Teil 2: Thermisches Verhalten



# TEIL 2

# THERMISCHES VERHALTEN

• von

L. Twilt TNO Bouw Niederlande

# INHALT

1	EINL	EITUNG	3
2	GRUN	JDLAGEN	4
3	BERE	CHNUGSVERFAHREN FÜR STAHLBAUTEILE	7
	3.1	Anwendungsbereich	7
	3.2	Ungeschützte Stahlbauteile	9
	3.3	Geschützte Stahlbauteile	11
	3.4	Bemessungsparameter zur Temperaturentwicklung	12
	3.4.1	Allgemeines	. 12
	3.4.2	Ermittlung und Einfluss des Profilfaktors	. 12
	3.4.3	Eigenschaften der Brandschutzmaterialien für Stahlbauteile	. 13
	3.4.4	Naturbrandbedingungen	. 16
4	BERE	CHNUNGSVERFAHREN FÜR VERBUNBAUTEILE	. 17
	4.1	Anwendungsbereich	17
	4.2	Berechnungsregeln zu dem thermischen Verhalten von kammerbetonierten	
		Verbundstützen	18
	4.3	Vereinfachtes Berechnungsverfahren zum Nachweis des Wärmedämmkriteriums,	,I''
		bei Verbunddecken mit Profilblechen	19
	4.4	Vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Temperaturbestimmung der Feldbewehru	ung
		von Verbunddecken	21
	4.5	Die Verwendung von allgemeinen thermischen Modellen im "vereinfachten"	
		Berechnungsverfahren für betongefüllte Hohlprofilstützen	24
	4.6	Fazit	26
R	EFERENZ	ZEN	. 26
А	NHANG	A: FOURIER DIFFERENTIALGLEICHUNG	. 28
А	NHANG		
	INITAINU	B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER	
		B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER VORAUSSETZUNG EINER EINHEITLICHEN	
		B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER VORAUSSETZUNG EINER EINHEITLICHEN TEMPERATURVERTEILUNG	. 29
A	NHANG	<ul> <li>B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER VORAUSSETZUNG EINER EINHEITLICHEN TEMPERATURVERTEILUNG</li> <li>C: ANWENDUNGSGEBIETE DES TABELLARISCHEN UND DES</li> </ul>	. 29
A	NHANG	<ul> <li>B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER VORAUSSETZUNG EINER EINHEITLICHEN TEMPERATURVERTEILUNG</li> <li>C: ANWENDUNGSGEBIETE DES TABELLARISCHEN UND DES VEREINFACHTN NACHWEISVERFAHREN NACH EN 1994-1-2</li> </ul>	. 29 . 30
A A	NHANG	<ul> <li>B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER VORAUSSETZUNG EINER EINHEITLICHEN TEMPERATURVERTEILUNG</li> <li>C: ANWENDUNGSGEBIETE DES TABELLARISCHEN UND DES VEREINFACHTN NACHWEISVERFAHREN NACH EN 1994-1-2</li> <li>D: NACHWEISVERFAHREN DES WÄRMEDÄMMKRITERIUMS FÜR</li> </ul>	. 29 . 30
A A	NHANG	<ul> <li>B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER VORAUSSETZUNG EINER EINHEITLICHEN TEMPERATURVERTEILUNG</li> <li>C: ANWENDUNGSGEBIETE DES TABELLARISCHEN UND DES VEREINFACHTN NACHWEISVERFAHREN NACH EN 1994-1-2</li> <li>D: NACHWEISVERFAHREN DES WÄRMEDÄMMKRITERIUMS FÜR VERBUNDDECKEN MIT PROFILBLECHEN NACH EUROCODE</li> </ul>	. 29 . 30 . 32
A A A	NHANG NHANG NHANG	<ul> <li>B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER VORAUSSETZUNG EINER EINHEITLICHEN TEMPERATURVERTEILUNG</li> <li>C: ANWENDUNGSGEBIETE DES TABELLARISCHEN UND DES VEREINFACHTN NACHWEISVERFAHREN NACH EN 1994-1-2</li> <li>D: NACHWEISVERFAHREN DES WÄRMEDÄMMKRITERIUMS FÜR VERBUNDDECKEN MIT PROFILBLECHEN NACH EUROCODE</li> <li>E: BERECHNUNG DER TEMPERATUR DER BEWEHRUNG EINER</li> </ul>	. 29 . 30 . 32
A A A	NHANG NHANG NHANG	<ul> <li>B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER VORAUSSETZUNG EINER EINHEITLICHEN TEMPERATURVERTEILUNG</li> <li>C: ANWENDUNGSGEBIETE DES TABELLARISCHEN UND DES VEREINFACHTN NACHWEISVERFAHREN NACH EN 1994-1-2</li> <li>D: NACHWEISVERFAHREN DES WÄRMEDÄMMKRITERIUMS FÜR VERBUNDDECKEN MIT PROFILBLECHEN NACH EUROCODE</li> <li>E: BERECHNUNG DER TEMPERATUR DER BEWEHRUNG EINER VERBUNDDECKE ZUR ERMITTLUNG DES FELDMOMENTES NACH</li> </ul>	. 29 . 30 . 32

# Projekt DIFISEK

# WP2: Thermisches Verhalten

L. Twilt TNO Bouw – Centre for Fire Research, Niederlande

#### 1 EINLEITUNG

Bei einem Brand wird das Tragwerk eines Gebäudes mechanischen und thermischen Einwirkungen ausgesetzt. Die mechanischen Einwirkungen entstehen durch das Eigengewicht und der Kombination der Lasten, die während des Brandes auf das Tragwerk einwirken. Die thermischen Einwirkungen entstehen durch das Ansteigen der Gastemperatur im Brandabschnitt und wirken, gesteuert von den Wärmübergangsbedingungen an der Oberfläche des Bauteils, auf das Tragwerk ein. Als Ergebnis der thermischen Einwirkungen steigt die Temperatur in den Bauteilen des Tragwerks an. Dies wird "thermisches Verhalten" genannt und kann zu thermischer Dehnung und einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften in den erwärmten Bauteilen führen. Wird die thermische Dehnung behindert, so können thermisch indizierte Spannungen entstehen die unter Umständen zu einem Versagen des Tragwerks (oder eines Teiltragwerks) führen könnten. Dieser Prozess wird "mechanisches Verhalten" genannt. Diese Ereigniskette ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.



Abb. 1: Feuerwiderstand - Folge von Ereignissen

Ein ingenieurmäßiger Ansatz für die Bestimmung der Einwirkungen im Brandfall wird im Teil 1 des DIFISEK-Projektes behandelt. Das mechanische Tragwerksverhalten wird im Teil 3 erläutert. Dieser Teil 2 setzt sich mit dem thermischen Verhalten von Tragwerken bzw. Bauteilen auseinander. Es werden ausschließlich Stahl- und Verbundtragwerke/-bauteile behandelt. Grundlage sind die Brandschutzteile der Eurocodes [1], [2].

#### 2 GRUNDLAGEN

Die Wärmeübertragung zu Bauteilen wird durch die folgende Differentialgleichung (Fourier Differentialgleichung), in Kombination mit den Ausgangs- und Randbedingungen, beschrieben:

$$\frac{\partial(\rho \ c \ \theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z})}{\partial z} = 0 \qquad \dots (1)$$

mit:

x, y, z Koordinaten in m

 $\theta$  Temperatur bei x, y, z in °C

 $\rho$  Dichte in kg/m<sup>3</sup>

*c* spezifische Wärmekapazität in J/kg

 $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit in W/m °K

Für eine kurze Beschreibung dieser Gleichung, siehe Anhang A.

Aus Gleichung (1) lässt sich schließen, dass folgende thermische Materialeigenschaften Auswirkungen auf die Temperaturentwicklung in Bauteilen im Brandfall haben:

- thermische Wärmekapazität
- Wärmeleitfähigkeit

Im Allgemeinen werden die Dichte und die spezifische Wärmkapazität zur "Wärmekapazität" [J/m<sup>3</sup>] zusammengefasst. Die Wärmeleitfähigkeit und die spezifische Wärmekapazität der meisten Materialien hängen stark von der Temperatur ab. In Abbildung 2 sind diese Parameter für Stahl und Beton dargestellt [1], [2].



