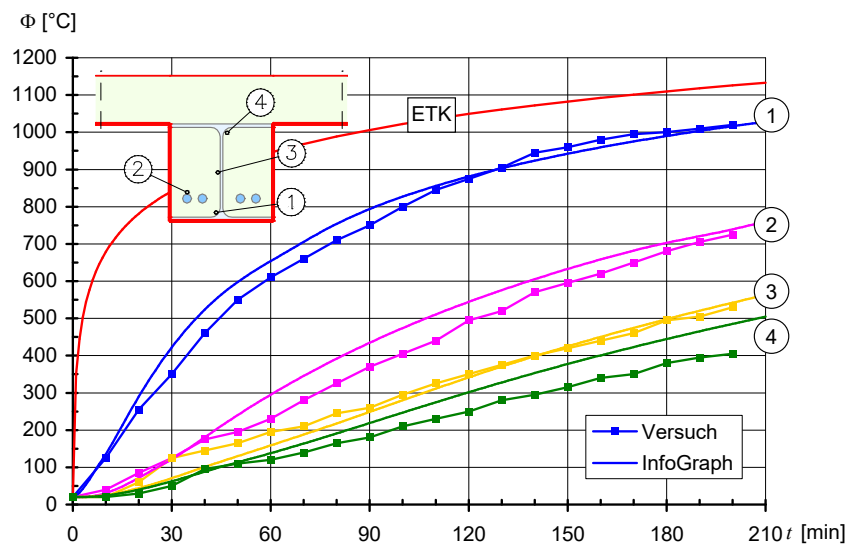
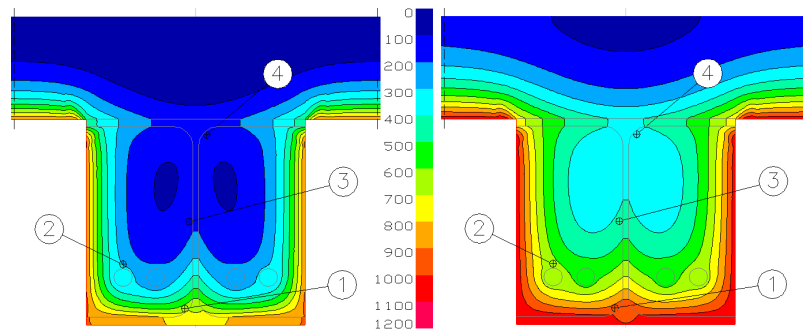


Tragwerksanalyse für den Brandfall

für Stahl-, Stahlbeton-, Holz- und Verbundtragwerke nach Eurocode



Die Beschreibung von Programmfunktionen im Rahmen dieser Dokumentation gilt nicht als Zusicherung von Produkteigenschaften. Gewährleistungs- und Haftungsansprüche aus der Benutzung der Dokumentation sind ausgeschlossen.

InfoGraph® ist ein eingetragenes Warenzeichen der InfoGraph GmbH Aachen. Im Text genannte Hersteller und Produktbezeichnungen sind Warenzeichen der jeweiligen Inhaber.

Diese Dokumentation ist urheberrechtlich geschützt. Nachdruck, Vervielfältigung, Übersetzung und elektronische Speicherung, auch auszugsweise, sind nur nach schriftlicher Genehmigung der InfoGraph GmbH zulässig.

InfoGraph® Software nutzt Microsoft® MFC- und Intel® MKL-Bibliotheken.

© InfoGraph GmbH, Aachen, Juni 2024. Alle Rechte vorbehalten.

Titelbild: Temperaturverlauf an einem Verbundträger nach 60 und 90 Minuten [°C].
Vergleichsberechnung zu: Nachweis der Brandsicherheit von kammerbetonierten Verbundbauteilen über Grenzbrandlasten.
J. Upmeyer, Dissertation, TU Hannover, 2001.

Inhaltsverzeichnis

Anwendungsbereich	3
Berechnung der Querschnittstemperaturen	4
Grundlagen	4
Thermischer Querschnitt	6
Nichtlineare Systemanalyse für den Brandfall	14
Grundlagen	14
Lastfalldefinition	17
Berechnungseinstellungen	17
Ergebnisse	18
Beispiele	19
Giebelstütze einer Halle	19
Stahlrahmen	20
Verbundträger	21
Tunnelrahmen	22
Flachdecke mit Kragarm unter Brandeinwirkung	24
Validierung gemäß DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09	27
Literaturhinweise	40

Tragwerksanalyse für den Brandfall

Anwendungsbereich

Die Tragwerksanalyse für den Brandfall erlaubt die Untersuchung von ebenen und räumlichen Stab- und Flächentragwerken innerhalb der Programmsysteme *Ebene Stabwerke*, *Räumliche Stabwerke* und *Finite Elemente*. Dabei kommen Stahl-, Stahlbeton-, Holz und Verbundquerschnitte unter Berücksichtigung der folgenden Normen zur Anwendung:

- EN 1992-1-2:2004+A1:2019 (Eurocode 2)
- EN 1993-1-2:2005+AC:2009 (Eurocode 3)
- EN 1994-1-2:2005+A1:2014 (Eurocode 4)
- EN 1995-1-2:2004+AC:2009 (Eurocode 5)

Als Querschnittsformen können Stahlbauprofile, Polygonquerschnitte und Kombinationen aus diesen sowie Flächenquerschnitte benutzt werden. Bei der Materialauswahl stehen folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

- Beton nach DIN 1045-1, EN 1992-1-1, DIN EN 1992-1-1, ÖNORM B 4700 und SIA 262
- Baustahl nach DIN 18800 und EN 10025-2
- Stahl mit anwenderdefinierten Kennwerten
- Holz nach EN 338:2016 und EN 14080:2013 (nur Stäbe)
- Frei definierbares Material

Die Bearbeitung gliedert sich im Regelfall in folgende Arbeitsschritte:

1. Tragwerksbemessung für Standardeinwirkungen

- Tragwerksdefinition mit den statisch wirksamen Querschnitten.
- Schnittgrößenermittlung für die maßgebenden Lastfälle.
- Beschreibung der Einwirkungskombinationen nach der anzuwendenden nationalen Norm.
- Spannungsnachweise für Stahlbauteile, Bewehrungsermittlung für Stahlbetonbauteile.

2. Thermische Berechnung zur Ermittlung der Querschnittstemperaturen

- Definition der für den Brandfall maßgebenden Querschnitte (Funktion *Thermische Berechnung* im Querschnittsdialog).
- Festlegung der Brandeinwirkung für die betroffenen Querschnittsränder.
- Berechnung des Temperaturverlaufs im Querschnitt (über Dialog *Thermische Berechnung* oder mit Funktion *Querschnittstemperaturen* im Berechnungsmenü).

3. Nichtlineare Systemanalyse für den Brandfall

- Eingabe eines maßgebenden Lastfalls. Hierzu werden die vorhandenen Lastfälle mit Hilfe der Lastart *Lastgruppe* zusammengestellt und gewichtet.
- Ergänzung des Lastfalls mit der Lastart *Brandfall*.
- Auswahl dieses Lastfalls auf der Registerkarte *Brandfall* in den Berechnungseinstellungen für die Nichtlineare Systemanalyse.
- Auswahl der unter Punkt 1 ermittelten Bewehrung, sofern relevant.
- Durchführung der Stabwerks- bzw. FEM-Berechnung zur Ermittlung der Tragfähigkeit im Brandfall.

Wenn unterschiedliche Brandfälle zu untersuchen sind, können den Querschnittsrändern unter Punkt 2 mehrere Brandeinwirkungen zugeordnet werden. Die einzelnen Brandfälle werden dabei nummeriert. Anschließend ist unter Punkt 3 für jeden Brandfall ein Nachweislastfall zu erzeugen, wobei in der Lastart *Brandfall* auf diese Nummer Bezug genommen wird.

Berechnung der Querschnittstemperaturen

Dieser Abschnitt beschreibt die thermische Berechnung der Querschnittstemperaturen infolge von Brandeinwirkungen.

Grundlagen

Die Berechnung der Temperaturverteilung in Festkörpern für den instationären Fall erfolgt über die Lösung der Wärmeleitungsgleichung nach Fourier. Diese hat für den hier behandelten zweidimensionalen Fall den folgenden Aufbau:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (1)$$

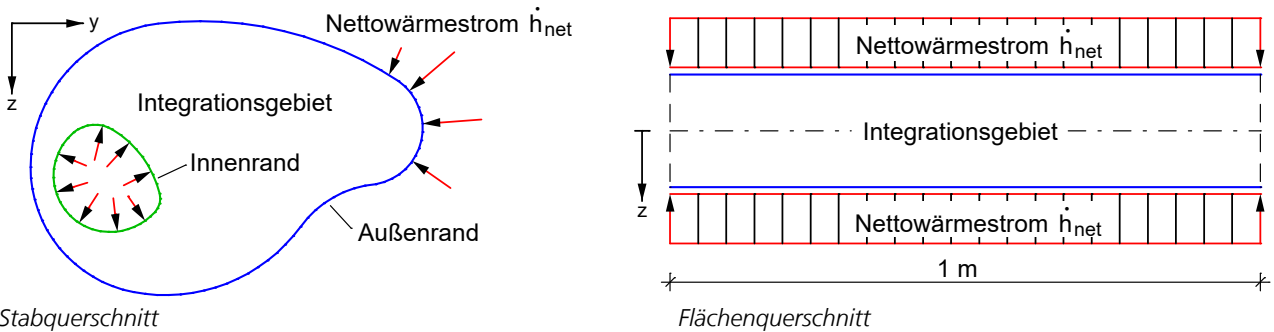
mit

- t Zeit [s]
- y, z Gebietskoordinaten [m]

Funktionen von y, z, t

- θ Temperatur [°C]
- ρ Rohdichte [kg/m³]
- c_p spez. Wärmekapazität [J/(kg K)]
- λ Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]

Bei Flächenquerschnitten reduziert sich die Wärmeleitungsgleichung auf den eindimensionalen Fall mit der Koordinate z . Eine horizontale Wärmeleitung kann somit nicht erfasst werden. Hierfür müsste ein Volumenmodell herangezogen werden. Wärmequellen im Inneren des Integrationsgebiets werden bei Flächenquerschnitten nicht berücksichtigt. Da sämtliche Einflussgrößen zeitabhängig sind, ist ein Anfangswertproblem unter Berücksichtigung der Randbedingungen zu lösen. Als Anfangsbedingung wird die Temperaturverteilung zum Zeitpunkt $t = 0$ im Integrationsgebiet vorgeschrieben.



Stabquerschnitt

Flächenquerschnitt

Für die hier zu behandelnden Problemstellungen werden die thermischen Einwirkungen hauptsächlich durch den Nettowärmestrom \dot{h}_{net} [W/m²] normal zur Berandung bestimmt. Dieser setzt sich aus einem Konvektions- und einem Strahlungsanteil zusammen.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (2)$$

Der konvektive Anteil berechnet sich zu:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c (\Theta_g - \Theta_m) \quad (3)$$

mit

- α_c Wärmeübergangskoeffizient [W/(m² K)]
- Θ_g Gastemperatur in der Umgebung des beanspruchten Bauteils [°C]
- Θ_m Temperatur an der Berandung des Bauteils [°C]

Bei der Berechnung des konvektiven Anteils am Innenrand eines Querschnittslochs wird im Zeitintervall von einer mittleren Gastemperatur ausgegangen.

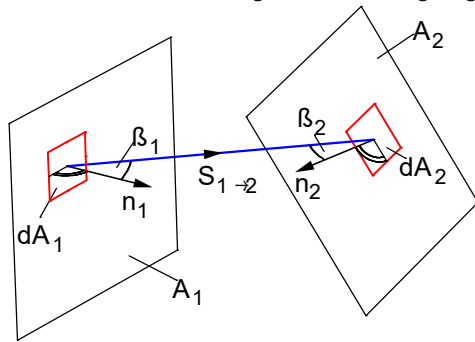
Der Nettowärmestrom zwischen zwei Flächen infolge Strahlung berechnet sich zu:

$$\dot{h}_{\text{net,r}} = \Phi \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot [(\Theta_1 + 273)^4 - (\Theta_2 + 273)^4] \quad (4)$$

mit

Φ	Konfigurationsfaktor
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	Emissivitäten der Bauteiloberflächen [-]
σ	Stephan-Boltzmann-Konstante [= $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$]
Θ_1, Θ_2	Temperaturen der Bauteiloberflächen [°C]

Der Konfigurationsfaktor wird durch die Oberflächengeometrie, dem Abstand der Flächen sowie ggf. durch Abschattungseffekte bestimmt. Die folgende Abbildung zeigt die zugrundeliegenden Größen.



Der Konfigurationsfaktor kann hiermit wie folgt ermittelt werden:

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \cdot \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{s_{1 \rightarrow 2}^2} \cdot dA_1 \cdot dA_2 \quad (5)$$

Im Falle der Strahlungseinwirkung durch Beflammung ergibt sich:

$\Phi = 1$	
$\varepsilon_1 = \varepsilon_m$	Emissivität der Bauteiloberfläche [-]
$\varepsilon_2 = \varepsilon_f$	Emissivität der Flamme (hier $\varepsilon_f = 1$) [-]
$\Theta_1 = \Theta_r$	Wirksame Strahlungstemperatur des Brandes (hier $\Theta_r = \Theta_g$) [°C]
$\Theta_2 = \Theta_m$	Oberflächentemperatur an der Brandung des Bauteils [°C]

Die Gastemperatur Θ_g eines Brandabschnittes wird als bekannt vorausgesetzt und ist in der Regel durch vorgegebene Temperaturzeitkurven definiert.

Das durch die Gleichungen (1) bis (5) gegebene nichtlineare Randwertproblem lässt sich nicht in geschlossener Form lösen. Zur Lösung wird die Methode der Finiten Elemente herangezogen. Hierzu wird das oben beschriebene Randwertproblem unter Verwendung der Methode von Galerkin und anschließender partieller Integration in ein System von Variationsgleichungen umgeformt.

Das Programmsystem verwendet kompatible Elemente mit einem vollständig quadratischen Ansatz. Daraus ergibt sich eine hohe Lösungsgenauigkeit, die weitgehend unabhängig von der Netzgeometrie ist.

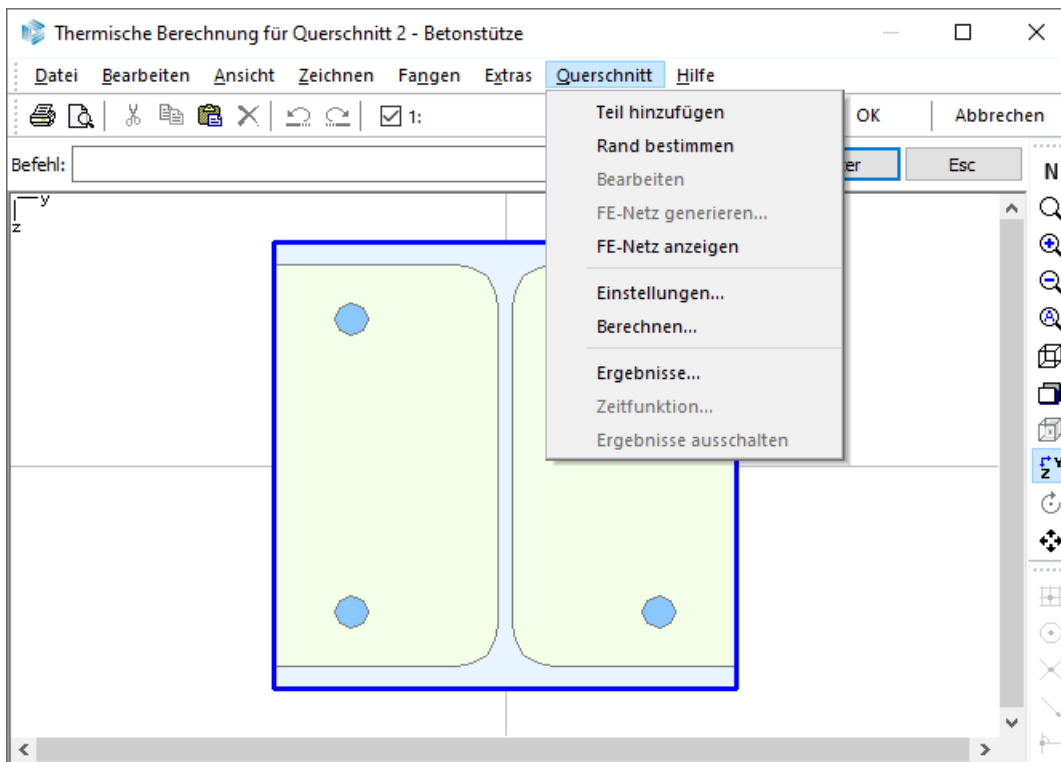
Der Elementansatz erfüllt die sogenannte *adiabatische Randbedingung* automatisch. D.h. wenn keine Randbedingung explizit vorgegeben wird, findet über diesen Rand kein Austausch von thermischer Energie statt.

Das nichtlineare Anfangswertproblem wird mit Hilfe einer Zeitschrittintegration in Verbindung mit einem inkrementellen Newton-Raphson-Algorithmus gelöst. Nach erfolgter Berechnung stehen die Temperaturprofile für alle untersuchten Zeitpunkte zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

Thermischer Querschnitt

Über den Querschnittsdialog gelangt man über die Funktion *Thermische Berechnung* zu dem nachfolgend abgebildeten Eingabefenster. Im Menü *Querschnitt* und im Kontextmenü stehen die nachfolgend erläuterten Funktionen zur Verfügung:

<i>Teil hinzufügen</i>	Erlaubt es, den Querschnitt durch vorhandene und neue Teile zusammensetzen.
<i>Rand bestimmen</i>	Bestimmt den Rand des aus Teilen zusammengesetzten Querschnitts und stellt ihn mit einer roten Linie dar.
<i>Bearbeiten</i>	Startet den Dialog zur Bearbeitung des markierten Querschnittsteils oder zur Festlegung von Brandeinwirkungen für den markierten Abschnitt des Querschnittsrandes.
<i>FE-Netz generieren...</i>	Startet den Dialog zur Vorgabe der Rasterweite für das Elementnetz der thermische Berechnung.
<i>FE-Netz anzeigen</i>	Zeigt das Elementnetz für die thermische Berechnung an. Das Netz wird vor jeder Berechnung automatisch generiert, auch wenn die Anzeige abgeschaltet ist.
<i>Einstellungen...</i>	Startet den Dialog mit Einstellungen für die thermische Berechnung.
<i>Berechnen...</i>	Startet die thermische Berechnung in einem eigenen Fenster und stellt den Temperaturverlauf für den letzten berechneten Zeitpunkt dar.
<i>Ergebnisse...</i>	Startet den Dialog für die Ergebnisauswahl zu verschiedenen Zeitpunkten.
<i>Zeitfunktion...</i>	Startet den Dialog für die Darstellung einer Zeitfunktion des aktuellen Ergebnisses an einem ausgesuchten Querschnittspunkt.
<i>Ergebnisse ausschalten</i>	Schaltet die Ergebnisdarstellung aus.



