3.1.1 Querkraftbewehrung

Im folgenden Bild 3.2 ist ein Vergleich der Bewehrungsmenge für Balken mit verschiedenen Breiten dargestellt. Die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrungsmenge nimmt mit zunehmender Balkenbreite nach beiden Normen auf Grund der Zunahme des Eigengewichtes mäßig zu. Nur bei geringeren Breiten ist eine anfängliche Abnahme der Bewehrung zu erkennen. Für eine Balkenhöhe von 40cm ist bei geringeren Balkenbreiten der Wert $\cot\theta$ noch im Grenzwert, dass heißt $\cot\theta$ nimmt mit der Breite zu, wodurch die Bewehrungsmenge abnimmt. Für größere Balkenhöhen ist für $\cot\theta$ der obere Grenzwert erreicht. Damit bleibt der Druckstrebenwinkel für diese Fälle konstant und die Bewehrungsmenge ändert sich nur noch durch die oben beschriebene Variation der Breite.

Im Bild 3.2 ist auch die Mindestbewehrungsmenge beider Normen dargestellt (siehe Gleichungen (2.45b), (2.46) und (2.47)). Der Unterschied beider Mindestbewehrungen ist für die gewählte Betonfestigkeit fast nicht erkennbar.

Die rechnerisch ermittelte Querkraftbewehrung nach DIN 1045-1 ist kleiner als nach EN 1992-1-1. Dies führt dazu, dass die Mindestbewehrung nach DIN 1045-1 schon bei kleineren Balkenbreiten maßgebend wird.

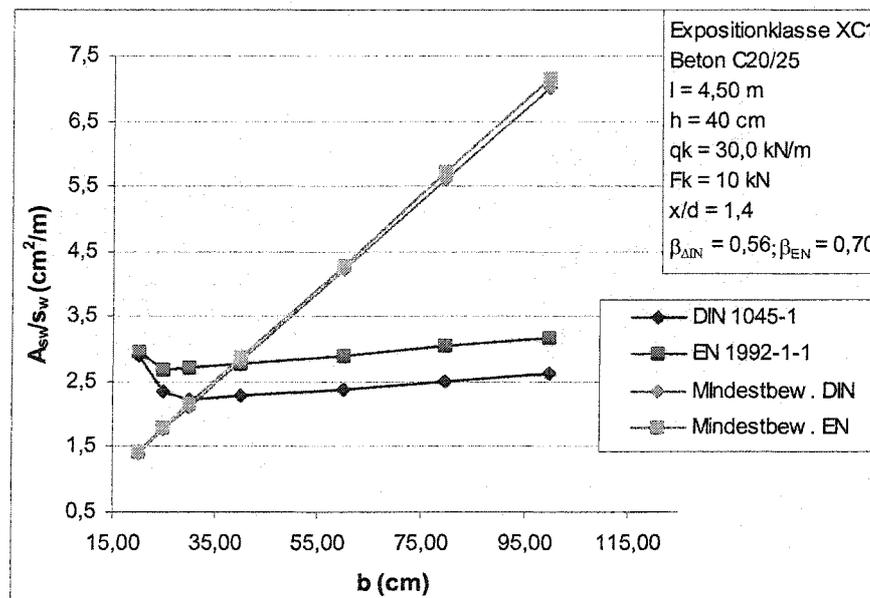


Bild 3.2 Vergleich der rechnerisch erforderlichen Querkraftbewehrung in Abhängigkeit der Balkenbreite

3.3.1.2 Maximal aufnehmbare Querkraft

Das Bild 3.3 zeigt den Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft mit zunehmender Balkenbreite. Wie es zu erwarten ist, wächst in beiden Fällen die Druckstreben­tragfähigkeit des Bauteiles mit zunehmender Breite. Auch hier unterschieden sich DIN 1045-1 und EN 1992-1-1. Die maximal aufnehmbare Querkraft ist nach DIN 1045-1 deutlich größer als nach EN 1992-1-1.

Wenn keine Längskraft auftritt, ist die maximal aufnehmbare Querkraft für Normalbeton nach folgenden Gleichungen zu errechnen:

$$V_{Rd,max}^{DIN} = \frac{0,75 \cdot b_w \cdot z \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad \text{Gl. (3.1)}$$

$$V_{Rd,max}^{EN} = \frac{b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta} \quad \text{Gl. (3.2)}$$

Die folgende Bedingung muss zusätzlich nach EN 1992-1-1 erfüllt werden:

$$V_{Rd,max}^{EN} = 0,5 \cdot b_w \cdot d \cdot v \cdot f_{cd} \quad \text{Gl. (3.3)}$$

$$\text{mit } v = v_1 = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right) \quad (f_{ck} \text{ in Mpa})$$

$$\text{und damit ist } V_{Rd,max}^{EN} \leq \frac{0,6 \cdot b_w \cdot z \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$$

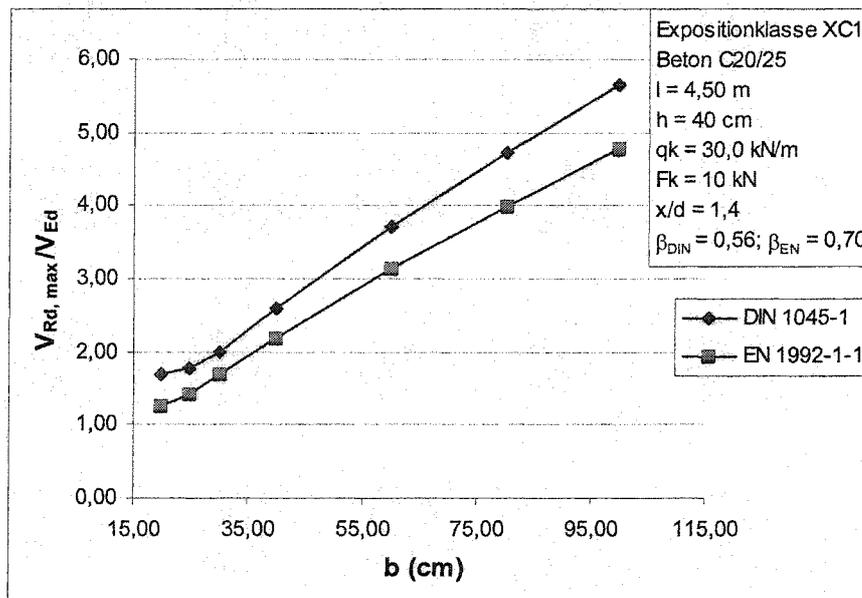


Bild 3.3 Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft in Abhängigkeit der Balkenbreite

3.3.2 Höhe

3.3.2.1 Abminderungsbeiwert β

Der Beiwert β ist zur Höhe umgekehrt proportional. Dies wird deutlich in folgendem Bild 3.4 gezeigt.

Wie schon analysiert wurde, ist bei DIN 1045-1 eine höhere Abminderungsmöglichkeit vorhanden, was auch im Bild 3.4 erkennbar ist. Wie es schon erwähnt wurde, ist β nach EN 1992-1-1 nach unten zu begrenzen. Auf der Graphik ist dieser maximale Abminderungsfaktor zu sehen, $\beta \geq 0,25$.

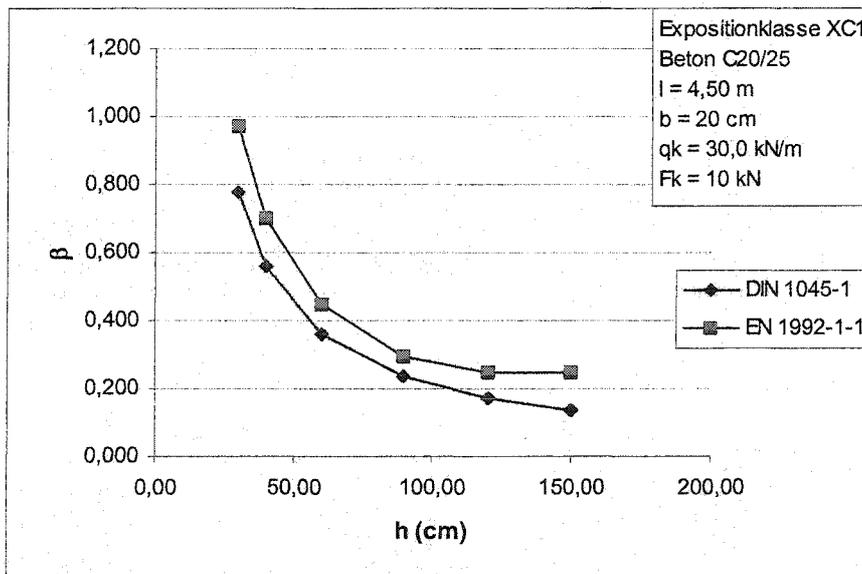


Bild 3.4 Vergleich des Beiwertes β in Abhängigkeit der Balkenhöhe

3.3.2.2 Querkraftbewehrung

Die Balkenhöhe spielt eine wichtige Rolle für die Ermittlung der Querkraftbewehrung. Im Bild 3.5 ist die Beziehung dargestellt.

