

**Erarbeitung von Anwendungskriterien
für das vereinfachte Rechenverfahren
(Zonenmethode) nach DIN EN 1992-1-2**

T 3233

T 3233

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2010

ISBN 978-3-8167-8263-6

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.baufachinformation.de

Schlussbericht

Erarbeitung von Anwendungskriterien für das vereinfachte Rechenverfahren (Zonenmethode) nach DIN EN 1992-1-2

Aktenzeichen ZP 52-5-7.297-1332/09

Im Auftrag des
Deutschen Instituts für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 L, 10829 Berlin

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch
Dr.-Ing. André Müller
Dipl.-Ing. Claudia Reitmayer

August 2009

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Zusammenfassung	2
Summary	2
1 Einführung	3
2 Rechengrundlagen für die Bemessung im Brandfall.....	4
2.1 Rechenprogramm	4
2.2 Zonenmethode.....	4
2.2.1 Querschnitt	4
2.2.2 Materialdefinition.....	6
2.2.3 Thermische Dehnungen.....	11
2.2.4 Krümmung	14
2.3 Allgemeines Rechenverfahren	15
2.4 Sicherheitskonzept.....	17
3 Parameterstudie.....	18
3.1 Vierseitig beflamnte Stützen	20
3.2 Dreiseitig beflamnte Stützen	39
4 Zusammenfassung	42
5 Literatur	44

Zusammenfassung

Dieses Forschungsvorhaben hatte zum Ziel, die Anwendungssicherheit der Zonenmethode hinsichtlich der Bemessung von Stützen im Brandfall zu überprüfen. Darüber hinaus sollten Anwendungskriterien erarbeitet werden, falls sich im Zuge des Forschungsvorhabens zeigen sollte, dass die Zonenmethode unter gewissen Randbedingungen Anwendungsunsicherheiten aufweist.

Hierfür wurde die Parametrisierung einer Kragstütze im Hinblick auf die Belastung, die Stützenschlankheit und die Beflammungsart (vierseitig und dreiseitig) für die Feuerwiderstandsklasse R 90 vorgenommen. Die brandschutztechnische Bemessung sämtlicher Stützenvariationen wurde hierbei sowohl unter Anwendung der Zonenmethode als auch unter Heranziehung des allgemeinen Rechenverfahrens gemäß DIN (V) EN(V) 1992-1-2 durchgeführt.

Basierend auf einem Ergebnisabgleich der beiden Rechenverfahren konnte festgestellt werden, dass für das vereinfachte Rechenverfahren unter Ansatz einer Mindest- Lastausmitte die Anwendungssicherheit gewährleistet werden konnte. Unter Beachtung dieses Kriteriums stellte das Zonenverfahren somit in Abhängigkeit der untersuchten Eingangsgrößen ein geeignetes Verfahren zur brandschutztechnischen Bemessung von Stützen dar.

Summary

The purpose of this study is to check if the zone method is conservative for the fire design of columns. In addition to this, criteria for the correct use should be found in case the zone method is unconservative for certain conditions.

During this research parameters for the fire resistance R 90 of cantilever columns were used to include the effect of loading, slenderness ratio and the type of fire (e.g. fire at four or three sides). The fire design of all column variations was carried out by using the zone method and also the advanced method according to DIN (V) EN(V) 1992-1-2.

In order to obtain similar results of both approaches we found that the simplified method was on the safe side as long as a minimum eccentricity was used. When using this criterion the zone method is therefore a suitable approach for the fire design of columns within the constraints of this research.

1 Einführung

In Deutschland ist die Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken für den Brandfall in der Vornorm DIN V ENV 1992-1-2 [1] in Verbindung mit dem Nationalen Anwendungsdokument geregelt. Im September 2007 wurde der DIN Fachbericht 92 [2] als nationales Anwendungsdokument in die Muster-Liste der Technischen Baubestimmungen [3] aufgenommen. Dieses Anwendungsdokument ermöglicht, im Gegensatz zu seinem Vorläufer [4], die Anwendung der Zonenmethode. Die Zonenmethode zählt zu den vereinfachten Rechenverfahren, bei denen im Gegensatz zu dem allgemeinen Rechenverfahren die thermische Analyse entfällt und durch die in den Eurocodes [1; 5] abgebildeten Temperaturprofile ersetzt wird.

Dieses vereinfachte Rechenverfahren zur Ermittlung des Feuerwiderstandes von Bauteilen weist den Vorteil auf, dass es auf Basis der mechanischen Grundlagen und der Biegebetrachtung hergeleitet wurde. Bei dieser Methode herrscht jedoch bezüglich der Anwendung bei Stützen noch Unsicherheit darüber, inwiefern der Anwendungsbereich gegebenenfalls einzuschränken ist.

Aufgrund dessen wird nachfolgend die Parametrisierung einer Kragstütze mit den Querschnittsabmessungen 30 x 30cm, der Betongüte C30/37 und einem Achsabstand der Längsbewehrung von $u = 2,0\text{cm} + 1,0\text{cm} + \frac{\varnothing_{\text{längs}}}{2}$ hinsichtlich der Belastung, der Stützenschlankheit und der Beflammungsart (vierseitig bzw. dreiseitig) vorgenommen. Die brandschutztechnische Bemessung sämtlicher Stützenvarianten wird sowohl unter Anwendung der Zonenmethode als auch unter Heranziehung des allgemeinen Rechenverfahrens gemäß DIN (V) EN(V) 1992-1-2 [1; 5] für die Feuerwiderstandsklasse R 90 durchgeführt. Basierend auf einem Ergebnisabgleich der beiden Rechenverfahren werden anschließend Anwendungskriterien erarbeitet, die die Anwendungssicherheit der Zonenmethode erhöhen.

2 Rechengrundlagen für die Bemessung im Brandfall

2.1 Rechenprogramm

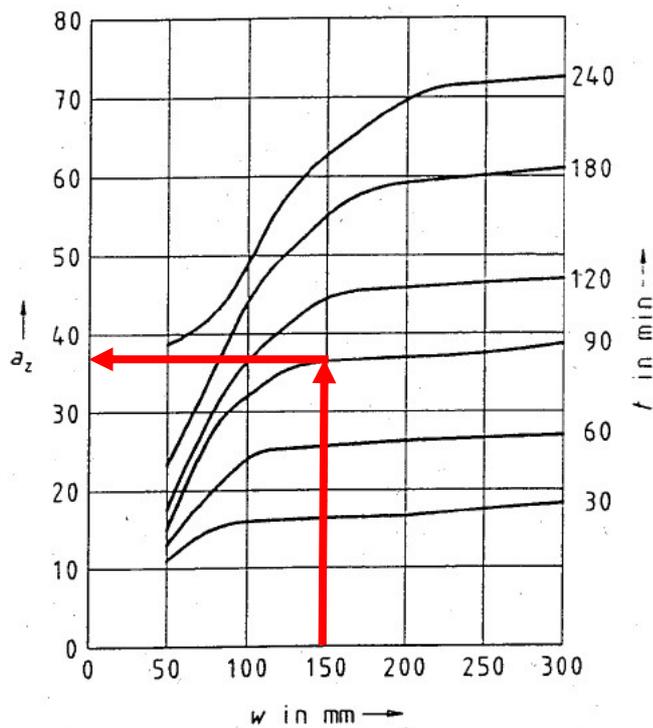
Für die Heißbemessung der zu untersuchenden Stützenvariationen wird bei beiden Rechenverfahren das Statikprogramm SOFISTIK (Version 11.07-25, Modul AQUA, SOFIMSHA, SOFILOAD und STAR2) eingesetzt, da dieses Programm eine differenzierte Materialdefinition in Abhängigkeit der Temperaturverteilung innerhalb des Stützenquerschnitts gewährleistet.

2.2 Zonenmethode

2.2.1 Querschnitt

Gemäß DIN V ENV 1992-1-2 [1] ist bei Anwendung der Zonenmethode zur Abbildung der brandgeschädigten Betonbereiche der Stützenquerschnitt um die Randzone a_z zu reduzieren. Im Rahmen der Parameterstudie wird von Rechteckstützen mit den Querschnittsabmessungen 30 x 30cm ausgegangen, die für eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten nachgewiesen werden. Zur Ermittlung von a_z wird das Bild B.3c des Eurocodes [1] herangezogen, wobei für den Parameter w die Hälfte der kleinsten Abmessung der zu bemessenden Stütze anzusetzen ist.

Abbildung 1: Reduktion a_z eines Stützenquerschnitts [1]



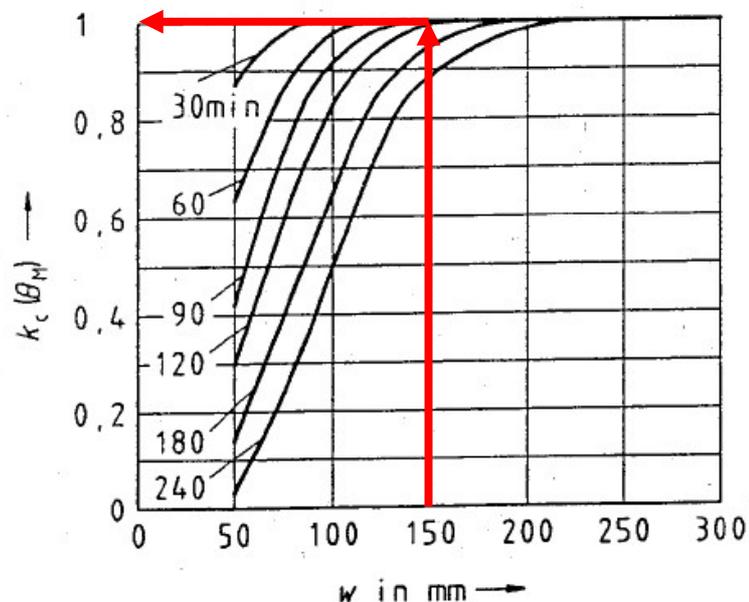
Für alle zu untersuchenden Stützenvariationen ist der vorliegende Querschnitt von 30 x 30cm um $a_z = 3,7$ cm zu reduzieren. Somit ergibt sich bei vierseitig beflamnten Stützen ein Restquerschnitt von 22,6 x 22,6cm; bei dreiseitig beflamnten Stützen ist ein Restquerschnitt von 26,3 x 22,6cm anzusetzen.

2.2.2 Materialdefinition

Beton

Die im Restquerschnitt anzusetzende Betontemperatur wird mit Hilfe des Abminderungsfaktors $k_c(\theta_M)$ bestimmt. Für die Ermittlung von $k_c(\theta_M)$ wird das Diagramm Bild B.3a des Eurocodes [1] angewendet:

Abbildung 2: Reduktion der Druckfestigkeit eines reduzierten Querschnitts [1]



Für die zu bemessenden Stützen ergibt sich aufgrund von $w = 150$ mm und der Feuerwiderstandsklasse von R 90 der Reduktionsfaktor zu $k_c(\theta_M) = 1,0$. Die Betondruckfestigkeit der Restquerschnitte ist somit im Rahmen der Parameterstudie nicht abzumindern und beträgt für die gewählte Betongüte C30/37

$$f_{cd,fi} = k_c(\theta_M) \cdot \alpha \cdot f_{ck} \cdot 1/\gamma_{c,fi} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 30 \cdot 1/1,0 = 30 \text{ MN/m}^2$$

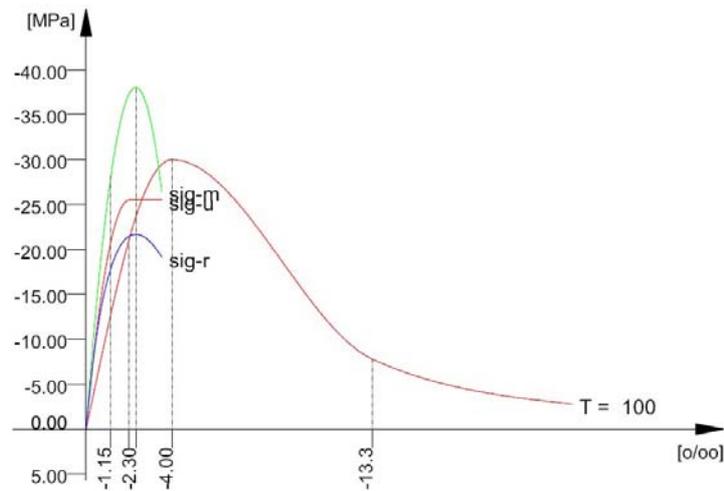
Zur Berechnung der temperaturabhängigen Arbeitslinie wird die Tabelle 3.1 der DIN EN 1992-1-2 [5] verwendet.

