

**Bestimmung der thermischen Materialkennwerte von Normalbeton für die brandschutztechnische Bemessung von Verbundbauteilen nach EC 4 Teil 1-2**

**T 3060**

**T 3060**

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2004, ISBN 3-8167-6669-2

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

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

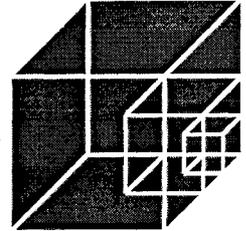
Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

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



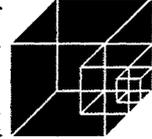
# Forschungsbericht

## Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

P 32-5- 17.13-1051/03

**„Bestimmung der thermischen Materialkennwerte von Normalbeton für  
die brandschutztechnische Bemessung von Verbundbauteilen nach  
EC 4 Teil 1-2“**

- Forschende Stelle:** Institut für Stahlbau  
Universität Hannover  
Appelstraße 9A  
30167 Hannover
- Leitung:** Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann
- Bearbeitung:** Dipl.-Ing. Florian Kettner  
Dipl.-Ing. Stefanie Ostheer
- Förderer:** Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30  
10829 Berlin
- Berichtsumfang:** 52 Seiten
- Datum:** Fassung vom 13. Juli 2004



## Vorwort

Im Zuge der Fortschreibung der Eurocodes wurden bezüglich der Tragwerksbemessung im Brandfall von Verbundtragwerken im Eurocode 4 Teil 1-2 grundlegende Änderungen an den thermischen Betonkennwerten im Vergleich zur ENV-Fassung vorgenommen. Für die brandschutztechnische Bemessung im Stahlverbundbau muss sichergestellt werden, dass das bisherige Sicherheitsniveau zukünftig aufrechterhalten wird.

Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton wurde in der prEN-Fassung so festgelegt, dass innerhalb eines vorgegebenen Bereiches in den einzelnen Mitgliedsländern im Rahmen der Nationalen Anhänge dem nationalen Sicherheitsniveau entsprechende Festlegungen zu treffen sind.

Daher wurde das Institut für Stahlbau der Universität Hannover mit Datum vom 25.02.2003 vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) beauftragt, das Forschungsvorhaben „Bestimmung der thermische Materialkennwerte von Normalbeton für die brandschutztechnische Bemessung von Verbundbauteilen nach EC 4 Teil 1-2“ P 32-5-17.13-1051/03 durchzuführen.

In dieser Arbeit wird ein Regelvorschlag für die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton erarbeitet und im Bezug auf das Sicherheitsniveau untersucht. Dieser Vorschlag wurde mit Prof. Dr. Ing. D. Hosser vom Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig abgestimmt.

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, Juli 2004

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

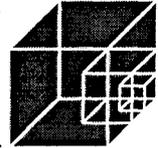
Dipl.-Ing. Florian Kettner

Dipl.-Ing. Stefanie Ostheer



## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung .....	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	1
2	Brandschutztechnische Bemessung im Stahlverbundbau.....	2
2.1	Allgemeines.....	2
2.2	Thermische Materialeigenschaften von Normalbeton .....	2
2.2.1	Dichte .....	2
2.2.2	Spezifische Wärmekapazität .....	4
2.2.3	Wärmeleitfähigkeit.....	6
2.3	Wärmeübergangsbedingungen .....	8
2.3.1	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient und Emissivität .....	8
2.4	Hintergrund zu den Änderungen der thermischen Betonkennwerte .....	9
2.5	Bauteilbemessung nach Eurocode 4 Teil 1-2 (prEN – ENV) .....	11
3	Ableitung des Regelvorschlages für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton .....	14
3.1	Allgemeines.....	14
3.2	Ableitung über die Temperaturleitfähigkeit.....	14
4	Validierung der thermischen Betonkennwerte .....	18
4.1	Stahlbetonquerschnitte .....	18
4.2	Verbundquerschnitte .....	22
4.2.1	Allgemeines.....	22
4.2.2	Verbundstützen mit Kammerbeton .....	24
4.2.3	Verbundstützen mit vollständig einbetonierten Stahlquerschnitten.....	30
4.2.4	Verbundstützen aus ausbetonierten Hohlprofilen .....	37
4.2.5	Verbundträger mit ausbetonierten Kammern.....	42
4.2.6	Zusammenfassung der Vergleichsrechnungen.....	48
5	Zusammenfassung .....	49
6	Literatur .....	50



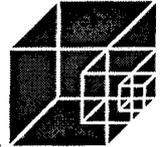
## Bezeichnungen

### Abkürzungen

CEN	Europäisches Komitee für Normung (Comité Européen de Normalisation)
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)

### Lateinische Bezeichnungen

a	Temperaturleitfähigkeit
c	spezifische Wärmekapazität
e	Exzentrizität
E	Eulerfall
$E_{fi,d,t}$	Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchung im Brandfall zum Zeitpunkt t
f	Streckgrenze
F	Einzellast
L	Systemlänge
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, Branddauer
$t_{fi,d}$	Feuerwiderstandsdauer (Eigenschaft des Bauteils oder Tragwerks)



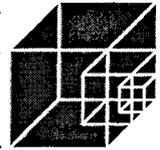
$t_{fi,requ}$	erforderliche Feuerwiderstandsdauer
T	Temperaturfeld
u	Feuchtigkeitsgehalt
W	Wärmequelle oder -senke
x, y, z	Koordinaten

### Griechische Bezeichnungen

$\alpha$	Wärmeübergang
$\beta$	Festigkeit
$\varepsilon$	Emissivität
$\varnothing$	Durchmesser eines Bewehrungsstabes
$\eta$	Lastausnutzungsgrad
$\eta_0$	Lastausnutzungsgrad der Gebrauchslast
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\theta$	Temperatur
$\rho$	spezifische Masse (Dichte)

### Indizes

a	Baustahl
ab	dem Brand abgewandt
c	Beton, konvektiv
cyl	Zylinder
f	Flamme
res	resultierend
s	Betonstahl
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 des Eurocodes für die brandschutztechnische Bemessung von Stahlverbundbauteilen von der ENV- in die EN-Fassung [2.11] sind die thermischen Materialkennwerte von Normalbeton neu definiert worden. Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton wurde dabei so festgelegt, dass innerhalb eines vorgegebenen Bereiches in den einzelnen Mitgliedsländern im Rahmen des Nationalen Anhangs dem nationalen Sicherheitsniveau entsprechende Festlegungen zu treffen sind. Diese national festzulegenden Parameter sind für den Bereich Stahlbetonbau und Stahlverbundbau einheitlich zu formulieren. Dabei muss sichergestellt werden, dass das derzeitige Bemessungsniveau allgemein und die bestehenden Bemessungstabellen und vereinfachten Berechnungsverfahren speziell im Bemessungsergebnis nicht spürbar verändert werden.

Die thermischen Materialkennwerte der Werkstoffe Baustahl, Betonstahl und Beton sind eine fundamentale Festlegung zur brandschutztechnischen Bemessung in den Eurocodes. Sie dienen insbesondere zur Harmonisierung der in numerischen Simulationsverfahren zugrunde gelegten Materialparameter und damit der auf numerischem Wege erzielten Beurteilung zum Feuerwiderstand der Bauteile. Diese Berechnungsgrundlagen sind somit Basis für die Entwicklung zukünftiger vereinfachter Nachweismethoden und den Nachweis für neuartige Querschnittstypen.

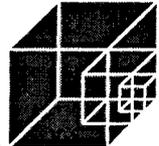
Im Stahlverbundbau existieren sehr unterschiedliche Ausführungsvarianten hinsichtlich der Querschnittsgestaltung. Bei Stützen und Trägern werden Querschnittstypen mit vollständig einbetoniertem, teilweise einbetoniertem und außen liegendem Stahlprofil unterschieden. Das Erwärmungsverhalten dieser Querschnitte ist demzufolge sehr unterschiedlich und wird auch unterschiedlich von den Annahmen bezüglich der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Beton beeinflusst.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel des Vorhabens ist die Erarbeitung eines validierten Regelvorschlages für die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton. Damit soll erreicht werden, dass das bisherige Sicherheitsniveau der brandschutztechnischen Nachweise im Stahlverbundbau nach dem Eurocode aufrechterhalten wird.

Dazu werden numerische Vergleichsrechnungen zum Erwärmungsverhalten unter Brandbeanspruchungen nach der Einheits-Temperaturzeitkurve an ausgewählten Beispielen des Stahlverbundbaus durchgeführt. Für diese Untersuchungen wurden die neuen temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte in das Programmsystem BOFIRE [1.2] am Institut für Stahlbau implementiert.

Zusätzlich zu der Gegenüberstellung berechneter Erwärmungsverläufe auf Basis der bisherigen Regelungen (ENV) und der zukünftigen Regelungen werden auch in Deutschland durchgeführte Brandversuche an Verbundstützen und ein in Belgien durchgeführter Brandversuch an einem Verbundträger in die Untersuchungen miteinbezogen.



## 2 Brandschutztechnische Bemessung im Stahlverbundbau

### 2.1 Allgemeines

Im Juni 1997 wurde die Europäische Vornorm DIN V ENV 1994-1-2 [2.10] für die Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton im Brandfall mit dem dazugehörigen Nationalen Anwendungsdokument [2.15] in Deutschland veröffentlicht. Während der Erprobung in der praktischen Anwendung durch die CEN-Mitglieder wurden mehrfach Änderungen an dieser Norm vorgeschlagen und in überarbeiteten Entwürfen veröffentlicht.

In einem Entwurf des Eurocode 2 Teil 1-2 [2.6] vom Juli 2002 (Tragwerksbemessung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken für den Brandfall) sind die thermischen Materialkennwerte von Normalbeton neu definiert worden. Diese Änderungen sollten nun, um eine einheitliche Formulierung zu gewährleisten, in den Eurocode 4 Teil 1-2 (Tragwerksbemessung von Stahlverbundtragwerken für den Brandfall) übernommen werden.

Im Oktober 2003 erschien der Schlussskizzenentwurf des Eurocodes 4 Teil 1-2 [2.11]. Dieser enthält gegenüber der EC 2-Fassung [2.6] vom Juli 2002 noch einmal geänderte thermische Materialkennwerte von Normalbeton.

Dieser Abschnitt stellt einen Vergleich der relevanten Festlegungen aus den normativen Dokumenten dar. Dabei werden zunächst die thermischen Materialkennwerte und des Weiteren die Wärmeübergangparameter betrachtet. Zusätzlich werden die Hintergründe für die Änderungen der thermischen Materialkennwerte von Normalbeton sowie der Nachweismethoden für die brandschutztechnische Bemessung erläutert.

### 2.2 Thermische Materialeigenschaften von Normalbeton

#### 2.2.1 Dichte

- DIN V ENV 1994-1-2

In der DIN V ENV 1994-1-2 [2.10] ist die Dichte für die thermische Analyse bei normal dichtem quarzhaltigen oder kalkhaltigen Beton als temperaturunabhängig mit  $\rho_c = 2300 \text{ kg/m}^3$  angenommen und kann oberhalb von  $100^\circ\text{C}$  infolge der Verdampfung des freien Wassers um  $100 \text{ kg/m}^3$  reduziert werden.

- Draft prEN 1992-1-2 (July 2002) und Draft prEN 1994-1-2 (October 2003)

In diesen Entwürfen wird die Dichte von Normalbeton nicht mehr als temperaturunabhängig angenommen, sondern verändert sich mit zunehmender Temperatur und ist wie folgt festgelegt:



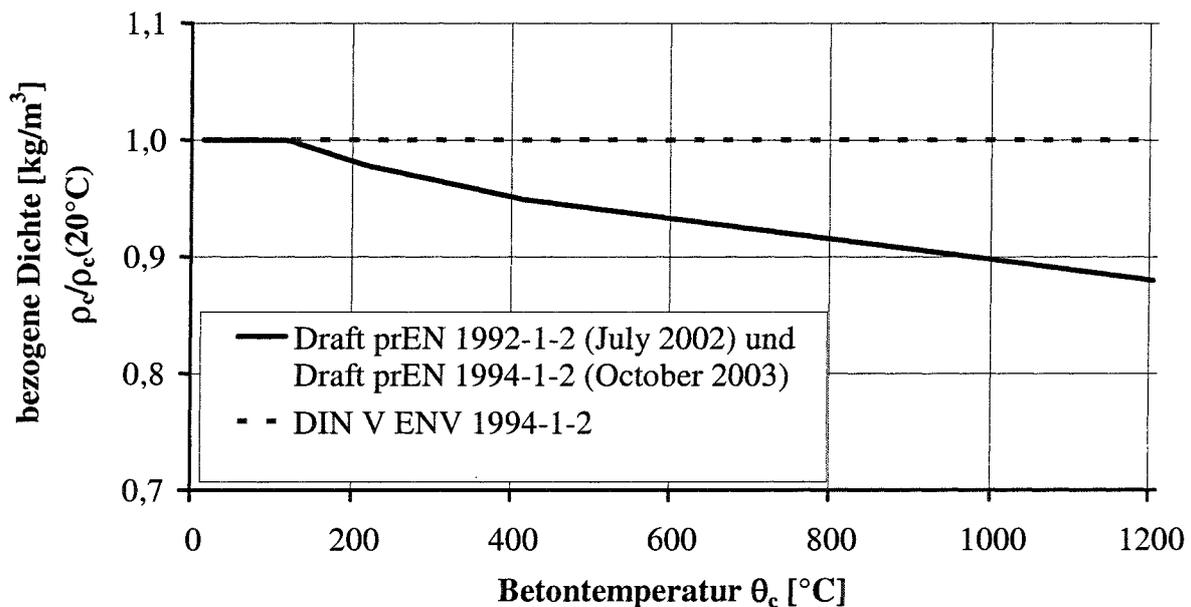
$$\rho_c(\theta_c) = \rho_c(20^\circ\text{C}) \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 115^\circ\text{C} \quad (2.1a)$$

$$\rho_c(\theta_c) = \rho_c(20^\circ\text{C}) \cdot \left( 1 - 0,02 \cdot \frac{\theta_c - 115}{85} \right) \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{für } 115^\circ\text{C} < \theta_c \leq 200^\circ\text{C} \quad (2.1b)$$

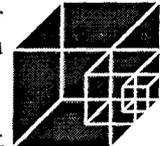
$$\rho_c(\theta_c) = \rho_c(20^\circ\text{C}) \cdot \left( 0,98 - 0,03 \cdot \frac{\theta_c - 200}{200} \right) \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{für } 200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C} \quad (2.1c)$$

$$\rho_c(\theta_c) = \rho_c(20^\circ\text{C}) \cdot \left( 0,95 - 0,07 \cdot \frac{\theta_c - 400}{800} \right) \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{für } 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.1d)$$

mit  $\theta_c$  = Betontemperatur



**Abbildung 2-1:** Vergleich der bezogenen Dichte von Normalbeton nach DIN V ENV 1994-1-2, Draft prEN 1992-1-2 (July 2002) und Draft prEN 1994-1-2 (October 2003)



### 2.2.2 Spezifische Wärmekapazität

- DIN V ENV 1994-1-2

Der Verlauf der spezifischen Wärmekapazität ist in der DIN V ENV 1994-1-2 [2.10] wie folgt durch eine quadratische Gleichung beschrieben:

$$c_c = 900 + 80 \cdot \frac{\theta_c}{120} - 4 \cdot \left(\frac{\theta_c}{120}\right)^2 \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.2)$$

mit  $\theta_c =$  Betontemperatur

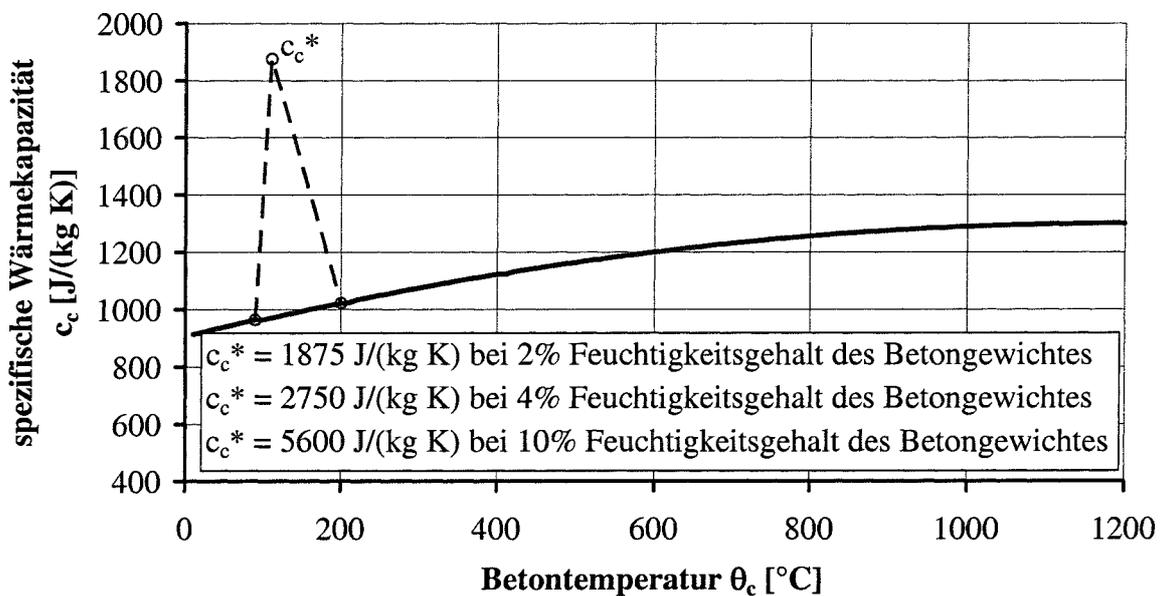


Abbildung 2-2: Spezifische Wärmekapazität  $c_c$  von Normalbeton nach DIN V ENV 1994-1-2

- Draft prEN 1992-1-2 (July 2002)

Die spezifische Wärmekapazität wird in diesem Entwurf durch die nachstehenden vier Gleichungen definiert:

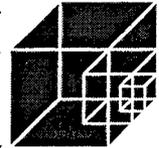
$$c_c(\theta_c) = 900 \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100^\circ\text{C} \quad (2.3a)$$

$$c_c(\theta_c) = 900 + (\theta_c - 100) \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 200^\circ\text{C} \quad (2.3b)$$

$$c_c(\theta_c) = 1000 + (\theta_c - 200) / 2 \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C} \quad (2.3c)$$

$$c_c(\theta_c) = 1100 \quad \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.3d)$$

mit  $\theta_c =$  Betontemperatur



- Draft prEN 1994-1-2 (October 2003)

Die vorstehenden Gleichungen gelten auch nach dem Entwurf des Eurocodes 4 [2.11] vom Oktober 2003. Zusätzlich ist eine weitere Gleichung angegeben, die annähernd den Verlauf dieser vier Gleichungen beschreibt.

$$c_c(\theta) = 890 + 56,2 \cdot \frac{\theta_c}{100} - 3,4 \cdot \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.4)$$

mit  $\theta_c$  = Betontemperatur

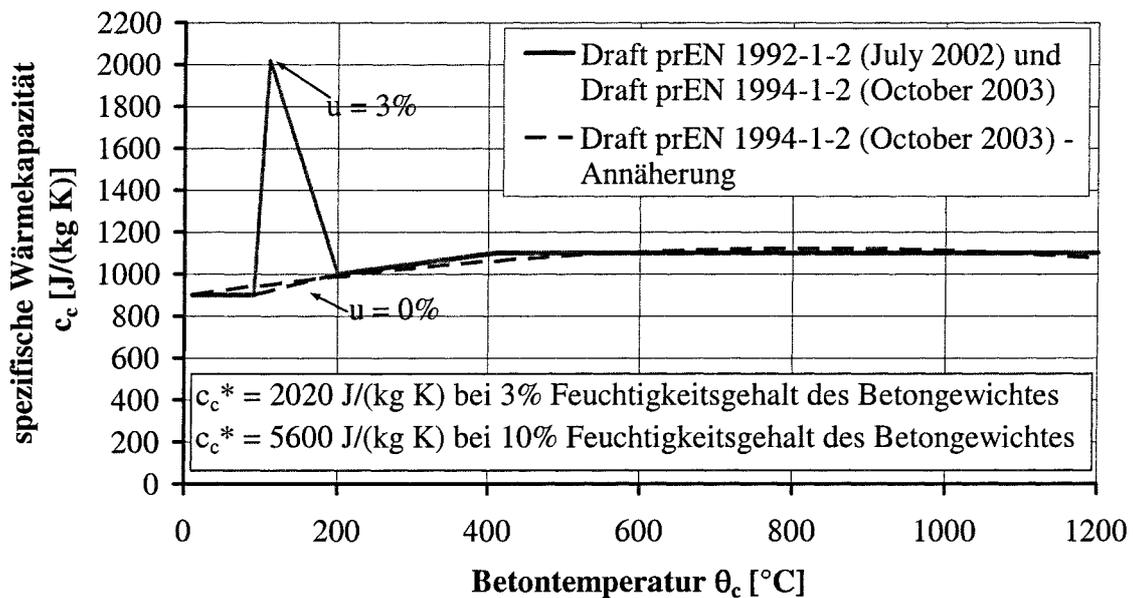


Abbildung 2-3: Spezifische Wärmekapazität  $c_c$  von Normalbeton nach Draft prEN 1992-1-2 (July 2002) und Draft prEN 1994-1-2 (October 2003)

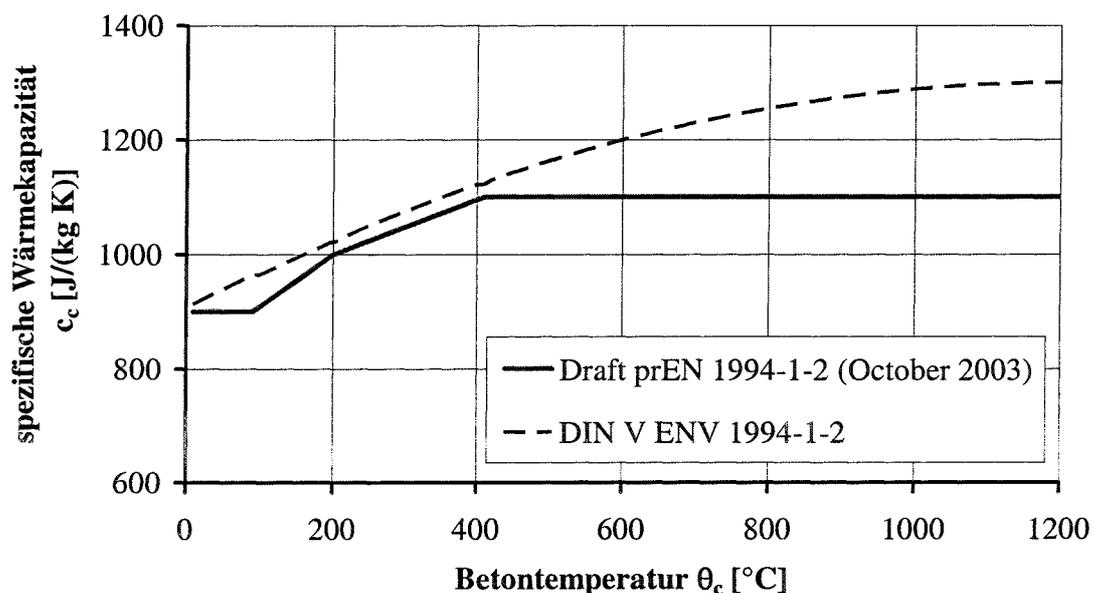


Abbildung 2-4: Vergleich der spezifische Wärmekapazität  $c_c$  nach ENV- und prEN-Fassung des EC 4-1-2 [2.11]

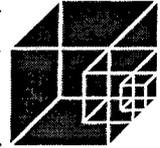


Abbildung 2-4 zeigt eine Gegenüberstellung der Regelungen für die spezifische Wärmekapazität  $c_c$  für Normalbeton nach ENV- und prEN-Fassung des EC 4-1-2 [2.11].