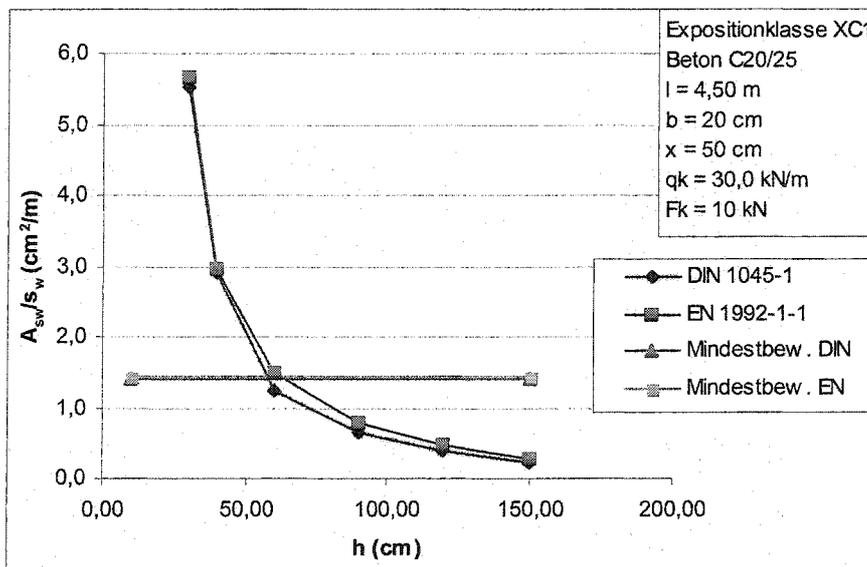


Bild 3.5 Vergleich der Querkraftbewehrung in Abhängigkeit der Balkenhöhe

Die Querkraftbewehrung nimmt mit zunehmender Höhe schnell ab (s. Gleichung (2.45)). Dies ist so zu erwarten, da die Querkraftbewehrungsmenge umgekehrt proportional zu dem Hebelarm ist. Der Unterschied beider Normen ist hier kaum erkennbar. Die Mindestbewehrung wird fast gleichzeitig nach beiden Normen erreicht.

3.3.2.3 Maximal aufnehmbare Querkraft

Das Bild 3.6 zeigt den Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft mit zunehmender Balkenhöhe. Genau so wie bei der Balkenbreite, wächst in beiden Fällen die Druckstreben-tragfähigkeit des Bauteiles mit zunehmender Höhe, da die beiden Größen direkt proportional sind. Auch hier unterschieden sich DIN 1045-1 und EN 1992-1-1. Die maximal aufnehmbare Querkraft ist auch hier nach DIN 1045-1 deutlich größer als nach EN 1992-1-1.

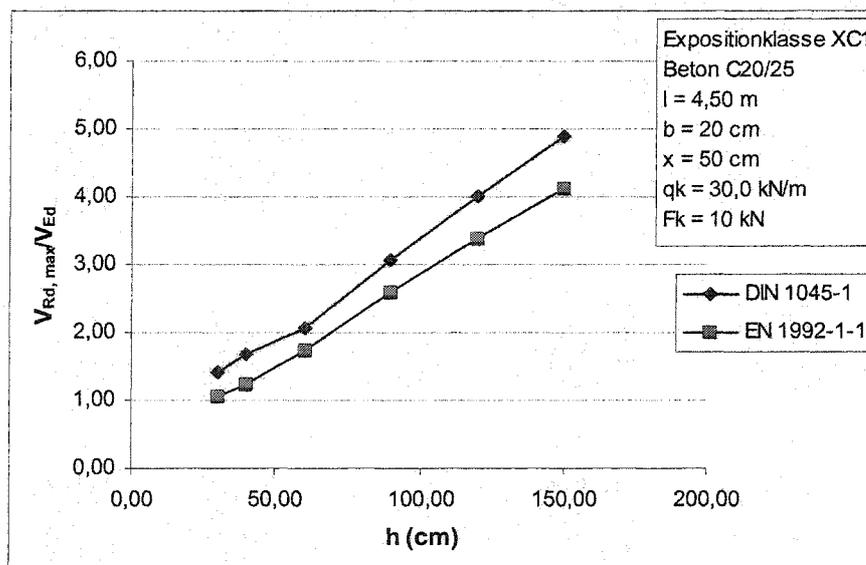


Bild 3.6 Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft in
Abhängigkeit der Balkenhöhe

3.3.3 Längskraft

3.3.3.1 Querkraftbewehrung

Im Bild 3.7 ist die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung sowie die Mindestbewehrung in Abhängigkeit von der Längsdruckkraft dargestellt. Es sind zwei Fälle von auflagenahen Einzellasten ($F_k = 0 \text{ kN}$; $F_k = 60 \text{ kN}$) zum Vergleich dargestellt.

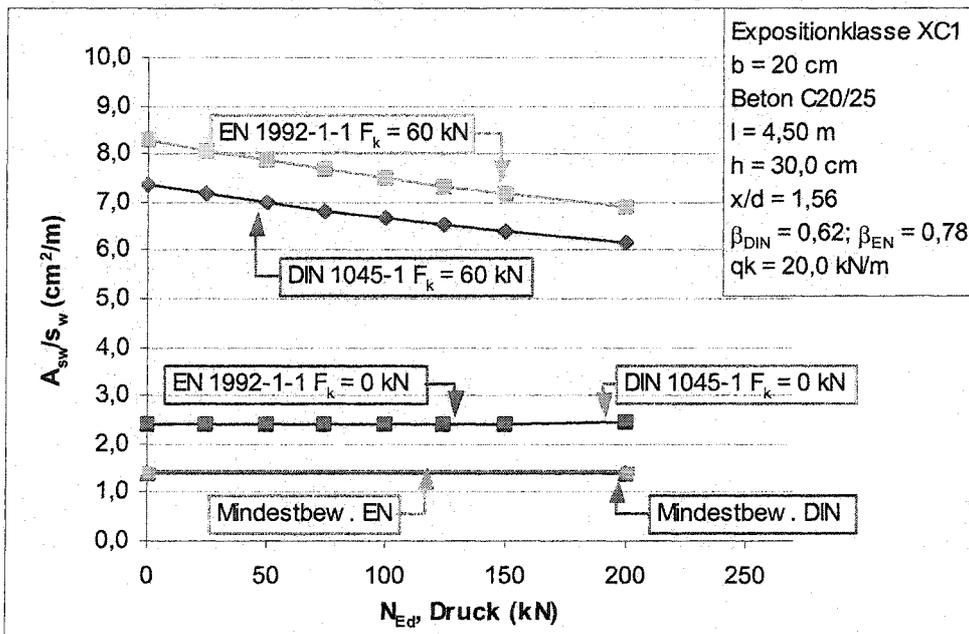


Bild 3.7 Vergleich der Querkraftbewehrung in Abhängigkeit der Längsdruckkraft

Je höher die Längsdruckkraft ist, desto niedriger wird die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung. Dieses Verhältnis kann durch die kleinere Neigungen des Druckstrebenwinkels erklärt werden. Damit wird ein größerer Teil der Last direkt in das Auflager abgetragen. Im Gegensatz dazu, wie es zu erwarten ist, ergibt sich bei Längszugkraft wegen des größeren Druckstrebenwinkels eine Erhöhung der Querkraftbewehrung, siehe Bild 3.8.

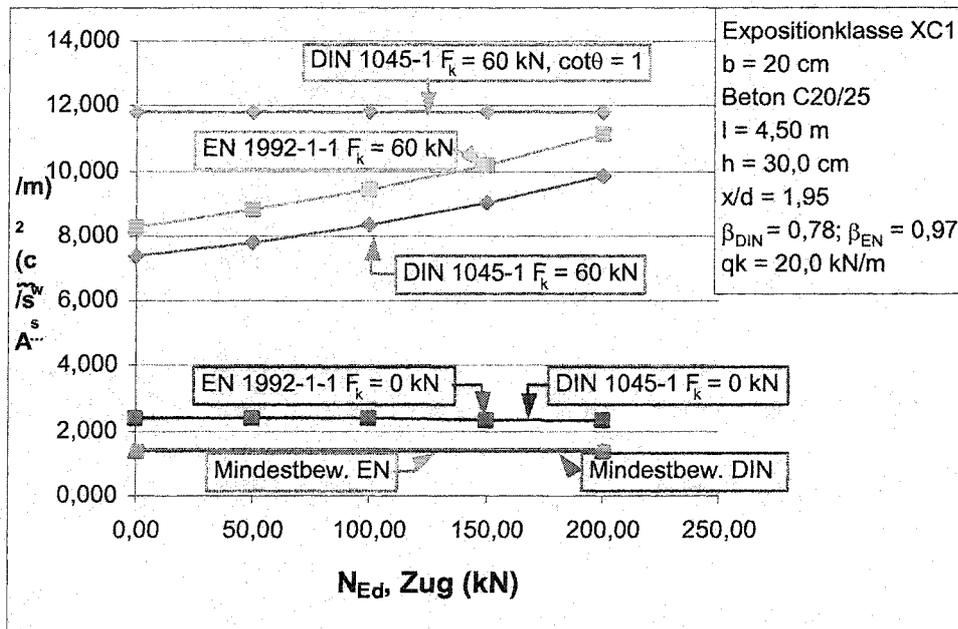


Bild 3.8 Vergleich der Querkraftbewehrung in Abhängigkeit der Längszugkraft

Die rechnerisch erforderliche Bewehrung wenn keine auflagernahe Einzellast auftritt, ist nach beiden Normen gleich, sowohl für Längsdruck- als auch für Längszugkraft. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die einwirkende Querkraft nach beiden Normen gleich ist