Abbildung 3: Temperaturabhängige Spannungs- Dehnungsbeziehung von Normalbeton [5]

Beton Temp. θ	Quarzh. Zuschläge			Kalksteinhaltige Zuschläge		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200	0,00	–	–	0,00	–	–

Bei einem Reduktionsfaktor $k_c(\theta_M)$ von 1,0 werden die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungsbeziehungen des Betons auf der sicheren Seite liegend unter einer erhöhten Temperatur von 100°C berücksichtigt [6]. Dem Zonenverfahren wird somit folgende Arbeitslinie des Betons zugrunde gelegt:

Abbildung 4: Temperaturabhängige Spannungs- Dehnungsbeziehungen des Betons



Betonstahl

Die Lage der Längsbewehrung ist entscheidend für die Betonstahltemperatur und somit für die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Betonstahls. Im Zuge der Parameterstudie wird der Achsabstand der Bewehrung in Abhängigkeit des gewählten Durchmessers der Längsbewehrung folgender Maßen festgelegt (die Angaben sind auf den Ursprungsquerschnitt 30 x 30cm bezogen):

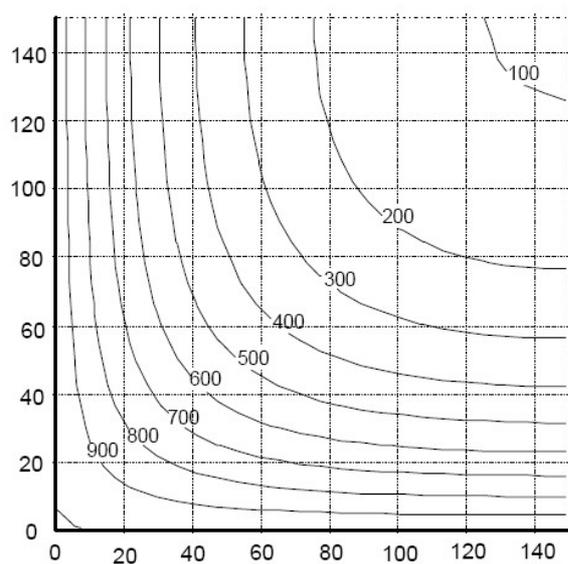
$$\text{Eckstäbe: } u_1 = u_2 = c_{\text{nom}} + \varnothing_{\text{Bügel}} + \varnothing_{\text{längs}}/2 = 2,0\text{cm} + 1,0\text{cm} + \varnothing_{\text{längs}}/2$$

$$\text{Randstäbe: } u_1 = c_{\text{nom}} + \varnothing_{\text{Bügel}} + \varnothing_{\text{längs}}/2 = 2,0\text{cm} + 1,0\text{cm} + \varnothing_{\text{längs}}/2$$

$$u_2 = 11\text{cm}$$

Die jeweiligen Betonstahltemperaturen werden mit Hilfe des in der DIN EN 1992-1-2 [5] abgebildeten, unter Ansatz der Einheitstemperaturzeitkurve errechneten Temperaturprofils einer Rechteckstütze $h \times b = 30 \times 30\text{cm}$ ermittelt.

Abbildung 5: Temperaturprofil einer Stütze $h \times b = 30 \times 30$ für $R 90$ [5]



Hieraus ergeben sich folgende Betonstahltemperaturen:

Abbildung 6: Betonstahltemperaturen

Durchmesser [mm]	u_1 [cm]	u_2 [cm]	Stahltemperatur [°C]
20	4,00	4,00	630
	4,00	11,00	440
25	4,25	4,25	600
	4,25	11,00	410
28	4,40	4,40	580
	4,40	11,00	390

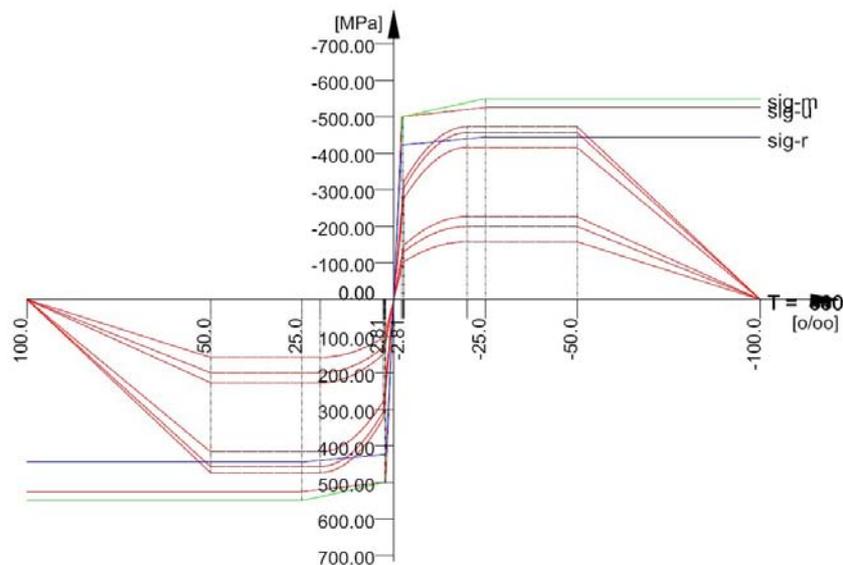
Auf Basis der ermittelten Stahltemperaturen werden die temperaturabhängigen Spannungs-Dehnungsbeziehungen des Betonstahls unter Verwendung der Tabelle 3.2a des Eurocodes DIN EN 1992-1-2 [5] unter der Annahme von kaltverformtem Betonstahl der Klasse N ermittelt.

Abbildung 7: Temperaturabhängige Spannungs- Dehnungsbeziehung von Betonstahl [5]

Stahltemperatur θ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	w.-gewalzt	kaltverformt	w.-gewalzt	kaltverformt	w.-gewalzt	kaltverformt
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1 000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1 100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Dementsprechend werden folgende temperaturabhängige Arbeitslinien des Betonstahls im Rahmen der Parametrisierung in Ansatz gebracht:

Abbildung 8: Temperaturabhängige Spannungs- Dehnungsbeziehungen des Betonstahls

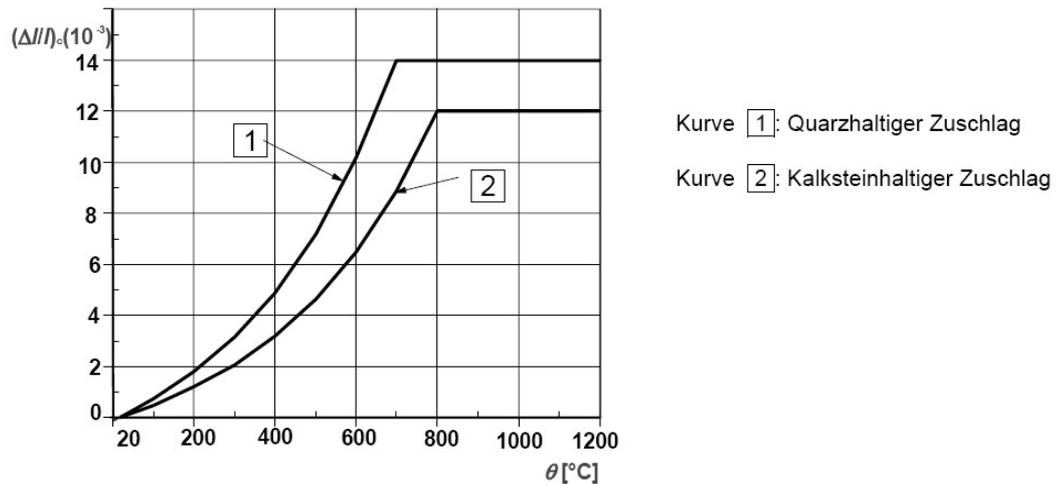


2.2.3 Thermische Dehnungen

Durch die erhöhte Temperatur im Brandfall stellen sich sowohl im Beton als auch im Betonstahl thermische Dehnungen ein, die vor allem bei Berechnungen nach Theorie II. Ordnung nicht vernachlässigt werden sollten. Die thermischen Dehnungen können sich im Brandfall nicht frei einstellen, da sich die benachbarten Querschnittsbereiche gegenseitig beeinflussen. Demzufolge kann von einem Ebenbleiben des Stützenquerschnitts ausgegangen werden [7]. Die hierbei entstehenden Zwangsspannungen werden im Zuge der Parameterstudie durch das Verschieben der Arbeitslinien berücksichtigt.

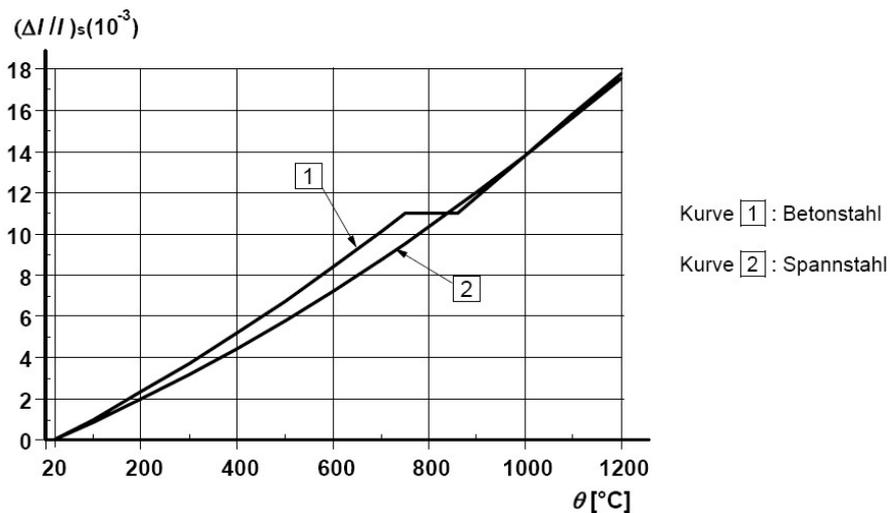
Die gesamte thermische Dehnung des Betons wird anhand von DIN EN 1992-1-2 [5] Bild 3.5 unter Annahme von quarzhaltigen Zuschlägen ermittelt:

Abbildung 9: Gesamte thermische Verlängerung von Beton [5]



Für die Bestimmung der gesamten thermischen Dehnung des Stahls wird das Diagramm Bild 3.8 [5] angewendet:

Abbildung 10: Gesamte thermische Verlängerung von Stahl [5]



Unter Berücksichtigung der Eigenspannungen werden somit folgende Arbeitslinien bei Anwendung der Zonenmethode in Ansatz gebracht (für Betonstahl wird exemplarische die verschobene Arbeitslinie für eine Temperatur von $T = 600^\circ\text{C}$ abgebildet):

Abbildung 11: Verschobene Arbeitslinie des Betons für $T = 100^\circ\text{C}$

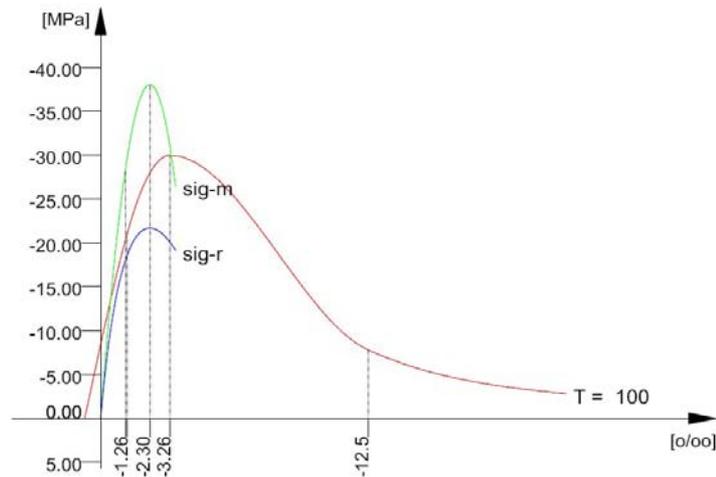
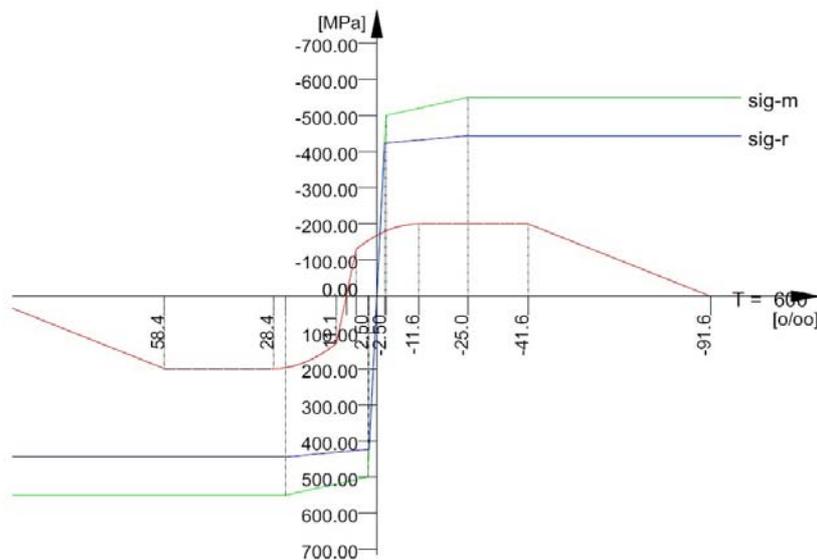