### 2.2.3 Wärmeleitfähigkeit

- DIN V ENV 1994-1-2

Die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton ist in dieser Vornorm durch die nachstehende quadratische Gleichung definiert und in Abbildung 2-5 dargestellt.

$$\lambda_c = 2 - 0,24 \cdot \frac{\theta_c}{120} + 0,012 \cdot \left( \frac{\theta_c}{120} \right)^2 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.5)$$

mit  $\theta_c =$  Betontemperatur

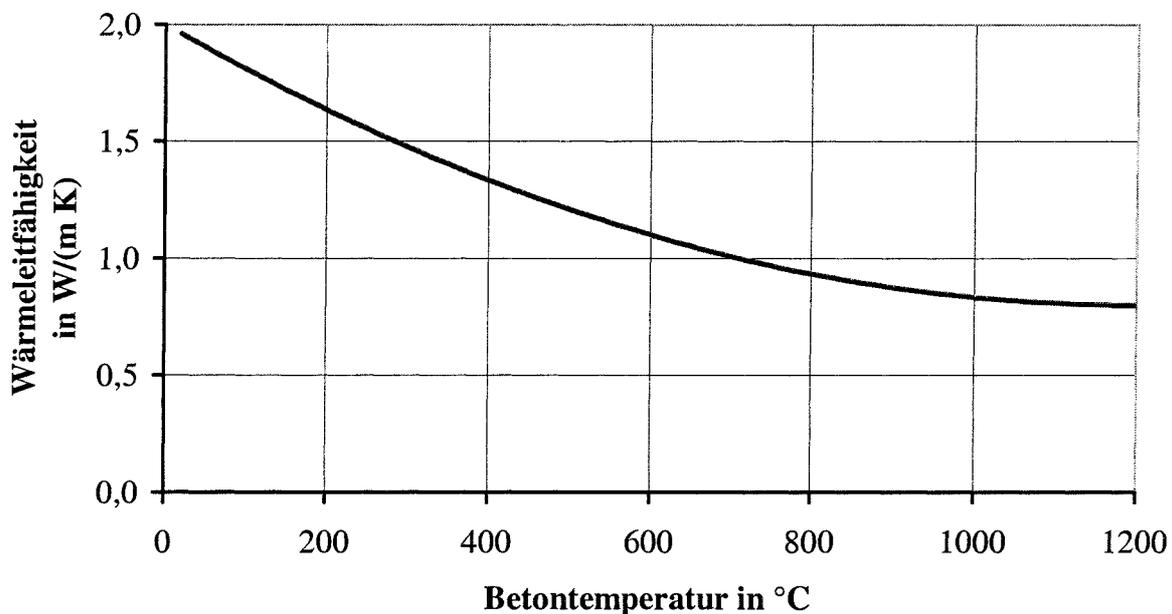


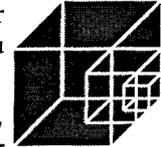
Abbildung 2-5: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  von Normalbeton nach DIN V ENV 1994-1-2 [2.10]

- Draft prEN 1992-1-2 (July 2002)

Im Entwurf des EC 2 von Juli 2002 [2.6] ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  von Normalbeton neu definiert worden. Für sie wird ein Bereich durch eine obere und eine untere Grenze festgelegt. Die obere Grenze entspricht dabei den Angaben der DIN V ENV 1994-1-2 (Gleichung (2.5)). Die untere Grenze weicht wesentlich von den bisherigen Regelungen ab und ist durch die folgende Gleichung definiert:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,163 \cdot \frac{\theta_c}{120} + 0,0082 \cdot \left( \frac{\theta_c}{120} \right)^2 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.6)$$

mit  $\theta_c =$  Betontemperatur



Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit ist innerhalb dieses vorgegebenen Bereiches (siehe Abbildung 2-6) in den einzelnen Mitgliedsländern im Rahmen des Nationalen Anhanges dem nationalen Sicherheitsniveau entsprechend festzulegen.

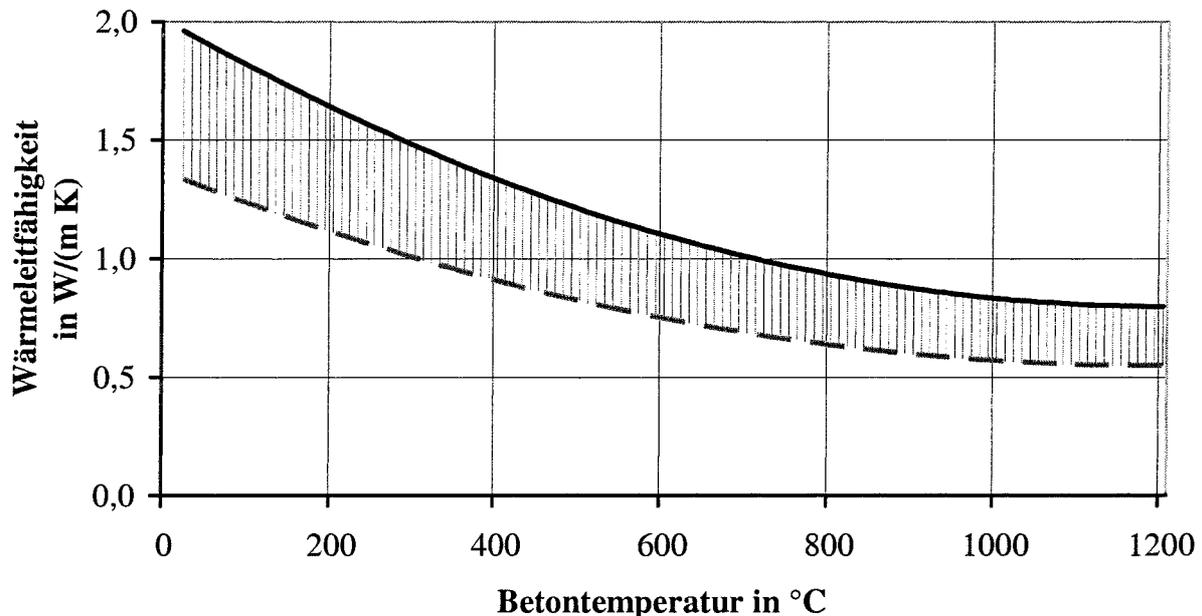


Abbildung 2-6: Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  von Normalbeton nach Draft prEN 1992-1-2 (July 2002) [2.6]

- Draft prEN 1994-1-2 (October 2003)

In diesem Entwurf des Eurocodes 4 [2.11] wurde die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  von Normalbeton nochmals neu definiert. Der Verlauf der unteren Grenze hat sich dabei nicht verändert, aber die Gleichung lautet nun wie folgt:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \cdot \frac{\theta_c}{100} + 0,0057 \cdot \left( \frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

Die obere Grenze für den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit entspricht nicht mehr dem der DIN V ENV 1994-1-2, sondern wird durch die Gleichung (2.8) beschrieben und ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \cdot \frac{\theta_c}{100} + 0,0107 \cdot \left( \frac{\theta_c}{100} \right)^2 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.8)$$

Ein Vergleich der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton nach der ENV- und prEN-Fassung des EC 4-1-2 ist in Abbildung 2-7 dargestellt.

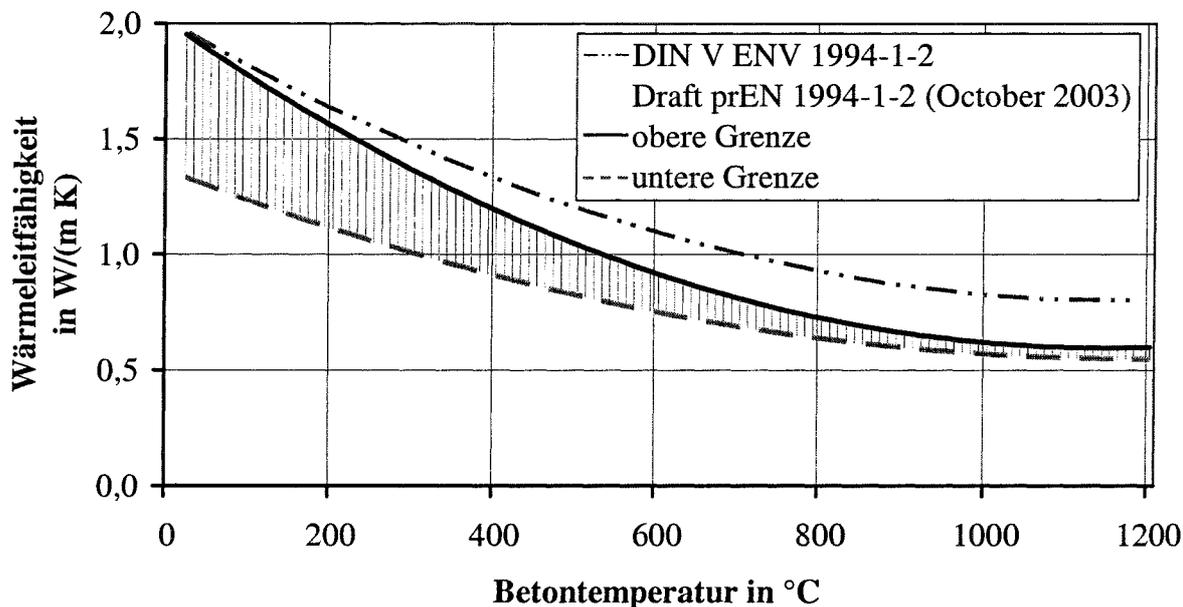
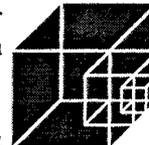


Abbildung 2-7: Vergleich der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  nach der ENV- und prEN-Fassung des EC 4-1-2 [2.11]

## 2.3 Wärmeübergangsbedingungen

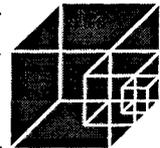
### 2.3.1 Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient und Emissivität

Als Wärmeübergangsbedingungen sind zum einen der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c$  und zum anderen die resultierende Emissivität  $\epsilon_{res}$  zu nennen. Die resultierende Emissivität  $\epsilon_{res}$  ist das Produkt aus der Emissivität für den Werkstoff  $\epsilon_m$  und für die Flamme  $\epsilon_f$ .

$$\epsilon_{res} = \epsilon_m \cdot \epsilon_f \quad [-] \quad (2.9)$$

mit  $\epsilon_{res}$  resultierende Emissivität  
 $\epsilon_m$  Emissivität des Werkstoffes  
 $\epsilon_f$  Emissivität der Flamme

Die Werte für  $\alpha_c$ ,  $\epsilon_m$  und  $\epsilon_f$  sind für die brandschutztechnische Bemessung in den Eurocodes festgelegt. Eine Gegenüberstellung dieser Größen ist in Tabelle 2-1 dargestellt. Dabei sind die zum jetzigen Zeitpunkt maßgebenden Werte fett dargestellt.



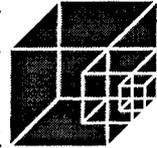
DOKUMENT	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient		Emissivitäten				
	Brand zugewandt $\alpha_{c,zu}$	Brand abgewandt $\alpha_{c,ab}$	Stahl $\epsilon_{m,Stahl}$	Beton $\epsilon_{m,Beton}$	Flamme $\epsilon_f$	$\epsilon_{res,Stahl}^{2)}$	$\epsilon_{res,Beton}^{2)}$
	$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	$\left[ \frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>Vornorm und NAD</b>							
DIN V ENV 1991-2-2 [2.4]	25	9	0,7 <sup>1)</sup>	0,7 <sup>1)</sup>	0,8	0,56	0,56
zugehöriges NAD [2.12]	25	9	0,9	0,9	0,8	0,72	0,72
DIN V ENV 1992-1-2 [2.5]	-	-	-	(0,9)	(0,8)	-	<b>(0,72)</b>
zugehöriges NAD [2.13]	-	-	-	-	-	-	-
DIN V ENV 1993-1-2 [2.7]	-	-	0,625	-	0,8	<b>0,5</b>	-
zugehöriges NAD [2.14]	-	-	-	-	-	-	-
DIN V ENV 1994-1-2 [2.10]	-	-	0,625	0,7	(0,8)	(0,5)	(0,56)
zugehöriges NAD [2.15]	-	-	0,7	0,7	(0,8)	<b>(0,56)</b>	<b>(0,56)</b>
<b>Entwurf</b>							
Draft prEN 1992-1-2 (July 2002) [2.6]	-	-	-	0,7	(1,0)	-	(0,7)
Draft prEN 1993-1-2 (April 2003) [2.8]	-	-	0,7; 0,4 <sup>5)</sup>	-	(1,0)	(0,7); (0,4) <sup>5)</sup>	-
Draft prEN 1994-1-2 (October 2003) [2.11]	-	-	0,7	0,7	(1,0)	(0,7)	(0,7)
<b>Deutsche Norm</b>							
DIN EN 1991-1-2 [2.3]	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.							
1) sofern in der materialbezogenen Norm nicht anders geregelt							
2) resultierende Emissivität $\epsilon_{res} = \epsilon_f \cdot \epsilon_m$							
3) wenn die Strahlung gesondert berücksichtigt wird							
4) wenn die Strahlung nicht gesondert berücksichtigt wird							
5) für nichtrostenden Stahl nach Anhang C							

**Tabelle 2-1: konvektive Wärmeübergangskoeffizienten und Emissivitäten nach den Eurocodes bei ETK – Brandbeanspruchung**

Aus Tabelle 2-1 wird deutlich, dass sich die resultierende Emissivität für den Verbundbau in der prEN-Fassung [2.11] des EC 4-1-2 gegenüber der ENV-Fassung [2.10] von 0,56 auf 0,7 geändert hat.

## 2.4 Hintergrund zu den Änderungen der thermischen Betonkennwerte

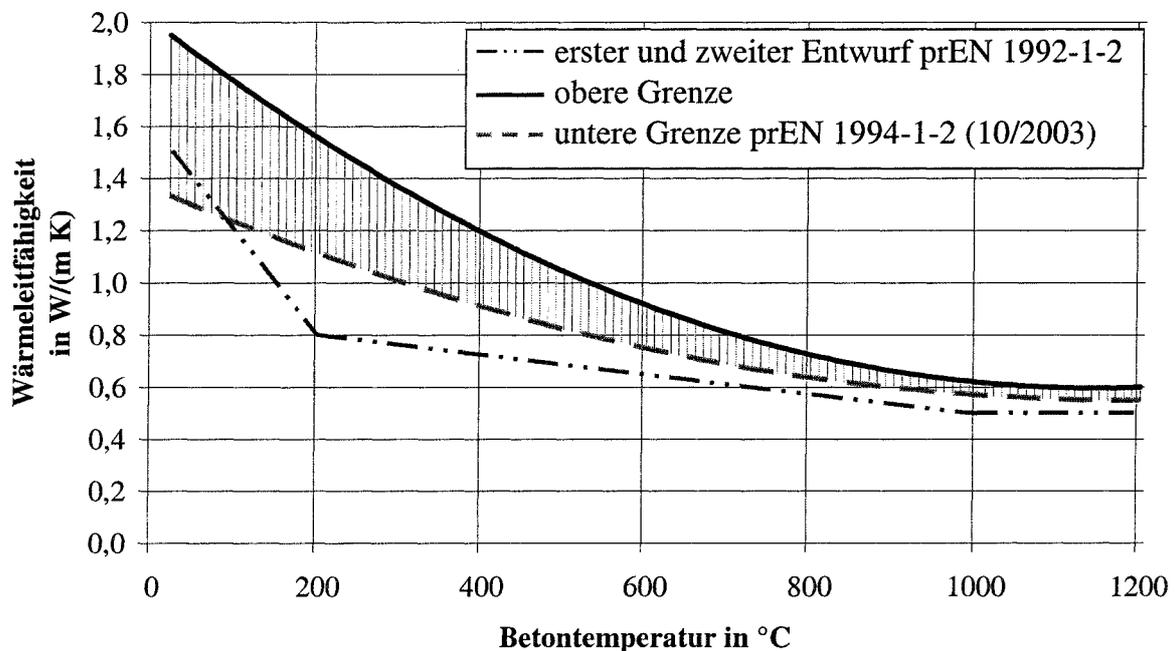
Während der Arbeiten an den Entwürfen für den EC 2 Teil 1-2 wurde vor allem von nordeuropäischen Staaten Kritik an der bisherigen Formulierung für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton  $\lambda_c$  geübt. Aufgrund von Vergleichen zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen von Massiv- und Hohlplatten 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. Daraufhin fanden intensive Beratungen mit dem Project Team für Verbundkonstruktionen (EC 4 Teil 1-2) statt, mit dem Ziel, dass vereinbarungsgemäß die thermischen und mechanischen Materialeigenschaften von Beton aus dem EC 2 Teil 1-2 übernommen werden sollen. Dabei konnten die Bedenken gegenüber den „neuen“ Werten nicht beseitigt werden. Deshalb wurde ein Kompromiss vereinbart, nach dem beide Funktionsverläufe der Wärmeleitfähigkeit in die prEN-Fassung übernommen wurden. Die Entscheidung, welcher Funkti-



onsverlauf angewendet werden darf, wurde so geregelt, dass die Festlegung über den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von den einzelnen Mitgliedsländern im Rahmen der „National festgelegten Parameter“ dem nationalen Sicherheitsniveau entsprechend zu treffen ist. [1.12]

Ein am 3. Juli 2001 erschienener Hintergrundbericht von Anderberg [1.1] soll die Gültigkeit der im ersten und zweiten Entwurf der prEN 1992-1-2 verwendeten thermischen Eigenschaften von Beton bestätigen.

Die thermische Wärmeleitfähigkeit des ersten und zweiten Entwurfs der prEN 1992-1-2 entspricht nicht den Werten des neusten Entwurfs des EC 4-1-2 vom Oktober 2003 [2.11]. Ein Vergleich der thermischen Wärmeleitfähigkeit dieser Entwürfe ist in Abbildung 2-8 dargestellt.



**Abbildung 2-8:** thermische Wärmeleitfähigkeit nach dem ersten und zweiten Entwurf der prEN 1992-1-2 im Vergleich zum Schlussentwurf der prEN 1994-1-2 vom Oktober 2003

Der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit nach dem ersten und zweiten Entwurf des EC 2-1-2 liegt unterhalb der unteren Grenze nach dem Entwurf des EC 4-1-2 vom Oktober 2003.

In den Untersuchungen von Anderberg [1.1] werden sechs verschiedene Computersimulationen beschrieben, die die gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Berechnungen unter Verwendung der geänderten thermischen Kennwerte an Stahlbetonbauteilen veranschaulichen sollen.

Es wurden folgende Bauteile untersucht:

- vorgespannte TT-Deckenplatte (über 60 min getestet von TNO, 1977)
- vorgespannte TT-Deckenplatte (über 60 min getestet in Schweden, 1978)



- Hohldielenplatte (über 200 min getestet von VTT, 1991)
- Hohldielenplatte (über 200 min getestet in Finnland, 1991)
- 120 mm dicke Betonwand (über 33 min getestet in Dänemark, 1999)
- 150 mm dicke Betonwand (über 65 min getestet in Dänemark, 1999)
- Hohldielenplatte (über 120 min getestet in Großbritannien, 1969)

Durch die vergleichenden Simulationsrechnungen und die Gegenüberstellung von Versuchswerten wurde festgestellt, dass sich die Berechnungsergebnisse auf Grundlage der Materialkennwerten für Normalbeton nach DIN V ENV 1992-1-2 [2.5] weit auf der sicheren Seite befinden und Temperaturen liefern, die bis zu 90°C über den in den Brandversuchen ermittelten Werten liegen. Mit den Betonkennwerten des ersten und zweiten Entwurfs des prEN 1992-1-2 aus Abbildung 2-8 ergab sich eine bessere Übereinstimmung mit den in Versuchen gemessenen Temperaturen.

Das Projekt-Team vom EC 4-1-2 hat sich von der wissenschaftlichen Substanz der Untersuchungen von Anderberg [1.1] aus zwei Gründen nicht überzeugen können. Erstens wird die Anzahl der simulierten Versuche als viel zu klein angesehen. Für die Regelungen in der ENV-Fassung waren hunderte von Versuchen simuliert worden. Zweitens scheinen insbesondere die Versuche mit den Hohldielen für eine Ableitung von thermischen Materialkennwerten wegen der zusätzlichen Hohlraumproblematik nicht geeignet zu sein.

Dennoch hat das Projekt-Team mit dem Ziel, in jedem Fall einheitliche Regelungen im EC 2 und EC 4 zu finden, dem oben beschriebenen Kompromiss (siehe Abschnitt 2.2) zugestimmt.

## 2.5 Bauteilbemessung nach Eurocode 4 Teil 1-2 (prEN – ENV)

Die Bemessung von Verbundtragwerken im Brandfall kann durch eines der drei folgenden Verfahren (Stufe 1 bis 3) erfolgen:

Stufe 1: Bemessung von Einzelbauteilen mit tabellarischen Daten

Die folgenden Bauteile können mit Hilfe von Tabellenwerten nachgewiesen werden:

- Verbundträger mit ausbetonierten Kammern,
- Verbundstützen mit vollständig einbetonierten Stahlquerschnitten,
- Verbundstützen mit Kammerbeton,
- Verbundstützen aus betongefüllten Hohlprofilen.

Diese Nachweismethode beschränkt sich in der Regel darauf, die Querschnittsabmessungen des zu untersuchenden Bauteils mit Werten zu vergleichen, die zum Erreichen der vorgesehenen Feuerwiderstandsdauer erforderlich sind.

Die Bemessungstabellen des Eurocodes 4 Teil 1-2 bauen auf denen der DIN 4102 Teil 4 auf, so dass sich etwa gleiche Tragfähigkeiten ergeben. Bei der Überführung des Eurocodes 4 von der ENV- in die EN-Fassung gab es keine wesentlichen Veränderungen dieser Daten. Lediglich die Tabellenwerte für Verbundstützen mit Kammerbeton wurden erneuert. Diese Änderungen waren notwendig, da eine große An-



zahl von kammerbetonierten Verbundstützen auf der Grundlage von Walzprofilen nicht mit den bisherigen geometrischen Randbedingungen klassifiziert werden konnten. In [1.15] sind Informationen zum Hintergrund der neuen Nachweistabellen dargestellt. Weitere Unterschiede zu den bisherigen Tabellenwerten haben keinen Einfluss auf die Klassifizierung der Bauteile und sind durch das geänderte Sicherheitskonzept zu erklären. Die Bemessungstabellen aus der DIN 4102-4 aus dem Jahre 1994 für Verbundbauteile basieren auf dem globalen Sicherheitskonzept. Für die heißen Eurocodes gilt das neue Teilsicherheitskonzept. Damit sind die Tabellen der DIN 4102-4 Abschnitt 7 für Verbundbauteile wegen der dort enthaltenen Lastausnutzungsgrade mit den neuen Normen nicht mehr kompatibel und wurden dementsprechend überarbeitet.

**Stufe 2: Bemessung mit vereinfachten Bemessungsverfahren für bestimmte Typen von Einzelbauteilen und Tragwerken (Durchlaufträger)**

Bei dieser Methode werden festigkeitsreduzierte Querschnitte angesetzt. Mit diesem Verfahren wird nachgewiesen, dass alle maßgebenden Lasteinwirkungen innerhalb der erforderlichen Feuerwiderstandsdauer eines Bauteils ohne Versagen aufgenommen werden können. Dafür werden u. a. Vereinfachungen bei der Temperaturermittlung für die Bauteilquerschnitte und bei der Beschreibung des Versagenszustandes im Brandfall angenommen.

Nachweis:  $R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$

mit  $R_{fi,d,t}$  Bemessungswert der Tragfähigkeit eines Bauteils im Brandfall zum Zeitpunkt  $t$

$E_{fi,d,t}$  Bemessungswert der maßgebenden Beanspruchung im Brandfall zum Zeitpunkt  $t$

**Stufe 3: allgemeines Berechnungsverfahren zur Simulation des Verhaltens von Gesamttragwerken, Teiltragwerken oder Einzelbauteilen**

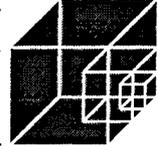
Mit Hilfe dieses Nachweises wird für vorgegebene Feuerwiderstandsdauern das tatsächliche Tragvermögen und eventuell auch das Verformungsverhalten der Bauteile ermittelt. In der Norm sind dafür Grundlagen für rechnerische Simulationsverfahren definiert. Die Simulationsverfahren beziehen sich auf die Berechnung der zeitabhängigen Temperaturfelder im Bauteil einerseits und das mechanische Tragverhalten andererseits. Diese Nachweismethode darf nach den Eurocodes auf Bauteile, Tragwerksteile und Gesamtkonstruktionen angewendet werden.

