

Thermische Analyse im Brandfall

Temperaturfeld

SectionPro-Tutorial · Transiente Temperaturverläufe
in einem brandbeanspruchten Querschnitt, mit finiten Elementen

BridgeKernel · 2026

Einleitung

Der Brandschutznachweis eines Stahlbetonquerschnitts beruht zunächst auf der Kenntnis der Temperatur in jedem Punkt des Querschnitts nach einer bestimmten Branddauer, beispielsweise 30, 60, 90 oder 120 Minuten. Diese räumliche Verteilung, das Temperaturfeld, bestimmt den weiteren Verlauf der Berechnung: Der Festigkeitsabfall von Beton und Bewehrungsstahl und daraus die Resttragfähigkeit folgen unmittelbar daraus. Sie stellt gleichwohl einen eigenständigen thermischen Schritt dar, den SectionPro unabhängig vom mechanischen Nachweis löst und ausgibt.

Der vorliegende Artikel beschränkt sich auf diesen thermischen Schritt. Er ruft dessen Grundlagen in Erinnerung, beschreibt das in SectionPro verwendete Modell und stellt die Ergebnisse anschließend den Referenzprofilen aus Anhang A der EN 1992-1-2 gegenüber.

Das thermische Problem

Der transiente Wärmetransport im Querschnitt gehorcht der nichtlinearen Wärmeleitungsgleichung:

$$\rho(\theta) \cdot c_p(\theta) \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda(\theta) \nabla \theta)$$

Die thermischen Eigenschaften des Betons ändern sich mit der Temperatur. Die Wärmeleitfähigkeit $\lambda(\theta)$ nimmt monoton ab, während die spezifische Wärmekapazität $c_p(\theta)$ einen ausgeprägten Peak um 115 °C aufweist, der mit der Verdampfung des freien Wassers verbunden und umso größer ist, je höher der Feuchtegehalt ist. Dieser Peak absorbiert einen erheblichen Teil des Wärmestroms und verzögert deutlich das Vordringen der Wärmefront zum Kern des Querschnitts.

Auf den brandbeanspruchten Seiten setzt sich der Nettowärmestrom aus Konvektion und Strahlung zusammen:

$$\dot{h}_{\text{net}} = \underbrace{\alpha_c (\theta_g - \theta_m)}_{\text{Konvektion}} + \underbrace{\Phi \varepsilon_m \sigma \left[(\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right]}_{\text{Strahlung}}$$

wobei θ_g die Gastemperatur (Brandkurve), θ_m die Oberflächentemperatur ist, $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ und $\varepsilon_m = 0.7$ (Standardwerte, anpassbar). Die nicht beanspruchten Seiten werden als adiabatisch angenommen ($\partial\theta/\partial n = 0$).

Die Einheitstemperaturkurve ISO 834 liefert die Gastemperatur:

$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad [t \text{ in min}]$$

In diese Gleichungen gehen mehrere Parameter ein: die Brandkurve, die Materialgesetze $\lambda(\theta)$ und $c_p(\theta)$ des Werkstoffs sowie die Wärmeübergangskoeffizienten an der Oberfläche. Standardmäßig nehmen sie die Werte der EN 1992-1-2 an und bleiben in der Eingabe veränderbar.

Das Temperaturfeld in SectionPro

SectionPro löst das Temperaturfeld für einen Querschnitt beliebiger Form, sei er voll, ausgespart oder aus mehreren Materialien zusammengesetzt, ohne sich auf die in der Norm tabellierten Geometrien zu beschränken. Seine wichtigsten Fähigkeiten:

