

# Tragwerksbemessung für den Brandfall bei Verbundtragwerken

**T 3089**

T 3089

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen 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 3-8167-6944-6

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](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.IRBbuch.de](http://www.IRBbuch.de)

Universität Hannover - Institut für Stahlbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann  
Appelstraße 9a ♦ 30167 Hannover  
☎ (0511) 762-3781 FAX (0511) 762-2991  
www.stahlbau.uni-hannover.de



# Forschungsbericht

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben  
**ZP 52-5- 17.17-1124/04**

**„Tragwerksbemessung für den Brandfall bei Verbundtragwerken“**

**Forschende Stelle:** Institut für Stahlbau  
Universität Hannover  
Appelstraße 9A  
30167 Hannover

**Leitung:** Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

**Bearbeitung:** Dipl.-Ing. Florian Kettner  
Dr.-Ing. Alexander Heise  
Dr.-Ing. Sascha Hothan

**Förderer:** Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30  
10829 Berlin

**Berichtsumfang:** 63 Seiten

**Datum:** Fassung vom 22. August 2005



## Vorwort

Während der Weiterentwicklung von Eurocode 4-1-2 für die Bemessung von Stahlverbundbauteilen im Brandfall von der ENV- zur EN-Fassung haben sich Änderungen ergeben. Diese betreffen sowohl einige Bemessungstabellen, vereinfachte Berechnungsmethoden als auch die allgemeinen Werkstoffdefinitionen von Stahl und Beton. Es ist sicher zu stellen, dass das bestehende Sicherheitsniveau auch mit den eingegangenen Änderungen aufrechterhalten bleibt.

Im Einzelnen sind die Bemessungstabellen für Verbundstützen zum Teil erweitert und zum Teil an ein neues Bemessungsverfahren im Kaltfall (vgl. Eurocode 4-1-1) angepasst worden. Für ungeschützte Verbunddecken ist ein neues vereinfachtes Bemessungsverfahren aufgenommen worden, was insbesondere die Berücksichtigung einer Resttragfähigkeit des Profilbleches erlaubt. In Abstimmung mit Eurocode 3-1-2 ergibt sich für ungeschützte Verbundträger eine genauere Erwärmungsberechnung der Stahlteile. Die thermischen und mechanischen Werkstoffkennwerte von Beton haben sich geändert. Dies betrifft insbesondere die Wärmeleitfähigkeit und die Spannungs-Dehnungsbeziehung unter erhöhten Temperaturen. Weiterhin ist in der EN-Fassung ein anderer Emissionsbeiwert an der Oberfläche von Verbundbauteilen zu berücksichtigen.

Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) beauftragte das Institut für Stahlbau der Universität Hannover mit Datum vom 05.05.2004 das Forschungsvorhaben „Tragwerksbemessung für den Brandfall bei Verbundtragwerken“ ZP 52-5- 17.17-1124/04 durchzuführen.

In dem vorliegenden Forschungsbericht werden die Änderungen zwischen den beiden Normenversionen untersucht und hinsichtlich des bestehenden Sicherheitsniveaus beurteilt.

Die Autoren danken dem Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) für die finanzielle Unterstützung und die fruchtbare Zusammenarbeit.

Die Autoren danken ferner für die Anregung und Unterstützung durch die Mitglieder des Normenausschusses NABau 00.32.00 „Konstruktiver Baulicher Brandschutz“ und insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Wathling als Mitglied der FK Bauaufsicht.

Hannover, September 2005

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Dr.-Ing. Sascha Hothan

Dipl.-Ing. Florian Kettner



## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	2
Inhaltsverzeichnis .....	3
Bezeichnungen .....	5
1 Einführung .....	9
1.1    Problemstellung .....	9
1.2    Zielsetzung und Vorgehensweise .....	9
2 Tabellarische Nachweisverfahren für Verbundstützen .....	10
2.1    Allgemeines .....	10
2.2    Änderungen der Bemessungstabelle für kammerbetonierte Verbundstützen .....	10
2.3    Erweiterung des Anwendungsbereiches für kammerbetonierte Verbundstützen ....	11
2.4    Anpassung der Bemessungstabelle an das neue Kalt-Bemessungsverfahren der EN 1994-1-1 .....	12
2.5    Beurteilung der Änderungen .....	14
3 Bestimmung der Grenztragfähigkeit von Verbunddecken im Brandfall .....	15
3.1    Zielsetzung .....	15
3.2    Allgemeines .....	15
3.3    Beschreibung und Gegenüberstellung der Verfahren .....	15
3.3.1    Sicherheitskonzept .....	15
3.3.2    Werkstoffe .....	16
3.3.3    Berechnungsverfahren im Brandfall nach Eurocode 4 .....	18
3.3.4    Berechnungsverfahren im Brandfall nach Zulassungen .....	21
3.4    Nachweis der Längsschubtragfähigkeit im Brandfall .....	22
3.5    Berechnungsergebnisse und Vergleich .....	23
3.6    Zusammenfassung und Empfehlungen .....	25
4 Erwärmung von unbedeckten Verbundträgern .....	27
4.1    Grundlagen der Erwärmungsberechnung nach Eurocode 4-1-2 .....	27
4.2    Erwärmungsberechnungen an einem Beispiel .....	30
4.3    Beurteilung der veränderten Erwärmungsberechnung .....	31
5 Werkstoffeigenschaften von Stahl und Beton .....	32
5.1    Allgemeines .....	32
5.2    Thermischen Materialparameter von Normalbeton .....	32



5.2.1	Allgemeines .....	32
5.2.2	Änderungen zwischen ENV- und EN-Version .....	32
5.2.3	Erarbeiteter Regelvorschlag .....	34
5.2.4	Ergebnis für den Regelvorschlag der Wärmeleitfähigkeit von Beton .....	36
5.3	Mechanische Materialparameter von Normalbeton .....	37
5.4	Thermische Übergangsbedingung für den Verbundbau .....	39
5.5	Auswirkungen der geänderten Materialparameter von Stahl und Beton .....	39
5.5.1	Allgemeine Berechnungsgrundlagen .....	39
5.5.2	Berechnungsergebnisse .....	40
5.6	Folgerungen aus den Vergleichsrechnungen .....	42
6	Zusammenfassung .....	43
7	Literatur .....	45
Anhang A	Vergleich der Kalt-Traglasten für zentrisch gedrückte Verbundstützen nach Berechnung über Knickspannungslinien oder mit Vorverformungen .....	48
Anhang B	Vergleichsberechnungen an Verbundbauteilen mit Werkstoffkennwerten nach ENV- und EN-Fassung von Eurocode 4-1-2 .....	50
B.1	Kammerbetonierte Verbundstütze .....	50
B.2	Vollständig einbetonierte Verbundstütze .....	53
B.3	Verbundstütze als betongefülltes Hohlprofil .....	56
B.4	Kammerbetonierte Verbundträger .....	59
Anhang C	Auswertungstabellen für die Berechnung von Verbunddecken im Brandfall nach EN 1994-1-2, Anhang D und nach Zulassung .....	61
B.1	Auswertung der positiven Biegemomententragfähigkeit .....	62
B.2	Auswertung der negativen Biegemomententragfähigkeit .....	63



## Bezeichnungen

### Abkürzungen

BSt	Betonstahl
CEN	Europäisches Komitee für Normung (Comité Européen de Normalisation)
C	Beton
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBA	Eisenbahn – Bundesamt
EC	Eurocode
ENV	Europäische Vornorm
EN	Europäische Norm
ETK	Einheits – Temperaturzeitkurve
FE	Finite – Elemente
NAD	Nationales Anwendungsdokument
prEN	Vorentwurf der Europäischen Norm (pr = preliminary)
S	Baustahl
St	Betonstahl

### Lateinische Bezeichnungen

a	Temperaturleitfähigkeit
A	Querschnittsfläche
$A_{s1}$	Querschnitt der unteren Bewehrung
$A_{s2}$	Querschnitt der oberen Bewehrung
A/V	Profilmfaktor
b	Querschnittsabmessung
$b_{eff}$	mittragende Breite
c	spezifische Wärmekapazität
e	Exzentrizität
E	Eulerfall, Elastizitätsmodul
$E_{fi,d,t}$	Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchung im Brandfall zum Zeitpunkt t



$f$	Streckgrenze
$f_{a,y}$	Streckgrenze von Baustahl
$f_{ck,cyl}$	charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit von Beton; nach Eurocodes
$f_{ck,cube}$	charakteristischer Wert der Würfeldruckfestigkeit von Beton; nach Eurocodes
$F$	Einzellast
$h$	Querschnittsabmessung
$\dot{h}_{net}$	Bemessungswert des Netto-Wärmestroms
$I$	Trägheitsmoment
$k$	Reduktionsfaktor
$k_{shadow}$	Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt
$l$	Querschnittsabmessung
$L$	Systemlänge
$M^+$	positives Moment (Feldmoment)
$M^-$	negatives Moment (Stützmoment)
$M_{pl}$	plastische Momententragfähigkeit
$N$	Normalkraft
$q$	Streckenlast
R 30	oder R 60, ... ein Bauteil, das das Tragfähigkeitskriterium 30, 60 ... Minuten unter Norm-Brandbeanspruchung erfüllt
$R_{fi,d,t}$	Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Bauteils im Brandfall zum Zeitpunkt $t$
$t$	Zeit
$t_{fi}$	Branddauer
$t_{fi,d}$	Feuerwiderstandsdauer (Eigenschaft des Bauteils oder Tragwerks)
$t_{fi,requ}$	erforderliche Feuerwiderstandsdauer
$t_n$	Blechdicke von Stahlprofilblechen
$T$	Temperaturfeld
$u$	Feuchtigkeitsgehalt, Betondeckung der Bewehrung
$W$	Wärmequelle oder -senke
$x, y, z$	Koordinaten



### Griechische Bezeichnungen

$\alpha$	Wärmeübergang
$\alpha$	globaler Abminderungsfaktor für die Momententragfähigkeit im Brandfall nach der Zulassung für die Cofrastra-Verbunddecken
$\alpha_c$	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Langzeitbelastung von Beton
$\alpha_M$	Faktor zur Berücksichtigung der Rissbildung im Beton
$\beta$	Festigkeit
$\beta_{s,a}$	Streckgrenze von Baustahl
$\beta_R$	Rechenfestigkeit von Beton
$\beta_{WN,200\text{ mm}}$	Betonwürfeldruckfestigkeit bei 200 mm Kantenlänge, nach DIN 1045: 1988-07
$\beta_{WN,150\text{ mm}}$	Betonwürfeldruckfestigkeit bei 150 mm Kantenlänge, nach DIN 1045: 1988-07
$\gamma$	globaler Sicherheitsbeiwert
$\gamma_G$	Teilsicherheitsbeiwert für Eigenlasten
$\gamma_M$	Teilsicherheitsbeiwert für das Material
$\gamma_Q$	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten
$\varepsilon$	Emissivität, Dehnung
$\varepsilon_m$	Emissivität des Bauteils
$\varepsilon_f$	Emissivität der Flamme
$\varepsilon_{cu}$	Betonstauchung bei Erreichen der maximalen Betonspannung
$\varepsilon_{ce}$	maximale Betonstauchung
$\varnothing$	Durchmesser eines Bewehrungsstabes
$\eta$	Lastausnutzungsgrad
$\eta_0$	Lastausnutzungsgrad der Gebrauchslast
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\mu_d$	Reduktionsfaktor für die vollplastische Biegemomententragfähigkeit
$\sigma$	Spannung, Stefan-Boltzmann Konstante
$\theta$	Temperatur
$\rho$	spezifische Masse (Dichte)

**Indizes**

a	Baustahl
ab	dem Brand abgewandt
c	Beton, konvektiv
cyl	Zylinder
d	Bemessungswert
EN	die EN-Fassung des Eurocodes betreffend
ENV	die ENV-Fassung des Eurocodes betreffend
f	Flamme, den Flansch betreffend
fi	im Brandfall
fi,0	zu Beginn der Brandbeanspruchung ( $t = 0$ )
pl	plastisch, nach Plastizitätstheorie
Rd	Widerstandsgröße als Bemessungswert
res	resultierend
s	Betonstahl
t	zeitabhängig
$\theta$	temperaturabhängig
w	den Steg betreffend
W15cm	Würfel mit 15 cm Seitenlänge
W20cm	Würfel mit 20 cm Seitenlänge
x, y, z	Koordinaten
zu	dem Brand zugewandt



## 1 Einführung

### 1.1 Problemstellung

Bei der Überführung der Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung von Stahlverbundbauteilen von der ENV- in die EN-Version sind neue Kennwerte für die Berechnung der Erwärmung definiert worden und einige Bemessungsverfahren verändert worden oder neu hinzugekommen. Im Einzelnen betrifft dies die thermischen und mechanischen Werkstoffkennwerte von Beton und den Wärmeübergang auf Bauteilen. Die Änderung der Bemessungsverfahren betrifft die Tabellen für kammerbetonierte Verbundstützen und betongefüllte Hohlprofile und die vereinfachten Rechenverfahren für ungeschützte Stahlverbundträger und Profilverbunddecken.

Insgesamt ist sicher zu stellen, dass das derzeitige Bemessungsniveau allgemein und die bestehenden Bemessungstabellen und vereinfachten Berechnungsverfahren speziell im Bemessungsergebnis nicht spürbar verändert werden. Dazu werden die geänderten Bemessungsverfahren auf Grundlage der ENV- und EN-Fassung analysiert und beurteilt. Die vorhandene Hintergrundliteratur zu der EN-Fassung wird für die Analyse herangezogen.

Die geänderten Materialkennwerte werden anhand signifikanter Beispiele zwischen den bestehenden Regelungen und denen nach EN-Fassung verglichen und bewertet.

### 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der Eurocode 4-1-2 ermöglicht den Nachweis von Verbundbauteilen auf drei verschiedenen Ebenen:

- Level 1: Tabellenverfahren
- Level 2: Vereinfachte Bemessungsverfahren
- Level 3: Allgemeine Berechnungsverfahren

Dabei erfolgt eine Bemessung auf Level 1 durch eine Klassifizierung über Mindestquerschnittsabmessungen und eine zulässige Lastausnutzung. Ein Nachweis auf Level 2 ist durch einfache Handrechnung möglich, während eine Level 3-Bemessung den Einsatz von computergestützten Verfahren mit einer genauen Abbildung der thermischen und mechanischen Werkstoffparameter erfordert.

Die durch die Fortschreibung entstandenen Änderungen werden anhand der einzelnen Nachweisebenen gegliedert und analysiert, d.h. im Abschnitt 2 werden die Änderungen im Bereich der Verbundstützentabellen erläutert. Abschnitt 3 und 4 analysieren die Änderungen in den vereinfachten Berechnungsverfahren für ungeschützte Profilverbunddecken und Stahlverbundträger. In Abschnitt 5 werden die geänderten Werkstoffkennwerte von Stahl und Beton beschrieben. Die Materialgesetze werden in das numerische Simulationsprogramm BoFire implementiert. Anschließend werden exemplarisch Verbundbauteile berechnet.

Abschließend werden die Änderungen in den einzelnen Nachweisebenen ganzheitlich betrachtet und das Sicherheitsniveau der EN-Version im Vergleich zur ENV-Fassung beurteilt.



## 2 Tabellarische Nachweisverfahren für Verbundstützen

### 2.1 Allgemeines

Der Eurocode 4-1-2 bietet auf dem Level 1 den Nachweis von Verbundstützen mit Hilfe von Tabellen an. Dabei wird eine gewünschte Feuerwiderstandsdauer bei vorgegebenen Lastausnutzungsgrad allein durch die Einhaltung von Mindestquerschnittsabmessungen erreicht.

Im Zuge der Fortschreibung der Eurocodes haben sich die Bemessungstabellen für kammerbetonierte Verbundstützen und für betongefüllte Hohlprofilen geändert. Im Folgenden werden die Hintergründe zu diesen Änderungen aufgezeigt und bewertet.

### 2.2 Änderungen der Bemessungstabelle für kammerbetonierte Verbundstützen

Die neue Bemessungstabelle für kammerbetonierte Verbundstützen in der EN-Version von Eurocode 4-1-2 unterscheidet sich deutlich von der ENV-Version. Die Tabelle wurde zum einen in ihrem Anwendungsbereich erweitert und zum anderen an das neue Bemessungsverfahren für Verbundstützen im Kaltfall angepasst. Tabelle 2-1 zeigt die Bemessungstabelle der ENV-Version und Tabelle 2-2 die EN-Version.

		Feuerwiderstandsklasse			
		R30	R60	R90	R120
1	für den Ausnutzungsfaktor $\eta_{n,t} = 0,3$				
1.1	min h und min b [mm]	160	260	300	300
1.2	min $u_s$ [mm]	40	40	50	60
1.3	min ( $e_w / e_f$ )	0,6	0,5	0,5	0,7
2	für den Ausnutzungsfaktor $\eta_{n,t} = 0,5$				
2.1	min h und min b [mm]	200	300	300	-
2.2	min $u_s$ [mm]	35	40	50	-
2.3	min ( $e_w / e_f$ )	0,6	0,6	0,7	-
3	für den Ausnutzungsfaktor $\eta_{n,t} = 0,7$				
3.1	min h und min b [mm]	250	300	-	-
3.2	min $u_s$ [mm]	30	40	-	-
3.3	min ( $e_w / e_f$ )	0,6	0,7	-	-

Tabelle 2-1 Alte Bemessungstabelle für kammerbetonierte Verbundstützen im Brandfall nach ENV 1994-1-2 [2.5]



		Feuerwiderstandsklasse			
		R30	R60	R90	R120
Mindestverhältnis von Steg- zu Flanschdicke $e_w/e_f$		0,5	0,5	0,5	0,5
1	Mindestquerschnittsabmessungen für den Lastausnutzungsfaktor $\eta_{fi,t} \leq 0,28$				
1.1	Mindestabmessungen $h$ und $b$ [mm]	160	200	300	400
1.2	Mindestachsabstand der Bewehrungsstäbe $u_s$ [mm]	-	50	50	70
1.3	Mindestbewehrungsgrad $A_s/(A_c+A_s)$ in %	-	4	3	4
2	Mindestquerschnittsabmessungen für den Lastausnutzungsfaktor $\eta_{fi,t} \leq 0,47$				
2.1	Mindestabmessungen $h$ und $b$ [mm]	160	300	400	-
2.2	Mindestachsabstand der Bewehrungsstäbe $u_s$ [mm]	-	50	70	-
2.3	Mindestbewehrungsgrad $A_s/(A_c+A_s)$ in %	-	4	4	-
3	Mindestquerschnittsabmessungen für den Lastausnutzungsfaktor $\eta_{fi,t} \leq 0,66$				
3.1	Mindestabmessungen $h$ und $b$ [mm]	160	400	-	-
3.2	Mindestachsabstand der Bewehrungsstäbe $u_s$ [mm]	40	70	-	-
3.3	Mindestbewehrungsgrad $A_s/(A_c+A_s)$ in %	1	4	-	-

**Tabelle 2-2** Neue Bemessungstabelle für kammerbetonierte Verbundstützen im Brandfall nach EN 1994-1-2 [2.10]

### 2.3 Erweiterung des Anwendungsbereiches für kammerbetonierte Verbundstützen

Grund für die Überarbeitung der Bemessungstabelle war, dass der Anwendungsbereich der alten bestehenden Tabelle stark eingeschränkt war und teilweise zu unwirtschaftlichen, teilweise zu unsicheren Ergebnissen führte. Für eine sinnvolle Anwendung der Bemessungstabellen haben sich folgende Mängel gezeigt:



- Mindestverhältniswerte der Blechdicken von Steg und Flansch  $\min(e_w/e_f)$  waren so hoch, ein Großteil der gängigen Walzprofile nicht anwendbar war.
- der Bewehrungsgrad der Stütze wird für die Berechnung der Tragfähigkeit nicht berücksichtigt.

Im Jahre 2001 wurde aus diesen Gründen die Bemessungstabelle von dem Verfasser überarbeitet. Die Überarbeitung wurde in einem Hintergrundbericht zum EC 4-1-2 [1.16] und in [1.15] dokumentiert, und die Tabelle hat direkt Eingang in die EN-Fassung gefunden. Wie bei einem Vergleich von Tabelle 2-1 und Tabelle 2-2 zu erkennen ist, besteht die wesentliche Änderung darin, dass die brandschutztechnische Klassifizierung maßgebend durch den Grad der Bewehrung beeinflusst werden kann. Der ehemalige Parameter des Blechdickenverhältnisses von Steg zu Flansch wird nur noch mit  $\min(e_w/e_f) = 0,5$  als grundlegende Anforderung an alle Profile gestellt. Diese Änderungen machen es möglich, nahezu alle gängigen Walzprofile mit der Tabelle zu klassifizieren. Die Werte der neuen Bemessungstabelle wurden mit dem numerischen Simulationsprogramm BoFire aufgestellt. Anschließend wurden die Tabellenwerte mit dem vereinfachten Berechnungsverfahren FRESH kontrolliert, welches auf dem vereinfachten Bemessungsverfahren der ENV 1994-1-2 [2.5] beruht.

#### 2.4 Anpassung der Bemessungstabelle an das neue Kalt-Bemessungsverfahren der EN 1994-1-1

Nach dem alten Verfahren der ENV 1994-1-1 [2.4] wurden Imperfektionen an den Stützen durch eine Auswertung der Europäischen Knickspannungslinien berücksichtigt.

Das neue Verfahren der EN-Fassung [2.9] geht auf Untersuchungen von Lindner und Bergmann zurück [1.11]. Die Berücksichtigung von Imperfektionen kann jetzt durch den Ansatz einer Ersatzimperfektion und einer Schnittgrößenberechnung nach Theorie II. Ordnung erfolgen.

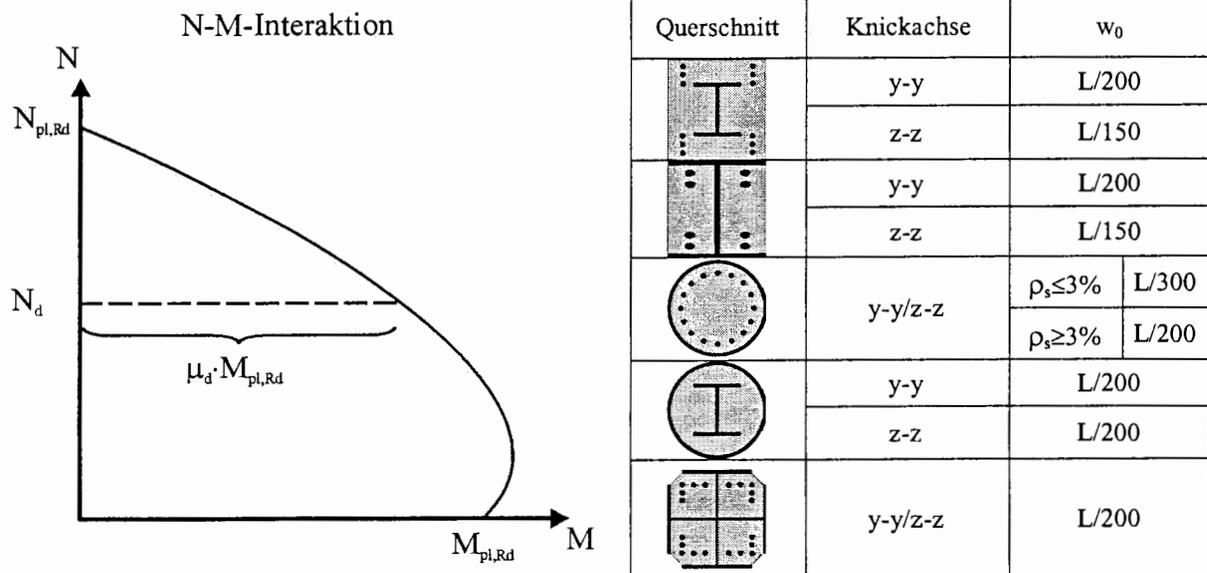


Abbildung 2-1 Interaktionsbeziehung und Ersatzimperfektionen für das neue Nachweisverfahren der EN 1994-1-1



Nach der neuen Berechnungsmethode erfolgt der Nachweis nach Gleichung (2.1) direkt gegen die vollplastischen Grenzschnittgrößen der Interaktionsbeziehung (vgl. Abbildung 2-1).

$$M_{Ed} \leq \alpha_M \cdot \mu_d \cdot M_{pl,Rd} \quad \text{mit } \alpha_M = 0,9 \quad (2.1)$$

mit

$M_{Ed}$	einwirkende Biegemoment nach Theorie II. Ordnung
$\alpha_M$	Faktor zur Berücksichtigung der Rissbildung im Beton
$\mu_d$	Reduktionsfaktor für die vollplastische Biegemomenten Tragfähigkeit, der sich aus der Interaktionsbeziehung ergibt

Die Schnittgrößen sind mit einer Biegesteifigkeit nach Gleichung (2.2) unter Berücksichtigung einer Ersatzimperfektion entsprechend Abbildung 2-1 zu berechnen.

$$(EI)_e = 0,9 \cdot (E_a I_a + 0,5 \cdot E_{cm} I_c + E_s I_s) \quad (2.2)$$

Die in EN 1994-1-1, Tabelle 6.7.3.7 [2.9] angegebenen Ersatzimperfektionen (vgl. Abbildung 2-1) wurden von Lindner und Bergmann direkt aus den vorhandenen europäischen Knickspannungslinien abgeleitet [1.6] [1.12].