$V_{Ed} = V_{Ed,g+q}$ und sich für $\cot\theta$ nach beiden Normen der gleiche Wert errechnet:

$$\cot\theta = \frac{1,2 - 1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} \quad \text{Gl. (3.4)}$$

Im Bild 3.8 ist auch die mit dem Wert $\cot\theta = 1$ gerechnete Querkraftbewehrung dargestellt. Dies wird bei Längszugkraft im Heft 525 des DAfStb [18] empfohlen (Erläuterungen zu 10.3.4 Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung, Seite 79).

3.3.3.2 Maximal aufnehmbare Querkraft

Das Bild 3.9 zeigt den Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft mit zunehmender Längsdruckkraft. Diese ist nach der DIN 1045-1 für die verschiedenen Längsdruckkräfte fast konstant.

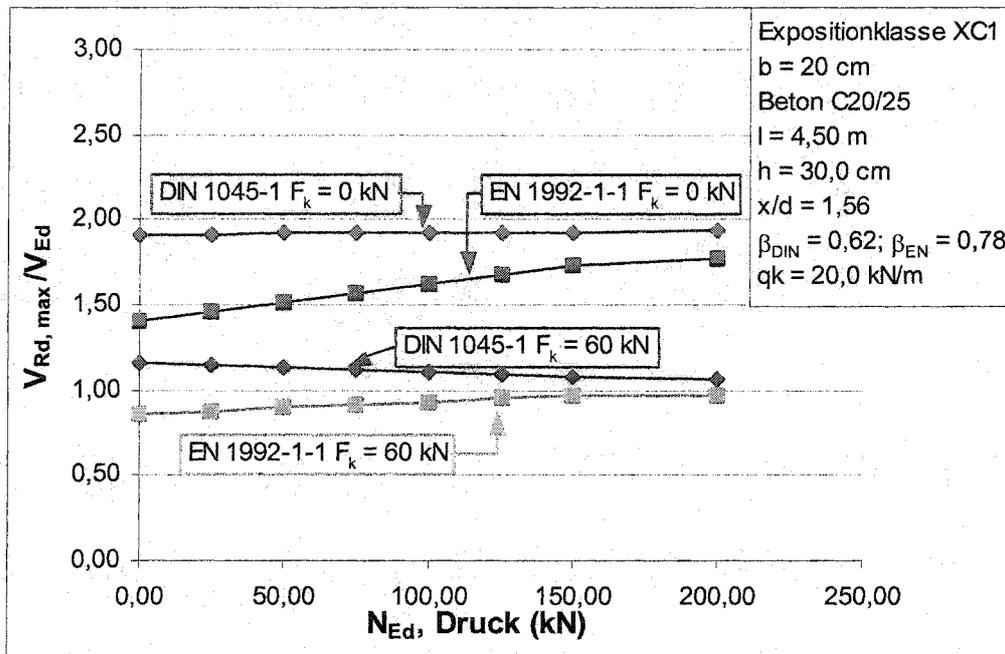


Bild 3.9 Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft in Abhängigkeit der Längsdruckkraft

Für die analysierten Fälle errechnet sich auch für $\cot\theta$ nach beiden Normen der gleiche Wert (s. Gleichung (3.4)) und nimmt leicht ab, womit die maximal aufnehmbare Querkraft leicht zunimmt. Nach EN 1992-1-1 ist diese Zunahme deutlicher. Dies kommt dadurch, dass nach EN 1992-1-1 der Wert α_{cw} mit der Längskraft variiert. Trotz dieser Zunahme bleibt die aufnehmbare Querkraft nach DIN 1045-1 immer größer (siehe Bild 3.9).

3.3.4 Größe der Verkehrslast

In Bild 3.10 und Bild 3.11 ist die Querkraftbewehrung in Abhängigkeit des Verhältnisses der Verkehrslast zur auflagenahen Einzellast dargestellt. Die Bilder 3.12 und 3.13 zeigen die maximale aufnehmbare Querkraft in Abhängigkeit des gleichen Verhältnisses. Die Analyse beider Parameter zeigt eine Erhöhung der rechnerisch erforderlichen Querkraftbewehrung

sowohl für die Verkehrslast als auch für die auflagernahe Einzellast. Wie es zu erwarten ist, nimmt die maximale aufnehmbare Querkraft in beiden Fällen, Verkehrslast und Einzellast, mit zunehmenden Werten ab.

In Bild 3.10 ist die Querkraftbewehrung in Abhängigkeit der Beziehung von der Verkehrslast zur auflagernahen Einzellast ($q_k \cdot l / F_k$) bei einem konstanten Wert der Einzellast ($F_k = 10 \text{ kN}$) dargestellt. Das Bild zeigt, dass in diesem Fall, die Querkraftbewehrungsmenge bei Zunahme der Verkehrslast zunimmt.

Im Bild 3.11 ist die Gleiche Beziehung aber für eine konstante Verkehrslast ($q_k = 20 \text{ kN/m}$) dargestellt. Wie es zu erwarten ist, nimmt in diesem Fall die Querkraftbewehrung mit zunehmender Einzellast ab.

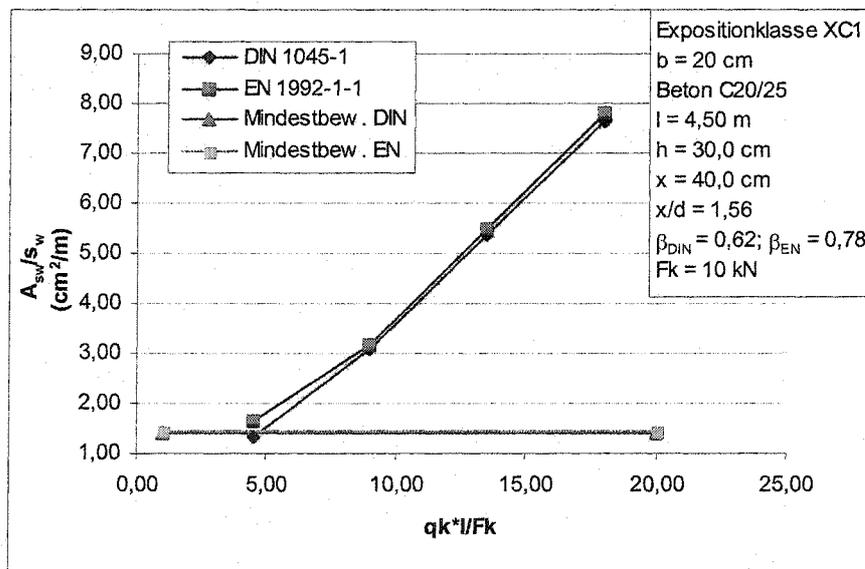


Bild 3.10 Querkraftbewehrung in Abhängigkeit des Verhältnisses der Verkehrslast zur auflagernahen Einzellast, für eine konstante Einzellast.

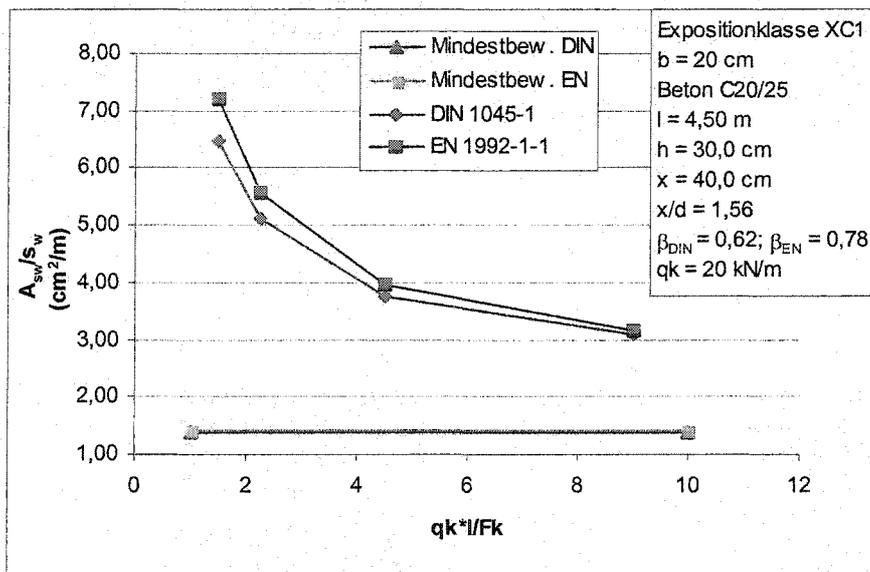


Bild 3.11 Querkraftbewehrung in Abhängigkeit des Verhältnisses der Verkehrslast zur auflagernahen Einzellast, für eine konstante Verkehrslast.