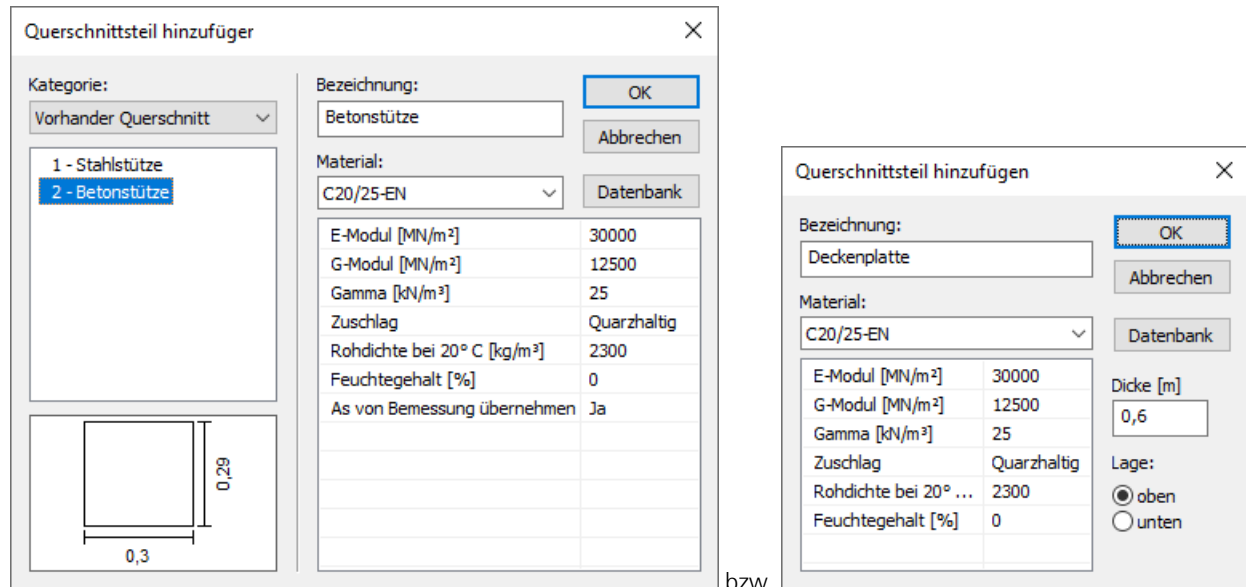
Der thermische Querschnitt kann aus beliebigen Querschnittsteilen zusammengesetzt werden und erlaubt neben der Erfassung statisch relevanter Teile z.B. auch die Berücksichtigung von thermischen Dämmungen.

Für die statische Berechnung (Brandfall) befinden sich die Stabachsen am Ursprung (0; 0) des thermischen Querschnitts.

Die Mittelfläche der Flächenelemente verläuft durch $z = 0$.

Querschnittsteil hinzufügen

Der thermische Querschnitt wird durch Hinzufügen von Querschnittsteilen aufgebaut. Dabei überdecken nachträglich eingefügte Querschnittsteile die zuvor definierten Teile. Die Reihenfolge bestimmt somit die Geometrie des endgültigen Querschnitts. Beim hinzufügen eines Querschnitts mit Loch, wird zuerst ein Querschnittsteil mit der Form des Außenpolygons und der gewählten Materialart und danach ein Querschnittsteil mit der Form des Lochs und der Materialart *Null* erzeugt. Eine vollständige Überdeckung eines im Hintergrund angeordneten Teils ist unzulässig.



Bei Flächenquerschnitten kann ein Querschnittsteil mit der gewählten Dicke oben bzw. unten an bestehende Querschnittsteile angefügt werden. Die Breite der Querschnittsteile beträgt grundsätzlich 1 m.

Bei Stabquerschnitten können folgende Kategorien von Querschnittsteilen eingefügt werden:

Kategorie

- *Bewehrungsstab*: Wird als Querschnittsteil eingefügt und elementiert, hat somit Einfluss auf die Temperaturverteilung (nur für große Durchmesser sinnvoll).
- *Neudefinition*: Neudefinition eines polygonalen Querschnittsteils, welches auch Betonstahlbewehrung enthalten kann. Diese wird nicht elementiert und hat keinen Einfluss auf den Temperaturverlauf.
- *Stahlprofil*: Stahlprofil aus der Querschnittsbibliothek.
- *Vorhandener Querschnitt*: Bereits im Projekt definierter Querschnitt.

Material

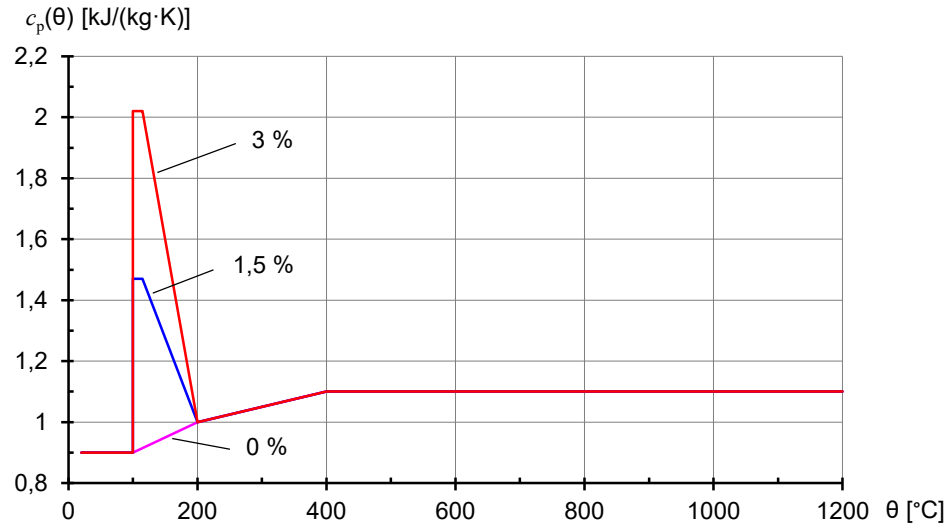
Material des Querschnittsteils mit den zugehörigen thermischen und mechanischen Eigenschaften.

Mit der Option *As von Bemessung übernehmen* wird festgelegt, dass für diesen Querschnitt die Bewehrung übernommen wird, die in den *Berechnungseinstellungen* für die Nichtlineare Systemanalyse auf der Registerkarte *Brandfall* ausgewählt wurde. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese Bewehrungslagen keinen Einfluss auf die Temperaturverteilung im Querschnitt haben und daher die Temperatur des Beton an Ihrer Lage aufweisen. Zur Verwendung in anderen Tragwerken kann das Material in der Datenbank *Igraph.dat* abgespeichert werden.

Für die thermische Berechnung gelten die nachfolgenden spezifischen Materialeigenschaften:

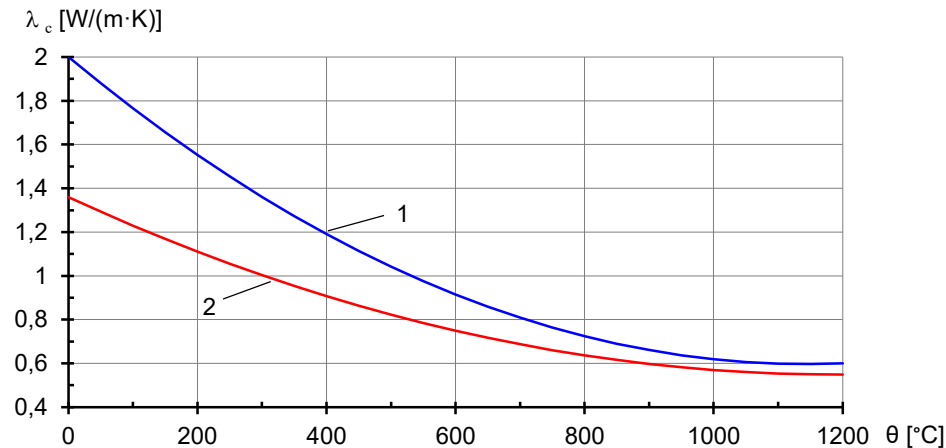
Beton

Allen Querschnittsteilen aus Beton werden die temperaturabhängige *spezifische Wärmekapazität*, die *thermische Leitfähigkeit* und die *Rohdichte* nach EN 1992-1-2 automatisch zugewiesen. Gemäß DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12 wird für DIN-Beton die obere Grenzfunktion der *thermischen Leitfähigkeit* aus 3.3.3 (2) verwendet. Für die übrigen Betone kommt der untere Grenzwert zur Anwendung. Der *Feuchtegehalt* und die *Rohdichte bei 20° C* kann von Benutzer vorgegeben werden. Für das Material ÖNBeton können benutzerdefinierte Verläufe der thermischen Eigenschaften festgelegt werden.

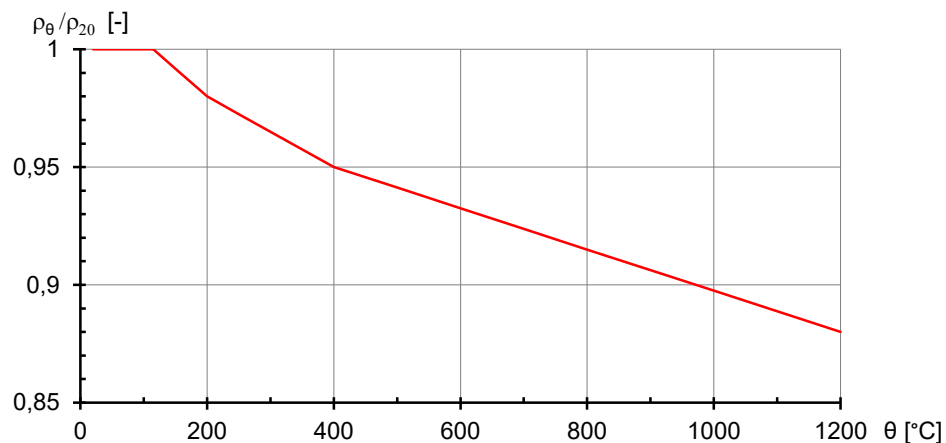


Spezifische Wärme von Beton mit quarz- und kalksteinhaltigem Zuschlag $c_p(\theta)$ in Abhängigkeit von der Temperatur (Feuchtegehalt $u = 0, 1,5$ und 3 Gew.-%)

Bei einem Feuchtegehalt zwischen den angegebenen Werten wird linear interpoliert.



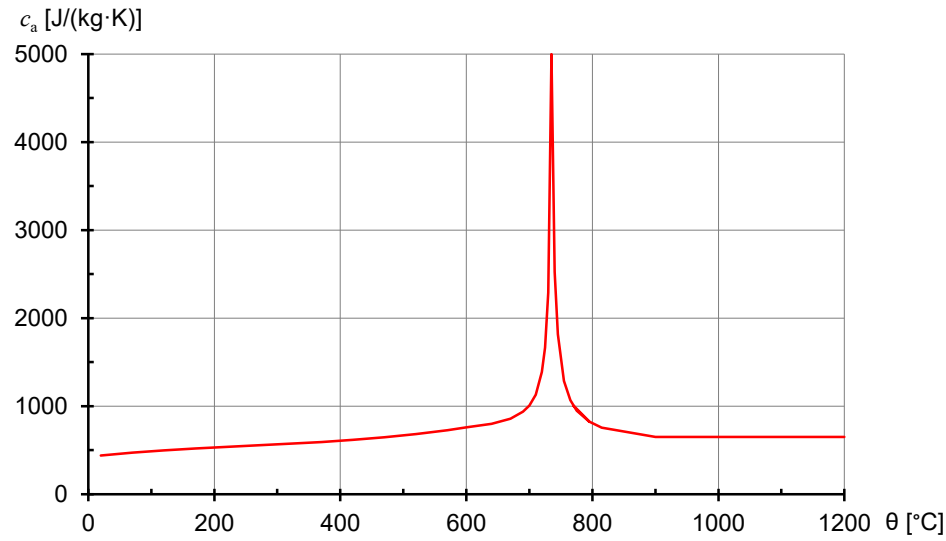
Thermische Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur
1: obere Grenze (DIN-Beton); 2: untere Grenze



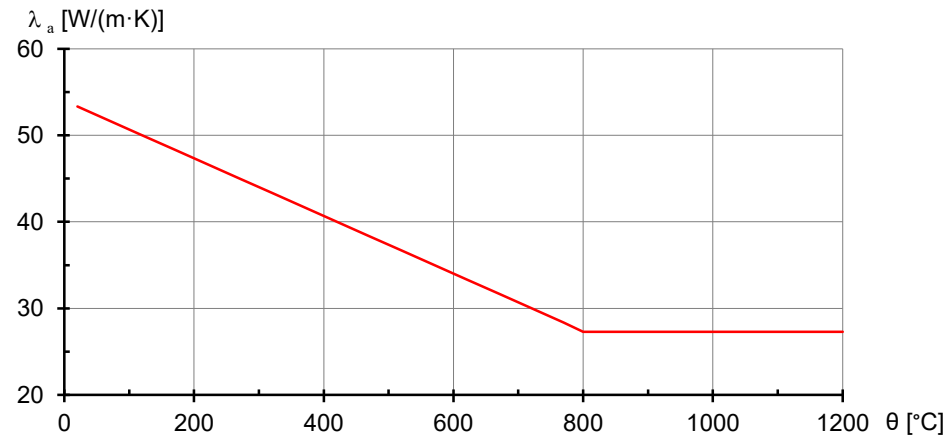
Verhältnis der Rohdichte für Beton in Abhängigkeit von der Temperatur

Stahl

Allen Querschnittsteilen aus Stahl werden die temperaturabhängige *spezifische Wärmekapazität* und die *thermische Leitfähigkeit* nach EN 1993-1-2 automatisch zugewiesen.



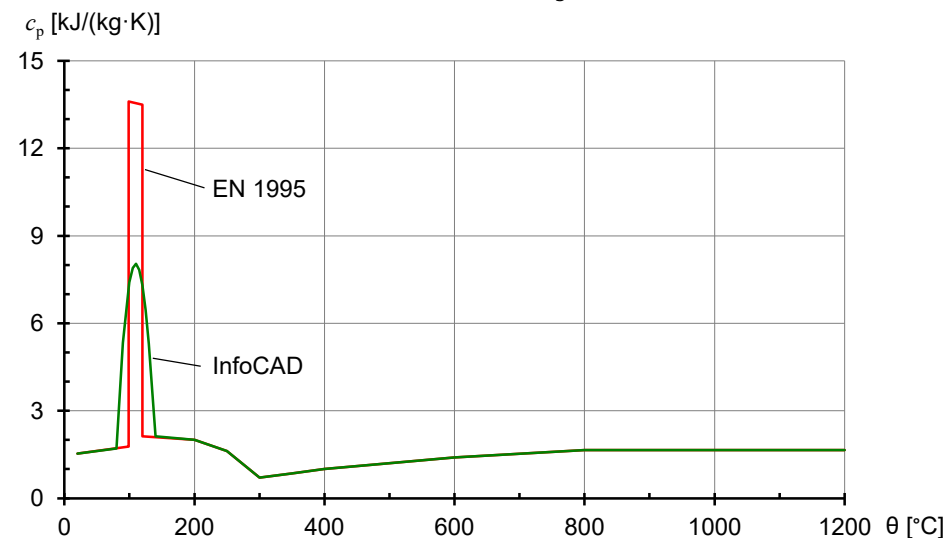
Spezifische Wärmekapazität von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit von der Temperatur



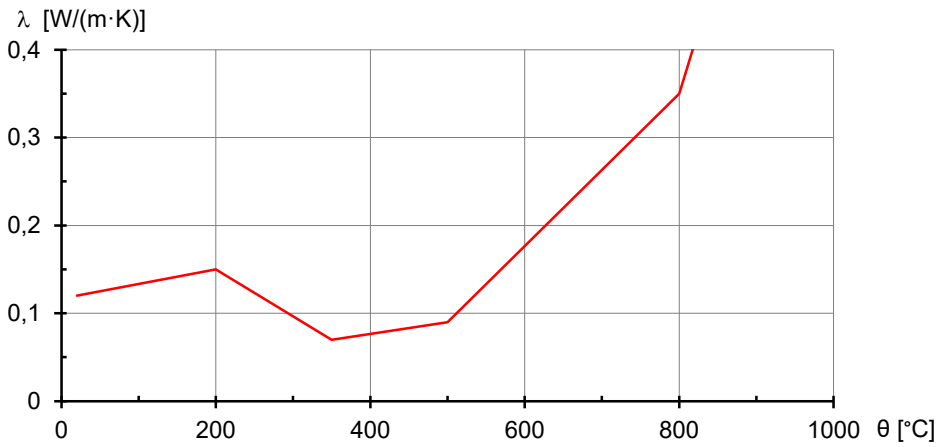
Wärmeleitfähigkeit von Kohlenstoffstahl in Abhängigkeit von der Temperatur

Holz

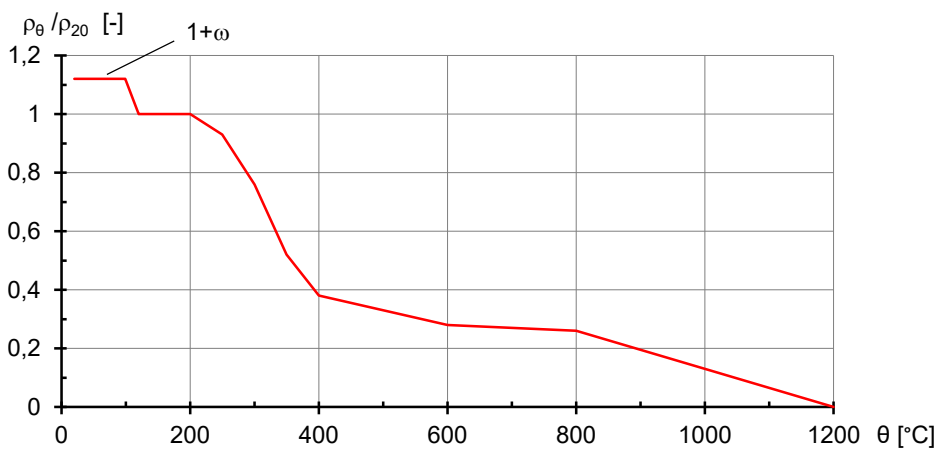
Allen Querschnittsteilen aus Holz werden die temperaturabhängige *spezifische Wärmekapazität*, die *thermische Leitfähigkeit* und die *Rohdichte* nach EN 1995-1-2 automatisch zugewiesen.



Spezifische Wärmekapazität von Holz in Abhängigkeit von der Temperatur



Wärmeleitfähigkeit von Holz in Abhängigkeit von der Temperatur



Verhältnis der Rohdichte für Holz mit einer Anfangsfeuchte ω von 12 % in Abhängigkeit von der Temperatur

Freies Material

Querschnittsteile aus freiem Material sind z.B. Dämmstoffe für die der Benutzer beliebige temperaturabhängige Verläufe der spezifischen Wärmekapazität, der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit angeben kann.

Wärmeleitfähigkeit ✕

Werte:

T [°C]	Lambda [W/(m·K)]	
1	0	1,5
2	150	0,75
3	1000	0,55
*		

Bezeichnung:
Freies Material

OK Abbrechen

Benutzerdefinierte Wärmeleitfähigkeit

Materialart „Null“

Querschnittsteile mit dieser Materialart werden von der Berechnung ausgenommen. Dadurch lassen sich nachträglich Öffnungen definieren.

Querschnittsteil bearbeiten

E-Modul [MN/m ²]	30000
G-Modul [MN/m ²]	12500
Gamma [kN/m ³]	25
Zuschlag	Quarzhaltig
Rohdichte bei 20° C [kg/m ³]	2300
Feuchtegehalt [%]	0
As von Bemessung übernehmen	Ja

Die Funktionen *Bearbeiten* erlaubt es, für markierte Querschnittsteile das Material und weitere Eigenschaften für das thermische Verhalten zu ändern. Bei Querschnittspolygonen kann zusätzlich die Geometrie mit den Bewehrungslagen modifiziert werden.

Querschnittsrand bearbeiten

Nach dem Einfügen aller Querschnittsteile ist deren Umrandung zu bestimmen. Dies geschieht automatisch mit dem Befehl „*Rand bestimmen*“. Jedem der sich dabei ergebenden Querschnittsränder können die nachfolgenden Eigenschaften zugeordnet werden. Rändern an Löchern wird standardmäßig die Eigenschaft „*Innere Strahlung und Konvektion*“ zugeordnet.