In einer umfangreichen Parameterstudie wurden in [1.6] und [1.12] berechnete Traglasten aus Knickspannungslinien und mit Vorverformung gegenübergestellt. Auszüge aus [1.6] für Querschnitte der Knickspannungslinie a und aus [1.12] für Querschnitte der Knickspannungslinien b und c sind im Anhang abgebildet. In den Abbildungen A-1 für KSL a und A-2 für KSL b und c sind Abweichungen der beiden Berechnungsverfahren für unterschiedliche Schlankheitsgrade aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass das neue Rechenverfahren zum Teil höhere Traglasten ergibt, zum Teil aber auch deutlich konservativere Lösungen liefert.

Alle Vergleichsrechnungen haben gezeigt, dass die alten Traglasten um weniger als 5 % überschritten werden. In Abstimmung mit dem Project Team von Eurocode 4-1-2 wurden die Bemessungstabelle 4.6 für kammerbetonierte I-Profile und die Tabelle 4.7 für betongefüllte Hohlprofile so an die erhöhten Kaltrtraglasten angepasst, indem der zulässige Lastausnutzungsgrad für den Brandfall  $\eta_{fi}$  um 5 % verringert wurde. Damit ergab sich der neue Lastausnutzungsgrad nach Gleichung (2.3).

$$\eta_{fi,EN} = 0,95 \cdot \eta_{fi,ENV} \quad (2.3)$$

Tabelle 2-3 zeigt die neuen und alten Grenzwerte für die Lastausnutzung von brandbeanspruchten Verbundstützen.



$\eta_{fi,ENV}$	$\eta_{fi,EN}$
0,3	$0,95 \cdot 0,3 = 0,285 \approx \mathbf{0,28}$
0,5	$0,95 \cdot 0,5 = 0,475 \approx \mathbf{0,47}$
0,7	$0,95 \cdot 0,7 = 0,665 \approx \mathbf{0,66}$

**Tabelle 2-3 Vergleich der alten und neuen zulässigen Lastausnutzungsgrade für den tabellarischen Brandschutznachweis von Verbundstützen**

## 2.5 Beurteilung der Änderungen

Während der Überführung von Eurocode 4-1-2 in die EN-Fassung wurde die Bemessungstabelle für kammerbetonierte Verbundstützen überarbeitet. Weiterhin wurde der zulässige Lastausnutzungsgrad sowohl für die kammerbetonierten Verbundstützen als auch für betongefüllte Hohlprofile an das neue Kaltbemessungsverfahren für Verbundstützen angepasst.

Die obigen Ausführungen haben die Änderungen identifiziert und die wissenschaftlichen Hintergrunduntersuchungen für die vorgenommenen Änderungen aufgezeigt. Die Änderungen können als wissenschaftlich abgesichert und das Sicherheitsniveau im Vergleich zur ENV-Fassung als eingehalten betrachtet werden.



## 3 Bestimmung der Grenztragfähigkeit von Verbunddecken im Brandfall

### 3.1 Zielsetzung

Die in diesem Kapitel dokumentierten Untersuchungen dienen einem Vergleich der Bemessungsvorschriften für Verbunddecken im Brandfall nach den derzeit in Deutschland gültigen Regelungen und den Regelungen von DIN V ENV 1994-1-2 Eurocode 4: 1997-06 [2.5] unter Berücksichtigung des Neuentwurfs prEN 1994-1-2 Eurocode 4: 2004-05 [2.10]. Es soll überprüft werden, ob die Regelungen des Eurocode 4 für eine Anwendung auf nationaler Ebene geeignet sind. Zu diesem Zweck wird anhand von Vergleichsberechnungen untersucht, inwieweit die Bemessungsvorschriften zu gleichwertigen Ergebnissen führen.

### 3.2 Allgemeines

Für die Anwendung von Verbunddecken sind in Deutschland Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik erforderlich. Derzeit gültige Zulassungen existieren für die folgenden Verbunddeckensysteme: Cofrastra 40, Cofrastra 40 MP, Cofrastra 70 (Z-26.1-22) [1.1] sowie für Holorib 38/150, Holorib 51/150 (Z-26.1-4) [1.2] und Super-Holorib 51 (Z-26.1-45) [1.4] und für Hoesch Additiv (Z-26.1-44) [1.3]. In den Zulassungen ist sowohl die Kaltbemessung als auch die Bemessung für den Brandfall geregelt.

Die Bemessungsverfahren auf der Grundlage der genannten Zulassungen basieren unter anderem auf den Regelungen von DIN 1045: 1988-07, DIN 1055-3: 1971-06, DIN 4102-4: 1994-3 und DIN 18807-1 bis -3: 1987-06. Diesen Normen liegt ein globales Sicherheitskonzept zugrunde. Im Gegensatz dazu ist in den Eurocodes ein Teilsicherheitskonzept verankert, siehe Abschnitt 3.3.1. Ferner unterscheiden sich die Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045: 1988-07 und nach den Eurocodes. Den Normen liegen unterschiedliche Prüfverfahren zur Bestimmung der Betonfestigkeit zugrunde, siehe dazu Abschnitt 3.3.2.3. Die genannten Unterschiede sind im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse zu beachten. Da die Berechnungsergebnisse für die Tragfähigkeit im Brandfall von zahlreichen weiteren Einflussfaktoren bestimmt sind, lässt sich ein Vergleich erst an den Endergebnissen aus den verschiedenen Bemessungsverfahren ziehen.

### 3.3 Beschreibung und Gegenüberstellung der Verfahren

In der nachfolgenden Gegenüberstellung der Berechnungsverfahren im Brandfall werden neben dem Berechnungsverfahren nach Eurocode 4 die Zulassungen der Verbunddecken Cofrastra 40 und 70, Holorib, und Super-Holorib 51 berücksichtigt. Dabei werden die wesentlichen, für den Vergleich relevanten Punkte herausgestellt. Weitere Details können dem Normtext oder den Zulassungen entnommen werden.

#### 3.3.1 Sicherheitskonzept

Die Grundlage der Zulassungen bilden Normen mit einem globalen Sicherheitskonzept. Für den Kaltfall bei einer Bemessung auf Basis der Richtlinien für Verbundträger: 1981-03 [2.11] ist der globale Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 1,7$  zu verwenden. In der Zulassung der Super-Holorib-Verbunddecke ist alternativ eine Bemessung des Verbundquerschnitts im Kaltfall auf Basis der DIN 1045: 1988-07 möglich, wobei  $\gamma = 1,75$  anzusetzen ist. Im Brandfall wird in allen Fällen der globale Sicherheitsbeiwert auf  $\gamma = 1,0$  gesetzt.



In den Eurocodes wird generell zwischen Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_G$  und  $\gamma_Q$  für die Einwirkungen und  $\gamma_M$  für das Material unterschieden. Im Brandfall werden sämtliche Sicherheitsbeiwerte zu 1,0 gesetzt, siehe auch Gleichung (3.4).

### 3.3.2 Werkstoffe

#### 3.3.2.1 Baustahl

In den Zulassungen sind Stahlgüten für die Profilbleche entsprechend EN 10147 festgelegt.

	Cofrastra 40, 70	Holorib	Super-Holorib
Bezeichnung	FE E 350 G	FE E 320 G	FE E 350 G
Streckgrenze $\beta_{s,a}$	350 N/mm <sup>2</sup>	320 N/mm <sup>2</sup>	350 N/mm <sup>2</sup>

**Tabelle 3-1: Stahlgüten der Profilbleche nach den Zulassungen**

Die in den Zulassungen genannte Streckgrenze  $\beta_{s,a}$  entspricht der Streckgrenze  $f_{a,y}$  nach Eurocode 4 und wird in den Vergleichsberechnungen entsprechend verwendet.

#### 3.3.2.2 Betonstahl

Als Bewehrung für den Kaltfall kann nach den Zulassungen BSt 420 S sowie BSt 500 S oder BSt 500 M verwendet werden. Für die Cofrastra-Verbunddecke sind als Zusatzbewehrung im Brandfall BSt 500 S oder BSt 500 M zu verwenden. Für die Holorib-Verbunddecke darf als Zusatzbewehrung für den Brandfall ausschließlich BSt 500 S verwendet werden. Die in den Zulassungen verwendeten Stahlgüten und deren Bezeichnungen stimmen mit denen nach den Eurocodes überein.

#### 3.3.2.3 Beton

Die Zulassungen beziehen sich auf die Betonfestigkeitsklassen nach DIN 1045: 1988-07. Für eine Auslegung einer Verbunddecke für den Brandfall muss laut den Zulassungen mindestens ein Beton der Festigkeitsklasse B 25 verwendet werden. Als Ausgangswert für die Rechenfestigkeit wird die Nennfestigkeit  $\beta_{WN,200\text{ mm}}$  verwendet, die an Würfeln mit der Kantenlänge 200 mm bestimmt wurde. Diese berechnet sich aus der an Würfeln der Kantenlänge 150 mm bestimmten Nennfestigkeit  $\beta_{WN,150\text{ mm}}$  nach Gleichung (3.1):

$$\beta_{WN,200\text{ mm}} = 0,95 \cdot \beta_{WN,150\text{ mm}} \quad (3.1)$$

Dabei wird  $\beta_{WN,150\text{ mm}}$  in einer Prüfung nach DIN 1048-5 nach einer trockenen Lagerung vor der Prüfung bestimmt.

Die Betonfestigkeitsklasse B 25 entspricht näherungsweise der Betonfestigkeitsklasse C 20/25 nach den Eurocodes. Der erste Wert in der Eurocode-Bezeichnung ist dabei die an Zylindern mit dem Durchmesser 150 mm und der Höhe 300 mm gemessene charakteristische Druckfestigkeit  $f_{ck,cyl}$ . Bei dem zweiten Wert handelt es sich um die an Würfeln der Kantenlänge 150 mm bestimmte charakteristische Druckfestigkeit  $f_{ck,cube,150\text{ mm}}$ . Diese Würfeldruckfestigkeit wird im Gegensatz zu  $\beta_{WN,150\text{ mm}}$  an Proben bestimmt, die bis zu Prüfung unter Wasser gelagert wurden. Zwischen den beiden Werten besteht die folgende Umrechnungsbeziehung:



$$f_{ck,cube,150\text{ mm}} = 0,92 \cdot \beta_{WN,150\text{ mm}} \tag{3.2}$$

Für einen Vergleich der Nennfestigkeit  $\beta_{WN,200\text{ mm}}$  nach DIN 1045: 1988-07 und  $f_{ck,cube,150\text{ mm}}$  ergibt sich mit Gleichung (3.1):

$$\beta_{WN,200\text{ mm}} = 0,95/0,92 \cdot f_{ck,cube,150\text{ mm}} \approx 1,033 \cdot f_{ck,cube,150\text{ mm}} \tag{3.3}$$

Ein Beton, der nach den Eurocodes die Festigkeitsklasse C 20/25 besitzt, würde nach einer Prüfung entsprechend DIN 1045: 1988-07 eine Nennfestigkeit von 25,82 N/mm<sup>2</sup> aufweisen („B 25,82“). Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein Beton mit den gleichen Festigkeitseigenschaften nach DIN 1045: 1988-07 günstiger beurteilt wird, als nach den Eurocodes, was sich aus den unterschiedlichen Prüfbedingungen ergibt. Dies ist bei späteren Vergleichen zwischen den Bemessungsergebnissen nach den Zulassungen und nach Eurocode 4 zu beachten.

In Tabelle 3-2 sind die Rechenwerte für die Betondruckfestigkeit vergleichend gegenübergestellt. Die für die Bemessung zu verwendenden Werte sind fett gedruckt.

Zulassungen					Eurocode 4			
Festigkeitsklasse	$\beta_{WN}$	DIN 1045: 1988-07		Verb.-Ri.: 1981-03	Festigkeitsklasse	$f_{ck,cyl}$	$f_{ck,cube}$	$f_{cd,fi} = 0,8 \cdot f_{ck,cyl}$ ( $f_{ck} = 0,8 \cdot 0,85 \cdot f_{ck,cyl}$ )
		$\beta_{R,1045}$	$\beta_R = 0,95 \cdot \beta_{R,1045}$	$\beta_R = 0,6 \cdot \beta_{WN}$				
B 25	25	17,5	<b>16,625</b>	<b>15</b>	C 20/25	20	25	<b>16 (13,6)</b>
					C 25/30	25	30	20 (17)
B 35	35	23	<b>21,85</b>	<b>21</b>	C 30/37	30	37	<b>24 (20,4)</b>
B 45	45	27	<b>25,65</b>	<b>27</b>	C 35/45	35	45	<b>28 (23,8)</b>
					C 40/50	40	50	32 (27,5)
B 55	55	30	<b>28,5</b>	<b>33</b>	C 45/55	45	55	<b>36 (30,6)</b>
					C 50/60	50	60	40 (34)

**Tabelle 3-2: Vergleich der Rechenwerte für die Betondruckfestigkeit in N/mm<sup>2</sup>**

Die vergleichbaren Festigkeitsklassen entsprechend der Zulassungen und nach Eurocode 4 sind jeweils in einer Zeile dargestellt. Bei den Rechenwerten der Zulassungen wird zwischen DIN 1045: 1988-07 und der Richtlinie für Verbundträger: 1981-03 unterschieden. Der Faktor 0,95 zur Bestimmung der Rechenfestigkeit  $\beta_R$  nach DIN 1045 dient zur Berücksichtigung der Annahme eines rechteckigen Spannungsbereichs in der Biegedruckzone des Bauteils. Nach der Richtlinie für Verbundträger wird zur Berechnung der Rechenfestigkeit, ausgehend von der Nennfestigkeit  $\beta_{WN}$ , ein pauschaler Abminderungsfaktor von 0,6 verwendet. Dieser gilt sowohl für die Kalt- als auch für die Heißbemessung.



Die Rechenfestigkeit entsprechend Eurocode 4 wird anhand der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit  $f_{ck,cyl}$  festgelegt. Dabei ist zu unterscheiden, ob eine Kalt- oder eine Heißbemessung durchgeführt werden soll. Für eine Kaltbemessung ist ein Abminderungsfaktor  $\alpha_c = 0,85$  und ein weiterer Abminderungsfaktor 0,8 zur Berücksichtigung der Annahme eines rechteckigen Spannungsblocks in der Biegedruckzone des Bauteils zu berücksichtigen. Die sich ergebenden Festigkeitswerte  $f_{ck}$  ohne Berücksichtigung des Materialteilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_M$  für den Kaltfall sind in Tabelle 3-2 in Klammern dargestellt. Für den Brandfall wird zur Berechnung von  $f_{cd,fi}$  ausschließlich der Abminderungsfaktor 0,8 berücksichtigt, siehe dazu auch Abschnitt 3.3.3.

Ein Vergleich der Werte  $f_{cd,fi}$  mit dem Rechenwert der Betondruckfestigkeit  $\beta_R$  nach den Richtlinien für Verbundträger zeigt, dass für eine vergleichbare Betonfestigkeitsklasse nach den Eurocodes im Brandfall höhere Betondruckfestigkeiten angesetzt werden dürfen, als nach den Zulassungen. Dies wirkt den Unterschieden aus den verschiedenen Prüfbedingungen für die Bestimmung der Betondruckfestigkeit entgegen.

### 3.3.3 Berechnungsverfahren im Brandfall nach Eurocode 4

Das vereinfachte Berechnungsverfahren für Verbunddecken im Brandfall fußt auf den Untersuchungen von Booth, die in dessen Dissertation [1.8] veröffentlicht sind. In DIN V ENV 1994-1-2 Eurocode 4: 1997-06 [2.5] wurde im Abschnitt 4.3.1 ein Verfahren zur Überprüfung des Wärmedämm-Kriteriums und zur Berechnung der positiven Momententragfähigkeit aufgenommen. In prEN 1994-1-2 Eurocode 4: 2004-05 [2.10] in Abschnitt 4.3.2 mit Anhang D wurde ein Verfahren zur Berechnung der negativen Momententragfähigkeit ergänzt.

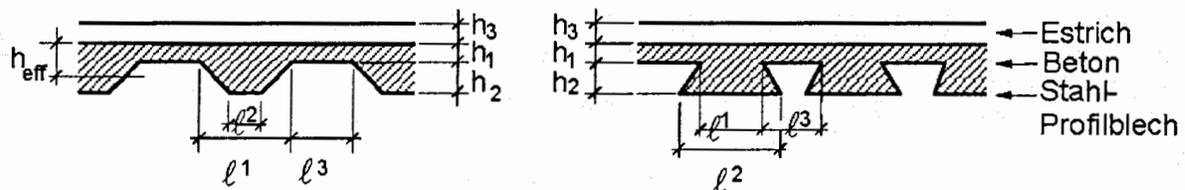
Die Berechnung der Grenztragfähigkeit erfolgt sowohl beim positiven als auch beim negativen Grenztragmoment pro Sicke des Verbundprofilblechs. Der Bemessungswert der Beanspruchbarkeit wird auf Grundlage der Plastizitätstheorie ermittelt. Dabei wird der Temperatureinfluss auf das Bauteil durch reduzierte Materialfestigkeiten berücksichtigt. Sämtliche Teilsicherheitsbeiwerte für die Werkstoffe werden für die Bemessung im Brandfall zu 1,0 gesetzt:

$$\gamma_{M,fi,c} = \gamma_{M,fi,a} = \gamma_{M,fi,s} = 1,0. \quad (3.4)$$

Somit werden für die Streckgrenze des Baustahls und Betonstahls charakteristische Werte  $f_{a,k}$  und  $f_{s,k}$  angesetzt. Bei der Berechnung von Decken ist nach Abschnitt 4.3.1.4(1) in [2.5] die Betondruckfestigkeit  $f_{c,k}$  vorab mit einem Faktor 0,85 abzumindern. Der Abminderungsfaktor dient laut Abschnitt 2.3(4) in [2.5] zur Berücksichtigung der Annahme eines rechteckigen Spannungsblocks in der Decke. Er ist somit für die Berechnung des positiven und negativen Grenztragmomentes anzuwenden. Diese Regelung steht im Widerspruch zu den Vorschriften für den Kaltfall in Abschnitt 7.6.1.2 des nationalen Anwendungsdokuments zu ENV 4-1-1 [2.15]. Dort ist zur Berücksichtigung des Spannungsblocks ein Abminderungsfaktor von 0,8 angegeben. Ein Abminderungsfaktor  $\alpha_c = 0,85$  zur Berücksichtigung des Verhältnisses der Dauerstandfestigkeit zu Kurzzeitfestigkeit des Betons ist im Kaltfall zusätzlich zu berücksichtigen, wird im Brandfall aber generell nicht angesetzt. Folgende Annahmen und Anwendungsvoraussetzungen sind gemäß [2.5] Abschnitt 4.3.1 und [2.10] Abschnitt 4.3.2 zu beachten:



- Die geometrischen Anwendungsgrenzen sind Tabelle 3-3 in Verbindung mit Abbildung 3-1 zu entnehmen. Der Tabelleninhalt weicht für hinterschnittene Profile bei den Grenzen von  $h_1$  und  $h_2$  sowie für Trapezprofile bei den Grenzen für  $h_1$  von den Angaben in prEN 1994-1-2 Eurocode 4: 2004-05 [2.10] ab und spiegelt den derzeitigen Diskussionsstand auf europäischer Ebene zur Einführung der Vornorm wider.
- Das Berechnungsverfahren gilt für die Bestimmung der Feuerwiderstandsklasse von einfeldrigen und durchlaufenden Verbunddecken mit bewehrten Stahlprofilblechen nach [2.5] Abschnitt 1.1(10) unter Normbrandbedingungen.
- Es werden nur direkt beflammete ungeschützte Stahlprofilbleche und Verbunddecken ohne Wärmedämmung zwischen Decke und Estrich betrachtet.
- Die möglichen Auswirkungen von Längsdehnungsbehinderungen auf die Feuerwiderstandsdauer bleiben unberücksichtigt.
- Das Tragfähigkeitskriterium „R“ gilt für Verbunddecken mit Stahlprofilblechen mit oder ohne zusätzliche Bewehrung für mindestens 30 Minuten als erfüllt, wenn die Decken den Anforderungen nach Eurocode 4 Teil 1-1 [2.4], [2.15] genügen.
- Für Verbunddecken wird angenommen, dass das Raumabschlusskriterium „E“ erfüllt ist.
- Um eine ausreichende Rotationsfähigkeit für durchlaufende Decken zu gewährleisten, sollten die Abschnitte 4.2.7.3(2) und (3) von Eurocode 2 Teil 1-2 [2.2], [2.13] erfüllt sein.



**Abbildung 3-1: Geometrieparameter: links Trapezprofil, rechts hinterschnittenes Profil**

hinterschnittene Profile	Trapezprofile
$77,0 \text{ mm} \leq l_1 \leq 135,0 \text{ mm}$	$80,0 \text{ mm} \leq l_1 \leq 155,0 \text{ mm}$
$110,0 \text{ mm} \leq l_2 \leq 150,0 \text{ mm}$	$32,0 \text{ mm} \leq l_2 \leq 132,0 \text{ mm}$
$38,5 \text{ mm} \leq l_3 \leq 97,5 \text{ mm}$	$40,0 \text{ mm} \leq l_3 \leq 115,0 \text{ mm}$
$50,0 \text{ mm} \leq h_1 \leq 130 \text{ mm}$	$50,0 \text{ mm} \leq h_1 \leq 125,0 \text{ mm}$
$30,0 \text{ mm} \leq h_2 \leq 70,0 \text{ mm}$	$50,0 \text{ mm} \leq h_2 \leq 100,0 \text{ mm}$

**Tabelle 3-3: Anwendungsbereich des Berechnungsverfahrens**

Anhand der Einstufung entsprechend Tabelle 3-4 zeigt sich, dass lediglich die Holorib-Verbunddecken mit dem Maß  $l_3$  geringfügig die Anwendungsgrenzen der Tabelle 3-3 unterschreiten. Die Werte außerhalb der Anwendungsgrenzen sind in Tabelle 3-4 unterstrichen dargestellt. Da es sich bei den Abweichungen von  $l_3$  zum erlaubten Anwendungsbereich ausschließlich um geringe Unterschreitungen handelt – diese beträgt maximal 2,5 mm –, könnte durch eine geringfügige Erweiterung des Anwendungsbereiches nach Tabelle 3-5 eine Über-



einstimmung mit den Anwendungsgrenzen erreicht werden. Bei der Festlegung von  $h_1$  wurden die für den Kaltfall vorgeschriebenen Mindestbetonüberdeckungen oberhalb der Profilbleche zugrunde gelegt, da diese von den entsprechend der angestrebten Feuerwiderstandsklasse minimal erforderlichen Deckendicken nach Tabelle 3-5 unterschritten werden.