Die Spitze bei ca. 730 °C in der Kurve der thermischen Wärmekapazität wird durch einen Phasenübergang im Stahl hervorgerufen. Die Spitze in der thermischen Wärmekapazität des Betons wird durch verdampfen der Feuchtigkeit im Beton hervorgerufen.

Wie sich erkennen lässt, ist die Wärmeleitfähigkeit des Stahls um eine Zehnerpotenz größer als die des Betons. Deswegen sind die Temperaturgradienten in Stahlbauteilen wesentlich kleiner als

in Betonbauteilen. Häufig wird zur Vereinfachung angenommen, dass die Temperaturverteilung in einem Stahlbauteil konstant über dem Querschnitt ist (siehe Kapitel 3).

Die thermischen Eigenschaften von den in Bauteilen verwendeten Materialien sind bekannt und die Temperaturentwicklung kann für thermische Einwirkungen auf Basis der Gleichung (1) berechnet werden. Andererseits sind nur in (einfachen) Ausnahmefällen analytische Lösungen vorhanden. In den meisten Fällen müssen numerische Methoden (Computermodelle) zur Lösung verwendet werden. Heutzutage existiert eine Vielzahl solcher Modelle (siehe DIFISEK, Teil 4). In den Abbildungen 3, 4 und 5 sind Berechnungen von Computermodellen zum thermischen Verhalten dargestellt.



Abb. 3: Thermisches Verhalten: Stahlträger und Betondecke (2D)

In Abbildung 3 ist das thermische Verhalten auf einen Naturbrand eines unbekleideten Stahlträgers mit einer aufliegenden Betondecke dargestellt [4]. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur im Unterflansch und im Steg nahezu identisch ist und die Temperaturentwicklung im Oberflansch der im Steg und Unterflansch hinterher hinkt. Das liegt an den Wärmeverlusten des Oberflansches an die aufliegende relativ kalte Betondecke. Im vereinfachten Berechnungsverfahren nach EN 1993-1-2 wird eine gleichmäßige Temperaturverteilung über den Stahlquerschnitt angenommen. Um den niedrigeren Temperaturen im Oberflansch Rechnung zu tragen, ist der Korrekturfaktor  $\kappa$  eingeführt worden (siehe Kapitel 3).



Abb. 4: Thermische Verhalten: Verbunddecke (2D)

In Abbildung 4 ist die 2D Temperaturverteilung in einer Verbunddecke nach 120 min Branddauer dargestellt. Berechnet wurde diese mit dem Computerprogramm DIANA [5]. Wie sich bei dem ebenfalls dargestellten Vergleich zwischen der Berechnung und eines Versuchs zeigt, konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation erzielt werden, insbesondere in den kritischen Bereichen an der Oberseite der Rippen (Punkt D in Abbildung 4). Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit des Betons ist die Temperaturverteilung im Beton ungleichmäßig.



Abb. 5: Thermisches Verhalten eines Verbundeckträgers (3D)

In Abbildung 5 ist eine 3D Temperaturverteilung eines Verbundeckentägers dargestellt [6]. Der Stahleckträger ist auf einer Seite kastenförmig und auf der anderen Seite profilförmig bekleidet. Solche 3D-Berechnungen sind eher aufwendig und werden in der Praxis nicht sehr häufig verwendet. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden dargestellt, um die Leistungsfähigkeit von heutigen Berechnungsprogrammen zu zeigen.

#### 3 BERECHNUGSVERFAHREN FÜR STAHLBAUTEILE

#### 3.1 Anwendungsbereich

Das Hauptziel einer Analyse des thermischen Verhaltens im Stahlbau ist die Bestimmung der Tragfähigkeit im Brandfall. Da Stahlbauteile üblicherweise nicht zur Trennung von Brandabschnitten verwendet werden, ist lediglich das Tragfähigkeitskriterium maßgebend.

Im EN 1993-1-2 werden folgende Möglichkeiten zur Berechnung des Tragwerksverhaltens im Brandfall genannt<sup>1</sup>:

- vereinfachte Berechnungsverfahren
- allgemeine Berechnungsverfahren

Die Berechnungen des thermischen Verhaltens mit Modellen, die das allgemeine Berechnungsverfahren verwenden, basieren auf Gleichung (1) in Kombination mit den relevanten thermischen Einwirkungen. Solche Modelle haben eine allgemeine Gültigkeit. Eine grundsätzliche Annahme bei vereinfachten Berechnungsverfahren ist eine gleichmäßige Temperaturverteilung im Bauteil. Dies entspricht annähernd der Realität, da die Wärmeleitfähigkeit im Stahl relativ hoch ist (siehe Kapitel 2).

Mit der Annahme der gleichmäßigen Temperaturverteilung kann die Berechnung wie in Abbildung 6 schematisch dargestellt erfolgen.



Abb. 6: Berechnung des Feuerwiderstandes eines Stahlbauteils auf Grundlage des vereinfachten Berechnungsverfahrens

Die Berechnung erfolgt in drei Schritten

- Schritt 1: Bestimmung der kritischen Temperatur (z.B. die Temperatur bei der das Bauteil versagt). Diese Temperatur ist abhängig von dem Verhältnis zwischen der Belastung im Brandfall und der Tragfähigkeit unter Raumtemperatur. Die Temperatur ist das Ergebnis der mechanischen Tragfähigkeitsanalyse im Teil 3)
- Schritt 2: Bestimmung der Temperaturentwicklung im Querschnitt. Dies ist das Ergebnis der Analyse des thermischen Verhaltens des Stahlbauteils.
- Schritt 3: Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer des Stahlbauteils. Dies folgt aus der Kombination der ersten beiden Schritte.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Für Stahlbauteile existiert kein tabellarisches Nachweisverfahren.

Hier werden die verschiedenen Aspekte von "Schritt 2" behandelt. Bei der Annahme einer unendlich hohen Wärmeleitfähigkeit ist die Temperaturverteilung über den Stahlquerschnitt konstant und Gleichung (1) reduziert sich zu (siehe auch Anhang B):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{A_m/V}{\rho_a \cdot c_a} \cdot \dot{h}_{net,tot} \qquad \dots (2)$$

mit:

 $\theta_a$  Stahltemperatur in °C (konstant über den Querschnitt)

t Zeit in s

 $\rho_a$  Dichte des Stahls in kg/m<sup>3</sup>

 $c_a$  Spezifische Wärmekapazität in J/kg

 $\dot{h}_{net.tot}$  Netto-Wärmestrom zum Stahlbauteil in W/m<sup>2</sup>

 $A_m$  brandbeanspruchte Oberfläche in m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>

V Volumen des Bauteils in m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>

Auf der rechten Seite der Gleichung (2) sind folgende Terme zu finden:

- Der Term " $\dot{h}_{net,tot}$ " repräsentiert die thermische Einwirkung, die abhängig von dem Brandmodell (z.B. Einheits-Temperaturzeitkurve, Hydrokarbon-Brandkurve, Naturbrände, …) und der Art der Bekleidung (falls vorhanden) des Stahlbauteils ist.
- Der Term " $\rho_a c_a$ " beschreibt die thermischen Eigenschaften des Stahls.
- Der Term "A<sub>m</sub>/V" beschreibt die Auswirkungen der Querschnittsgeometrie und den Anteil der Bauteiloberfläche, die dem Brand ausgesetzt ist. (Beflammung auf allen Seiten, drei Seiten, …). Dieser Term wird auch "Profilfaktor" genannt.

Gleichung (2) bildet die Grundlage der Berechnungsregeln für die Temperaturentwicklung, die für das vereinfachte Berechnungsverfahren des Eurocodes für Stahltragwerke im Brandfall [1] verwendet wird. Sie kann nur gelöst werden, wenn die Anfangs- und Randbedingungen bekannt sind. Eine typische Anfangsbedingung ist die Raumtemperatur vor dem Brand (üblicherweise 20 °C). Die Randbedingungen werden über den Netto-Wärmestrom (= thermische Einwirkung) des dem Stahl umgebenden Raumes beschrieben. Der Netto-Wärmestrom ist in einem Strahlungs- und einem Konvektionsanteil unterteilt (siehe Abbildung 7 und DIFISEK Teil 1).