Netzweite

Der Rand wird mit der gewählten Netzweite eingeteilt [mm]. Ist die gewählte Netzweite "0" und ist dem Rand eine Brandkurve zugeordnet wird der Rand mit ca. 20 mm eingeteilt.

Bedingungen

Um unterschiedliche Brandszenarien untersuchen zu können, wird zwischen verschiedenen *Brandfällen* unterschieden. Deren Bezeichnung und Nummerierung kann bei Bedarf durch den Benutzer abgeändert werden. Für jeden Brandfall wird eine separate thermische Berechnung durchgeführt. Dabei wirken auf die Ränder Einwirkungen gleicher Brandfallnummer. Ränder, denen unter dieser Nummer keine Einwirkung zugeordnet wurde, verhalten sich adiabatisch.

Jedem Brandfall sind folgende Eigenschaften zugeordnet:

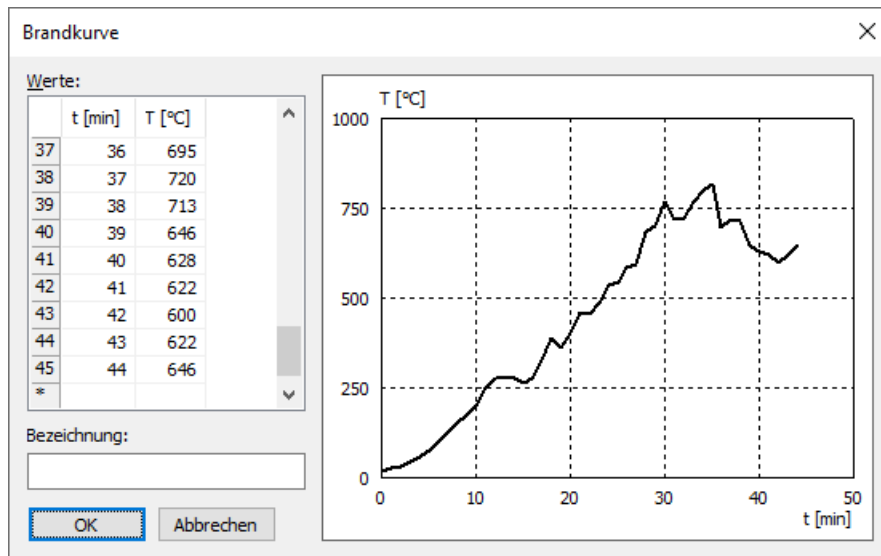
- Brandkurve z.B. *ETK (Einheits-Temperaturzeitkurve)*
- *Wärmeübergangskoeffizient [W/(m² K)]*
- *Emissivität [-]*

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient kann EN 1991-1-2, Anhang B entnommen werden.

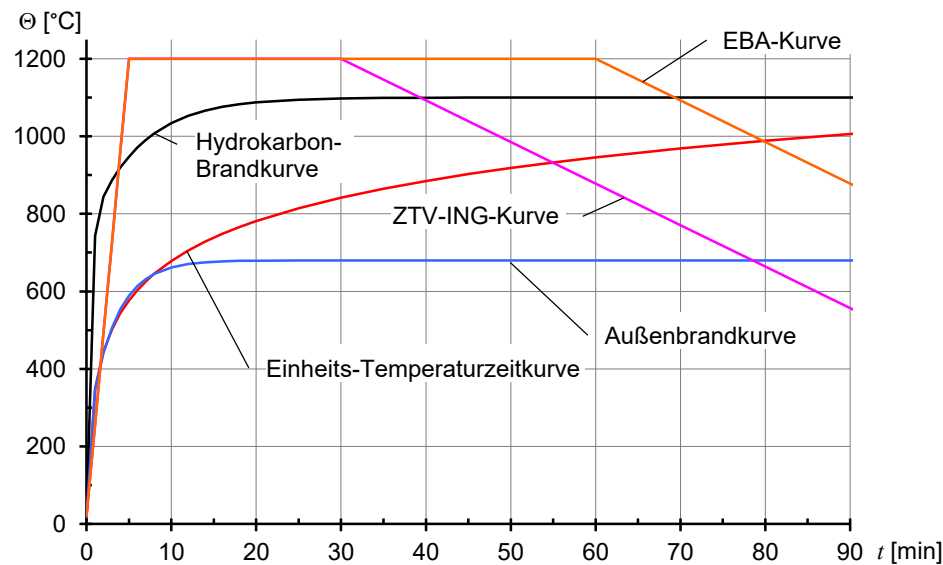
Die Emissivität von Beton- und Baustahloberflächen sollte nach EN 1992-1-2 bzw. EN 1993-1-2, Kapitel 2.2 (2) mit dem Vorschlagswert von 0,7 angesetzt werden. Bei nichtrostendem Stahl nach Anhang C der Norm sollte die Emissivität 0,4 gesetzt werden.

Für den Brandverlauf können die nachfolgenden Brandkurven verwendet werden.

- *Außenbrandkurve*: Brandkurve nach EN 1991-1-2 (Türkis dargestellt).
- *Benutzerdefinierte Brandkurve*: Vom Benutzer zu definierende Brandkurve (Blau dargestellt).
- *EBA-Kurve*: Brandkurve nach EBA-Richtlinie (Orange dargestellt).
- *ETK (Einheits-Temperaturzeitkurve)*: Brandkurve nach EN 1991-1-2 bzw. prEN 13501-2 (Rot dargestellt).
- *Hydrokarbon-Brandkurve*: Brandkurve nach EN 1991-1-2 (Schwarz dargestellt).
- *Konstante Umgebungstemperatur*: Die Höhe der Umgebungstemperatur kann eingestellt werden (Grün dargestellt).
- *ZTV-ING-Kurve*: Brandkurve nach ZTV-ING Teil 5 (Lila dargestellt).



Benutzerdefinierte Brandkurve

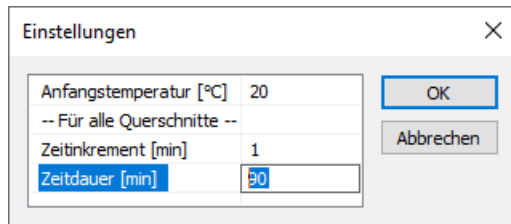


Brandkurven nach EN 1991-1-2, ZTV-ING Teil 5 bzw. EBA-Richtlinie

FE-Netz generieren

Die Querschnittsgeometrie ist durch die eingefügten Querschnittsteile und die Berandung festgelegt. Für die thermische Berechnung wird hieraus programmintern eine Vernetzung mit finiten Elementen hergeleitet. Diese kann mit dem Befehl „FE-Netz anzeigen“ visualisiert werden. Für Stabquerschnitte kann mit dem Befehl „FE-Netz generieren“ die Netzweite [mm] und ein Netzwinkel [°] (kleinster Innenwinkel der Elemente) gewählt werden. Das FE-Netz hat sowohl Einfluss auf die thermische als auch auf eine spätere mechanische Berechnung, da beide mit der selben Elementierung arbeiten.

Einstellungen für die Temperaturberechnung



Mit der Anfangstemperatur wird die Anfangsbedingung für die Zeitschrittberechnung zum Zeitpunkt $t = 0$ festgelegt. Diese gilt für den jeweiligen Querschnitt. Bei einer Temperatur von 20°C tritt gemäß Norm keine Temperaturdehnung auf.

Das Zeitinkrement und die Zeitdauer werden sowohl bei der thermischen als auch bei der mechanischen Berechnung verwendet. Beide Größen gelten aus Kompatibilitätsgründen global.

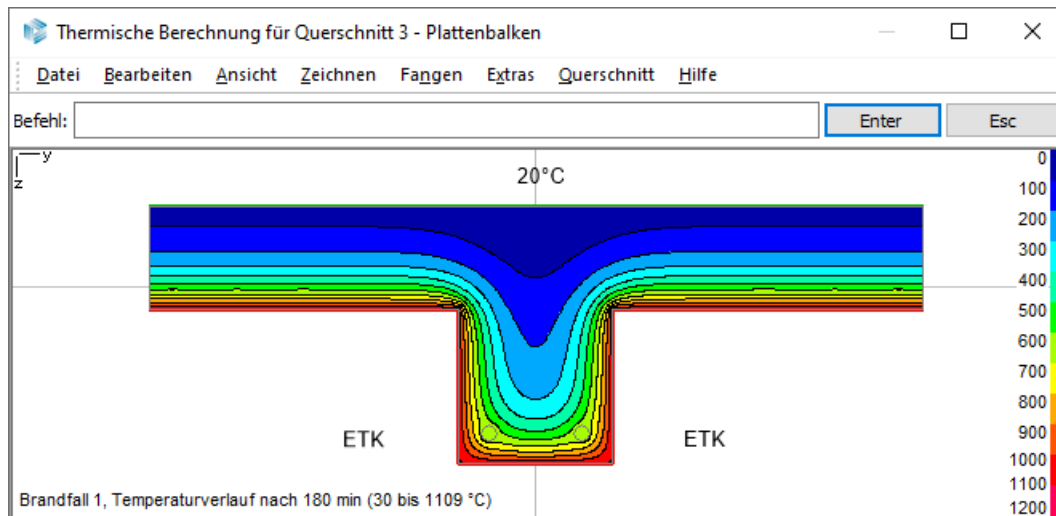
Die Größe des Zeitinkrements beeinflusst die Berechnungsgenauigkeit, sollte jedoch in Hinblick auf die Rechenzeit nur ausnahmsweise kleiner als 1 min gewählt werden.

Temperaturverlauf berechnen

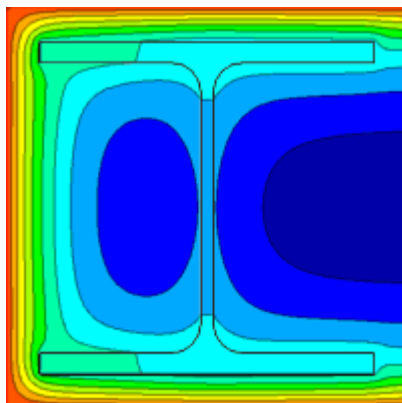
Mit dem Menüpunkt *Berechnen* des Bearbeitungsfensters wird für den aktuellen Querschnitt die Berechnung des Temperaturverlaufes über die gewünschte Zeitdauer gestartet. Im Berechnungsmenü des Hauptfensters kann mit der Funktion *Querschnittstemperaturen* die gleichzeitige Berechnung für alle Querschnitte gestartet werden.

Ergebnisse darstellen

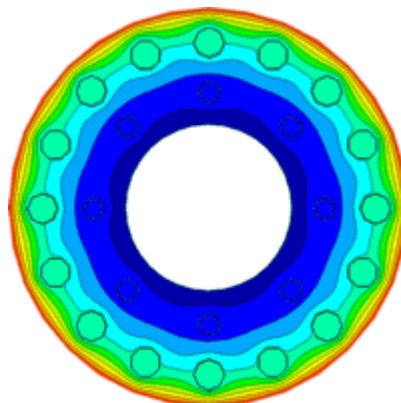
Nach der Berechnung wird die Temperaturverteilung des letzten berechneten Zeitpunkts dargestellt. Mit dem Ergebnis-Dialog können die Temperaturprofile für jeden untersuchten Zeitpunkt angezeigt werden.



Temperaturverteilung aus der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK)



Dreiseitig beflammtes Verbundquerschnitt mit einem adiabatischen Rand



Schleuderbetonstütze mit Bewehrungsseisen

Nichtlineare Systemanalyse für den Brandfall

Nachfolgend werden die Besonderheiten bei der Anwendung der Nichtlinearen Systemanalyse für den Brandfall erläutert. Die allgemeinen theoretischen Grundlagen sind im Kapitel *Nichtlineare Systemanalyse* zu finden.

Grundlagen

Die nichtlineare Berechnung im Brandfall erfolgt nach dem *Allgemeinen Rechenverfahren* der Normen EN 1992-1-2, EN 1993-1-2 und EN 1995-1-2. Dabei wird davon ausgegangen, dass die mechanische Analyse unabhängig von der thermischen Berechnung durchgeführt werden kann. Basis für die Berechnung sind die vorab innerhalb der thermischen Querschnittsanalyse ermittelten Temperaturprofile entsprechend dem Kapitel *Berechnung der Querschnittstemperaturen*.

Da die wesentlichen Einflussgrößen zeit- und temperaturabhängig sind, wird bei der *Nichtlinearen Systemanalyse für den Brandfall* stets eine Zeitschrittberechnung durchgeführt. Dabei werden alle Querschnitte, für die eine thermische Berechnung vorliegt, gemäß den Vorgaben von EN 1992-1-2, EN 1993-1-2 bzw. EN 1995-1-2 behandelt. Für sämtliche querschnittsbezogenen Integrationen wird dabei der thermische Querschnitt herangezogen. Liegen für einen thermischen Querschnitt für einen Brandfall keine Temperaturprofile vor, so wird dieser unter Normaltemperatur (20°C) nach EN 1992-1-2, EN 1993-1-2 bzw. EN 1995-1-2 analysiert. Für alle übrigen Querschnitte gelten die Eigenschaften des Basisquerschnitts. Querschnittsteile des thermischen Querschnitts, die weder aus Stahl, Stahlbeton noch aus Holz bestehen, werden bei der mechanischen Analyse nicht berücksichtigt. Da zum Schubtragverhalten im Brandfall insbesondere bei Stahlbetonquerschnitten keine genaueren Erkenntnisse vorliegen, werden der Berechnung z.Zt. die Schub- und Torsionssteifigkeiten der Basisquerschnitte zugrundegelegt.

Das Programm rechnet nach der nichtlinearen Elastizitätstheorie. D.h. Be- und Entlastung folgen demselben Pfad. Eine mögliche Festigkeitszunahme von Beton oder Holz in der Abkühlphase wird nicht berücksichtigt.

Auf der Widerstandsseite wird programmintern der Teilsicherheitsbeiwert für die Materialeigenschaften im Brandfall zu $\gamma_{M,fi} = 1,0$ gesetzt.

Auf der Einwirkungsseite (benutzerdefiniert) ist gemäß EN 1990 (Eurocode 0) folgende Einwirkungskombination im Brandfall zu berücksichtigen:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

dabei beinhaltet A_d neben den Temperature Auswirkungen auf die Baustoffeigenschaften auch die thermischen Dehnungen. Der Dehnungsansatz lautet:

$$\varepsilon_s = \varepsilon - \varepsilon_{th}$$

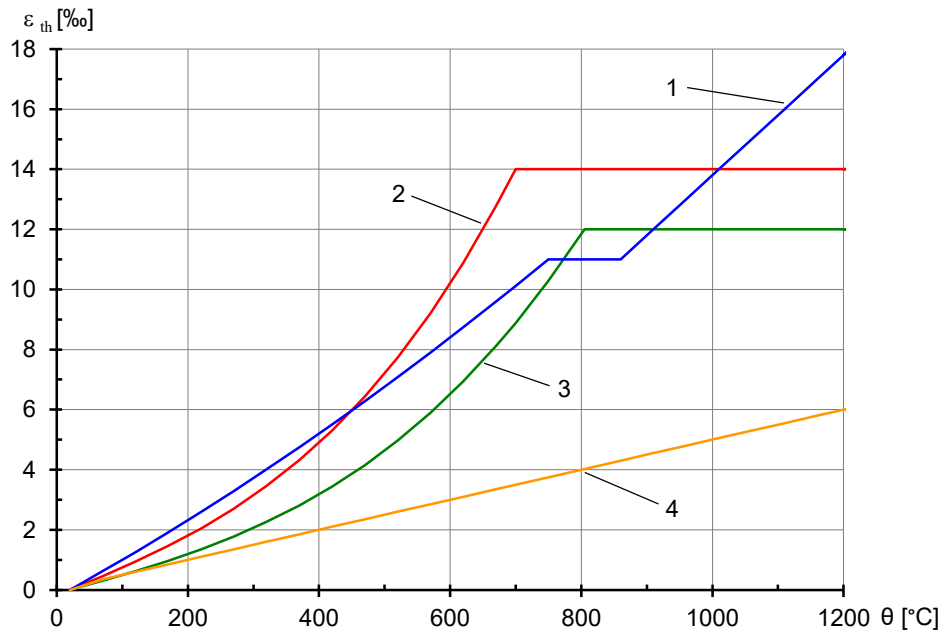
mit

ε Gesamtdehnung

ε_s Spannungserzeugende Dehnung

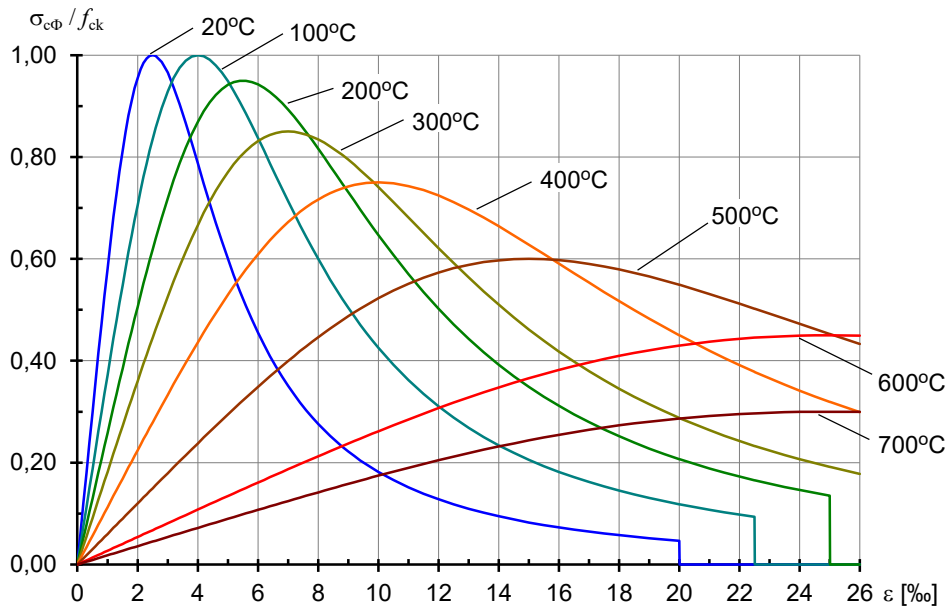
ε_{th} thermische Dehnung

Die nachfolgende Abbildung zeigt den Verlauf der thermischen Dehnung für Stahl, Beton und Holz in Abhängigkeit von der Temperatur.



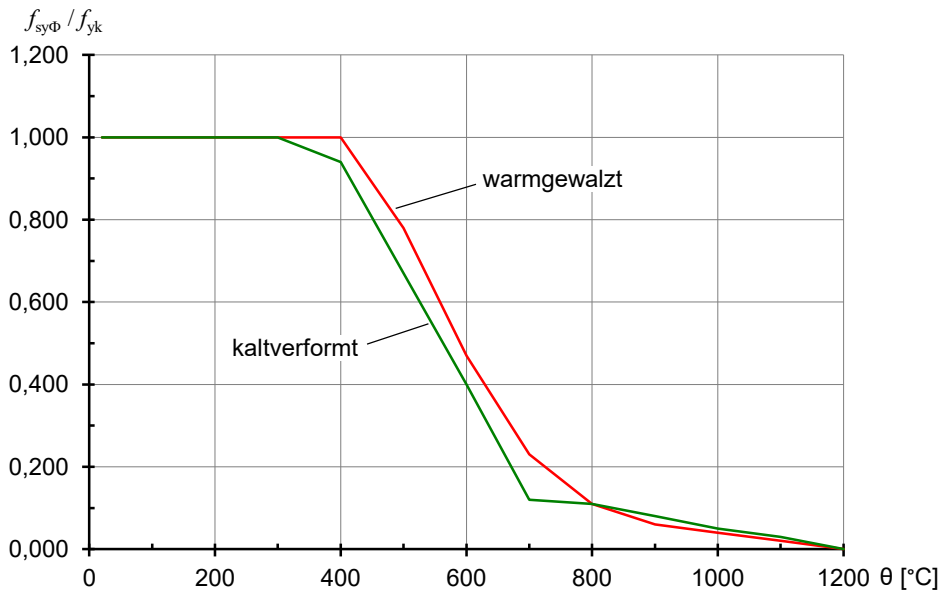
Thermische Dehnung (1:Stahl; 2:Quarzhaltige Zuschläge; 3:Kalksteinhaltige Zuschläge; 4:Holz)

Die Temperaturabhängigkeit der Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton verdeutlicht die folgende Abbildung. Eine Betonzugfestigkeit wird gemäß EN 1992-1-2 (Abschnitt 3.2.2.2) im Brandfall nicht berücksichtigt. Auch Kriech- und Schwindbeiwerte werden im Brandfall nicht angesetzt.