Die maximal aufnehmbare Querkraft ist in den Bildern 3.12 und 3.13 für eine konstante Verkehrslast bzw. eine konstante auflagernahe Einzellast dargestellt. Für den Fall einer konstanten Einzellast nimmt die maximal aufnehmbare Querkraft mit zunehmender Verkehrslast ab.

Es ist deutlich zu erkennen, dass nach der EN 1992-1-1 die Grenze schneller erreicht wird, wie nach der DIN 1045-1 (siehe Bild 3.12). Dieses Verhalten ist auch für eine konstante Verkehrslast zu erkennen, wie das Bild 3.13 zeigt.

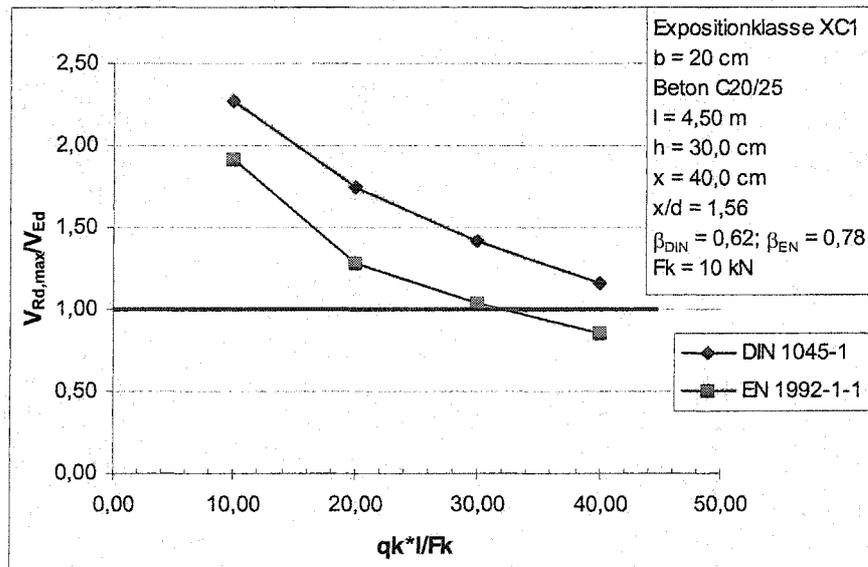


Bild 3.12 Maximal aufnehmbare Querkraft in Abhängigkeit des Verhältnisses der Verkehrslast zur auflagenahen Einzellast, für eine konstante Einzellast.

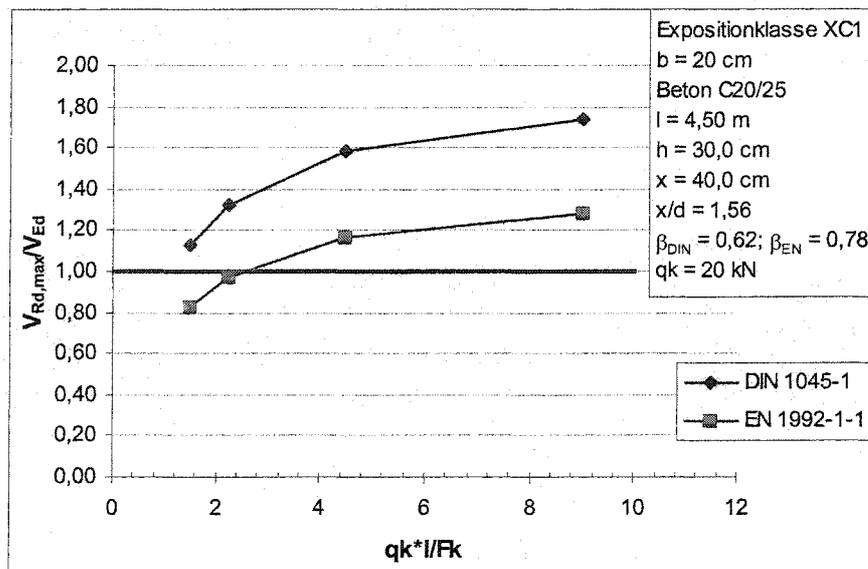


Bild 3.13 Maximal aufnehmbare Querkraft in Abhängigkeit des Verhältnisses der Verkehrslast zur auflagenahen Einzellast, für eine konstante Verkehrslast.

3.3.5 Abstand der Einzellast vom Auflagerrand und Größe der Einzellast

In den Bildern 3.14 und 3.15 ist die Querkraftbewehrung (rechnerisch erforderlich und Mindestbewehrung) für zwei bestimmte Balkenabmessungen in Abhängigkeit des Abstandes der Einzellast zum Auflagerrand x dargestellt. Der Verlauf in allen anderen analysierten Fällen ist ähnlich und deswegen nicht gezeigt. Die Bewehrungsmenge nimmt mit abnehmendem Abstand zum Auflagerrand nach beiden Normen ab, wie es zum erwarten ist. Nach EN 1992-1-1 für Werte von x/d größer als 2, nimmt die Bewehrungsmenge wieder leicht ab. In diesem Punkt ist für EN 1992-1-1 die Abminderung der Einzellast nicht mehr zu berücksichtigen, das heißt $V_{Ed} = V_{Ed,q} + \beta V_{Ed,F} = V_{Ed,q} + V_{Ed,F}$. Damit wird aufgrund des Schnittkraftverlaufes der Bemessungswert der Querkraft kleiner, wenn ein Querschnitt weit vom Auflagerrand betrachtet wird.

Für den Fall $h = 60\text{cm}$ (siehe Bild 3.14) ist der Unterschied zwischen beiden Normen deutlich zu erkennen. Im Gegensatz dazu ist bei der Balkenhöhe $h = 40\text{cm}$ (siehe Bild 3.15) dieser Unterschied kaum zu sehen. Dies ergibt sich, weil in dem Fall mit $h = 40\text{cm}$ der Grenzwert des $\cot\theta$ nicht erreicht wird und deswegen die Druckstrebenwinkel nach beiden Normen gleich berechnet werden.

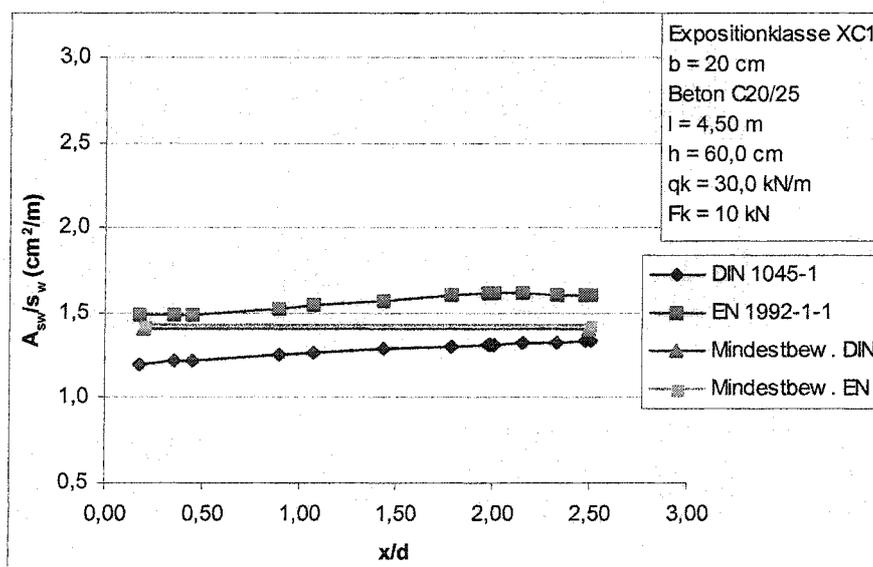


Bild 3.14 Querkraftbewehrung in Abhängigkeit des Abstandes x der Einzellast zum Auflagerrand für die Abmessungen $b = 20\text{cm}$ und $h = 60\text{cm}$

In beiden Fällen ist die höhere Wirtschaftlichkeit der Norm DIN 1045-1 gegenüber der Norm EN 1992-1-1 erkennbar. Nach DIN 1045-1 ist der obere Grenzwert des $\cot\theta$ größer wie nach EN 1992-1-1 und damit wird die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung wegen dieses günstigeren Druckstrebenwinkel kleiner als nach EN 1992-1-1

Wie im Kapitel 2.4 schon analysiert wurde, ist gemäß EN 1992-1-1 für β ein konstanter Wert gleich 0,25 zu wählen, wenn die Einzellast näher als 0,5d vom Auflagerrand liegt. In den Bildern 3.14 und 3.15 ist dies graphisch dargestellt. In diesem Bereich bleibt nach EN 1992-1-1 die Abminderung zur Berücksichtigung der Einzellast konstant und damit nimmt im Gegensatz zu DIN 1045-1 die Bewehrungsmenge nicht mehr ab.