Abb. 7: Wärmeübertragung an beflammten Oberflächen

Das Strahlungsgesetz von Stephan-Boltzmann beschreibt die Wärmeübertragung durch Strahlung. Nach diesem Gesetz wird über die so genannte Strahlungstemperatur der Brandumgebung die maximale Strahlung auf das Stahlbauteil ermittelt [3]. Es kann gezeigt werden (konservative Annahme), dass die Strahlungstemperatur gleich der Gastemperatur (die Abhängig von der Brandkurve ist) angesetzt werden kann. Dies bildet die Grundlage der Gleichung zur Berechnung des Netto-Wärmestroms durch Strahlung im EN 1993-1-2. In dieser Gleichung gehen folgende physikalische Parameter ein:

- Stephan-Boltzmann Konstante ( $\sigma = 5,67 \ 10^{-8} \ W/m^2 K^4$ ): Dies ist eine physikalische Konstante.
- Emissivität der Oberfläche ( $\varepsilon_m$ ): Diese hängt von dem Material der Oberfläche ab.
- Konfigurationsfaktor ( $\Phi$ ): Ein geometrischer Faktor  $\leq 1$ . In vielen Fällen (z.B. der Simulation von Brandversuchen) kann der Faktor zu eins gesetzt werden<sup>2</sup>.

Der Wert für die Oberflächentemperatur ( $\theta_m$ ) für einen bestimmten Zeitschritt folgt aus der berechneten Temperatur des vorangegangenen Zeitschritts.

Der konvektive Wärmestrom kann proportional zum Temperaturunterschied ( $\theta_g - \theta_m$ ) angenommen werden und wird durch den Wärmeübergangskoeffizienten ( $\alpha_c$ ) gekennzeichnet. Er variiert zwischen 25 W/m<sup>2</sup>K (Einheits-Temperaturzeitkurve) und 50 W/m<sup>2</sup>K (Hydrokarbon-Brandkurve)<sup>3</sup> [7].

# 3.2 Ungeschützte Stahlbauteile

Berechnungsregeln für die Temperaturentwicklung von ungeschützten Stahlbauteilen werden im ENV 1993-1-2, basierend auf den konventionellen Werten der Koeffizienten der Wärmeübertragung, angegeben [8]. Diese Werte wurden so angenommen, dass eine vernünftige Übereinstimmung mit Versuchsergebnissen erzielt werden konnte. Diese führten jedoch zu Annahmen, die aus physikalischen Gesichtspunkten, nicht überzeugend waren. Dies gilt insbesondere für die Wärmeübertragung durch Strahlung, bei der unrealistische Werte für die Emissivität für die Stahloberfläche und die Brandumgebung angenommen wurden. Um die Versuchsergebnisse zu treffen wurde die Emissivität sehr niedrig zu  $0,5 (= \varepsilon_f, \varepsilon_m)^4$ gesetzt. Diese Diskrepanz verschärfte sich, als so genannte Plattenthermometer (anstatt der üblichen Thermoelemente) zur Messung der Gastemperatur bei Brandversuchen eingeführt wurden [1], [9].

Mit dem Ziel realistischere und beständigere Berechnungsregeln für die Temperaturentwicklung in ungeschützten Stahlbauteilen zu erreichen und im Einklang der zukünftigen Brandversuche zu bleiben, werden im EN 1993-1-2 [1] realistischere Werte für die Emissivität angegeben. Für die Emissivität des Stahls ( $\varepsilon_m$ ) wurde der Wert 0,7 angegeben (ein niedriger aber realistischer Wert) und die Emissivität des Feuers ( $\varepsilon_f$ ) wurde mit 1,0 angegeben (als direkte Konsequenz auf die Verwendung von "plate thermometer" zur Kontrolle der Temperatur) [9].

Die daraus resultierenden Temperaturen sind höher als mit den alten Werten. Dies wird kompensiert, indem ein so genannter "Abschattungseffekt" berücksichtigt wird, der in der ENV Version unberücksichtigt bleibt. Unter der Annahme von vollständig beflammten Bauteilen (wie im Falle der vereinfachten Berechnungsverfahren) wird der Abschattungseffekt durch die Abschirmung der Strahlung durch die Profilform verursacht. Bei konkaven Bauteilen (wie dem

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Bei lokalen Bränden gilt  $\Phi < 1$ 

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Bei Naturbränden ist  $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$ 

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Die Emmissivität der Flammen ist  $\epsilon_f$ 

I-Profil) spielt der Abschattungseffekt eine große Rolle, bei konvexen Bauteilen (wie Rohre) nicht (keine lokale Abschirmung vorhanden).

Der Temperaturanstieg  $\Delta \theta_{a,t}$  eines ungeschützten Stahlbauteils während eines Zeitintervalls  $\Delta t$  wird bestimmt durch:

$$\Delta \theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_{\rm m}/V}{c_{\rm a} \rho_{\rm a}} \dot{h}_{\rm net,d} \Delta t \qquad \dots (3)$$

mit:

*k*<sub>sh</sub> Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt

 $\dot{h}_{net,d}$  Bemessungswert des Netto-Wärmestroms für ungeschützten Stahl mit  $\varepsilon_a = 0.7$  und  $\varepsilon_{fi} = 1.0 \, [W/m^2].$ 

Im Vergleich zur ENV Version des Eurocode 3 wurde der Korrekturfaktor für den Abschattungseffekt eingeführt<sup>5</sup>. Für I-Profile unter Normbrandbeanspruchung kann der Korrekturfaktor wie folgt berechnet werden [9]:

$$k_{sh} = 0.9 \cdot [A_m/V]_{\text{box}} / [A_m/V] \qquad \dots (4)$$

mit:

 $[A_m/V]_{box}$  Profilfaktor für die das Profil umschließende Box<sup>6</sup>

In allen anderen Fällen wird der Korrekturfaktor mit der folgenden Gleichung ermittelt:

 $k_{sh} = [A_m/V]_{\text{box}}/[A_m/V]$ 

Aus den obigen Definitionen folgt, dass für Rohrprofile der Abschattungseffekt mit 1,0 angesetzt wird, so lange  $[A_m/V] = [A_m/V]_{box}$  ist.

Siehe Abbildung 8 für eine Zusammenfassung der wesentlichen Gleichungen zur Ermittlung des Temperaturanstiegs eines ungeschützten Stahlbauteils.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Der Korrekturfaktor macht keinen Unterschied zwischen dem Wärmestrom durch Strahlung oder Konvektion. Es ist klar, dass der konvektive Wärmestrom von dem Abschattungseffekt weniger beeinflusst wird als der Wärmestrom durch Strahlung. Dieser Effekt wird ignoriert, da die Konvektion im Brandfall nur eine untergeordnete Rolle spielt.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Der Profilfaktor für die das Profil umschließende Box ist definiert als das Verhältnis zwischen beflammter Oberfläche einer imaginären Box zur Querschnittsfläche des Stahls.