Typ		Holorib	S-Holorib	Cofrastra 40	Cofrastra 70
Form <sup>1)</sup>		h	h	h	t
$l_1$ [mm]		114	114	103,5	143
$l_2$ [mm]		138	138	123,5	87
$l_3$ [mm]		<u>36</u>	<u>36</u>	46,5	40
$h_1$ [mm]	F 30	50	50	50	50
	F 60	50	50	50	57
	F 90	50	50	80	77
	F 120	69	69	100	107
	F 180	99	99		
$h_2$ [mm]		51	51	<u>40</u>	73

<sup>1)</sup> h: hinterschnitten; t: trapezförmig

**Tabelle 3-4: Geometrieparameter der untersuchten Verbunddeckensysteme**

Die in Tabelle 3-4 verwendeten Bezeichnungen für die Feuerwiderstandsklassen F 30 bis F 180 entsprechen den Bezeichnungen R 30 bis R 180 nach den Brandschutz-Eurocodes.

Bei strenger Auslegung der geometrischen Anwendungsvoraussetzungen dürften die Holorib-Verbunddeckensysteme nicht mit dem Verfahren nach Eurocode 4 nachgewiesen werden. Da es sich bei den Anwendungsgrenzen jedoch um den derzeitigen Diskussionsstand handelt und weitere Änderungen nicht endgültig ausgeschlossen werden können, sind die weiteren Untersuchungen nicht nur sinnvoll sondern auch notwendig im Hinblick auf eine mögliche Modifikation von Tabelle 3-3.

Der Berechnungsablauf gliedert sich in die Überprüfung des Wärmedämm-Kriteriums „I“ und die anschließende Berechnung von positiver und bei Durchlaufsystemen negativer Momenten tragfähigkeit. Durch die Erfüllung des Wärmedämm-Kriteriums wird nachgewiesen, dass während der angestrebten Feuerwiderstandsdauer eine mittlere Temperatur auf der brandabgewandten Seite (an der Oberkante der Decke) von 140°C und eine maximale Temperatur von 180°C nicht überschritten werden. Die Rippengeometrie und mögliche Abschattungseffekte werden dabei rechnerisch berücksichtigt. Die für die Berechnung der Tragfähigkeit im Brandfall erforderliche Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt wird mittels eines halbempirischen Berechnungsverfahrens bestimmt. Die Berechnung des Bauteilwiderstandes erfolgt dann nach der Plastizitätstheorie mit abgeminderten Materialfestigkeiten bzw. brandre-



duzierten Querschnitten. Für nähere Ausführungen wird hier auf die Norm und auf die Dissertation [1.8] verwiesen.

### 3.3.4 Berechnungsverfahren im Brandfall nach Zulassungen

Im Folgenden wird zusammenfassend auf die wesentlichen Merkmale und die Vorgehensweise beim Nachweis von Verbunddecken im Brandfall nach Zulassungen eingegangen. Für detaillierte Darstellungen wird auf die Zulassungen [1.1], [1.2] und [1.4] verwiesen. Auch die Nachweisverfahren der Zulassungen zielen auf eine ausreichende Wärmedämmung und die Berechnung der ausreichenden Tragfähigkeit im Brandfall.

Ein rechnerischer Nachweis des Wärmedämm-Kriteriums ist nicht vorgesehen. Der Nachweis der ausreichenden Wärmedämmung ergibt sich pauschal durch die Einhaltung von Mindestdeckendicken in Abhängigkeit von der angestrebten Feuerwiderstandsklasse. In Tabelle 3-5 sind die erforderlichen Minstdicken zusammengestellt.

Feuerwiderstands- klasse	Mindestdeckendicke in mm			
	Cofrastra 40	Cofrastra 70	Holorib	Super-Holorib 51
F 30	90	120	100	100
F 60	90	130	100	100
F 90	120	150	100	100
F 120	140	180	120	120
F 180			150	150

**Tabelle 3-5: Mindestdeckendicken im Brandfall nach den Zulassungen**

Wie auch beim Verfahren nach Eurocode 4, erfolgen eine Berechnung der plastischen Momententragfähigkeit und ein Nachweis gegen das Lastmoment. Dabei wird der globale Sicherheitsbeiwert im Brandfall auf  $\gamma = 1,0$  gesetzt. Die verschiedenen Arten der Verbundsicherung zwischen dem Stahlprofilblech und dem Beton ist für den Kalt- und den Heißfall in Tabelle 3-6 übersichtlich dargestellt.

Deckentyp	Flächenverbund	Endverankerung	Nachweis	
			Kaltfall	Heißfall
Cofrastra 40/70	ansetzbar	in der Zulassung nicht enthalten	Teilverbundtheorie	Teilverbundtheorie
Holorib	bei einachsiger gespannten Platten	notwendig	konst. Verlauf im anrechenbaren Scherkraftgebiet	konst. Verlauf im anrechenbaren Scherkraftgebiet
Super-Holorib 51	ansetzbar	möglich/notwendig	Teilverbundtheorie	Teilverbundtheorie

**Tabelle 3-6: Möglichkeiten der Verbundsicherung und des Nachweises nach den Zulassungen**

Bei allen zugelassenen Deckensystemen, mit Ausnahme der Holorib-Verbunddecke, darf generell ein Flächenverbund angesetzt werden. Bei der Holorib-Verbunddecke darf ein Flächenverbund lediglich bei einachsigen gespannten Platten angesetzt werden. Sie ist ausschließlich in Verbindung mit einer Endverankerung anzuwenden. Bei den Cofrastra-Verbunddecken und bei der Super-Holorib-Verbunddecke wird der Nachweis der Tragfähigkeit nach der Teilverbundtheorie (Anwendung des Teilverbunddiagramms) geführt. Dies gilt für den Kalt- und für den Heißfall. Im Heißfall wird ein entsprechend der Abminderung der Momenten Tragfähigkeit abgemindertes Teilverbunddiagramm verwendet. Bei der Holorib-Verbunddecke wird generell von einem konstanten Verlauf des Flächenverbundes im anrechenbaren Scherkraftgebiet ausgegangen.

Die Berechnung der plastischen Biegemomenten Tragfähigkeit  $M_{pl,fi}$  für eine angestrebte Feuerwiderstandsdauer erfolgt je nach Zulassung auf unterschiedliche Weise. Bei beiden Holorib-Deckensystemen erfolgt die Berechnung der positiven Momenten Tragfähigkeit  $M_{pl,fi}^+$  durch Abminderung der Materialfestigkeiten in Abhängigkeit von der angestrebten Feuerwiderstandsdauer und anschließender Berechnung nach Plastizitätstheorie. Die Berechnung der negativen Momenten Tragfähigkeit  $M_{pl,fi}^-$  erfolgt an einem brandreduzierten Betonquerschnitt bei Vernachlässigung des Stahlprofilblechs. Nach der Zulassung für die Cofrastra-Verbunddecken ist ausschließlich die Berechnung der positiven Momenten Tragfähigkeit vorgesehen. Es wird zunächst die plastische Momenten Tragfähigkeit zu Beginn der Beflammung  $M_{pl,fi,0}$  berechnet und dann pauschal mit einem Abminderungsfaktor  $\alpha$  in Abhängigkeit von der angestrebten Feuerwiderstandsdauer abgemindert, wobei die Berücksichtigung der Auflagersituation (Statisches System, Stützbewehrung) durch unterschiedliche Werte für den Abminderungsfaktor  $\alpha$  erfolgt. Hier wird implizit eine Lastumlagerung in die Auflagerbereiche bei Durchlaufsystemen durch eine geringere Abminderung des im Brandfall aufnehmbaren Feldmomentes mit eingerechnet. Um die Vergleichbarkeit mit den Berechnungsergebnissen aus den anderen Zulassungen und denen nach Eurocode 4 zu erreichen, wurde der Abminderungsfaktor für Einfeldsysteme unter Verwendung der entsprechenden Brandschutzbewehrung verwendet. Mit dem Faktor  $\alpha$  ist der Temperatureinfluss auf das Stahltrapezprofilblech, den Beton und die Brandschutzbewehrung abgedeckt. Der Anteil einer für den Kaltfall statisch erforderlichen Bewehrung an der Momenten Tragfähigkeit muss durch separate Abminderung berücksichtigt werden. Die unter 3.5 dokumentierten Vergleichsberechnungen wurden an Querschnitten ohne eine im Kaltfall statisch erforderliche Bewehrung durchgeführt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es sich bei beiden Nachweisverfahren - nach Eurocode 4 und nach den Zulassungen - um vereinfachte Berechnungsverfahren auf der Nachweisebene 2 in der Terminologie der Brandschutz-Eurocodes handelt.

**3.4 Nachweis der Längsschubtragfähigkeit im Brandfall**

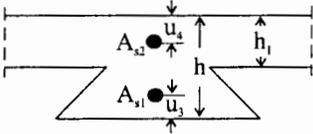
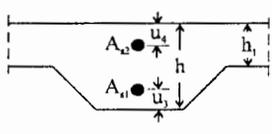
Neben dem Nachweis der Biegemomenten Tragfähigkeit ist grundsätzlich auch ein Nachweis der Schubtragfähigkeit für den Verbund zwischen Profilblech und Ortbetonplatte zu führen. Dies gilt auch für den Brandfall. Das neue Verfahren der EN-Version von Eurocode 4-1-2 ermöglicht insbesondere den Ansatz Resttragfähigkeit des Profilbleches bei der Biegemomenten Tragfähigkeit. Dies setzt aber voraus, dass die Zugkräfte im Blech im Gleichgewicht mit den Druckkräften im Beton stehen können. Dies ist nur bei ausreichender Schubtragfähigkeit möglich und erfordert deshalb einen solchen Nachweis. Während die Zulassungen



Nachweise wie im Abschnitt 3.3.4 beschrieben anbieten, werden im Eurocode 4-1-2 zu dem Aspekt der Längsschubtragfähigkeit keine Hinweise gegeben.

### 3.5 Berechnungsergebnisse und Vergleich

Die im Folgenden vorgestellten Resultate wurden anhand einer Vielzahl von Berechnungen an unterschiedlichen Querschnitten gewonnen. Dabei wurden jeweils baupraktisch relevante Querschnittsabmessungen verwendet, die die Zulassungen entsprechende Mindestabmessungen und Achsabstände der Brandschutzbewehrung für die Erreichung der verschiedenen Feuerwiderstandsdauern einhielten. Bei den Blechdicken wurden jeweils die nach den aktuellen Zulassungen geregelten und lieferbaren Werte verwendet. Gleiches gilt für die Stahlgüte der Profilbleche. In allen Berechnungen wurde ein Beton der der Festigkeitsklasse B 25 bzw. C 20/25 verwendet. Die jeweils verwendete Brandschutzbewehrung entspricht den in der Zulassung der Cofrastra-Verbunddecken [1.1] mit Typ B oder Typ D bezeichneten Bewehrungsmengen, da sich die entsprechenden  $\alpha$ -Faktoren auf diese Typen beziehen und somit eine Vergleichbarkeit mit den Berechnungsergebnissen der anderen Verbunddeckensysteme gegeben ist. In Tabelle 3-7 sind die in der Parameterstudie verwendeten Größen zusammengestellt.

Querschnitt					
Parameter		Holorib 51 / Super-Holorib 51	Cofrastra 40	Cofrastra 70	
$t_n$	[mm]	0,75; 0,88; 1,00; 1,25	0,75; 0,85; 0,88; 1,00	0,88; 1,00	
Beton		B 25 / C 20/25	B 25 / C 20/25	B 25 / C 20/25	
Betonstahl		BSt 500	BSt 500	BSt 500	
$A_{s1}$	[cm <sup>2</sup> /m]	5,24	5,13	6,18	
$A_{s2}$	[mm <sup>2</sup> ]	7,54	7,54	6,18	
$h$	[mm]	100; 120; 150	90; 120; 140	120; 130; 150; 180	
$h_1$	[mm]	49; 69; 99	50; 80; 100	47; 57; 77; 107	
$u_3$	[mm]	15; 25	45	45	
$u_4$	[mm]	20	20	20; 30	

**Tabelle 3-7: Untersuchte Parameter**

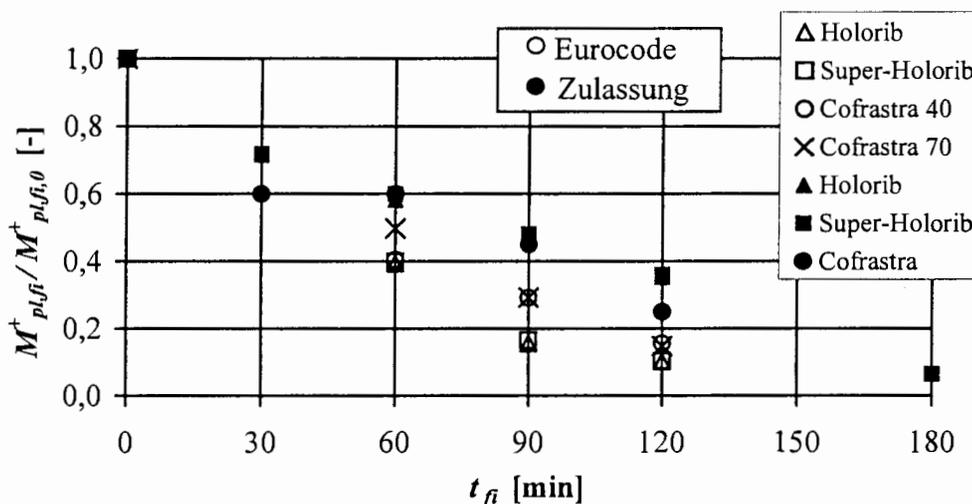
In Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 sind die Berechnungsergebnisse nach den Zulassungen und Nach Eurocode 4 zusammenfassend und vergleichend gegenübergestellt. Als Bezugsgröße wurde dabei die jeweilige plastische Momententragfähigkeit zu Beginn der Brandbeanspruchung  $M_{pl,\bar{n},0}$  gewählt. Verschieden hohe Ausgangswerte für die Rechenfestigkeit der



Baustoffe wirken sich auf dieser Vergleichsebene nicht aus. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um die Mittelwerte aus Ergebnissen die an gleichen Querschnitten in Bezug auf die Abmessungen, die Profilform und die Bewehrung, jedoch mit verschiedenen Blechdicken des Stahlprofils gewonnen wurden. Bei der Berechnung der negativen Momententragfähigkeit war eine Mittelung nicht erforderlich, da das Profilblech hier in beiden Berechnungsverfahren (Eurocode 4 oder Zulassungen) nicht angerechnet wird.

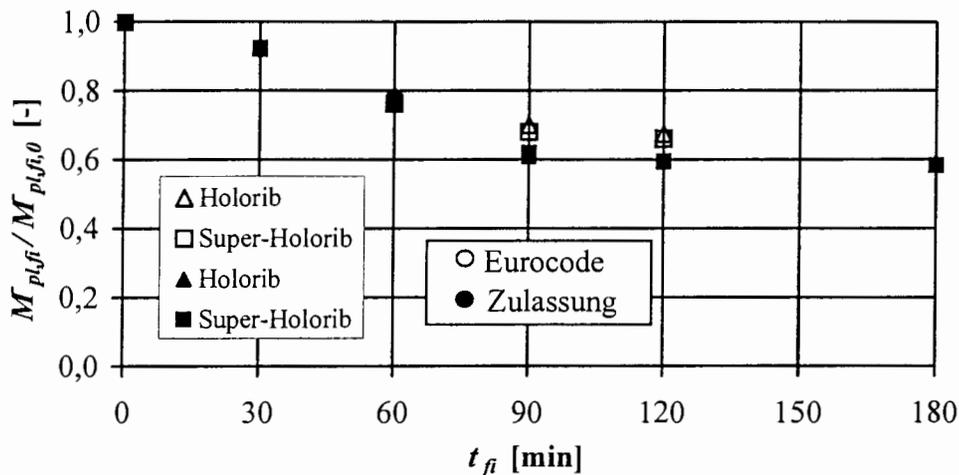
Abbildung 3-2 zeigt die auf den jeweiligen Ausgangswert bezogenen positiven Grenztragmomente in Abhängigkeit von der angestrebten Feuerwiderstandsklasse. Die Werte nach den Zulassungen sind mit ausgefüllten Symbolen dargestellt.

Nach Eurocode berechnete Werte für eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten sind in der Darstellung nicht enthalten, da bei einer Ausführung der Verbunddecke für den Kaltfall nach den Regelungen des Eurocode 4 vorausgesetzt wird, dass eine solche Decke a priori eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten erreicht. Folglich ist mit dem Verfahren eine Berechnung für diese Feuerwiderstandsdauer nicht vorgesehen. Generell können nach dem Eurocode 4-Verfahren Grenztragmomente bis zu einer Feuerwiderstandsdauer von 120 Minuten berechnet werden. Dies gilt sowohl für positive als auch für negative Momente.



**Abbildung 3-2: Vergleich Abminderung des positiven Grenztragmomentes im Abhängigkeit von der Branddauer**

Die nach Eurocode 4 berechneten, positiven bezogenen Momententragfähigkeiten sind in allen Fällen geringer, als die Werte nach den Zulassungen. Bei einer angestrebten Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten besitzt das Streuband eine Breite von etwa 13 % von  $M_{pl,fi,0}$ . Werden die Unterschiede in den Berechnungsergebnissen untereinander innerhalb einer angestrebten Feuerwiderstandsdauer betrachtet, so erscheinen die nach Eurocode 4 berechneten Werte deutlich konservativ. Beispielsweise ist die bezogene positive Momententragfähigkeit einer Super-Holorib-Verbunddecke nach 90 Minuten Beflammungsdauer weniger als halb so groß wie das nach Zulassung berechnete.



**Abbildung 3-3: Vergleich Abminderung des negativen Grenztragemomentes im Abhängigkeit von der Branddauer**

Wie unter 3.3.4 ausgeführt, ist eine Berechnung des negativen Grenztragemomentes nach der Zulassung für die Cofrastra-Verbunddecken nicht vorgesehen, so dass ein Vergleich in diesem Falle nicht geprüft werden kann. Bei den Holorib-Verbunddeckensystemen stimmen die Berechnungsergebnisse bis zu einer Beflammungsdauer von 60 Minuten nahezu überein (vgl. Abbildung 3-3). Für 90 und 120 Minuten angestrebter Feuerwiderstandsdauer ist die verbleibende bezogene Momententragfähigkeit nach Eurocode 4 etwas höher als nach der Zulassung.

Die absoluten Werte für die positiven und negativen Momententragfähigkeiten sind im Anhang C zu finden.

### 3.6 Zusammenfassung und Empfehlungen

In dem vorliegenden Kapitel wurde anhand von Vergleichsberechnungen nach Eurocode 4 und nach Zulassungen untersucht, inwieweit die Bemessungsvorschriften für Verbunddecken im Brandfall zu gleichwertigen Ergebnissen führen.

Bei beiden Nachweisverfahren handelt es sich um vereinfachte Berechnungsverfahren auf der Nachweisebene 2 in der Terminologie der Brandschutz-Eurocodes.

Da die Zulassungen auf ein Normenkonzept mit globalem Sicherheitskonzept aufgesetzt sind und in den Eurocodes ein Teilsicherheitskonzept verankert ist, stellt sich grundsätzlich die Frage, ob eine Vergleichbarkeit gegeben ist. Für die Auswertung der Parameterstudie, mit einer Vielzahl von berechneten Querschnitten, wurde deshalb die jeweilige plastische Momententragfähigkeit zu Beginn der Brandbeanspruchung  $M_{pl,fi,0}$  eines jeden Querschnitts als Bezugsgröße gewählt. Verschieden hohe Ausgangswerte für die Rechenfestigkeit der Baustoffe wirken sich auf dieser Vergleichsebene nicht aus.

Für die positive Momententragfähigkeit ist die Abminderung im Brandfall nach dem Verfahren des Eurocode 4 in jedem Falle konservativ gegenüber den Zulassungen. Bei der negativen Momententragfähigkeit zeigt sich eine weitgehende Übereinstimmung und in höheren Feuerwiderstandsklassen eine etwas geringere Abminderung.

Gegen eine Erweiterung der Anwendbarkeitsgrenzen des Verfahrens nach Eurocode 4 (vgl. Tabelle 3-4), mit der die hier untersuchten Verbunddeckensysteme abgedeckt sind, können



deshalb keine Bedenken bestehen, da im Vergleich mit den derzeit gültigen Zulassungen keine unververtretbaren Ergebnisse erzielt werden.

Es ist jedoch zu beachten, dass den Zulassungen teilweise spezifische, produktbezogene Anwendungsvorgaben zugrunde liegen, die in dem allgemein gefassten Verfahren Nach Eurocode 4 keine Berücksichtigung finden. Hier ist als Beispiel, die Holorib-Verbunddecke zu nennen, die ausschließlich in Verbindung mit einer Endverankerung funktioniert.

Weiterhin ist anzumerken, dass die Zulassungen den Nachweis der Längsschubtragfähigkeit im Brandfall regeln, während im Eurocode 4-1-2 keine Angaben dazu gemacht werden. Eine Berechnung der Längsschubtragfähigkeit im Brandfall nach Eurocode 4 ist demnach nicht möglich, obwohl sich das Verfahren gerade dadurch auszeichnet, dass die Resttragfähigkeit des Profilbleches bei der Momententragfähigkeit mit berücksichtigt werden kann. Das Berechnungsverfahren nach Eurocode ist in Bezug auf den Nachweis der Längsschubtragfähigkeit unvollständig.

Im Hinblick auf die temperaturbedingte Abminderung der plastischen Momententragfähigkeit führt das Verfahren nach ENV 1994-1-2 wie auch nach EN 1994-1-2 im Wesentlichen zu gleichwertigen und konkret bei der positiven Momententragfähigkeit zu deutlich konservativen Ergebnissen gegenüber den Verfahren der Zulassungen.



## 4 Erwärmung von unbedeckten Verbundträgern

Neue Festlegungen im Brandschutzteil des Eurocode 1-1-2 [2.6] wirken sich auf Stahl- und Verbundbauteile aus. Eine wesentliche Änderung gegenüber der ENV-Fassung [2.1] betrifft den Wärmeübergang. Die thermischen Einwirkungen werden durch den Netto-Wärmestrom, der die Wärmeübertragung von Konvektion und Strahlung berücksichtigt, in die Oberfläche des Bauteils gegeben. Im Folgenden wird auf die Änderungen und die Auswirkungen näher eingegangen.

### 4.1 Grundlagen der Erwärmungsberechnung nach Eurocode 4-1-2

Zur Bestimmung des Temperaturverlaufs von unbedeckten Stahlbauteilen wird in der EN-Version des EC 4-1-2 das folgende Verfahren angewendet. Der Querschnitt darf gemäß Abbildung 4-1 in die Teilquerschnitte Oberflansch, Steg und Unterflansch unterteilt werden.