Abbildung 12: Verschobene Arbeitslinie des Betonstahls für $T = 600^\circ\text{C}$



2.2.4 Krümmung

Bei dreiseitig beflamten Stützen entsteht aufgrund des innerhalb des Querschnitts auftretenden Temperaturgradienten eine Verkrümmung, die im Zuge der Parameterstudie durch den Ansatz einer Vorverformung berücksichtigt wird. Die anzusetzende Kopfverformung wird gemäß [7] folgendermaßen errechnet:

$$w = \frac{1}{2} \cdot (l_{col})^2 \cdot \kappa \quad \text{mit}$$

$$\kappa = \left| \frac{\varepsilon_s(\theta_1) - \varepsilon_s(\theta_2)}{h - 2a} \right| \quad \text{wobei}$$

$\varepsilon_s(\theta_1)$ thermische Dehnung des Betonstahls an der beflamten Seite

$\varepsilon_s(\theta_2)$ thermische Dehnung des Betonstahls an der unbeflamten Seite

a Achsabstand des Betonstahls

2.3 Allgemeines Rechenverfahren

Im Gegensatz zum Zonenverfahren wird bei dem allgemeinen Rechenverfahren zusätzlich zur mechanischen Analyse auch eine thermische Analyse erforderlich. Im Fall der zu parametrisierenden Stütze mit den Querschnittsabmessungen 30 x 30cm wird das im Eurocode [5] abgebildete Temperaturprofil (siehe *Abbildung 5*) verwendet, um mit Hilfe des SOFISTIK - Moduls AQUA den Stützenquerschnitt in die Temperaturbereiche $T = 150, 250, 350, 450, 550, 650, 750, 850$ und 950°C mit den entsprechenden Materialeigenschaften zu unterteilen.

Abbildung 13: Temperaturbereiche für eine vierseitig beflamnte Stütze, R 90

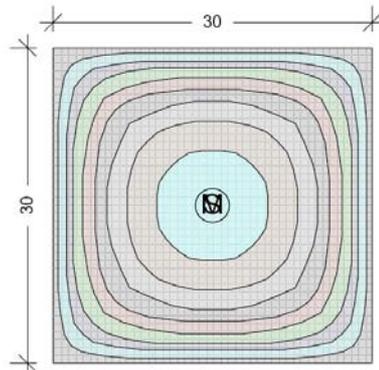


Abbildung 14: Temperaturbereiche für eine dreiseitig beflamnte Stütze, R 90

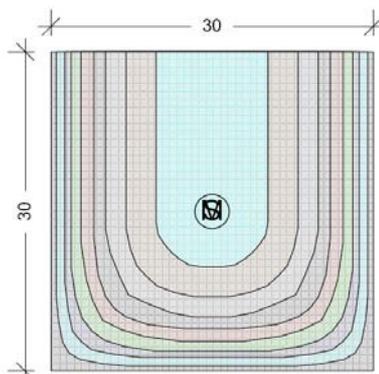
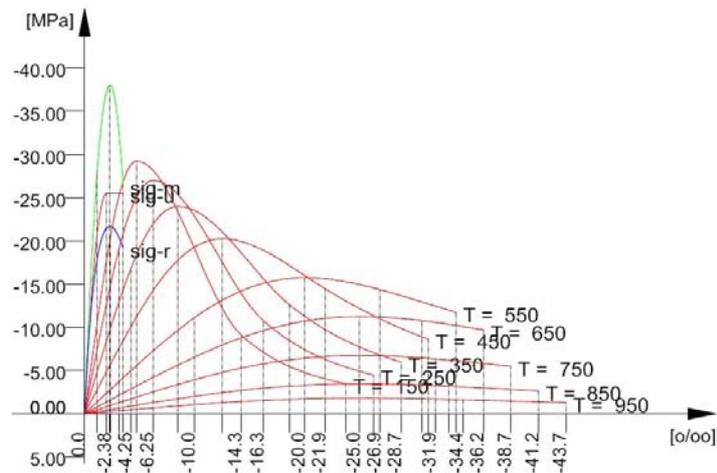


Abbildung 15: Temperaturabhängige Spannungs- Dehnungsbeziehungen des Betons



Die temperaturabhängigen Spannungs- Dehnungsbeziehungen des Betonstahls können dem Abschnitt 2.2.2 entnommen werden.

Im Zuge der Parameterstudie werden bei Anwendung des allgemeinen Rechenverfahrens die thermischen Dehnungen und die hieraus resultierenden Eigenspannungen durch das Verschieben der Arbeitslinien von Beton und Betonstahl berücksichtigt (siehe Abschnitt 2.2.3) Die bei asymmetrischer Beflammung auftretende Krümmung muss nicht wie beim Zonenverfahren durch eine Vorverformung (siehe Abschnitt 2.2.4). abgebildet werden, da beim allgemeinen Rechenverfahren die genaue Temperaturverteilung im Querschnitt berücksichtigt wird und somit die infolge des Temperaturgradienten entstehende Krümmung mit Hilfe des verwendeten Statikprogramm SOFISTIK exakt errechnet werden kann.

2.4 Sicherheitskonzept

Die Bemessung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit infolge Brand erfolgt unter der außergewöhnlichen Lastfallkombination.

$$E_{dA} = \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{PA} \cdot P_k \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right\}$$

Abbildung 16: Kombinationsbeiwerte nach DIN 1055-100 [8]

Tabelle A.2 — Beiwerte ψ

Einwirkung	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Nutzlasten^{a d}			
– Kategorie A — Wohn- und Aufenthaltsräume	0,7	0,5	0,3
– Kategorie B — Büros	0,7	0,5	0,3
– Kategorie C — Versammlungsräume	0,7	0,7	0,6
– Kategorie D — Verkaufsräume	0,7	0,7	0,6
– Kategorie E — Lagerräume	1,0	0,9	0,8
Verkehrslasten			
– Kategorie F, Fahrzeuglast ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
– Kategorie G, ≤ 30 kN \leq Fahrzeuglast ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
– Kategorie H — Dächer	0	0	0
Schnee- und Eislasten			
Orte bis NN + 1 000 m	0,5	0,2	0
Orte über NN + 1 000 m	0,7	0,5	0,2
Windlasten	0,6	0,5	0
Temperatureinwirkungen (nicht Brand)^b	0,6	0,5	0
Baugrundsetzungen	1,0	1,0	1,0
Sonstige Einwirkungen^c	0,8	0,7	0,5
^a Abminderungsbeiwerte für Nutzlasten in mehrgeschossigen Hochbauten siehe E DIN 1055-3 ^d ψ -Beiwerte für Maschinenlasten sind betriebsbedingt festzulegen. ^b Siehe E DIN 1055-7 ^c ψ -Beiwerte für Flüssigkeitsdruck sind standortbedingt festzulegen.			

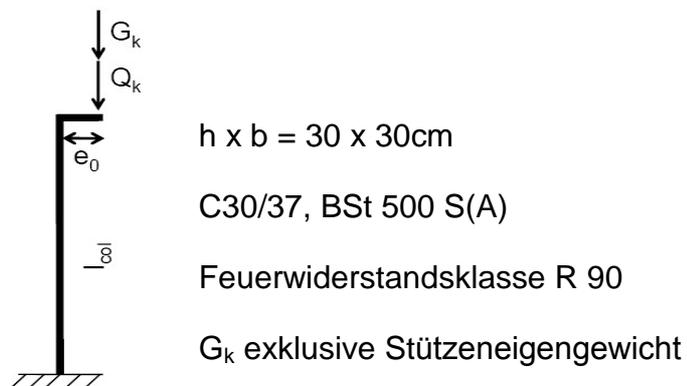
Die bei den im Folgenden untersuchten Stützenvariationen angesetzten veränderlichen Lasten werden der Einwirkungskategorie B zugeordnet. Der Kombinationsbeiwert der Nutzlasten beträgt folglich $\psi_1 = 0,5$.

3 Parameterstudie

Für die im Nachfolgenden durchgeführte Parameterstudie zur Erarbeitung von Anwendungskriterien für die Zonenmethode wurden folgende Randbedingungen als invariabel angenommen:

- Untersucht wird bei allen Variationen eine Kragstütze mit den Querschnittsabmessungen $h \times b = 30 \times 30\text{cm}$
- Die Betongüte wird auf C30/37, die Stahlgüte auf BSt 500 S(A) festgelegt
- Den brandschutztechnischen Bemessungen wird die Feuerwiderstandsklasse R 90 zugrunde gelegt
- Der Achsabstand der Eckbewehrung errechnet sich zu:
 $u_1 = u_2 = 2,0\text{cm} + 1,0\text{cm} + \varnothing_{\text{längs}}/2$
- der Achsabstand der Randbewehrung errechnet sich zu:
 $u_1 = 2,0\text{cm} + 1,0\text{cm} + \varnothing_{\text{längs}}/2$
 $u_2 = 11\text{cm}$

Abbildung 17: Randbedingungen



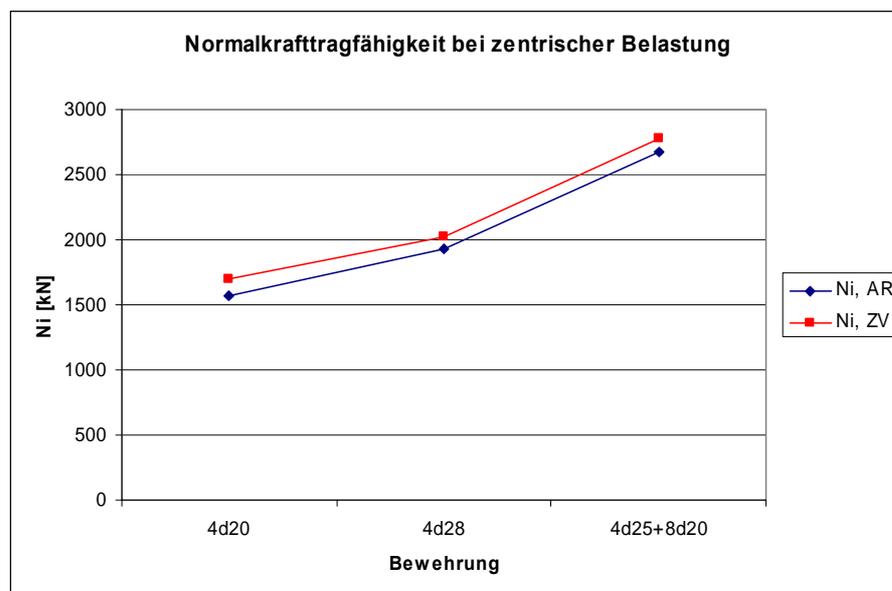
Als Vergleichsbasis zwischen dem Zonenverfahren und dem allgemeinen Rechenverfahren wird die relative Tragfähigkeit der Stützenvariationen herangezogen. Hierfür werden mit Hilfe des Statikprogramms SOFISTIK die inneren Schnittgrößen N_i und M_i errechnet, die im selben Verhältnis wie die nach Theorie II. Ordnung ermittelten äußeren Schnittgrößen stehen. Der relative Tragfaktor gibt somit das Verhältnis von $N_i/N_{ed,fi,II}$ bzw. $M_i/M_{ed,fi,II}$ an. Ist die relative Tragfähigkeit einer Stützenvariation unter Anwendung des vereinfachten Rechenverfahrens geringer als unter Anwendung des allgemeinen Rechenverfahrens, liegen die Ergebnisse der Zonenmethode auf der sicheren Seite. Tritt das Gegenteil auf, ist der Anwendungsbereich hinsichtlich des untersuchten Parameters einzuschränken.