Nachweis:  $t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$

mit  $t_{fi,d}$  Feuerwiderstandsdauer (Eigenschaft des Bauteils oder Tragwerks)

$t_{fi,requ}$  erforderliche Feuerwiderstandsdauer

Der Bemessungsaufwand der Nachweisverfahren nimmt von Stufe zu Stufe zu. Das Bemessungskonzept ist so aufgebaut, dass die Ergebnisse umso sicherer sein sollen, je einfacher die gewählte Nachweismethode ist [1.8]. Mittels der Nationalen Anwendungsdokumente (NAD's) wird das bisherige Sicherheitsniveau der DIN 4102 gewährleistet [1.11]. Aufgrund der Bemessung werden die Bauteile einer bestimmten Feuerwiderstandsklasse zugeordnet.

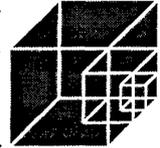


Die Norm sieht folgende Feuerwiderstandsklassen vor:

Feuerwiderstandsklasse	Feuerwiderstandsdauer in Minuten
R 30	$\geq 30$
R 60	$\geq 60$
R 90	$\geq 90$
R 120	$\geq 120$
R 180	$\geq 180$
R 240	$\geq 240$

**Tabelle 2-2: Feuerwiderstandsklassen**

Die Feuerwiderstandsdauer ist die Mindestdauer in Minuten, während der ein Bauteil unter Normbrandbedingungen die Anforderungen an die Tragfähigkeit erfüllt.



### 3 Ableitung des Regelvorschlages für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton

#### 3.1 Allgemeines

Bei der Erarbeitung eines Regelvorschlages für den Verlauf der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit ist entscheidend, dass das bisherige Sicherheitsniveau der brandschutztechnischen Nachweise im Stahlverbundbau nach dem Eurocode aufrechterhalten wird.

Hierfür wird zunächst das Problem der instationären Wärmeleitung erläutert und danach ein Ansatz über den Vergleich der Temperaturleitfähigkeit erarbeitet. Bei dieser Untersuchung geht es primär um die Temperaturentwicklung, damit handelt es sich um ein rein thermisches Problem.

#### 3.2 Ableitung über die Temperaturleitfähigkeit

Grundlage für die weiteren Betrachtungen ist die Ermittlung der Temperaturverteilung in einem festen Körper. Dieses instationäre Wärmeleitungsproblem wird mathematisch durch die Fouriersche Differentialgleichung (Gleichung (3.1)) beschrieben.

$$c \cdot \rho \frac{\delta T}{\delta t} = \operatorname{div} \lambda (\operatorname{grad} T) + W \quad (3.1)$$

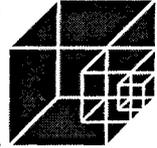
mit	$T = f(x, y, z, t)$	Temperaturfeld mit den Raumkoordinaten $x, y, z$ im kartesischen System und der Zeit $t$
	$t$	Zeit
	$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
	$c$	spezifische Wärmekapazität
	$\rho$	Dichte
	$W$	Wärmequelle oder -senke

Es wird davon ausgegangen, dass innerhalb des betrachteten Temperaturfeldes keine Wärmequellen oder -senken existieren, demzufolge entfällt in Gleichung (3.1) der Anteil  $W$ . [1.20]

Zeitabhängige Wärmeleitungsprobleme, wie z. B. die Erwärmung eines Verbundquerschnittes, erfordern das Lösen der Gleichung (3.1). Da die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  vom Ort unabhängig ist, lässt sich ein Quotient aus den thermischen Materialparametern bilden, der nur noch von der Temperatur abhängt. Diese charakteristische Kenngröße wird in der technischen Thermodynamik als Temperaturleitfähigkeit  $a$  bezeichnet. [1.5]

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad \left[ \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \quad (3.2)$$

Wenn die Temperaturleitfähigkeit von Normalbeton unverändert bleiben soll, kann die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  so bestimmt werden, dass die Temperaturleitfähigkeit  $a$  mit den Werkstoff-



parametern des Normalbetons sowohl nach der ENV- als auch nach der prEN-Fassung gleich groß ist.

$$a = \frac{\lambda_c}{\rho_c \cdot c_c} (\text{ENV}) = \frac{\lambda_c}{\rho_c \cdot c_c} (\text{prEN}) = \text{const.} \quad (3.3)$$

Durch Einsetzen der bereichsweise definierten Funktionen für die thermischen Materialparameter  $\rho_c$ ,  $c_c$  und  $\lambda_c$  für Normalbeton nach ENV- und prEN-Fassung gemäß Abschnitt 2.2 in Gleichung 3.3 ergeben sich die folgenden fünf gebrochen rationale Funktionen für den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  nach prEN-Version:

$$20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c = \frac{4,14 \cdot 10^6 - 4140 \cdot \theta_c + 1,725 \cdot \theta_c^2}{2,07 \cdot 10^6 + 1,533 \cdot 10^3 \cdot \theta_c - 0,639 \cdot \theta_c^2} \quad (3.4a)$$

$$100^\circ\text{C} < \theta \leq 115^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c = \frac{3,68 \cdot 10^6 + 920 \cdot \theta_c - 3,067 \cdot \theta_c^2 + 1,92 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_c^3}{2,07 \cdot 10^6 + 1,533 \cdot 10^3 \cdot \theta_c - 0,639 \cdot \theta_c^2} \quad (3.4b)$$

$$115^\circ\text{C} < \theta \leq 200^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c = \frac{(2 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_c + 8,333 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_c^2) \cdot (1,89 \cdot 10^6 + 1929,294 \cdot \theta_c - 0,541 \cdot \theta_c^2)}{2,07 \cdot 10^6 + 1,533 \cdot 10^3 \cdot \theta_c - 0,639 \cdot \theta_c^2} \quad (3.4c)$$

$$200^\circ\text{C} < \theta \leq 400^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c = \frac{(2 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_c + 8,333 \cdot 10^{-7} \cdot \theta_c^2) \cdot (2,091 \cdot 10^6 + 851 \cdot \theta_c - 0,173 \cdot \theta_c^2)}{2,07 \cdot 10^6 + 1,533 \cdot 10^3 \cdot \theta_c - 0,639 \cdot \theta_c^2} \quad (3.4d)$$

$$400^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}$$

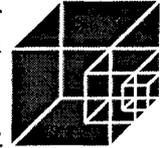
$$\lambda_c = \frac{4,984 \cdot 10^6 - 5426,85 \cdot \theta_c + 2,519 \cdot \theta_c^2 - 1,845 \cdot 10^{-4} \cdot \theta_c^3}{2,07 \cdot 10^6 + 1,533 \cdot 10^3 \cdot \theta_c - 0,639 \cdot \theta_c^2} \quad (3.4e)$$

mit  $\lambda_c$  Wärmeleitfähigkeit des Betons

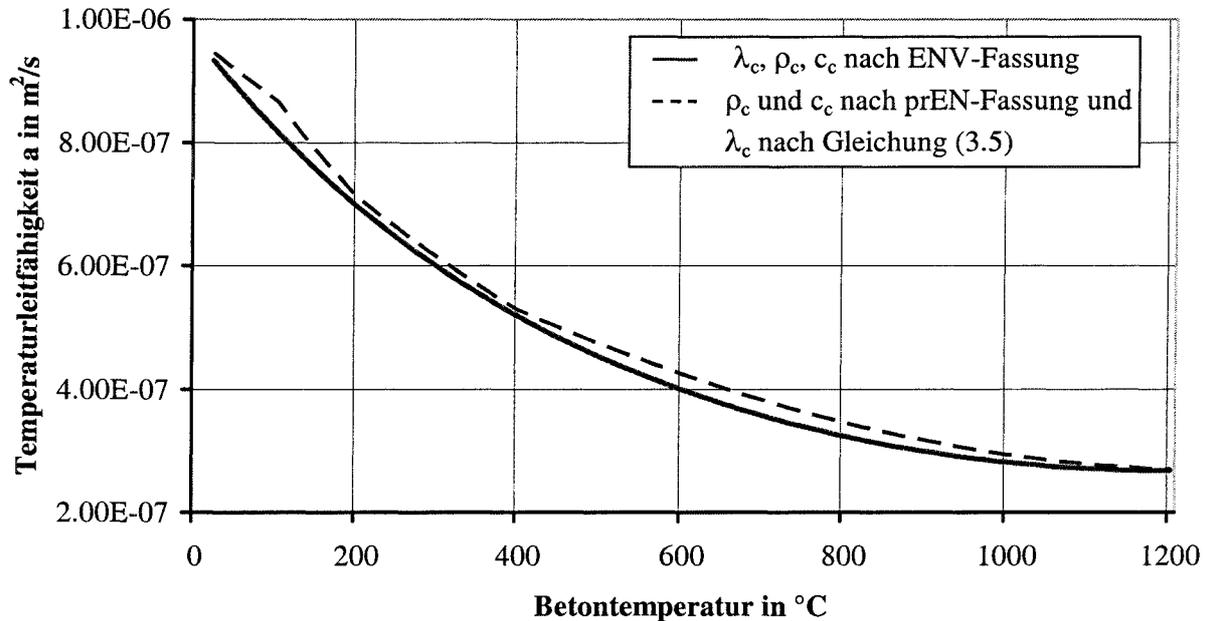
$\theta_c$  Betontemperatur

Für eine praktische Anwendung ist der Berechnungsaufwand dieser fünf Gleichungen zu umfangreich. Deshalb wird in Gleichung (3.5) eine kontinuierliche Funktion angegeben, die näherungsweise gleiche Ergebnisse liefert.

$$\lambda_c = 2 - 0,26 \cdot \frac{\theta_c}{120} + 0,012 \cdot \left( \frac{\theta_c}{120} \right)^2 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad (3.5)$$



### Vergleich der Temperaturleitfähigkeit



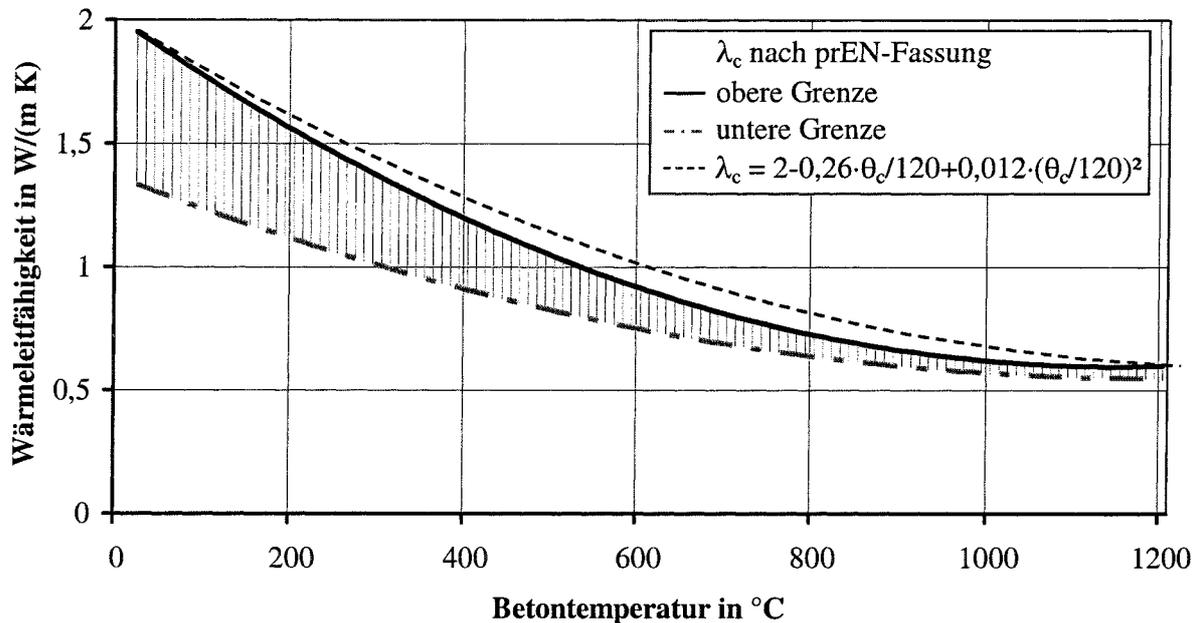
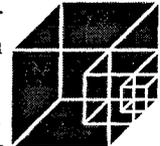
**Abbildung 3-1: Vergleich der Temperaturleitfähigkeit a nach ENV-Fassung und prEN-Fassung mit  $\lambda_c$  nach Gleichung (3.5)**

In Abbildung 3-1 ist die Temperaturleitfähigkeit  $a$  dargestellt. Diese wurde mit der Dichte und der spezifischen Wärmekapazität nach der prEN-Fassung sowie der Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung (3.5) berechnet und mit der Temperaturleitfähigkeit nach der ENV-Fassung verglichen. Abbildung 3-1 zeigt, dass die beiden Verläufe dicht beieinander liegen, wobei die Werte für die Temperaturleitfähigkeit nach der ENV-Fassung etwas unterhalb der Werte nach der prEN-Fassung mit dem Vorschlag für die Wärmeleitfähigkeit liegen.

Anmerkung:

Durch die Einarbeitung von Randbedingungen kann der Quotient der Temperaturleitfähigkeit (Gleichung (3.2)) nicht mehr eliminiert werden, da die oben genannte Differentialgleichung (Gleichung (3.1)) um einen Summanden ergänzt wird, ähnlich der Wärmequelle  $W$ . Dieser Summand ist von den thermischen Materialparametern  $\lambda$ ,  $c$  und  $\rho$  unabhängig.

Das führt dazu, dass in der Lösung der Differentialgleichung, z.B. durch eine FE-Methode, bei gleicher Temperaturleitfähigkeit trotzdem geringfügig unterschiedliche Ergebnisse entstehen. Diese Abweichungen sind aber sehr gering und werden hier bei der Erarbeitung eines Vorschlages für den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  vernachlässigt. Nähere Informationen zu dieser Problematik werden in [1.9] veröffentlicht.



**Abbildung 3-2: Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten nach prEN-Fassung und dem Ansatz der Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung (3.5)**

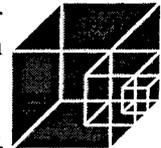
Abbildung 3-2 zeigt die obere und untere Grenze nach der prEN-Fassung sowie den erarbeiteten Verlauf der Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung (3.5). Es ist zu erkennen, dass die vorgeschlagene Funktion etwas oberhalb der oberen Grenze nach der prEN-Fassung verläuft, aber nicht innerhalb der vorgegebenen Grenzen liegt.

Da der Verlauf der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit zwischen der oberen und unteren Grenze liegen muss und im Entwurf die obere Grenze empfohlen wird, wird als Regelvorschlag die obere Grenze gewählt und es gilt für alle weiteren Untersuchungen:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \cdot \frac{\theta_c}{100} + 0,0107 \cdot \left(\frac{\theta_c}{100}\right)^2 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad \text{für } 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \quad (3.6)$$

mit  $\lambda_c$  Wärmeleitfähigkeit des Betons  
 $\theta_c$  Betontemperatur

Am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig wurden in einem parallel bearbeiteten Forschungsprojekt die thermischen Materialkennwerte für Stahlbetonbauteile untersucht. Der Regelvorschlag nach Gleichung (3.6) für den Verlauf der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton wurde mit Herrn Dr.-Ing. E. Richter abgestimmt, der unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Hossler das Forschungsprojekt in Braunschweig bearbeitet.



## 4 Validierung der thermischen Betonkennwerte

### 4.1 Stahlbetonquerschnitte

Zur Überprüfung des Regelvorschlages der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit werden die Temperaturverteilungen an einem quadratischen Betonquerschnitt  $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$  unter ETK-Brandbeanspruchung untersucht. Bei der Validierung wird ein Vergleich der Bauteiltemperaturen zwischen der Berechnung auf Grundlage der „neuen“ Materialkennwerte mit dem Regelvorschlag des Verlaufes der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit und den bisherigen Materialkennwerten der ENV-Fassung gemacht.

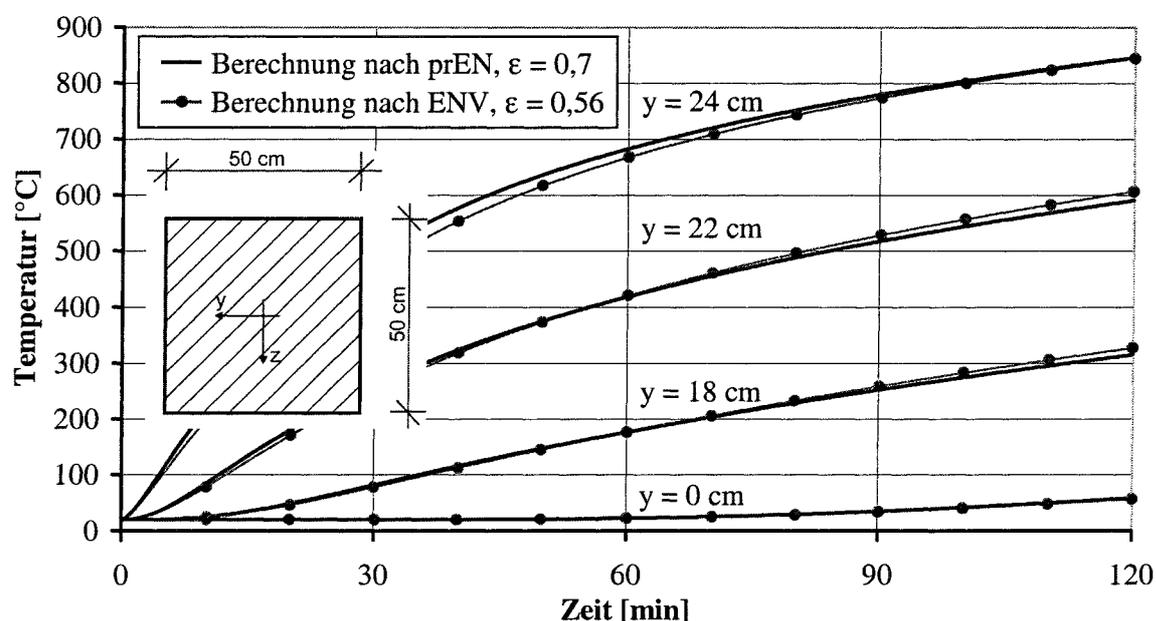
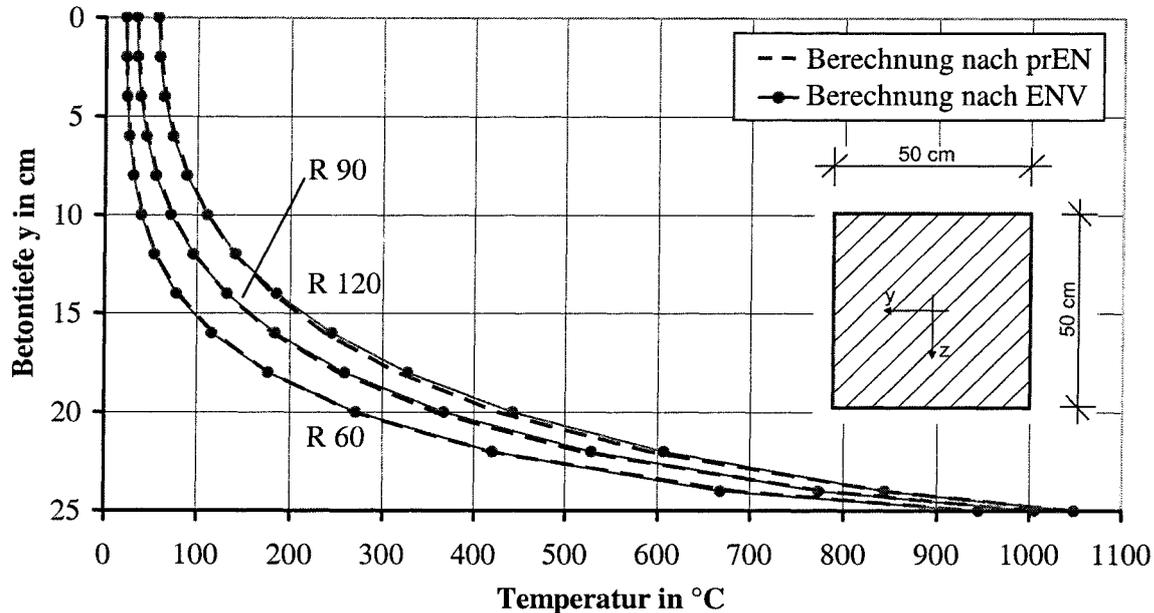
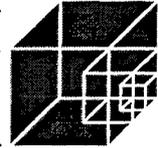


Abbildung 4-1: Vergleich der Temperaturverteilungen in einem Betonwürfel unter ETK-Brandbeanspruchung bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %

Abbildung 4-1 zeigt einen Vergleich der Temperaturentwicklung in verschiedenen Betontiefen in Abhängigkeit von der Zeit. Es ist zu erkennen, dass die Temperaturen in etwa übereinstimmen. Zu Beginn der Brandbeanspruchung liegen die mit den „neuen“ Materialparametern berechneten Temperaturen über den Temperaturen, die nach der ENV-Fassung berechnet wurden. Diese Erscheinung ist durch die geänderte Emissivität  $\epsilon_{\text{res}}$  (siehe Abschnitt 2.3.1) zu erklären und ist besonders an der Betonoberfläche bei  $y = 24\text{ cm}$  zu beobachten.

Die neu definierte Wärmeleitfähigkeit führt dazu, dass die Temperaturen etwas geringer ermittelt werden, als bei der Berechnung mit den bisherigen Materialkennwerten. Dies wird besonders nach 120 Minuten Branddauer bei  $y = 22\text{ cm}$  deutlich.

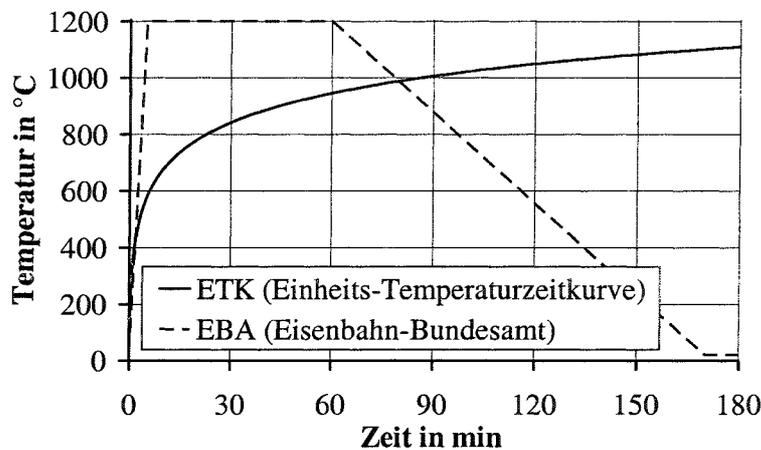
In Abbildung 4-2 sind die Temperaturen nach 60, 90 und 120 Minuten Branddauer in Abhängigkeit der Betontiefe dargestellt. Auch aus diesem Diagramm ist erkennbar, dass die berechneten Temperaturen mit den „neuen“ und den bisherigen Materialparametern in etwa übereinstimmen. Es ist zu erkennen, dass die geringen Abweichungen mit zunehmender Branddauer ansteigen, wobei die berechneten Werte nach der prEN-Fassung etwas geringer sind, als die Werte nach ENV-Fassung.



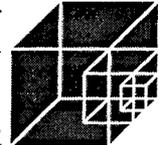
**Abbildung 4-2: Vergleich der Temperaturverteilungen in einem Betonwürfel unter ETK-Brandbeanspruchung**

Zur weiteren Untersuchung des Verlaufs der Wärmeleitfähigkeit werden die berechneten Temperaturen mit gemessenen Werten verglichen. Dazu werden Temperaturen aus einem Brandversuch an einem Tübbing unter EBA-Brandbeanspruchung verwendet, dieser wurde 2003 am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig im Auftrag der Firma HOCHTIEF getestet. [1.3] Bei diesem Brandversuch wurden Temperaturmessungen in unterschiedlichen Betontiefen an je drei Messstellen durchgeführt.

