

Thermomechanische Analyse im Brandfall

Resttragfähigkeit des brandbeanspruchten Querschnitts

SectionPro-Tutorial · Resttragfähigkeit eines Querschnitts im Brandfall,
nach dem 500-°C-Isothermenverfahren der EN 1992-1-2

BridgeKernel · 2026

| Einleitung

Die Brandberechnung erfolgt in zwei aufeinanderfolgenden Schritten. Der erste Schritt ist thermisch, wie im vorherigen Artikel beschrieben: SectionPro löst das Wärmetransportproblem am realen Querschnitt und gibt zu jedem angeforderten Zeitpunkt das Temperaturfeld im Beton, in der Bewehrung und in einem etwaigen eingebetteten Stahlprofil aus.

Der zweite Schritt ist mechanisch. Für jede gewählte Branddauer gehen die mechanischen Module vom zugehörigen Temperaturfeld aus und leiten daraus den für den Nachweis maßgebenden tragenden Querschnitt ab. Der Betonbeitrag wird entsprechend dem erwärmten Bereich des Querschnitts abgemindert, während die Bewehrungsstäbe und das eingebettete Stahlprofil temperaturabhängige mechanische Eigenschaften erhalten. Der so entstandene brandbeanspruchte Querschnitt wird anschließend im selben Sinne wie ein Querschnitt bei Normaltemperatur untersucht: Lastfallnachweis, Interaktionskurven und -fläche, Distanzen, Steifigkeitskurven und Zeit bis zum Versagen.

Das 500-°C-Isothermenverfahren

Für den Beton folgt SectionPro dem 500-°C-Isothermenverfahren der EN 1992-1-2. Über 500 °C erwärmter Beton wird verworfen; Beton, der unter 500 °C geblieben ist, wird mit seiner vollen Festigkeit bei Normaltemperatur und seinem üblichen Parabel-Rechteck-Gesetz ($\varepsilon_{c2} = -2\text{‰}$, $\varepsilon_{cu2} = -3.5\text{‰}$) beibehalten. Die tragende Geometrie reduziert sich damit auf den von der 500-°C-Isotherme umschlossenen Bereich, der mit zunehmender Brandeinwirkung schrumpft.

Jeder Bewehrungsstab wird bei seiner eigenen Temperatur abgemindert: Seine Streckgrenze und sein Modul werden zu $f_y(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ und $E_s(\theta) = k_E(\theta) \cdot E_s$, mit den Abminderungsfaktoren der EN 1992-1-2 (Tabellen 3.2a und 3.2b). Ein außerhalb der 500-°C-Isotherme liegender Stab wird nicht entfernt; er trägt weiterhin mit seiner abgeminderten Festigkeit bei.

Dieselbe Behandlung gilt für ein eingebettetes Stahlprofil, sofern es im thermischen Schritt vernetzt ist: Jedes Stahlelement wird bei seiner Temperatur erfasst, mit $k_y(\theta)$ und $k_E(\theta)$ abgemindert, und der von ihm eingenommene Beton wird entfernt, damit er nicht doppelt gezählt wird. Sobald der brandbeanspruchte Querschnitt aufgebaut ist, läuft der mechanische Nachweis wie eine Standard-

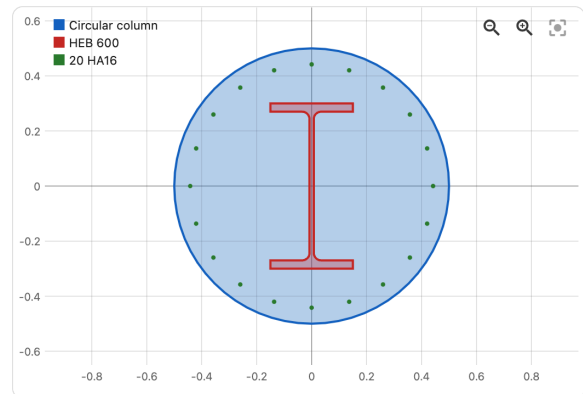
Querschnittsanalyse ab, wobei der Brand die tragende Geometrie und die zum gewählten Zeitpunkt verwendeten Werkstoffgesetze beeinflusst. An diesem reduzierten Querschnitt führt SectionPro Folgendes aus:

- Querschnittsnachweis: das Gleichgewicht eines Lastfalls, mit dem vollständigen Spannungs- und Dehnungsfeld zu einem bestimmten Zeitpunkt.
- Interaktionskurve: die Widerstandsgrenze in einer gewählten Kraftebene, mit einer festgehaltenen Komponente.
- Interaktionsfläche: der vollständige 3D-Widerstandsbereich im Raum (N, M_z, M_y) .
- Distanzen: der Ausnutzungsgrad jeder Last durch Projektion auf diese Fläche.
- Steifigkeit: das Momenten-Krümmungs-Verhalten sowie die Sekanten- und Tangentenbiegesteifigkeit.
- Zeit bis zum Versagen: die Branddauer, bei der die Last den Widerstandsbereich verlässt.

Der Beispielquerschnitt

Die Berechnungen werden an der mit den SectionPro-Beispielen gelieferten Verbundstütze veranschaulicht:

- Kreisquerschnitt, $\varphi = 1000$ mm, C30/37.
- Eingebettetes Profil HEB 600 aus Stahl S235.
- 20 Stäbe Ø16 B500B am Umfang.
- Normbrandbeanspruchung ISO 834.



Querschnittsnachweis

Für eine zum Nachweis vorgegebene Last (N, M_z, M_y) ermittelt SectionPro den Dehnungszustand $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$, eine Längsdehnung und zwei Krümmungen, der das innere Gleichgewicht mit den aufgetragenen Schnittgrößen erfüllt. Es löst dies iterativ und integriert in jedem Schritt die Spannungen über den brandbeanspruchten Querschnitt: den beibehaltenen Beton über seine Konturen, die Stäbe und das vernetzte Profil als Fasern, jeweils gemäß ihrem abgeminderten Gesetz.

Aus dem konvergierten Dehnungszustand entnimmt SectionPro die Spannungen und Dehnungen in jeder Faser, die Lage der Nulllinie sowie einen Ausnutzungsgrad, definiert als Verhältnis der maßgebenden Faserdehnung zur Bruchdehnung des jeweiligen Werkstoffs. Ein Ausnutzungsgrad unter 1 bedeutet, dass die Last getragen wird; ein Wert von 1 oder darüber bedeutet, dass der reduzierte Querschnitt sie nicht mehr aufnehmen kann.