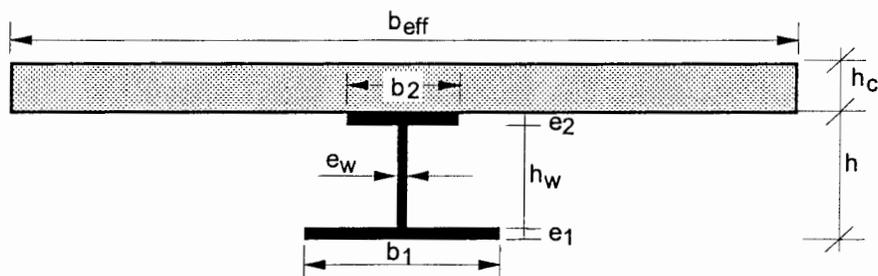


Abbildung 4-1: Querschnittseinteilung

Die Temperaturerhöhung  $\Delta\theta_{a,t}$  der einzelnen Teile von ungeschützten Stahlquerschnitten wird nach der folgenden inkrementellen Gleichung berechnet:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{\text{shadow}} \left( \frac{1}{c_a \rho_a} \right) \left( \frac{A_i}{V_i} \right) \dot{h}_{\text{net}} \Delta t \quad (4.1)$$

Dabei sind:

- $k_{\text{shadow}}$  Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt, entsprechend Gleichung (4.2).
- $c_a$  spezifische Wärmekapazität von Baustahl gemäß Regel 3.3.1(4) [J/kgK]
- $\rho_a$  Dichte von Baustahl gemäß Regel 3.4(1)P [kg/m<sup>3</sup>]
- $A_i$  beflamnte Oberfläche pro Längeneinheit des Stahlquerschnittsteiles  $i$  [m<sup>2</sup>/m]
- $A_i/V_i$  Profilmfaktor des Stahlquerschnittsteiles  $i$
- $V_i$  Volumen pro Längeneinheit des Stahlquerschnittsteiles  $i$  [m<sup>3</sup>/m]
- $\dot{h}_{\text{net}}$  gemäß prEN 1991-1-2, Abschnitt 3.1, Bemessungswert des Netto-Wärmestroms pro Flächeneinheit [W/m<sup>2</sup>]

Bei ungeschützten I-Profilen darf unter Normbrandbedingungen ein Abschattungseffekt berücksichtigt werden. Dabei wird anstelle des bekannten Profilmfaktors  $A_m/V$  der Wert



$0,9 \cdot [A_m / V]_b$  gesetzt (vgl. Gleichung (4.2)). Der Index b kennzeichnet dabei, dass es sich um eine fiktive „box“ handelt, die das Profil umschließt.

Der Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt  $k_{sh}$  darf wie folgt bestimmt werden:

$$k_{sh} = 0,9 \frac{[A_m / V]_b}{[A_m / V]} \quad (4.2)$$

Die Querschnittsabmessungen werden entsprechend Abbildung 4-1 bestimmt.

Der Bemessungswert des Netto-Wärmestroms berechnet sich nach Gleichung (4.3).

$$\dot{h}_{net,d} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (4.3)$$

mit

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\theta_g - \theta_n) \quad (4.4)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \epsilon_m \epsilon_f \sigma \left[ (\theta_t - 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right] \quad (4.5)$$

$\epsilon_m$  Emissivität des Bauteils

$\epsilon_f$  Emissivität der Flamme

$\sigma$  die Stefan-Boltzmann Konstante ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}^4$ )

$\theta_r$  die wirksame Strahlungstemperatur des Brandes

Gegenüber der ENV-Version haben sich zwei wesentliche Punkte geändert. Das eine sind die radiativen Werte der Emissivität für den Stahl und das Feuer und das andere ist die Berücksichtigung des Abschattungseffektes. Eine Übersicht zu den Änderungen der Emissivität zeigt Tabelle 4-1.



DOKUMENT	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient		Emissivitäten				
	Brand zugewandt $\alpha_{c,zu}$	Brand abgewandt $\alpha_{c,ab}$	Stahl $\epsilon_{m,Stahl}$	Beton $\epsilon_{m,Beton}$	Flamme $\epsilon_f$	$\epsilon_{res,Stahl}^{2)}$	$\epsilon_{res,Beton}^{2)}$
	$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Vornorm und NAD</b>							
ENV 1991-2-2 [2.1] zugehöriges NAD [2.12]	25	9	0,7 <sup>1)</sup> 0,9	0,7 <sup>1)</sup> 0,9	0,8 0,8	0,56 0,72	0,56 0,72
ENV 1992-1-2 [2.2] zugehöriges NAD [2.13]	-	-	-	0,9	0,8	-	0,72
ENV 1993-1-2 [2.3] zugehöriges NAD [2.14]	-	-	0,625	-	0,8	0,5	-
ENV 1994-1-2 [2.5] zugehöriges NAD [2.16]	-	-	0,625 0,7	0,7 0,7	0,8 0,8	0,5 0,56	0,56 0,56
<b>prEN-Version</b>							
prEN 1992-1-2 [2.7] (März 2004)	-	-	-	0,7	1,0	-	0,7
prEN 1993-1-2 [2.8] (April 2003)	-	-	0,7; 0,4 <sup>3)</sup>	-	1,0	0,7 0,4 <sup>5)</sup>	-
prEN 1994-1-2 [2.10] (November 2004)	-	-	0,7	0,7	1,0	(0,7)	0,7
DIN EN 1991-1-2 [2.6]	25	4 <sup>3)</sup> ; 9 <sup>4)</sup>	0,8 <sup>1)</sup>	0,8 <sup>1)</sup>	1,0	0,8	0,8

Die Werte in den Klammern sind dem maßgebenden Eurocode entnommen bzw. folgerichtig mit diesen Werten berechnet worden.

<sup>1)</sup> sofern in der materialbezogenen Norm nicht anders geregelt

<sup>2)</sup> resultierende Emissivität  $\epsilon_{res} = \epsilon_f \cdot \epsilon_m$

<sup>3)</sup> wenn die Strahlung gesondert berücksichtigt wird

<sup>4)</sup> wenn die Strahlung nicht gesondert berücksichtigt wird

<sup>5)</sup> für nichtrostenden Stahl nach Anhang C

**Tabelle 4-1: Konvektive Wärmeübergangskoeffizienten und Emissivitäten nach den Eurocodes bei ETK – Brandbeanspruchung**

Die Emissivität wird zur Bestimmung der Erwärmung des Bauteils bei der Berücksichtigung des radiativen Anteils angesetzt. Sie setzt sich nach den EN-Fassungen aus dem Produkt der Emissivität der Bauteiloberfläche  $\epsilon_m=0,7$  (für Stahl- und Verbundbauteile) und der Emissivität der Flamme  $\epsilon_f=1,0$  zusammen. Das Produkt  $\epsilon_m \cdot \epsilon_f=0,7$  ist größer als die bisherigen Festlegungen für ungeschützte Stahlbauteile ( $\epsilon_m \cdot \epsilon_f=0,5$ ) und Verbundbauteile ( $\epsilon_m \cdot \epsilon_f=0,56$ ), da nach ENV-Version für die Flamme eine Emissivität von  $\epsilon_f=0,8$  anzunehmen war.

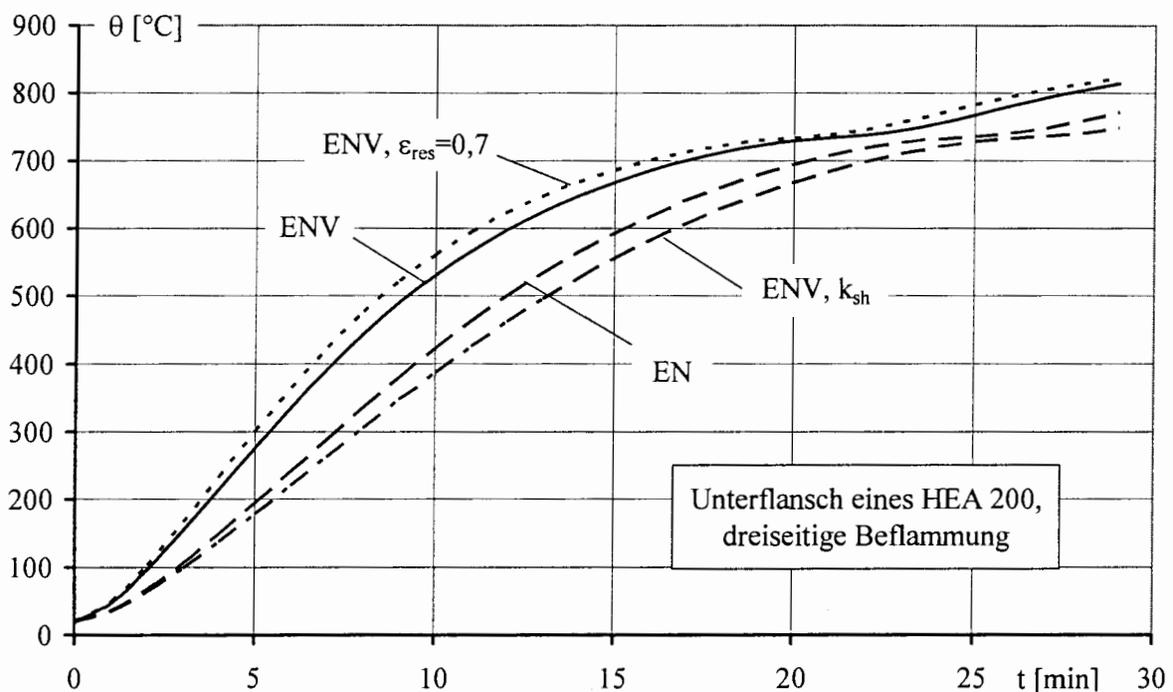
Mit dieser Änderung wurde der für Oberflächen aus Stahl physikalisch begründete Wert zur Berücksichtigung der Emissivität angesetzt [1.21]. Die Auswirkung dieser Änderung wird von Twilt in [1.21] auf der Grundlage von numerischen Berechnungen (Level 3) und von Versuchsauswertungen anhand von allseitig beflamten Stahlträgern untersucht. Hierbei zeigt sich, dass sich in diesem Falle eine gute Korrelation mit den Versuchsergebnissen und numerischen Berechnungen unter Verwendung der inkrementellen Gleichung (4.1) erzielt werden, wenn der Konfigurationsfaktor, der in der ENV-Version auf der sicheren Seite liegend zu 1,0 gesetzt wird, genauer bestimmt wird. Als Näherungslösung wird an Stelle des Konfigurationsfaktors der Faktor  $k_{Sh}$  zur Bestimmung des Abschattungseffektes eingeführt. Das hierzu verwendete physikalische Modell – die „fiktive“ Box – wird auf der Grundlage bestimmt, dass der Energieeintrag aus der Strahlung in die Kammer nicht zunehmen kann, wenn er die Umrissfläche des I-Profiles erreicht.



Aufgrund dieser Regelung werden für massigere Profile günstigere Tragfähigkeiten unter einer Beanspruchung nach der Einheits-Temperaturzeitkurve erreicht.

## 4.2 Erwärmungsberechnungen an einem Beispiel

Beispielhaft werden die Temperaturen und Querschnittstragfähigkeiten an einem typischen Trägerprofil dargestellt. Es werden die Temperaturen eines HEA 200 unter einer Betonplatte untersucht. Es wird mit einer dreiseitigen Brandbeanspruchung gerechnet.

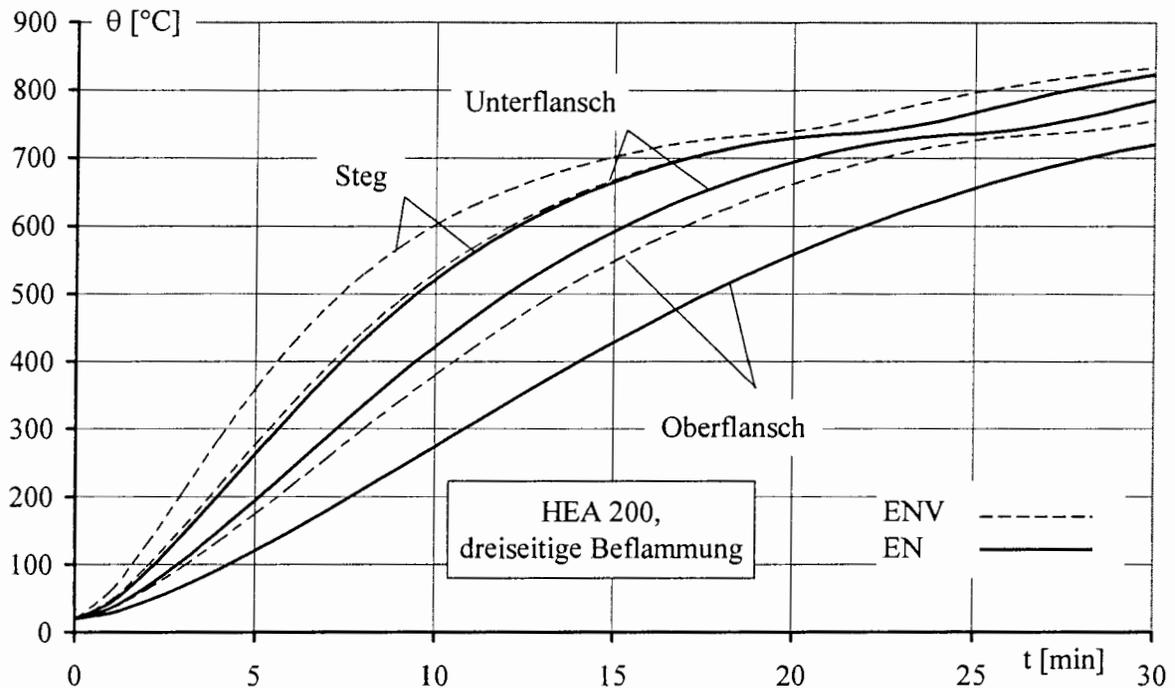


**Abbildung 4-2: Vergleich der Einflüsse verschiedener Faktoren auf die Erwärmung des Unterflansches eines HEA 200 unter ETK-Beanspruchung**

Der Erwärmungsverlauf darf bei Verbundträgern nach EN 1994-1-2 für die drei Querschnittsteile Oberflansch, Steg und Unterflansch des Stahlprofils jeweils getrennt berechnet werden. Die maßgebenden Größen für das thermische Verhalten sind der Profilfaktor und der Wärmeübergang (vgl. Abschnitt 4.1). Abbildung 4-2 zeigt die unterschiedliche Bedeutung der Änderungen in der EN-Version des Eurocode 4 durch die Einführung des Shadow-Faktors und durch die Änderung der Emissivität  $\epsilon_{res}$  am Beispiel der Erwärmung des Unterflansches eines HEB 200-Profiles.

Die Erhöhung von  $\epsilon_{res}$  von 0,56 auf 0,7 führt zu einer schnelleren Erwärmung und damit zu zwangsläufig höheren Temperaturen (vgl. durchgezogene und gepunktete Linie). Die Berücksichtigung des Abschattungseffektes führt zu niedrigeren Temperaturen (vgl. punktgestrichelte Linie). Die Überlagerung von geänderter Emissivität und Abschattungseffekt ist durch die gestrichelte Linie dargestellt und entspricht damit dem Ergebnis einer Berechnung nach EN-Version von Eurocode 4-1-2. Der Einfluss des Abschattungseffektes überwiegt und führt insgesamt zu niedrigeren Temperaturen für den Unterflansch.

Abbildung 4-3 zeigt die Auswertung der Temperaturberechnung für alle Teile des Stahlquerschnitts nach ENV- und EN-Version von Eurocode 4-1-2.



**Abbildung 4-3: Temperaturentwicklung für einen HEA 200 nach EN- und ENV-Version**

Aus Abbildung 4-3 ist erkennbar, dass die Temperaturen nach EN-Version, unter Berücksichtigung des Abschattungsfaktors und der vergrößerten Emissivität, niedriger ausfallen, als nach ENV-Version. Nach [1.21] waren die Ergebnisse der ENV-Version konservativ, so dass dieses Ergebnis zu erwarten war.

Weiterhin ist erkennbar, dass die Stegtemperaturen über den Temperaturen des Unterflanschs liegen. Dies mag zunächst nicht ganz einleuchtend sein. Aber in die Temperaturberechnung der getrennt betrachteten Querschnittsteile spielt in diesem Falle nur der Profilmfaktor eine Rolle. Für den Steg ergibt sich aufgrund der geringeren Blechdicke ein höherer Profilmfaktor ( $U/A = 1/t$ ), als für den Unterflansch und folglich auch eine höhere Temperatur. Alle anderen Parameter wie der Wärmeübergang und der Abschattungseffekt sind für alle Querschnittsteile gleich. Eine Wärmeleitung innerhalb des Querschnitts wird nicht berücksichtigt.

### 4.3 Beurteilung der veränderten Erwärmungsberechnung

Die angesprochenen Veränderungen sind eine Folge der physikalisch genaueren Betrachtung der Emissivität und des eingeführten Faktors zur Berücksichtigung des Abschattungseffektes. Dieser ist eine Näherung und wurde durch Twilt in [1.21] anhand von Versuchsergebnissen und numerischen Berechnungen validiert.

Die Änderungen entsprechen den Regelungen für dreiseitig beflammete Profile im Eurocode 3-1-2 [2.8].



## 5 Werkstoffeigenschaften von Stahl und Beton

### 5.1 Allgemeines

Für die Anwendung von allgemeinen Berechnungsmethoden (Level 3) bietet der Eurocode 4-1-2 Angaben zu den thermischen und mechanischen Werkstoffeigenschaften von Stahl und Beton. Die EN-Fassung unterscheidet sich in einigen Punkten deutlich von den Angaben der ENV-Fassung. Die Änderungen betreffen im Einzelnen:

- die thermischen Werkstoffkennwerte von Normalbeton
- die mechanischen Materialparameter von Beton
- die thermischen Übergangsbedingungen

Im Folgenden werden diese Änderungen einzeln beschrieben. Die Hintergründe zu den Änderungen werden, soweit vorhanden, erläutert und beurteilt. Anschließend werden die alten und die geänderten Werkstoffeigenschaften an exemplarischen Verbundbauteilen angewendet und miteinander verglichen. Die Einflüsse der einzelnen Änderungen können danach abschließend beurteilt werden.

### 5.2 Thermischen Materialparameter von Normalbeton

#### 5.2.1 Allgemeines

Im Zuge der Überarbeitung des Eurocodes 4-1-2 ging besonders von den nordeuropäischen Staaten der Wunsch aus, den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton im Hochtemperaturbereich neu zu formulieren. Aufgrund von Vergleichen zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen von Massiv- und Hohlplatten sowie Balkenquerschnitten wurde die Entscheidung getroffen, die Funktionswerte für die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit in der Entwurfs-Fassung vom Juli 2002 gegenüber der ENV-Fassung des Eurocodes 2 Teil 1-2 zu reduzieren. Um insbesondere eine Konformität zwischen Eurocode 2-1-2 für die brandschutztechnische Bemessung von Massivbauteilen und Eurocode 4-1-2 als entsprechende Norm für Verbundbauteile zu wahren, entschied sich das Project Team von Eurocode 4 für einen Kompromiss, indem es für den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton einen Bereich festsetzte, der durch eine obere und eine untere Grenze definiert wird (vgl. Abbildung 5-1). Innerhalb dieses Bereiches liegt es dann an den einzelnen Mitgliedsstaaten einen definierten Verlauf für die Wärmeleitfähigkeit festzusetzen.

Das DIBt beauftragte den Verfasser dieses Forschungsberichtes im Jahre 2003 damit, einen Verlauf für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton innerhalb des vorgegebenen Bereichs zu ermitteln [1.14]. Dabei war es das Ziel, das durch die ENV-Fassung geschaffene Sicherheitsniveau aufrecht zu erhalten. Im Folgenden werden die Grundlagen und Ergebnisse dieses Forschungsprojektes kurz vorgestellt.

#### 5.2.2 Änderungen zwischen ENV- und EN-Version

Die unter 5.2.1 beschriebene Änderung der Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton zeigt Abbildung 5-1. In dem Diagramm ist neben dem ursprünglichen Verlauf der ENV-Version der durch die EN-Version definierte Bereich schraffiert dargestellt. Die neu definierte obere Grenze liegt etwas unterhalb der ursprünglichen ENV-Version.



Neben der Wärmeleitfähigkeit wurden auch für den temperaturabhängigen Verlauf der Dichte und der Wärmekapazität von Normalbeton folgende Änderungen vorgenommen.

Während in der ENV-Version von Eurocode 4 bei der thermischen Analyse ein konstanter Wert von  $\rho_c = 2300 \text{ kg/m}^3$  für die Dichte von Beton zu verwenden war, wird in der EN-Version ein temperaturabhängiger linearer Verlauf angegeben, der bei  $\theta_c = 1200^\circ\text{C}$  bei 90% der ursprünglichen Dichte liegt. Eine Gegenüberstellung der Dichte aus den beiden Normversionen zeigt Abbildung 5-2.

Die maßgebende Änderung für den Verlauf der Wärmekapazität von Normalbeton in der EN-Fassung von Eurocode 4-1-2 ist eine Begrenzung auf  $c_c = 1100 \text{ J/(kgK)}$  ab einer Betontemperatur  $\theta_c = 400^\circ\text{C}$ . Einen Vergleich mit dem kontinuierlichen Verlauf der ENV-Version zeigt Abbildung 5-3.