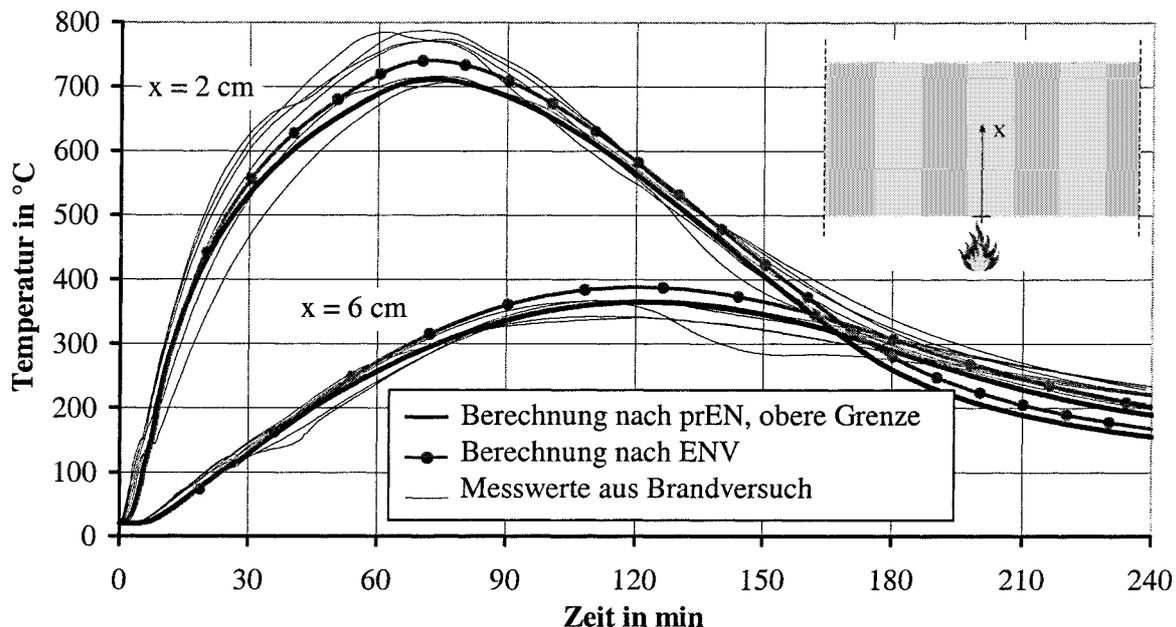
Bei der EBA-Brandbeanspruchung handelt es sich um eine Temperaturzeitkurve mit einem schnellen Temperaturanstieg auf eine Maximaltemperatur von 1200°C nach fünf Minuten. Die Höchsttemperatur bleibt bis zur 60ten Minute konstant. Danach beginnt die Abkühlungsphase (siehe Abbildung 4-3).



**Abbildung 4-3: Vergleich der ETK- und EBA-Brandbeanspruchung**



### Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen am Beispiel eines Tübbings bei $x = 2$ und $6$ cm unter EBA-Brandeinwirkung

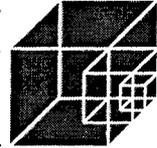


**Abbildung 4-4:** Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen am Beispiel eines Tübbings in einer Betontiefe  $x$  von 2 und 6 cm

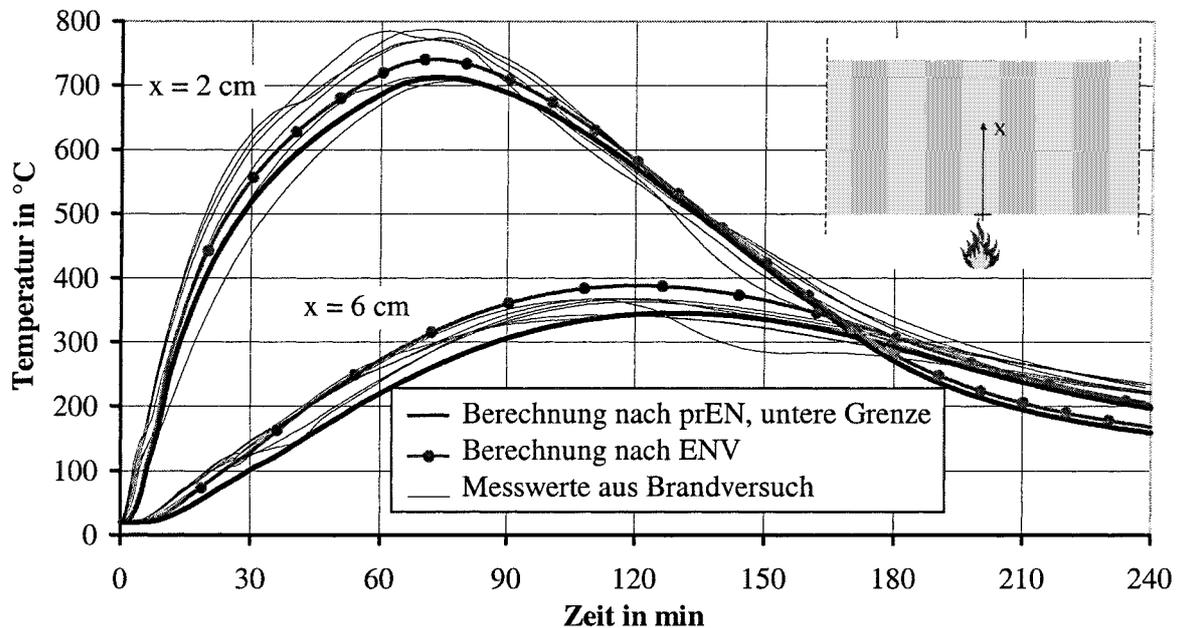
In Abbildung 4-4 sind neben den berechneten Werten (prEN, obere Grenze), jeweils sechs gemessene Temperaturverteilungen in einer Betontiefe von 2 cm und 6 cm dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Werte in gleichen Betontiefen große Streuungen aufweisen.

Eine Gegenüberstellung der berechneten und gemessenen Temperaturen in Abbildung 4-4 zeigt, dass die berechneten Werte bei einer Betontiefe von 2 cm innerhalb dieses Streubereiches liegen. Nur während der Abkühlungsphase sinken die berechneten Temperaturen schneller, als die gemessenen, was auf die Brandraumtemperaturen im Brandversuch zurückzuführen ist, die beim Versuch während der Abkühlungsphase etwas größer waren, als die der EBA-Kurve.

Ein Vergleich der berechneten Temperaturen nach ENV- und prEN-Fassung zeigt, dass auch bei der Nachrechnung eines Brandversuches die Temperaturen auf Grundlage der prEN-Fassung etwas geringer ausfallen, als die Temperaturen nach der ENV-Fassung. Wobei die berechneten Temperaturen mit den Materialparametern nach prEN-Fassung in 6 cm Betontiefe wesentlich genauer mit den gemessenen Temperaturen übereinstimmen, als die berechneten Temperaturen mit den bisherigen Materialparametern nach ENV-Fassung.



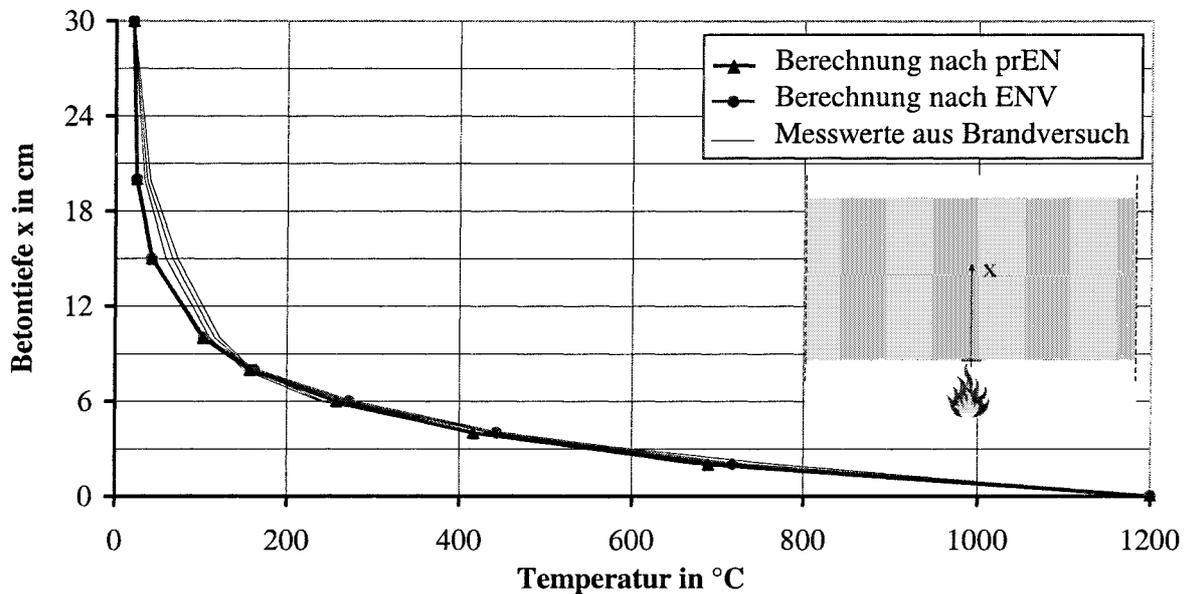
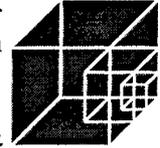
### Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen am Beispiel eines Tübbings bei $x = 2$ und $6$ cm unter EBA-Brandeinwirkung



**Abbildung 4-5:** Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen am Beispiel eines Tübbings in einer Betontiefe  $x$  von 2 und 6 cm unter Verwendung der unteren Grenze aus der prEN-Fassung

In Abbildung 4-5 sind die gleichen Temperaturverläufe wie in Abbildung 4-4 dargestellt. Allerdings wurde für die Berechnung die untere Grenze der Wärmeleitfähigkeit nach der prEN-Fassung verwendet. Die Temperaturunterschiede zu einer Berechnung mit der oberen Grenze werden erst in größeren Betontiefen ersichtlich, da dort der Einfluss der Wärmeleitfähigkeit zum Tragen kommt. Durch die Verwendung der unteren Grenze werden etwas tiefere Temperaturen erreicht, als bei Verwendung der oberen Grenze (bis zu  $30$  °C bei 6 cm Betontiefe). Im Vergleich zu einer Berechnung mit Materialkennwerten nach der ENV-Version ergeben sich deutlichere Unterschiede (bis zu  $53$  °C bei 6 cm Betontiefe). Während die Ergebnisse, die nach der ENV-Version oder mit der oberen Grenze nach der prEN-Version berechnet wurden, auf der sicheren Seite der Messwerte liegen, liegen Werte nach der unteren Grenze der prEN-Version zwar noch im Streubereich der Messergebnisse, aber dort im unteren Randbereich.

Der Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Betontiefe nach 60 Minuten Branddauer ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Die berechneten Temperaturen nach den unterschiedlichen Materialgesetzen sind annähernd gleich. Der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen zeigt keine wesentlichen Abweichungen.



**Abbildung 4-6: Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen am Beispiel eines Tübbings nach einer Brandauer von 60 Minuten**

Für die untersuchten Stahlbetonbauteile kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die mit den „neuen“ thermischen Materialkennwerten und der Wärmeleitfähigkeit nach Gleichung (3.6) berechneten Betontemperaturen gut mit denen auf Grundlage der ENV-Fassung übereinstimmen.

## 4.2 Verbundquerschnitte

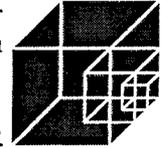
### 4.2.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die neuen thermischen Betonkennwerte anhand von numerischen Vergleichsuntersuchungen zum Erwärmungsverhalten unter ETK-Brandbeanspruchung an ausgewählten Beispielen des Stahlverbundbaus überprüft und bewertet. Für diese Untersuchungen wurden die „neuen“ temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte in das Simulationsprogramm BOFIRE [1.2] implementiert.

Für die mechanische Analyse wurden die Materialparameter für Beton und Stahl nach ENV-Fassung verwendet. Dadurch kann die Abhängigkeit der Traglast von den thermischen Materialparametern gezeigt werden, ohne dass zusätzliche Änderungen der mechanischen Parameter die Ergebnisse beeinflussen.

Es werden Brandversuche mit dem Programm BOFIRE nachgerechnet, dabei werden folgende Querschnittstypen untersucht:

- eine Verbundstütze mit Kammerbeton,
- eine Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlquerschnitt,
- eine Verbundstütze mit einem betongefüllten Hohlprofil und
- ein Verbundträger mit ausbetonierten Kammern.



Es sind Berechnungen zum einen mit den bisherigen Materialkennwerten nach ENV-Fassung und zum anderen mit den „neuen“ Materialparametern nach der prEN-Fassung dargestellt. Die berechneten Werte werden zusätzlich mit Temperaturen aus Brandversuchen verglichen. Die Versuchswerte stellen Mittelwerte mehrerer Messpunkte dar, dazu wurde das arithmetische Mittel mehrerer Thermoelemente an äquivalenten Messstellen berechnet.

Bei den Simulationsberechnungen mit BOFIRE werden die Materialfestigkeiten zum Zeitpunkt des Versuches verwendet. Es wird mit der Zylinderdruckfestigkeit des Betons gerechnet. Da der charakteristische Wert der Betonfestigkeitsklasse noch unterhalb dieses Wertes liegt, kann davon ausgegangen werden, dass die berechneten Feuerwiderstandszeiten auf der sicheren Seite liegen. Da in den Dokumentationen der Brandversuche häufig Würfeldruckfestigkeiten angegeben sind, werden diese zuerst in Zylinderdruckfestigkeiten umgerechnet. Dabei werden im Rahmen dieser Arbeit die Gleichungen nach der DIN 1045 [2.16] angewendet.

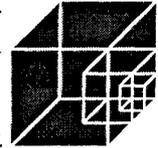
$$\beta_{W20cm} = 0,95 \cdot \beta_{W15cm} \quad (4.1)$$

$$f_{cyl} = \frac{\beta_{W20cm}}{1,18} \quad (4.2)$$

mit:  $\beta_{W20cm}$       Betondruckfestigkeit eines 20-cm-Würfels  
 $\beta_{W15cm}$       Betondruckfestigkeit eines 15-cm-Würfels  
 $f_{cyl}$             Betondruckfestigkeit eines Zylinders ( $\varnothing = 15 \text{ cm}$ ,  $h = 30 \text{ cm}$ )

Die BOFIRE-Berechnungen für alle untersuchten Verbundbauteile wurden mit verschiedenen Betonfeuchtigkeiten durchgeführt. Zum einen weil häufig keine Angaben über den vorhandenen Feuchtigkeitsgehalt gemacht wurden und zum anderen, um den Einfluss der Betonfeuchtigkeit zu zeigen. In der Norm ist festgelegt, dass der Feuchtigkeitsgehalt, falls er nicht bekannt ist, mit maximal 4 % angenommen werden darf.

Im Gegensatz zu den vergleichenden Berechnungen an Stahlbetonbauteilen in Abschnitt 4.1 werden hier nicht nur die Temperaturzeitverläufe sondern zusätzlich auch die rechnerischen Feuerwiderstandsdauern ermittelt. Dafür sind bei Stützen neben den Geometrie- und Werkstoffparametern auch Annahmen zu den Imperfektionen zu treffen. Dabei sind nicht die bei der Bemessung bei Normaltemperatur üblichen Ersatzimperfektionen der Näherungsverfahren anzusetzen, sondern Imperfektionen für die nichtlineare Berechnung mit dem Programm BOFIRE (siehe auch [1.22]). Für die numerische 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. In allen Berechnungen wurden die Sollwerte der Querschnittsabmessungen angesetzt.



#### 4.2.2 Verbundstützen mit Kammerbeton

Für den Querschnittstyp der kammerbetonierten Verbundstütze wird ein 1984 von der Amtlichen Materialprüfanstalt für das Bauwesen der TU Braunschweig durchgeführter Brandversuch simuliert. Dieser Versuch fand im Auftrag der Firmen TRADE ARBED und ARBED Recherches, Luxemburg statt. [1.4]

Die Materialfestigkeiten, das statische System, Querschnittsabmessungen sowie die Belastung des Verbundstützenquerschnittes sind in Abbildung 4-7 dargestellt.

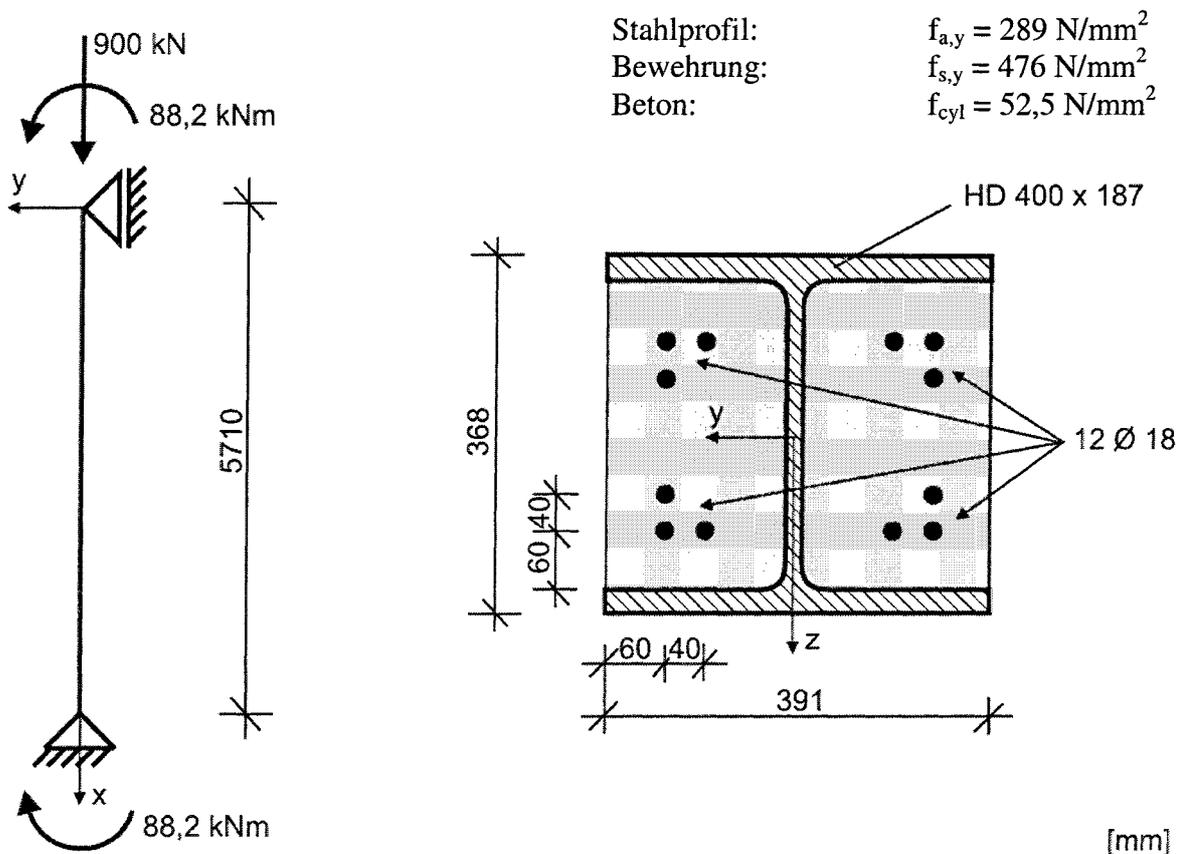


Abbildung 4-7: Materialfestigkeiten, statisches System, Querschnittsabmessungen und Belastung der kammerbetonierten Verbundstütze

Die folgenden Parametersätze wurden in den Berechnungen dieser Verbundstütze variiert:

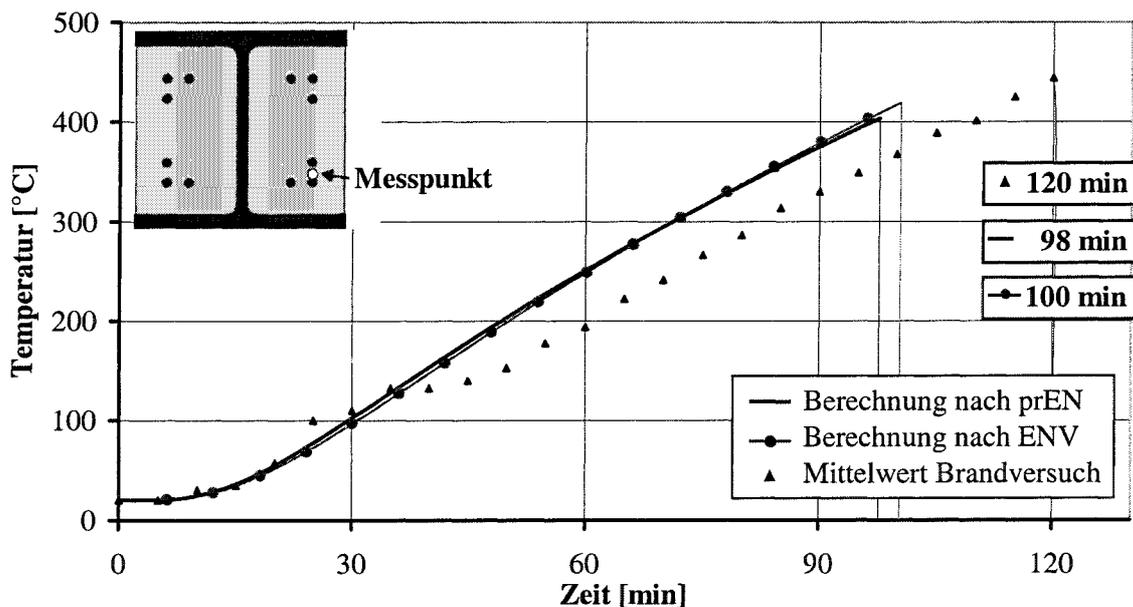
1. die Materialgesetze nach ENV- bzw. prEN-Fassung,
2. die Wärmeübergangsbedingungen mit  $\varepsilon_{\text{res}} = 0,7$  bzw.  $0,56$  und
3. die Betonfeuchtigkeit  $0\%$  bzw.  $4\%$ .

In den Abbildungen 4-8 bis 4-13 sind die berechneten und gemessenen Temperaturen an der Bewehrung, am Steg und an der Flanschausrundung der kammerbetonierten Verbundstütze abgebildet. Alle Diagramme zeigen berechnete Temperaturen nach der ENV-Fassung und der

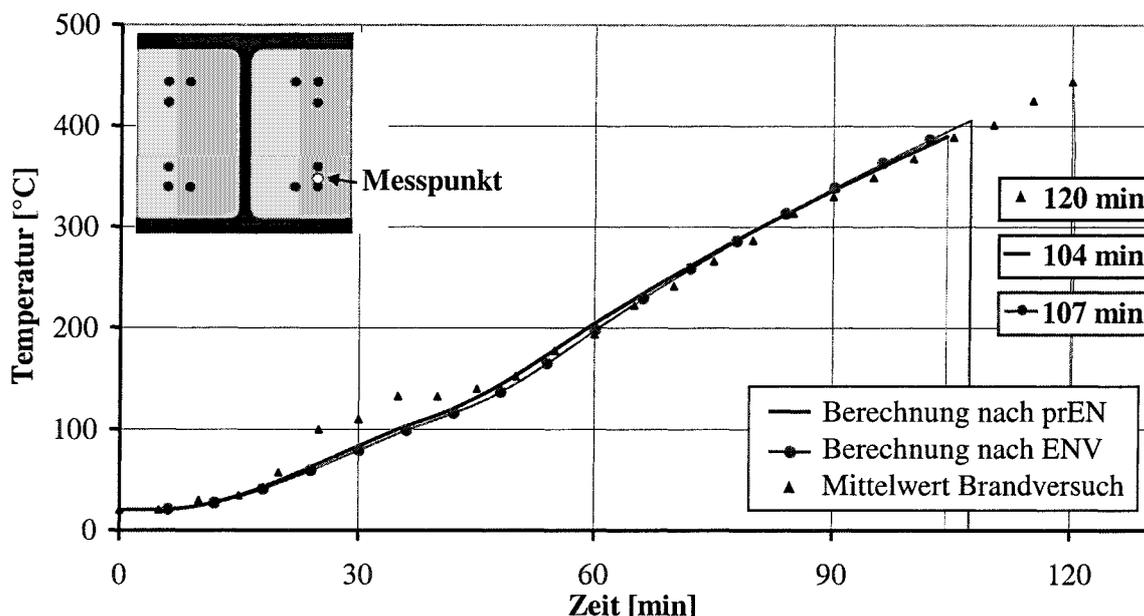


prEN-Fassung sowie den Mittelwert der im Brandversuch gemessenen Temperaturen. Die Abbildungen 4-8 und 4-9 bzw. die Abbildungen 4-10 und 4-11 zeigen die Temperaturverteilungen an der Bewehrung bzw. am Steg des Querschnittes in Abhängigkeit von der Zeit bei unterschiedlichen Betonfeuchtigkeiten. In Abbildung 4-12 und 4-13 sind die Temperaturverteilungen an der Flanschausrundung in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Sie unterscheiden sich durch eine variierende Emissivität bei der Berechnung mit den Materialkennwerten nach der prEN-Fassung des EC 4-1-2.