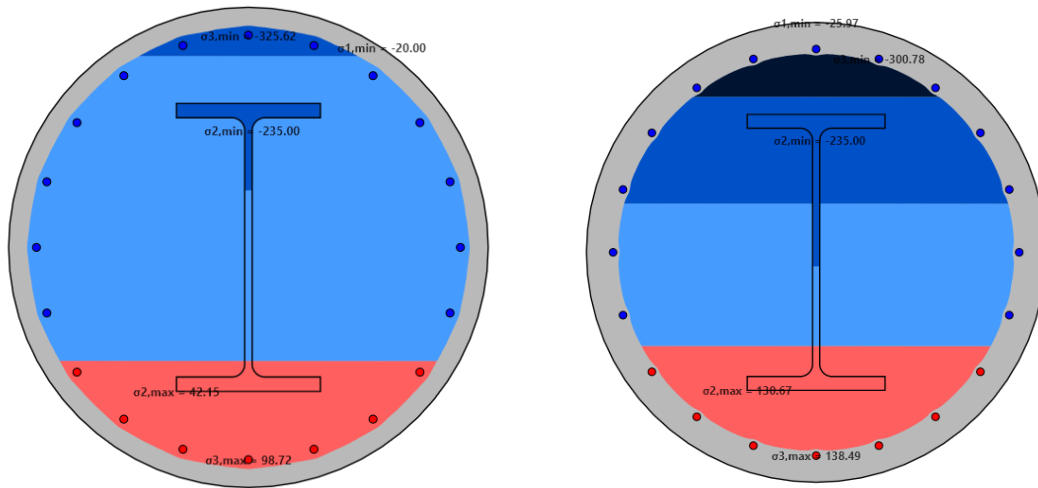


Abbildung 1: Konvergierter Spannungs- und Dehnungszustand bei R120 und R240 unter der Last $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, in kN und kN · m.

Im Beispiel beträgt die Last $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, in kN und kN · m. Die Ansichten R120 und R240 bringen dieselbe Last auf einen Querschnitt auf, dessen tragende Fläche mit der Brandeinwirkung schrumpft: Der Beton innerhalb der 500-°C-Isotherme nimmt die Druckkraft auf, während die noch kühlen Stäbe und das eingebettete Profil die Biegung ausgleichen. Bei R240 erreicht der Querschnitt das Versagen durch Zerdrücken des beibehaltenen Betons.

Interaktionskurve N–M_z

Die Interaktionskurve N – M_z ist die Widerstandsgrenze des Querschnitts bei einachsiger Biegung: die Menge der Paare aus Normalkraft und Biegemoment, die er um die betrachtete Achse aufnehmen kann. Für jede Branddauer am reduzierten Querschnitt neu berechnet, geben die überlagerten Kurven einen unmittelbaren Eindruck der durch die Erwärmung verlorenen Tragfähigkeit.

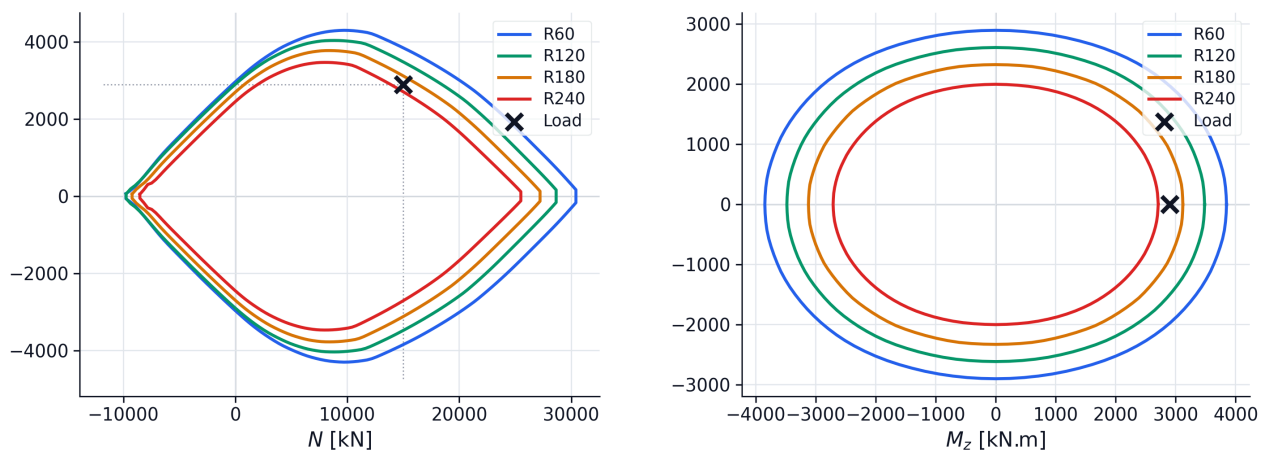


Abbildung 2: Brand-Interaktionskurven N – M_z und M_y – M_z unter ISO 834.

Die Abbildungen zeigen den Tragfähigkeitsverlust mit steigender Temperatur: Die Widerstandsbe-reiche ziehen sich mit der Branddauer fortschreitend zusammen. Für die gewählte Last tritt das Versagen zwischen R180 und R240 auf.