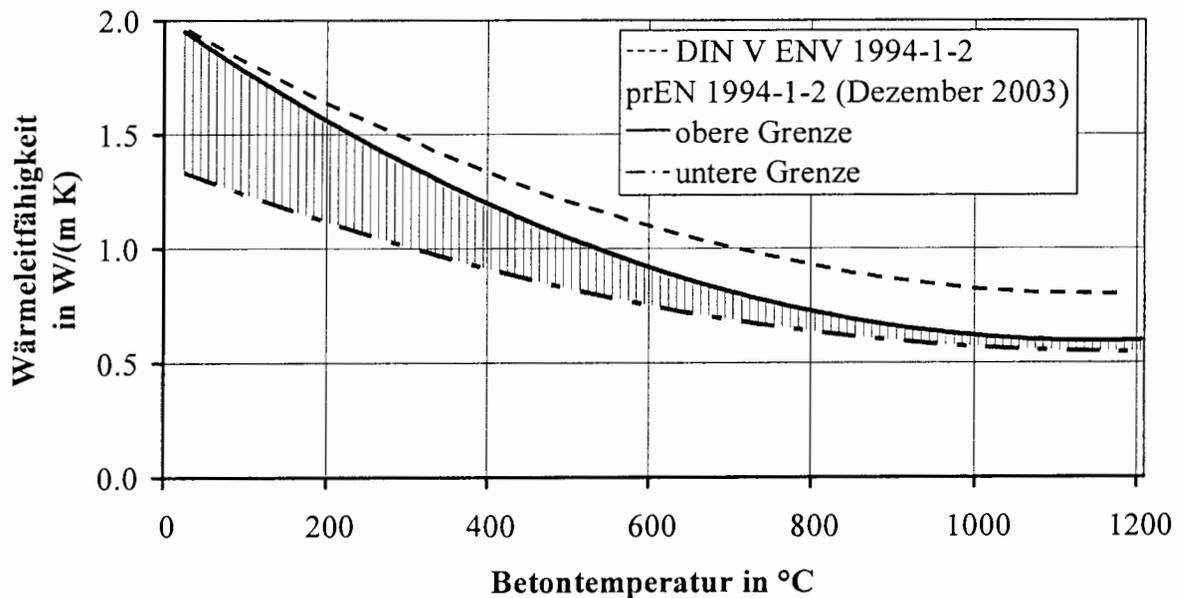


Abbildung 5-1 Vergleich der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  nach  
DIN V ENV 1994-1-2 und prEN 1994-1-2 (Dezember 2004)

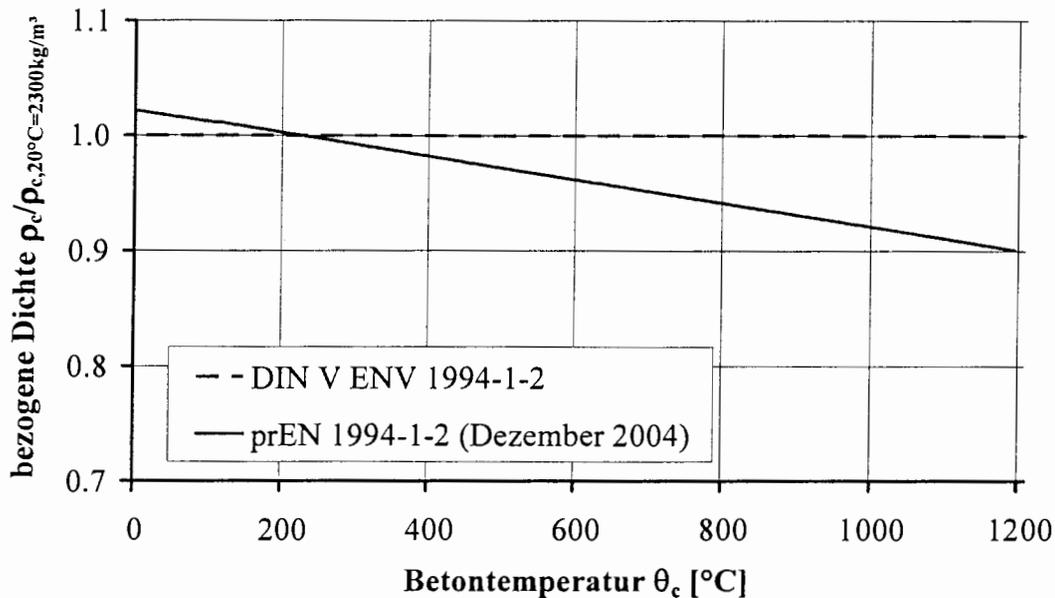


Abbildung 5-2 Vergleich der bezogenen Dichte von Normalbeton nach DIN V ENV 1994-1-2 und prEN 1994-1-2 (Dezember 2004)

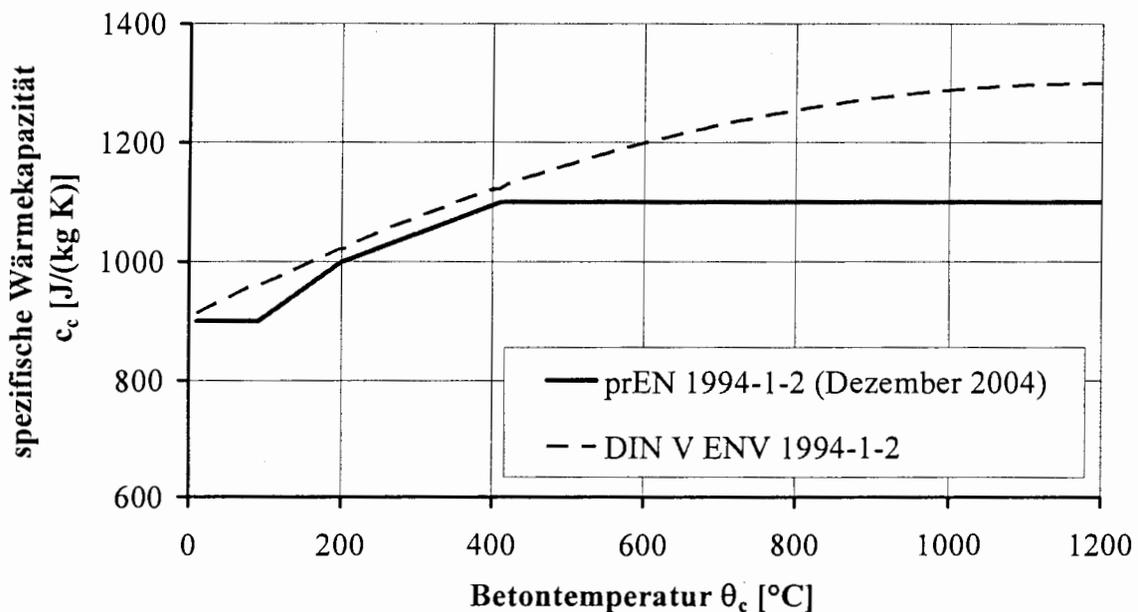


Abbildung 5-3 Vergleich der spezifische Wärmekapazität  $c_c$  nach DIN V ENV 1994-1-2 und prEN 1994-1-2 (Dezember 2004)

### 5.2.3 Erarbeiteter Regelvorschlag

Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-3 zeigen den temperaturabhängigen Verlauf der drei Materialparameter  $\rho_c$ ,  $c_c$  und  $\lambda_c$ . Eine Betrachtung der Fourierschen Differentialgleichung (5.6) für die Wärmeleitung zeigt, dass sie die entscheidenden Parameter sind, die von der Materialseite her den Temperaturfluss im Bauteil bestimmen.



$$c \cdot \rho \frac{\delta T}{\delta t} = \operatorname{div} \lambda (\operatorname{grad} T) + W \quad (5.6)$$

mit

$T = f(x, y, z, t)$	Temperaturfeld mit den Raumkoordinaten $x, y, z$ im kartesischen System und der Zeit $t$
$t$	Zeit
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$c$	spezifische Wärmekapazität
$\rho$	Dichte
$W$	Wärmequelle oder -senke

Die Änderungen von der ENV-Version zur EN-Fassung bedeuten folgendes:

Die Dichte  $\rho$  und die Wärmekapazität  $c$  charakterisieren die Wärmespeichermöglichkeit des Baustoffes. Eine Herabsetzung dieser beiden Parameter bedeutet, dass der Werkstoff nicht mehr so viel Energie speichern kann. Es kommt folglich zu einer schnelleren Durchwärmung des Querschnitts.

Die Änderung der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  hat den gegenteiligen Effekt. Eine geringere Leitfähigkeit führt zu einer langsameren Durchwärmung des Querschnitts.

Für die Lösung des instationären Temperaturproblems innerhalb des betrachteten Werkstoffes lässt sich aus der Differentialgleichung (5.6) ein Koeffizient herausziehen, der als Temperaturleitfähigkeit  $a$  definiert ist. Um eine Einhaltung des Sicherheitsniveaus der ENV-Version zu gewährleisten, wurde postuliert, dass die Temperaturleitfähigkeit  $a$  nach ENV- und nach EN-Fassung konstant bleiben soll (vgl. Gleichung (5.7)).

$$a = \frac{\lambda_c}{\rho_c \cdot c_c} (\text{ENV}) = \frac{\lambda_c}{\rho_c \cdot c_c} (\text{prEN}) = \text{const.} \quad (5.7)$$

mit

$a$	Temperaturleitfähigkeit	$[\text{m}^2/\text{s}]$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit	$[\text{W}/(\text{mK})]$
$c$	spezifische Wärmekapazität	$[\text{J}/(\text{kgK})]$
$\rho$	Dichte	$[\text{kg}/\text{m}^3]$

Aus dieser Prämisse (5.7) wurde vom Verfasser ein Regelvorschlag für den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von Beton abgeleitet. Die so erhaltene Funktion für  $\lambda_c$  lag geringfügig oberhalb der oberen Grenze des vorgegebenen Bereichs der EN-Version. Somit ist die obere Grenze nach EN 1994-1-2 die Funktion für die Wärmeleitfähigkeit von Beton, die zum einen



innerhalb des vorgegebenen Bereiches liegt und zum anderen die Anforderungen an eine unveränderliche Temperaturleitfähigkeit am ehesten erfüllt. Für eine genauere Betrachtung der Herleitung wird auf den Forschungsbericht [1.14] verwiesen.

Die Gleichung für den Regelvorschlag der Wärmeleitfähigkeit lautet entsprechend der oberen Grenze nach EN 1994-1-2 (vgl. Abbildung 5-1):

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \cdot \frac{\theta_c}{100} + 0,0107 \cdot \left( \frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5.8)$$

mit

$\lambda_c$	Wärmeleitfähigkeit des Betons	[W/(mK)]
$\theta_c$	Betontemperatur	[°C]

Um die Auswirkungen der geänderten thermischen Materialparameter auf die Tragfähigkeit von Verbundbauteilen zu untersuchen, wurde eine umfangreiche Parameterstudie an unterschiedlichen Verbundquerschnitten durchgeführt. Dabei wurden die Temperaturen, die sich aus der Berechnung mit den Materialparametern der ENV- und der EN-Fassung mit Messergebnissen aus Versuchen an unterschiedlichen Querschnittsstellen verglichen. Weiterhin wurden die Tragfähigkeiten der Berechnungen den im Versuch erreichten Feuerwiderstandszeiten gegenübergestellt.

#### 5.2.4 Ergebnis für den Regelvorschlag der Wärmeleitfähigkeit von Beton

Aus den Vergleichsrechnungen der untersuchten Bauteile ist zu erkennen [1.14], dass an den Messstellen, an denen die Temperaturen maßgeblich durch die Materialkennwerte des Betons beeinflusst werden, mit den Materialkennwerten des Betons nach prEN-Fassung etwas geringere Temperaturen ermittelt werden, als bei der Berechnung mit den bisherigen Materialkennwerten nach ENV-Fassung. Im Gegensatz dazu werden an Messstellen, die im Wesentlichen von den Stahleigenschaften abhängig sind, die Temperaturen nach prEN-Fassung etwas höher berechnet, als bei der ENV-Fassung. Grund dafür ist die geänderte resultierende Emissivität. Das bedeutet für Bauteile mit außen liegenden Stahlteilen werden die Temperaturen, außer an der Bewehrung mit den Materialparametern nach prEN-Fassung stets etwas höher berechnet, als nach der ENV-Fassung.

Eine Betrachtung der Feuerwiderstandsdauern zeigt, dass Bauteile mit außen liegenden Stahlteilen bei der Berechnung nach prEN-Fassung konservativere Ergebnisse liefern, als bei der Berechnung nach den bisherigen Materialkennwerten. Dagegen werden für vollständig einbetonierte Stahlquerschnitte höhere Versagenszeiten ermittelt, die aber immer noch unterhalb der im Versuch erhaltenen Versagenszeiten liegen.

Als nationale Regelung wird als Ergebnis des Forschungsvorhabens die obere Grenze nach EN-Fassung des EC 4-1-2 für den Verlauf der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit vorgeschlagen. Die im Forschungsbericht [1.14] dokumentierten Untersuchungen belegen, dass die damit erzielten Ergebnisse denen auf der Grundlage der ENV-Fassung nahezu gleich sind. Dieser Regelungsvorschlag wurde durch die vergleichenden Berechnungen abgesichert und



ist identisch mit dem entsprechenden Regelungsvorschlag für EC 2-1-2 (Stahlbetonbau), der in einem parallelen Projekt von Prof. Hosser an der TU Braunschweig verifiziert wurde.

Bezüglich der thermischen Materialkennwerte von Normalbeton wird durch das durchgeführte Forschungsprojekt [1.14] bestätigt, dass das gemäß DIN V ENV 1994-1-2 definierte Sicherheitsniveau in den Regelungen der prEN 1994-1-2 vom Oktober 2003 eingehalten wird.

### 5.3 Mechanische Materialparameter von Normalbeton

Neben der Änderung der thermischen Materialkennwerte haben sich auch die Spannungs-Dehnungsbeziehungen unter erhöhten Temperaturen geändert. Eine Begründung für diese Änderungen liegt nicht vor. Die Änderungen sind bislang nicht wissenschaftlich begründet und können noch nicht als endgültig betrachtet werden.

Im Folgenden sollen die Änderungen aufgezeigt werden. Dazu werden EN- und die ENV-Fassung von Eurocode 4-1-2 und die dazugehörigen Dokumente für den Betonbau, Eurocode 2-1-2, verwendet, da Eurocode 2 und Eurocode 4 bezüglich der Materialgesetze von Beton konform sein sollten.

Eurocode 4 macht sowohl im Hauptteil (Tabelle 3.3) als auch im Anhang B (Tabelle B.1) Angaben zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungslinie für quarzitisches Beton unter Druckbeanspruchung an. Der Verlauf wird durch im Wesentlichen durch zwei Parameter bestimmt:

- $f_{c,\theta}$ : maximale Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur
- $\epsilon_{cu,\theta}$ : Betonstauchung bei Erreichen der maximalen Betondruckfestigkeit  $f_{c,\theta}$

Den temperaturabhängigen Verlauf der beiden Werte zeigt Abbildung 5-4 in den durchgezogenen Linien. Die angegebenen Werte von  $f_{c,\theta}$  und  $\epsilon_{cu,\theta}$  dürfen auch für kalkhaltige Betone verwendet werden, da diese Annahme normalerweise konservativ ist ([2.5], 3.2.2 (5)). Diese Aussage deckt sich mit den Angaben aus der ENV 1992-1-2, Tabelle A.1 [2.2], denn für kalkhaltigen Beton ergeben sich dort etwas höhere Druckfestigkeiten bei erhöhten Temperaturen. Die Betonstauchung  $\epsilon_{cu,\theta}$  ist für beide Betonsorten gleich.

Die Angaben in der EN-Fassung von Eurocode 4 für die Betonstauchung unterscheiden sich jedoch deutlich von der ENV-Fassung, wie es in Abbildung 5-4 zu erkennen ist. Die Maximalwerte von  $\epsilon_{cu,\theta}$  liegen in der EN-Fassung bei 2,5 % während das Plateau der ENV-Fassung bei 1,5 % liegt. Die Werte für  $\epsilon_{cu,\theta}$  stimmen sowohl in der ENV- wie auch in der EN-Fassung jeweils mit den Angaben aus Eurocode 2 überein.

Weiterhin sind auch in der EN-Fassung von Eurocode 4-1-2 die Werte wieder für quarzitisches Beton angegeben, mit dem Hinweis, dass sie für kalkhaltige Betone konservative Annahmen darstellen ([2.9], 3.2.2 (6)). Die genauen Angaben im Eurocode 2 bestätigen diese Aussage([2.7], Tabelle 3.1).

Die erhöhten Werte für  $\epsilon_{cu,\theta}$  bewirken für Temperaturen über 500 °C eine deutliche Verschiebung der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien zu höheren Dehnungen hin, wie es in Abbildung 5-5 zu erkennen ist. In wieweit sich diese Verschiebung auf die Tragfähigkeit von Verbundbauteilen auswirkt, wird in Abschnitt 5.5 untersucht.

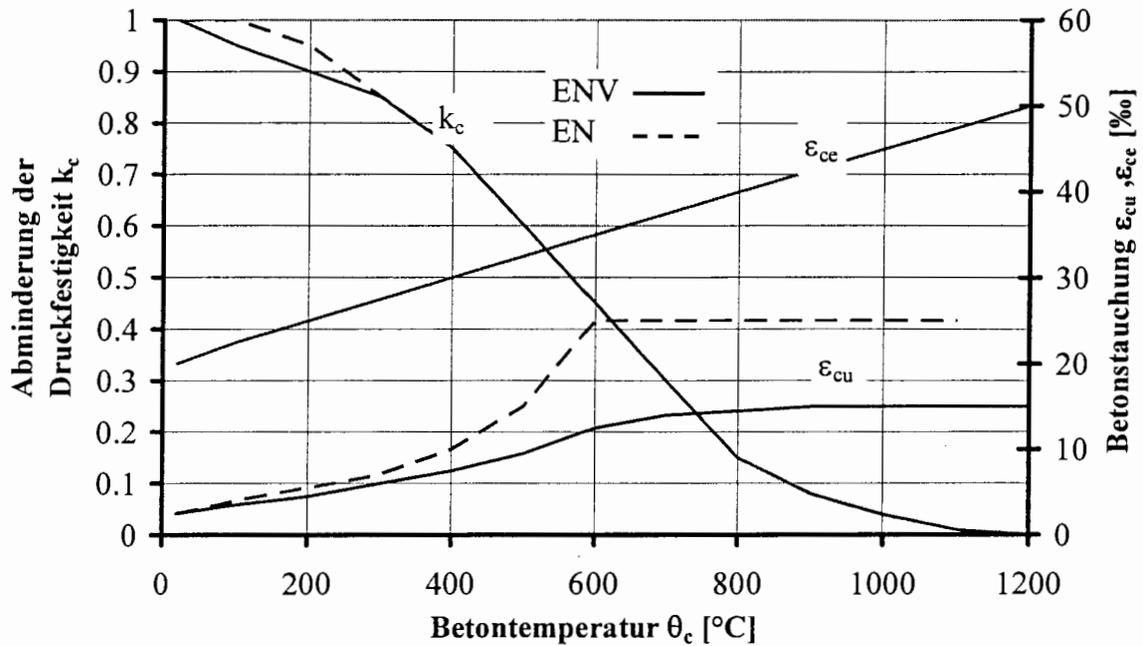


Abbildung 5-4 Vergleich der Hauptparameter der Spannungs-Dehnungsbeziehung für Normalbeton bei erhöhten Temperaturen nach prEN- und ENV-Version von Eurocode 4-1-2

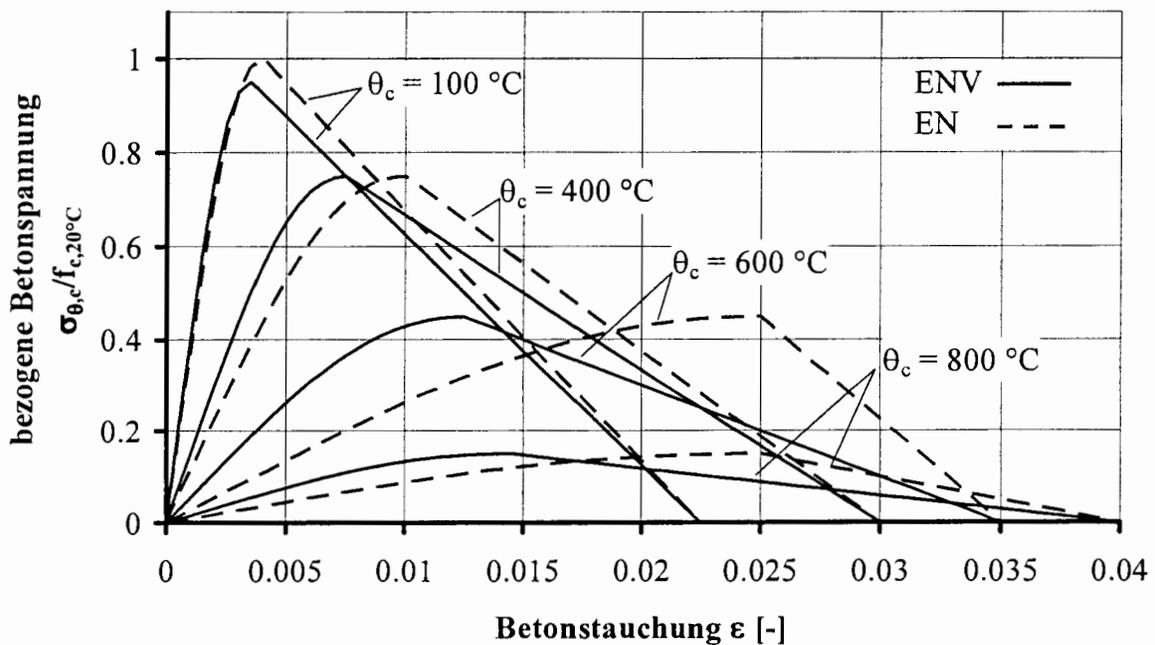


Abbildung 5-5 Vergleich der Spannungs-Dehnungsbeziehung von Normalbeton unter erhöhten Temperaturen nach prEN- und ENV-Version



## 5.4 Thermische Übergangsbedingung für den Verbundbau

Abschnitt 4 wurde im Zusammenhang mit unbedeckten Verbundträgern die Änderung der Emissionsbeiwerte erläutert. Für die Anwendung von allgemeinen Berechnungsverfahren im Verbundbau bedeutet dies, dass für alle Arten von Verbundquerschnitten ein resultierender Emissionsbeiwert von  $\varepsilon_{\text{res}} = 0,7$  anzusetzen ist, wo hingegen in der ENV-Fassung noch ein Wert von  $\varepsilon_{\text{res}} = 0,56$  zulässig war.

## 5.5 Auswirkungen der geänderten Materialparameter von Stahl und Beton

### 5.5.1 Allgemeine Berechnungsgrundlagen

In den Abschnitten 5.2 bis 5.4 wurden die Änderungen der thermischen und mechanischen Materialparameter von Beton sowie der thermischen Übergangsbedingungen für Verbundquerschnitte erläutert.

In diesem Abschnitt werden die neuen Werkstoffkennwerte an exemplarischen Verbundquerschnitten angewendet und mit den Ergebnissen nach den ENV-Parametern verglichen. Dies sind im Einzelnen:

- Kammerbetonierte Verbundstütze
- Vollständig einbetonierte Verbundstütze
- Betongefüllte Rechteck-Hohlprofilstütze
- Kammerbetonierter Verbundträger

Die Berechnungen der Bauteile werden mit dem numerischen Simulationsprogramm BoFire [1.7] durchgeführt. Das Programm arbeitet auf der Basis der Finite-Elemente-Methode und greift auf die Arbeiten von Schaumann (z.B. [1.13]) aus den 80er Jahren zurück. Das Programm liefert die Simulation des Tragverhaltens von zweidimensionalen Stab- und Rahmentragwerken mit Stahl- oder Verbundquerschnitten im Brandfall und entspricht damit einem Level 3-Verfahren gemäß der Definition im Eurocode 4-1-2 [2.5] [2.10].

Ende der 90er Jahre wurde das Programm von Upmeyer [1.22] auf die aktuellen Werkstoffparameter und die Berücksichtigung beliebiger Brandraum-Temperaturzeitkurven erweitert.

Für die Vergleichsrechnungen wurden Bauteile ausgewählt, die auch für die Beurteilung des neuen Regelvorschlages der Wärmeleitfähigkeit von Beton [1.14] herangezogen wurden. Die Berechnungsergebnisse wurden in dem Forschungsbericht [1.14] mit den Versagenszeiten aus durchgeführten Normbrandversuchen gegenübergestellt und beurteilt. Innerhalb des vorliegenden Forschungsprojektes wurden aber nicht die in den Versuchsberichten angegebenen Materialfestigkeiten verwendet, sondern die in den Eurocodes angegebenen Nennfestigkeiten. Ziel war es, die Ergebnisse bei Verwendung der unterschiedlichen Fassungen von Eurocode 4-1-2 zu vergleichen und nicht, den Vergleich gegenüber Brandversuchen zu führen.

Für die numerische Berechnung der Bauteile wird in allen Fällen keine Feuchtigkeit des Betons angesetzt. Für die Simulation von Stützen mit außen liegenden Stahlteilen werden geometrische Imperfektionen von  $1/1000$  angesetzt. Dabei sind die Eigenspannungen im Stahlquerschnitt nicht berücksichtigt, da diese, wie Vergleichsrechnungen gezeigt haben, durch die schnelle Erwärmung des Stahls vernachlässigt werden können. Für Verbundstützen mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil wird eine Ersatzimperfektion von  $1/500$  angesetzt, die geometrische und strukturelle Imperfektionen abdeckt.