Abb. 8: Temperaturanstieg in ungeschützten Stahlbauteilen

### 3.3 Geschützte Stahlbauteile

Die Gleichung zur Berechnung der Temperaturentwicklung in geschützten Stahlbauteilen ist der Gleichung (3) ähnlich. Bei der Berechnung des Netto-Wärmestrom ist jedoch zusätzlich die Wärmedämmung zu berücksichtigen. Der Temperaturabfall in der Wärmedämmung ist relativ groß und die Temperatur auf der Oberfläche der Wärmedämmung entspricht annähernd der Gastemperatur. Folglich ist die Auswirkung des Wärmestroms durch Strahlung klein und kann normalerweise vernachlässigt werden. Dies bedeutet wiederum, dass der Abschattungseffekt ebenfalls vernachlässigt werden kann und der Korrekturfaktor  $k_{sh}$  bei geschützten Bauteilen nicht eingeführt werden muss [1]. Die wesentlichen Gleichungen sind in Abbildung 9 dargestellt. Wie bei den unbekleideten Stahlbauteilen, kann ein allgemeiner Wärmeübertragungskoeffizient  $K_{ins}$  definiert werden. Dieser Koeffizient ist eine Funktion der Dicke der Bekleidung ( $d_p$ ), so wie der thermischen Eigenschaften des Stahls ( $\rho_a$ ,  $c_a$ ) und der Bekleidung ( $\lambda_p$ ,  $\rho_p$ ,  $c_p$ ). Siehe auch [1], wo die Gleichungen angegeben werden, die die o.g. Effekte berücksichtigen. Wenn die thermische Kapazität der Bekleidung im Vergleich zu der des Stahls klein ist, kann  $K_{ins}$  mit  $K_{ins} \approx \lambda_p/d_p$  angenähert werden, da in diesem Fall eine lineare Temperaturverteilung über die Bekleidung angenommen werden kann.



Abb. 9: Temperaturanstieg in geschützten Stahlbauteilen

#### 3.4 Bemessungsparameter zur Temperaturentwicklung

### 3.4.1 Allgemeines

Die Temperaturentwicklung in einem Stahlbauteil hängt (bei bekannter Beflammung) von zwei Parametern ab:

- der Profilfaktor  $A_m/V$  (für unbekleidete Stahlbauteile) oder  $A_p/V$  (für bekleidete Stahlbauteile)
- der Charakteristiken des Brandschutzmaterials  $d_p$ ,  $\lambda_p$ ,  $\rho_p$ ,  $c_p$  (nur bei bekleideten Bauteilen)

In den folgenden Abschnitten wird jeder dieser Parameter kurz beschrieben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Normbrandbedingungen, da diese in der Praxis am häufigsten verwendet werden. Zum Schluss wird über das Potenzial der Anwendung des Naturbrandkonzeptes auf ungeschützte und geschützte Stahlbauteile eingegangen (siehe Abschnitt 3.4.4).

### 3.4.2 Ermittlung und Einfluss des Profilfaktors

In Abbildung 10 ist die Temperaturentwicklung verschiedener Stahlquerschnitte mit unterschiedlichen Profilfaktoren unter Normbrandbedingung dargestellt. Die Größenordnung des Profilfaktors liegt zwischen 50 m<sup>-1</sup> und 400 m<sup>-1</sup>. Zusätzlich ist hier ein Querschnitt mit einem Profilfaktor von 100 m<sup>-1</sup> und ein geschützter Querschnitt mit einem Profilfaktor von 100 m<sup>-1</sup> abgebildet.

Abbildung 11<sup>a</sup> zeigt den Zusammenhang zwischen Profilfaktor und Querschnittstemperatur von ungeschützten Stahlquerschnitten. Jede Kurve steht für eine bestimmte Beflammungsdauer. In Abbildung 11<sup>b</sup> ist der Einfluss der Dicke des Brandschutzmaterials zu erkennen. Jede Kurve steht für eine bestimmte Bekleidungsdicke und die Beflammungsdauer durch Normbrand betrug 90 min. Es lässt sich erkennen, dass der Profilfaktor speziell bei kleinen Werten und niedrigen Bekleidungsdicken einen großen Einfluss auf die Temperaturentwicklung ausübt.



Abb. 10: Temperaturentwicklung im Stahl

Dissemination of Fire Safety Engineering Knowledge

Teil 2: Thermisches Verhalten



Der Profilfaktor wird, wie schon erwähnt, über das Verhältnis der "beflammten Oberfläche" und des "Bauteilvolumens" definiert. Zusätzlich gelten folgende (konventionelle) Regeln:

- Bei kastenförmigen Bekleidungen wird der Stahlumfang durch den Umfang der umschließenden Box ersetzt.
- Bei Stahlquerschnitten, die von einer Seite durch Beton geschützt sind (z.B. Verbundträger), findet kein Temperaturaustausch zwischen Stahl und Beton statt.

Diese Regeln sind in Abbildung 12 dargestellt. Zusätzlich werden einige Zahlenbeispiele angegeben. Für einen umfassenden Überblick, siehe auch [1].



(a) Konzept





## 3.4.3 Eigenschaften der Brandschutzmaterialien für Stahlbauteile

Im Abschnitt 3.4.1 werden folgende Eigenschaften des Brandschutzmaterials erwähnt:

- Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_p$ )
- spezifische Wärmekapazität (c<sub>p</sub>)
- Dichte  $(\rho_p)$
- Dicke  $(d_p)$

Die ersten drei Parameter sind physikalische Eigenschaften. Die Werte dieser Eigenschaften hängen von Änderungen ab, die während des Brandes auftreten, wie z.B. Rissbildung, Abblättern, entweichen von Feuchtigkeit, usw.. Dies gilt insbesondere für die Wärmeleitfähigkeit, was der Grund dafür ist, dass von der Verwendung von Werten bei Raumtemperatur abgeraten wird.

Zur Bestimmung von  $\lambda_p$  wurde ein semi-empirischer Ansatz entwickelt [10]. In diesem Ansatz werden zwei verschiedene Arten von Versuchen verwendet:

- (a) Versuche für belastete und unbelastete Träger
- (b) Versuche für unbelastete, kurze Stützen

Das Ziel der Versuche nach (a) ist es nachzuweisen, ob das Brandschutzmaterial "während der Brandbeanspruchung zusammenhält und nicht auseinander fällt"<sup>7</sup> wie es in Abschnitt 4 in [1] gefordert wird. Um dies zu untersuchen, werden zwei Trägerpaare mit gleichem Profilfaktor in einem Heizofen dem Normbrand ausgesetzt. Die Trägerpaare unterscheiden sich in der Bekleidungsdicke des Brandschutzmaterials, das eine wird mit der maximalen und das andere mit der minimalen Dicke bekleidet. Die Unterschiede des belasteten und des unbelasteten Trägers werden der spannungsinduzierten Verformung des belasteten Trägers zugeschrieben. Wenn nötig, werden Korrekturfaktoren zur Berücksichtigung solcher Effekte eingeführt.

Das Ziel der Versuche nach (b) ist es, repräsentative Werte für die Wärmeleitfähigkeitfähigkeit im Brandfall zu finden. Es werden 10 unbelastete, kurze Stützen (typische Höhe: 1 m) dem Normbrand ausgesetzt. Die Dicke und der Profilfaktor werden systematisch variiert. Die gemessenen Stahltemperaturen werden (wenn nötig) auf Basis der Versuche (a) korrigiert. Das Ergebnis ist eine Kurvenschar, wie sie in Abbildung 11<sup>b</sup> dargestellt ist, obwohl das Format durchaus variieren kann. Es existieren Computerprogramme, die solche Analysen durchführen können, andere Programme können die gewonnenen Informationen zur brandschutztechnischen Bemessung verwenden.

In Abbildung 13 ist ein Versuch eines belasteten Trägers vor und nach der Versuchsdurchführung dargestellt. Die großen Verformungen können den Gefügezusammenhalt der Bekleidung beeinträchtigen.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Dies wird als Gefügezusammenhang bezeichnet.



Das oben genannte Verfahren gilt für Brandschutzmaterialien, die das Stahlbauteil umschließen. Es existieren folgende verschiedene Methoden:

- Spritzputze
- Platten
- Dämmschichtbildner

Eine weitere Möglichkeit sind so genannte Schilde. Sie können vertikal (z.B. um Stahlverbindungen in Trennwänden zu schützen) oder horizontal (z.B. um Träger in Deckenkonstruktionen zu schützen) angeordnet werden. Es gibt europäische Normen, die auf einem ähnlichen Prinzip wie oben beschrieben basieren, um die Schilde bemessen zu können. Sie werden hier nicht weiter behandelt [11], [12].