3D-Interaktionsfläche

Bei zweiachsiger Biegung lässt sich der Widerstand nicht mehr durch eine einzelne ebene Kurve erfassen: Er wird zu einer geschlossenen Fläche im Raum (N, M_z, M_y) , dem Widerstandsbereich des Querschnitts. SectionPro berechnet diese Fläche unmittelbar aus den Bruchdehnungszuständen des Querschnitts, über alle Biegerichtungen hinweg erfasst. Auf dem brandbeanspruchten Querschnitt aufgebaut, erlaubt sie den unmittelbaren Nachweis jeder zweiachsigen Last, ohne sie auf eine bevorzugte Achse zu reduzieren: Eine Last innerhalb der Fläche wird getragen, eine Last außerhalb überschreitet die Tragfähigkeit.

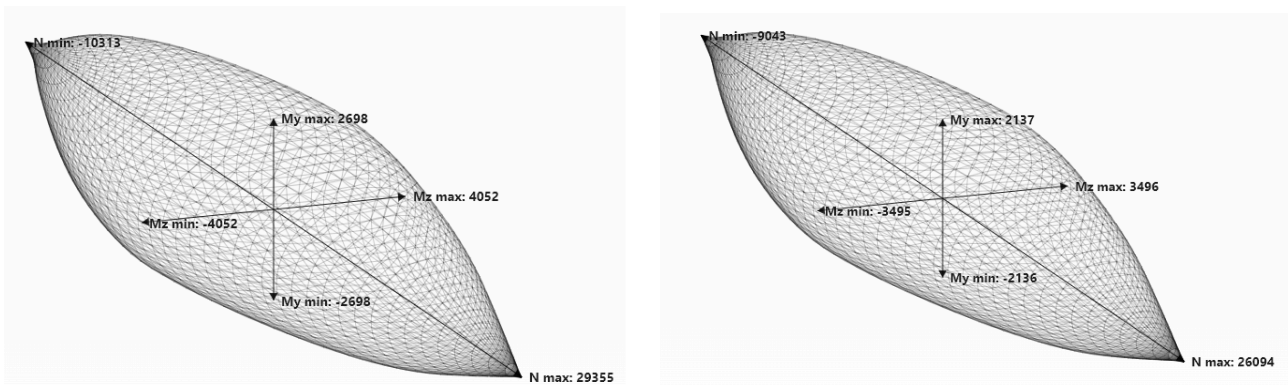


Abbildung 3: Brand-Interaktionsfläche $(N-M_z-M_y)$ bei R120 und R240.

Distanzen

Das Distanzmodul prüft mehrere Lastfälle unter zweiachsiger Biegung grafisch gegen dieselbe Interaktionsfläche. Jede Last (N, M_z, M_y) wird auf die Fläche projiziert und mit einem Ausnutzungsgrad η zurückgegeben, sodass der Ingenieur auf einen Blick erkennt, welche Lasten innerhalb des Widerstandsbereichs bleiben und welche ihn überschreiten.

- $\eta < 1$: Die Last bleibt **intern** und der Querschnitt hat Tragreserve.
- $\eta = 1$: Die Last liegt auf der Grenze, genau am Limit.
- $\eta > 1$: Die Last wird **extern** und die Tragfähigkeit ist überschritten.

Im Brandfall zieht sich der Bereich mit der Brandeinwirkung zusammen, sodass der Status derselben Last mit zunehmender Dauer von innen nach außen wechseln kann.