Jedes Bauteil wird mit vier verschiedenen Materialdefinitionen gerechnet:

- B.1 Thermische und mechanische Werkstoffgesetze nach ENV 1994-1-2 [2.5]
- B.2.1 Thermische und mechanische Werkstoffgesetze nach EN 1994-1-2 [2.10]
- B.2.2 Thermische und mechanische Werkstoffgesetze nach EN 1994-1-2 [2.10]  
+ Spannungs-Dehnungsbeziehung von Beton nach ENV-Version
- B.2.3 Thermische und mechanische Werkstoffgesetze nach EN 1994-1-2 [2.10]  
+  $\epsilon_{res} = 0,56$  nach ENV-Version

Die Bauteile werden bei einer vorgegebenen Belastung solange nach ETK erwärmt, bis ein Versagen des Bauteils eintritt. Dies wird durch drei unterschiedliche Kriterien beurteilt.

1. Querschnittfasern erreichen eine Grenzdehnung von 20 %
2. Querschnittsversagen; die überlagerten Schnittgrößen können vom Querschnitt nicht aufgenommen werden
3. Stabilitätsversagen; die Abnahme der Steifigkeit im Inkrement führt zur Singularität der Steifigkeitsmatrix

### 5.5.2 Berechnungsergebnisse

Eine Übersicht über die Versagenszeiten  $t_{fi,d}$  der untersuchten Bauteile zeigen Tabelle 5-1 und Abbildung 5-6 in Abhängigkeit der unterschiedlichen Materialgesetze.

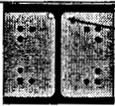
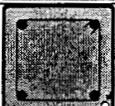
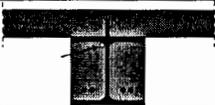
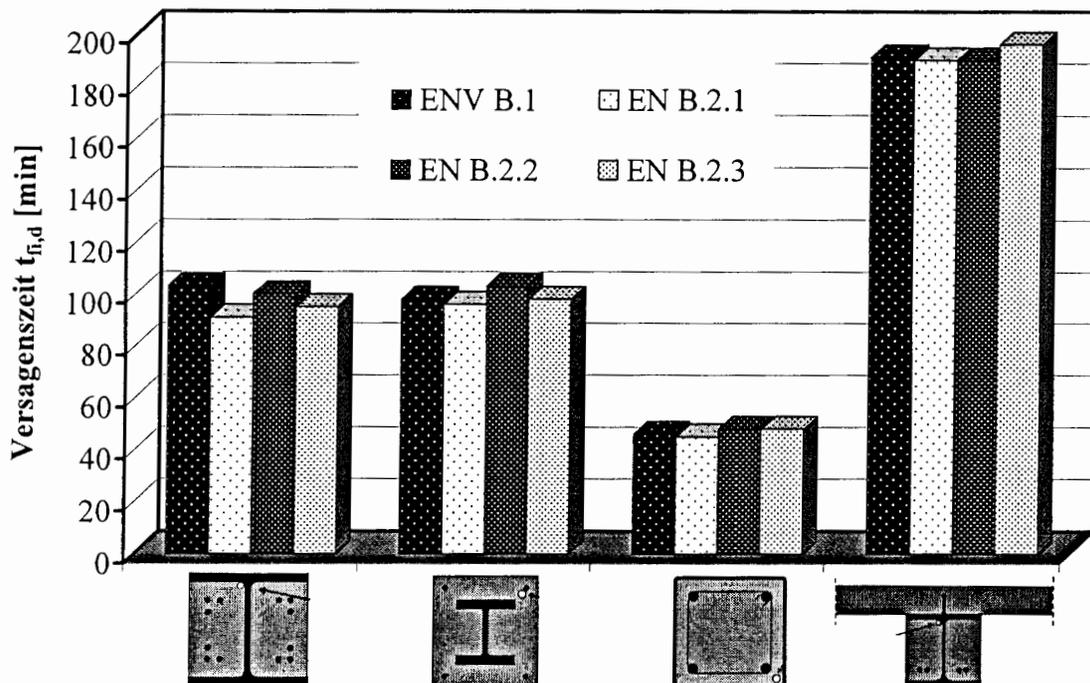
	B.1	B.2.1	B.2.2	B.2.3
	ENV	EN	EN $\sigma$ - $\epsilon$ -Bez. von Beton nach ENV	EN $\epsilon_{res} = 0,56$
	103	91	100	95
	98	96	103	98
	46	45	48	48
	191	190	190	196

Tabelle 5-1 Berechnete Versagenszeiten  $t_{fi,d}$  der untersuchten Verbundbauteile



**Abbildung 5-6** Graphische Darstellung der berechneten Versagenszeiten  $t_{fi,d}$  der untersuchten Verbundbauteile

Aus einem Vergleich der Versagenszeiten lassen sich die unterschiedlichen Materialdefinitionen wie folgt beurteilen:

- Die neuen Materialparameter der EN-Version führen zu früheren Versagenszeiten als Berechnungen nach der ENV-Fassung und somit zu konservativeren Ergebnissen.
- Der geänderte resultierende Emissionsbeiwert  $\epsilon_{res}$  macht sich hauptsächlich bei Verbundbauteilen mit außen liegenden Stahlteilen bemerkbar. Detailuntersuchungen haben gezeigt, dass der Einfluss von  $\epsilon_{res}$  bei Betonoberflächen schon nach wenigen Millimetern Eindringtiefe vernachlässigbar ist. Grund dafür ist die geringe Wärmeleitfähigkeit von Beton und der damit verbundene starke Temperaturgradient innerhalb des Betons.
- Die geänderten Spannungs-Dehnungslinien für Beton wirken sich nur bei Stützenbauteilen aus. Grund hierfür sind die erhöhten Werte für  $\epsilon_{cu}$ . Das Erreichen der maximalen Betondruckfestigkeit bei höheren Dehnungen führt dazu, dass bei Aufnahme der gleichen inneren Schnittgrößen größere Verformungen auftreten. Dies führt bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen zu geringeren Tragfähigkeiten oder zu früheren Versagenszeiten.
- Entsprechend dem Forschungsbericht [1.14] sind die Auswirkungen der geänderten thermischen Materialgesetze von Beton vernachlässigbar gering (vgl. Abbildungen im Anhang B)



## 5.6 Folgerungen aus den Vergleichsrechnungen

In Abschnitt 5 wurden die geänderten Materialdefinitionen von Stahl und Beton vorgestellt. Mit den neuen Werkstoffkennwerten wurden Vergleichsrechnungen an ausgewählten Verbundbauteilen durchgeführt. Die berechneten Versagenszeiten wurden den Ergebnissen, die mit den Materialparametern der ENV-Fassung berechnet wurden, gegenübergestellt und verglichen. Die Definitionen der EN-Version liefern konservativere Ergebnisse. Der Einfluss bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen ist deutlich größer als bei rein biegebeanspruchten Bauteilen. Dies liegt vor allem an den erhöhten Dehnungen  $\epsilon_{cu}$  zum Erreichen der maximalen Betondruckfestigkeit  $f_{c,0}$  bei erhöhten Temperaturen.

Da die Berechnungen nach EN-Fassung durchweg zu konservativeren Ergebnissen führen, kann festgehalten werden, dass das durch die ENV-Version definierte Sicherheitsniveau eingehalten ist.



## 6 Zusammenfassung

Bei der Überführung der Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung von Stahlverbundbauteilen von der ENV- in die EN-Version sind neue Kennwerte für die Berechnung der Erwärmung definiert worden und einige Bemessungsverfahren verändert worden oder neu hinzugekommen. Im Einzelnen betrifft dies die thermischen und mechanischen Werkstoffkennwerte von Beton und den Wärmeübergang von Stahlbauteilen. Die Änderung der Bemessungsverfahren betrifft die Tabellen für kammerbetonierte Verbundstützen und betongefüllte Hohlprofile und die vereinfachten Rechenverfahren für ungeschützte Stahlverbundträger und Profilverbunddecken.

Für die tabellarischen und vereinfachten Nachweismethoden wurden die Hintergründe und wissenschaftlichen Ergebnisse, die zu den Veränderungen geführt haben, erläutert.

Die neuen thermischen und mechanischen Materialdefinitionen von Stahl und Beton wurden in das numerische Simulationsprogramm implementiert und anschließend Vergleichsrechnungen an exemplarischen Verbundbauteilen durchgeführt.

Die Bemessungstabellen für kammerbetonierte Verbundstützen wurden in ihrem Anwendungsbereich erweitert. Die neuen Tabellenwerte sind wissenschaftlich belegt, indem sie mit einem Level 3-Verfahren bestimmt und durch ein vereinfachtes Berechnungsverfahren überprüft wurden. Weiterhin wurden bei den Bemessungstabellen für kammerbetonierte Verbundstützen und für betongefüllte Hohlprofile der Lastausnutzungsgrad an das neue Berechnungsverfahren im Kaltfall der EN 1994-1-1 angepasst. Auch diese Änderungen sind wissenschaftlich geprüft und in Abstimmung mit dem Project Team von Eurocode 4-1-2 erfolgt.

Für die Erwärmung von unbedeckten Stahlprofilen ist für Eurocode 3 und Eurocode 4 in der EN-Fassung ein Faktor  $k_{sh}$  eingeführt worden. Er ist das Ergebnis einer genaueren Energiebetrachtung und entspricht dem Konfigurationsfaktor  $\Phi$  der ENV-Fassung, der konservativ zu 1,0 angenommen werden konnte. In Verbindung mit einem erhöhten resultierenden Emissionsbeiwert  $\epsilon_{res}$  ergeben sich geringere Temperaturen als nach ENV-Fassung, welche durch die Betrachtung des Konfigurationsfaktor zu konservativeren Lösungen führt.

Das neue Deckenbemessungsverfahren führt im Hinblick auf die temperaturbedingte Abminderung der Plastischen Momententragfähigkeit im Wesentlichen zu gleichwertigen und konkret bei der positiven Momententragfähigkeit zu deutlich konservativen Ergebnissen gegenüber den Verfahren der Zulassungen. Es ist jedoch zu beachten, dass den Zulassungen teilweise spezifische, produktbezogene Anwendungsvorgaben zugrunde liegen, die in dem allgemein gefassten Verfahren nach Eurocode 4 keine Berücksichtigung finden.

Eine genaue Untersuchung der Anwendungsgrenzen für das Deckenbemessungsverfahren hat gezeigt, dass keines der hier untersuchten und in Deutschland zugelassenen Verbunddeckensysteme in allen Punkten diese Anwendungsgrenzen erfüllt. Vergleichsberechnungen haben gezeigt, dass das Verfahren aber durchaus auf die in Deutschland zugelassenen Verbunddeckensysteme anwendbar ist und akzeptable Ergebnisse liefert, die in Bezug auf die bestehenden Zulassungen auf der sicheren Seite liegen.

Die mechanischen und thermischen Materialkennwerte von Beton sind geändert worden. An der Bauteiloberfläche ist weiterhin ein geänderter Emissionsbeiwert zu berücksichtigen. Die Auswirkungen aller geänderten Werkstoffkennwerte auf allgemeine Berechnungsverfahren wurden anhand von numerischen Simulationsrechnungen an exemplarischen Verbundbauteilen untersucht. Die Vergleichsberechnungen haben gezeigt, dass die EN-Fassung von Euroco-



de 4-1-2 zu etwas konservativeren Ergebnissen führt, als Berechnungen mit der ENV-Version. Die Änderung des resultierenden Emissionsbeiwertes wirkt sich in erster Linie bei Verbundbauteilen mit außen liegenden Stahlteilen aus. Die Veränderungen der mechanischen Materialparameter von Beton führen zu größeren Verformungen und reduzieren deshalb deutlich die Tragfähigkeit von Verbundstützen. Die Veränderung der thermischen Werkstoffkennwerte von Beton hat nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Tragfähigkeit von Verbundbauteilen.

Die Verfasser weisen jedoch darauf hin, dass die im Eurocode enthaltenen Bemessungstabellen und vereinfachten Nachweisverfahren nicht auf der Grundlage dieser neu festgelegten Werkstoffparameter stehen.

Wie in dem Forschungsbericht gezeigt wird, ist das Sicherheitsniveau insgesamt nicht verändert worden. In einzelnen Bereichen ergeben sich zum Teil geringfügig günstigere, zum Teil ungünstigere Ergebnisse. Die EN-Fassung des Eurocode 4-1-2 ist aus der Sicht der Verfasser im Hinblick auf die bauaufsichtlichen Belange akzeptabel.



## 7 Literatur

- [1.1] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-26.1-22: COFRASTRA-Verbunddecken, Geltungsdauer bis 31. Dezember 2006. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 17. Dezember 2001
- [1.2] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-26.1-4: Holorib-Verbunddecke, Geltungsdauer bis zum 30. Juni 2003, Verlängert bis zum 9. Juni 1998. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 8. Juli 2003
- [1.3] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-26.1-44: Hoesch Additiv Decke, Geltungsdauer bis zum 31. Januar 2008. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 7. Januar 2003
- [1.4] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-26.1-45: SUPER-HOLORIB SHR 51-Verbunddecke, Geltungsdauer bis zum 30. April 2007. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 26. April 2002
- [1.5] Bemessungsbeispiel HOLORIB-Verbunddecke (gemäß Zulassungsbescheid Nr. Z-26.1-4 und DIN 1045). Holorib (Deutschland) GmbH, Blumenstraße 38, D-63069 Offenbach am Main. [www.holorib.de](http://www.holorib.de)
- [1.6] Bergmann, R.: Geometrische Ersatzimperfektionen für Verbundstützen, die in Knickspannungskurve a eingestuft sind. DIBt-Forschungsbericht T 2755, IRB Verlag, Dezember 1996
- [1.7] BoFIRE: Computerprogramm zur numerischen Simulation von Stahl- und Verbundtragwerken unter Brandbeanspruchung, Institut für Stahlbau, Universität Hannover, Hannover, 2000
- [1.8] Booth, C.: The Fire Resistance of Composite Steel-Concrete Slabs. Dissertation. TNO Building and Construction Research. Delft: Delft University Press, 1998
- [1.9] Hothan, S.: Zur dreidimensionalen Simulation von Deckentragwerken im Brandfall. Dissertation, Universität Hannover. Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau der Universität Hannover, Heft 21. Aachen: Shaker Verlag, 2004
- [1.10] Hothan, S.: Zur Simulation von Deckentragwerken mit ungeschützten Verbundträgern im Brandfall. Forschungsbericht 2/2004, Deutscher Ausschuss für Stahlbau DASt. 15. DASt-Forschungskolloquium Stahlbau, Universität Stuttgart, 01. und 02. April 2004. Düsseldorf: Stahlbau Verlags- und Service GmbH, 2004
- [1.11] Lindner, J., Bergmann, R.: Zur Bemessung von Verbundstützen nach DIN 18800 Teil 5; Stahlbau 67:7 (1998), Seite 536 – 546.
- [1.12] Lindner, J.: Geometrische Ersatzimperfektionen für Verbundstützen, die in Knickspannungskurven b und c eingestuft sind. DIBt-Forschungsbericht T 2759, IRB Verlag, Dezember 1996



- [1.13] Schaumann, P.: Zur Berechnung stählerner Bauteile und Rahmentragwerke unter Brandbeanspruchung, Technisch-wissenschaftliche Mitteilungen Nr. 84-4, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, Bochum, 1984.
- [1.14] Schaumann, P.; Kettner, F.; Ostheer, S.: Bestimmung der thermischen Materialkennwerte von Normalbeton für die brandschutztechnische Bemessung von Verbundbauteilen nach EC 4 Teil 1-2, Schlussbericht zum DIBt-Forschungsvorhaben P 32-5- 17.13-1051/03
- [1.15] Schaumann, P.; Upmeyer, J.: Neue Nachweistabellen zum Feuerwiderstand kammerbetonierter Verbundstützen, Stahlbau 71, Heft 5, 2002, S. 334 - 341
- [1.16] Schaumann, P.; Upmeyer, J.: Tabulated Data for Fire Design of Partially Encased Composite Columns; Background Document to Eurocode 4 Part 1-2; EC4-1-2/60; August 2001
- [1.17] Steinert, C.; Schaumann, P.; Hothan, S.: Entwicklung und Anwendung von Planungssoftware zur brandschutztechnischen Optimierung von Stahlgeschossbauten. Forschungsbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13011 BG, in Vorbereitung
- [1.18] Stützweiten Cofrastra 40 Verbunddecke im Montagezustand. COFRASTRA, ARCELOR Construction France, Groupe Arcelor. [www.verbund-decke.de](http://www.verbund-decke.de)
- [1.19] Stützweiten Cofrastra 70 Verbunddecke im Montagezustand. COFRASTRA, ARCELOR Construction France, Groupe Arcelor. [www.verbund-decke.de](http://www.verbund-decke.de)
- [1.20] Stützweiten im Betonierzustand für Holorib- und Super Holorib Verbunddecken. Holorib (Deutschland) GmbH, Blumenstraße 38, D-63069 Offenbach am Main. [www.holorib.de](http://www.holorib.de)
- [1.21] Twilt L., P.H.E. van de Leur, C. Both: Characteristics of the heat transfer for calculating the temperature development in structural steelwork exposed to standard fire conditions under thermocouple control, EC 3 / PT2: N061 (NL).
- [1.22] Upmeyer, J.: Nachweis der Brandsicherheit von kammerbetonierten Verbundbauteilen über Grenzbrandlasten, Schriftenreihe Heft 19, Institut für Stahlbau, Universität Hannover, Dissertation, Hannover, 2001

#### Normen

- [2.1] DIN V ENV 1991-2-2 Eurocode 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke - Einwirkungen im Brandfall, Mai 1997
- [2.2] DIN V ENV 1992-1-2 Eurocode 2 – Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Deutsche Fassung ENV 1192-1-2: 1995, Mai 1997, Beuth Verlag, Berlin
- [2.3] DIN V ENV 1993-1-2 Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Mai 1997



- [2.4] DIN V ENV 1994-1-1 Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau, Februar 1994
- [2.5] DIN V ENV 1994-1-2 Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Juni 1997
- [2.6] EN 1991-1-2 Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, September 2003
- [2.7] prEN 1992-1-2 Eurocode 2 – Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Schlussentwurf, März 2004
- [2.8] prEN 1993-1-2 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, April 2003
- [2.9] prEN 1994-1-1 Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, T Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau, Schlussentwurf, Januar 2004
- [2.10] prEN 1994-1-2 Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung im Brandfall, Final Draft, November 2004
- [2.11] Richtlinie für die Bemessung und Ausführung von Stahlverbundträgern (Kurztitel: Richtlinie für Stahlverbundträger). Ausgabe März 1981, überarbeitete Fassung der Ausgabe Juni 1974. Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.. Berlin: Beuth Verlag
- [2.12] Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1991-2-2 Eurocode 1 – Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Einwirkungen im Brandfall, September 1999
- [2.13] Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1992-1-2 Eurocode 2 - Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, September 1999, Beuth Verlag, Berlin
- [2.14] Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1993-1-2 Eurocode 3– Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, September 1999
- [2.15] Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1994-1-1 Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau; DASt-Richtlinie 104, Nationales Anwendungsdokument (NAD), Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Februar 1994
- [2.16] Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1994-1-2 Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, September 1999



### Anhang A

## Vergleich der Kalt-Traglasten für zentrisch gedrückte Verbundstützen nach Berechnung über Knickspannungslinien oder mit Vorverformungen

Die folgenden zwei Diagramme sind Auszüge aus den Forschungsberichten von Lindner und Bergmann [1.6] [1.12]. Sie zeigen die Abweichung der Traglasten nach einer Berechnung mit den Knickspannungslinien ( $N_k$ ) oder unter Berücksichtigung einer Vorverformung ( $N_{fm}$ ).

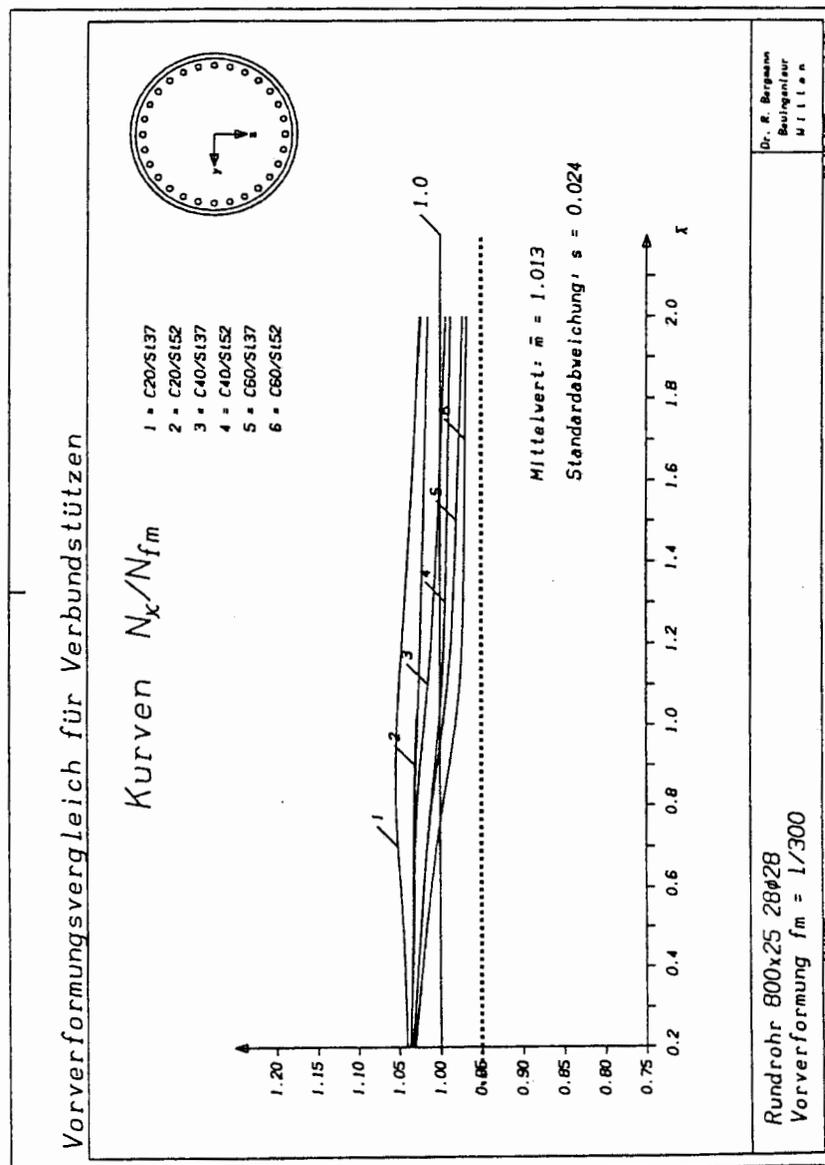


Abbildung A-1: Beispiel für die Abweichungen der Traglasten für Querschnitte der KSL a nach [1.6]