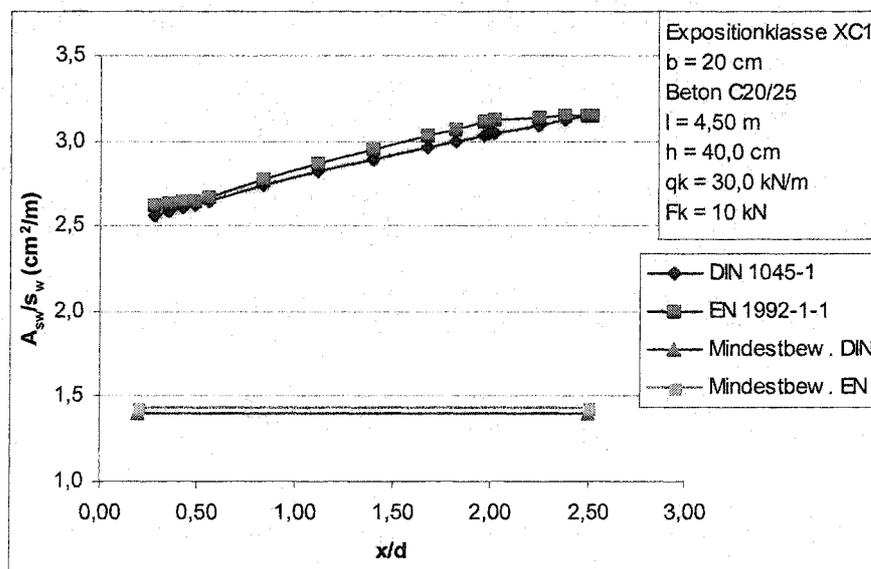


Bild 3.15: Querkraftbewehrung in Abhängigkeit des Abstandes x der Einzellast zum Auflagerrand für die Abmessungen $b = 20\text{cm}$ und $h = 40\text{cm}$

Bild 3.16 zeigt den Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft in Abhängigkeit des Abstandes x der Einzellast zum Auflagerrand. Der Verlauf ist in allen analysierten Fällen ähnlich, deswegen ist auch hier nur ein Beispiel graphisch dargestellt.

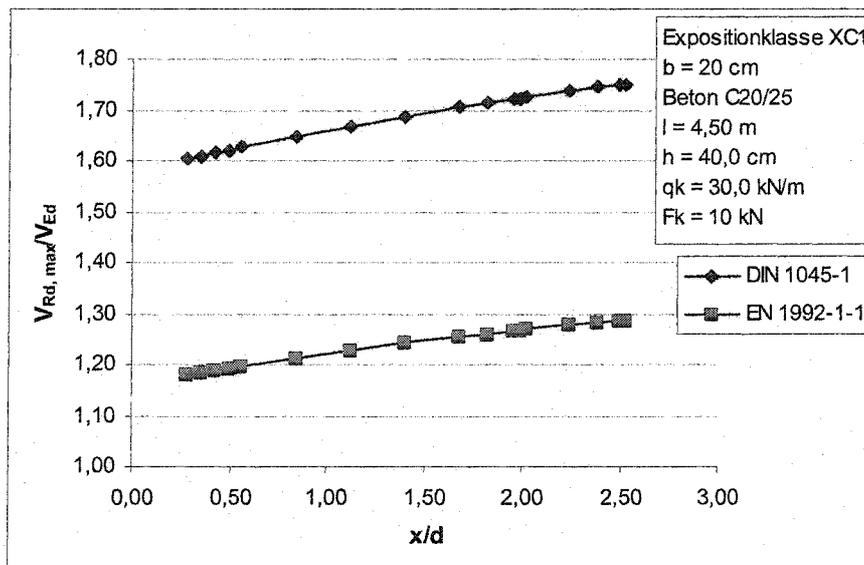


Bild 3.16 Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft in Abhängigkeit des Abstandes x der Einzellast zum Auflagerrand

Die maximal aufnehmbare Querkraft nimmt mit abnehmendem Abstand der Einzellast zum Auflagerrand ab. Es ist deutlich erkennbar, dass die nach EN 1992-1-1 gerechnete maximale Querkraft kleiner ist als die nach DIN 1045-1. Dieser Unterschied ist im Kapitel 2.4 dargestellt und erklärt worden

In dem Fall einer Platte ($b/h \geq 4$) ist keine Mindestbewehrung wie bei Balken erforderlich. Das heißt, dass wenn rechnerisch keine Querkraftbewehrung erforderlich ist, in der Platte keine Bügel eingeordnet werden müssen. Im folgenden Bild 3.17 ist die Beziehung der ohne Querkraftbewehrung aufnehmbaren Querkraft zu der einwirkenden Querkraft ($V_{Rd,ct}/V_{Ed}$) bei verschiedenen Abständen der Einzellast vom Auflagerrand dargestellt.

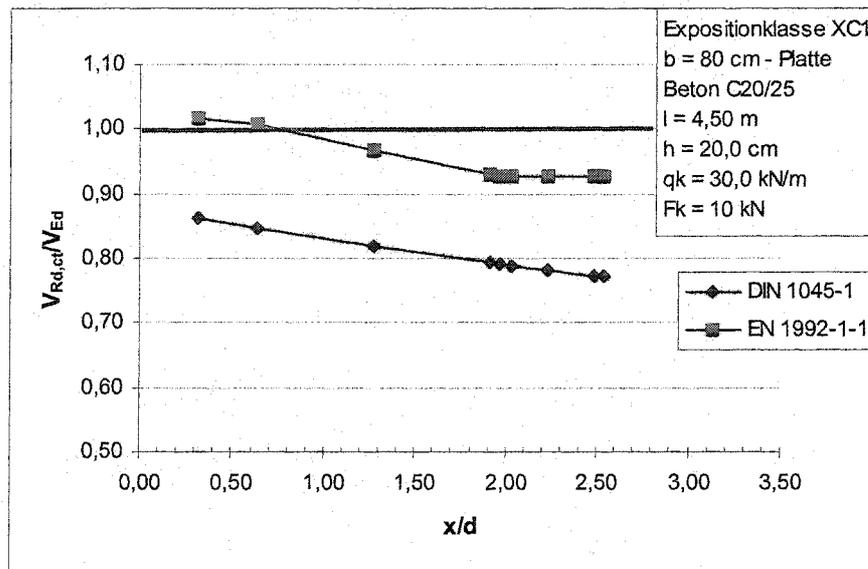


Bild 3.17 Grenze der ohne Querkraftbewehrung aufnehmbaren Querkraft für Platten in Abhängigkeit des Abstandes x der Einzellast zum Auflagerrand

Die Graphik zeigt die direkte Abtragung der Last in das Auflager durch die Zunahme von $V_{Rd,ct}/V_{Ed}$ mit abnehmendem Abstand vom Auflagerrand. Es ist deutlich der Unterschied bei den Normen zu erkennen. Bei EN 1992-1-1 ist, wie die analysierten Fälle zeigen, schon bei größeren Werten von x/d keine Querkraftbewehrung mehr erforderlich, während für DIN 1045-1 rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung noch einzulegen ist.

Diese Analyse ist für Balken nicht dargestellt worden, da in dem Fall immer eine Mindestquerkraftbewehrung einzulegen ist. Wäre für Balken keine Mindestquerkraftbewehrung erforderlich, ergäbe sich jedoch in einer entsprechenden Graphik die gleiche Tendenz. Das heißt, je näher die Einzellast am Auflagerrand ist, desto größer ist $V_{Rd,ct}/V_{Ed}$. Damit ergibt sich eine geringere rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung.

4 Vorschlag für den Nationalen Anhang zur EN 1992-1-1

In diesem Kapitel werden Vorschläge für einen Nationalen Anhang zu EN 1992-1-1 für den Bereich von auflagnahen Einzellasten (Kapitel 6.2) vorgelegt, um diese Norm (bzw. deren Vorschläge) an DIN 1045-1 anpassen zu können.

Die Mehrzahl der Unterschiede zwischen DIN 1045-1 und den Vorschlägen nach EN 1992-1-1 im Bereich von auflagnahen Einzellasten entsteht aufgrund der unterschiedlichen Behandlung des Druckstrebenwinkels im Bauteil. Die unterschiedlichen Beiwerte β zur Berücksichtigung einer auflagnahen Einzellast sowie seine verschiedenen Gültigkeitsbereiche führen ebenfalls zu leichten Unterschieden in der Bemessung nach beiden Normen. Sowohl für die maximal aufnehmbare Querkraft als auch für die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung ist ein günstigeres Ergebnis bei der Anwendung der Norm DIN 1045-1 erkennbar. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass eine Anpassung der relevanten Abschnitte aus EN 1992-1-1 an DIN 1045-1 aus wirtschaftlicher Sicht geboten ist.