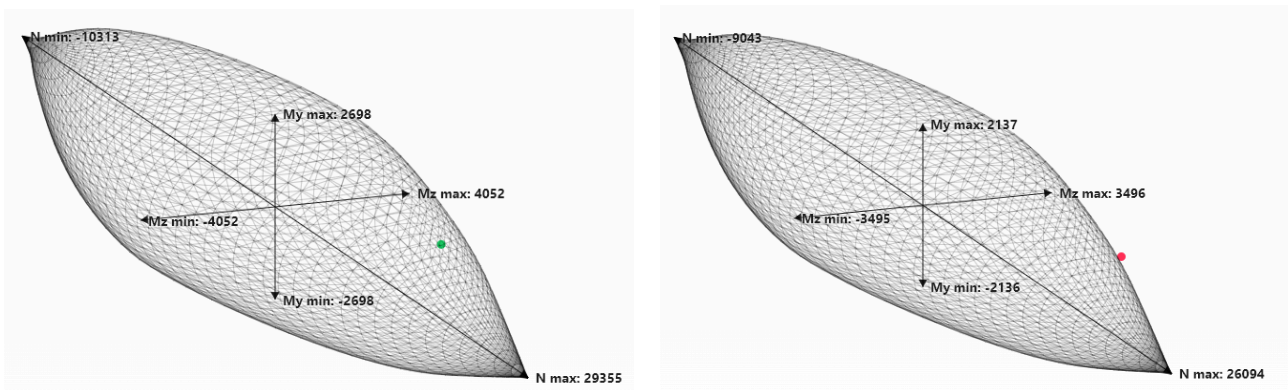


Abbildung 4: Distanzbasierter Nachweis einer Brandlast am 3D-Widerstandsbereich, bei R120 (links) und R240 (rechts). Der Bereich zieht sich mit der Brandeinwirkung zusammen; die normierte Distanz η gibt an, ob die Last **intern** bleibt ($\eta \leq 1$) oder **extern** wird ($\eta > 1$).

Der Lastpunkt wandert von **intern** bei R120 zu **extern** bei R240, was mit den Ergebnissen des Querschnittsnachweises und der Interaktionskurve übereinstimmt.

Steifigkeit im Brandfall

Die Erwärmung verringert auch die Biegesteifigkeit von Stützen. Mit zunehmender Krümmung kann dieser Steifigkeitsverlust Effekte zweiter Ordnung verstärken, noch bevor der Grenzwiderstand erreicht ist.

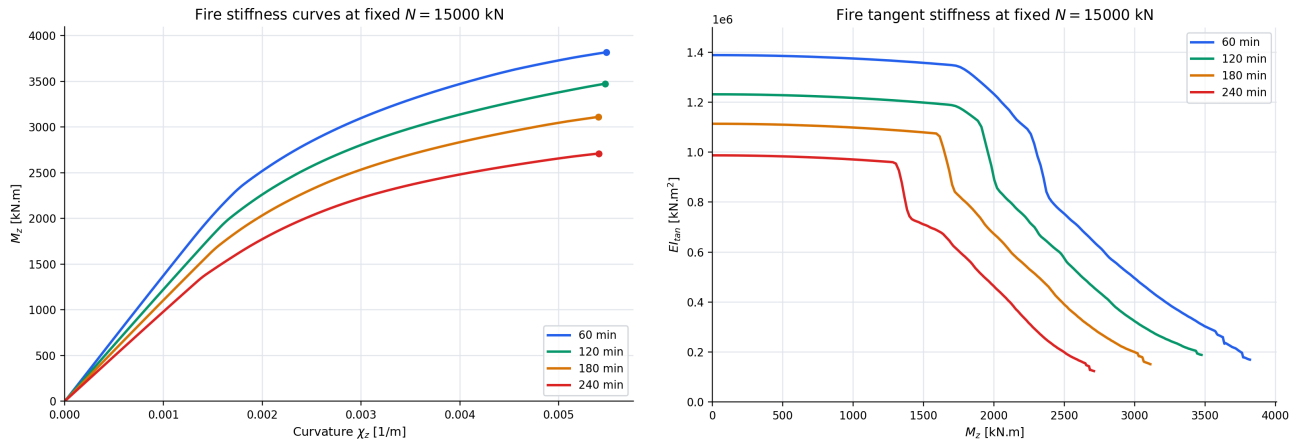


Abbildung 5: Steifigkeit im Brandfall bei $N = 15000 \text{ kN}$ und $M_y = 0$. Links das Momenten-Krümmungs-Verhalten M_z - χ_z . Rechts die Tangentensteifigkeit EI_{tan} über M_z .