Aus Abbildung 4-8 und 4-9 wird deutlich, dass die Berechnungen mit den Materialkennwerten nach der ENV- und prEN-Fassung an der Bewehrung des Querschnittes gleiche Temperaturen liefern. Da dieser Messpunkt innerhalb des Betons liegt, wird der Temperaturverlauf an dieser Stelle maßgeblich durch die thermischen Materialparameter des Betons beeinflusst. Da diese Parameter in der prEN-Fassung auf die der ENV-Fassung abgestimmt wurden, ergeben sich folglich annähernd gleiche Temperaturen.



**Abbildung 4-8:** Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung der kammerbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %



**Abbildung 4-9:** Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung der kammerbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 4 %

Der Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf die Temperaturen im Bauteil wird durch einen Vergleich der Abbildungen 4-8 und 4-9 deutlich. Bei einer Betonfeuchtigkeit von 4 % werden gegenüber trockenem Beton etwa 50°C geringere Temperaturen berechnet. Es ist zu beobachten, dass bei diesem Bauteil mit den berechneten Temperaturen bei einer Betonfeuchte von 4 % die gleichen Temperaturen ermittelt werden wie die Mittelwerte der Temperaturen aus dem Brandversuch (vgl. Abbildung 4-9).

Die Messpunkte am Steg und an der Ausrundung des Stahlprofils in den Abbildungen 4-10 bis 4-13 zeigen den Einfluss der thermischen Materialgesetze des Stahls. Wie in den Abbildungen zu sehen ist, kommt es bei diesen Messpunkten bei den Simulationsberechnungen zu Abweichungen zwischen den bisherigen und den „neuen“ Materialgesetzen. Der Grund dafür liegt an der geänderten resultierenden Emissivität (vgl. Kapitel 2.3).

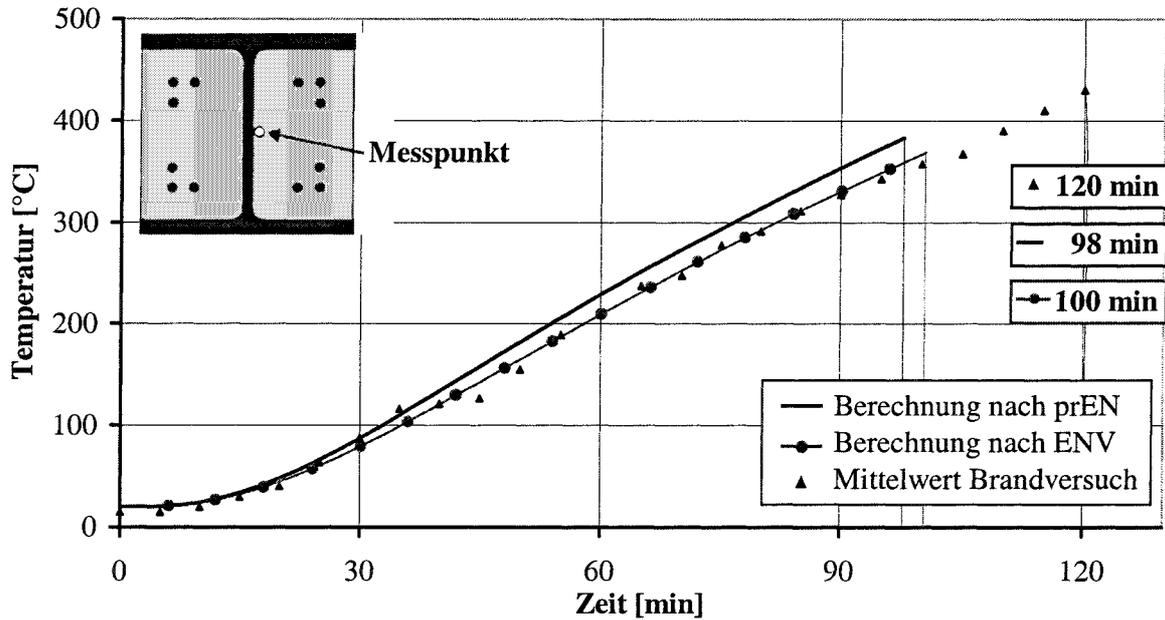
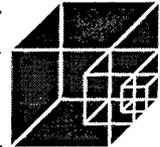


Abbildung 4-10: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen am Steg der kammerbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %

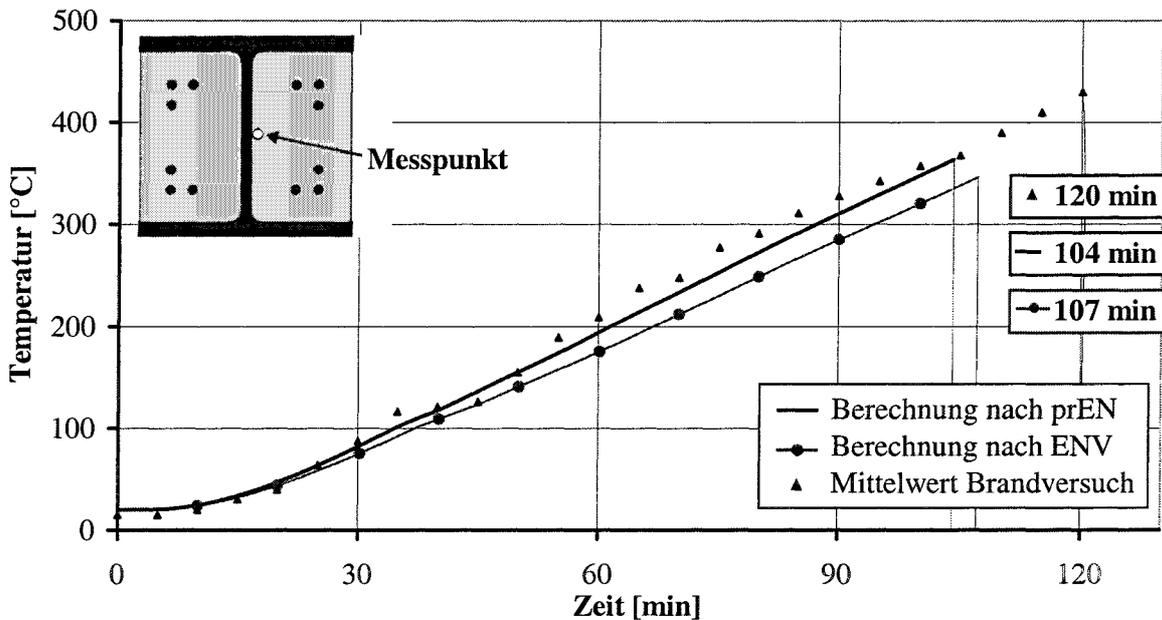


Abbildung 4-11: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen am Steg der kammerbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 4 %

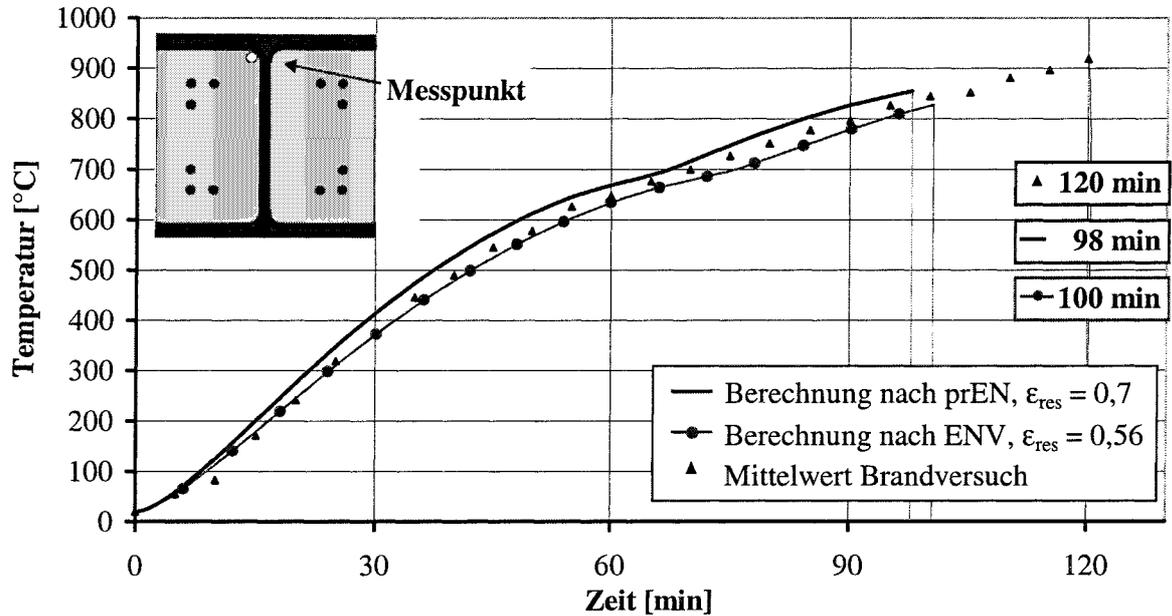
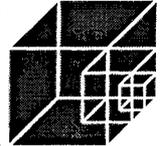


Abbildung 4-12: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Ausrundung der kammerbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 % und einer Emissivität von 0,7 bei der Berechnung nach prEN-Fassung

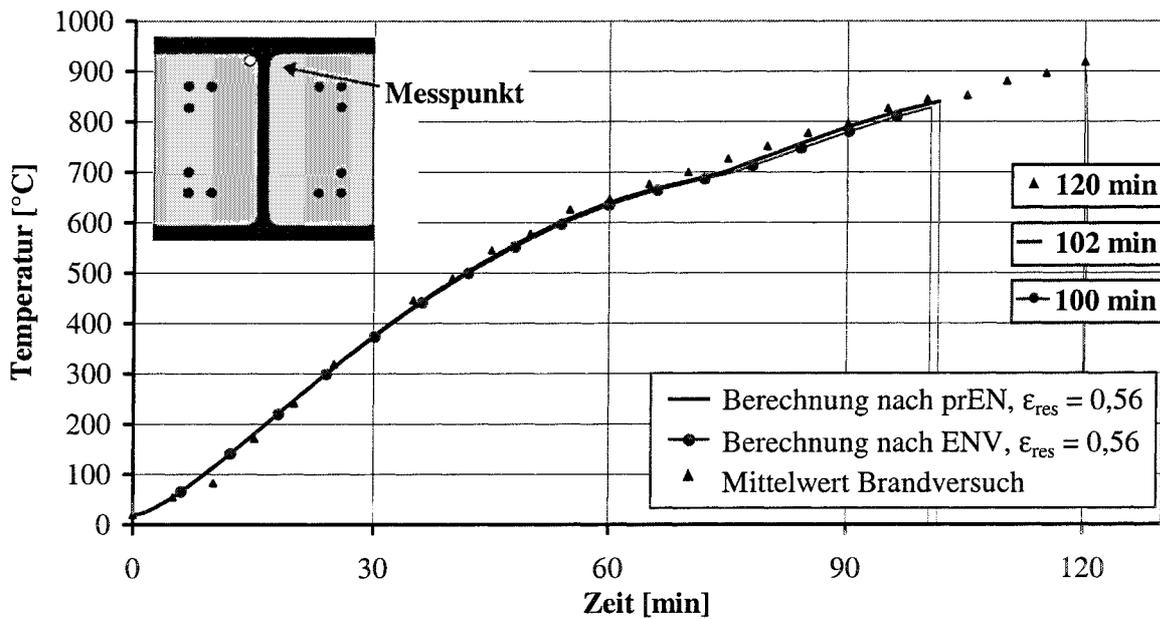
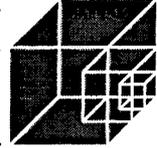


Abbildung 4-13: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Ausrundung der kammerbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 % und einer Emissivität von 0,56 bei der Berechnung nach prEN-Fassung



Der Vergleich der Feuerwiderstandsdauern dieses Querschnittes in Tabelle 4-1 zeigt, dass die berechneten Werte bei gleicher Betonfeuchtigkeit dicht beieinander liegen, wobei mit der Berechnung auf Grundlage der bisherigen Materialparameter etwa zwei bis drei Minuten längere Versagenszeiten erreicht werden, als bei der Berechnung nach der prEN-Fassung. Bezüglich der im Brandversuch ermittelten Versagenszeit liegen alle berechneten Werte mindestens 13 Minuten unter der gemessenen Feuerwiderstandsdauer und damit auf der sicheren Seite.

Wie aus dem Vergleich der Feuerwiderstandsdauern bei verschiedenen Feuchtigkeitsgehalten des Betons in Tabelle 4-1 deutlich wird, hat die Betonfeuchtigkeit einen Einfluss auf die Feuerwiderstandsdauer des Bauteils. Bei zunehmender Betonfeuchtigkeit sind auch höhere Feuerwiderstandsdauern zu erwarten.

berechnete Feuerwiderstandsdauern	Betonfeuchtigkeit		im Versuch ermittelte Feuerwiderstandsdauer
	0 %	4 %	
nach ENV-Fassung	100 min	107 min	120 min
nach prEN-Fassung	98 min	104 min	

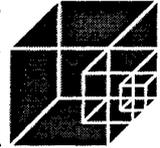
**Tabelle 4-1: Vergleich der Feuerwiderstandsdauern der kammerbetonierten Verbundstütze**

Abbildung 4-13 zeigt die Ergebnisse einer Berechnung, bei der die resultierende Emissivität von Stahl bei der Berechnung nach der prEN-Fassung auf den ENV-Wert  $\epsilon_{res} = 0,56$  gesetzt wurde. Es liegen damit sowohl für die Berechnung nach ENV-Fassung als auch für die Berechnung nach prEN-Fassung die gleichen Materialgesetze für Stahl vor. Wie in Abbildung 4-13 zu sehen ist, ergeben sich somit auch die gleichen Temperaturverläufe an der Ausrundung des Flansches. Das gleiche Ergebnis ergibt sich für den Messpunkt am Steg.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit den Materialgesetzen nach der prEN-Fassung im Vergleich zur ENV-Fassung annähernd übereinstimmende Ergebnisse erreicht werden. Die bei den Berechnungen auftretenden Temperaturunterschiede bei diesem Querschnittstyp mit außen liegenden Stahlteilen sind im Wesentlichen auf die geänderte Emissivität zurückzuführen.

Die Feuerwiderstandsdauern der Berechnungen liegen dicht beieinander, wobei das Bauteil bei der Berechnung nach prEN-Fassung je nach Betonfeuchte zwei bis drei Minuten früher versagt als nach ENV-Fassung, und damit für diesen Querschnitt konservative Ergebnisse liefert. Im Vergleich mit dem Versuch werden bei allen Berechnungen kleinere Feuerwiderstandszeiten erreicht.

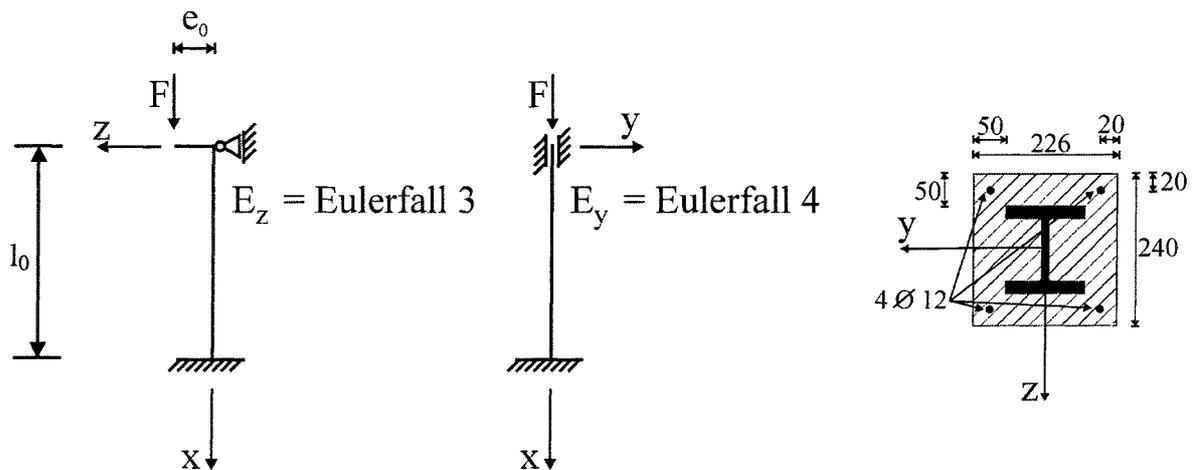
Das Sicherheitsniveau der ENV-Fassung des EC 4-1-2 bleibt bei diesem Verbundquerschnitt auch nach der prEN-Fassung erhalten.



### 4.2.3 Verbundstützen mit vollständig einbetonierten Stahlquerschnitten

Für die Untersuchungen am Querschnittstyp der Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil wurde ein 1979 durchgeführter Brandversuch simuliert. Die Verbundstütze wurde im Rahmen eines Forschungsauftrages, welcher am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig durchgeführt wurde, getestet. [1.10]

Die wesentlichen Daten dieses Brandversuches sind in Abbildung 4-14 dargestellt.



Stützenlänge:  $l_0 = 4200 \text{ mm}$

Stahlprofil: HE 120 M;  $f_{a,y} = 401 \text{ N/mm}^2$

Bewehrung:  $f_{s,y} = 470 \text{ N/mm}^2$

Beton:  $f_{cyl} = 36,0 \text{ N/mm}^2$

Exzentrizität:  $e_0 = 40 \text{ mm}$

Einzellast:  $F = 963 \text{ kN}$

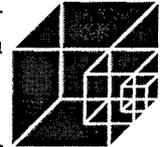
**Abbildung 4-14: Materialfestigkeiten, statisches System, Querschnittsabmessungen und Belastung der Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil**

Bei den Simulationsrechnungen für dieses Bauteil wurden folgende Parametersätze variiert:

1. die Materialgesetze nach ENV- bzw. prEN-Fassung und
2. die Betonfeuchtigkeit mit 0 %, 4 % bzw. 10 %.

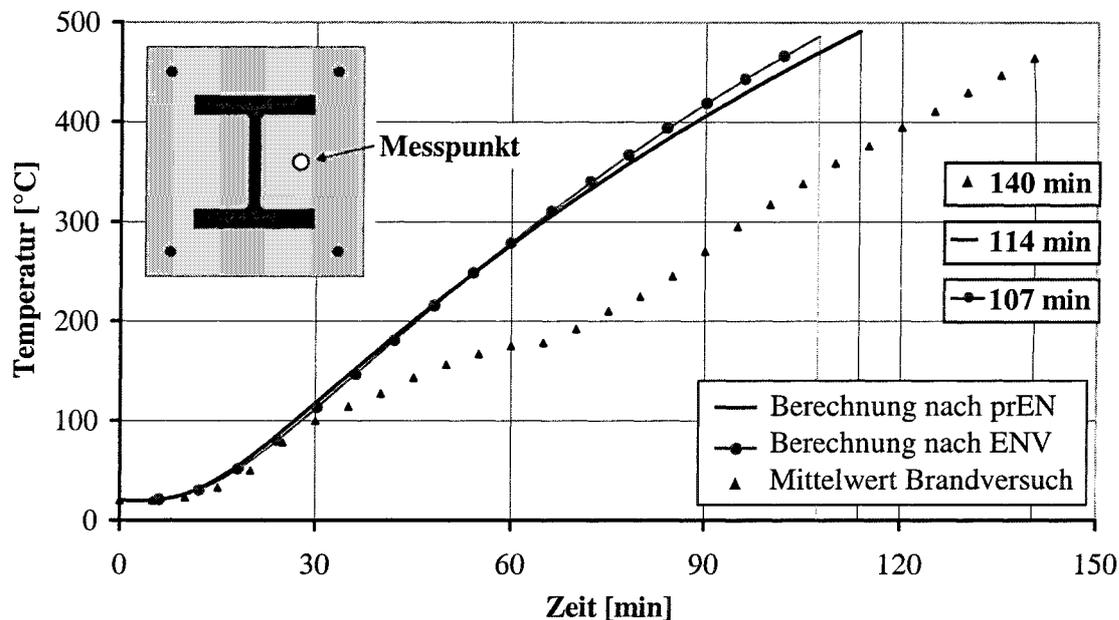
Die Abbildungen 4-15 bis 4-22 zeigen einen Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen im Beton, am Steg, an der Flanschausrundung und an der Bewehrung des Querschnitts der vollständig einbetonierten Verbundstütze. In allen Diagrammen sind die berechneten Temperaturen nach ENV- und prEN-Fassung sowie die Mittelwerte der im Brandversuch gemessenen Temperaturen zu sehen. Von jedem Messpunkt ist jeweils ein Diagramm mit den Berechnungen bei 0 % und 10 % Betonfeuchtigkeit dargestellt.

In allen Abbildungen ist zu beobachten, dass die berechneten Temperaturen nach ENV- und prEN-Fassung annähernd gleich sind. Die Erklärung dafür liegt in der Querschnittsgestaltung des Bauteils. Das gesamte Stahlprofil ist von Beton umgeben, deshalb werden alle Messpunkte des Querschnittes maßgeblich von den thermischen Materialparametern des Betons beein-

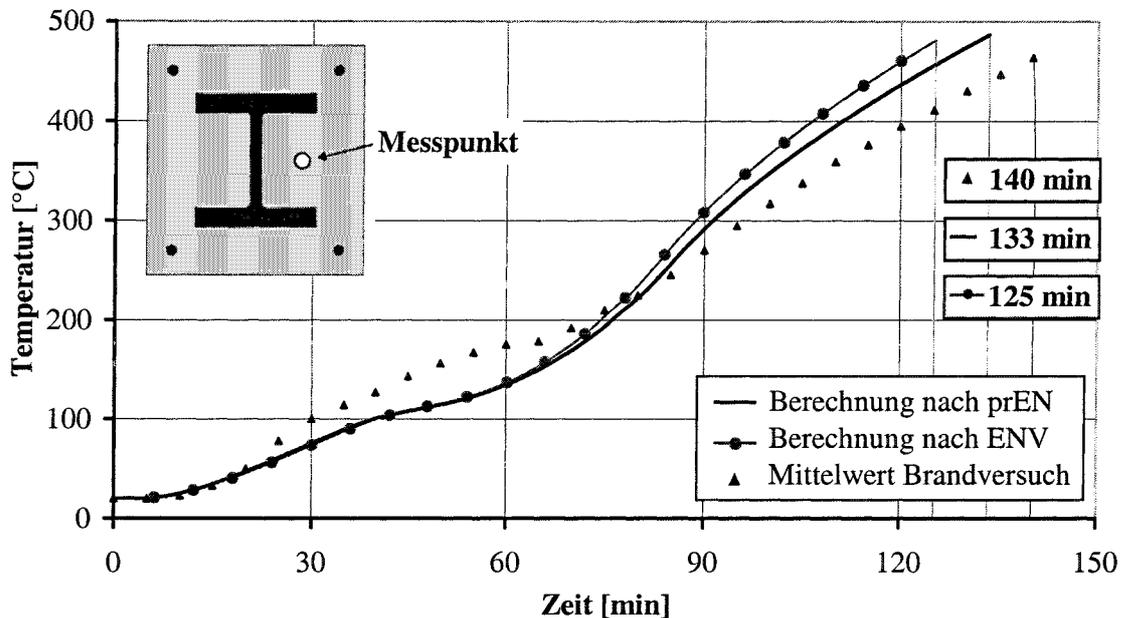
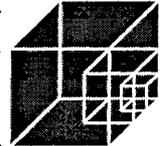


flusst, die in der prEN-Fassung auf die der ENV-Fassung abgestimmt wurden und somit annähernd gleiche Temperaturen liefern.

Bei der Berechnung mit den Materialkennwerten nach prEN-Fassung werden Temperaturen ermittelt, die geringfügig unterhalb der Berechnung nach ENV-Fassung liegen. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in der prEN-Fassung auf die obere Grenze gelegt wurde (vgl. Kapitel 3.2) und dadurch nicht einer identischen Temperaturleitfähigkeit  $a$  nach ENV-Fassung entspricht. Wie auch Abbildung 3.2 zeigt, kommt es ab etwa 300°C Bauteiltemperatur zu Unterschieden im Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von Beton und damit zu etwas geringeren Temperaturentwicklungen.