In der Lösung aus Kapitel 4.1 ist ein Vorschlag für einen Ausgleich des eingeschränkten Bereiches des möglichen Druckstrebenwinkels nach EN 1992-1 durch einen Korrekturterm dargestellt.

In der Lösung aus Kapitel 4.2 und den Empfehlungen aus Kapitel 4.3 ist dagegen eine Anpassung des möglichen Druckstrebenwinkels an die Vorgaben aus DIN 1045-1 behandelt. Gemacht werden weiterhin Vorschläge zu den Beiwerten α_{cw} und v , die in die maximal aufnehmbare Querkraft nach EN 1992-1-1 eingehen, um sie an die Vorgaben aus DIN 1045-1 anzupassen.

Vorschläge für den Beiwert β und den Abstand a_v einer auflagnahen Einzellast zum Auflagerend sind in den Empfehlungen in Kapitel 4.3 dargestellt.

4.1 Lösung mit Korrekturterm

Wie oben erwähnt, führt der Unterschied beider Normen allein in der Betrachtung einer auflagernahen Einzellast nicht zu einer maßgebend verschiedenen Bewehrungsmenge. Der Unterschied ist in dem Druckstrebenwinkel des Bauteils versteckt.

In folgender Tabelle ist der Quotient der maximal aufnehmbaren Querkraft nach beiden Normen für verschieden Werte von $\cot\theta$ für Bauteile ohne Längskraft dargestellt.

Obwohl DIN 1045-1 Druckstrebenwinkel bis zu 60° ($\cot\theta = 0,58$) zulässt, empfiehlt Heft 525 [17] den Druckstrebenwinkel auf 45° ($\cot\theta = 1,00$) zu begrenzen. Diese Empfehlung ist in Tabelle 4.1 eingearbeitet.

cot θ		VRd,max (DIN)/VRd,max(EN)
DIN	EN	
3,00	2,50	1,18
2,99	2,50	1,19
2,92	2,50	1,21
2,86	2,50	1,23
2,80	2,50	1,25
2,75	2,50	1,26
2,71	2,50	1,28
2,71	2,50	1,28
2,70	2,50	1,28
2,67	2,50	1,29
2,66	2,50	1,30
2,64	2,50	1,30
2,64	2,50	1,30
2,50	2,50	1,36
1 < cot θ < 2,5		1,36

Tabelle 4.1 Vergleich der maximal aufnehmbare Querkraft nach beiden Normen

Wie die Tabelle zeigt, ist für den Bereich, in dem $\cot\theta$ im erlaubten Intervall nach EN 1992-1-1 liegt ($1 \leq \cot\theta \leq 2,5$), eine Multiplikation mit dem Faktor 1,36 nötig um eine Übereinstimmung der maximalen aufnehmbaren Querkrafttragfähigkeit zu erreichen. Dieser Faktor entsteht aufgrund der verschiedenen Rechenwerte der maximal aufnehmbaren Querkraft nach beiden Normen, wie die Gleichungen (2.48) und (2.49) und Tabelle 2 (s. S. 19) zeigen. Dieser

Vergleich ist im Kapitel 2.4 im Detail analysiert worden. Im Gegensatz dazu wäre für Werte von $\cot\theta$ im Intervall zwischen 2,50 und 3,00 eine Multiplikation mit einem variablen Faktor nötig. Dies ist im Bild 4.1 graphisch dargestellt.

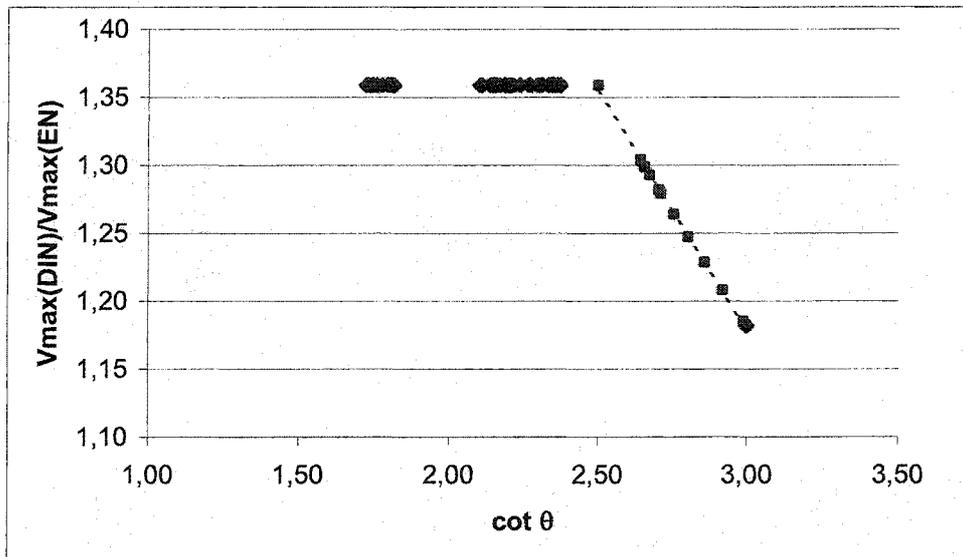


Bild 4.1 Vergleich der maximal aufnehmbaren Querkraft beider Normen in Abhängigkeit des $\cot\theta$

Aus der Graphik ist für den Bereich $2,50 < \cot\theta < 3,00$ die folgende lineare Beziehung zu entnehmen:

$$\frac{V_{Rd,max}^{DIN}}{V_{Rd,max}^{EN}} = 2,23 - 0,35 \cdot \cot\theta \quad \text{Gl. (4.1)}$$

Die Korrelationskoeffizient R^2 für diese Gleichung liegt bei $R^2 = 0,9988$.

Um die maximal aufnehmbare Querkraft nach EN 1992-1-1 an DIN 1045-1 anzupassen, sollte der Ausdruck von $V_{Rd,max}$ im genannten Bereich mit den oben dargestellten Beiwerten in Abhängigkeit des $\cot\theta$ multipliziert werden. Für Werte von $\cot\theta$ im Gültigkeitsbereich beider Normen ($1 \leq \cot\theta \leq 2,5$) ist ein konstanter Wert von 1,36 zu benutzen. Daraus ergibt sich folgender Vorschlag:

$$\text{für } 1,0 \leq \cot\theta \leq 2,5 \quad V_{Rd,max}^{EN} = 1,36 \cdot \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad \text{Gl. (4.2)}$$

$$\text{für } 2,5 \leq \cot\theta \leq 3,0 \quad V_{Rd,max}^{EN} = (2,23 - 0,35 \cdot \cot\theta) \cdot \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad \text{Gl. (4.3)}$$

Wenn eine Längskraft vorhanden ist, ändert sich das Verhalten. Der Beiwert α_{cw} (Gl. (2.41) bis Gl. (2.44)), der nach EN 1992-1-1 in die maximal aufnehmbare Querkraft eingeht (siehe Gl. (2.49)), ist von der Normalkraft abhängig. Deswegen wird das Verhalten von $V_{Rd,max}$ modifiziert. Dies wurde im Kapitel 3.3.3 im Detail erklärt. Je höher die Längsdruckkraft ist, desto niedriger wird die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung. Dieses Verhältnis kann durch einen flacheren Druckstrebenwinkel erklärt werden, siehe Gl. (2.19) oder Gl. (2.39). Im Gegensatz dazu, ergibt sich bei Längszugkraft wegen des steileren Druckstrebenwinkels eine Erhöhung der Querkraftbewehrung.

Die maximal aufnehmbare Querkraft ist nach DIN 1045-1 für die verschiedenen Längsdruckkräfte fast konstant. Im Gegensatz dazu nimmt nach EN 1992-1-1 die maximal aufnehmbare Querkraft deutlich zu. Dies entsteht, wie schon oben erklärt, aufgrund der Tatsache, dass sich nach EN 1992-1-1 der Wert α_{cw} mit der Längskraft ändert. Trotz dieser Zunahme bleibt die aufnehmbare Querkraft nach DIN 1045-1 immer größer (siehe Bild 3.9).

Wegen der genannten Variation ist für den Fall, dass eine Längskraft auftritt, um eine Übereinstimmung der maximalen aufnehmbaren Querkrafttragfähigkeit zu erreichen, eine Multiplikation mit einem noch komplizierteren Faktor nötig. Sinnvoller und einfacher ist es, stattdessen, die Grenzwerte des Intervalls für $\cot\theta$ in EN 1992-1-1 zu erweitern, wie es im nächsten Kapitel dargestellt ist.

4.2 Vereinfachte Näherungslösung

Die Norm DIN 1045-1 benutzt statt der Parameter $v_1 = v$ (Gl. (2.36)) und α_{cw} (Gl. (2.41) bis Gl. (2.44)) für $V_{Rd,max}$ nur den Parameter $\alpha_c = 0,75$ ($0,75 \cdot \eta_1$ für Leichtbeton), der die Festigkeitsabminderung infolge der gerissenen Betondruckstrebe berücksichtigt. Damit entspricht der konstante Parameter α_c in DIN 1045-1 dem Parameter v_1 in EN 1992-1-1.