3.1 Vierseitig beflamnte Stützen

Gemäß der deutschen Norm DIN 1045-1 [9] sind Imperfektionen für die außergewöhnliche Einwirkungskombination und somit für die Bemessung im Brandfall nicht anzusetzen.

Wird jedoch die Normalkrafttragfähigkeit des allgemeinen und des vereinfachten Rechenverfahrens bei zentrischer Belastung gegenübergestellt (siehe *Abbildung 18*), wird deutlich, dass das Zonenverfahren ohne Aufbringung von Exzentrizitäten im Vergleich zum allgemeinen Verfahren auf der unsicheren Seite liegende Ergebnisse liefert, da der in Temperaturbereiche unterteilte Querschnitt des allgemeinen Rechenverfahrens eine geringere Normalkrafttragfähigkeit aufweist als der reduzierte Querschnitt des vereinfachten Verfahrens unter Ansatz einer Betontemperatur von 100°C.

Abbildung 18: Normalkrafttragfähigkeit bei zentrischer Belastung



Aufgrund dessen wird nachfolgend untersucht, ob die Aufbringung einer Vorverformung diese Anwendungsunsicherheit des Zonenverfahrens bei zentrischer Belastung bzw. sehr geringen Lastausmitten e_0 ausschalten kann. Hierfür werden brandschutztechnische

Bemessungen für die Stützenlängen $l_{col} = 2,0\text{m}; 3,0\text{m}; 4,0\text{m}$ und $6,0\text{m}$ unter Ansatz folgender Imperfektionen durchgeführt:

- Imperfektion nach DIN 1045-1 [9]

$$\alpha_{a1} = 1 / [100 \cdot (l_{col})^{0,5}] \leq 1 / 200$$

$$e_a = \alpha_{a1} \cdot l_0 / 2$$

- $e_a = l_0 / 2000$

- $e_a = 0$

Abbildung 19: Ergebnisse für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d20$; $l=2,0m$

G _k = 325kN; Q _k = 50kN; e ₀ = 0h; A _s = 4d20; l = 2,0m							
	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung
Imperfektion [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	A _{s,eff} [cm ²]
10 (DIN 1045-1)	1,22	26,90	76,60	4,01	4,36	12,40	4,52
2,0 (l ₀ /2000)	1,66	16,70	47,70	4,65	0,87	2,48	
0	4,54	0,00	0,00	4,83	0,00	0,00	

Abbildung 20. relTra für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d20$; $l=2,0m$

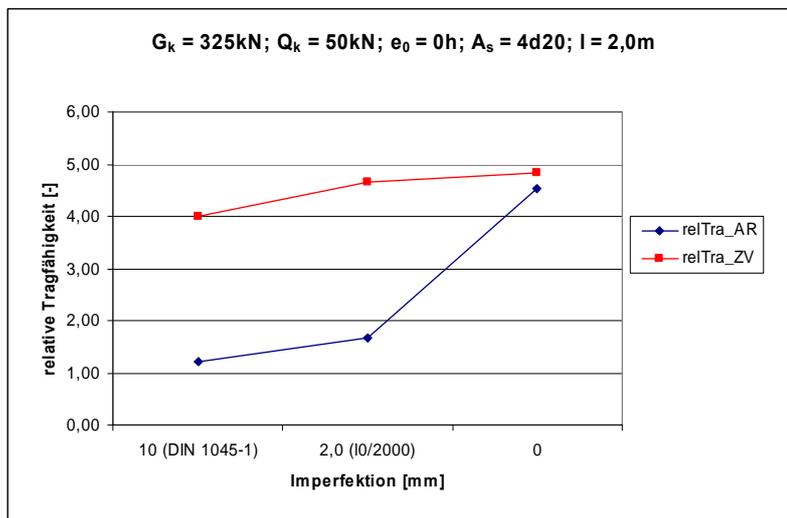
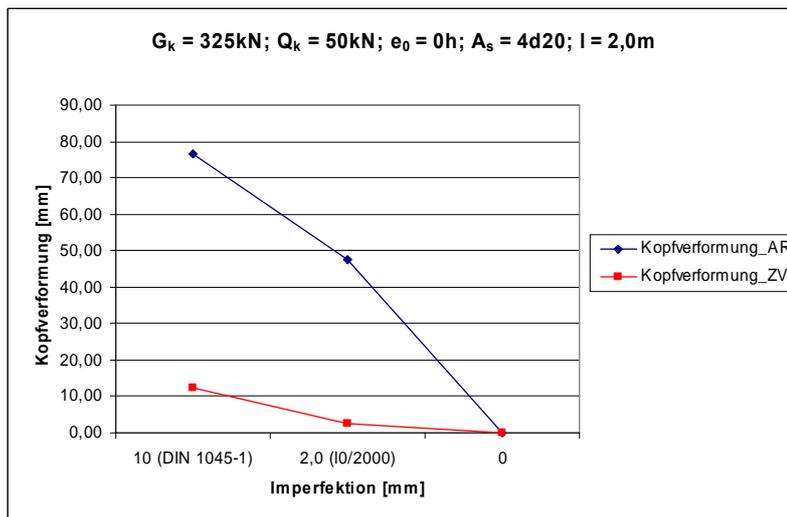


Abbildung 21: Kopfverformung für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d20$; $l=2,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Abbildung 22: Ergebnisse für $G_k=835kN$; $Q_k=140kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=2,0m$

G _k = 835kN; Q _k = 140kN; e ₀ = 0h; A _s = 4d25+8d20; l = 2,0m							
Imperfektion [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung A _{s,eff} [cm ²]
	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	
10 (DIN 1045-1)	1,79	21,90	24,10	1,10	80,30	88,70	4,63
2,0 (l ₀ /2000)	2,55	4,52	4,99	1,25	63,50	70,10	
0	2,96	0,00	0,00	3,07	0,00	0,00	

Abbildung 23. relTra für $G_k=835kN$; $Q_k=140kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=2,0m$

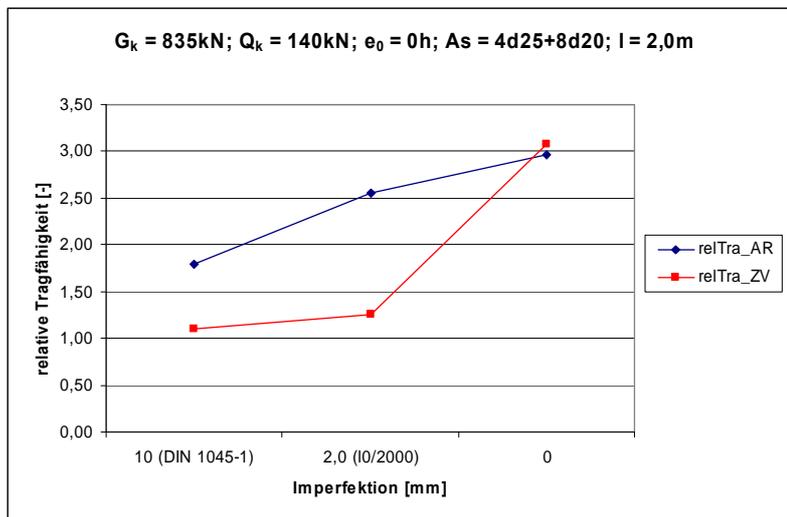
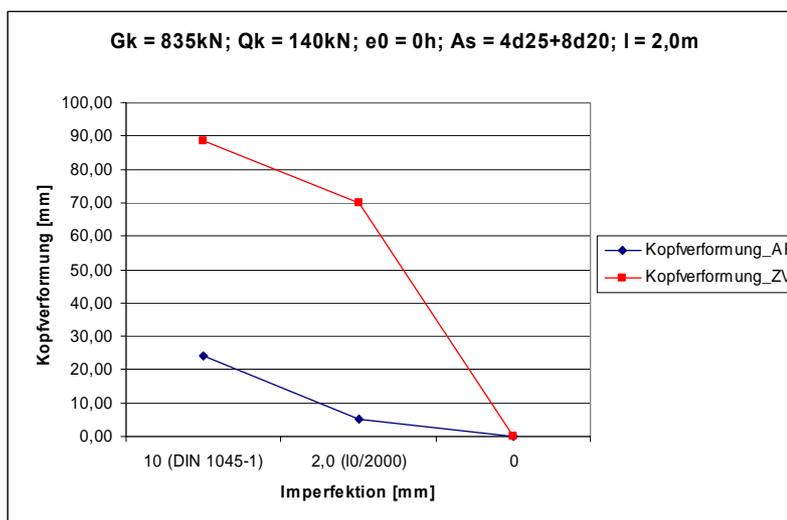


Abbildung 24: Kopfverformung für $G_k=835kN$; $Q_k=140kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=2,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Abbildung 25: Ergebnisse für $G_k=170kN$; $Q_k=30kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25$; $l=3,0m$

G _k = 170kN; Q _k = 30kN; e ₀ = 0h; A _s = 4d25; l = 3,0m							
	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung
Imperfektion [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	A _{s,eff} [cm ²]
15 (DIN 1045-1)	4,86	5,28	28,10	6,06	6,52	35,00	4,52
3,0 (l ₀ /2000)	7,91	1,02	5,41	8,98	1,29	6,91	
0	9,37	0,00	0,00	9,96	0,00	0,00	

Abbildung 26: relTra für $G_k=170kN$; $Q_k=30kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25$; $l=3,0m$

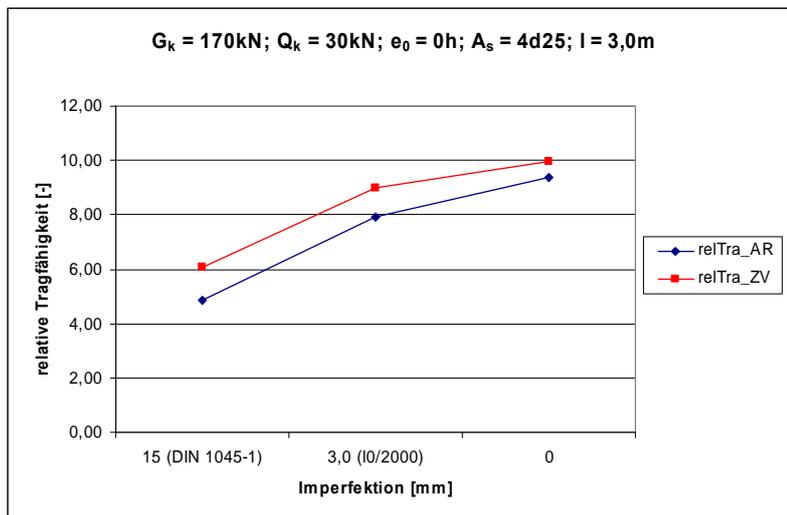
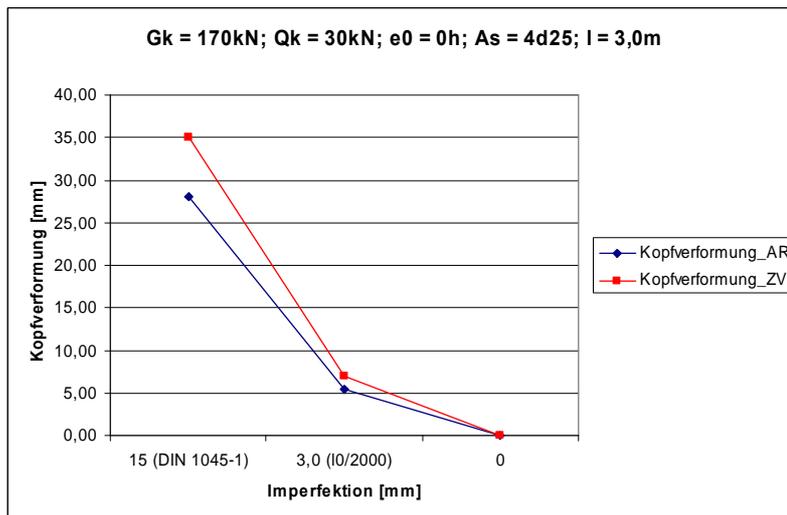