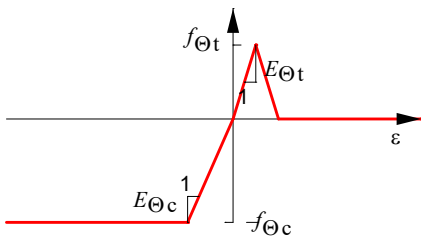
Bezogene Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton mit quarzhaltigen Zuschlägen

Die Spannungs-Dehnungs-Linien für Stahl sind ebenfalls temperaturabhängig. Sie ergeben sich mit Bild 3.3 und Tabelle 3.2a aus EN 1992-1-2. Den Festigkeitsabfall bei erhöhten Temperaturen demonstriert die folgende Abbildung.

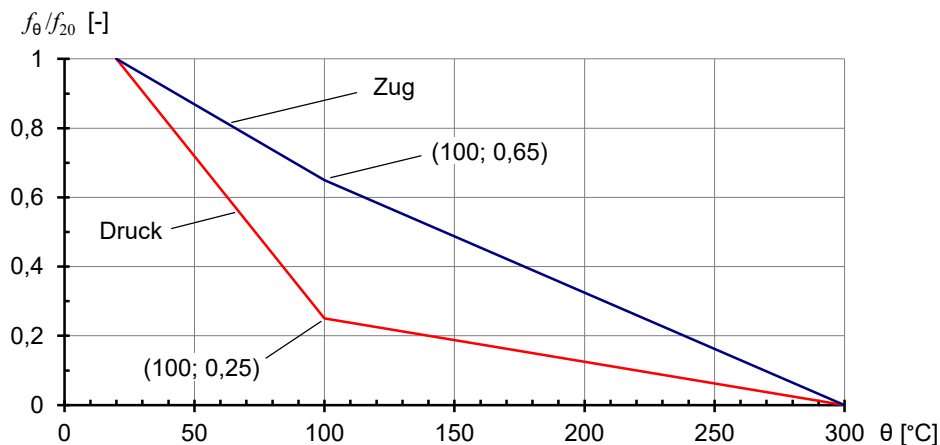


Festigkeitsabfall von Beton- und Baustahl bei erhöhten Temperaturen

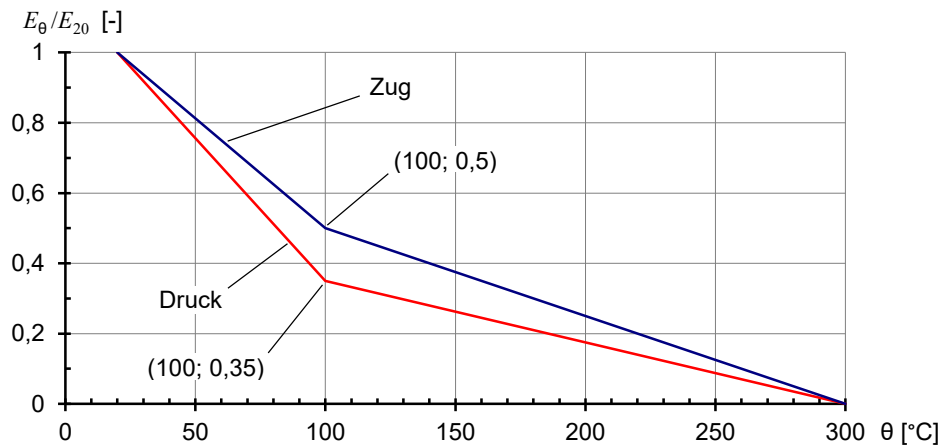
In EN 1995-1-2 werden keine Angaben zum Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Holz unter erhöhten Temperaturen gemacht. Gleichwohl wird die Erfassung nichtlinearen Materialverhaltens gefordert. Deshalb wird für Stabwerke die nachfolgende Spannungs-Dehnungs-Linie mit Entfestigung im Zugbereich und Fließen im Druckbereich verwendet. Die Festigkeiten $f_{\Theta t}$, $f_{\Theta c}$ und die Elastizitätsmoduli $E_{\Theta t}$, $E_{\Theta c}$ entsprechen EN 338:2016 bzw. EN 14080:2013 unter Berücksichtigung des temperaturabhängigen Festigkeitsabfalls. Hiermit ergibt sich insbesondere für biegebeanspruchte Bauteile eine Unterschätzung der Tragfähigkeit gegenüber dem Bemessungsverfahren gemäß EN 1995-1-2, Abschnitt 4.2. Ursache hierfür sind die geringeren Druck- und Zugfestigkeiten ($f_{\Theta t}$, $f_{\Theta c}$) des allgemeinen Berechnungsverfahrens gegenüber der mittleren Biegefestigkeit f_m , welche beim vereinfachten Nachweis Anwendung findet.



Spannungs-Dehnungs-Linien für Holz



Festigkeitsabfall von Holz bei erhöhten Temperaturen



E-Modul-Abfall von Holz bei erhöhten Temperaturen

Die Stabwerkstheorie hat das Ebenbleiben der Querschnitte zur Voraussetzung. Wegen der nichtlinearen thermischen Dehnungsverteilung über dem Querschnitt ergibt sich eine ebenfalls nichtlineare Verteilung der spannungserzeugenden Dehnungen. Die hieraus berechneten Spannungen werden über dem Querschnitt unter Zuhilfenahme der Elementierung zu Schnittgrößen integriert. Der nichtlineare Dehnungszustand wird während der Gleichgewichtsiteration durch Addition linearer Dehnungszustände solange variiert bis Gleichgewicht vorliegt. Diese Methode ist als Standardalgorithmus im Programm implementiert.

Eine alternative Vorgehensweise ist die Zugrundelegung einer sogenannten „Äquivalenten Temperatur“. Hierbei wird die bei der thermischen Berechnung ermittelte nichtlineare Temperaturverteilung durch eine Regressionsebene zuvor linearisiert und dann erst der Berechnung zugeführt. Mit diesem Ansatz bewegt man sich zwar vollständig im Rahmen der Stabwerkstheorie, wird jedoch insbesondere bei Stahlbetontragwerken den thermischen Einwirkungen nicht ausreichend gerecht, da der Einfluss der Steifigkeitsverteilung des gesamten Tragwerks auf die Lage der Regressionsebene nicht erfasst werden kann.

Bei Flächentragwerken wird analog zur nichtlinearen Analyse unter Normaltemperatur mit einem Schichtmodell gerechnet (Siehe "Nichtlineare Systemanalyse > Flächenelemente"). Hierbei wird das biaxiale Tragverhalten von Stahlbeton berücksichtigt. Für Flächentragwerke aus Stahl wird die Raghava-Fließbedingung unter Zugrundelegung temperaturabhängiger Festigkeiten angewendet. Flächentragwerke aus Holz können nicht analysiert werden.

Lastfalldefinition

Für die nichtlineare Berechnung im Brandfall muss ein maßgebender Lastfall definiert werden. Dazu wird folgende Vorgehensweise empfohlen:

- Zusammenstellung und Wichtung vorhandener Lastfälle mit der Lastart *Lastgruppe*.
- Auswahl der Theorie 2. Ordnung, wenn neben der physikalischen auch geometrische Nichtlinearität berücksichtigt werden soll.
- Ergänzung des Lastfalls mit der Lastart *Brandfall*. Die Nummer des Brandfalls bezieht sich auf die Nummerierung im Dialog *Thermischer Querschnitt*.

Wenn unterschiedliche Brandfälle zu untersuchen sind, muss für jeden ein eigener Lastfall erzeugt werden.

Berechnungseinstellungen

Die nachfolgenden Einstellungen können in der Registerkarte *Brandfall* in den *Vorgaben* für die nichtlineare Systemanalyse über den Menüpunkt *Berechnung - Einstellungen* vorgenommen werden.

Folgende Lastfälle berücksichtigen

In das linke Auswahlfeld sind die zu berechnenden, oben beschriebenen Lastfälle einzutragen.

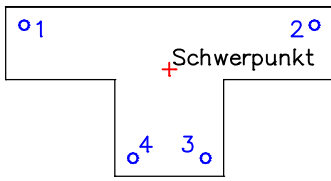
Konstante Steifigkeit

Die Iteration erfolgt mit einer konstanten Steifigkeitsmatrix. Ist der Schalter nicht gesetzt, wird mit der „Newton-Raphson-Methode“ gearbeitet.

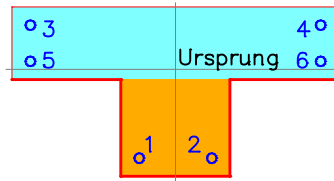
Ausgangsbewehrung

Die Bewehrungsübernahme bei der *Berechnung im Brandfall* erfolgt auf eine andere Weise als bei der Berechnung unter Standardeinwirkungen. Die aus einer Stahlbetonbemessung resultierende Ausgangsbewehrung bezieht sich auf die

Betonstahllagen des Basisquerschnittes. Die eingebetteten Stahllagen des thermischen Querschnitts werden durch Kopie oder Neudefinition von Querschnittsteilen erzeugt. Deshalb kann eine Zuordnung zu der Ausgangsbewehrung des Basisquerschnitts nur geometrisch durch Koordinatenvergleich erfolgen. Im folgenden Beispiel werden die Lagen 1 bis 4 geometrisch zugeordnet, sofern in beiden Teilen des thermischen Querschnittes die Option „As von Bemessung übernehmen“ bejaht wurde. Dabei ist darauf zu achten, dass der Schwerpunkt des Basisquerschnittes mit dem Nullpunkt des thermischen Querschnitts übereinstimmt.



Basisquerschnitt



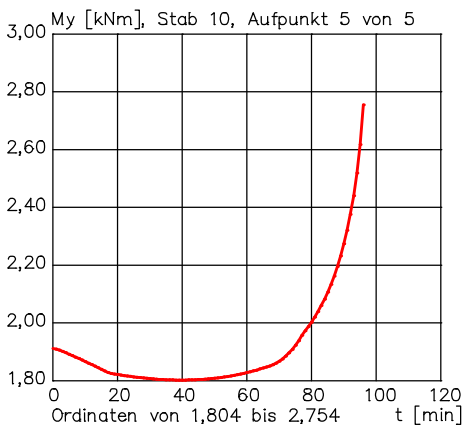
Thermischer Querschnitt

Bei Flächentragwerken wird stets mit den Betonstahllagen des Basisquerschnitts gerechnet. Diese werden entsprechend ihrer Höhenlagen dem thermischen Querschnitt zugeordnet. Daher sollte die Mittellinie des thermischen Betonquerschnitts sich auf der Nulllinie ($z=0$) befinden und die Dicke des Basisquerschnitts gleich der Dicke des thermischen Betonquerschnittes sein.

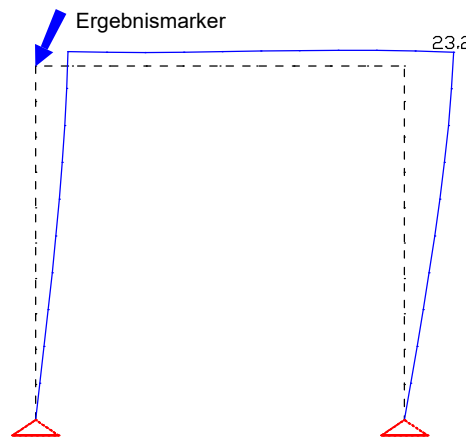
Ergebnisse

Für die in den Einstellungen ausgewählten Nachweislastfälle werden die Verformungen, Schnittgrößen und Auflagerreaktionen für die gewählten Zeitinkremente in der Datenbasis gespeichert.

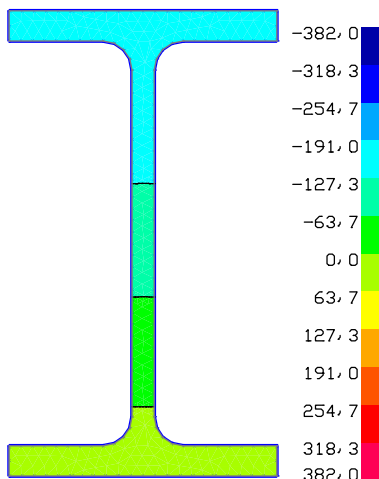
Zusätzlich werden für Stäbe mit thermischem Querschnitt an den Ergebnismarkern die Spannungsverteilungen über den Querschnitt gespeichert.



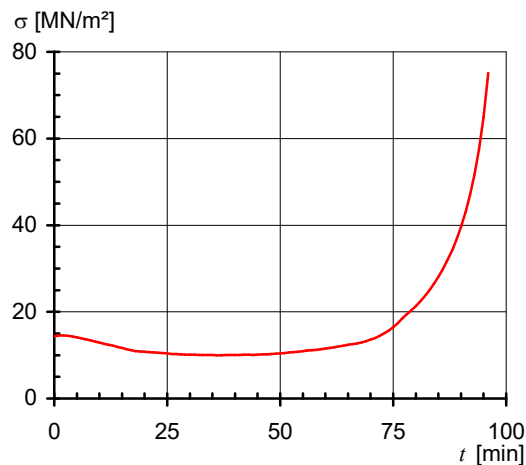
Zeitabhängiger Verlauf des Biegemoments M_y an einem Stabknoten



Darstellung der Knotenverschiebungen u [mm] bei $t = 90$ min



Verlauf der Spannungen σ_x [MN/m²] am Ergebnismarker bei $t = 90$ min



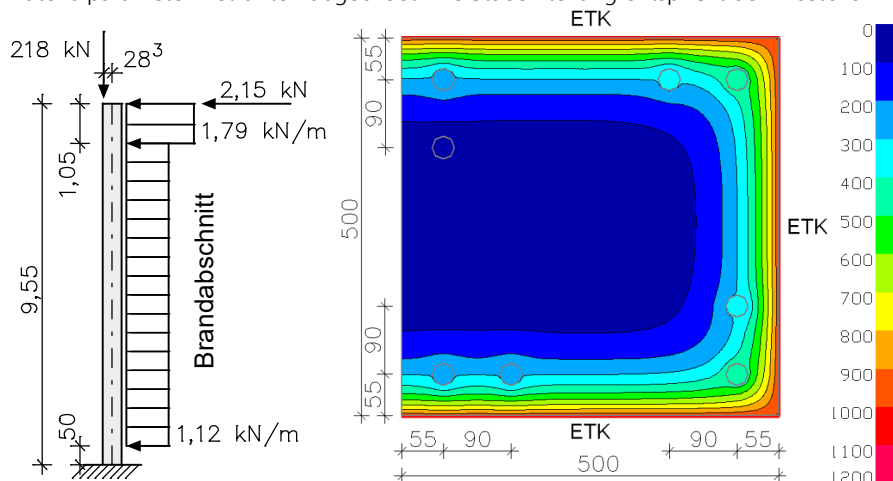
Verlauf der Spannungen σ_x am Ergebnismarker in Mitte der Profilunterkante

Beispiele

Die nachfolgenden Berechnungsbeispiele sollen Anwendungsmöglichkeiten des Programmsystems demonstrieren und gleichzeitig zur Validierung der erzielten Resultate anhand von Versuchsergebnissen dienen.

Giebelstütze einer Halle

Die nachfolgende Giebelstütze wurde von Richter untersucht. Das zugrundeliegende statische System mit den zugehörigen Materialparametern ist unten abgebildet. Die Stabenteilung entspricht dem Lastbild.



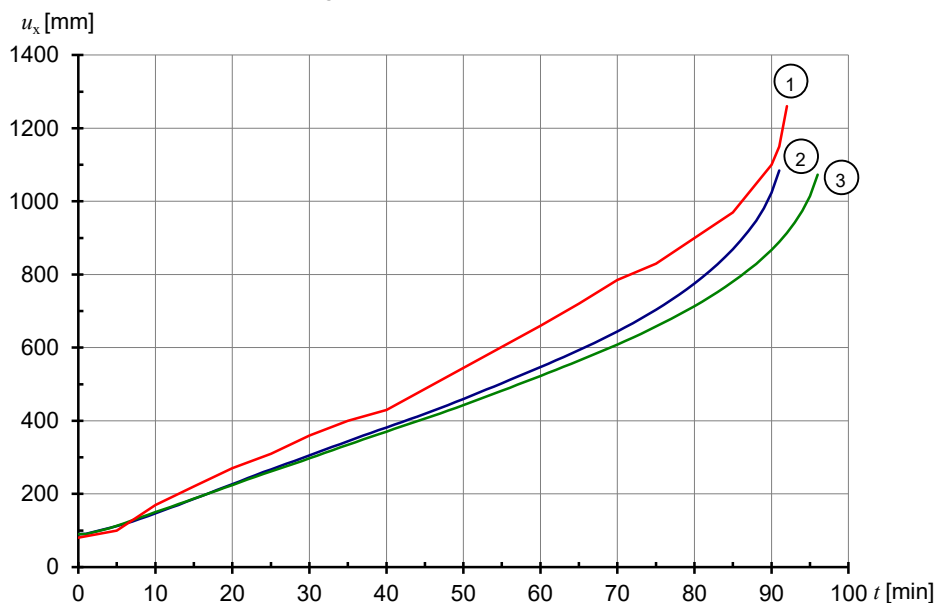
System mit Lasten und Abmessungen, Querschnitt und Temperaturprofil nach 90 min

Materialparameter:

Beton: C30/37-EN, Rohdichte bei 20°C 2300 kg/m³, Feuchtegehalt 0 %, Quarzhaltige Zuschläge, $\alpha_c = 25 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, $\epsilon_m = 0,7$

Betonstahl: BSt 500 S (A), 8 Ø 28 (warmgewalzt), Achsabstand vom Rand $u = 55 \text{ mm}$

Die Berechnung wurde unter Berücksichtigung einer dreiseitigen Beflammung nach der Einheitstemperaturkurve (ETK) durchgeführt. Dabei wurden geometrische und physikalische Nichtlinearitäten im Rahmen der Zeit-Schritt-Berechnung erfasst. Je nach Art der Modellierung der Bewehrung tritt Systemversagen nach 91 min (Kurve 2) bzw. nach 96 min (Kurve 3) ein. Bei Kurve 3 wurde die vorhandene Bewehrung als Bauteil elementiert. Diese hat somit Einfluss auf die Temperaturverteilung, was aus dem abgebildeten Temperaturprofil gut ersichtlich ist. In beiden Fällen kann die geforderte Feuerwiderstandsklasse R90 eingehalten werden.