**Abbildung 4-15:** Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen bei einer Betontiefe von 6 cm der vollständig einbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %



**Abbildung 4-16:** Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen bei einer Betontiefe von 6 cm der vollständig einbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 10 %

Ein Vergleich der Abbildung 4-15 mit der Abbildung 4-16 macht deutlich, dass die Betonfeuchtigkeit die Temperaturen im Beton erheblich beeinflusst. Wobei in Abbildung 4-15 Berechnungen mit einer Betonfeuchtigkeit von 0 % und in Abbildung 4-16 von 10 % dargestellt sind. Bei Berechnungen mit 4 % Betonfeuchtigkeit werden Temperaturunterschiede von über 50°C und bei 10 % von über 100°C gegenüber Berechnungen mit trockenem Beton ermittelt. Es ist erkennbar, dass die Berechnungen mit 10 % Betonfeuchtigkeit mit den im Brandversuch gemessenen Werten gut übereinstimmen. Die gleichen Beobachtungen können auch aus einem Vergleich der Temperaturen bei unterschiedlichen Betonfeuchtigkeiten am Steg (siehe Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18) und an der Flanschausrundung (siehe Abbildung 4-19 und Abbildung 4-20) des Querschnitts gemacht werden. Im Gegensatz dazu ist der Einfluss der Betonfeuchtigkeit an der Bewehrung geringer (vgl. Abbildung 4-21 und Abbildung 4-22), die Erklärung dafür liegt an der geringen Betondeckung der Bewehrung von 2 cm. Es kann somit die Beobachtung gemacht werden, dass je weiter der Messpunkt von der Betonoberfläche entfernt ist, desto größer wird der Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf die Temperaturen.

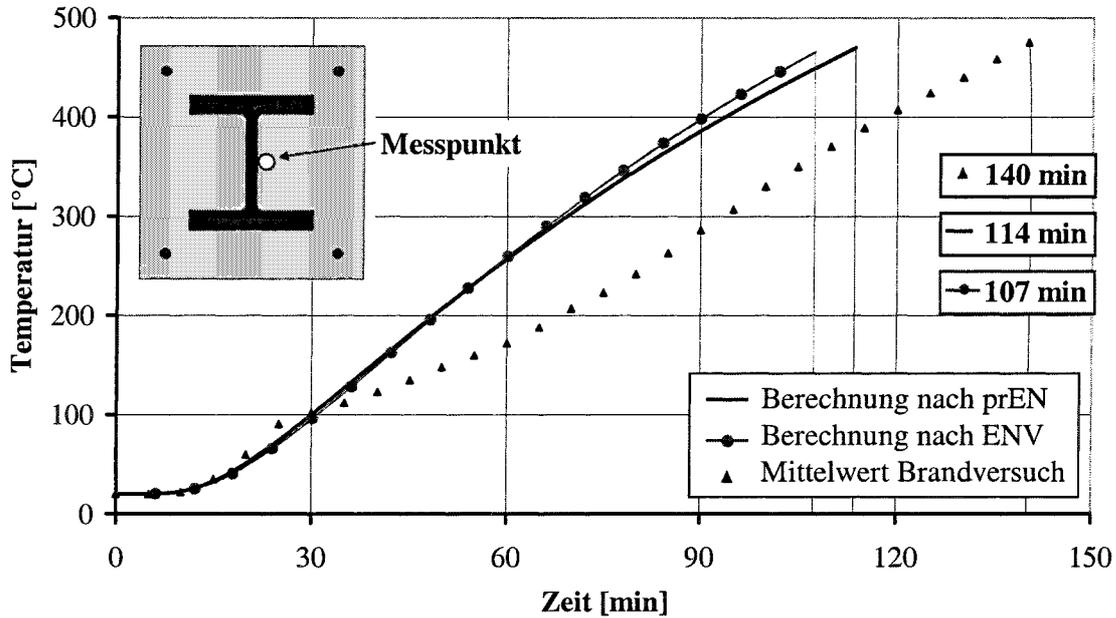
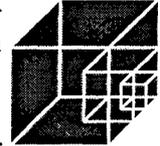


Abbildung 4-17: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen am Steg der vollständig einbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %

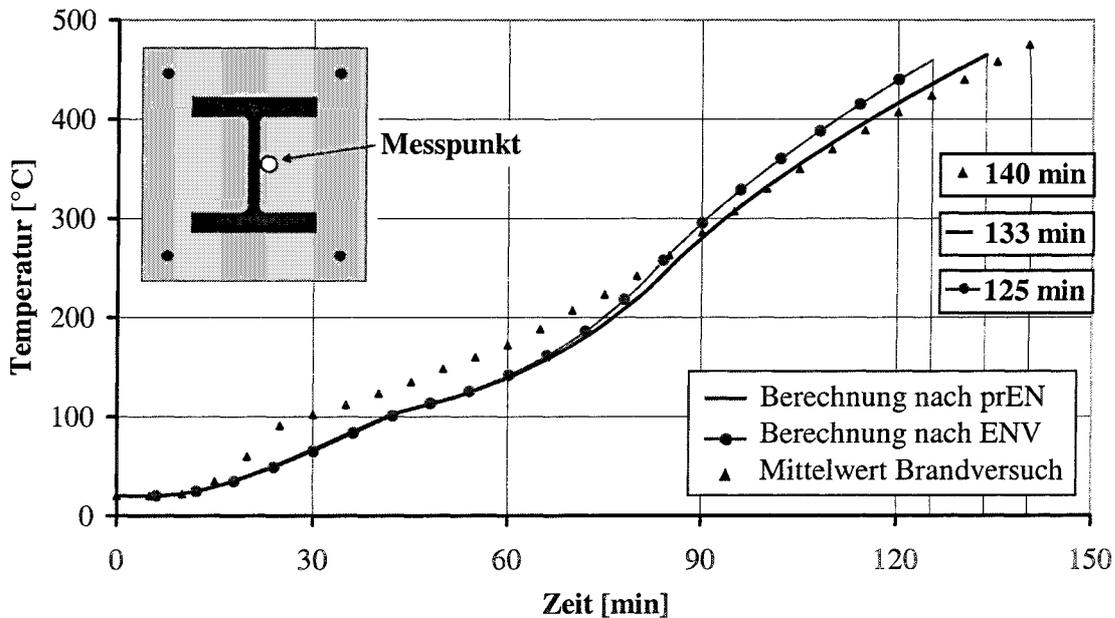


Abbildung 4-18: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen am Steg der vollständig einbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 10 %

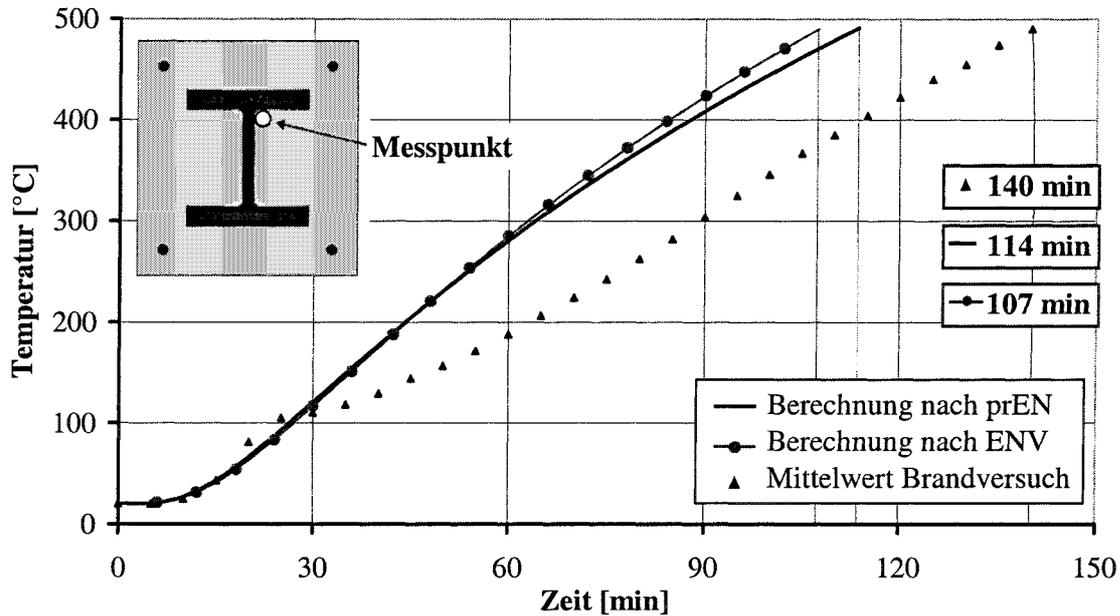
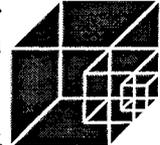


Abbildung 4-19: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Ausrundung der vollständig einbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %

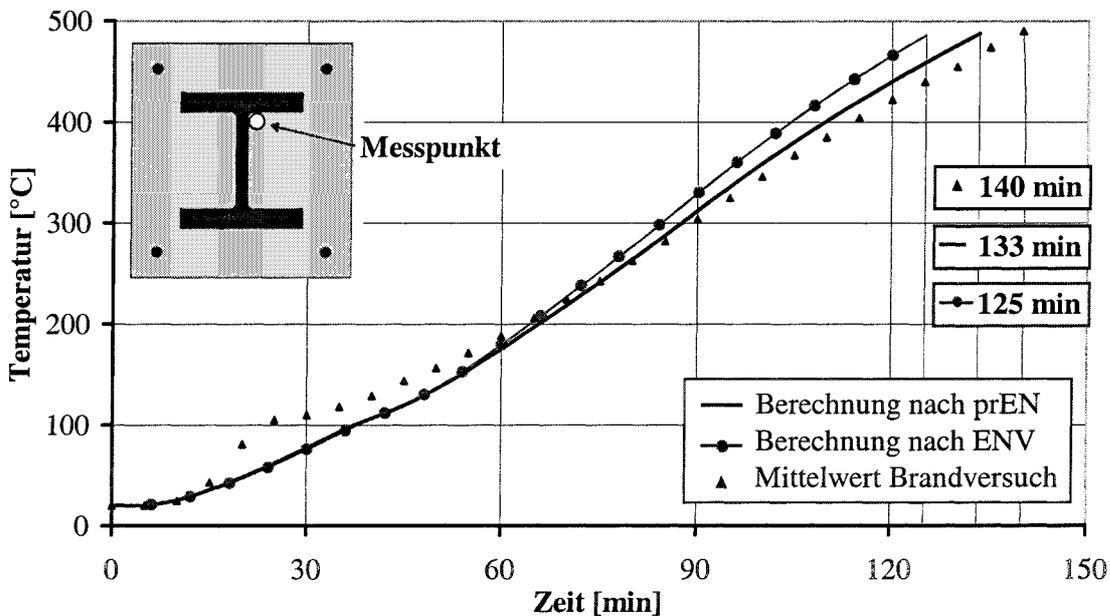


Abbildung 4-20: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Ausrundung der vollständig einbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 10 %

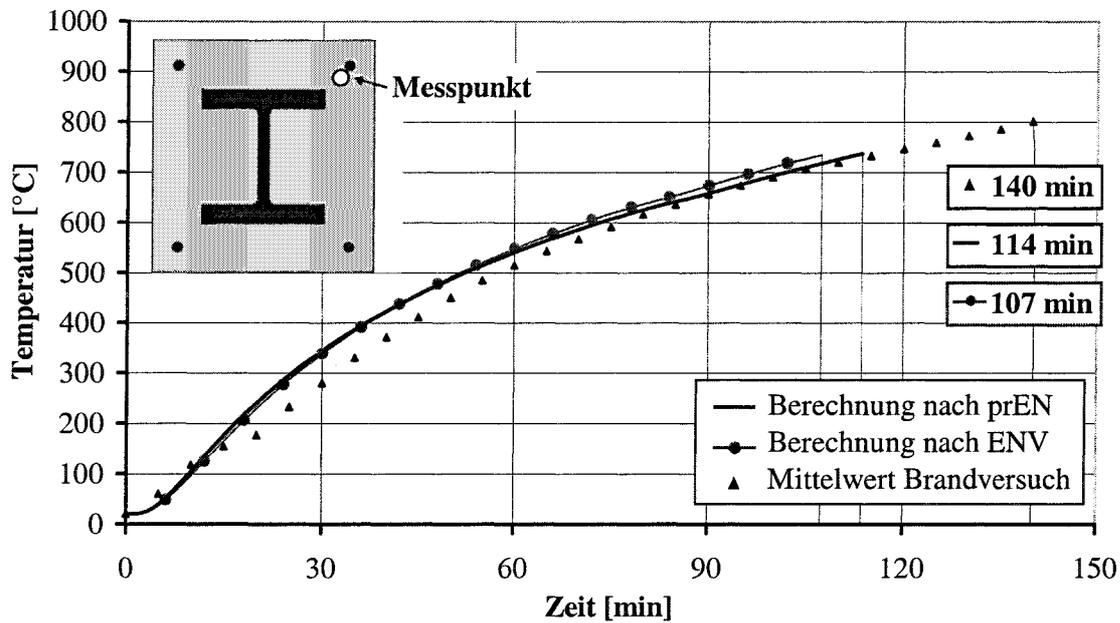
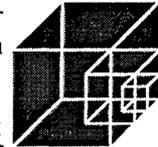


Abbildung 4-21: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung der vollständig einbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %

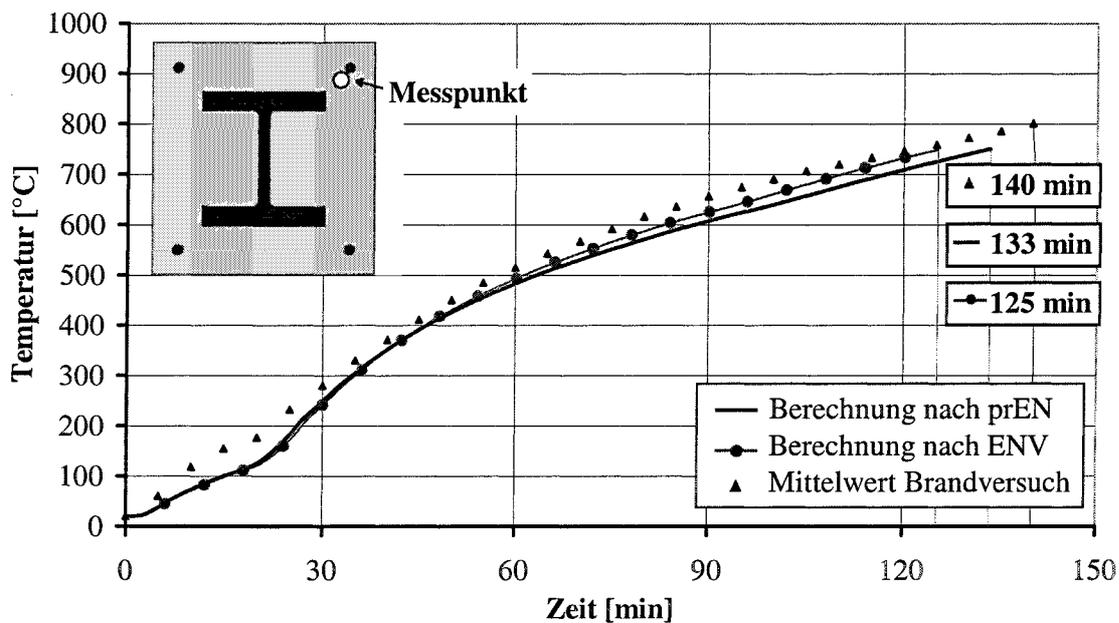
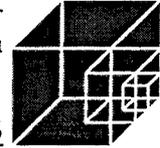


Abbildung 4-22: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung der vollständig einbetonierten Verbundstütze bei einer Betonfeuchtigkeit von 10 %



Der Vergleich der Feuerwiderstandsdauern zwischen der Berechnung nach ENV- und prEN-Fassung (siehe Tabelle 4-2) zeigt, dass bei der Berechnung mit den Materialparametern nach der prEN-Fassung, unabhängig von der Betonfeuchtigkeit, etwa 6 bis 7 Minuten längere Feuerwiderstandsdauern ermittelt werden.

Bei einer Berechnung mit den Materialparametern nach prEN-Fassung und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  nach Gleichung (3.5), wodurch die gleiche Temperaturleitfähigkeit  $a$  wie nach ENV-Fassung vorliegt, ergeben sich die gleichen Feuerwiderstandszeiten wie nach ENV-Fassung.

Die ungünstigeren Versagenszeiten nach den Materialparametern der prEN-Fassung, sind demzufolge auf den ungünstigeren Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von Beton zurückzuführen (vgl. Abschnitt 3.2).

Die geänderten Wärmeübergangsbedingungen, die die Versagenszeit der kammerbetonierten Verbundstütze (vgl. Abschnitt 4.2) beeinflussen, spielen bei der Berechnung der vollständig einbetonierten Verbundstütze keine Rolle.

Auch bei diesem Querschnitt beeinflusst die Betonfeuchtigkeit die Feuerwiderstandsdauern. So werden bei einer Betonfeuchtigkeit von 10 % mindestens 18 Minuten höhere Versagenszeiten berechnet, als bei der Annahme von 0 %. Dieses Berechnungsergebnis liegt somit auf der sicheren Seite, wenn der Wassergehalt des Betons zu null angenommen wird.

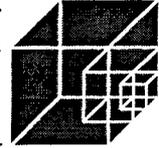
berechnete Feuerwiderstandsdauern	Betonfeuchtigkeit			im Versuch ermittelte Feuerwiderstandsdauer
	0 %	4 %	10 %	
nach ENV-Fassung	107 min	114 min	125 min	140 min
nach prEN-Fassung	114 min	120 min	133 min	

**Tabelle 4-2: Vergleich der Feuerwiderstandsdauern der Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil bei verschiedenen Betonfeuchtigkeiten**

Die berechneten Feuerwiderstandszeiten des Bauteils liegen bei allen Berechnungen unter der im Brandversuch ermittelten Feuerwiderstandszeit. Bei der Berechnung mit den Materialparametern nach der prEN-Fassung und einer angenommenen Betonfeuchtigkeit von 10 % kommt die berechnete Feuerwiderstandsdauer, der im Versuch ermittelte Versagenszeit am nächsten.

Bei der Untersuchung dieses Bauteils ist zusammenfassend zu sagen, dass die Berechnungen mit den Materialgesetzen nach der prEN-Fassung sowie der ENV-Fassung annähernd gleiche Ergebnisse liefern. Wobei die Berechnung nach der prEN-Fassung etwas geringere Temperaturen und höhere Feuerwiderstandszeiten bewirkt. Alle berechneten Versagenszeiten liegen unterhalb der im Versuch ermittelten Versagenszeit des Bauteils.

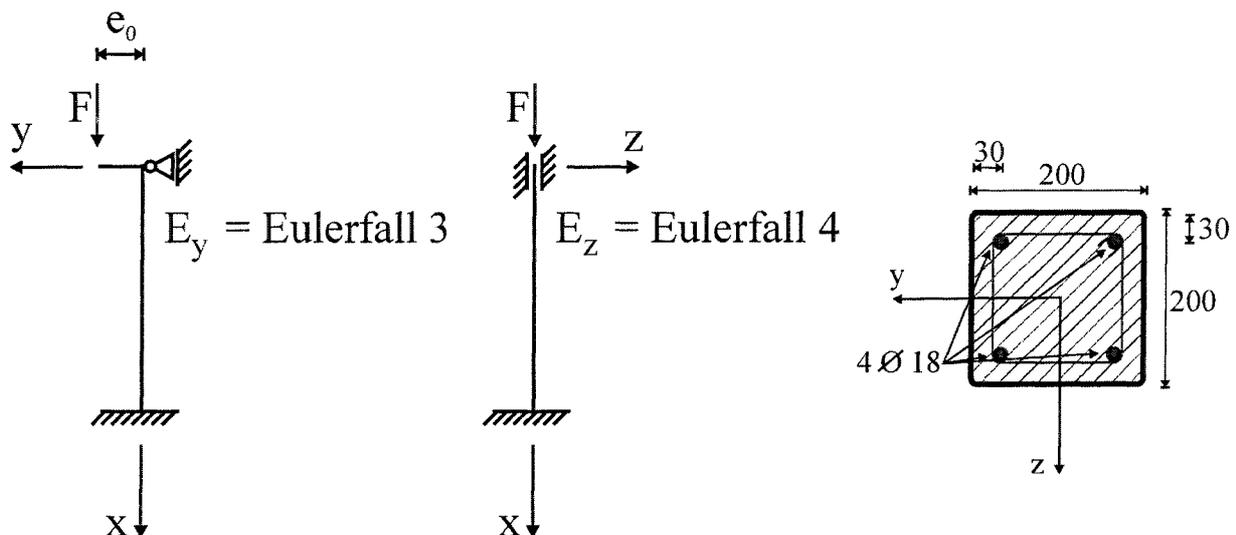
Das Sicherheitsniveau der ENV-Fassung des EC 4-1-2 wird bei diesem Bauteil, trotz geringfügig höherer Versagenszeiten, auch nach der prEN-Fassung eingehalten.



#### 4.2.4 Verbundstützen aus ausbetonierten Hohlprofilen

In diesem Abschnitt wird ein Brandversuch an einer Verbundstütze aus einem ausbetoniertem Hohlprofil nachgerechnet, der im Rahmen eines Forschungsauftrages am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig durchgeführt wurde. [1.10]

Die Materialfestigkeiten, das statische System, die Querschnittsabmessungen und die Belastung der Verbundstütze sind in Abbildung 4-23 abgebildet.



Stützenlänge:  $l_0 = 4200 \text{ mm}$

Stahlprofil:  $200 \times 200 \times 6,3$ ;  $f_{a,y} = 277 \text{ N/mm}^2$

Bewehrung:  $f_{s,y} = 475 \text{ N/mm}^2$

Beton:  $f_{cyl} = 36,0 \text{ N/mm}^2$

Exzentrizität:  $e_0 = 50 \text{ mm}$

Einzellast:  $F = 643 \text{ kN}$

**Abbildung 4-23: Statisches System, Belastung, Materialfestigkeiten und Querschnittsabmessungen der Verbundstütze aus einem ausbetoniertem Hohlprofil**

Für die Berechnungen dieser Verbundstütze wurden die folgenden Parameter verändert:

1. die Materialgesetze nach ENV- bzw. prEN-Fassung und
2. die Betonfeuchtigkeit mit 0 % bzw. 4 %.

Die berechneten und gemessenen Temperaturen dieser Verbundstütze sind in den Abbildungen 4-24 bis 4-29 dargestellt. Es sind Temperaturen für die Querschnittsmitte, eine Betontiefe von 77 mm sowie die Bewehrung abgebildet. Die Abbildungen zeigen berechnete Werte nach der ENV- und prEN-Fassung des EC 4-1-2 sowie die Mittelwerte der im Brandversuch gemessenen Temperaturen. Für jeden Messpunkt sind Berechnungen mit 0 % und 4 % Betonfeuchtigkeit durchgeführt worden.