Abbildung 27: Kopfverformungen für $G_k=170kN$; $Q_k=30kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25$; $l=3,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Abbildung 28: Ergebnisse für $G_k=410kN$; $Q_k=70kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=3,0m$

G _k = 410kN; Q _k = 70kN; e ₀ = 0h; A _s = 4d25+8d20; l = 3,0m							
Imperfektion [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung A _{s,eff} [cm ²]
	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	
15 (DIN 1045-1)	3,09	16,50	36,90	2,74	26,90	60,20	4,52
3,0 (l ₀ /2000)	4,68	3,96	8,84	4,78	7,95	17,80	
0	5,95	0,00	0,00	6,20	0,00	0,00	

Abbildung 29: relTra für $G_k=410kN$; $Q_k=70kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=3,0m$

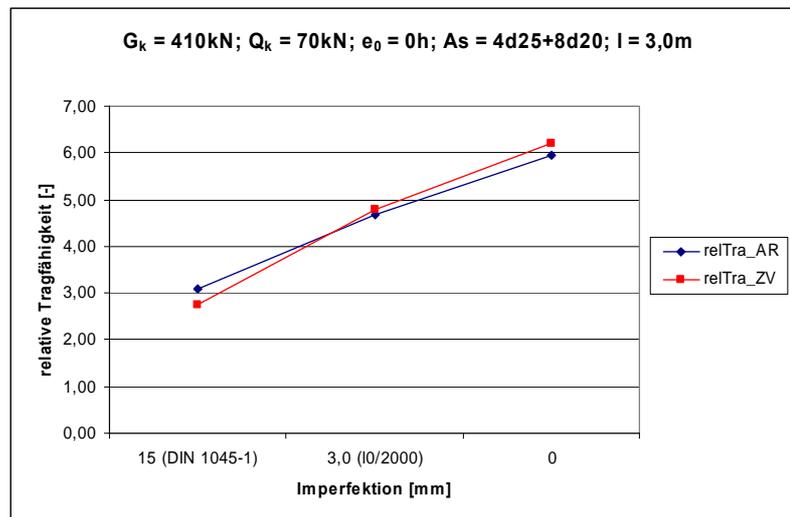
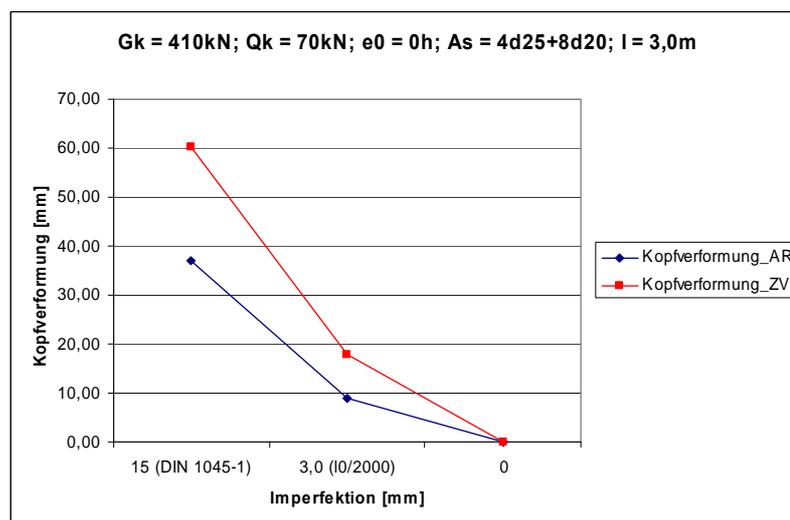


Abbildung 30: Kopfverformungen für $G_k=410kN$; $Q_k=70kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=3,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Abbildung 31: Ergebnisse für $G_k=150kN$; $Q_k=30kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d28$; $l=4,0m$

G _k = 150kN; Q _k = 30kN; e ₀ = 0h; A _s = 4d28; l = 4,0m							
Imperfektion [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung A _{s,erf} [cm ²]
	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	
20 (DIN 1045-1)	4,66	8,02	47,50	4,65	10,10	60,50	4,52
4,0 (l ₀ /2000)	8,71	1,54	9,11	10,00	2,01	12,00	
0	10,70	0,00	0,00	11,90	0,00	0,00	

Abbildung 32: relTra für $G_k=150kN$; $Q_k=30kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d28$; $l=4,0m$

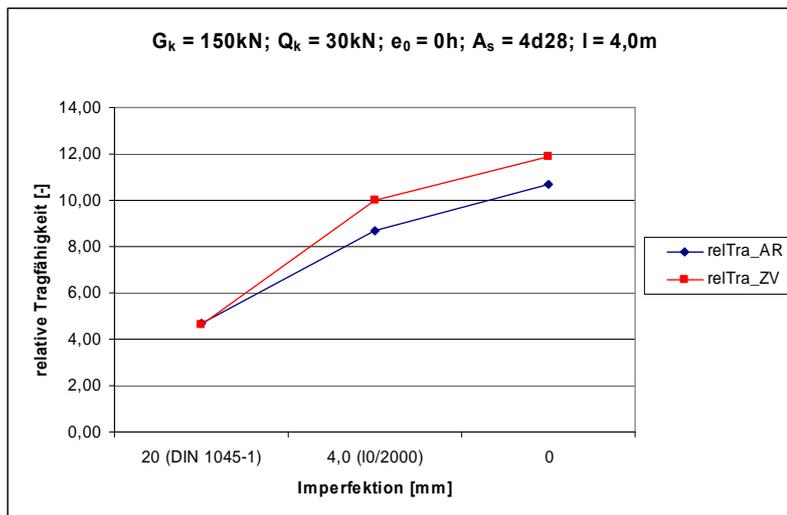
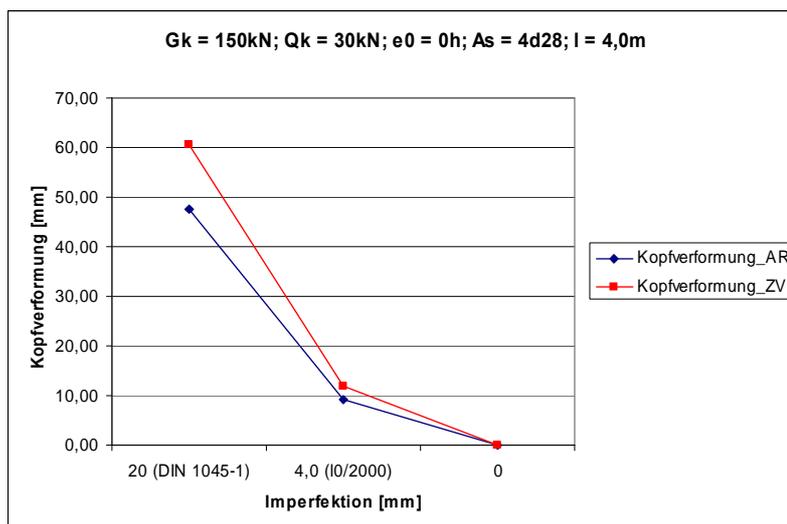


Abbildung 33: Kopfverformungen für $G_k=150kN$; $Q_k=30kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d28$; $l=4,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Abbildung 34: Ergebnisse für $G_k=280kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=4,0m$

G _k = 280kN; Q _k = 50kN; e ₀ = 0h; A _s = 4d25+8d20; l = 4,0m							
Imperfektion [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung
	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	A _{s,eff} [cm ²]
20 (DIN 1045-1)	3,65	18,10	58,70	2,46	41,40	134,70	4,52
4,0 (l ₀ /2000)	6,65	2,93	9,50	5,28	10,20	33,20	
0	8,57	0,00	0,00	8,98	0,00	0,00	

Abbildung 35: relTra für $G_k=280kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=4,0m$

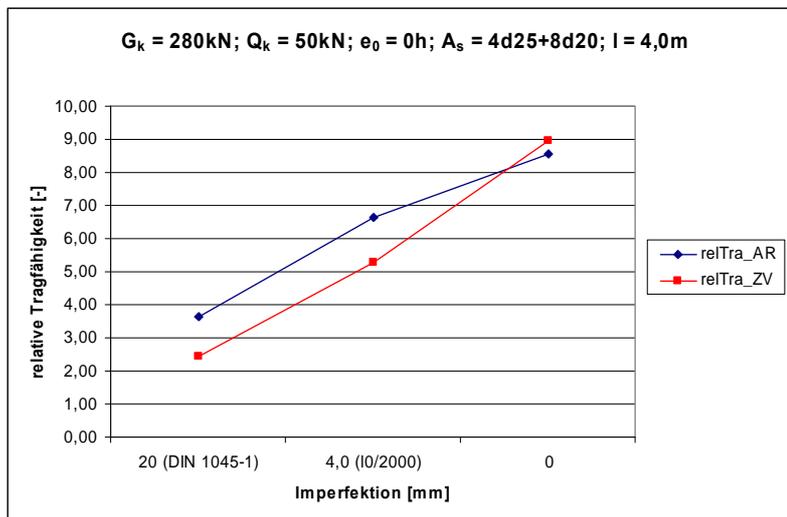
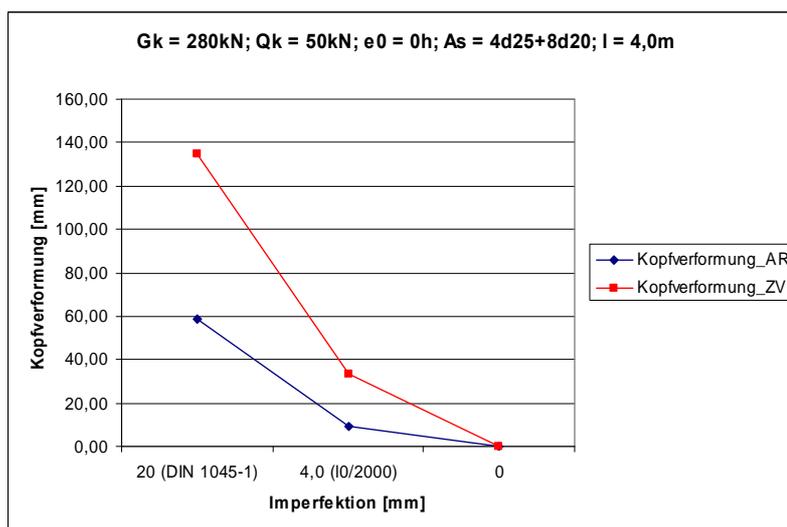


Abbildung 36: Kopfverformungen für $G_k=280kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=4,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Abbildung 37: Ergebnisse für $G_k=85kN$; $Q_k=15kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d28$; $l=6,0m$

G _k = 85kN; Q _k = 15kN; e ₀ = 0h; A _s = 4d28; l = 6,0m							
Imperfektion [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung A _{s,erf} [cm ²]
	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	
25 (DIN 1045-1)	4,90	11,20	114,10	3,16	22,70	237,50	4,52
6,0 (l ₀ /2000)	10,40	2,52	25,80	8,31	5,44	57,00	
0	18,10	0,00	0,00	20,30	0,00	0,00	

Abbildung 38: relTra für $G_k=85kN$; $Q_k=15kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d28$; $l=6,0m$