Im Schlussbericht zur Forschungsvorhaben „Voruntersuchung Nationaler Anhang EN 1992-1-1“ [18] ist ein Vorschlag für den Wert v gegeben. Dafür ist der Wert $\cot\theta + \tan\theta$ näherungsweise gleich 2 ($\cot\theta = 1,2$) und $z = 0,9 \cdot d$ angesetzt. Werte für z und $\cot\theta$ sind nach DIN 1045-1 im Kapitel 10.3.4 Absatz (2) bzw. (5) empfohlen. Mit diesen Vereinfachungen ergibt sich für v , bei Gleichsetzung der Gleichungen (3.1) und (3.3) der Wert 0,675.

Die Analyse, die in den vorigen Kapiteln gemacht wurde, zeigt, dass die Anwendung des Ansatzes nach DIN 1045-1 zu einer einfachen und wirtschaftlichen Bemessung führt.

Wie schon erwähnt, entsteht die Mehrzahl der Unterschiede zwischen DIN 1045-1 und den Vorschlägen nach EN 1992-1-1 im Bereich von auflagennahen Einzellasten, aufgrund der unterschiedlichen Grenzwerte des Druckstrebenwinkels im Bauteil. Deswegen scheint es sinnvoll, um eine Übereinstimmung der maximal aufnehmbaren Querkrafttragfähigkeit in beiden Normen zu erreichen, die Grenzwerte des Intervalls für den Druckstrebenwinkel in EN 1992-1-1 auf die Grenzwerte nach DIN 1045-1 zu erweitern. Es wird daher vorgeschlagen, die Gleichung (73) nach DIN 1045-1 (Kapitel 10.3.4, Absatz (3)) zu übernehmen, siehe Gl. (4.4).

$$0,58 \leq \cot\theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} \leq 3,00 \quad \text{Gl. (4.4)}$$

4.3 Empfehlung

Eine Anpassung der Formulierung aus EN 1992-1-1 an die Formulierung nach deutscher Norm DIN 1045-1, wie es im Kapitel 4.1 beschrieben wurde, ist sehr aufwendig. Für den Fall einer Längskraft wäre diese Formulierung noch aufwendiger.

Es wird daher für den deutschen nationalen Anhang vorgeschlagen, wie im Schlussbericht zur Forschungsvorhaben „Voruntersuchung Nationaler Anhang EN 1992-1-1“ [19], α_{cw} zu 1,0 und ν_1 zu 0,75 zu setzen. Die von der EN 1992-1-1 vorgeschlagenen Gleichungen für die genannten Beiwerte sind nicht zu übernehmen.

Wie es in der Vereinfachten Näherungslösung empfohlen ist, wird vorgeschlagen, auch die Grenzwerte des Druckstrebenwinkels nach DIN 1045-1 zu übernehmen, dies entspricht:

$$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \frac{\sigma_{cd}}{f_{cd}}}{1 - \frac{V_{Rd,c}}{V_{Ed}}} \leq 3,00$$

Der Unterschied im Ergebnis der Bemessung für auflagernahen Einzellasten nach EN 1992-1-1 und DIN 1045-1 ist zwar erkennbar, jedoch nicht bedeutend. Es lässt sich ein leicht günstigeres Verhalten für DIN 1045-1 nachweisen.

Es wird daher für den Fall einer auflagernahen Einzellast vorgeschlagen, die Gleichung (68) nach DIN 1045-1 zu übernehmen, siehe Gl. (4.5).

$$\beta = \frac{x}{2,5 \cdot d} \quad \text{Gl. (4.5)}$$

Es wird weiterhin vorgeschlagen, für den erlaubten Bereich der auflagernahen Einzellast die Grenzwerte nach DIN 1045-1 zu übernehmen, dies entspricht: $x \leq 2,5 \cdot d$ statt $0,5 \cdot d \leq a_v \leq 2,0 \cdot d$

Damit wird die günstigere Auswirkung der Einzellast in unmittelbare Nähe des Auflagerandes immer noch nutzbar.

5 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine vergleichende Untersuchung zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit auflagnahen Lasten nach DIN 1045-1 [4] und den Vorschläge und Regelungen nach EN 1992-1-1 (EC2) [5] durchzuführen.

In einem ersten Schritt sind die Unterschiede zwischen beiden Normen aufgezeigt. Im Anschluss ist ein Vorschlag zur Anpassung der Norm EN 1992-1-1 (EC2) an DIN 1045-1 dargestellt.

Bei auflagnahen Einzellasten kann sich bei direkter Lagerung ein Sprengwerk einstellen, bei dem sich die zugehörige Druckstrebe ganz oder teilweise direkt auf das Auflager abstützt. Für diesen Anteil der Querkraft ist dann keine Querkraftbewehrung bzw. bei großen Einzelkräften lediglich eine reduzierte Querkraftbewehrung zur Abdeckung der Zugstrebenkraft zu berücksichtigen.

Sowohl die europäische Norm EN 1992-1-1 wie auch die deutsche Norm DIN 1045-1 berücksichtigen diese günstige Tragwirkung von auflagnahen Lasten bei der Querkraftbemessung.

Bei der Berechnung führen die zwei Normen aber zu unterschiedlichen Bewehrungsmengen.

In dieser Arbeit ist gezeigt worden, dass sich die Mehrzahl der Unterschiede zwischen beiden Normen im Bereich von auflagnahen Einzellasten aufgrund der unterschiedlichen Behandlung des Druckstrebenwinkels des Bauteiles ergeben. Die unterschiedlichen Beiwerte β zur Berücksichtigung einer auflagnahen Einzellast sowie seine verschiedenen Gültigkeitsbereiche führen auch zu leichten Unterschieden in der Bemessung nach beiden Normen. Sowohl für die maximal aufnehmbare Querkraft als auch für die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung ist das günstigere Ergebnis bei der Anwendung der DIN 1045-1 erkennbar. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass eine Anpassung der relevanten Abschnitte der Formulierung aus EN 1992-1-1 an DIN 1045-1 aus wirtschaftlicher Sicht geboten ist.

Die Vorschläge für die zu ändernden Parametern sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

	Aktuelle EN 1992-1-1	Vorschlag
β	$\frac{a_v}{2,0 \cdot d}$	$\frac{a_v}{2,5 \cdot d}$
Abstand der Einzellast zum Auflagerrand	$0,5 \cdot d \leq a_v \leq 2,0 \cdot d$	$a_v \leq 2,5 \cdot d$
$V_{Rd,max}$	$\frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$	
α_{cw}	<p>$\alpha_{cw} = 1$ Für nicht vorgespannten Bauteile</p> <p>$\alpha_{cw} = (1 + \sigma_{cp} / f_{cd})$ für $0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd}$</p> <p>$\alpha_{cw} = 1,25$ für $0,25 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,50 \cdot f_{cd}$</p> <p>$\alpha_{cw} = 2,5 \cdot (1 - \sigma_{cp} / f_{cd})$ für $0,50 < \sigma_{cp} \leq 1,00 \cdot f_{cd}$</p>	1,0
$v_1 = v$	$0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$	0,75
Grenzwerte für den Druckstreben-winkel θ	$1,0 \leq \cot \theta \leq 2,5$	$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \cdot \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,c} / V_{Ed}} \leq 3,00$

6 Unterschriften



Univ.-Prof. Dr.-Ing, Konrad Zilch
Antragsteller



Dipl.-Ing. Michael Cylok
Sachbearbeiter



Ing. Civil María Noel Pereyra
Sachbearbeiter

7 Literatur

- [1] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Juli 2001
- [2] EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings, April 2003
- [3] DIN V ENV Teil 1-1: Eurocode 2, Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1 Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau. Deutsche Fassung ENV 1992-1-1: 1991
- [4] Zilch, K.; Rogge, A.: Grundlagen der Bemessung von Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen nach DIN 1045-1. Berlin: Ernst & Sohn, 2002. (Betonkalender 2002 Teil 1)
- [5] Feix, Jürgen: Kritische Analyse und Darstellung der Bemessung für Biegung mit Längskraft, Querkraft und Torsion nach Eurocode 2 Teil 1. Dissertation.
- [6] Kupfer, H.: Erweiterung der Mörsch'schen Fachwerkanalogie mit Hilfe des Prinzips vom Minimum der Formänderungsarbeit. Lausanne: 1964. (CEB Bulletin d'Information N° 40)
- [7] Leonhardt, F.: Die verminderte Schubdeckung bei Stahlbetontragwerken. In: Bauingenieur 40 (1965). S. 1-15
- [8] Kirmair, H.: Das Schubtragverhalten schlanker Stahlbetonbalken. Berlin: Ernst & Sohn, 1987. (DAfStb Heft 453)
- [9] Zilch, K.: Vorlesungsskript Massivbau
- [10] Kordina und Blume: Empirische Zusammenhänge zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit stabförmiger Stahlbetonelemente. DAfStb Heft 364
- [11] Jungwirth, D.: Elektronische Berechnung des in einem Stahlbetonbalken im gerissenen Zustand auftretenden Kräftezustandes unter besonderer Berücksichtigung des Querkraftbereiches. Berlin: Ernst & Sohn, 1970 (DAfStb Heft 211)
- [12] Moosecker, W.: Zur Bemessung der Schubbewehrung von Stahlbetonbalken mit möglichst gleichmäßiger Zuverlässigkeit. Berlin: Ernst & Sohn, 1979. (DAfStb Heft 307)
- [13] Mallee, R.: Zum Schubtragverhalten stabförmiger Stahlbetonelemente. Berlin: Ernst & Sohn, 1981. (DAfStb Heft 323)