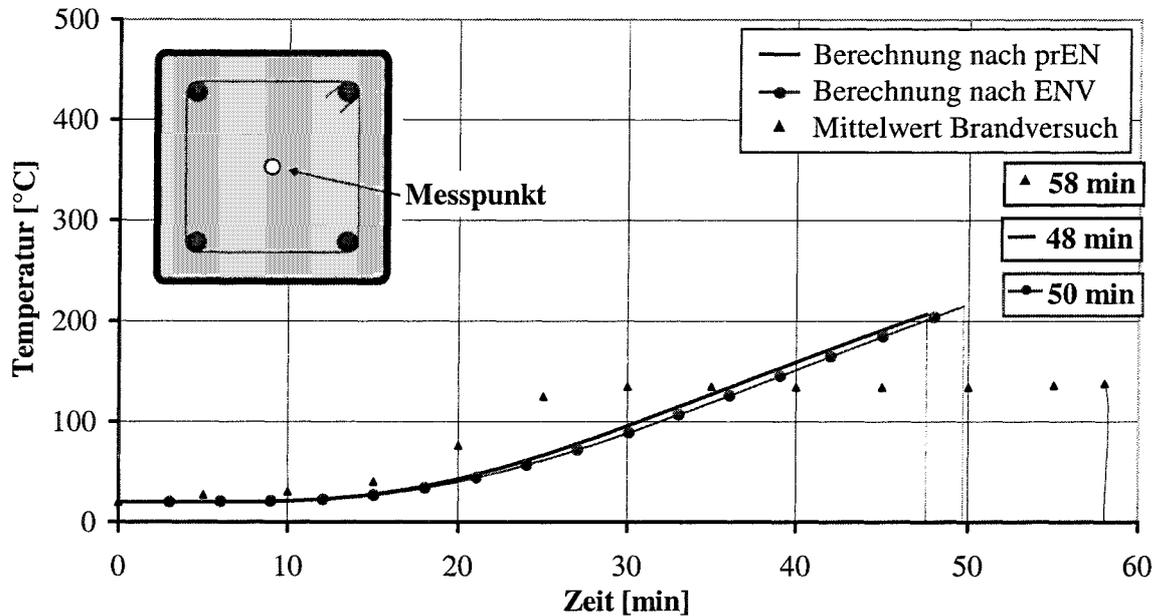
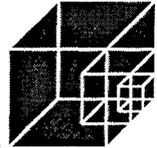


Abbildung 4-24: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen der Verbundstütze aus ausbetoniertem Hohlprofil bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 % in Querschnittsmitte

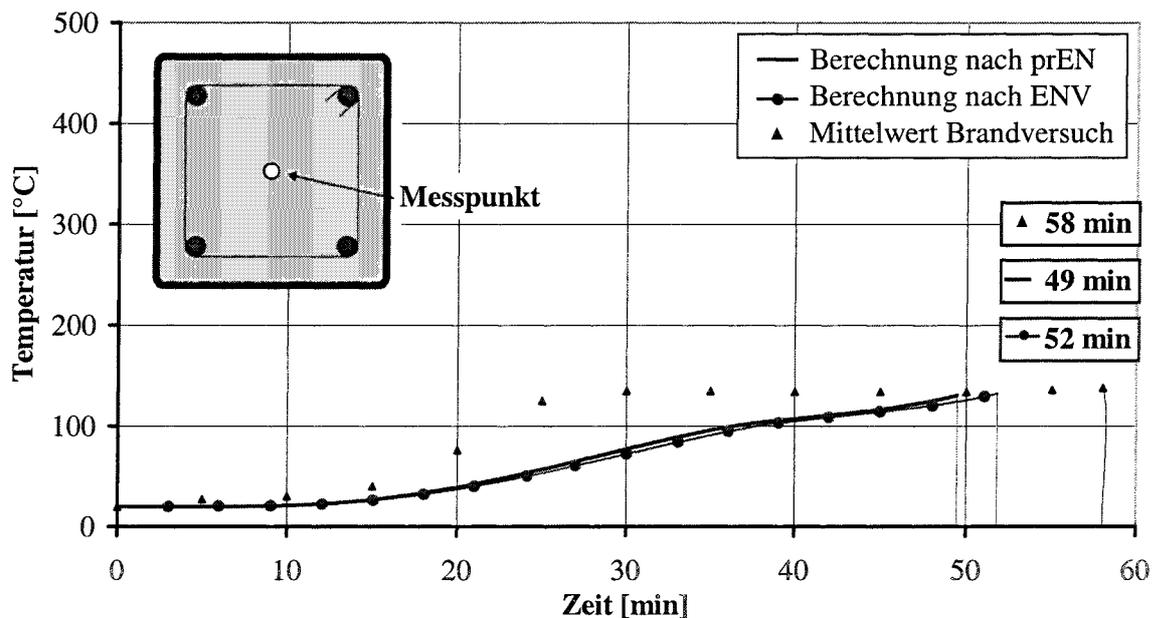


Abbildung 4-25: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen der Verbundstütze aus ausbetoniertem Hohlprofil bei einer Betonfeuchtigkeit von 4 % in Querschnittsmitte

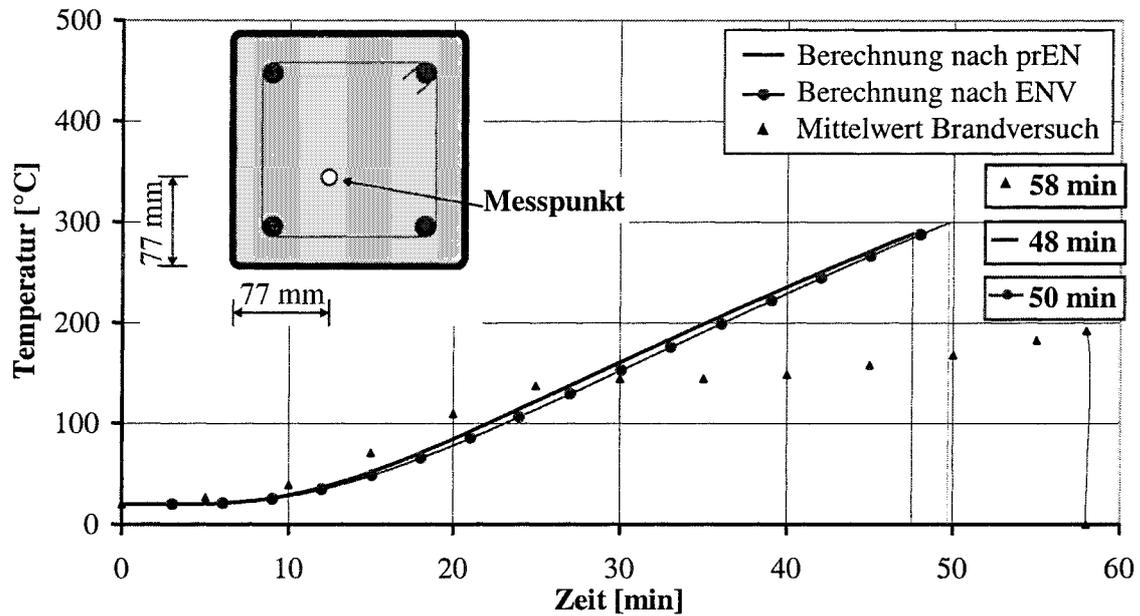
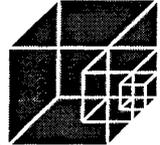


Abbildung 4-26: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen der Verbundstütze aus ausbetoniertem Hohlprofil bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 % in 77 mm Betontiefe

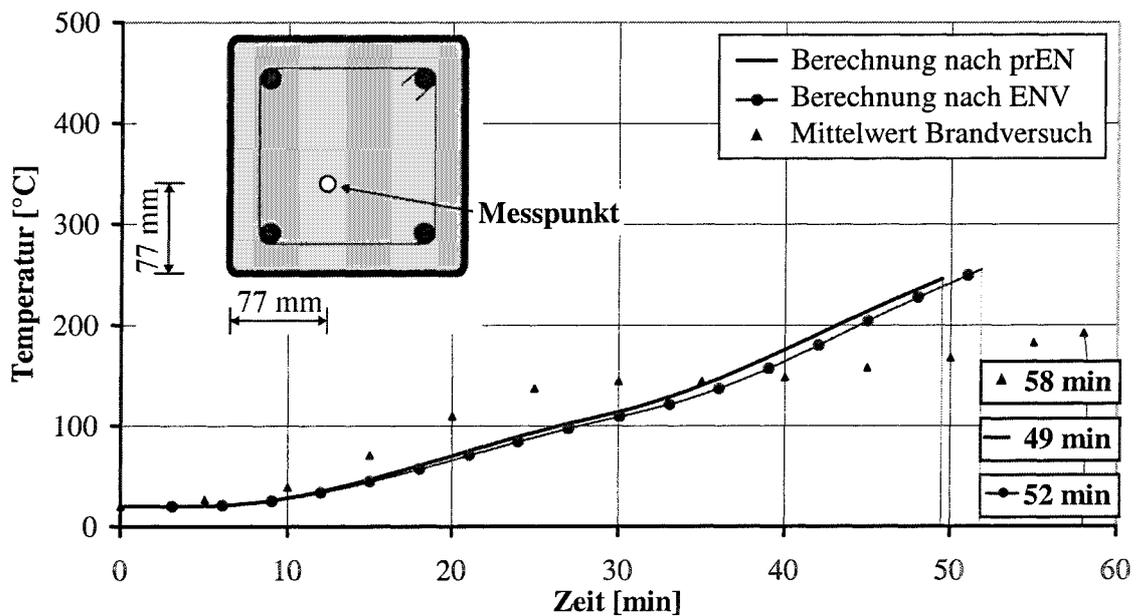


Abbildung 4-27: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen der Verbundstütze aus ausbetoniertem Hohlprofil bei einer Betonfeuchtigkeit von 4 % in 77 mm Betontiefe

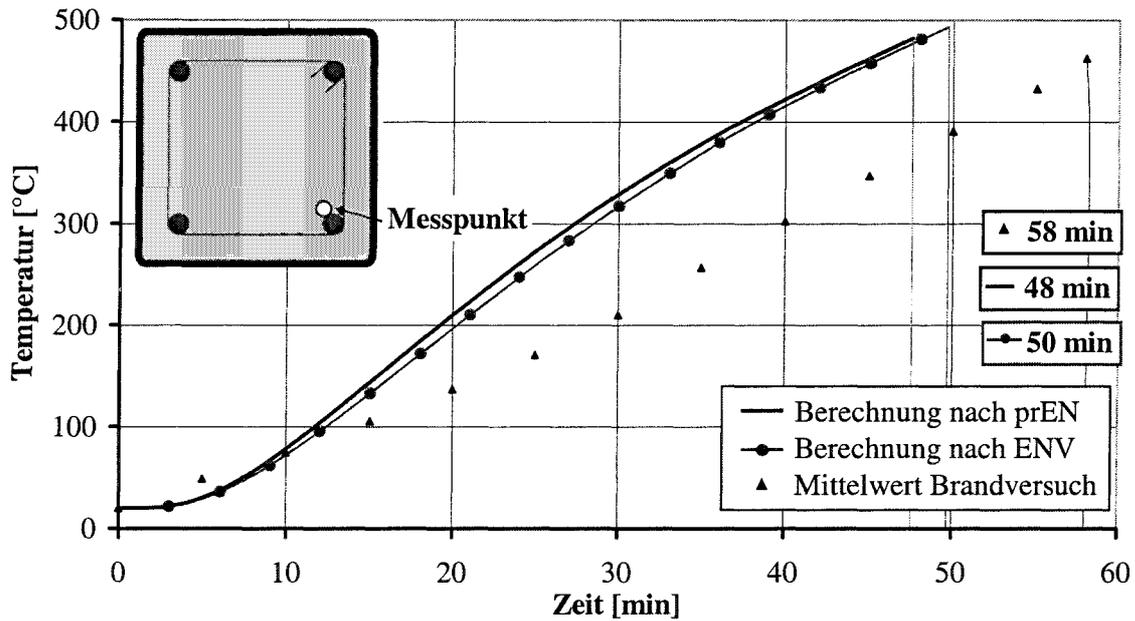
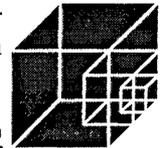


Abbildung 4-28: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung der Verbundstütze aus ausbetoniertem Hohlprofil bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %

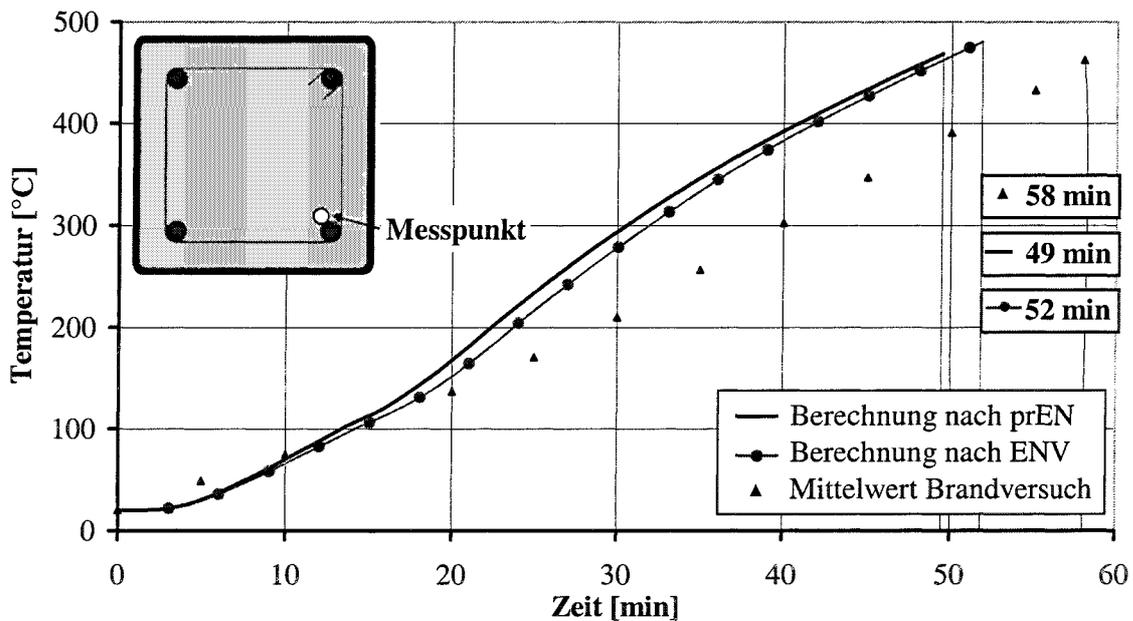
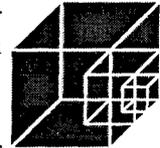


Abbildung 4-29: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung der Verbundstütze aus ausbetoniertem Hohlprofil bei einer Betonfeuchtigkeit von 4 %



Aus allen Abbildungen wird deutlich, dass die berechneten Temperaturen nach den bisherigen Materialkennwerten der ENV-Fassung annähernd mit denen auf der Basis der „neuen“ Materialkennwerte nach prEN-Fassung übereinstimmen. Vergleiche von berechneten mit gemessenen Temperaturen in Querschnittsmitte (Abbildungen 4-24 und 4-25) bzw. in einer Tiefe von 77 mm (Abbildungen 4-26 und 4-27) zeigen, dass die Übereinstimmung bei der Berechnung mit 4 % Betonfeuchtigkeit mit den gemessenen Temperaturen relativ gut ist.

An der Bewehrung hat die Betonfeuchtigkeit kaum einen Einfluss auf die Temperaturen (vgl. Abbildung 4-28 und 4-29).

In Bezug auf die Feuerwiderstandszeiten zeigen die Berechnungen nach ENV- und prEN-Fassung nur sehr kleine Unterschiede. Mit der Berechnung nach den bisherigen Materialkennwerten werden zwei bis drei Minuten längere Feuerwiderstandsdauern ermittelt.

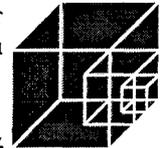
Bei diesem Bauteil hat die Betonfeuchtigkeit einen sehr geringen Einfluss auf die Versagenszeit, so beträgt die Differenz zwischen den Versagenszeiten bei 0 % und 4 % Betonfeuchtigkeit etwa ein bis zwei Minuten (siehe Tabelle 4-3).

Die berechneten Feuerwiderstandszeiten liegen etwas unterhalb der im Brandversuch ermittelten Feuerwiderstandszeit.

berechnete Feuerwiderstandsdauern	Betonfeuchtigkeit		im Versuch ermittelte Feuerwiderstandsdauer
	0 %	4 %	
nach ENV-Fassung	50 min	52 min	58 min
nach prEN-Fassung	48 min	49 min	

**Tabelle 4-3: Vergleich der Feuerwiderstandsdauern der Verbundstütze aus einem ausbetoniertem Hohlprofil**

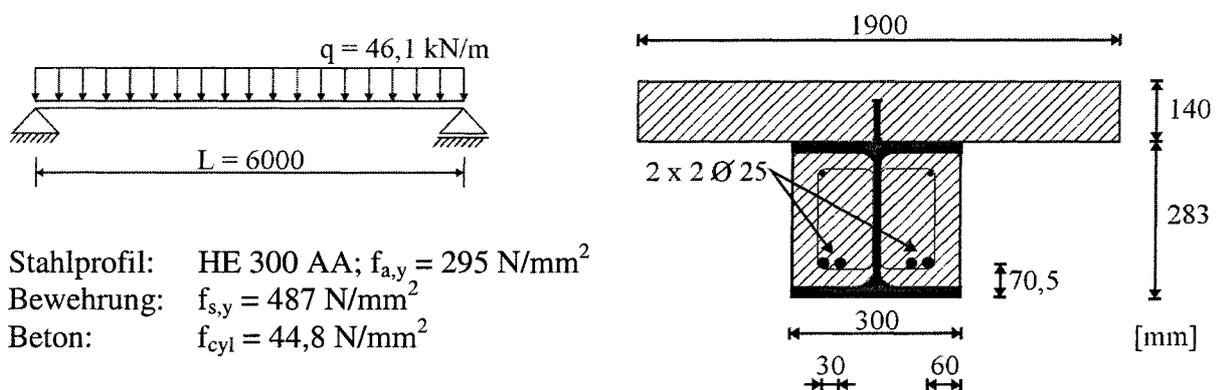
Das Sicherheitsniveau dieses Bauteils nach ENV-Fassung des EC 4-1-2 wird auch nach prEN-Fassung eingehalten.



#### 4.2.5 Verbundträger mit ausbetonierten Kammern

Der in dieser Arbeit simulierte Brandversuch an einem kammerbetonierten Verbundträger wurde 1984 im Auftrag der Firma ARBED Recherches, Luxemburg im Rahmen eines Forschungsprojektes in Gent (Belgien) durchgeführt. [1.21]

Die wesentlichen Daten des Bauteils sind in Abbildung 4-30 zusammengestellt. In der Dokumentation des Brandversuches wurde der Wassergehalt in der Mitte der Betondecke mit  $40 \text{ l/m}^3$  (ca. 1,6 Massen-%) und an der Betonoberfläche auf Null abfallend angegeben.



**Abbildung 4-30: Materialfestigkeiten, statisches System, Querschnittsabmessungen und Belastungen des kammerbetonierten Verbundträgers**

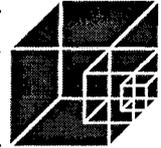
Bei den Simulationsberechnungen für diesen Verbundträger wurden folgende Parameter verändert:

1. die Materialkennwerte nach ENV- bzw. prEN-Fassung und
2. die Betonfeuchtigkeit mit 0 % bzw. 4 %.

In den Abbildungen 4-31 bis 4-36 sind die berechneten Temperaturen an der Bewehrung, am Steg und an der Flanschausrundung des kammerbetonierten Verbundträgers abgebildet. In allen Diagrammen sind berechnete Temperaturen nach der ENV- und der prEN-Fassung sowie im Brandversuch gemessene Temperaturen dargestellt. Für jeden Messpunkt wurden jeweils Berechnungen mit 0 % und 4 % Betonfeuchtigkeit durchgeführt.

In den Abbildungen 4-31 und 4-32 sind die Temperaturen an der Bewehrung des Verbundträgerquerschnittes dargestellt. Dieser Messpunkt wird durch die Materialeigenschaften des ihn umgebenden Betons beeinflusst. Aus den Abbildungen wird deutlich, dass die Temperaturen nach der Berechnung mit den bisherigen Materialkennwerten und den „neuen“ Kennwerten annähernd übereinstimmen. An der Bewehrung liegen die berechneten Temperaturen nach der prEN-Fassung geringfügig unter den Werten nach ENV-Fassung. Die Erklärung dafür ist, dass die thermischen Materialparameter nach prEN-Fassung nicht genau mit denen der ENV-Fassung abgestimmt werden konnten, da ein Verlauf der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit oberhalb der oberen Grenze nicht gewählt werden darf. (vgl. Kapitel 3.2)

Zwischen der Abbildung 4-31 und Abbildung 4-32 wird der Einfluss des Wassergehaltes des Betons auf die Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Zeit deutlich. Nach 60 Minuten



Branddauer ist ein Temperaturunterschied von über 50°C zwischen den berechneten Werten mit 0 % und 4 % Betonfeuchtigkeit feststellbar.

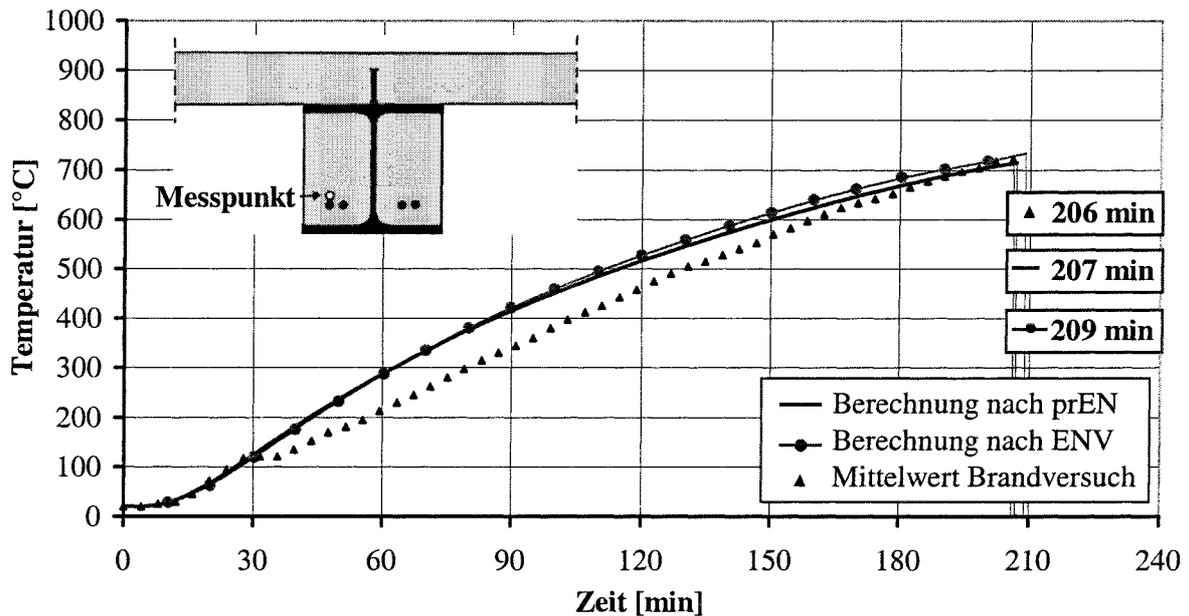


Abbildung 4-31: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung des kammerbetonierten Verbundträgers bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %

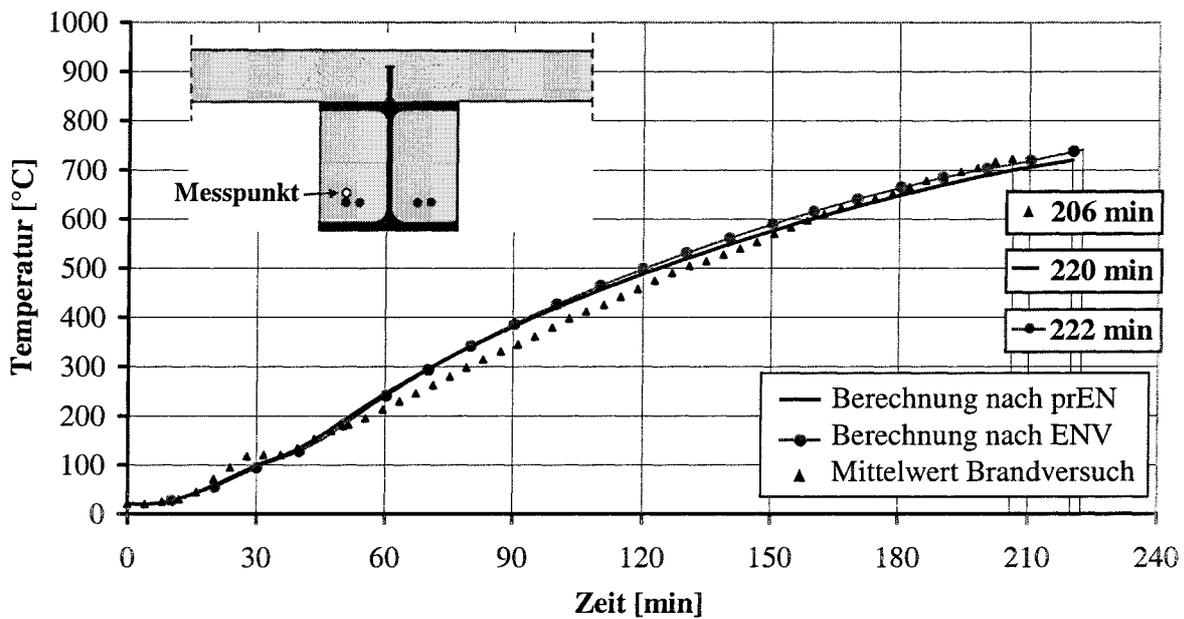


Abbildung 4-32: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen an der Bewehrung des kammerbetonierten Verbundträgers bei einer Betonfeuchtigkeit von 4 %