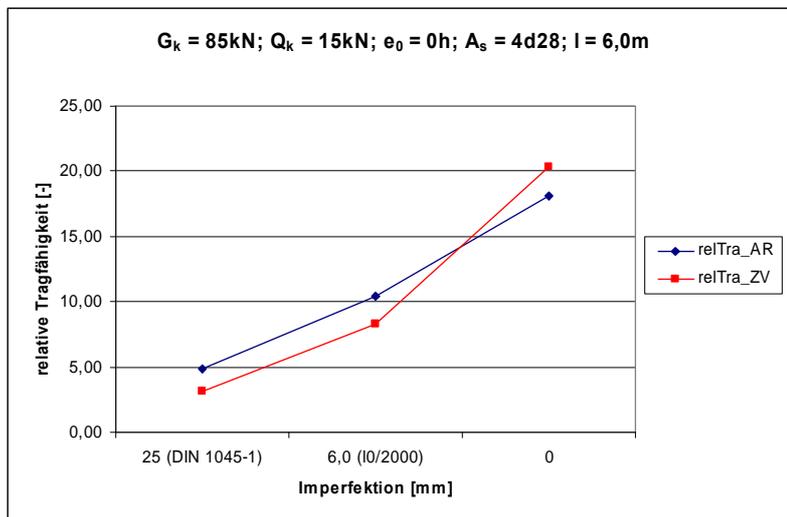
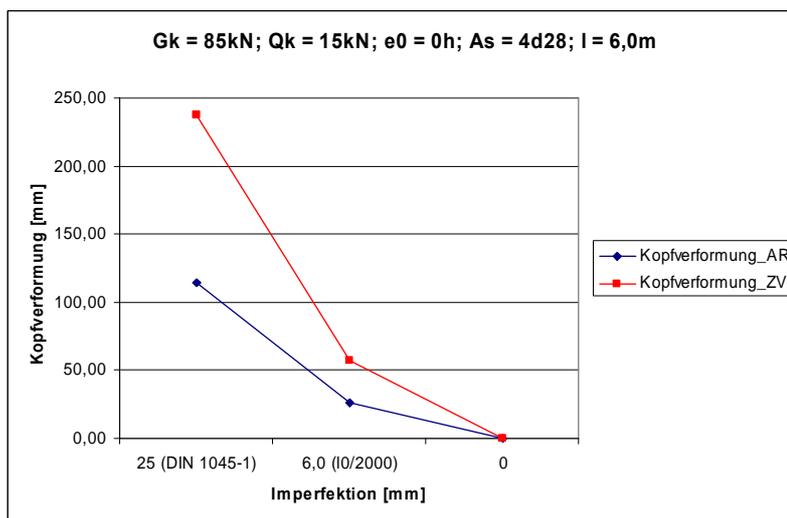


Abbildung 39: Kopfverformung für $G_k=85kN$; $Q_k=15kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d28$; $l=6,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Abbildung 40: Ergebnisse für $G_k=130kN$; $Q_k=25kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=6,0m$

G _k = 130kN; Q _k = 25kN; e ₀ = 0h; A _s = 4d25+8d20; l = 6,0m							
Imperfektion [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung A _{s,erf} [cm ²]
	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	
25 (DIN 1045-1)	6,60	11,10	75,20	6,54	13,60	93,40	4,52
6,0 (l ₀ /2000)	11,60	2,58	17,40	13,80	3,03	20,80	
0	17,20	0,00	0,00	18,50	0,00	0,00	

Abbildung 41: relTra für $G_k=130kN$; $Q_k=25kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=6,0m$

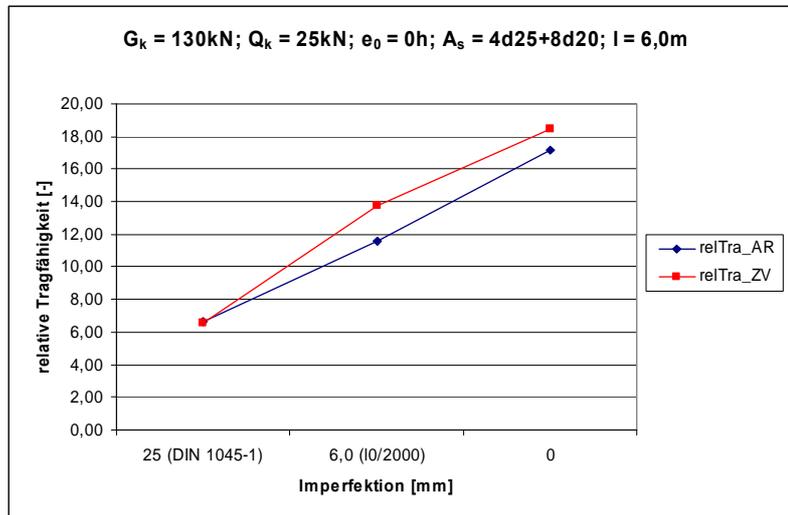
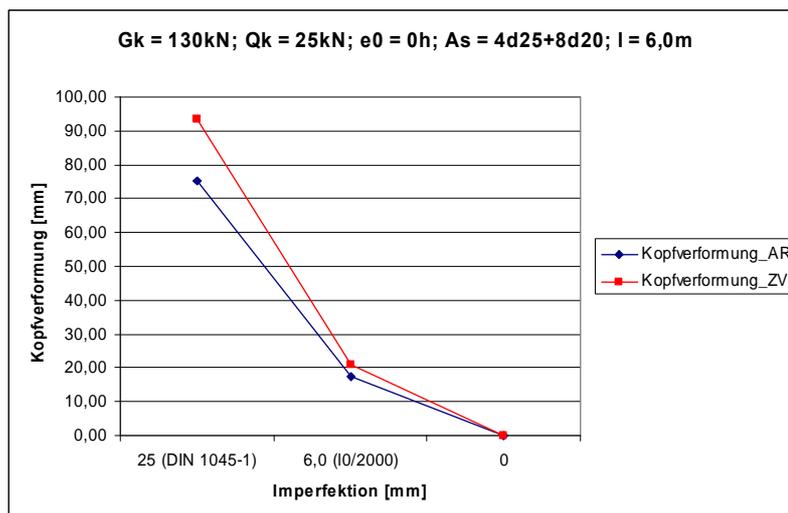


Abbildung 42: Kopfverformung für $G_k=130kN$; $Q_k=25kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d25+8d20$; $l=6,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Die Ergebnisse der durchgeführten Parametrisierung zeigen deutlich, dass sich bei Aufbringung einer linearen Vorverformung unter Anwendung des Zonenverfahrens größere Stützenverformungen nach Berechnung Theorie II. Ordnung einstellen als bei der Heißbemessung nach dem allgemeinen Rechenverfahren. Die Diskrepanz der Kopfverformungen nimmt hierbei sowohl mit Steigerung der Vorverformung als auch mit Erhöhung der Vertikallasten zu.

Eine Ausnahme hiervon bilden die in Abbildung 19 bis Abbildung 21 dargestellten Ergebnisse, da bei dieser Stützenvariation die Stützenverformungen nach Th. II. O. des allgemeinen Verfahrens die mit Hilfe des vereinfachten Verfahrens errechneten Verformungen überschreiten. In diesem Fall handelt es sich um eine Stütze mit geringer Schlankheit unter niedriger äußerer Belastung, wodurch der reduzierte Querschnitt der Zonenmethode im Gegensatz zum Querschnitt des allgemeinen Verfahrens bei Ansatz der „kalten“ Imperfektion überdrückt bleibt und demzufolge eine hohe Steifigkeit aufweist. Anhand dieser Stützenvariation wird klar, dass die Stützenverformungen nach Th. II. O. eine entscheidende Rolle bezüglich der Anwendungssicherheit der Zonenmethode spielen. Der Grund hierfür lässt sich durch genauere Betrachtung der Kopfverformungen ermitteln:

Abbildung 32 zeigt beispielsweise, dass im Fall der geringeren Vertikallast die relative Tragfähigkeit ($relTra = 4,65$) bei der Heißbemessung nach dem Zonenverfahren unter Ansatz der „kalten“ Vorverformung nach DIN 1045-1 [9] unter den mit Hilfe des allgemeinen Verfahrens errechneten relativen Tragfaktor ($relTra = 4,66$) sinkt. Wird als Vorverformung nur der Wert von $l_0/2000$ angesetzt, liefert das Zonenverfahren auf der unsicheren Seite liegende Ergebnisse.

Bei Steigerung der Vertikallast ist hingegen eine Vorverformung von $l_0/2000$ ausreichend, um den relativen Traglastfaktor des allgemeinen Rechenverfahrens zu unterschreiten (siehe Abbildung 35).

Im Fall der geringeren Vertikallasten ist der Unterschied zwischen den Verformungen bei Aufgabe einer Vorverformung von $l_0/2000$ sehr gering (Abbildung 33). Demzufolge nehmen auch die Momente nach Theorie II. Ordnung im Vergleich zum allgemeinen Verfahren nur in geringem Maße zu. Dieser geringe Momentenzuwachs im Vergleich zum allgemeinen Rechenverfahren reicht jedoch nicht aus, um die erhöhte Tragfähigkeit des Querschnitts (siehe *Abbildung 18*) auszugleichen.

Mit erhöhter Vertikallast stellen sich am Stützenkopf bei Anwendung der Zonenmethode jedoch im Vergleich zu dem allgemeinen Rechenverfahren deutlich höhere Verformungen nach Theorie II. Ordnung ein (*Abbildung 36*). Der hierdurch entstehende Momentenzuwachs ist bereits bei einer Vorverformung von $l_0/2000$ ausreichend, um die erhöhte Querschnittstragfähigkeit des reduzierten Stützenquerschnitts zu kompensieren.

Bei Anwendung des Zonenverfahrens ist somit im Fall von zentrischen Belastungen beziehungsweise von geringen Lastausmitten e_0 der Ansatz einer Vorverformung erforderlich, um die Anwendungssicherheit des vereinfachten Rechenverfahrens zu gewährleisten.

Auffällig ist hierbei die Tatsache, dass bei den untersuchten Stützenvariationen mit Stützenlängen von 4,0m und 6,0m die „kalte“ Imperfektion ausreichend ist, um Verformungen bei Anwendung der Zonenmethode hervorzurufen, die die erhöhte Querschnittstragfähigkeit kompensieren können. Bei den Stützenvariationen geringerer Schlankheit ist die Imperfektion jedoch bei geringeren Vertikalbelastungen nicht ausreichend, um die Anwendungssicherheit des Zonenverfahrens gewährleisten zu können.

Eine Lösung für dieses Problem bietet die Festlegung einer Mindest - Lastexzentrizität e_0 nach Th. I. O. bezogen auf die Querschnittsabmessung h , die bei der Durchführung der Heißbemessung anzusetzen ist, falls die „kalte“ Imperfektion e_a nach DIN 1045-1 [9] (bei zentrisch belasteten Stützen) bzw. die vorhandene Lastexzentrizität e_0 (bei geringen Lastausmitten) den Wert dieser vorgeschriebenen Mindest - Lastexzentrizität unterschreitet.

Nachfolgend wird dieser Wert anhand der Stützenvariation mit der geringsten Schlankheit unter geringer Vertikalbelastung (siehe *Abbildung 19* bis *Abbildung 21*) ermittelt und

anschließend durch die erneute brandschutztechnische Bemessung aller Stützenvariationen unter Einhaltung dieses Anwendungskriteriums verifiziert.

Abbildung 43: Erforderliche Lastexzentrizität für $G_k=325\text{kN}$; $Q_k=50\text{kN}$; $A_s=4d20$; $l=2,0\text{m}$

G _k = 325kN; Q _k = 50kN; A _s = 4d20; l = 2,0m						
Imperfektion bzw. Lastexzentrizität [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren		
	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]
e _a =10 (DIN 1045-1)	1,22 (relTra)	26,90	76,60	4,01 (relTra)	4,36	12,40
e ₀ =15	13,9cm ²	37,50	91,70	3,60 (relTra)	7,18	5,51
e ₀ =20	15,7cm ²	39,80	93,30	3,26 (relTra)	9,83	8,06
e₀=25	17,5cm ²	42,00	94,60	19cm ²	49,20	115,30

Bei einer Lastexzentrizität e₀ nach Th. I. O. von 25mm liefert das Zonenverfahren im Fall der gedrunghenen und gering belasteten Stütze im Vergleich zum allgemeinen Verfahren auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse (siehe *Abbildung 43*). Entsprechend diesem Wert wird im Rahmen der Parameterstudie für alle Stützenvarianten mit den Stützenlängen l_{col} = 2,0m; 3,0m und 4,0m eine Neubemessung unter Ansatz einer Lastexzentrizität von **e₀ = 25mm = h/12** erforderlich, da bei diesen Stützenlängen die Imperfektion nach DIN 1045-1 [9] kleiner als 25mm ist.