Es ist also empfehlenswert, die Eigenschaften der Brandschutzmaterialien zu verwenden, die unter ähnlichen Bedingungen ermittelt wurden. Unter Umständen kann es hilfreich sein, "schnell & einfach" eine Annäherung der Stahltemperatur von beflammten Stahlbauteilen zu ermitteln. Für diesen Fall hat die "Europäische Konvention für Stahlbau" (EKS) die so genannten "Euronomogramme" (siehe Abbildung 14) entwickelt [13]. Bei einer bekannten Branddauer kann die Temperatur eines unbekleideten Stahlbauteils unter Verwendung de Profilfaktors  $A_m/V$ ermittelt werden. Für bekleidete Bauteile wird als Eingangsparameter ( $\lambda_p/d_p$ ) · ( $A_p/V$ ) gefordert (siehe auch Abbildung 9).

Die Euronomogramme wurden auf Basis der ENV Version des EN 1993-1-2 erstellt. Deswegen sollten diese mit Vorsicht verwendet werden.



# 3.4.4 Naturbrandbedingungen

In Teil 1 des DIFISEK Projektes lag der Schwerpunkt der thermischen Einwirkungen auf den Naturbränden. Dieser Ansatz kann direkt bei unbekleideten Stahlbauteilen angewendet werden, da die thermischen und mechanischen Eigenschaften auch unter allgemeinen, nicht dem Normbrand entsprechenden Brandbedingungen gültig sind. Dies gilt nicht für die relevanten thermischen Eigenschaften der Brandschutzmaterialien, da diese, wie oben erklärt, unter Normbrandbedingungen ermittelt wurden und es keine Informationen darüber gibt, wie sich die Eigenschaften ändern, wenn die Einwirkung stark von der Normbrandkurve abweicht. Die Verwendung des Naturbrandkonzepts für geschützte Bauteile sollte also unter einiger Vorsicht erfolgen. Auf der anderen Seite werden die thermischen Eigenschaften bei einer Bemessung unter Normbrandbedingung bedenkenlos eingesetzt, obwohl der reale Brandverlauf häufig weit von dieser Brandkurve entfernt ist. So könnte derart argumentiert werden, dass diese Eigenschaften auch für den Ansatz des Naturbrandes verwendet werden können.

# 4 BERECHNUNGSVERFAHREN FÜR VERBUNBAUTEILE

### 4.1 Anwendungsbereich

Der EN 1994-1-2 behandelt eine Vielzahl von Verbundbauteilen. Eine Übersicht ist in Abbildung 15 dargestellt.



Abb. 15: Im EN 1994-1-2 behandelte Verbundbauteile

In Abhängigkeit der Funktion, können Verbundbauteile außer der Tragfähigkeit auch eine raumabschließende Funktion haben. Es können alle drei Feuerwiderstandskriterien relevant werden:

- Tragfähigkeit (R)
- Wärmedämmung (I)
- Raumabschluss  $(E)^8$

Beton stellt einen wichtigen Bestandteil des Verbundquerschnitts dar. Bei einem Verbundquerschnitt kann eine einheitliche Querschnittstemperatur (wie bei den vereinfachten Berechnungsverfahren für Stahlbauteile) nicht mehr angenommen werden. Dies erschwert die Berechnung von Verbundbauteilen. Deswegen werden im EN 1994-1-2 nicht nur ein vereinfachtes und allgemeines Berechnungsverfahren aufgeführt, sondern es besteht auch die Möglichkeit ein Verbundbauteil mit einem tabellarischen Nachweisverfahren nachzuweisen [2].

Die Auswirkung des thermischen Verhaltens auf das tabellarische Verfahren wird hier nicht weiter behandelt, weil keine Angaben über die Annahmen des thermischen Verhaltens gemacht werden und die Werte in diesen Tabellen auf Versuchsergebnisse von Normbrandversuchen basieren. Für Träger mit Betondecken existieren für das Wärmedämmkriterium "I" allgemein anerkannte Regeln, für Träger mit profilierten Verbunddecken werden keine Angaben gemacht.

Bei den vereinfachten Berechnungsverfahren basiert das thermische Verhalten häufig (aber nicht immer) auf dem in Abschnitt 2 erklärten allgemeinen Modell zur Wärmeübertragung. Drei Beispiele seien hier genannt:

 Das vereinfachte Berechnungsverfahren basiert auf semi-empirische Regeln, die sich auf konventionelle Annahmen stützen. Dies ist z.B. bei dem vereinfachtem Berechnungsverfahren für kammerbetonierte Verbundstützen der Fall (siehe Abbildung 15<sup>b</sup>).

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Es gibt derzeit kein Berechnungsverfahren um das Raumabschlusskriterium nachweisen zu können. Deshalb wird dies hier nicht weiter behandelt. Für einige mögliche Lösungen, siehe [2].

- Es wurde eine Parameterstudie mit allgemeinen Modellen durchgeführt, aus der dann das vereinfachte Berechnungsverfahren entstand. Dieser Ansatz wurde bei dem vereinfachtem Berechnungsverfahren für Verbunddecken verwendet (siehe Abbildung 15<sup>a</sup>).
- Das allgemeine Berechnungsverfahren selbst wird bei dem vereinfachtem Verfahren verwendet. Diese Methode wird bei dem vereinfachten Berechnungsverfahren für betongefüllte Hohlprofilstützen verwendet (siehe Abbildung 15<sup>b</sup>).

Um einen Überblick über die verschiedenen Verfahren des EN 1994-1-2 zu bekommen, siehe Anhang C.

Die Grundlage der allgemeinen thermischen Modelle ist (und muss es auch sein!) die Gleichung zur Wärmeübertragung, die in Abschnitt 2 angegeben ist. Beispiele für allgemeine Berechnungsmodelle sind in den Abbildungen 3, 4 und 5 zu erkennen. Die Lösungsverfahren dieser Gleichung sind bei allgemeinen Berechnungsverfahren für Beton und Stahl ähnlich.

In den nächsten Abschnitten wird die Anwendung des thermischen Verhaltens bei den oben genannten Verfahren genauer beschrieben.

- Berechnungsregeln zu dem thermischen Verhalten von kammerbetonierten Verbundstützen.
- Vereinfachtes Berechnungsverfahren zum Nachweis des Wärmedämmkriteriums "I" bei Verbunddecken mit Profilblechen.
- Vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Temperaturbestimmung der Feldbewehrung von Verbunddecken.
- Die Verwendung von allgemeinen thermischen Modellen im "vereinfachten" Berechnungsverfahren für betongefüllte Hohlprofilstützen.

# 4.2 Berechnungsregeln zu dem thermischen Verhalten von kammerbetonierten Verbundstützen

Um dem thermischen Verhalten von kammerbetonierten Verbundstützen Rechnung zu tragen, wird der Querschnitt in vier Teilquerschnitte aufgeteilt:

- Flansche des Stahlprofils
- Steg des Stahlprofils
- Kammerbeton
- Bewehrung im Kammerbeton

Jeder Teilquerschnitt wird auf Basis seiner Durchschnittstemperatur in seiner Festigkeit und Steifigkeit reduziert. Bei dem Kammerbeton und dem Steg wird ebenfalls die Querschnittsfläche reduziert, siehe Abbildung 16.



Das vereinfachte Berechnungsverfahren ist nur für allseitig beflammte Verbundstützen gültig.

Die durchschnittliche Temperatur in den Teilquerschnitten ist Abhängig von den Feuerwiderstandsklassen (R 30, R 60, R 90 und R 120) und der Geometrie des Querschnitts. Letzteres wird über den Profilfaktor bestimmt, welcher hier wie folgt berechnet wird:

$$\frac{A_m}{V} = \frac{2 \cdot (b+h)}{b \cdot h} \qquad \dots (5)$$

Die erforderlichen Beziehungen basieren auf semi-empirischen Ansätzen, die aus Normbrandversuchen gewonnen werden, siehe [2]. Hintergründe hierzu sind in [20] angegeben.