- **Brandkurven.** ISO 834 (Normbrand), Hydrocarbon-Kurve, Außenbrandkurve oder eine benutzerdefinierte Kurve in Form von Zeit-Temperatur-Punkten.
- **Beanspruchung je Seite.** Jede Seite ist unabhängig voneinander brandbeansprucht oder nicht. Ein in eine Platte eingegossener Balken hat drei brandbeanspruchte Seiten, wobei die Oberseite adiabatisch bleibt; eine Stütze hat deren vier.
- **Schutzschichten.** Eine Schutzschicht kann seitenweise definiert werden (Dicke d_p , Wärmeleitfähigkeit λ_p , Rohdichte ρ_p , spezifische Wärmekapazität $c_{p,p}$): Gipsplatten, Spritzputze oder Dämmstoffe. Ihr Wärmewiderstand geht in die Randbedingung ein.
- **Materialien und Geometrie.** Quarz- oder kalksteinhaltiger Beton, Feuchtegehalt, Rohdichte und Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit sind einstellbar. Der Querschnitt kann Löcher und Hohlräume, mehrmateriale Bereiche und eingebettete Bewehrungsstäbe enthalten.

Man erhält zu jedem angeforderten Zeitpunkt das vollständige Temperaturfeld: Isothermenkarte, Temperaturen an den Bewehrungen und zusammenfassende Kenngrößen (maximale Oberflächentemperatur, mittlere Temperatur, Kerntemperatur). Diese Daten dienen anschließend als Eingabe für die Berechnung der Resttragfähigkeit, die Gegenstand des nächsten Artikels sein wird.

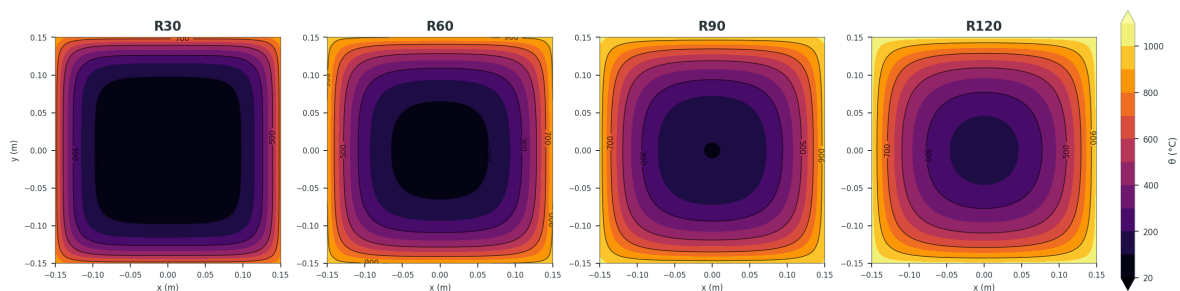


Abbildung 1: Beispiel eines von SectionPro berechneten Feldes: Stütze 300×300 , auf allen vier Seiten brandbeansprucht, Isothermen bei den Branddauern R30 / R60 / R90 / R120.

Validierung nach Anhang A der EN 1992-1-2

Anhang A der EN 1992-1-2 liefert Referenz-Temperaturprofile für gängige Querschnitte, die dem Normbrand ISO 834 ausgesetzt sind: eine Platte (Fig A.2), Balken (Fig A.3 bis A.10) und Stützen (Fig

A.11 bis A.20). Diese Profile wurden für einen Feuchtegehalt von 1,5 % und den unteren Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit aufgestellt. Diese Annahmen übernehmen wir als Validierungsmaßstab.

Zwei für die Norm repräsentative Geometrien werden unter denselben Annahmen nachgebildet: die Platte, ein eindimensionaler, auf einer Seite beanspruchter Fall, und die auf allen vier Seiten beanspruchte Stütze, für die die Norm unmittelbar die Lage der 500-°C-Isotherme angibt, die den als tragfähig geltenden Beton abgrenzt. In jedem Diagramm sind die von SectionPro berechneten Isothermen in Rot den in Anhang A veröffentlichten Profilen in Schwarz überlagert, im selben Koordinatensystem gezeichnet. Der Vergleich betrifft somit unmittelbar dieselben Kurven.