Stützenlänge $l_{col}=2,0m$

Abbildung 44: Ergebnisse für $G_k=835kN$; $Q_k=140kN$; $e_0=25mm$; $A_s=12d25$; $l=2,0m$

G _k = 835kN; Q _k = 140kN; A _s = 12d25; l = 2,0m						
Imperfektion bzw. Lastexzentrizität [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren		
	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]
10 (DIN 1045-1)	2,52 (relTra)	15,00	16,50	2,86 (relTra)	16,20	17,90
e₀=25	1,75 (relTra)	44,50	24,10	1,56 (relTra)	68,30	50,50

Die Bewehrung dieser Stützenvariation musste bei der brandschutztechnischen Bemessung unter Ansatz der Lastexzentrizität von $e_0 = 25mm$ aus programmtechnischen Gründen auf 12d25 erhöht werden (vergleiche Abbildung 22), da sonst keine Konvergenz erreicht werden konnte. Interessant ist hierbei, dass bei der gewählten Bewehrung von 12d25 der Ansatz der „kalten“ Imperfektion selbst bei den hohen Vertikallasten nicht ausreichend ist, um die Anwendungssicherheit des Zonenverfahrens zu gewährleisten, da sich aufgrund der Steifigkeitszunahme infolge des höheren Bewehrungsgrades der reduzierte Querschnitt der Zonenmethode nicht ausreichend unter Berechnung nach Th. II. O. verformt, um die erhöhte Querschnittstragfähigkeit auszugleichen. Wird jedoch eine Lastexzentrizität von $e_0 = h/12 = 25mm$ angesetzt, liefert das vereinfachte Verfahren auch in diesem Fall auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse.

Stützenlänge $l_{col}=3,0m$

Abbildung 45: Ergebnisse für $G_k=170kN$; $Q_k=30kN$; $e_0=25mm$; $A_s=4d25$; $l=3,0m$

G _k = 170kN; Q _k = 30kN; A _s = 4d25; l = 3,0m						
Imperfektion bzw. Lastexzentrizität [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren		
	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]
15 (DIN 1045-1)	4,86 (relTra)	5,28	28,10	6,06 (relTra)	6,52	35,00
e₀=25	3,33 (relTra)	10,90	33,50	24,3cm ²	65,20	324,80

Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Abbildung 46: Ergebnisse für $G_k=410kN$; $Q_k=70kN$; $e_0=25mm$; $A_s=4d25+8d20$; $l=3,0m$

G _k = 410kN; Q _k = 70kN; A _s = 12d25; l = 3,0m						
Imperfektion bzw. Lastexzentrizität [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren		
	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]
15 (DIN 1045-1)	4,47 (relTra)	12,00	26,80	4,82 (relTra)	13,20	29,50
e₀=25	3,43 (relTra)	23,60	27,80	3,45 (relTra)	27,10	35,80

Zum Erreichen der Konvergenz musste auch bei dieser Stützenvariante die Bewehrung von 4d25+8d20 auf 12d25 erhöht werden. Für die Lastexzentrizität von e₀ = 25mm liefern die beiden Rechenverfahren in etwa identische Ergebnisse.

Stützenlänge l_{col}=4,0m

Abbildung 47: Ergebnisse für $G_k=150kN$; $Q_k=30kN$; $e_0=25mm$; $A_s=4d28$; $l=4,0m$

G _k = 150kN; Q _k = 30kN; A _s = 4d28; l = 4,0m						
Imperfektion bzw. Lastexzentrizität [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren		
	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]
20 (DIN 1045-1)	4,66 (relTra)	8,02	47,50	4,65 (relTra)	10,10	60,50
e₀=25	3,67 (relTra)	12,90	52,20	3,41 (relTra)	17,10	77,60

Abbildung 48: Ergebnisse für $G_k=280kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=25mm$; $A_s=12d25$; $l=4,0m$

G _k = 280kN; Q _k = 50kN; A _s = 12d25; l = 4,0m						
Imperfektion bzw. Lastexzentrizität [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren		
	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-] bzw. A _{s,erf} [cm ²]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]
20 (DIN 1045-1)	5,49 (relTra)	12,80	41,40	5,53 (relTra)	15,70	51,10
e₀=25	4,56 (relTra)	19,40	38,30	4,50 (relTra)	24,00	53,30

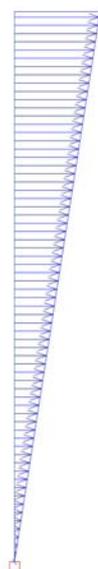
Zum Erreichen der Konvergenz wurde die Bewehrung zur Verifizierung der Mindest-Lastexzentrizität von 25mm auf 12d25 erhöht.

Die erneut durchgeführten brandschutztechnischen Bemessungen zeigen, dass die Anwendungssicherheit des Zonenverfahrens im Rahmen der Parameterstudie bei Einhaltung des folgenden Lastexzentrizitäts - Kriteriums gewährleistet werden kann (siehe *Abbildung 43 bis Abbildung 48*):

zentrisch belastete Kragstützen

Gemäß den durchgeführten Untersuchungen ist unter Anwendung des Zonenverfahrens bei zentrisch belasteten Kragstützen die „kalte“ Imperfektion nach DIN 1045-1 [9] als lineare Vorverformung (siehe *Abbildung 49*) aufzugeben. Falls diese jedoch den auf die Querschnittsabmessung bezogenen Wert von $h/12$ unterschreitet, ist statt dieser Vorverformung eine Lastexzentrizität e_0 von mindestens $h/12$ anzusetzen (siehe auch *Abbildung 17*).

Abbildung 49: Imperfektion als lineare Vorverformung



Kragstützen mit Lastausmitten $e_0 < h/12$

Unterschreitet die vorhandene Lastausmitte e_0 nach Theorie I. Ordnung den im Rahmen der Parameterstudie ermittelten Wert von $h/12$, ist die Lastexzentrizität mindestens auf diesen Wert zu erhöhen. Der Ansatz der Imperfektion kann gemäß DIN 1045-1 [9] entfallen.

Kragstützen mit Lastausmitten $e_0 > h/12$

Gemäß den im Zuge der Parameterstudie erhaltenen Resultaten liefert das Zonenverfahren für Kragstützen mit Lastausmitten $e_0 > h/12$ im Vergleich zum allgemeinen Rechenverfahren auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse. Auf den Ansatz der Imperfektion kann gemäß DIN 1045-1 [9] verzichtet werden.

Diese Aussage wird nachfolgend anhand der gedrunghenen Stütze der Länge $l_{col} = 2,0m$ bei geringer Vertikalbelastung unter Ansatz der Lastexzentrizitäten von $e_0 = 0,25h$ und $e_0 = 0,50h$ belegt:

Abbildung 50: Ergebnisse für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0,25h$; $A_s=4d28$; $l=2,0m$

G _k = 325kN; Q _k = 50kN; e ₀ = 0,25h; A _s = 4d28; l = 2,0m							
Imperfektion [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung A _{s,erf} [cm ²]
	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	
10 (DIN 1045-1)	1,04	62,30	102,60	1,01	71,30	128,30	4,52
2,0 (l ₀ /2000)	1,10	57,30	88,30	1,06	67,00	116,10	
0	1,12	56,10	84,80	1,07	65,90	113,10	

Abbildung 51: relTra für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0,25h$; $A_s=4d28$; $l=2,0m$

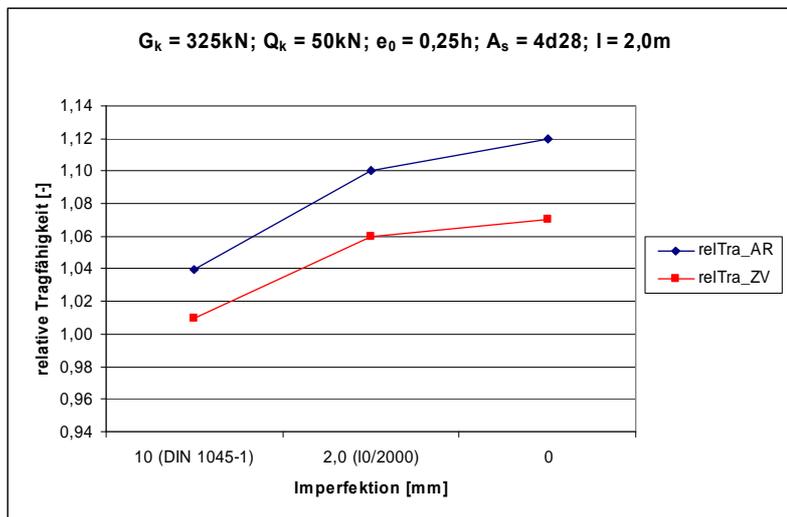
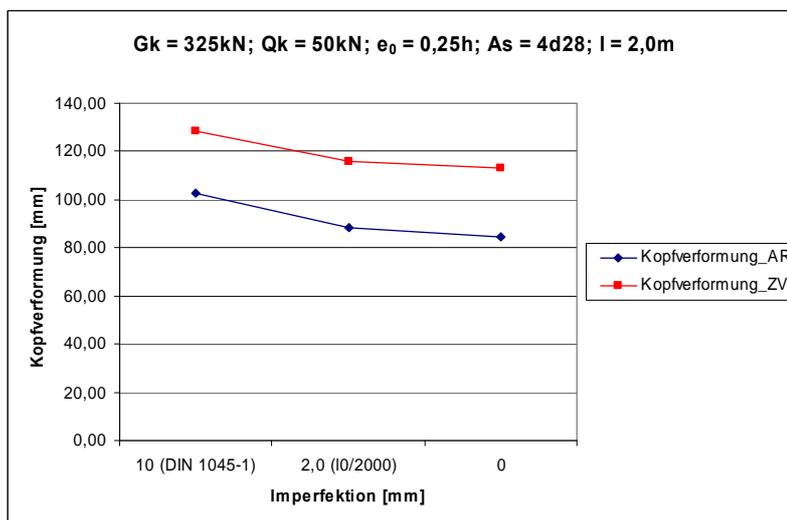


Abbildung 52: Kopfverformung für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0,25h$; $A_s=4d28$; $l=2,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Abbildung 53: Ergebnisse für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0,50h$; $A_s=12d20$; $l=2,0m$

G _k = 325kN; Q _k = 50kN; e ₀ = 0,50h; A _s = 12d20; l = 2,0m							
Imperfektion [mm]	Allgemeines Rechenverfahren			Zonenverfahren			Kaltbemessung A _{s,erf} [cm ²]
	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	
10 (DIN 1045-1)	1,06	88,30	101,70	1,01	100,50	136,70	10,7
2,0 (l ₀ /2000)	1,12	83,10	86,90	1,07	94,80	120,60	
0	1,13	81,80	83,20	1,08	93,50	116,90	

Abbildung 54: relTra für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0,50h$; $A_s=12d20$; $l=2,0m$

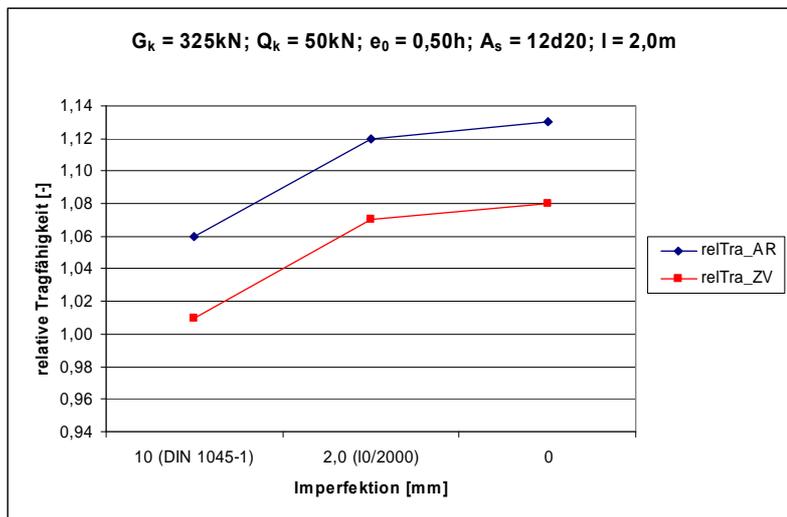
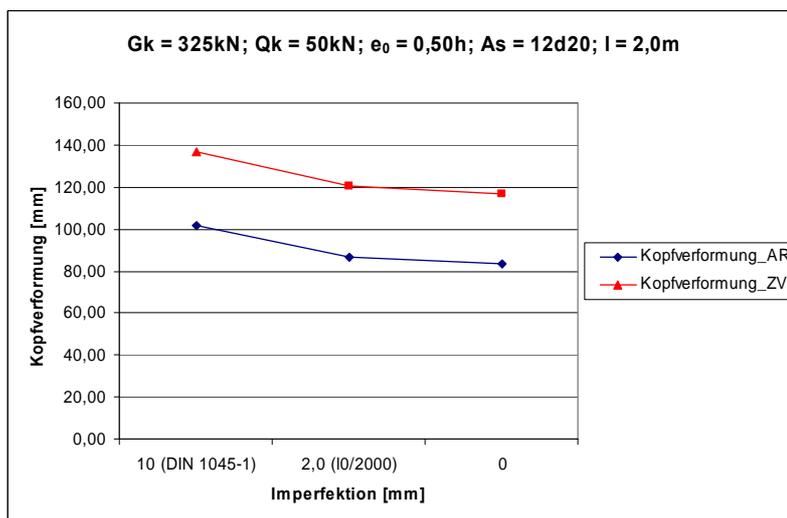