### 4.3 Vereinfachtes Berechnungsverfahren zum Nachweis des Wärmedämmkriteriums "I" bei Verbunddecken mit Profilblechen

Beim vereinfachten Berechnungsverfahren ist das Wärmedämmkriterium dem der Normbrandversuche ähnlich. So darf z.B. die unbeflammte Seite der Decke im Durchschnitt nicht heißer als 140 °C und maximal nicht heißer als 180 °C sein [14]. Bei Verbunddecken mit Profilblechen variiert die Temperatur in Abhängigkeit von der Position der Messung, da durch das Profilblech unterschiedliche Deckenhöhen entstehen (siehe Abbildung 17).



Abb. 17: Typische Temperaturverteilung auf der brandabgewandten Seite einer Verbunddecke

Bei dem vereinfachten Berechnungsverfahren für das Wärmedämmkriterium wird dieser Effekt berücksichtigt. Es wurden verschieden thermische Berechnungen mit in Europa erhältlichen Profilen durchgeführt, sowohl trapezförmige als auch hinterschnittene Profilbleche. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 gegeben.

rabelle 1. Thermische Berechnungen mit aktuen Verfugbaren Fromolechen					
Profilblech Betonhöhe H <sub>B</sub> [mm] Betontyp					
hinterschnitten (6x)	50, 60, 70, 80,	NC und LC			
trapezförmig (49x)	90, 100, 110, 120	Eurocode 4, 1994			

Tabelle 1:	Thermische	Berechnungen	mit aktuell V	/erfügbaren	Profilblechen

Die Berechnungen basieren auf Gleichung (1) und wurden für Normal- und Leichtbeton durchgeführt. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Es herrschen Normbrandbedingungen an der direkt beflammten Oberfläche (z.B. Unterseite).
- Die Wärmeübergangsbedingungen auf der beflammten Seite (durch Konvektion und Strahlung) berücksichtigen die Form und die Zinkschicht des Profilblechs (Für Detail, siehe [15]).
- Die Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_c$ ) und die Wärmekapazität ( $\rho_c \cdot c_c$ ) des Betons werden nach Eurocode angenommen.
- Der durchschnittliche Feuchtegehalt liegt bei 4 % für Normalbeton und 5 % bei Leichtbeton (des Trockengewichts).

Für jeden analysierten Fall (siehe Tabelle 1), wird die Zeit ( $t_{f,i}$ ) in der das Wärmedämmkriterium eingehalten ist, berechnet. Die Ergebnisse wurden mit einer linearen Regression unter Verwendung folgender Parameter analysiert:

- Rippengeometriefaktor  $(A/L_r)$
- Der Sichtfaktor des Oberflansches ( $\Phi$ )
- Die Höhe der Betondecke  $(h_1)$
- Die Breite des Oberflansches  $(l_3)$

Die Regressionskonstanten wurden mit einfachen linearen Regressionsmethoden ermittelt, die in gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen vorhanden sind. Das Verfahren ist in Abbildung 18 dargestellt. Für eine genauere Beschreibung, siehe Anhang D des EN 1994-1-2 [2]. Der gesamte Hintergrund dieser Berechnung wird in [15] beschrieben.



Abb. 18: Wärmedämmkriterium von Verbunddecken

Die sich daraus ergebende Gleichung zur Berechnung des Feuerwiderstandes hinsichtlich des Wärmedämmkriteriums wird im EN 1994-1-2 angegeben und ersetzt die in der ENV-Version

genannte Gleichung. In Abbildung 19 wird das vereinfachte mit dem allgemeinen Berechnungsverfahren verglichen. In Abbildung 19<sup>a</sup> werden diese beiden Verfahren verglichen. Abbildung 19<sup>b</sup> zeigt diesen Vergleich unter Verwendung der ENV-Version des vereinfachten Berechnungsverfahrens. Es lässt sich erkennen, dass das neue Berechnungsverfahren viel genauer ist.



Abb. 19: Vergleich der vereinfachten mit dem allgemeinen Berechnungsverfahren

Die Regressionskoeffizienten sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabene 2. Koemzienten zum Nachweis des warmedaminkriteriums "I						
$\begin{bmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 \\ [min] & [min/mm] & [min] & [min/mm] & [mm min] \end{bmatrix}$					<i>a</i> 5 [min]	
Normalbeton	-28,8	1,55	-12,6	0,33	-735	48,0
Leichtbeton	-79,2	2,18	-2,44	0,56	-542	52,3

Tabelle 2: Koeffizienten zum Nachweis des Wärmedammkriteriums "I"

# 4.4 Vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Temperaturbestimmung der Feldbewehrung von Verbunddecken

Zur Berechnung der plastischen Momententragfähigkeit im Brandfall wird die Temperaturverteilung über den Querschnitt benötigt. Es wird dabei unterschieden, ob das Feldoder das Stützmoment berechnet werden soll. Dieser Teil beschäftigt sich mit der Temperaturermittlung für Bewehrungen zur Berechnung der Feldmomententragfähigkeit.

Die Zusatzbewehrung wird im Allgemeinen in der Mitte einer Rippe angeordnet. Die Temperatur der Bewehrung ist sehr wichtig für die Ermittlung der Tragfähigkeit, da die Bewehrung einen großen Teil der auftretenden Zugkräfte aufnimmt<sup>9</sup>. Die Temperatur wird sehr stark von der Brandbeanspruchung beeinflusst.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Die Temperaturen im oberen Teil des Querschnitts (in der Druckzone) sind gering. Deswegen wird beim Beton bei der Berechnung des Feldmomentes eine Druckfestigkeit wie im Kaltfall angenommen.

Ähnlich wie bei der Ermittlung des Wärmedämmkriteriums (siehe Abschnitt 4.3), wurden zur Ermittlung der Bewehrungstemperatur ( $\theta_s$ ) Regressionsformeln als Funktion folgender Parameter entwickelt:

- Abstand zum Unterflansch  $(u_3)$
- Lage des Bewehrungsstabes (z), nach Anhang E
- Winkel des Stegs ( $\alpha$ )

Basierend auf den Berechnungen wurde folgende Gleichung entwickelt:

$$\theta_{s} = c_{0} + c_{1} \cdot \frac{u_{3}}{h_{2}} + c_{2} \cdot z + c_{3} \cdot \frac{A}{L_{r}} + c_{4} \cdot \alpha + c_{5} \cdot \frac{1}{l_{3}} \qquad \dots (6)$$

Das in Anhang E beschriebene Berechnungsverfahren ist in Abbildung 20 dargestellt. Eine Ausführliche Beschreibung ist in [15] zu finden.



Die Regressionskonstanten hängen von der Beflammungsdauer des Normbrandes ab. Die Werte sind für Normal- und Leichtbeton in Tabelle 3 angegeben. Abbildung 21<sup>a</sup> zeigt einen Vergleich zwischen dem vereinfachten und allgemeinen Berechnungsverfahren. Abbildung 21<sup>b</sup> zeigt diesen Vergleich unter Verwendung der Werte der ENV Version des Eurocode für Verbundbauteile [16]. Es lässt sich erkennen, dass das neue Berechnungsverfahren viel genauer ist.

Beton	Feuerwiderstand	$c_0$	$c_{l}$	$c_2[^{\circ}C/mm^{0.5}]$	$c_3$ [°C/mm]	$C_4$	$c_5$
	[min]	[°C]	[°C]			$[^{\circ}C/^{\circ}]$	[°Cmm]
Normal-	60	1191	-250	-240	-5,01	1,04	-925
beton	90	1342	-256	-235	-5,30	1,39	-1267
	120	1387	-238	-227	-4,79	1,68	-1326
Leicht-	30	809	-135	-243	-0,70	0,48	-315
beton	60	1336	-242	-292	-6,11	1,63	-900
	90	1381	-240	-269	-5,46	2,24	-918
	120	1397	-230	-253	-4,44	2,47	-906

Tabelle 3: Koeffizienten zur Berechnung der Bewehrungstemperatur in einer Rippe.



Abb. 21: Vergleich der Bewehrungstemperaturen zwischen dem vereinfachten und dem allgemeinen Berechnungsverfahren

Der oben genannte Ansatz wird im EN 1994-1-2 verwendet. Es gilt zu beachten, dass das Profilblech ebenfalls zu der Feldmomententragfähigkeit beiträgt. Deswegen existiert im EN 1994-1-2 auch ein vereinfachtes Berechnungsverfahren für die Berechnung der Temperaturen in den Teilquerschnitten (Oberflansch, Steg, Unterflansch). Dieses Verfahren ist dem zur Berechnung der Bewehrungstemperatur ähnlich.