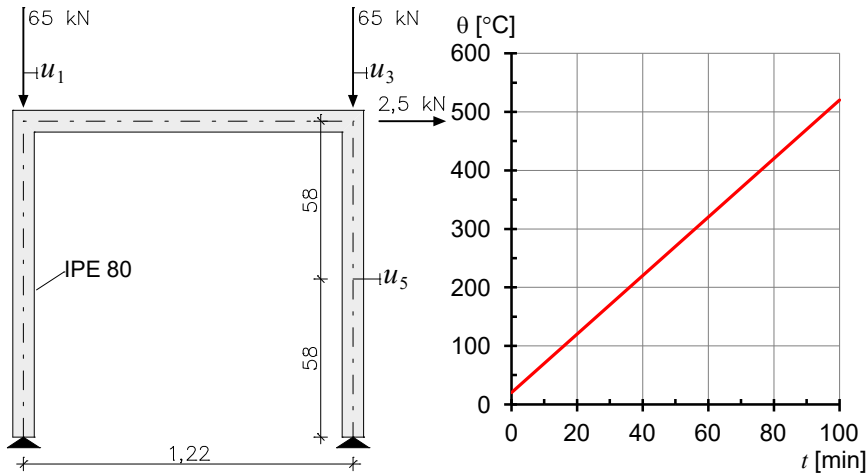


Horizontale Last-Verschiebungs-Kurven des Stützenkopfes

- 1: Richter: Brandschutzbemessung IBMB TU Braunschweig, Beispiel 6
- 2: InfoGraph: Temperaturprofil ohne Berücksichtigung der Bewehrung
- 3: InfoGraph: Temperaturprofil mit Berücksichtigung der Bewehrung

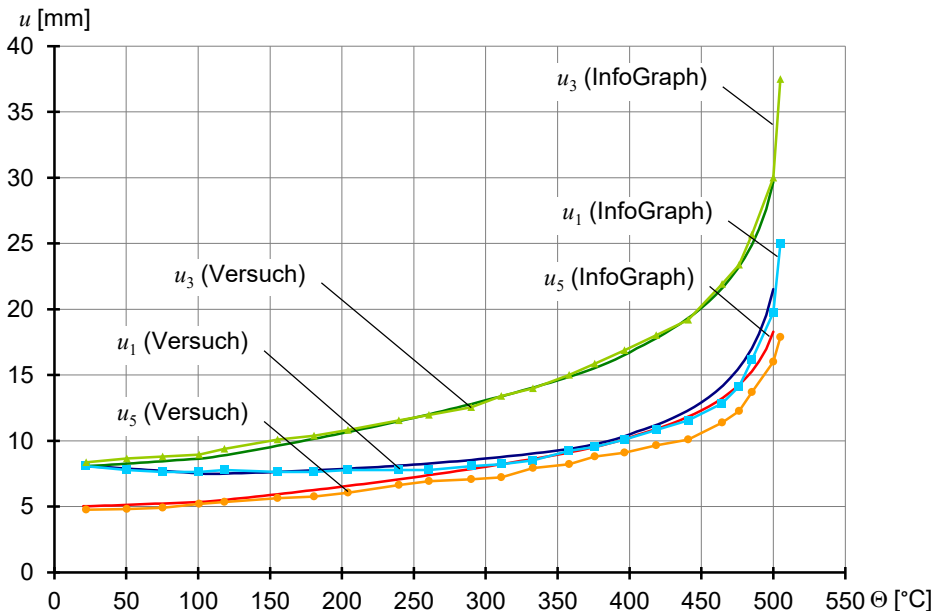
Stahlrahmen

Der unten abgebildete Großmodellrahmen (Versuch EGR 1c) ist von *Rubert* und *Schaumann* 1985 experimentell und rechnerisch untersucht worden. Im Brandversuch wurde eine gleichmäßige Temperaturerhöhung von ca. 5 K/min realisiert. Die Abweichungen von der Sollgeometrie lagen laut Versuchsbericht in vernachlässigbarer Größenordnung. Sämtliche Materialkennwerte wurden durch Versuche ermittelt. Da diese nicht vollständig dokumentiert sind, wurden der Lastausnutzungsgrad $1/\nu_u = 0,55$ sowie der Systemschlankheitsgrad $\lambda_{sys} = 0,93$ unter Normaltemperatur zur Systemgleichung herangezogen. Bei gelenkiger Lagerung der Fußpunkte und einer Zehnerteilung der Stützen und des Riegels ergab sich ein geringfügig erhöhter Lastausnutzungsgrad von $0,57$. Diese Abweichung wurde durch Anbringung einer sehr kleinen elastischen Fußpunkteinspannung (8,5 KNm/rad) eliminiert.



System mit Lasten und Abmessungen, Querschnitt und Temperaturverlauf

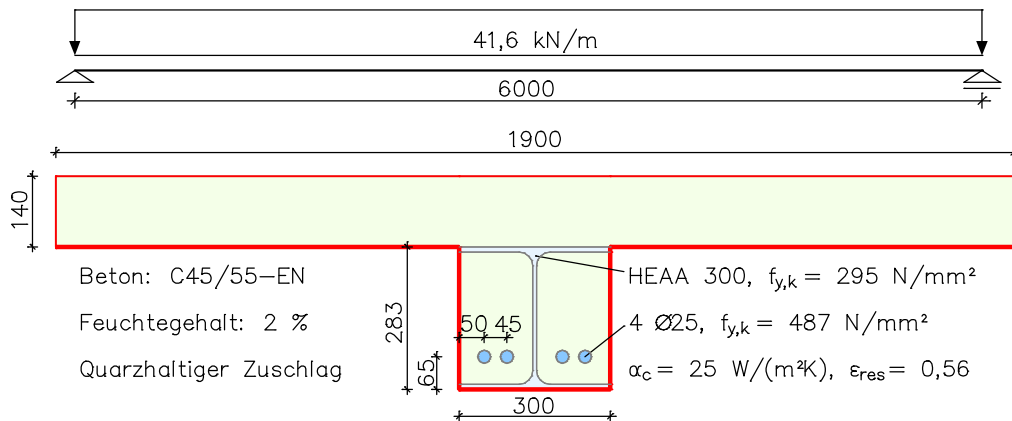
Im nachfolgenden Diagramm wurden die im Versuch ermittelten Temperatur-Verschiebungs-Kurven für die Punkte 1, 3 und 5 den Ergebnissen der Berechnung gegenübergestellt. Hierbei ist eine sehr gute Übereinstimmung über den gesamten Temperaturbereich festzustellen.



Temperatur-Verschiebungs-Kurven aus Vergleichsberechnung und Experiment

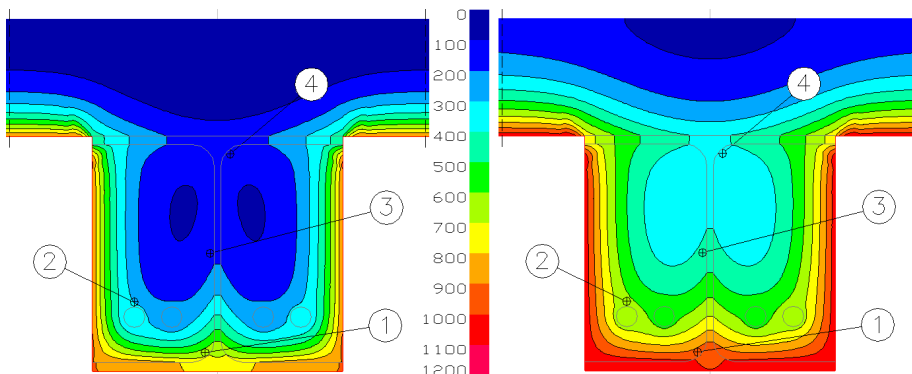
Verbundträger

Der folgende Verbundträger wurde aus Upmeyer, Dissertation Universität Hannover 2001, entnommen und basiert auf *Brandversuchen an kammerbetonierten Verbundträgern*. Das aus 10 Stäben bestehende statische System mit den zugehörigen Materialparametern ist unten abgebildet.

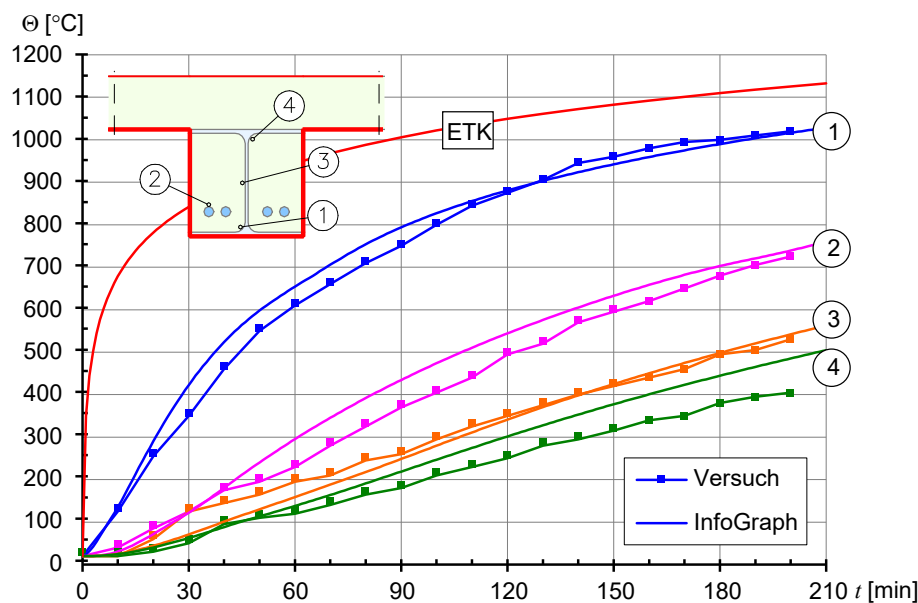


System mit Querschnitt, Lasten und Abmessungen [mm]

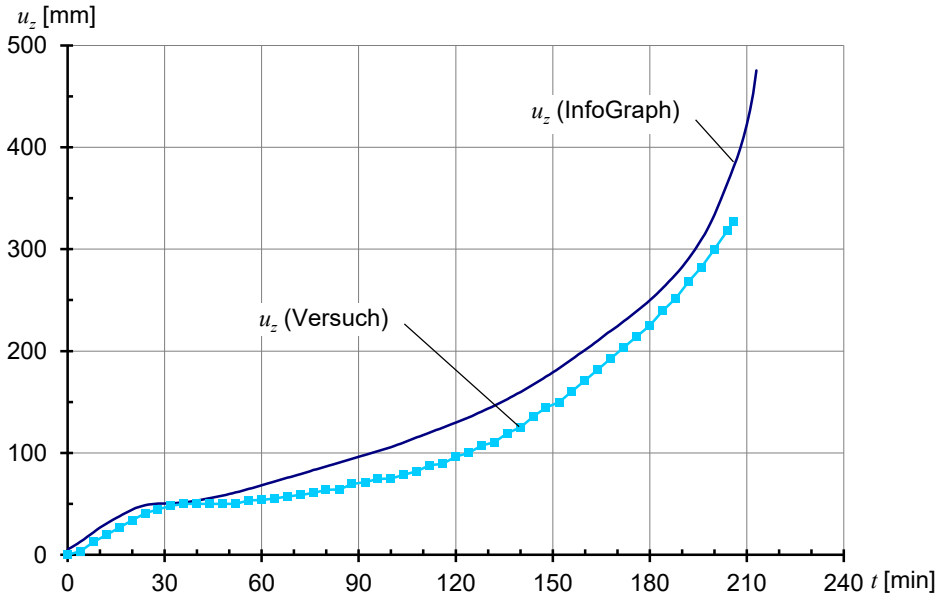
Neben der Zeit-Verschiebungs-Kurve der Trägermitte liegen hier auch die während des Versuchs ermittelten Bauteiltemperaturen an vier Messpunkten vor. Die rechnerisch ermittelte Temperaturentwicklung stimmt gut mit den im Versuch gemessenen Werten überein. Nur an Messpunkt 4 zeigt sich ein nennenswerter Unterschied. Dies könnte mit einer Abweichung des Feuchtegehalts oder durch die Temperaturableitung durch die rechnerisch nicht erfassten Kopfbolzen in den kalten Plattenbereich zusammenhängen. Zusätzlich ist die genaue Lage der Thermolemente nicht bekannt. Dies wirkt sich wegen des großen Temperaturgradienten insbesondere bei Messpunkt 1 aus.



Temperaturprofil nach 60 min bzw. 150 min [°C]



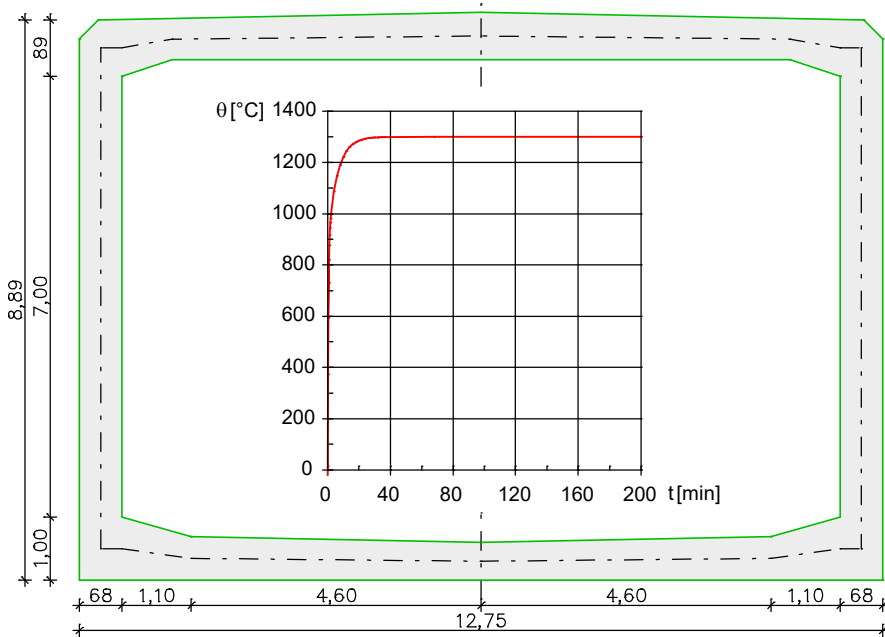
Die gute Übereinstimmung der Zeit-Verschiebungs-Kurven und des Versagenszeitpunktes in Berechnung und Versuch zeigt die nächste Abbildung.



Durchbiegung in Feldmitte über die Zeit

Tunnelrahmen

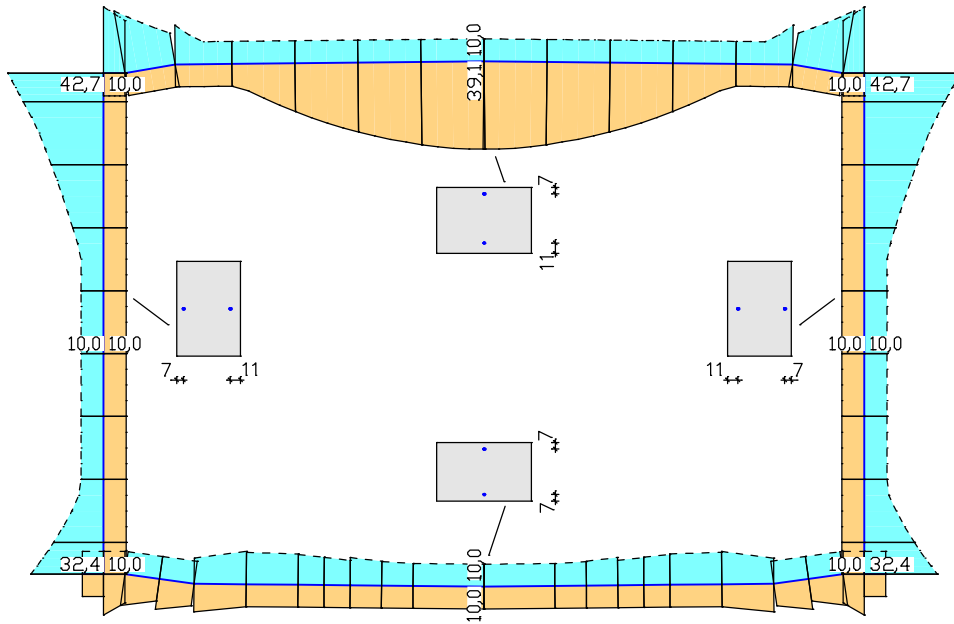
Der nachfolgende Tunnelrahmen wurde dem Forschungsbericht „Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton“ entnommen. Hier soll der Schnittgrößen- und Verformungszustand nach 180 min Brandeinwirkung untersucht werden.



System mit Abmessungen, Temperaturkurve

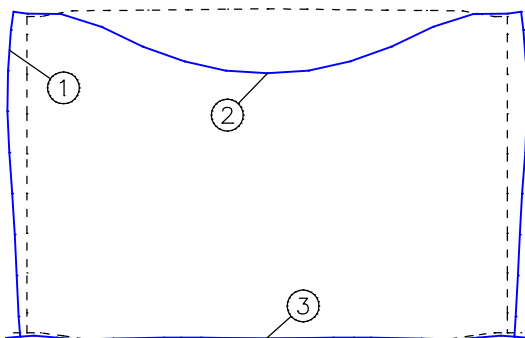
Der Tunnelrahmen ist an seiner Sohle elastisch gebettet. Die umfangreichen Querschnitts-, Material- und Beanspruchungsparameter sollen hier nicht näher erläutert werden. Die Einwirkungskombination setzt sich neben der Brandbeanspruchung aus Eigenlast, Auftrieb und Überschüttung sowie Wasser-, Erddruck und Auflast aus Verkehr zusammen. Die angenommene Temperaturkurve ist oben wiedergegeben. Der thermische Querschnitt ist geometrisch identisch mit dem Basisquerschnitt. Deshalb konnte die vorhandene Bewehrung automatisch übernommen werden. Die Bewehrungsverteilung ist nachfolgend abgebildet.

Die Handhabung eines ähnlichen Modells wird auch in dem Video "https://download.infograph.de/video_de/Stahlbetonrahmen%20im%20Brandfall.mp4" gezeigt.

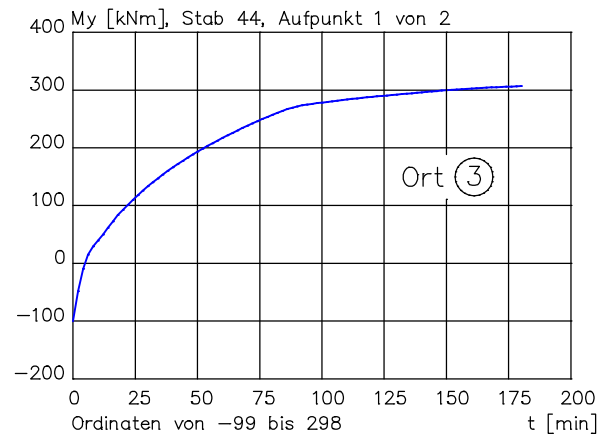
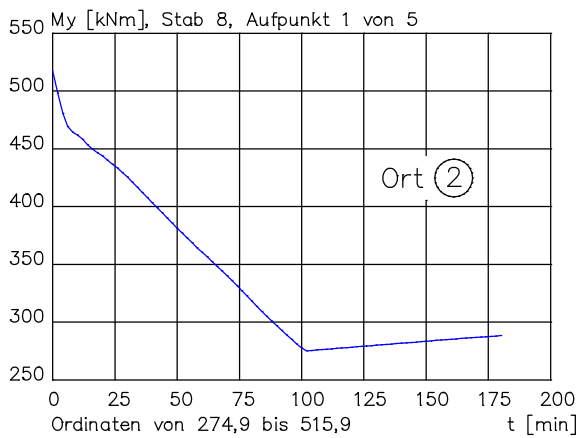
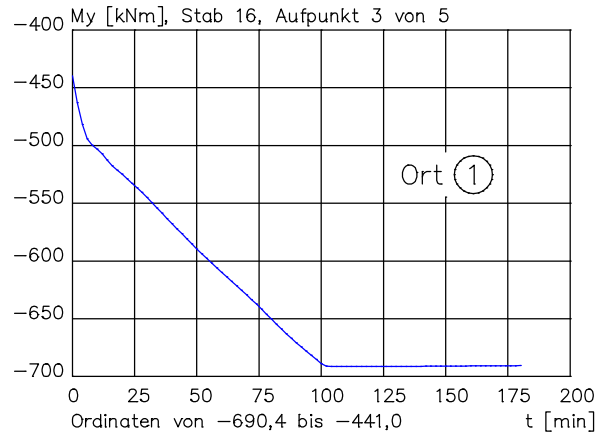


Vorhandene Bewehrungsanordnung [cm²/m]

Im Bereich der Rahmenecken ergeben sich negative Momente aus der Beanspruchungskombination. D.h. die Zugbewehrung hat hier Normaltemperatur. Im Feldbereich des Rahmenriegels (Ort 2) ist die untere Bewehrung für die Tragfähigkeit maßgebend. Wegen der großen Überdeckung von 11 cm ergibt sich hierfür nach 180 min eine Temperatur von ca. 250 °C. Diese bewirkt noch keinen nennenswerten Festigkeitsabfall.