Abbildung 55: Kopfverformung für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0,50h$; $A_s=12d20$; $l=2,0m$



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

3.2 Dreiseitig beflamnte Stützen

Wie unter Punkt 2.2.4 beschrieben wird im Rahmen der Parameterstudie bei Anwendung des Zonenverfahrens die bei asymmetrisch beflamnten Stützen auftretende Krümmung durch eine Vorverformung abgebildet. Gemäß den unter Punkt 3.1 gewonnenen Ergebnissen wirkt sich eine Vorverformung günstig auf die Anwendungssicherheit des Zonenverfahrens aus. Daher wird nachfolgend anhand derjenigen Stützenvariation, die unter vierseitiger Beflammung die „unsichersten“ Ergebnisse im Vergleich zum allgemeinen Verfahren geliefert hat, die Anwendungssicherheit des vereinfachten Verfahrens unter dreiseitiger Beflammung überprüft. Bei dieser Stützenvariante beträgt die anzusetzende Vorverformung infolge des Temperaturgradienten, die in die ungünstigste Richtung der Hauptbiegung angesetzt wird, 34mm.

Abbildung 56: Ergebnisse für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d20$; $l=2,0m$; dreiseitig

G _k = 325kN; Q _k = 50kN; e ₀ = 0h; A _s = 4d20; l = 2,0m; dreiseitig beflammt							
	Allgemeines Rechenverfahren			Vereinfachtes Rechenverfahren			Kaltbemessung
Imperfektion [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	relative Tragfähigkeit [-]	Fußmoment [kNm]	Kopfverformung [mm]	A _{s,erf} [cm ²]
10 (DIN 1045-1)	3,08	3,47	9,90	1,84	30,50	86,90	4,52
0	4,52	4,58	13,00	2,04	26,20	74,60	

Abbildung 57: relTra für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d20$; $l=2,0m$; dreiseitig

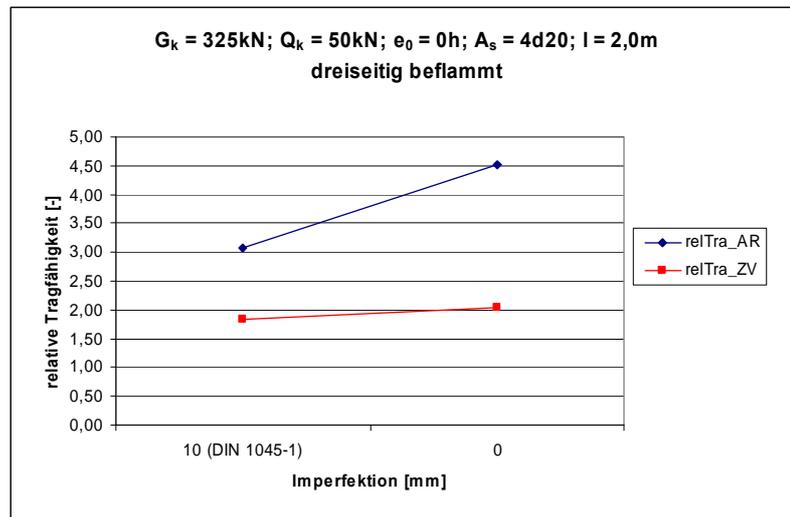
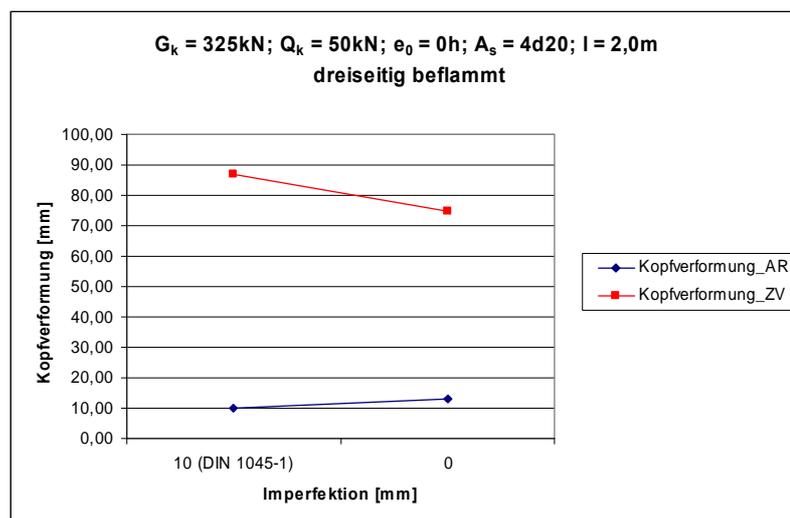


Abbildung 58: Kopfverformung für $G_k=325kN$; $Q_k=50kN$; $e_0=0h$, $A_s=4d20$; $l=2,0m$; dreiseitig



Sämtliche Rechte, auch urheberrechtlicher Art, bleiben vorbehalten

Bei dieser Stützenvariation ist die infolge des Temperaturunterschiedes anzusetzende Vorverformung von 34mm ausreichend, um die Anwendungssicherheit der Zonenmethode zu gewährleisten. Auf den Ansatz der „kalten“ Imperfektion kann in diesem Fall sogar verzichtet werden. Dieses Resultat bestätigt das im Rahmen der Parameterstudie unter Ansatz einer symmetrischen Beflammung gewonnene Ergebnis, dass unter Ansatz einer ausreichenden Vorverformung bzw. Lastausmitte das Zonenverfahren im Vergleich zum allgemeinen Verfahren auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse liefert.

4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde mittels Durchführung einer Parameterstudie die Zonenmethode dem allgemeinen Rechenverfahren nach DIN (V) EN(V) 1992-1-2 [1; 5] hinsichtlich der brandschutztechnischen Bemessung von Stützen gegenübergestellt. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Anwendungskriterien für die Zonenmethode zu erarbeiten, falls sich im Zuge der Parameterstudie zeigen sollte, dass dieses Verfahren gegenüber dem allgemeinen Verfahren unter gewissen Randbedingungen auf der unsicheren Seite liegende Ergebnisse liefert.

Parametrisiert wurde hierfür eine Kragstütze mit den Querschnittsabmessungen 30 x 30cm, der Betongüte C30/37 und einem Achsabstand der Längsbewehrung von $u = 2,0\text{cm} + 1,0\text{cm} + \frac{\varnothing_{\text{längs}}}{2}$ hinsichtlich der Belastung, der Stützenschlankheit und der Beflammungsart (vierseitig bzw. dreiseitig) für die Feuerwiderstandsklasse R 90.

Die Heißbemessung wurde bei beiden Verfahren unter Verwendung des Statikprogramms SOFISTIK (Version 11.07-25, Modul AQUA, SOFIMSHA, SOFILOAD und STAR2) durchgeführt, da dieses Programm eine differenzierte Materialdefinition in Abhängigkeit der Temperaturverteilung innerhalb des Stützenquerschnitts ermöglicht. Als Vergleichsbasis zwischen der Zonenmethode und dem allgemeinen Rechenverfahren wurde der relative Tragfaktor herangezogen. Mittels SOFISTIK wurden hierfür die inneren Schnittgrößen N_i und M_i im selben Verhältnis wie die äußeren Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung ermittelt.

Die brandschutztechnischen Bemessungen von vierseitig beflamnten Stützen unter Berücksichtigung der thermischen Dehnungen zeigten, dass das Vorhandensein einer gewissen Lastausmitte zwingend erforderlich ist, um die Anwendungssicherheit der Zonenmethode zu gewährleisten. Eine ausreichende Vorverformung bzw. Lastexzentrizität bewirkte eine deutlich stärkere Stützenverformung bei Anwendung des vereinfachten Rechenverfahrens als bei Verwendung des allgemeinen Rechenverfahrens, wodurch die höhere Tragfähigkeit des reduzierten Stützenquerschnitts gegenüber dem in Temperaturbereiche unterteilten Querschnitt des allgemeinen Verfahrens kompensiert wurde.

Eine zu geringe Ausmitte führte vor allem bei Stützen mit geringen Schlankheiten und niedrigen äußeren Lasten im Vergleich zum allgemeinen Verfahren zu unsicheren Ergebnissen, da bei diesen Randbedingungen keine ausreichenden Verformungen nach Theorie II. Ordnung hervorgerufen wurden.

Für die im Zuge der Parameterstudie untersuchten, vierseitig beflamnten Stützen konnte die Anwendungssicherheit des Zonenverfahrens gewährleistet werden, wenn eine Mindest – Lastexzentrizität von $e_0 = h/12$ angesetzt wurde, falls die als lineare Vorverformung aufzubringende „kalte“ Imperfektion e_a nach DIN 1045-1 [9] (bei zentrisch belasteten Stützen) bzw. die vorhandene Lastexzentrizität e_0 (bei geringen Lastausmitten) den Wert dieser vorgeschriebenen Mindest - Lastexzentrizität unterschritten hat (siehe auch Seite 34 und 35).

Der Wert der auf die Querschnittsabmessung bezogenen Lastausmitte von $h/12$ wurde im Rahmen der Stützenparametrisierung für vierseitig beflamnte Kragstützen mit den oben genannten Randbedingungen ermittelt und verifiziert. Hinsichtlich der eventuellen Anpassung dieses Wertes an verschiedene Parameter (wie z.B. Querschnittsabmessungen, Feuerwiderstandsdauer, Betonfestigkeit, usw.) besteht jedoch sicherlich noch Forschungsbedarf. Dennoch zeigen die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens deutlich, dass die Anwendungssicherheit des Zonenverfahrens unter Ansatz einer ausreichenden Vorverformung bzw. Lastexzentrizität gewährleistet werden kann.

Dieses Aussage konnte auch durch die brandschutztechnische Bemessung einer dreiseitig beflamnten Stütze bestätigt werden, da infolge der bei asymmetrischer Beflammung entstehenden Krümmung bei Anwendung der Zonenmethode ausreichend große Vorverformungen aufzubringen waren (siehe 2.2.4) und das vereinfachte Verfahren somit bei der untersuchten Stützenvariation, selbst unter Vernachlässigung der Imperfektion, auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse geliefert hat.

5 Literatur

- [1] DIN V ENV 1992-1-2: Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Eurocode 2, November 1995, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [2] DIN-Fachbericht 92: Nationales Anwendungsdokument (NAD), Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1992-1-2: 1997-05, 2000, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [3] Muster Liste der Technischen Baubestimmungen – Fassung September 2007, Deutsches Institut für Bautechnik
- [4] Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1992-1-2 in Verbindung mit DIN 1045-1, 2002, Deutsches Institut für Bautechnik
- [5] DIN EN 1992-1-2: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Oktober 2006, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [6] Müller, A. und Giese, Y.: Brandschutztechnische Bemessung von Stahlbetonstützen, 2008, Seminarreihe der Bundesvereinigung der Prüferingenieure für Bautechnik e.V.
- [7] Cyllok, M. und Achenbach, M.: Vereinfachte Bemessung brandbeanspruchter Stahlbetontragstützen in Anlehnung an EC 2, Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 7
- [8] DIN 1055-100: Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, Grundlagen der Tragwerksplanung, März 2001, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [9] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion, August 2008, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [10] Hosser, D. und Richter, E.: Sonderdruck aus Betonkalender, Konstruktiver Brandschutz im Übergang von DIN 4102 zu den Eurocodes, Ernst & Sohn, 2009
- [11] Upmeyer, J. und Schaumann, P.: Zum Feuerwiderstand von Stahlbetonstützen, Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 7