# 4.5 Die Verwendung von allgemeinen thermischen Modellen im "vereinfachten" Berechnungsverfahren für betongefüllte Hohlprofilstützen

Das Berechnungsverfahren für betongefüllte Hohlprofilstützen basieren – soweit es das thermische Verhalten betrifft – auf allgemeine Berechnungsverfahren nach Gleichung (1), während beim mechanischen Verhalten Vereinfachungen gemacht werden konnten. Das thermische Verhalten basiert weiterhin auf Normbrandbedingungen in Kombination mit den Wärmeübergangsbedingungen aus [7]. Die maßgebenden Parameter sind<sup>10</sup>:

- Dauer der (Norm-) Brandbeanspruchung
- Querschnittsparameter des Hohlprofils

Es lässt sich daraus schließen, dass es kein vereinfachtes Berechnungsverfahren zur Temperaturbestimmung existiert. Es wären eine Vielzahl von Diagrammen nötig, um die erforderlichen Daten darzustellen. Als Beispiel sei hier das Programm CIDECT "Design Guide for SHS Columns Exposed to Fire" genannt, in dem – basierend auf der ENV Version des EN 1994-1-2 – mehr als 40 Diagramme implementiert wurden [17] (siehe Abbildung 22a).

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Relevant mechanical response parameters are: steel grade, concrete quality, % of reinforcement.



Abb. 22: Bemessung von Hohlprofilstützen im Brandfall

Wegen der Komplexität der Berechnung wurde ein bedienerfreundliches Computerprogramm zu Berechnung des Feuerwiderstandes von betongefüllten Hohlprofilstützen unter Normbrandbedingungen entworfen ("POTFIRE") [18]. Dieses Programm verwendet die im Eurocode angegebenen Annahmen. In Abbildung 22<sup>b</sup> ist das Eingabe- und Ausgabefenster dargestellt. Das Programm wurde an vielen Normbandversuchen verifiziert. Abbildung 23 zeigt den Vergleich zwischen POTFIRE und den Versuchsergebnissen [19]. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung.



Abb. 23: Verifikation des Programms POTFIRE

Hinweis: Es ist wichtig zu wissen, dass auch nicht so "vereinfachte" Modelle wie POTFIRE ein begrenztes Anwendungsgebiet (siehe Tabelle 4) abdecken. In Abbildung 23 ist erkennbar, dass dies eher an Unsicherheiten im mechanischen Verhalten liegt, als am thermischen Verhalten.

Tabelle 4: Anwendungsgebiet der brandschutztechnischen Bemessung von betongefüllten Hohlprofilstützen

Minimum	Anwendungsgrenze	Maximum
0	Knicklänge	13.5 m
230 mm	Höhe des Querschnitts	1100 mm
230 mm	Breite des Querschnitts	500 mm
0 %	Bewehrungsgrad	6%
0 min	Feuerwiderstandsklasse	120 min

# 4.6 Fazit

Die Berechnung des thermischen Verhaltens von Verbundbauteilen ist, im Vergleich zur Analyse des thermischen Verhaltens von Stahlbauteilen, kompliziert. Dies liegt daran, dass die Temperaturverteilung in solchen Bauteilen normalerweise über den Querschnitt ungleichmäßig ist. Der EN 1994-1-2 bietet folgende Möglichkeiten zu vereinfachten Bemessung von Verbundbauteilen an:

- tabellarisches Verfahren
- vereinfachtes Berechnungsverfahren

Das tabellarische Verfahren basiert auf Erfahrungswerte, die aus Normbrandversuchen gewonnen wurden.

Es gibt die verschiedensten Ansätze die zu den vereinfachten Berechnungsverfahren führen: Zum Teil basieren sie auf Auswertungen von Normbrandversuchen in Verbindung mit theoretischen Ansätzen (z.B. kammerbetonierte Verbundstütze), andere Verfahren basieren auf Auswertungen von systematischen Berechnungen von allgemeinen Berechnungsmodellen (z.B. Verbunddecken mit Profilblechen). In anderen Fällen sind allgemeine Berechnungsmodelle zur Ermittlung des thermischen Verhaltens zu verwenden (z.B. kammerbetonierte Hohlprofilstützen).

Alle vereinfachten Berechnungsmodelle haben jedoch gemeinsam, dass sie nur unter Normbrandbedingungen gültig sind.

Die Anwendung des Brandsicherheitskonzepts unter Berücksichtigung von Naturbränden ist unter Verwendung von allgemeinen Berechnungsverfahren möglich. Hierzu existieren ein Vielzahl von Computerprogrammen (siehe DIFISEK Teil 4).

#### REFERENZEN

- [1] EN 1993.1.2: "Eurocode 3: Design of Steel Structures, part 1.2: General Rules -Structural fire design". CEN TC 250, 2004 (Veröffentlicht 2004).
- [2] EN 1994.1.2: "Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, part 1.2: General Rules Fire Design". CEN TC 250, 2004 (Veröffentlicht 2004).
- [3] Welty, J.R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E.: "Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer". John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [4] Twilt, L. et al: "Design tools for the behaviour of multi-storey steel-framed buildings exposed to natural fires". Report EUR 20953 EN, European Commission, Science Research and Development, 2004.

- [5] Both, C., Stark, J.W.B. and Twilt, L.: "Numerical simulation of thermal and structural response of composite steel/concrete structures to fire". Proceedings 4<sup>th</sup> Pacific Structural Steel Conference, pp 171-178, Singapur, 1995
- [6] Both, C.: "3D analysis of fire exposed composite slabs". Proceedings 3<sup>rd</sup> CIB/W14 Workshop on Modelling, Delft, 1993.
- [7] EN 1991.1.2: "Eurocode 1: Actions on Structures, part 1.2: General Actions Actions on structures exposed to fire". CEN TC 250, 2002.
- [8] ENV 1993.1.2: "Eurocode 3: Design of Steel Structures, part 1.2: General Rules Structural fire design". CEN TC 250, 1995.
- [9] Twilt, L., Leur, P.H.E. v.d., and Both, C.: "Characteristics of the heat transfer for calculating the temperature development in structural steelwork exposed to standard fire conditions under plate thermocouple control". Tagungsband des ersten internationalen Workshops "Structures in Fire", Kopenhagen, 19.-20. Juni 2001.
- [10] ENV13381-4: "Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 4: Applied protection to steel members". CEN TC 127, 2002.
- [11] ENV13381-1: "Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 1: Horizontal protective membranes". CEN TC 127, (in Vorbereitung).
- [12] ENV13381-2: "Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 1: Vertical protective membranes". CEN TC 127, 2002.
- [13] ECCS TC3: Eurono-nomograms for fire exposed steelwork
- [14] EN 1363-1: Fire resistance tests Part 1: General requirements", CEN TC 127, 1999.
- [15] Both, C.: The Fire Resistance of Composites Steel-Concrete Slabs", Dissertation TU Delft, 1998.
- [16] ENV 1994.1.2: "Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, part 1.2: General Rules – Structural fire design". CEN TC 250, 1995.
- [17] Twilt, L. et al: "Design Guide for Structural Hollow Section Columns Exposed to Fire". CIDECT, Verlag TÜV Rheinland,1994.
- [18] POTFIRE Manual, version 1-1, CTICM, Paris, 2000.
- [19] Twilt, L., Both, C, Kruppa, J., Zoa, B.: "Fire Design of Unprotected Concrete Filled SHS Columns: The further development and extension of application of user friendly PC software". Tagungsband der ISTS Konferenz, Düsseldorf, April 2001.
- [20] REAFO/CAFIR: "Computer assisted analysis of the fire resistance of steel and composite concrete structures". CEC Research 7210-SA/502, Final Report, Luxemburg, März 1986.