— EN 1992-1-2, Anhang A — SectionPro

Der Wärmetransport in der Platte bleibt von der beanspruchten Seite aus nahezu eindimensional, während die Stütze ein doppelt symmetrisches Feld entwickelt, dessen kalter Kern mit fortschreitender Brandeinwirkung schrumpft.

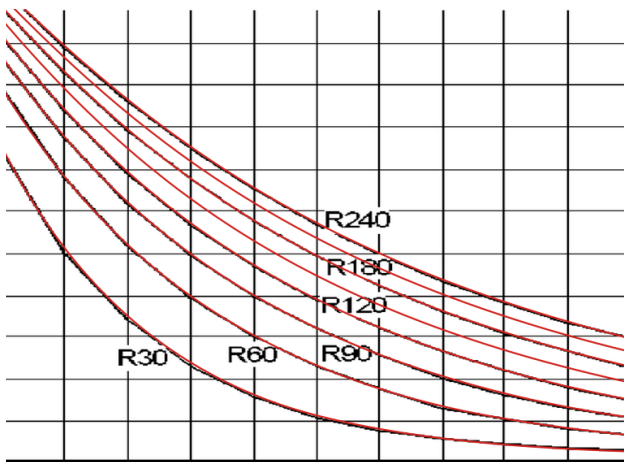


Abbildung 2: Platte $h = 200$ mm, an der Unterseite beansprucht, von R30 bis R240 (Tiefe 0 bis 100 mm auf der Abszisse, Temperatur auf der Ordinate).

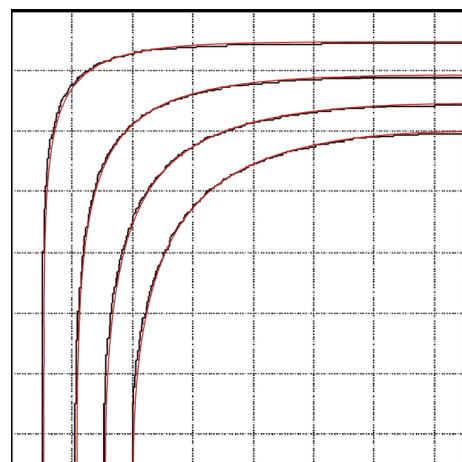


Abbildung 3: Stütze 300×300 , 500-°C-Isotherme bei R30, R60, R90 und R120 (Viertelquerschnitt, 0 bis 150 mm Seitenlänge).

Validierungsbilanz. Bei der Platte, dem eindimensionalen Referenzfall, deckt sich das berechnete Profil mit dem der Fig A.2 über den gesamten Bereich der maßgebenden Betondeckungen ebenso wie bis zum Kern. Bei der auf allen vier Seiten beanspruchten Stütze folgt die Lage der 500-°C-Isotherme bei jeder Branddauer der Norm. Der thermische Löser ist damit für diese beiden Beanspruchungskonfigurationen validiert.

■ Anwendungsbeispiel

Über die in der Norm tabellierten Formen hinaus behandelt SectionPro beliebige Geometrien. Die beiden folgenden Beispiele, ein sechseckiger und ein kreisförmiger Querschnitt, sind über ihren gesamten Umfang beansprucht.

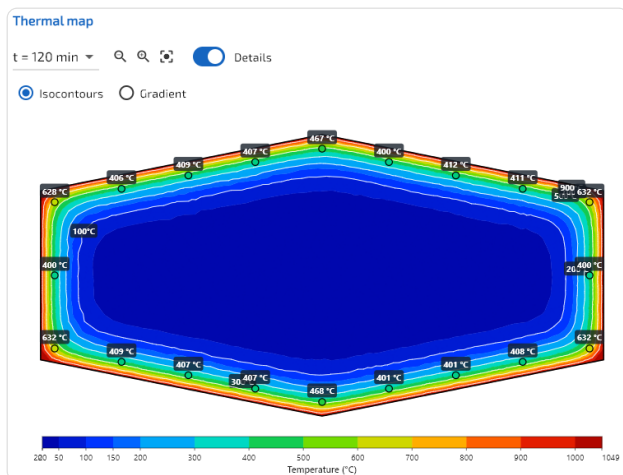


Abbildung 4: Sechseckiger Querschnitt, Temperaturfeld bei $t = 120$ min. Der Modus „Details“ zeigt die Temperaturen an den Bewehrungen (Punkte): kalter zentraler Kern, heiße Ecken am Rand.