- [14] Kani, G.: The riddle of shear failure and its solution. In: ACI Journal 61 (1964) S. 441-467
- [15] Reineck, K.H.: Ein mechanisches Modell für Stahlbetonbauteile ohne Stegbewehrung. In: Bauingenieur 66 (1991) S. 157-165
- [16] Reineck, K.H.: Ein mechanisches Modell für das Tragverhalten von Stahlbetonbauteile ohne Schubbewehrung. In: Bauingenieur 66 (1991) S. 323-332
- [17] DAfStb Heft 525: Erläuterungen zu DIN 1045-1
- [18] Zilch, K.; Cyllok, M.: „Voruntersuchung Nationaler Anhang EN 1992-1-1“ Schlussbericht zum Forschungsvorhaben von 15.09.2003

Anhang A Zusammenfassung des Vorhabens „Auflagernahen Einzellasten“

Ziel dieser Arbeit ist es, eine vergleichende Untersuchung zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit auflagernahen Lasten nach DIN 1045-1 und den Vorschläge und Regelungen nach EN 1992-1-1 (EC2) durchzuführen.

In einem ersten Schritt, sind die Unterschiede zwischen beiden Normen aufgezeigt. Im Anschluss ist ein Vorschlag zur Anpassung der Norm EN 1992-1-1 (EC2) an DIN 1045-1 dargestellt.

Bei auflagernahen Einzellasten kann sich bei direkter Lagerung ein Sprengwerk einstellen, bei dem sich die zugehörige Druckstrebe ganz oder teilweise direkt auf das Auflager abstützt. Für diesen Anteil der Querkraft ist dann keine Querkraftbewehrung bzw. bei großen Einzelkräften lediglich eine reduzierte Querkraftbewehrung zur Abdeckung der Zugstrebenkraft zu berücksichtigen.

Sowohl die europäische Norm EN 1992-1-1 wie auch die deutsche Norm DIN 1045-1 berücksichtigen diese günstige Tragwirkung von auflagernahen Lasten bei der Querkraftbemessung. Bei der Berechnung führen die zwei Normen aber zu unterschiedlichen Bewehrungsmengen. Es darf gemäß beider Normen der Querkraftanteil einer auflagernahen Einzellast V_F mit einem Beiwert β abgemindert werden. Der Grund dafür ist eine direkte Abtragung der Last in das Auflager. Dieser Abminderung darf aber nicht beim Nachweis der Druckstreben angesetzt werden.

Der Abminderungsfaktor β wird in beiden Normen unterschiedlich berücksichtigt:

$$\beta_{EN1992-1-1} = \frac{a_v}{2,0 \cdot d} \quad \text{und} \quad \beta_{DIN1045-1} = \frac{x}{2,5 \cdot d}$$

Die deutsche Norm DIN 1045-1 lässt grundsätzlich eine um 25% höhere Abminderung der auflagernahen Einzellast zu. Diese höhere Abminderung führt zu einem kleineren Bemessungswert der einwirkenden Querkraft V_{Ed} :

$$V_{Ed} = V_{Ed,g+q} + \beta \cdot V_{Ed,F}$$

$$\beta_{DIN} < \beta_{EN} \Rightarrow V_{Ed}^{DIN} < V_{Ed}^{EN}$$

In dieser Arbeit ist gezeigt worden, dass sich die Mehrzahl der Unterschiede zwischen beiden Normen im Bereich von auflagernahen Einzellasten aber aufgrund der unterschiedlichen Behandlung des Druckstrebenwinkels θ des Bauteiles ergeben. Die unterschiedlichen Beiwerte β zur Berücksichtigung einer auflagernahen Einzellast sowie seine verschiedenen Gültigkeitsbereiche führen nur zu leichten Unterschieden in der Bemessung nach beiden Normen.

Der zulässige Bereich für den Druckstrebenwinkel θ ist in DIN 1045-1 größer, wie die Gleichungen (1) und (2) zeigen. Die kleinere untere Grenze der Neigung nach DIN 1045-1, wirkt sich für die Querkraftbemessung wirtschaftlich günstig aus, da kleinere Bewehrungsmengen errechnet werden.

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

$$0,58 \leq \cot \theta \text{ (DIN)} \leq 3 \quad \text{Gl. (2)}$$

Sowohl für die maximal aufnehmbare Querkraft als auch für die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung ist das günstigere Ergebnis bei der Anwendung der Norm DIN 1045-1 erkennbar. Dies führt zur Schlussfolgerung, dass eine Anpassung der relevanten Abschnitte der Formulierung aus EN 1992-1-1 an DIN 1045-1 aus wirtschaftlicher Sicht geboten ist.

Die Vorschläge für die zu ändernden Parametern sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

	Aktuelle EN 1992-1-1	Vorschlag
β	$\frac{a_v}{2,0 \cdot d}$	$\frac{a_v}{2,5 \cdot d}$
Abstand der Einzellast zum Auflagerrand	$0,5 \cdot d \leq a_v \leq 2,0 \cdot d$	$a_v \leq 2,5 \cdot d$
$V_{Rd,max}$	$\frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}$	
α_{cw}	$\alpha_{cw} = 1$ Für nicht vorgespannten Bauteile $\alpha_{cw} = (1 + \sigma_{cp} / f_{cd})$ für $0 < \sigma_{cp} \leq 0,25 \cdot f_{cd}$ $\alpha_{cw} = 1,25$ für $0,25 \cdot f_{cd} < \sigma_{cp} \leq 0,50 \cdot f_{cd}$ $\alpha_{cw} = 2,5 \cdot (1 - \sigma_{cp} / f_{cd})$ für $0,50 < \sigma_{cp} \leq 1,00 \cdot f_{cd}$	1,0
$v_1 = v$	$0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right]$	0,75
Grenzwerte für den Druckstreben-winkel θ	$1,0 \leq \cot \theta \leq 2,5$	$0,58 \leq \cot \theta \leq \frac{1,2 - 1,4 \cdot \sigma_{cd} / f_{cd}}{1 - V_{Rd,c} / V_{Ed}} \leq 3,00$

Anhang B Kurzzusammenfassungen

Auflagnahen Einzellasten (Kurzzusammenfassung)

Ziel dieser Arbeit ist es, eine vergleichende Untersuchung zur Bemessung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit auflagnahen Lasten nach DIN 1045-1 und den Vorschläge und Regelungen nach EN 1992-1-1 (EC2) durchzuführen.

In einem ersten Schritt, sind die Unterschiede zwischen beiden Normen aufgezeigt. Im Anschluss ist ein Vorschlag zur Anpassung der Norm EN 1992-1-1 (EC2) an DIN 1045-1 dargestellt.

Bei auflagnahen Einzellasten kann sich bei direkter Lagerung ein Sprengwerk einstellen, bei dem sich die zugehörige Druckstrebe ganz oder teilweise direkt auf das Auflager abstützt. Für diesen Anteil der Querkraft ist dann keine Querkraftbewehrung bzw. bei großen Einzelkräften lediglich eine reduzierte Querkraftbewehrung zur Abdeckung der Zugstrebenkraft zu berücksichtigen.

Sowohl die europäische Norm EN 1992-1-1 wie auch die deutsche Norm DIN 1045-1 berücksichtigen diese günstige Tragwirkung von auflagnahen Lasten bei der Querkraftbemessung.

Bei der Berechnung führen die zwei Normen aber zu unterschiedlichen Bewehrungsmengen.

In dieser Arbeit ist gezeigt worden, dass sich die Mehrzahl der Unterschiede zwischen beiden Normen im Bereich von auflagnahen Einzellasten aufgrund der unterschiedlichen Behandlung des Druckstrebenwinkels des Bauteiles ergeben.

Sowohl für die maximal aufnehmbare Querkraft als auch für die rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung ist das günstigere Ergebnis bei der Anwendung der Norm DIN 1045-1 erkennbar. Dies führt zur Schlussfolgerung dass eine Anpassung der relevanten Abschnitte der Formulierung aus EN 1992-1-1 an DIN 1045-1 aus wirtschaftlicher Sicht geboten ist.