### ANHANG A: FOURIER DIFFERENTIALGLEICHUNG



Es ist der Wärmefluss (q [W/m<sup>2</sup>]) des Volumenelementes mit  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>],  $c_p$  [J/kg],  $\lambda$  [W/mK] und  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  [m] in x-Richtung zu berücksichtigen.  $\theta$  ist die Temperatur [°C]; t ist die Zeit [s].

Wärmebilanz (es wird im Volumenelement keine Wärme erzeugt!):

$$\begin{aligned} & \Delta q \cdot \Delta y \cdot \Delta z + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \theta) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = 0 \\ \Rightarrow & \Delta q / \Delta x + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \theta) / \Delta t = 0 \end{aligned}$$

Fouriergesetz: (nur in x-Richtung)

$$q = \lambda \cdot \Delta \theta / \Delta x$$

Daraus ergibt sich:

$$\Delta(\lambda \cdot \Delta\theta / \Delta x) / \Delta x + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \theta) / \Delta t = 0$$

Mit  $\Delta \rightarrow 0$ , lässt sich die Differentialgleichung, die sich ohne weiteres auf die y- und z-Richtung erweitern lässt, lösen. Diese Gleichung lässt sich numerisch mit bekannten Randbedingungen (thermische Einwirkungen) und Anfangsbedingungen (Raumtemperatur) lösen.

## ANHANG B: THERMISCHES VERHALTEN VON STAHLBAUTEILEN UNTER VORAUSSETZUNG EINER EINHEITLICHEN TEMPERATURVERTEILUNG



Unter Annahme einer einheitlichen Temperaturverteilung ( $\lambda \rightarrow \infty$ ) folgt:

 $\partial \theta / \partial x \rightarrow 0, \ \partial \theta / \partial y \rightarrow 0, \ \partial \theta / \partial z \rightarrow 0.$ 

Annahme: Stahlblock mit allseitiger Brandbeanspruchung (mit Volumen V und beanspruchter Oberfläche  $A_m$ ). Der eingehende Netto-Wärmestrom während des Zeitschritts dt berechnet sich zu:

$$\left(\int_{A} \dot{h}_{tot} \, dA\right) \cdot dt = \dot{h}_{tot} \cdot A \cdot dt \qquad [J] \qquad \dots (B.1)$$

Die Zunahme des Wärmeinhalts des Stahlvolumens während des Zeitschritts dt berechnet sich zu (unter Voraussetzung der einheitlichen Temperaturverteilung):

$$\rho_a \cdot c_a \cdot V \cdot d\theta_a \qquad [J] \qquad \dots (B.2)$$

Unter der Voraussetzung der Wärmebilanz ist Anstieg des Wärmeinhalts dem Wärmestrom gleich zu setzen. Aus (B.1) und (B.2) erfolgt nach einigem umstellen:

$$\frac{d\theta_a}{dt} = \frac{A_m/V}{\rho_a \cdot c_a} \cdot \dot{h}_{net,tot} \qquad \dots (B.3)$$

mit:

 $A_m/V$  Profilfaktor des Stahlprofils [m<sup>-1</sup>]  $c_a \cdot \rho_a$  Wärmekapazität des Stahls [J/m<sup>3</sup>C]

Diese übliche Differentialgleichung kann mit den gegebenen Rand- und Anfangsbedingungen numerisch gelöst werden.

# ANHANG C: ANWENDUNGSGEBIETE DES TABELLARISCHEN UND DES VEREINFACHTN NACHWEISVERFAHREN NACH EN 1994-1-2

Tabelle C1: Überblick über die Anwendungsgebiete des tabellarischen und vereinfachten Nachweisverfahren
---

Querschnitt	tabellarisches Nachweis- verfahren	Analyse des thermischen Verhaltens unter Verwendung eines vereinfachten Verfahrens
Reinforcing bar	ja	nein
Shear connectors connectors connectors connectors connectors connectors Profiles with or without fire protection material	nein	semi-empirischer Ansatz
Optional Stirrups to web of Reinforcing	nein	semi-empirischer Ansatz
	nein	Auswertung von systematischen Berechnungen von allgemeinen Berechnungsmodellen

Querschnitt	tabellarisches Nachweis- verfahren	Analyse des thermischen Verhaltens unter Verwendung eines vereinfachten Verfahrens
	ja	kein vereinfachtes Verfahren vorhanden
	ja	semi-empirischer Ansatz
	ja	direkte Anwendung von allgemeinen thermischen Modellen

# ANHANG D: NACHWEISVERFAHREN DES WÄRMEDÄMMKRITERIUMS FÜR VERBUNDDECKEN MIT PROFILBLECHEN NACH EUROCODE

(1) Der Feuerwiderstandsnachweis unter Berücksichtigung des Wärmedämmkriteriums "I" gilt als nachgewiesen, wenn der durchschnittliche Temperaturanstieg 140 °C und der maximale Temperaturanstieg 180 °C nicht überschreitet. Die Feuerwiderstandsdauer berechnet sich zu:

$$t_{i} = a_{0} + a_{1} \cdot h_{1} + a_{2} \cdot \Phi + a_{3} \cdot \frac{A}{L_{r}} + a_{4} \cdot \frac{1}{\ell_{3}} + a_{5} \cdot \frac{A}{L_{r}} \cdot \frac{1}{\ell_{3}} \qquad \dots (D.1)$$

mit:

$t_i$	Feuerwiderstandsdauer hinsichtlich des Wärmedämmkriteriums	[min]
A	Volumen einer Rippe pro m Länge	[mm <sup>3</sup> /m]
$L_r$	beanspruchte Rippenoberfläche pro m Länge	$[mm^2/m]$
$A/L_r$	Rippengeometriefaktor	[mm]
$\Phi$	Sichtfaktor des Oberflansches	[-]
$l_3$	Breite des Oberflansches (siehe Abb. D.1.1)	[mm]
$h_1$	Höhe der Betondecke	[mm]

Die Faktoren *a<sub>i</sub>*, können der Tabelle 1 entnommen werden.



Abb. D.1 : Definition des Rippengeometriefaktors  $A/L_r$  der Rippen von Verbunddecken.

(2) Der Konfigurationsfaktor, oder auch Sichtfaktor  $\Phi$  des Oberflansches wird wie folgt bestimmt:

$$\boldsymbol{\Phi} = \left( \sqrt{h_2^2 + \left(l_3 + \frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{l_1 - l_2}{2}\right)^2} \right) / l_3 \quad [-] \qquad \dots (D.3)$$

# ANHANG E: BERECHNUNG DER TEMPERATUR DER BEWEHRUNG EINER VERBUNDDECKE ZUR ERMITTLUNG DES FELDMOMENTES NACH EUROCODE

(1) Zur Berechnung des Feldmomentes im Brandfall wird die Temperatur in der Bewehrung benötigt. Diese ermittelt sich zu:

$$\theta_s = c_0 + c_1 \cdot \frac{u_3}{h_2} + c_2 \cdot z + c_3 \cdot \frac{A}{L_r} + c_4 \cdot \alpha + c_4 \cdot \frac{1}{l_3} \qquad \dots (E.1)$$

mit:

ım];
$1m^{-0.5}];$
;
1

Die Faktoren  $c_i$  können für die verschiedenen Feuerwiderstandsklassen der Tabelle 3 entnommen werden (für Normal- und Leichtbeton). Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden. Die o.g. Gleichung kann zur Bestimmung der Temperatur für die Feldbewehrung an jeder Stelle der Rippe verwendet werden.

Die Koeffizienten ci hängen von der Branddauer und des Betontyps ab.

(2) Bestimmung des z-Faktors zur Bestimmung der Lage des Bewehrungsstabes:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}} \qquad \dots (E.2.3)$$

Abb. E.1: Lage des Bewehrungsstabes

(3) Die Abstände u<sub>1</sub>, u<sub>2</sub> und u<sub>3</sub> werden in [mm] angegeben und sind wie folgt definiert:

- u1, u2: kürzester Abstand von der Achse des Bewehrungsstabes zum Steg des Profilblechs
- u<sub>3</sub>: kürzester Abstand von der Achse des Bewehrungsstabes zum Unterflansch des Profilblechs