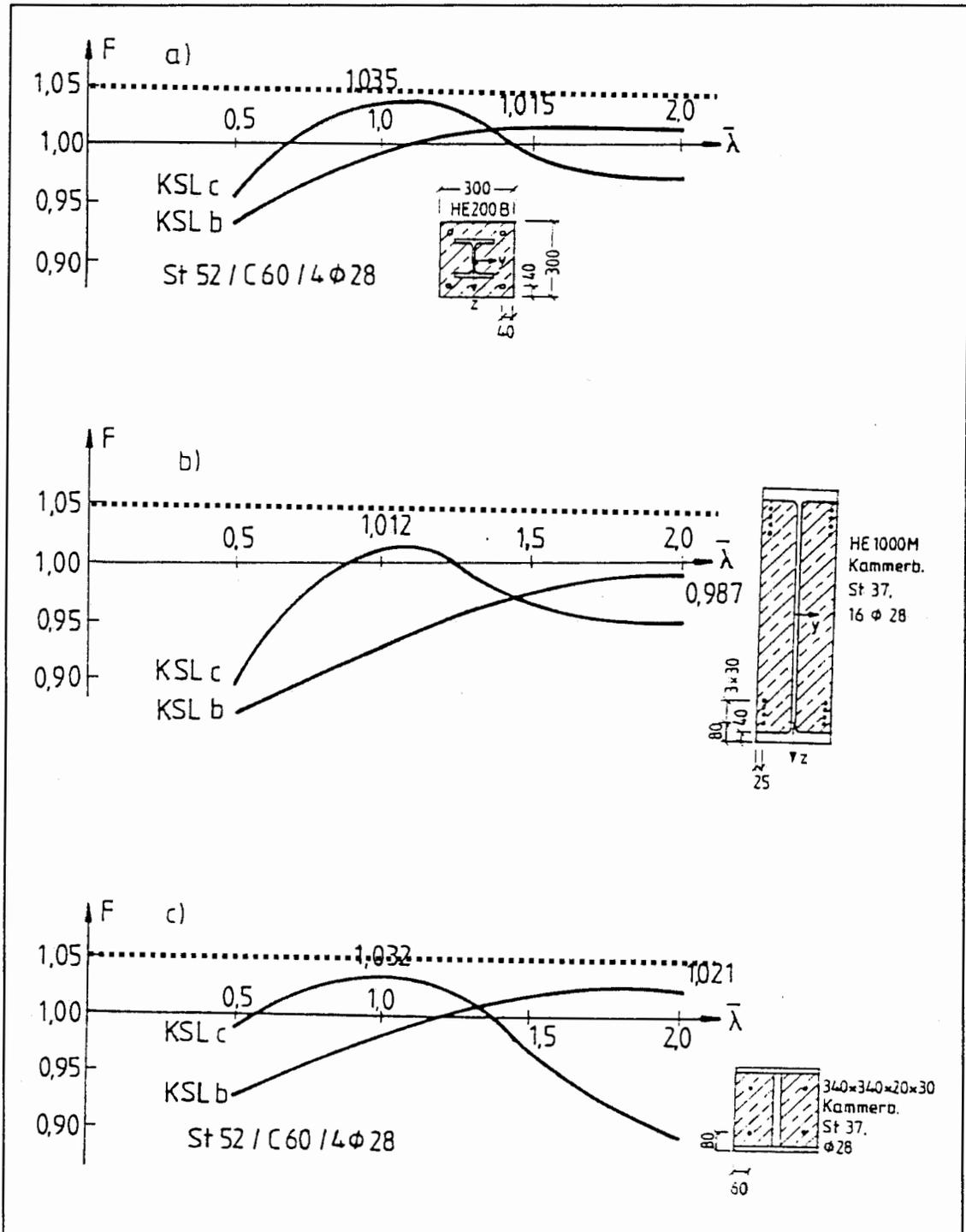


Abbildung A-2: Beispiele für die Abweichungen der Traglasten für Querschnitte der KSL b und c nach [1.12]



## Anhang B

### Vergleichsberechnungen an Verbundbauteilen mit Werkstoffkennwerten nach ENV- und EN-Fassung von Eurocode 4-1-2

Jedes Bauteil wurde mit vier verschiedenen Materialdefinitionen gerechnet:

- B.1 Thermische und mechanische Werkstoffgesetze nach ENV 1994-1-2 [2.5]
- B.2.1 Thermische und mechanische Werkstoffgesetze nach EN 1994-1-2 [2.10]
- B.2.2 Thermische und mechanische Werkstoffgesetze nach EN 1994-1-2 [2.10]  
+ Spannungs-Dehnungsbeziehung von Beton nach ENV-Version
- B.2.3 Thermische und mechanische Werkstoffgesetze nach EN 1994-1-2 [2.10]  
+  $\epsilon_{res} = 0,56$  nach ENV-Version

#### B.1 Kammerbetonierte Verbundstütze

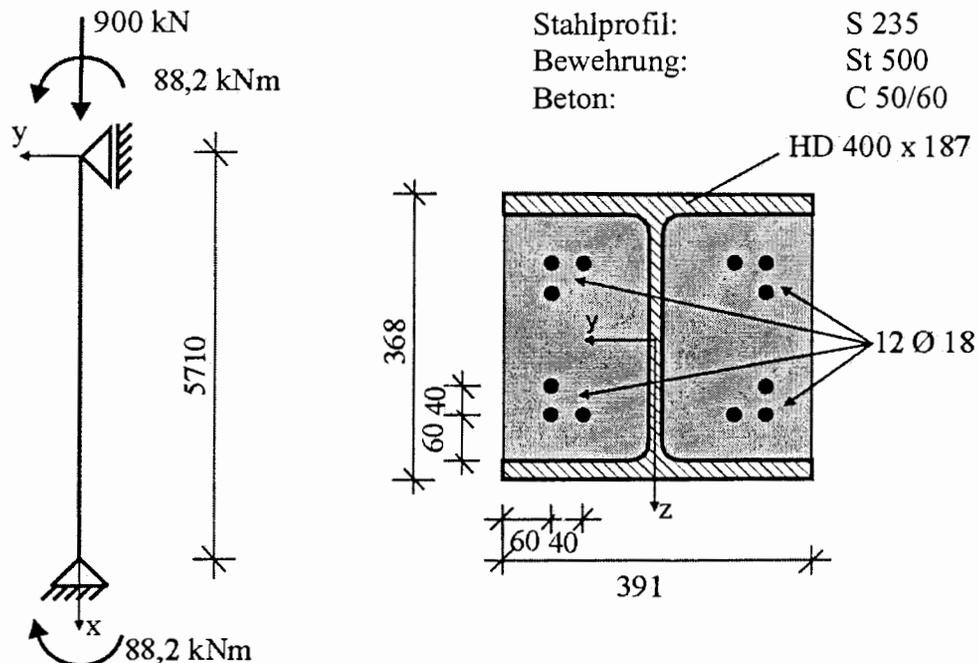


Abbildung B.1-1: Materialfestigkeiten, statisches System, Querschnittsabmessungen und Belastung der kammerbetonierten Verbundstütze

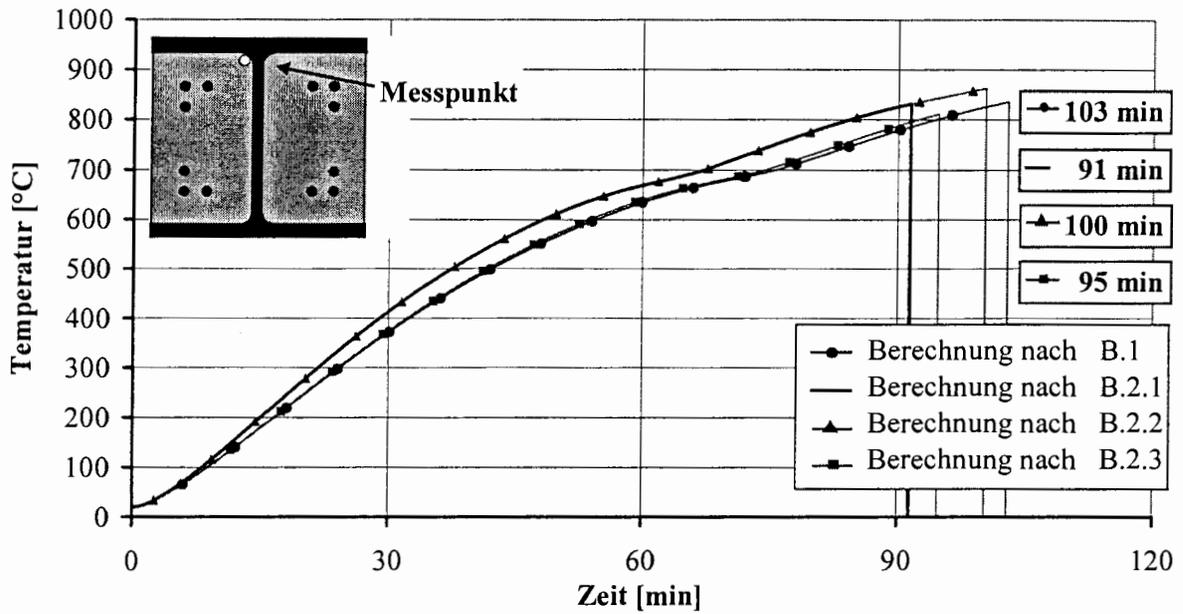


Abbildung B.1-2: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen an der Ausrundung der kammerbetonierten Verbundstütze

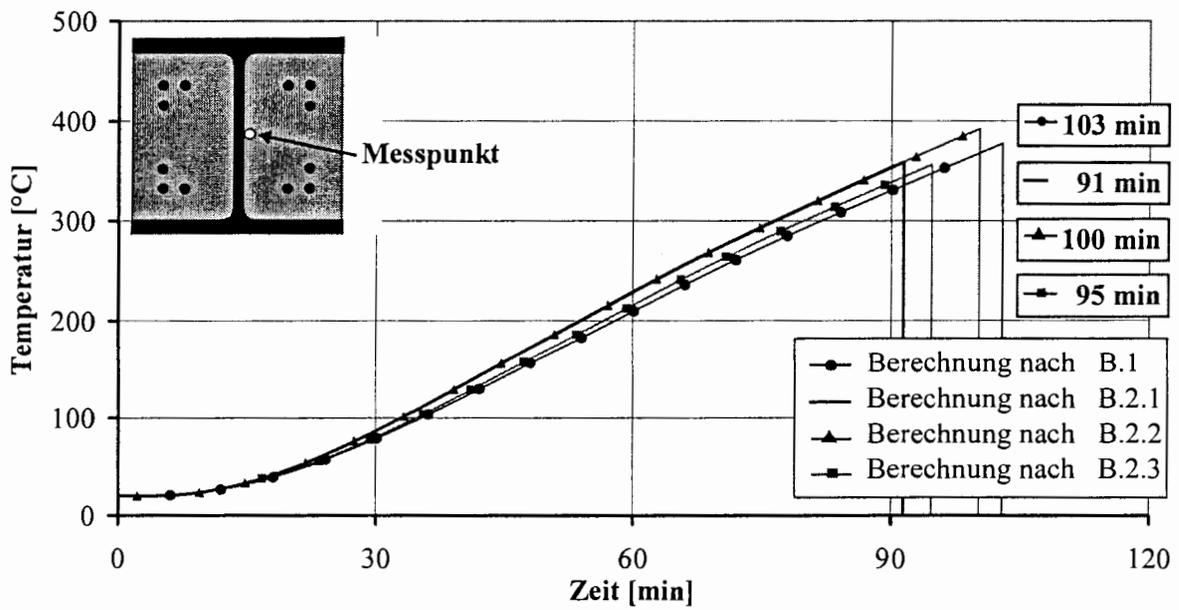


Abbildung B.1-3: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen am Steg der kammerbetonierten Verbundstütze

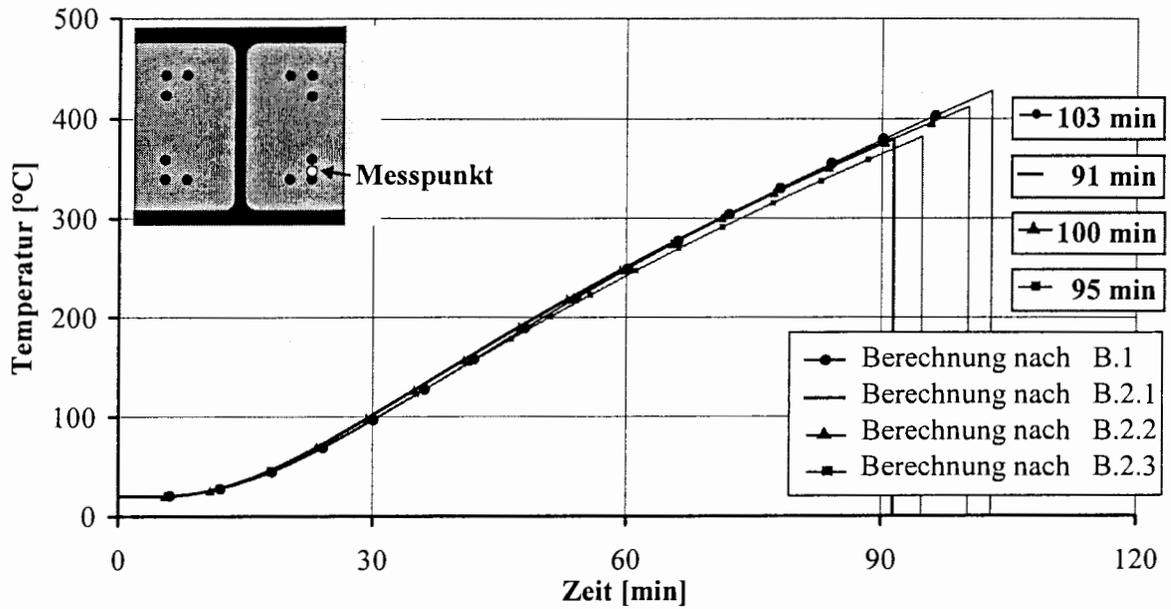
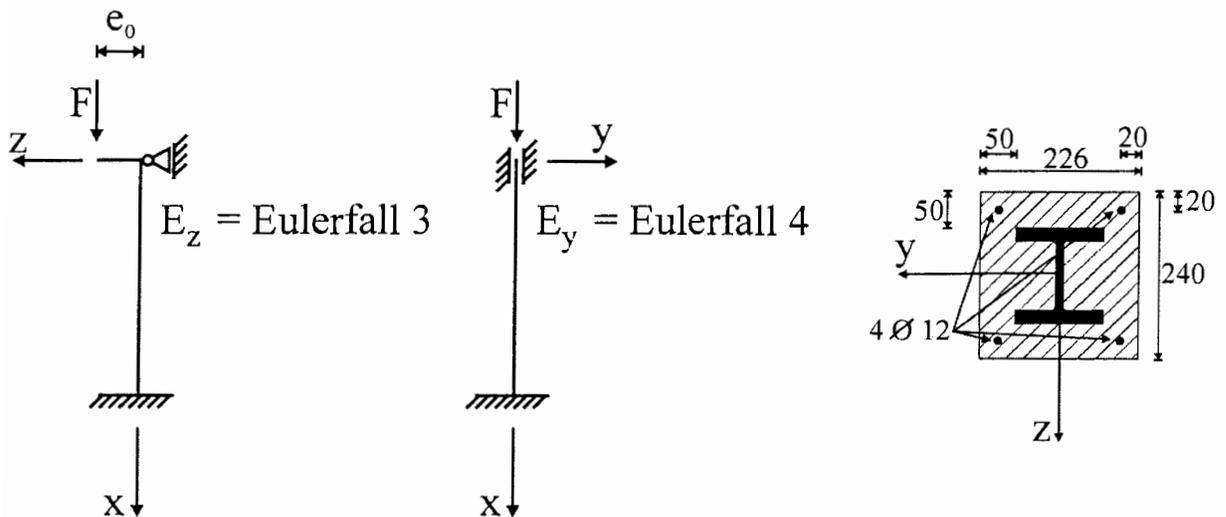


Abbildung B.1-4: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung der kammerbetonierten Verbundstütze



## B.2 Vollständig einbetonierte Verbundstütze



Stützenlänge:  $l_0 = 4200$  mm

Stahlprofil: HE 120 M; S 355

Bewehrung: St 500

Beton: C 35/45

Exzentrizität:  $e_0 = 40$  mm

Einzellast:

$F = 963$  kN

**Abbildung B.2-1: Materialfestigkeiten, statisches System, Querschnittsabmessungen und Belastung der Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil**

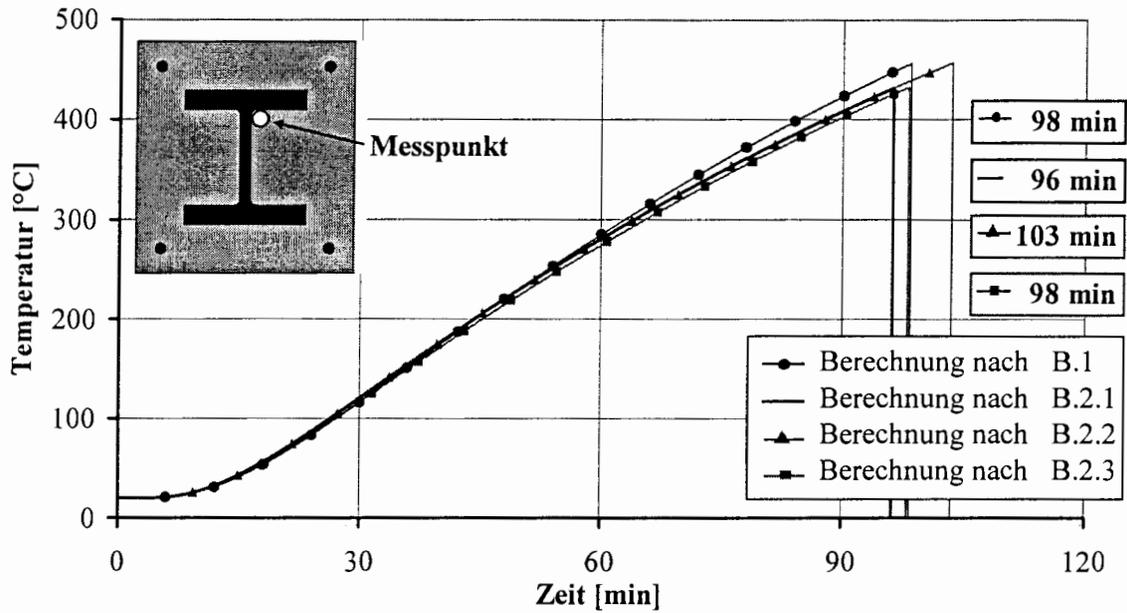


Abbildung B.2-2: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen an der Ausrundung der Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil

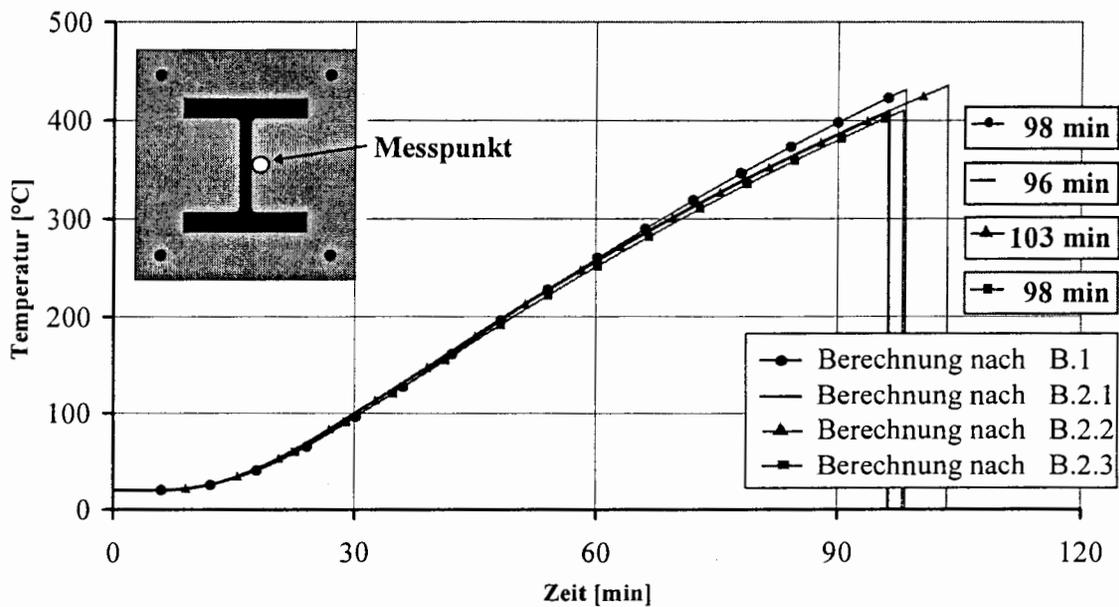


Abbildung B.2-3: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen am Steg der Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil

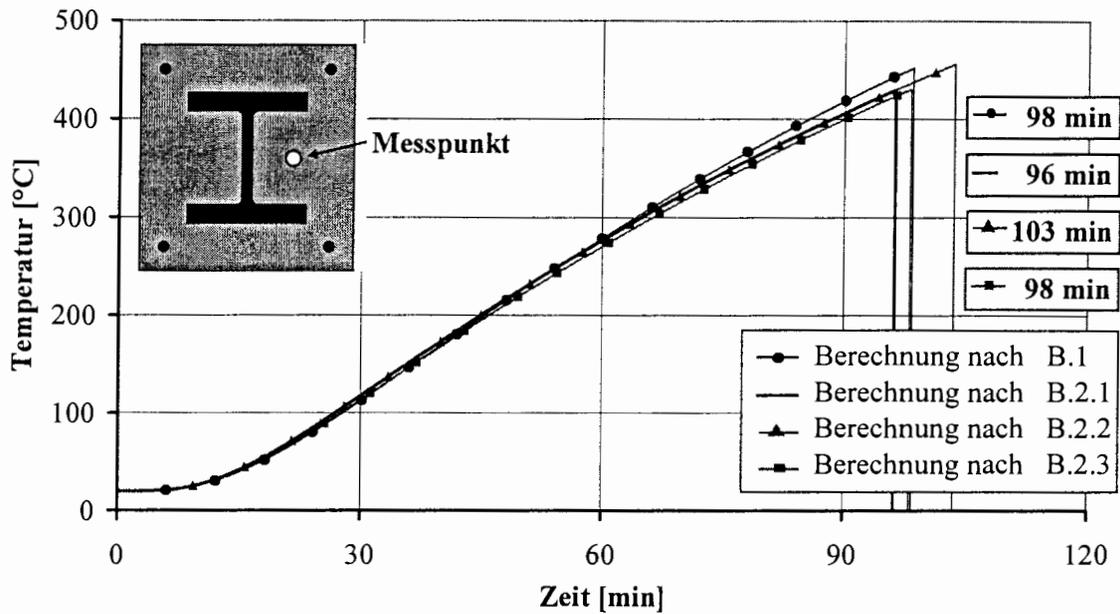


Abbildung B.2-4: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen im Kammerbeton der Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil