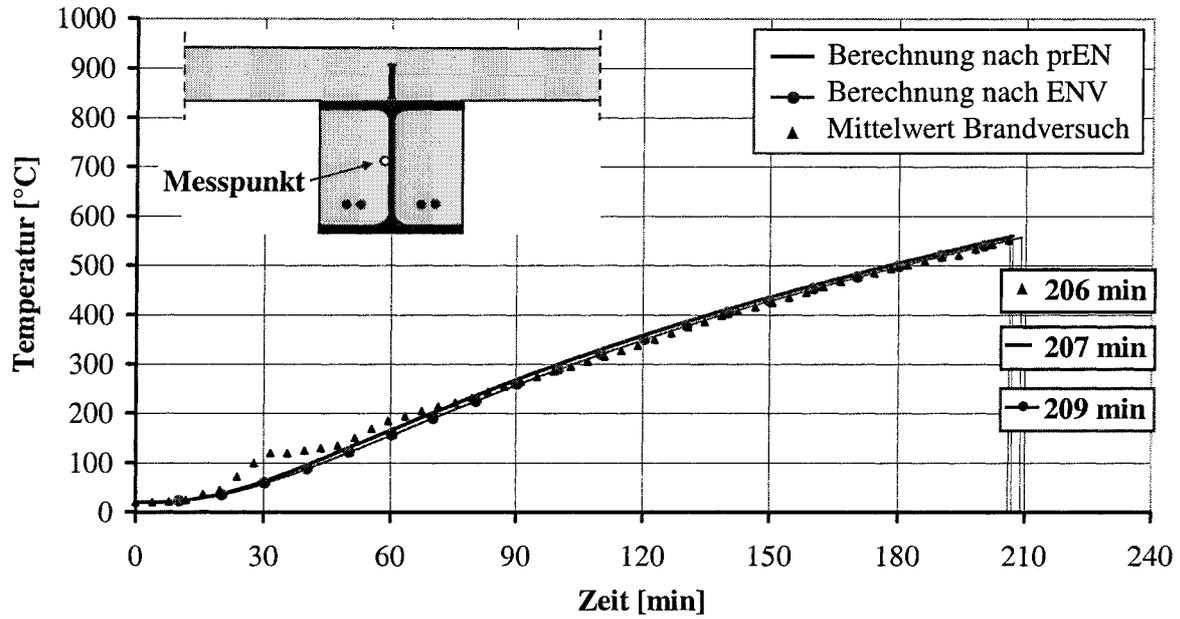
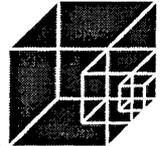


Abbildung 4-33: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen am Steg des kammerbetonierten Verbundträgers bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %

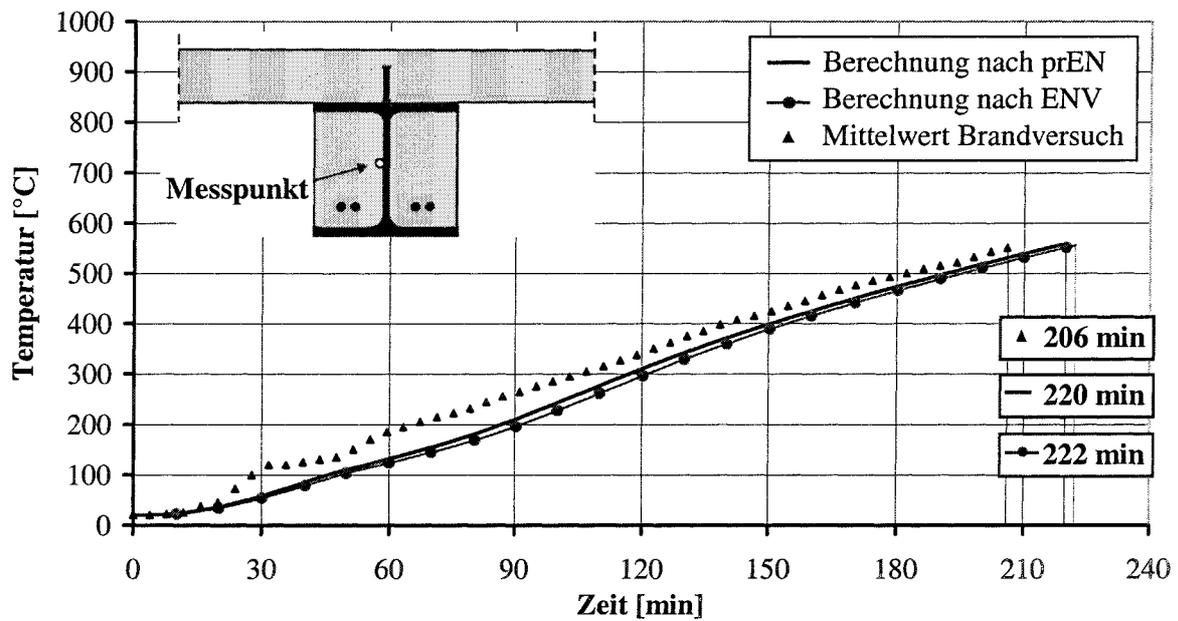


Abbildung 4-34: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen am Steg des kammerbetonierten Verbundträgers bei einer Betonfeuchtigkeit von 4 %

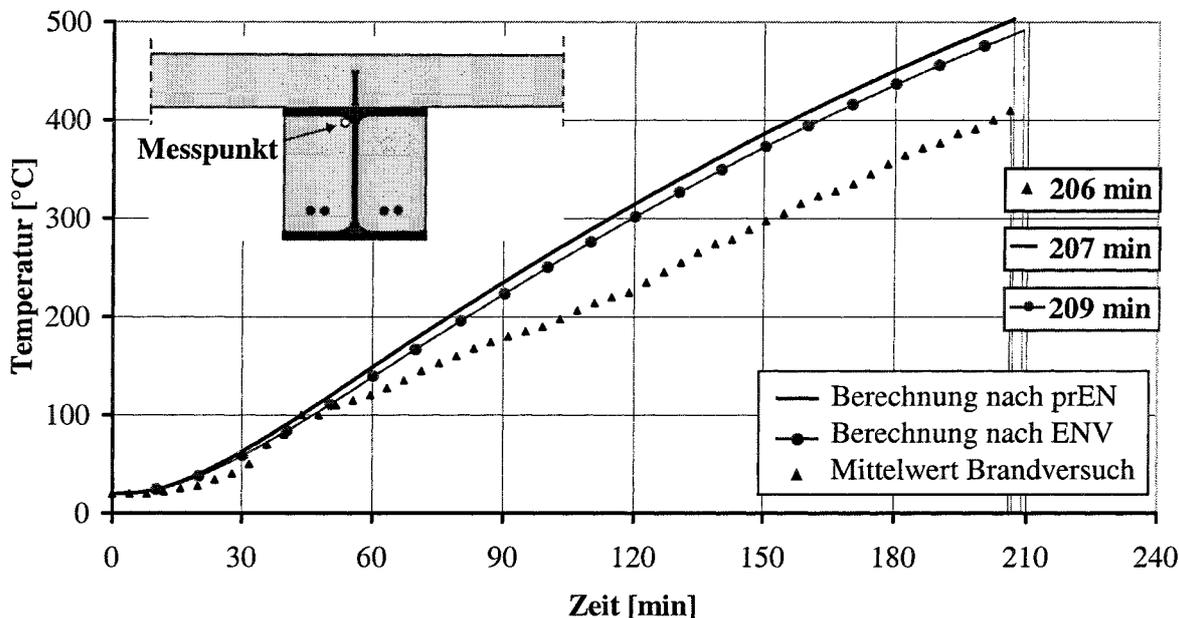
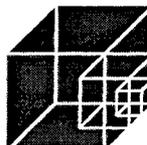


Abbildung 4-35: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen in der Ausrundung des kammerbetonierten Verbundträgers bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %

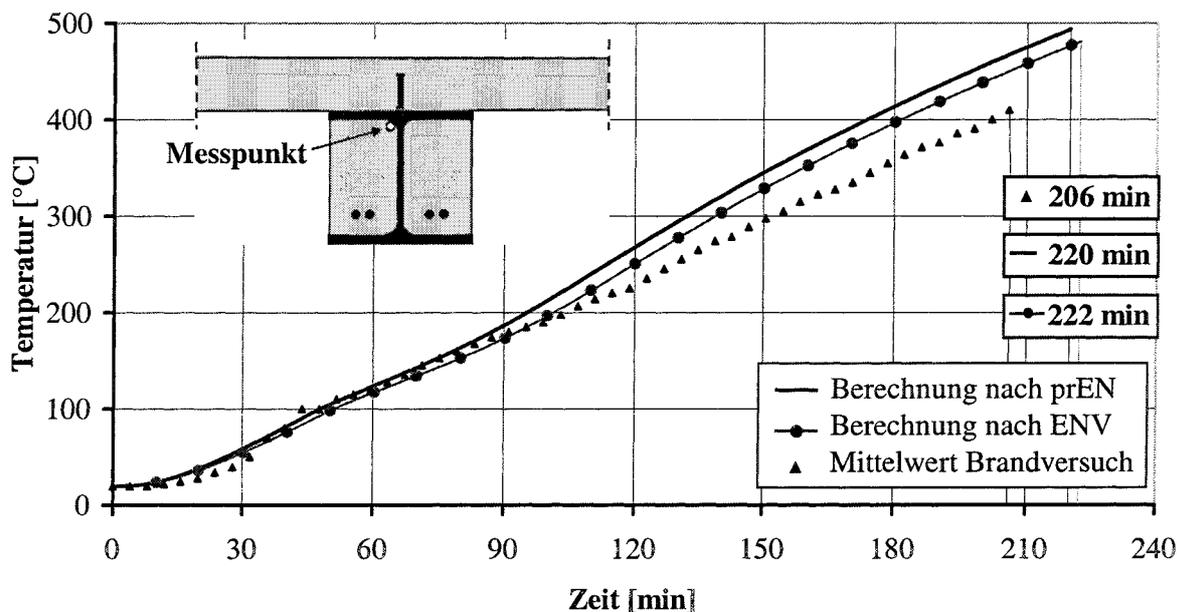
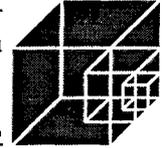


Abbildung 4-36: Vergleich gemessener und berechneter Bauteiltemperaturen in der Ausrundung des kammerbetonierten Verbundträgers bei einer Betonfeuchtigkeit von 4 %



In den Abbildungen 4-33 bis 4-36 ist der Einfluss der thermischen Materialgesetze des Stahls zu erkennen. Im Gegensatz zu den Temperaturen an der Bewehrung aus Abbildung 4-31 und 4-32 liegen die berechneten Temperaturen am Steg und an der Flanschausrundung nach prEN-Fassung etwas oberhalb der Werte nach ENV-Fassung. Diese Beobachtung ist auf die geänderte resultierende Emissivität zurückzuführen, die das Erwärmungsverhalten des Stahls beeinflusst.

Abbildung 4-33 zeigt die Temperaturen am Steg des Verbundträgerquerschnitts bei einer Betonfeuchtigkeit von 0 %. Die gemessenen Temperaturen stimmen mit den berechneten Temperaturen sowohl nach ENV- als auch nach prEN-Fassung überein. Die Erwärmung des Steges erfolgt direkt über den beflammt Flansch. Die Wärmeleitfähigkeit des Stahls ist wesentlich größer als die des Betons, deshalb haben die veränderten thermischen Betonkennwerte und der Wassergehalt kaum einen Einfluss auf das Erwärmungsverhalten des Steges.

Der Vergleich der Feuerwiderstandszeiten in Tabelle 4-4 in Bezug auf die unterschiedlichen Materialkennwerte zeigt, dass die Berechnungen nach den bisherigen und den „neuen“ Materialkennwerten keine wesentlichen Veränderungen aufweisen. Nach der prEN-Fassung errechnen sich unabhängig von der Betonfeuchtigkeit etwa 2 Minuten geringere Feuerwiderstandszeiten, als mit den bisherigen Materialkennwerten nach ENV-Fassung.

Eine Gegenüberstellung der Feuerwiderstandszeiten in Abhängigkeit der Betonfeuchtigkeit ist ebenfalls in Tabelle 4-4 dargestellt. Dieser Vergleich zeigt deutlich den Einfluss des Wasser­gehaltes im Beton auf die Feuerwiderstandsdauer des Bauteiles. Bei der Berechnung mit einer Betonfeuchtigkeit von 4 % hält der Verbundträger dem Feuer 13 Minuten länger stand, als bei trockenem Beton.

Bezüglich der im Brandversuch ermittelten Versagenszeit liegen die berechneten Werte bei 0 % Betonfeuchtigkeit in der gleichen Größenordnung und die Werte mit 4 % Betonfeuchtigkeit mindestens 14 Minuten über der gemessenen Versagenszeit.

Bei diesem Bauteil wird sehr gut deutlich, dass durch die Annahme einer Betonfeuchtigkeit zwar die gemessenen Temperaturen annähernd berechnet werden können, aber dadurch auch die Feuerwiderstandsdauer des Bauteils erhöht wird, so dass die gemessene Versagenszeit deutlich überschritten wird.

berechnete Feuerwiderstandsdauern	Betonfeuchtigkeit		im Versuch ermittelte Feuerwiderstandsdauer
	0 %	4 %	
nach ENV-Fassung	209 min	222 min	206 min
nach prEN-Fassung	207 min	220 min	

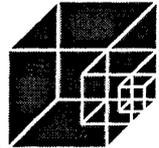
**Tabelle 4-4: Vergleich der Feuerwiderstandsdauern des Verbundträgers bei verschiedenen Betonfeuchtigkeiten**

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die berechneten Temperaturen nach ENV- und prEN-Fassung nur gering von einander abweichen und diese Abweichungen im Wesentlichen auf die geänderte resultierende Emissivität zurückzuführen sind.



Auch die berechneten Feuerwiderstandsdauern weichen nur gering voneinander ab. Ein Vergleich mit der Versagenszeit des Brandversuches zeigt, dass die berechneten Feuerwiderstandsdauern unter der Annahme von 0 % Betonfeuchtigkeit mit der gemessenen Versagenszeit übereinstimmen.

Bei diesem kammerbetonierten Verbundträger ist das Sicherheitsniveau der ENV-Fassung des EC 4-1-2 nach der prEN-Fassung eingehalten.

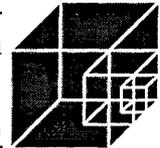


#### 4.2.6 Zusammenfassung der Vergleichsrechnungen

Aus den Vergleichsrechnungen der untersuchten Bauteile ist zu erkennen, 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. Bei der Verbundstütze mit vollständig einbetoniertem Stahlprofil, die maßgeblich durch die Materialparameter des Betons beeinflusst wird, werden die berechneten Temperaturen nach prEN-Fassung etwas niedriger berechnet, als nach ENV-Fassung. Bei zunehmender Betonfeuchtigkeit werden die Temperaturen im Beton abgemindert.

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 im Vergleich zum Brandversuch konservativ sind. Die Feuerwiderstandszeiten erhöhen sich, wenn angenommen wird, dass Feuchtigkeit im Beton vorhanden ist. Ist die Betonfeuchtigkeit eines Bauteils nicht bekannt, so sollte sie auf der sicheren Seite liegen zu Null angenommen werden. Nach Eurocode 4-1-2 darf, falls keine genauen Angaben gemacht wurden, der Wassergehalt des Betons mit maximal 4 % angenommen werden.

Für alle untersuchten Bauteile wurde das Sicherheitsniveau der ENV-Fassung auch nach der prEN-Fassung eingehalten.



## 5 Zusammenfassung

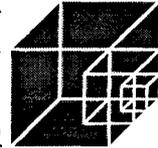
In dem Forschungsvorhaben wurden die thermischen Materialkennwerte von Normalbeton für die brandschutztechnische Bemessung im Verbundbau untersucht. Diese sind bei der Überführung des Eurocodes 4 Teil 1-2 von der ENV- in die EN-Version neu definiert worden. Die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit ist dabei so festgelegt worden, dass innerhalb eines vorgegebenen Bereichs in den einzelnen Mitgliedsländern im Rahmen des Nationalen Anhangs dem nationalen Sicherheitsniveau entsprechende Festlegungen zu treffen sind.

Für den Verlauf der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton sind im Schlusssentwurf des EC 4-1-2 vom Oktober 2003 eine obere und eine untere Grenze angegeben. Unter der Voraussetzung, dass auch zukünftig das bisherige Sicherheitsniveau der ENV-Fassung des EC 4-1-2 beibehalten werden soll, war es das Ziel dieser Arbeit einen Verlauf für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton zu erarbeiten und an ausgewählten Beispielen des Stahlverbundbaus zu verifizieren. Zusätzlich wurden auch in Deutschland durchgeführte Brandversuche an Verbundstützen und ein in Belgien durchgeführter Brandversuch an einem Verbundträger in die Untersuchungen miteinbezogen und mit den berechneten Ergebnissen verglichen.

Als nationale Regelung wird als Ergebnis des Forschungsvorhabens die obere Grenze nach prEN-Fassung des EC 4-1-2 für den Verlauf der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit vorgeschlagen. Die in diesem Forschungsbericht 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. Hossler an der TU Braunschweig verifiziert wurde.

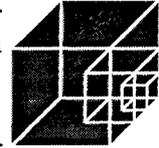
Bezüglich der thermischen Materialkennwerte von Normalbeton kann somit bestätigt werden, dass das gemäß DIN V ENV 1994-1-2 definierte Sicherheitsniveau in den Regelungen der prEN 1994-1-2 vom Oktober 2003 eingehalten wird.

Die bisherigen Untersuchungen betreffen ausschließlich die Auswirkungen der geänderten thermischen Materialkennwerte von Normalbeton. In weitergehenden Untersuchungen, die im Rahmen eines z.Zt beantragten Forschungsprojektes durchgeführt werden sollen, sind weitere Neuregelungen der prEN 1994-1-2 hinsichtlich der Wahrung des Sicherheitsniveaus zu überprüfen.



## 6 Literatur

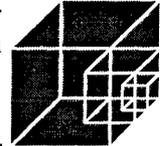
- [1.1] Anderberg, Y.: Background documentation for thermal conductivity of concrete, CEN/TC 250/SC 2/PT 1-2 Doc N150, 2001-07-03
- [1.2] BOFIRE: Computerprogramm zur numerischen Simulation von Stahl- und Verbundtragwerken unter Brandbeanspruchung, Institut für Stahlbau, Universität Hannover, Hannover, 2000
- [1.3] Dahl, J.; Schaab, A.: "Brandversuche zur Optimierung und Überprüfung von Schutzkonzepten für einschalige Tunnelauskleidungen", Braunschweiger Brandschutz-Tage 2003, 10. Fachseminar Brandschutz – Forschung und Praxis, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Braunschweig, 2003
- [1.4] Haß, R.: „Brandversuche an Stahlbeton- und Verbundstützen“, Sonderforschungsbe-  
reich 148 Brandverhalten von Bauteilen, Arbeitsbericht 1984-1986, Teil I, Band A,  
Seite 80-99, TU Braunschweig, Braunschweig, 1987
- [1.5] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, VDI-Verlag GmbH, Düs-  
seldorf
- [1.6] Hosser, D.; Dorn, T.: Entwicklung und Absicherung praxisgerechter Näherungsver-  
fahren für die brandschutztechnische Bemessung von Verbundbauteilen, Institut für  
Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Braunschweig, 1993
- [1.7] Hosser, D.: Brandschutz in Europa – Bemessung nach Eurocodes , Erläuterungen  
und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6, Beuth-  
Kommentare, Berlin 2000
- [1.8] Hosser, D.; Richter, E.: Hintergrundinformationen zum Eurocode 2 Teil 1-2: Trag-  
werksbemessung für den Brandfall, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2001
- [1.9] Hothan, S.: Zur dreidimensionalen Simulation von Deckentragwerken im Brandfall,  
Dissertation, Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau, Universität Hannover, Heft 21,  
Schaker Verlag, Aachen, 2004
- [1.10] Kordina, K.; Klingsch, W.: „Brandverhalten von Stahlstützen im Verbund mit Beton  
und von massiven Stahlstützen ohne Beton“, Forschungsbericht, Projekt 35, Stu-  
diengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., Düsseldorf, 1983
- [1.11] N.N: Gleichwertigkeit von Brandschutznachweisen nach Eurocode und DIN 4102  
Teil 4, Abschlussbericht, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 1998
- [1.12] Richter, E.; Hosser, D.: "Brandverhalten von Beton-, Stahlbeton- und Spannbeton-  
bauteilen nach deutschen und europäischen Normen“, Der Bauingenieur: mit Bauin-  
formatik; Zeitschrift für das gesamte Bauwesen; Organ der VDI-Gesellschaft Bau-  
technik, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, Band 77, 2002, 7-8, Seiten 370-377



- [1.13] Roik, K.; Schaumann, P.; Ziegler, Th.: Hintergrundbericht zu EUROCODE 4, Verträglichkeitsuntersuchungen an ausgewählten Problemen des Hochbaus – Verifizierung rechnerischer Nachweisverfahren der brandschutztechnischen Bemessung, Ministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, RS II 2 - 67 41 02 – 90 12, Bochum, 1993
- [1.14] Schaumann, P.; Upmeyer, J.: Nachweis von Verbundbauteilen unter Naturbränden, Stahlbau 71, 2002, Heft 5, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 325-333
- [1.15] Schaumann, P.; Upmeyer, J.: Neue Nachweistabelle zum Feuerwiderstand kammerbetonierter Verbundstützen, Stahlbau 71, 2002, Heft 5, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 334-341
- [1.16] Schaumann, P.; Hothan, S.: Fire Design of a New Slim Floor Beam System Using FEM-Analysis, SiF '02, 2<sup>nd</sup> International Workshop Structures in Fire, Christchurch, New Zealand, March 2002
- [1.17] Schaumann, P.: Improvements of Fire Design Methods for Composite Construction Based on General Calculation Models, 2001 Shanghai ISSSF International Seminar on Steel Structures in Fire, Shanghai, P.R.CHINA, 2-4 November 2001, Tongji University
- [1.18] Schaumann, P.; Upmeyer, J.: Behaviour of Composite Structures exposed to Natural Fires, The 6th. ASCCS International Conference – Steel-Concrete Composite Structures, Los Angeles, USA, 03/2000
- [1.19] Schaumann, P.; Haß, R.; Falke, J.: Anwendungsbezogene Aufbereitung der neueren nationalen Forschungsergebnisse für Verbundbauteile unter Brandbeanspruchung im Spiegel internationaler Bemessungsvorschläge, Projekt 210, Forschungsbericht, Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Düsseldorf, 1991
- [1.20] 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
- [1.21] Schleich, J. B.: Computer Assisted Analysis of the Fire Resistance of Steel and Composite Concrete-Steel Structures (REFAO - CAFIR), C.E.C. Agreement Number Nr.: 7210-SA/502, Final Report, ARBED-Recherches, Luxemburg, 1986
- [1.22] Upmeyer, J.: Nachweis der Brandsicherheit von kammerbetonierten Verbundbauteilen über Grenzbrandlasten, Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau der Universität Hannover, Heft 19, Shaker Verlag, Aachen 2001

## Normen

- [2.1] prEN 1990 Eurocode – Basis of structural design, July 2001
- [2.2] ENV 1991-1 Eurocode 1: Basis of Design and actions on structures, Part 1: Basis of Design, 1994



- [2.3] EN 1991-1-2 Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, September 2003
- [2.4] 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
- [2.5] DIN V ENV 1992-1-2 Eurocode 2 – Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Mai 1997
- [2.6] prEN 1992-1-2 (Draft for Stage 49) Eurocode 2 – Design of concrete structures, Part 1-2: General rules – Structural fire design; July 2002
- [2.7] DIN V ENV 1993-1-2 Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, Mai 1997
- [2.8] prEN 1993-1-2 Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, April 2003
- [2.9] 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
- [2.10] 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
- [2.11] Draft prEN 1994-1-2 Eurocode 4 – Design of Composite Steel and Concrete Structures , Part 1-2: General rules – Structural fire design, Final Edited Version (Stage 49), 30.10.2003
- [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 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, September 1999
- [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 1994-1-2 Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall, September 1999
- [2.16] DIN 1045, Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung, Juli 1988