Überhöhte Verformungsfigur nach 180 min und Momentenverlauf über die Zeit

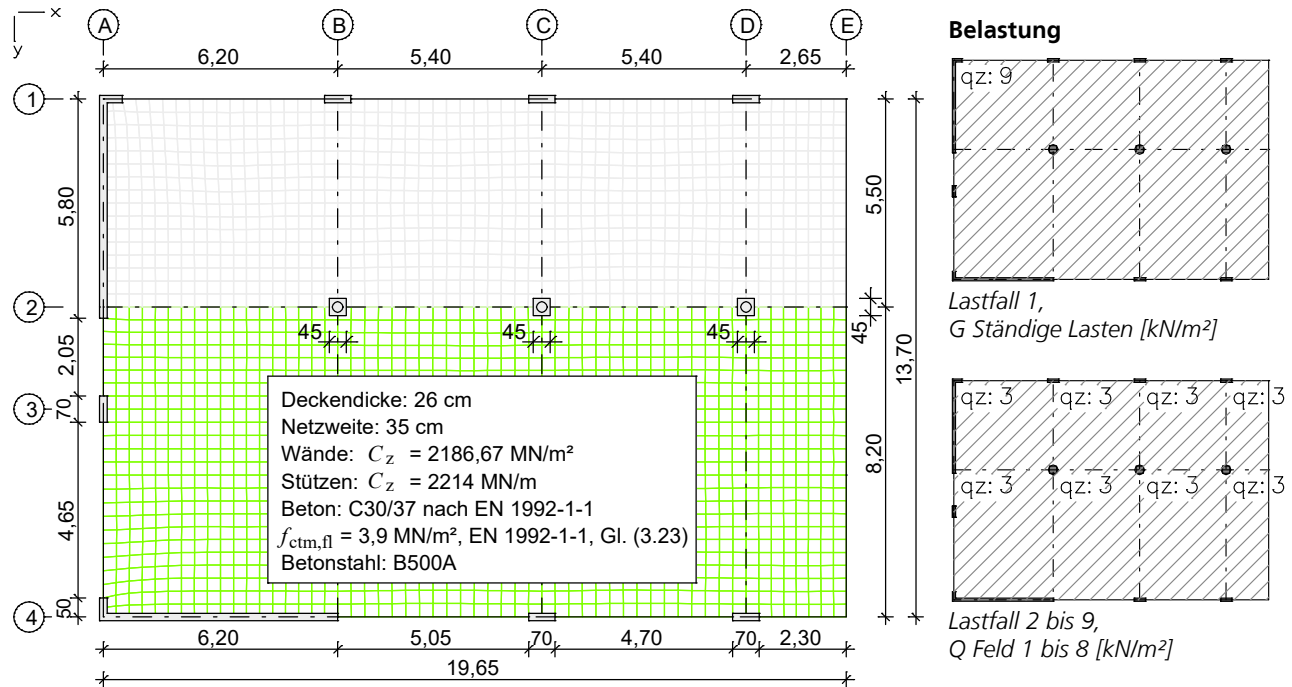


Momentenverläufe über die Zeit

Die dargestellten Momentenverläufe zeigen, dass sich am Ort 1 des Tunnelrahmens nach ca. 100 min ein plastisches Gelenk ausbildet. Die Tragsicherheit nach 180 min ist jedoch für das Gesamtsystem gesichert. Eine andere Beanspruchungssituation würde sich jedoch durch Betonabplatzungen im Feldbereich des Rahmenriegels (Ort 2) ergeben. Die hohen Temperaturen würden dann weiter in den Querschnitt eindringen und ein Ausfall der Feldbewehrung würde zum Versagen des Gesamtsystems führen.

Flachdecke mit Kragarm unter Brandeinwirkung

Dieses Beispiel behandelt eine Flachdecke, welche bereits in den Handbuchteilen *EN 1992-1-1 Bemessung und Nichtlineare Systemanalyse* untersucht wurde. Hier soll nachgewiesen werden, dass die Decke einer 90 minütigen Brandeinwirkung standhält.



System mit Abmessungen in [m] und Belastung aus „Beispiele zur Bemessung nach Eurocode 2 – Band 2: Ingenieurbau“

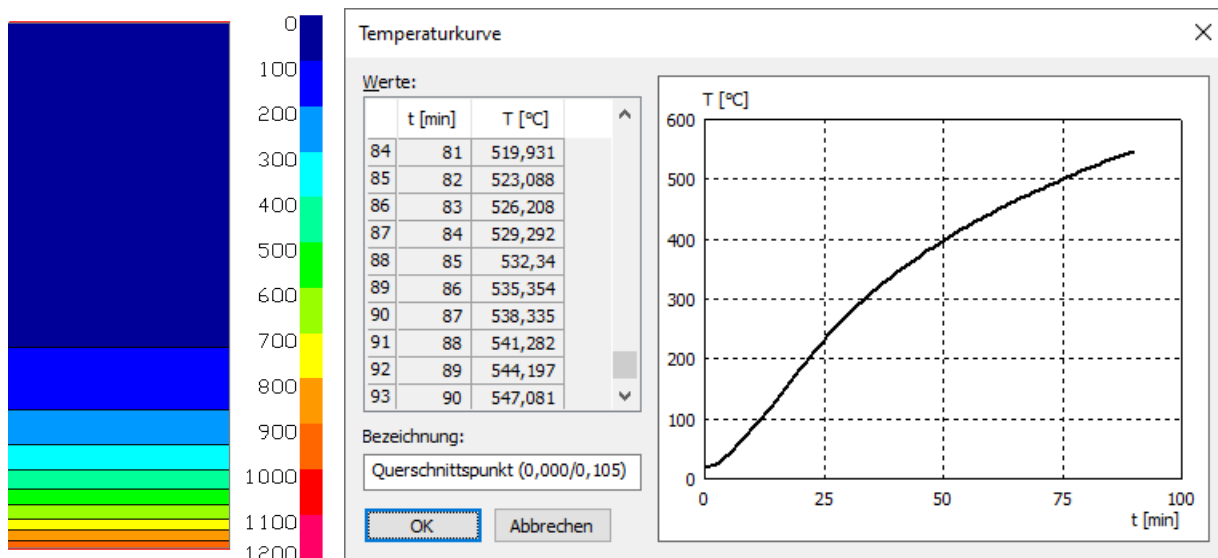
Im **ersten Berechnungsschritt** wird eine thermische Berechnung der Deckenplatte für einen Brandfall (Einheits-Temperaturzeitkurve) an der Plattenunterseite durchgeführt.

Thermischer Querschnitt 1 - Deckenplatte

Anfangstemperatur = 20 °C; Zeitinkrement = 1 min; Zeitdauer = 90 min

1. Teil - (Querschnitt 1)		
	Material	C30/37-EN
	E-Modul [MN/m^2]	33000
	G-Modul [MN/m^2]	13800
	Gamma [kN/m^3]	25
	Zuschlag	Kalksteinhaltig
	Rohdichte bei 20 °C [kg/m^3]	2300
	Feuchtegehalt [%]	3
	As von Bemessung übernehmen	Ja
1. Brandfall - (Querschnitt 1)		
	ETK (Einheits-Temperaturzeitkurve)	
	Emissivität	0,7
	Wärmeübergangskoeffizient	25 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

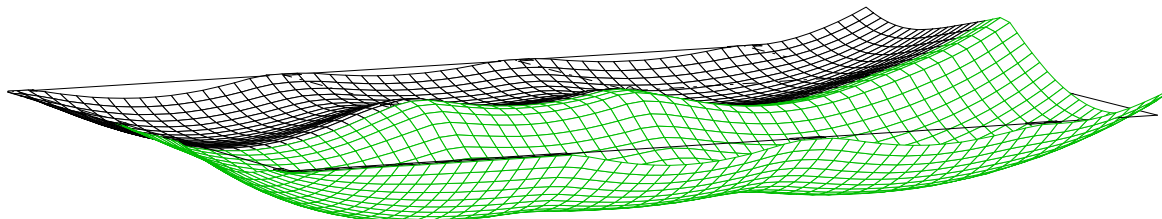
Die nachfolgende Abbildung dokumentiert die Ergebnisse.



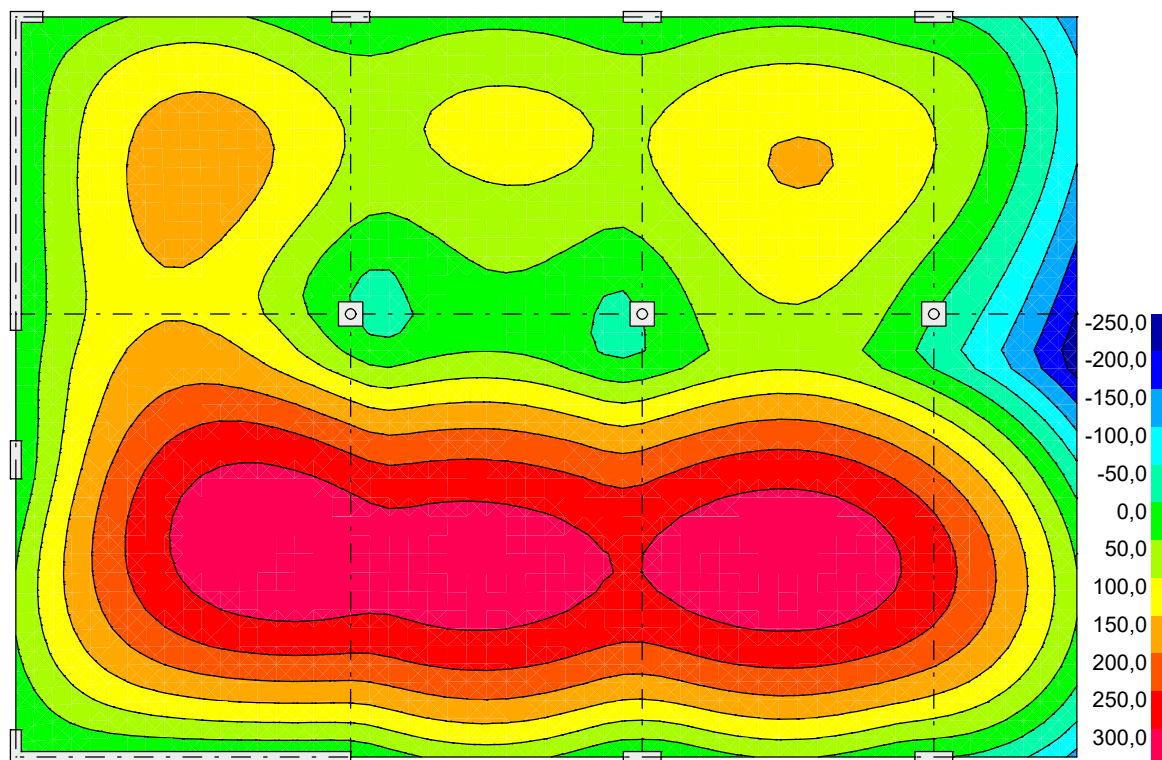
Temperaturverlauf nach 90 min über dem Querschnitt bzw. über die Zeit am Ort der unteren Bewehrungslage

Im **zweiten Berechnungsschritt** wird eine nichtlineare Systemanalyse für den Brandfall durchgeführt. Dabei wird, wie im oben genannten Beispiel, die aus einer zuvor durchgeführten Bemessung berechnete Längsbewehrung zugrundegelegt.

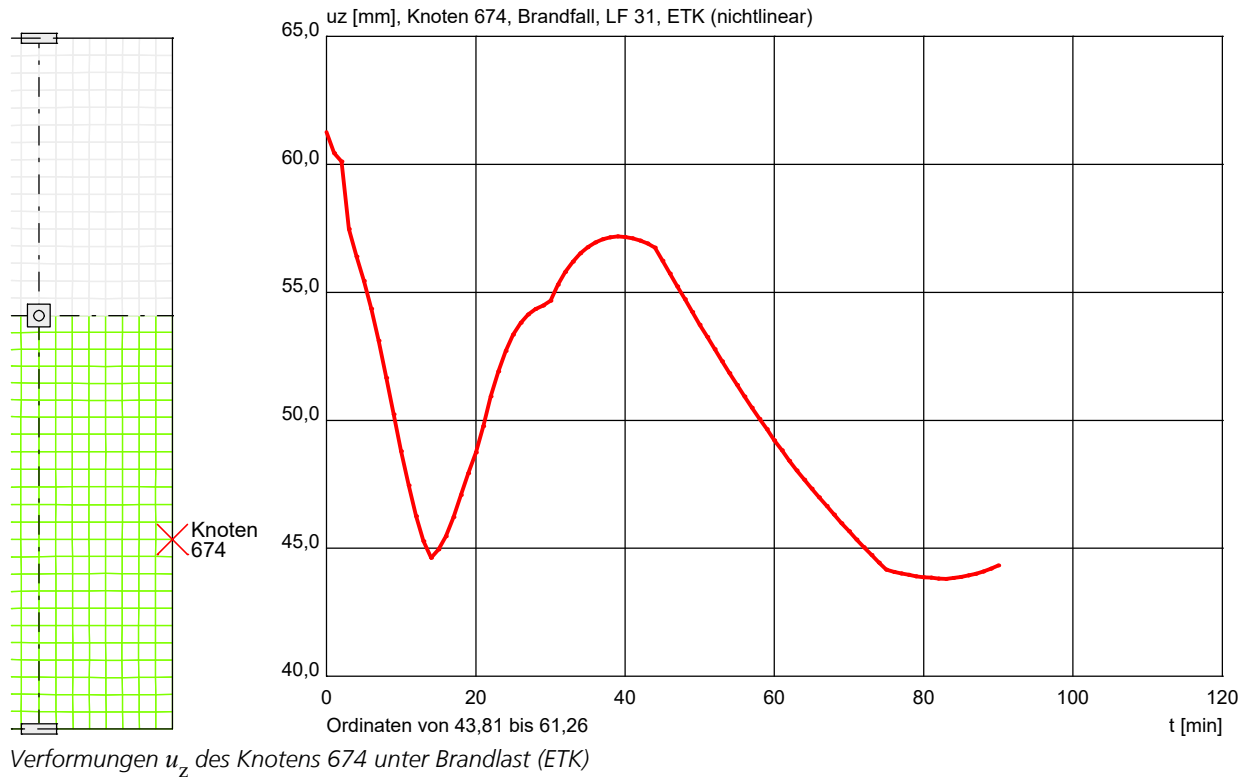
Unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens im Brandfall kann für die außergewöhnliche Situation unter einfacher G-Last und 50% der Verkehrslast die Tragfähigkeit für 90 min nachgewiesen werden, da in jedem Zeitschritt Gleichgewicht erzielt wurde.



Verformungsfigur nach 90 min in 5-facher Überhöhung



Farbverlauf der Verformungen u_z [mm] nach 90 min unter Brandlast (ETK)



Validierung gemäß DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09

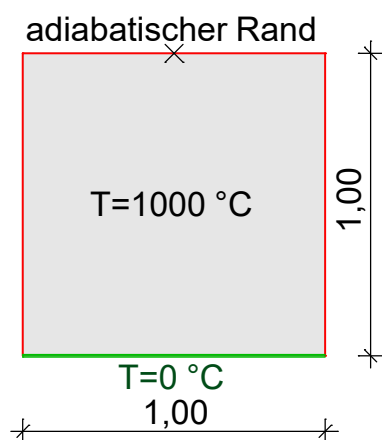
Auszug aus Anhang CC (NCI):

CC.3 Anwendung und Dokumentation

Vom Ersteller eines Rechenprogramms zur Durchführung von Nachweisen nach den allgemeinen Rechenverfahren sollen vor der Anwendung des Programms für bauordnungsrechtlich relevante Brandschutznachweise die Validierungsbeispiele eigenständig berechnet werden. Dabei sollen die Eingangsdaten und Rechenannahmen entsprechend der Programmbeschreibung unverändert verwendet werden.

Über die durchgeführten Berechnungen und die erzielten Ergebnisse soll eine Dokumentation unter Verwendung der in der Beispielsammlung enthaltenen tabellarischen Übersichten angefertigt werden. Die Abweichungen von den Ergebnissen der Muster-Berechnungen sollen innerhalb der angegebenen Toleranzen liegen.