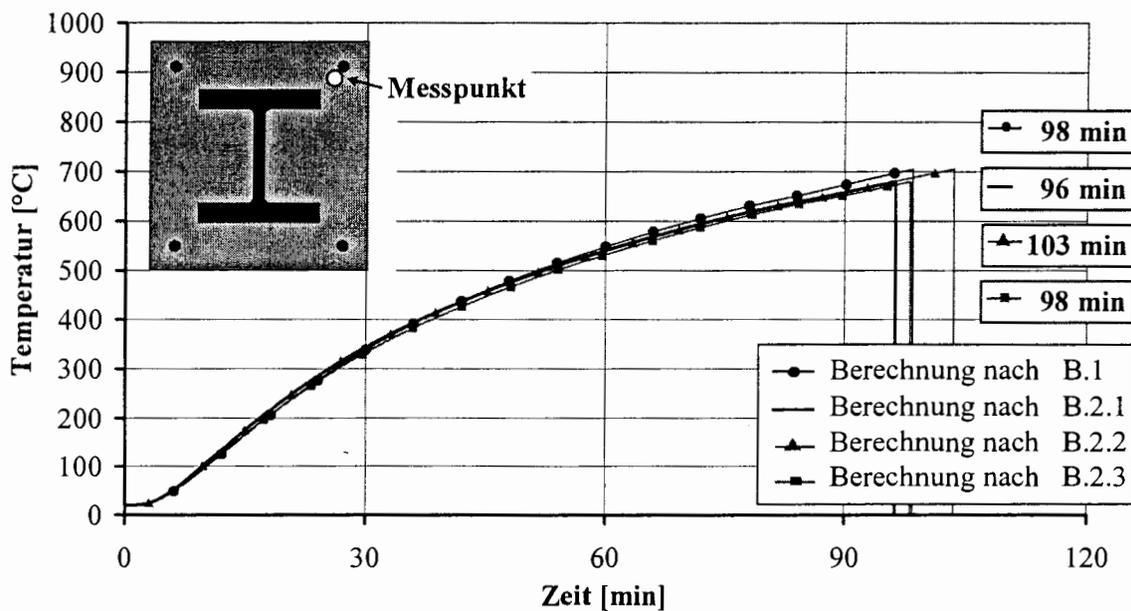
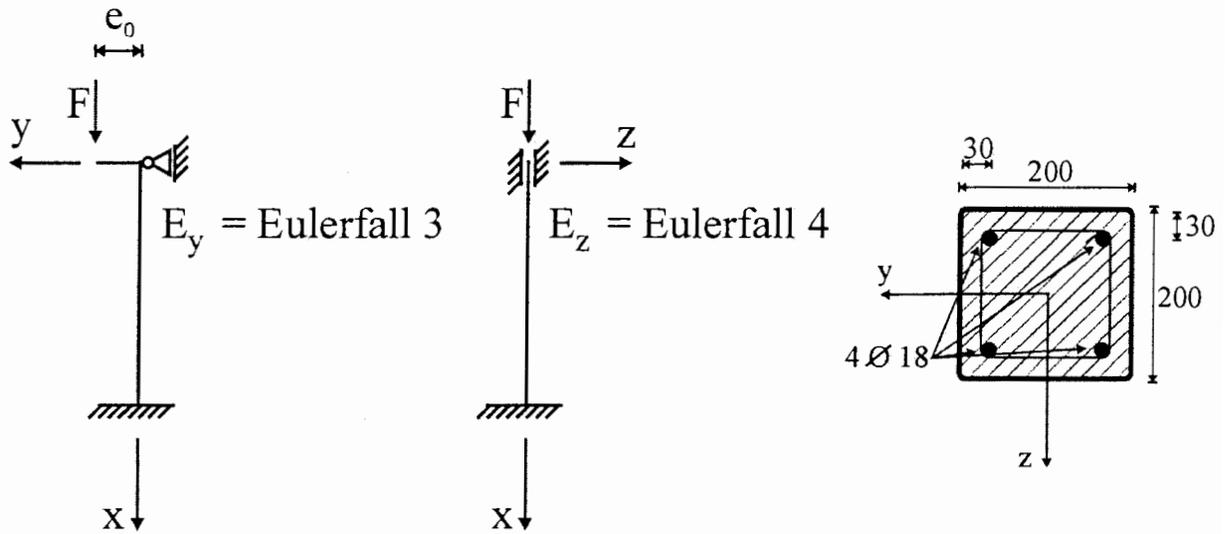


Abbildung B.2-5: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung der Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil



### B.3 Verbundstütze als betongefülltes Hohlprofil



Stützenlänge:  $l_0 = 4200$  mm  
 Stahlprofil: 200x200x6,3; S 235  
 Bewehrung: St 500  
 Beton: C 35/45

Exzentrizität:  $e_0 = 50$  mm  
 Einzellast:  $F = 643$  kN

Abbildung B.3-1: Statisches System, Belastung, Materialfestigkeiten und Querschnittsabmessungen der Verbundstütze als ausbetoniertes Hohlprofil

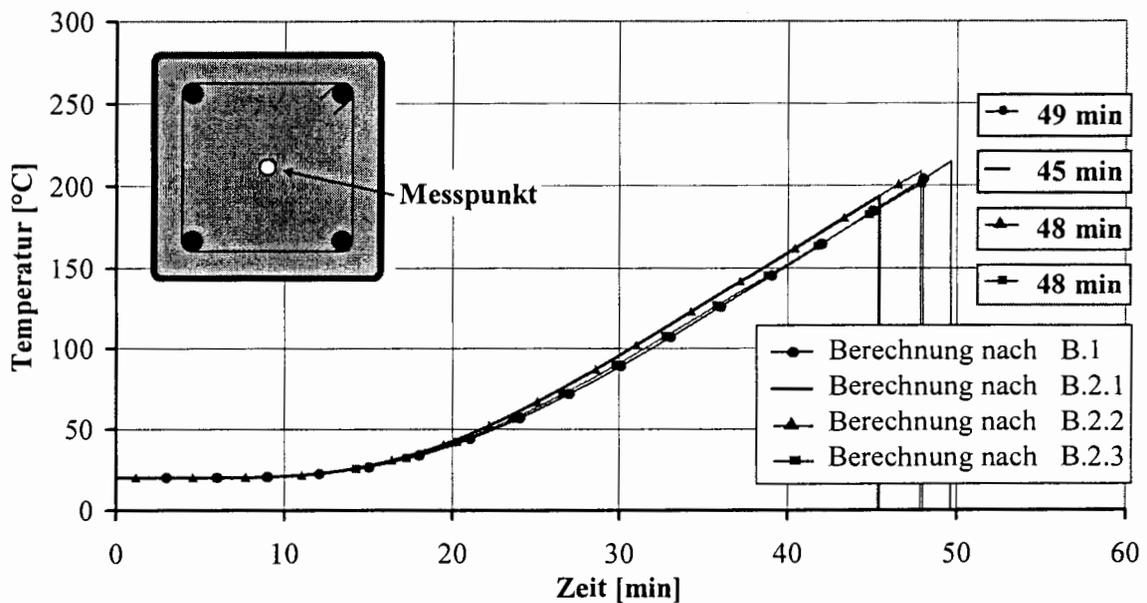


Abbildung B.3-2: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen in Querschnittsmitte der Verbundstütze als ausbetoniertes Hohlprofil

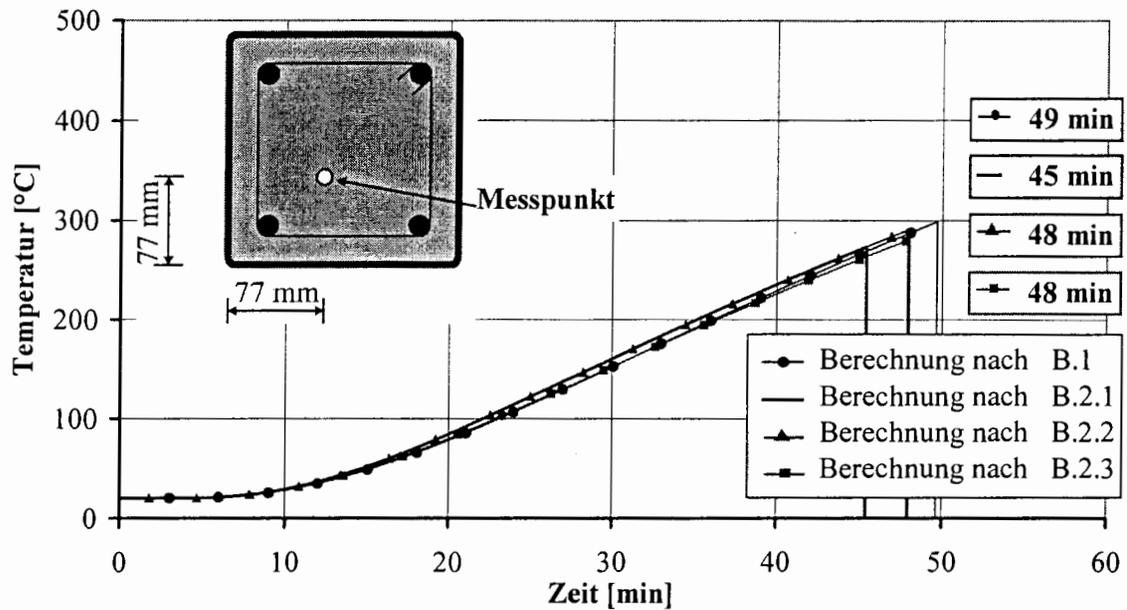


Abbildung B.3-3: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen in 77 mm Tiefe der Verbundstütze als ausbetoniertes Hohlprofil

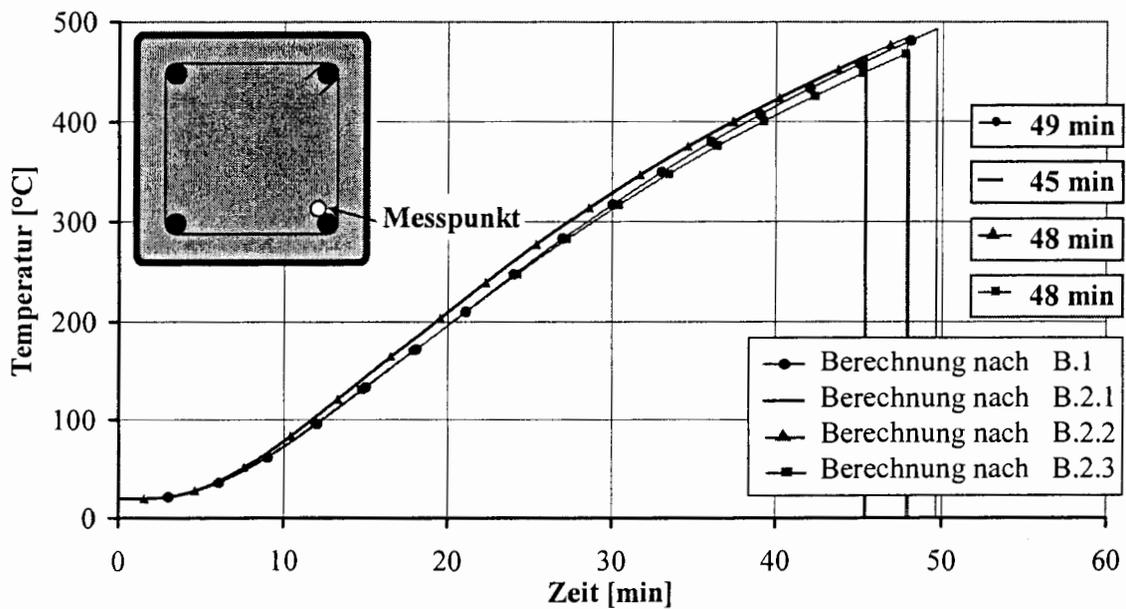


Abbildung B.3-4: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung der Verbundstütze als ausbetoniertes Hohlprofil

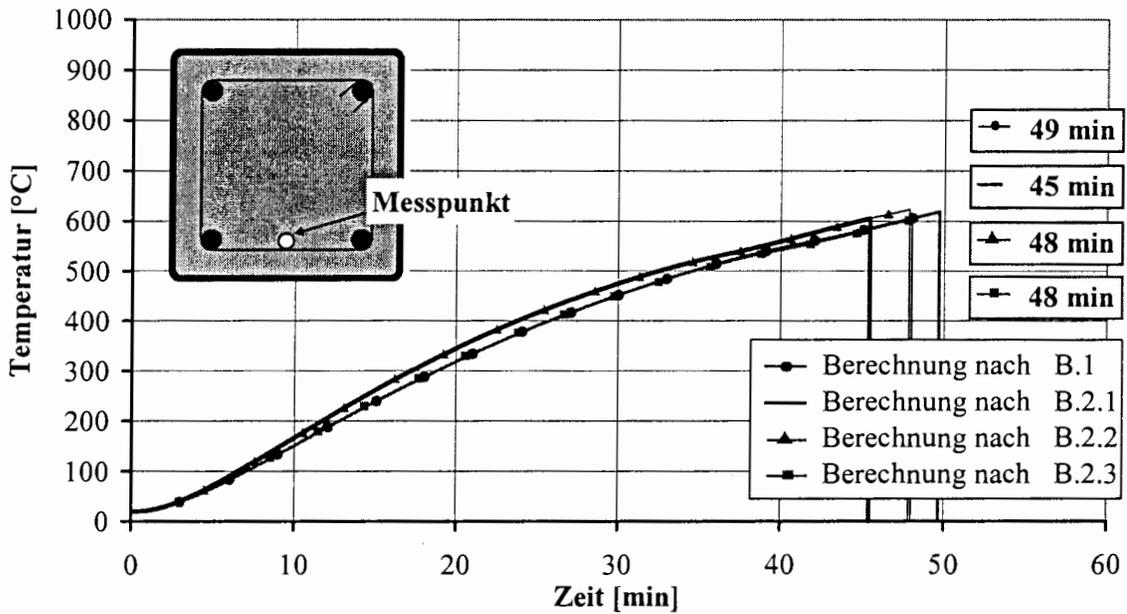


Abbildung B.3-5: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen mittig zwischen den Bewehrungsstäben der Verbundstütze als ausbetoniertes Hohlprofil

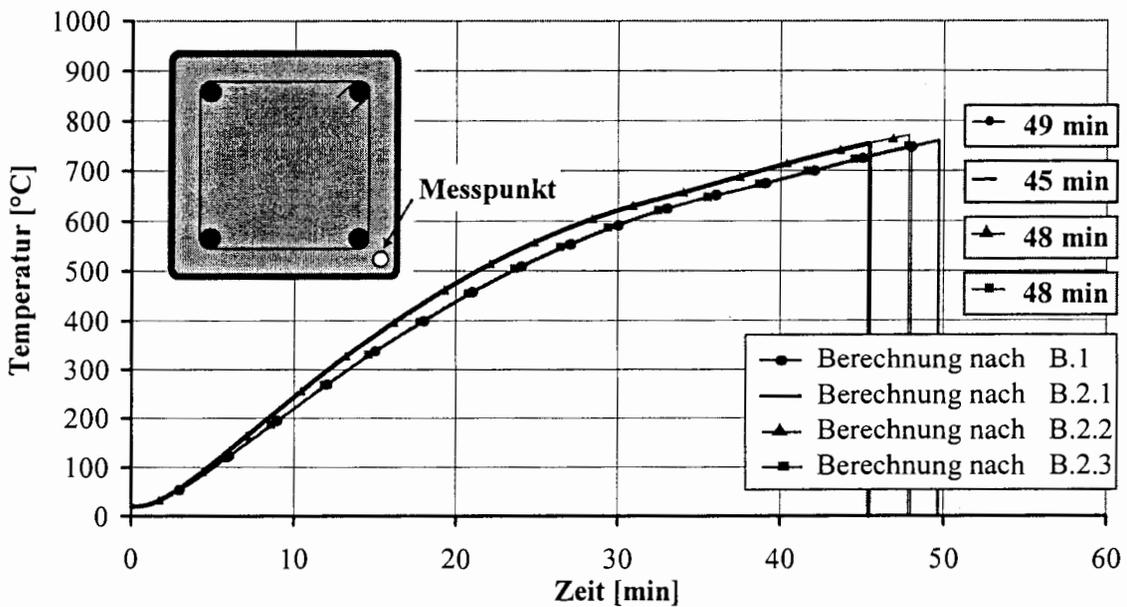


Abbildung B.3-6: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen in der Profillecke der Verbundstütze als ausbetoniertes Hohlprofil



### B.4 Kammerbetonierte Verbundträger

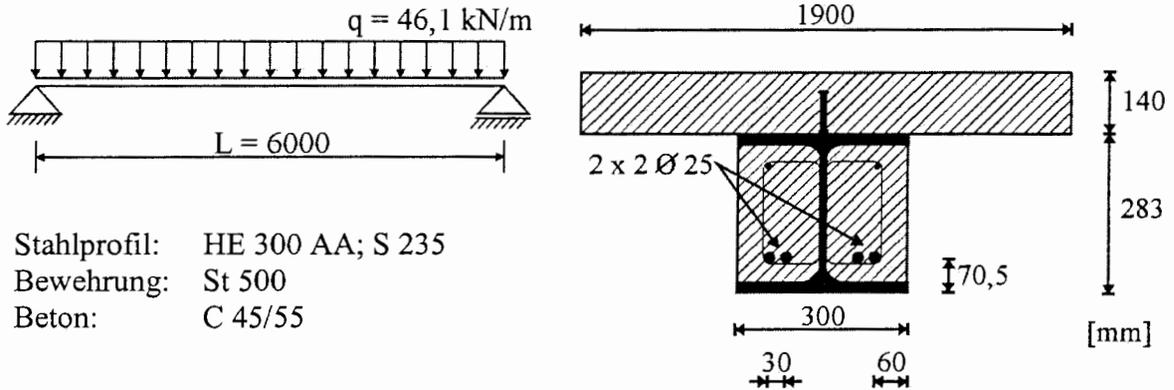


Abbildung B.4-1: Materialfestigkeiten, statisches System, Querschnittsabmessungen und Belastungen des kammerbetonierten Verbundträgers

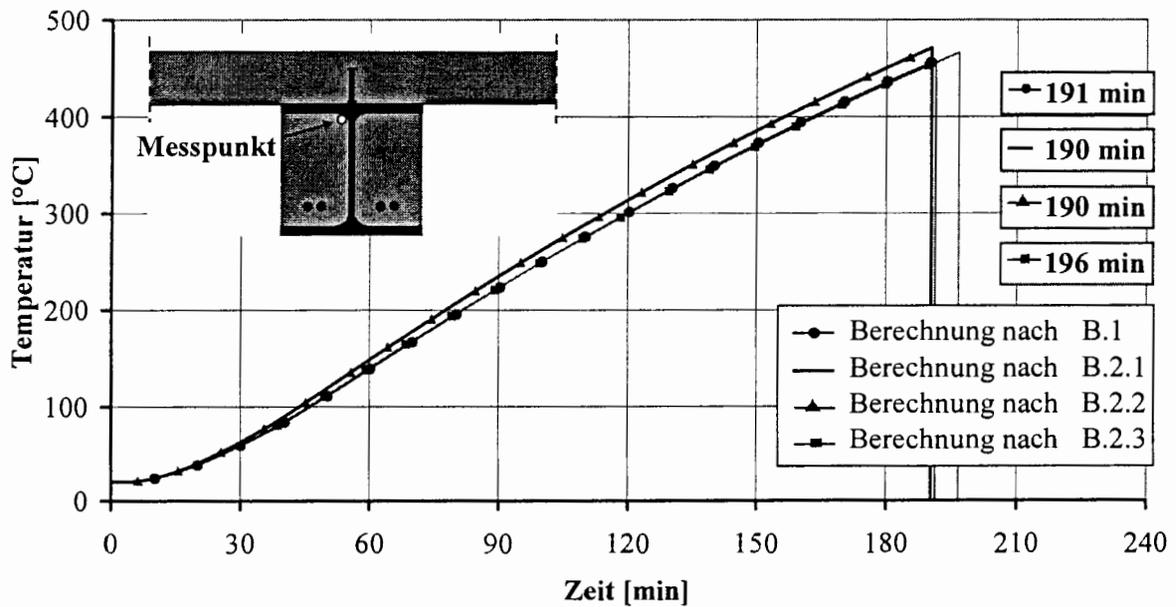


Abbildung B.4-2: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen in der Ausrundung des kammerbetonierten Verbundträgers

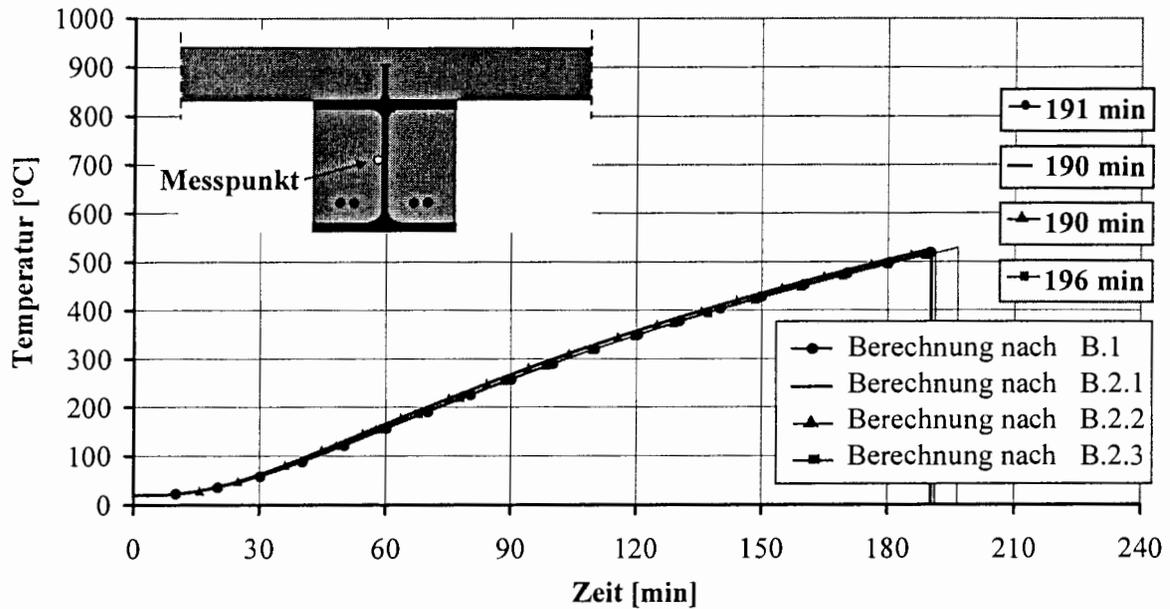


Abbildung B.4-3: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen am Steg des kammerbetonierten Verbundträgers

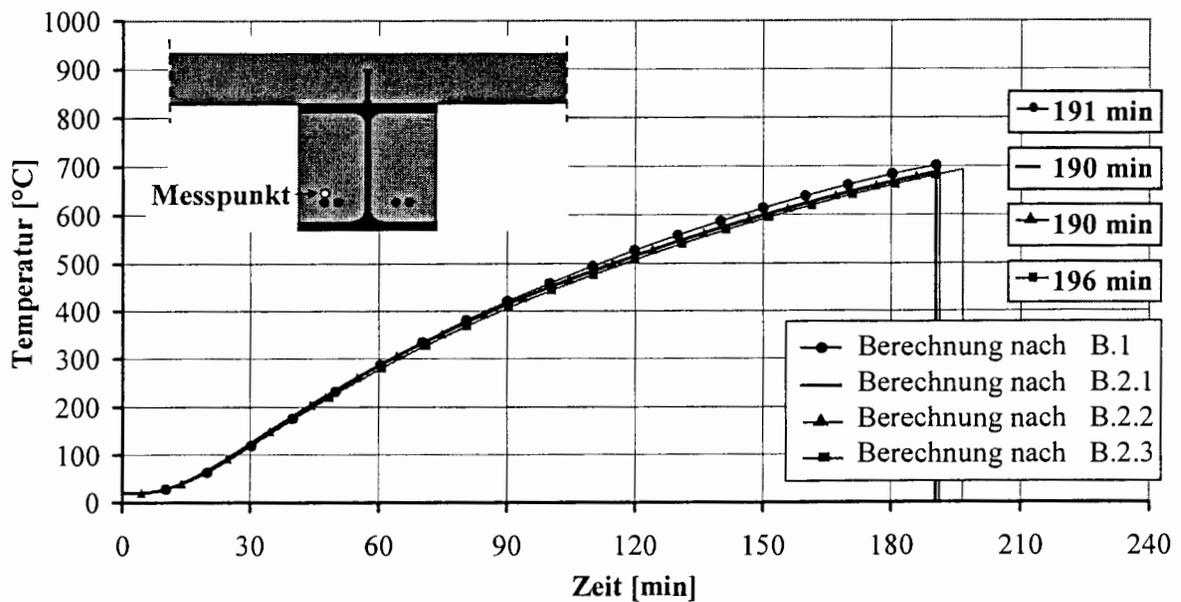


Abbildung B.4-4: Vergleich berechneter Bauteiltemperaturen an der Kammerbewehrung des kammerbetonierten Verbundträgers



**Anhang C**  
**Auswertungstabellen für die Berechnung von Verbunddecken im Brandfall**  
**nach EN 1994-1-2, Anhang D und nach Zulassung**