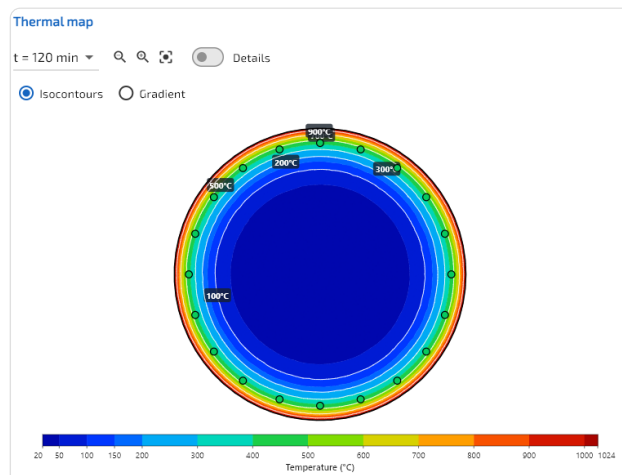


Abbildung 5: Kreisförmiger Querschnitt, über den gesamten Umfang beansprucht, Isothermen bei $t = 120$ min. Die Bezugskonturen (100, 200, 300, 500 und 900 °C) sind in Weiß gezeichnet.

Rechenleistung

Die Berechnung des Temperaturfeldes erfolgt nahezu augenblicklich: weniger als eine Sekunde, auch für die längsten Feuerwiderstandsdauern. Die an den Validierungsfällen gemessenen Zeiten sind nachstehend angegeben.

Querschnitt	Seiten	Simulierte Dauer	Rechenzeit
Balken 300×160	3	R90 (3 Zeitpunkte)	0,12 s
Stütze 300×300	4	R120 (4 Zeitpunkte)	0,35 s
Balken 600×300	3	R120 (4 Zeitpunkte)	0,52 s
Platte 200	1	R240 (8 Zeitpunkte)	0,57 s

Export

Das Temperaturfeld lässt sich als Bild exportieren (Isothermenkarte, in hellem oder dunklem Farbschema), im CSV-Format (Knotenkoordinaten, Knotentemperaturen zu jedem Zeitpunkt, Bewehrungstemperaturen) sowie im von SectionPro erstellten PDF-Berechnungsbericht. Die Ausgabepunkte sind frei wählbar, gleichmäßig verteilt oder einzeln festgelegt, was es erlaubt, die geregelten Feuerwiderstandsdauern R30, R60, R90 und R120 gezielt anzusteuern.

Fazit

Das Temperaturfeld bildet die Grundlage jedes Brandschutznachweises. SectionPro berechnet es mit transienten finiten Elementen, indem es die nichtlineare Wärmeleitungsgleichung löst, die die temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität mit Feuchtepeak und die Strahlung in θ^4 koppelt, für eine beliebige Geometrie und eine seitenweise definierte Beanspruchung, einschließlich Schutzschichten. Die Materialgesetze und die Brandkurve nehmen darin standardmäßig die Werte der EN 1992-1-2 an, die in der Eingabe veränderbar sind.

Der Vergleich mit den Profilen aus Anhang A bestätigt dieses Vorgehen: Das berechnete Profil deckt sich im eindimensionalen Fall der Platte mit der Referenz, und die Lage der 500-°C-Isotherme in der auf allen vier Seiten beanspruchten Stütze folgt bei jeder Branddauer der Norm. Das so gewonnene Feld liefert eine verlässliche Grundlage für die Berechnung der Resttragfähigkeit im Brandfall.