Validierungsbeispiele 1 (CC.4.1) Wärmeübertragung (Abkühlung)

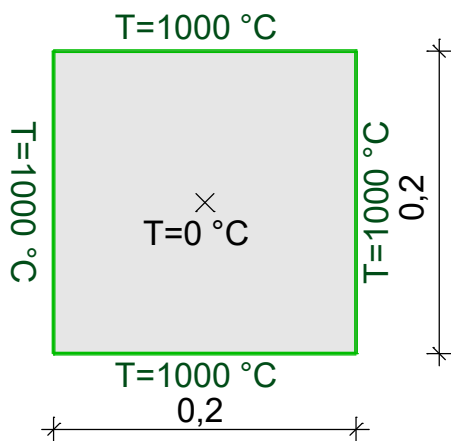


Materialeigenschaften		fiktiver Wert
Wärmeleitfähigkeit λ	W/(mK)	1
Spezifische Wärme c_p	J/(kgK)	1
Rohdichte ρ	kg/m ³	1000
Randbedingungen		
Abmessungen h, b	m	1
Wärmeübergangskoeffizient α_c	W/(m ² K)	1
Emissivität $\varepsilon_{res} = \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f$	-	0
Anfangsbedingungen		
Umgebungstemperatur Θ_u	°C	0
Temperatur im Querschnitt	°C	1000
Referenzgröße		
Temperatur Θ_0 im Punkt X	°C	

Tabelle CC.2 Referenz- und berechnete Größen für die Wärmeübertragung (Abkühlung)

Zeit s	Referenzgröße Θ_0 Temperatur °C	berechnete Größe Θ'_0 Temperatur °C	Abweichung ($\Theta'_0 - \Theta_0$) / $\Theta_0 \cdot 100$ % ($\Theta'_0 - \Theta_0$) K		Grenz- abweichung % oder K	Bemerkung
0	1000	1000	0,0	0,0	± 1 % und ± 5,0 K	
60	999,3	999,1	0,0	-0,3		
300	891,8	891,8	-0,1	-0,9		
600	717,7	717,9	-0,1	-0,6		
900	574,9	575,1	-0,1	-0,4		
1 200	460,4	460,6	-0,1	-0,3		
1 500	368,7	368,9	0,0	-0,1		
1 800	295,3	295,5	0,0	-0,1		

Validierungsbeispiele 2 (CC.4.2) Wärmeübertragung (Erwärmung)

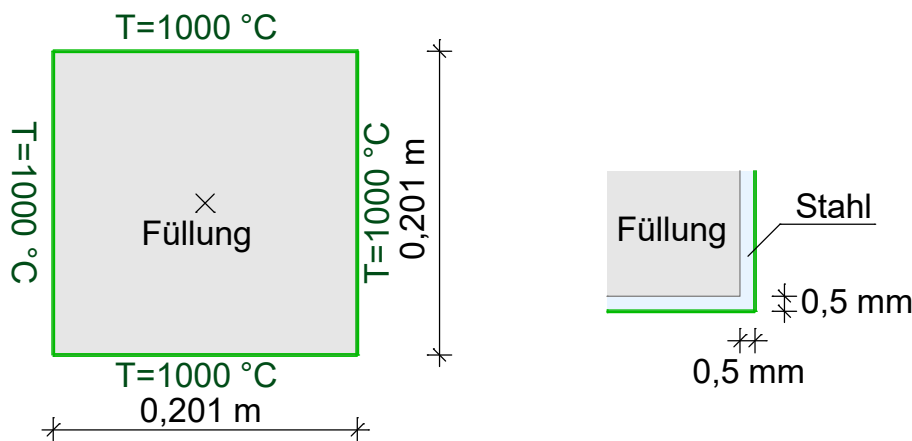


Material		fiktiver Wert	
Wärmeleitfähigkeit λ (linearer Verlauf)	W/(mK)	Θ	$\lambda (\Theta)$
		0	1,5
		200	0,7
		1000	0,5
Spezifische Wärme c_p	J/(kgK)	1000	
Rohdichte ρ	kg/m ³	2400	
Randbedingungen			
Abmessungen h, b	m	0,2	
Wärmeübergangskoeffizient α_C	W/(m ² K)	10	
Emissivität $\epsilon_{res} = \epsilon_m \cdot \epsilon_f$	-	0,8	
Anfangsbedingungen			
Umgebungstemperatur Θ_U	°C	1000	
Temperatur im Querschnitt	°C	0	
Referenzgröße			
Temperatur Θ_0 im Punkt X	°C		

Tabelle CC.4 Referenz- und berechnete Größen für die Wärmeübertragung (Erwärmungsprozess)

Zeit min	Referenzgröße Θ_0 Temperatur °C	berechnete Größe Θ'_0 Temperatur °C	Abweichung		Grenz- abweichung % oder K	Bemerkung
			$(\Theta'_0 - \Theta_0) / \Theta_0 \cdot 100$ %	$(\Theta'_0 - \Theta_0)$ K		
30	36,9	36,3	-1,6	-0,6	für $t \leq 60$ min ± 5 K für $t > 60$ min ± 3 %	
60	137,4	134,9	-1,8	-2,5		
90	244,6	243,3	-0,5	-1,3		
120	361,1	362,9	0,5	1,8		
150	466,2	469,2	0,6	3,0		
180	554,8	558,9	0,7	4,1		

Validierungsbeispiele 3 (CC.4.3) Wärmedurchgang bei mehreren Schichten (Stahlhohlquerschnitt mit Füllung)

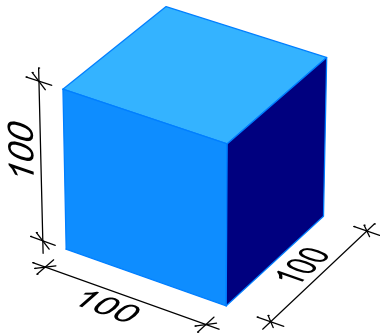


Materialeigenschaften		Stahl	Füllung
Wärmeleitfähigkeit λ	W/(mK)	DIN EN 1993-1-2	0,05
Spezifische Wärme c_p	J/(kgK)	DIN EN 1993-1-2	1000
Rohdichte ρ	kg/m ³	DIN EN 1993-1-2	50
Randbedingungen			
Abmessungen h, b, t	m	h = b = 0,201; t = 0,0005	
Wärmeübergangskoeffizient α_c	W/(m ² K)	10	
Emissivität $\epsilon_{res} = \epsilon_m \cdot \epsilon_f$	-	0,8	
Anfangsbedingungen			
Umgebungstemperatur Θ_U	°C	1000	
Temperatur im Querschnitt	°C	0	
Referenzgröße			
Temperatur Θ_0 im Punkt X	°C		

Tabelle CC.6 Referenz- und berechnete Größen für den Wärmedurchgang bei mehreren Schichten

Zeit min	Referenzgröße Θ_0 Temperatur °C	berechnete Größe Θ'_0 Temperatur °C	Abweichung $(\Theta'_0 - \Theta_0) / \Theta_0 \cdot 100$ %		Grenz- abweichung % oder K	Bemerkung
			$(\Theta'_0 - \Theta_0)$ K			
30	340,5	338,9	-0,5	-1,7	± 1 % und ± 5 K	
60	717,1	719,5	0,3	2,4		
90	881,6	883,5	0,2	1,9		
120	950,6	951,7	0,1	1,1		
150	979,3	979,9	0,1	0,6		
180	991,7	991,7	0,0	0,0		

Validierungsbeispiele 4 (CC.4.4) Thermische Verlängerung von Baustahl

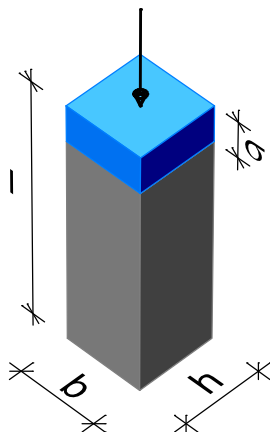


Randbedingungen		Baustahl
Abmessungen l, h, b	mm	100
Spannungs-Dehnungs-Linien		DIN EN 1993-1-2
Festigkeit $f_{yk(20^\circ)}$	N/mm ²	355
Anfangsbedingungen		°C
Homogene Bauteiltemperatur Θ	°C	20
Thermische Dehnung	-	100 300 500 600 700 900
Referenzgröße		
Thermische Verlängerung Δl	mm	

Tabelle CC.8 Referenz- und berechnete Größen für die thermische Verlängerung von Baustahl

Θ [°C]	Referenzgröße Δl mm	berechnete Größe $\Delta l'$ mm	Abweichung $(\Delta l' - \Delta l) / \Delta l \cdot 100$ %		Grenz- abweichung % oder mm	Bemer- kung
			$(\Delta l' - \Delta l)$ mm			
100	0,09984	0,09984	0,0	0,00	für $\Theta \leq 300$ °C ± 0,05 mm für $\Theta > 300$ °C ± 1 %	
300	0,37184	0,37184	0,0	0,00		
500	0,67584	0,67584	0,0	0,00		
600	0,83984	0,83984	0,0	0,00		
700	1,01184	1,0118	0,0	0,00		
900	1,18000	1,1800	0,0	0,00		

Validierungsbeispiele 5 (CC.4.5) Berechnung der Spannungs-Dehnungslinien



Randbedingungen		Baustahl	Beton
Abmessungen l / h / b	mm	100 / 10 / 10	100 / 31,6 / 31,6
Spannungs-Dehnungs-Linien		DIN EN 1993-1-2	DIN EN 1992-1-2
Festigkeit $f_{yk(20^\circ)}, f_{ck(20^\circ)}$	N/mm ²	355	20
Thermische Dehnung		DIN EN 1993-1-2	DIN EN 1992-1-2
Anfangsbedingungen		°C	
Homogene Bauteiltemperatur Θ	°C	20 200 400 600 800	
Belastung $\sigma_{s(\Theta)} / f_{yk(\Theta)}$ bzw. $\sigma_{c(\Theta)} / f_{ck(\Theta)}$	-	0,2 0,6 0,9	
Referenzgröße			
Längenänderung Δl	mm		

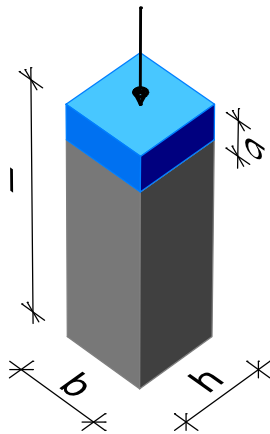
Tabelle CC.10 Referenz- und berechnete Größe für Spannungs-Dehnungs-Linien von Baustahl

Temperatur Θ °C	Belastung $\sigma_{s(\Theta)} / f_{yk(\Theta)}$	Referenzgröße Δl mm	berechnete Größe $\Delta l'$ mm	Abweichung $(\Delta l' - \Delta l) / \Delta l \cdot 100$ %	Grenzabweichung %	Bemerkung
20	0,2	-0,034	-0,034	0,0	± 3,0	
	0,6	-0,101	-0,101	0,0		
	0,9	-0,152	-0,152	0,0		
200	0,2	0,194	0,194	0,0		
	0,6	0,119	0,119	0,0		
	0,9	-0,159	-0,159	0,0		
400	0,2	0,472	0,472	0,0		
	0,6	0,293	0,293	0,0		
	0,9	-0,451	-0,451	0,0		
600	0,2	0,789	0,789	0,0		
	0,6	0,581	0,581	0,0		
	0,9	-0,162	-0,162	0,0		
800	0,2	1,059	1,059	0,0		
	0,6	0,914	0,914	0,0		
	0,9	0,170	0,170	0,0		

Tabelle CC.11 Referenz- und berechnete Größen für Spannungs-Dehnungs-Linien von Beton mit überwiegend quarzhaltiger Gesteinskörnung

Temperatur Θ °C	Belastung $\sigma_{s(\Theta)} / f_{yk(\Theta)}$	Referenzgröße Δl mm	berechnete Größe $\Delta l'$ mm	Abweichung $(\Delta l' - \Delta l) / \Delta l \cdot 100$ %	Grenzabweichung %	Bemerkung
20	0,2	-0,0334	-0,0334	0,0	± 3 %	
	0,6	-0,104	-0,104	0,0		
	0,9	-0,176	-0,176	0,0		
200	0,2	0,107	0,107	0,0		
	0,6	-0,0474	-0,0474	0,0		
	0,9	-0,2075	-0,2075	0,0		
400	0,2	0,356	0,356	0,0		
	0,6	0,075	0,075	0,0		
	0,9	-0,216	-0,216	0,0		
600	0,2	0,685	0,685	0,0		
	0,6	-0,0167	-0,0167	0,0		
	0,9	-0,744	-0,744	0,0		
800	0,2	1,066	1,066	0,0		
	0,6	0,365	0,365	0,0		
	0,9	-0,363	-0,363	0,0		

Validierungsbeispiele 6 (CC.4.6) Berechnung der Grenztragfähigkeit



Randbedingungen		Baustahl	Beton
Abmessungen l / h / b	mm	100 / 10 / 10	100 / 31,6 / 31,6
Spannungs-Dehnungs-Linien		DIN EN 1993-1-2	DIN EN 1992-1-2
Festigkeit $f_{yk(20^\circ)}, f_{ck(20^\circ)}$	N/mm ²	355	20
Thermische Dehnung		DIN EN 1993-1-2	DIN EN 1992-1-2
Anfangsbedingungen °C		20	
Homogene Bauteiltemperatur Θ	°C	20 200 400 600 800	
Referenzgröße			
Normalkraft $N_{R,fi,k}$	kN		

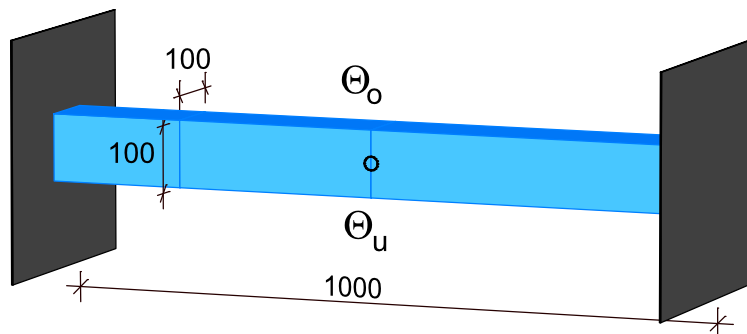
Tabelle CC.12 Referenz- und berechnete Größen für die Grenztragfähigkeit von Baustahl

Temperatur Θ °C	Referenzgröße $N_{R,fi,k}$ kN	berechnete Größe $N_{R,fi,k}'$ kN	Abweichung $(N_{R,fi,k}' - N_{R,fi,k})/N_{R,fi,k} \cdot 100$ %		Grenzabweichung % oder kN	Bemerkung
			$(N_{R,fi,k}' - N_{R,fi,k})$ kN			
20	-35,5	-35,5	0,0	0,0	± 3,0 % und ± 0,5 kN	
200	-35,5	-35,5	0,0	0,0		
400	-35,5	-35,5	0,0	0,0		
600	-16,7	-16,7	0,0	0,0		
800	-3,9	-3,9	0,0	0,0		

Tabelle CC.13 Referenz- und berechnete Größen für die Grenztragfähigkeit von Beton mit überwiegend quarzithaltiger Gesteinskörnung

Temperatur Θ °C	Referenzgröße $N_{R,fi,k}$ kN	berechnete Größe $N_{R,fi,k}'$ kN	Abweichung $(N_{R,fi,k}' - N_{R,fi,k})/N_{R,fi,k} \cdot 100$ %		Grenzabweichung % oder kN	Bemerkung
			$(N_{R,fi,k}' - N_{R,fi,k})$ kN			
20	-20,0	-20,0	0,0	0,0	± 3,0 % und ± 0,5 kN	
200	-19,0	-19,0	0,0	0,0		
400	-15,0	-15,0	0,0	0,0		
600	-9,0	-9,0	0,0	0,0		
800	-3,0	-3,0	0,0	0,0		

Validierungsbeispiele 7 (CC.4.7) Ausbildung von Zwangsschnittgrößen



Randbedingungen		Baustahl	
Abmessungen l / h / b	mm	1000 / 100 / 100	
Spannungs-Dehnungs-Linien		DIN EN 1993-1-2	
Festigkeit $f_{yk(20^{\circ}\text{C})}$	N/mm ²	650 ^{a)}	
Elastizitätsmodul $E_{a(20^{\circ}\text{C})}$	N/mm ²	210 000	
Thermische Dehnung		DIN EN 1993-1-2	
Anfangsbedingungen			
Bauteiltemperatur	Θ_o °C	120	20
	Θ_u °C	120	220
Referenzgröße			
Zwangsschnittgrößen N_{Zw}, M_{Zw}	kN, kNm		
Zwangsspannung σ_{Zw} am unteren Rand	N/mm ²		
^{a)} Baustahl nach DIN EN 1993-1-1 mit der fiktiven Streckgrenze $f_{yk(20^{\circ}\text{C})} = 650$ N/mm ² (kein hochfester Stahl) und den thermo-mechanischen Eigenschaften nach DIN EN 1993-1-2			

Tabelle CC.15 Referenz- und berechnete Größen für die Ausbildung von Zwanggrößen

Temperaturlastfall	Referenzgröße X	berechnete Größe X'	Abweichung $(X' - X)/X \cdot 100$ %	Grenzabweichung %	
120/120	N_{Zw} kN	-2585	-2585	0,0	$N_{Zw}: \pm 1$ $M_{Zw}: \pm 1$ $\sigma_{Zw}: \pm 5$
	M_{Zw} kNm	0	0	0,0	
	σ_{Zw} N/mm ²	-258,5	-258,5	0,0	
20/220	N_{Zw} kN	-2511	-2510	0,0	
	M_{Zw} kNm	-40,3	-40,3	0,0	
	σ_{Zw} N/mm ²	-479	-478,8	0,0	

Validierungsbeispiele 8 (CC.4.8) Schwach bewehrter Stahlbeton-Biegebalken

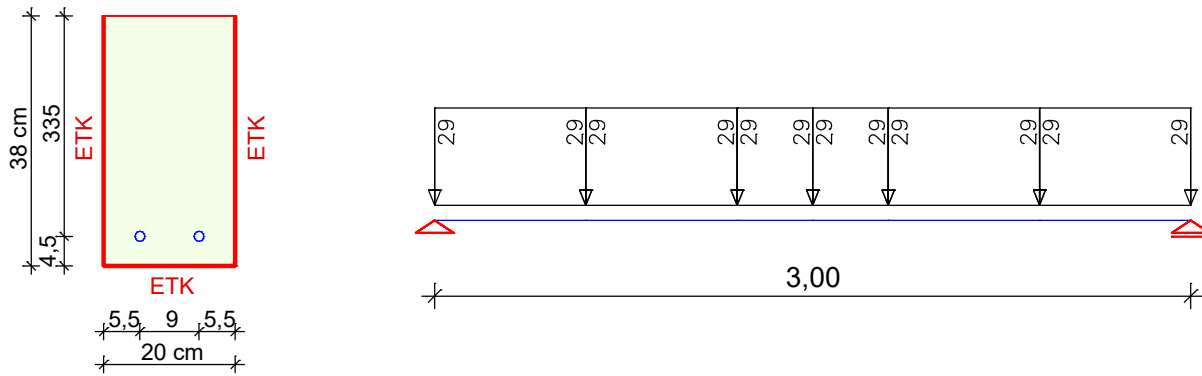


Tabelle CC.16 Querschnittswerte, Materialeigenschaften und Randbedingungen

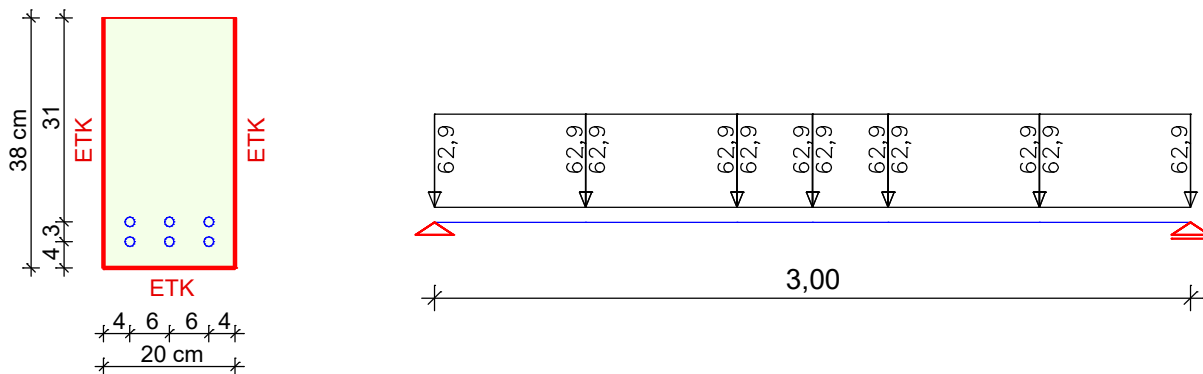
Stahlbeton-Biegebalken (schwach bewehrt)		R 90	
Abmessungen	l / h / b in cm	300 / 20 / 38	
Achsabstände	a / a _s in cm	4,5 / 5,5	
Belastung	q _{E,fi,d,t} in kN/m	29	
Beton C20/25 (3% Feuchte (Massenanteile))	f _{ck(20°)} in N/mm ²	20	
Betonstahl B500	f _{yk(20°)} in N/mm ²	500	
Spannungs-Dehnungs-Linien	Beton ^{a)}	DIN EN 1992-1-2	
	Betonstahl ^{b)}		
Temperaturbeanspruchung	ETK (dreiseitig)	DIN EN 1991-1-2	
Wärmeübergangskoeffizient	α _c in W/(m ² K)	25	
Emissivität	ε _m	0,70	
Thermische und physikalische Materialwerte	Beton	λ, ρ, c _p , ε _{th,c}	DIN EN 1992-1-2
	Betonstahl	λ _a , ρ, c _a , ε _{th,s}	DIN EN 1992-1-2
^{a)} mit überwiegend quarzhaltiger Gesteinskörnung und der Rohdichte ρ = 2 400 kg/m ³ ^{b)} Klasse N, warmgewalzt			

Die berechnete Feuerwiderstandsdauer beträgt 91 min, was einer Abweichung von 1 % entspricht. Die berechnete Temperatur in der Bewehrung beträgt nach 90 min 555 °C (1% Abweichung).

Tabelle CC.17 Referenz- und berechnete Größe für den schwach bewehrten Stahlbetonbalken

Feuerwiderstandsklasse	Referenzgröße	berechnete Größe	Abweichung (A' _s - A _s)/A _s · 100 %	Grenzabweichung %	Bemerkung
90 / 91	A _s cm ²	A' _s cm ²	0	± 10	θ _s = 555 °C
ANMERKUNG Die Temperatur in der Bewehrung nach t = 90 min Branddauer beträgt θ _s = 562 °C.					

Validierungsbeispiele 9 (CC.4.9) Stark bewehrter Stahlbeton-Biegebalken

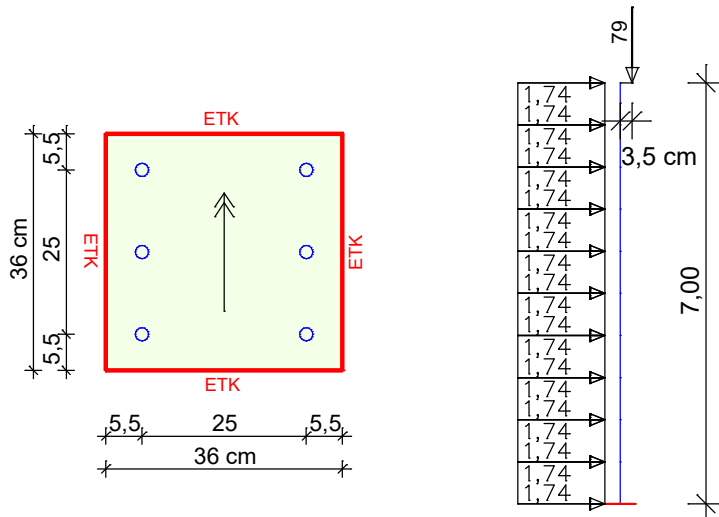


Stahlbeton-Biegebalken (stark bewehrt)		R 90	
Abmessungen	l / h / b in cm	300 / 20 / 38	
Achsabstände	a _{1,2,3} in cm	7	
	a _{4,5,6} in cm	4	
Belastung	q _{E,fi,d,t} in kN/m	62,9	
Beton C20/25 (3% Feuchte (Massenanteile))	f _{ck(20°)} in N/mm ²	20	
Betonstahl B500	f _{yk(20°)} in N/mm ²	500	
Spannungs-Dehnungs-Linien	Beton ^{a)}	DIN EN 1992-1-2	
	Betonstahl ^{b)}		
Temperaturbeanspruchung	ETK (dreiseitig)	DIN EN 1991-1-2	
Wärmeübergangskoeffizient	α _c in W/(m ² K)	25	
Emissivität	ε _m	0,70	
Thermische und physikalische Materialwerte	Beton	λ, ρ, c _p , ε _{th,c}	DIN EN 1992-1-2
	Betonstahl	λ _a , ρ, c _a , ε _{th,s}	DIN EN 1992-1-2
^{a)} mit überwiegend quarzithaltiger Gesteinskörnung und der Rohdichte ρ= 2 400 kg/m ³ ^{b)} Klasse N, warmgewalzt			

Die berechnete Feuerwiderstandsdauer beträgt 96 min, was einer Abweichung von -7 % entspricht.

Tabelle CC.19 Referenz- und berechnete Größe für den stark bewehrten Stahlbetonbalken

Feuerwiderstandsklasse	Referenzgröße	berechnete Größe	Abweichung	Grenzabweichung	Bemerkung
	A _{s,2} cm ²	A' _{s,2} cm ²	(A' _s - A _s)/A _s · 100 %	%	
90 / 96	9,76	9,76	0	± 10	
ANMERKUNG Die Temperatur in der Bewehrung nach t = 90 min Branddauer beträgt: θ _{s,1} = θ _{s,3} = 539 °C; 533 °C (1 %) θ _{s,2} = 372 °C; 367 °C (1 %) θ _{s,4} = θ _{s,6} = 656 °C; 645 °C (1 %) θ _{s,5} = 525 °C. 513 °C (2 %)					

Validierungsbeispiele 10 (CC.4.10) Stahlbeton-Kragstütze


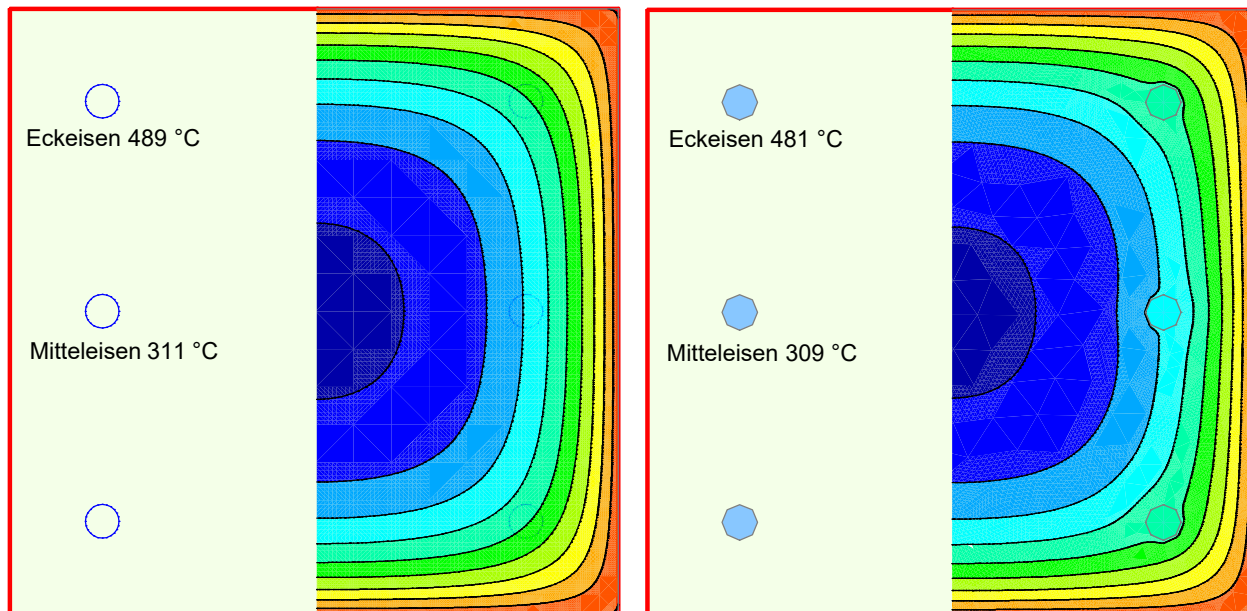
Abmessungen	$l / h / b$ in cm	700 / 36 / 36	
Knicklänge im Brand	$l_{0,fi}$ in m	14,0	
Lastausmitte im Brand	e_1 in cm	3,5	
Achsabstand	a in mm	55	
Belastung	$N_{E,fi,d,t}$ in kN	-79	
	$w_{E,fi,d,t}$ in kN/m	1,74	
Beton C20/25 (3% Feuchte (Massenanteile))	$f_{ck(20^\circ)}$ in N/mm ²	20	
Betonstahl B500	$f_{yk(20^\circ)}$ in N/mm ²	500	
Spannungs-Dehnungs-Linien	Beton ^{a)}	DIN EN 1992-1-2	
	Betonstahl ^{b)}		
Temperaturbeanspruchung	ETK (4-seitig)	DIN EN 1991-1-2	
Wärmeübergangskoeffizient	α_c in W/(m ² K)	25	
Emissivität	ϵ_m	0,70	
Thermische und physikalische Materialwerte	Beton	$\lambda, \rho, c_p, \epsilon_{th,c}$	DIN EN 1992-1-2
	Betonstahl	$\lambda_a, \rho, c_a, \epsilon_{th,s}$	DIN EN 1992-1-2
^{a)} mit überwiegend quarzithaltiger Gesteinskörnung und der Rohdichte $\rho = 2\,400\text{ kg/m}^3$			
^{b)} Klasse N, warmgewalzt			

Tabelle CC.21 Referenz- und berechnete Größen für die Stahlbeton-Kragstütze

	Referenzgröße X	berechnete Größe X'	Abweichung (X' - X)/X · 100 %	Grenzabweichung %
Versagenszeit t_u [min]	93	96	3,2	± 5
horiz. Verformung am Stützenkopf w_z [mm] nach $t = 90$ min Branddauer	381	314	-17,6	± 15
Moment am Stützenfuß $M_{E,fi,d}$ [kNm] nach $t = 90$ min Branddauer	75,5	70,2	-7,0	± 5
ANMERKUNG Temperatur in der Bewehrung nach $t = 90$ min Branddauer Eckenisen $\Theta_s = 502\text{ °C}$ (489 °C) und Mitteleisen $\Theta_s = 319\text{ °C}$ (311 °C)				

Die Verformungen und Schnittgrößen sind kurz vor dem Versagenszustand stark temperaturabhängig. Die Abweichungen in den Validierungsgrößen erklären sich dadurch, dass die berechneten Temperaturen in der Bewehrung niedriger sind als die zugehörigen Referenzgrößen.

Vergleichsberechnungen u.a. mit dem Programm ANSYS bestätigen die niedrigeren Temperaturen. Eine Berücksichtigung der Bewehrungsseisen bei der thermischen Berechnung würde zu einer weiteren Reduktion der Temperaturen führen (siehe nachfolgende Abbildung).



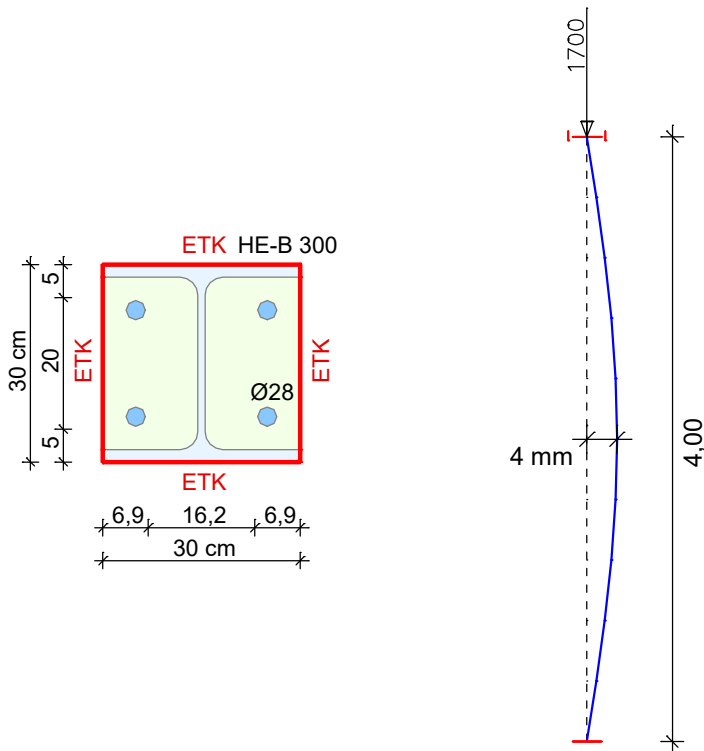
Temperaturprofile nach 90 min Branddauer ohne Berücksichtigung der Bewehrung

mit Berücksichtigung der Bewehrung

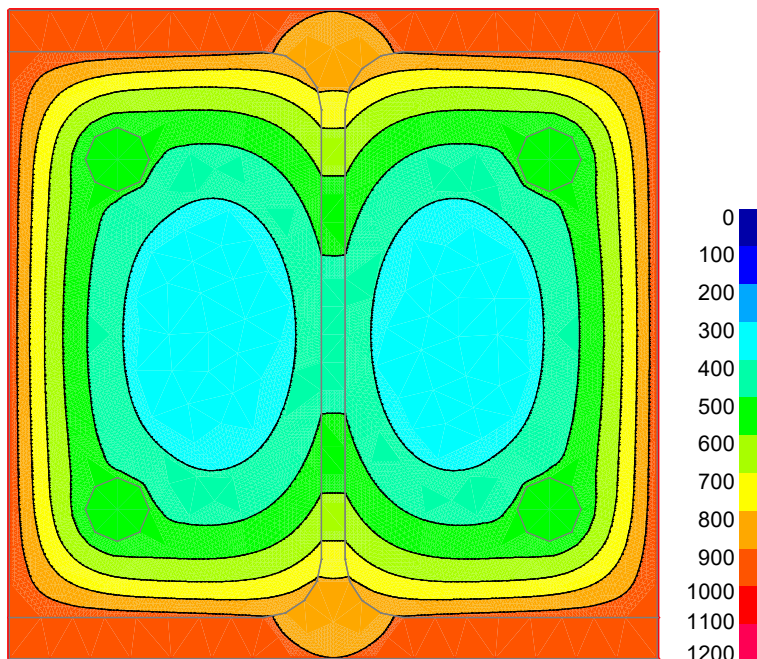
Um die mechanische Berechnung zu validieren, wurden die Temperaturprofile an die vorgegebenen Bewehrungstemperaturen angeglichen. Dafür wurde, abweichend von der Vorgabe, eine Betonrohddichte von 2280 kg/m² berücksichtigt. Die anschließende mechanische Berechnung liefert die nachfolgenden Resultate.

Tabelle CC.21a Referenz- und berechnete Größen für die Stahlbeton-Kragstütze nach Temperaturadaption

	Referenzgröße X	berechnete Größe X'	Abweichung (X' - X)/X · 100 %	Grenzabweichung %
Versagenszeit t _v [min]	93	92	-1,1	± 5
horiz. Verformung am Stützenkopf w _z [mm] nach t = 90 min Branddauer	381	348	-8,7	± 15
Moment am Stützenfuß M _{E,fi,d} [kNm] nach t = 90 min Branddauer	75,5	72,9	-3,4	± 5
ANMERKUNG Temperatur in der Bewehrung nach t = 90 min Branddauer Eckeisen θ _s = 502 °C (502 °C) und Mitteleisen θ _s = 319 °C (321 °C)				

Validierungsbeispiele 11 (CC.4.11) Verbundstütze mit Kammerbeton


Abmessungen	$l / h / b$ in cm	400 / 30 / 30	
	u_s in mm	50	
	e_f in mm	19	
	e_w in mm	11	
Knicklänge im Brand	$l_{0,fi}$ in cm	200	
Belastung	$N_{E,fi,d,t}$ in kN	-1 700	
Beton C25/30 (3% Feuchte (Massenanteile))	$f_{ck(20^\circ)}$ in N/mm ²	25	
Betonstahl B500	$f_{yk(20^\circ)}$ in N/mm ²	500	
Baustahl S 235	$f_{ak(20^\circ)}$ in N/mm ²	235	
Spannungs-Dehnungs-Linien	Beton ^{a)}	DIN EN 1994-1-2	
	Betonstahl ^{b)}		
	Baustahl		
Temperaturbeanspruchung	ETK (4-seitig)	DIN EN 1991-1-2	
Wärmeübergangskoeffizient	α_C in W/(m ² K)	25	
Emissivität	ε_m	0,7	
Thermische und physikalische Materialwerte	Beton	$\lambda, \rho, c_p, \varepsilon_{th,c}$	DIN EN 1994-1-2
	Betonstahl	$\lambda_a, \rho, c_a, \varepsilon_{th,s}$	DIN EN 1994-1-2
^{a)} mit überwiegend quarzithaltiger Gesteinskörnung und der Rohdichte $\rho = 2\,400\text{ kg/m}^3$			
^{b)} Klasse N, warmgewalzt			



Temperaturprofil nach t = 90 min Branddauer

Tabelle CC.23 Referenz- und berechnete Größen für die kammerbetonierte Verbundstütze

	Referenzgröße X	berechnete Größe X'	Abweichung $(X' - X)/X \cdot 100$ %	Grenzabweichung %	
Versagenszeit t_u [min]	92	91	-1,1	± 5	
horiz. Gesamtverformung w_z [mm] in Stützenmitte nach der Branddauer von t =	30 min	4,4	4,47		1,6
	60 min	5,5	5,72		4,0
ANMERKUNG Temperatur in der Bewehrung $\Theta_s = 535$ °C (523 °C) und im Schwerpunkt des Stahlprofils $\Theta_s = 447$ °C (469 °C) nach t = 90 min Branddauer.					

Literaturhinweise

Beispiele zur Bemessung nach Eurocode 2 – Band 2: Ingenieurbau.
Herausgeber: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2015.

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT)
Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton.
Straßenforschung Heft 544.
BMVIT, Wien 2004.

DIN EN 1991-1-2/NA:2015-09
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke –
Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
Beuth Verlag, Berlin 2015.

DIN EN 1992-1-2/NA:2010-12+A1:2015-09
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –
Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Änderung A1.
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
Beuth Verlag, Berlin 2015.

DIN EN 1993-1-2/NA:2010-12
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
Beuth Verlag, Berlin 2010.

DIN EN 1994-1-2/NA:2010-12
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –
Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton –
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
Beuth Verlag, Berlin 2010.

DIN EN 1995-1-2/NA:2010-12
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –
Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall.
Herausgeber: DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
Beuth Verlag, Berlin 2010.

EBA-Richtlinie
Anforderungen des Brand- und Katastrophenschutzes an den Bau und den Betrieb von Eisenbahntunneln.
Herausgeber: Eisenbahnbundesamt. Stand: 1.7.2008.

EN 338:2016
Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2016.

EN 14080:2013
Holzbauwerke – Brettschichtholz und Balkenschichtholz – Anforderungen.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2013.

EN 1991-1-2:2002+AC:2012
Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2012.

- EN 1992-1-2:2004+A1:2019
Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken –
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2019.
- EN 1993-1-2:2005+AC:2009
Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2009.
- EN 1994-1-2:2005+A1:2014
Eurocode 4 – Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton –
Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2014.
- EN 1995-1-2:2009
Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten –
Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall.
Herausgeber: CEN Europäisches Komitee für Normung, Brüssel.
Beuth Verlag, Berlin 2009.
- Lienhard IV, J.H.; Lienhard V, J.H.
A Heat Transfer Textbook.
Phlogiston Press, Cambridge (Massachusetts) 2008.
- Litzner, H.-U.
Grundlagen der Bemessung nach DIN 1045-1 in Beispielen.
Beton-Kalender 2002, Bd. 1, S. 435–480. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2002.
- Hosser, D. (Hrsg.)
Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Technischer Bericht vfdb TB 04/01.
Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e. V. (vfdb), Altenberge 2006.
- Richter, E.
Brandschutzbemessung im Massivbau - insbesondere Stahlbetonstützen.
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB),
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 2007.
- Rubert, A.; Schaumann, P.
Tragverhalten stählerner Rahmensysteme bei Brandbeanspruchung.
Stahlbau 9/1985.
Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1985.
- Upmeyer, J.
Nachweis der Brandsicherheit von kammerbetonierten Verbundbauteilen über Grenzbrandlasten (Dissertation).
Technische Universität Hannover, Hannover 2001.
- Zehfuß, J.
Bemessung von Tragsystemen mehrgeschossiger Gebäude in Stahlbauweise für realistische Brandbeanspruchung
(Dissertation).
Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 2004.
- ZTV-ING
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5 – Tunnelbau.
Herausgeber: Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Stand: 3/2012.

InfoGraph GmbH

Kackertstraße 10

D-52072 Aachen

Tel.: +49 241 889980

Fax: +49 241 8899888

info@infograph.de

www.infograph.de

InfoGraph 
Software für die Tragwerksplanung