Die Kurven zeigen einen starken Steifigkeitsabbau mit der Branddauer: Das Momenten-Krümmungs-Verhalten flacht ab, und die Tangentensteifigkeit fällt abrupt ab, wenn sich der brandbeanspruchte Querschnitt dem Versagen nähert.

Zeit bis zum Versagen

Die Zeit bis zum Versagen ist die brandspezifischste Berechnung. Für eine feste Gebrauchslast baut SectionPro den reduzierten Querschnitt zu jedem thermischen Ausgabezeitpunkt neu auf und löst daran das Gleichgewicht. Die Tragfähigkeit sinkt, während sich die 500-°C-Isotherme zusammenzieht und die Stahltemperaturen steigen; die Zeit bis zum Versagen ist der Zeitpunkt, zu dem die Last den Widerstandsbereich verlässt, wenn der reduzierte Querschnitt sie innerhalb der Werkstoff-Dehnungsgrenzen nicht mehr aufnehmen kann.

Anschließend wird an demselben Querschnitt ein Dämmversuch durchgeführt, um zu prüfen, ob ein passiver Brandschutz dieses spezielle Feuerwiderstandsproblem löst. Dieselbe Last wird zunächst am ungeschützten Querschnitt und dann mit einer durchgehenden Dämmschicht über dem Betonumfang bewertet.

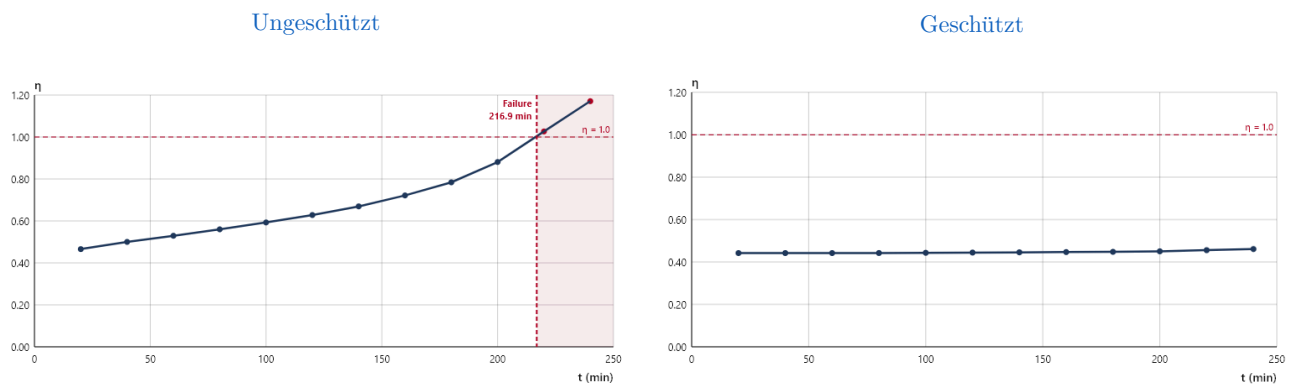


Abbildung 6: Zeit bis zum Versagen unter der Last $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, in kN und kN · m. Der passive Brandschutz verschiebt in diesem Fall den Austritt aus dem Widerstandsbereich über R240 hinaus.

Der Schutz wird als durchgehende passive Schicht modelliert, die durch vier thermische Parameter beschrieben wird. Für diesen Dämmversuch wurden die folgenden Werte verwendet:

d	λ	ρ	c_p
20 mm	0,2 W/(m · K)	700 kg/m ³	1000 J/(kg · K)

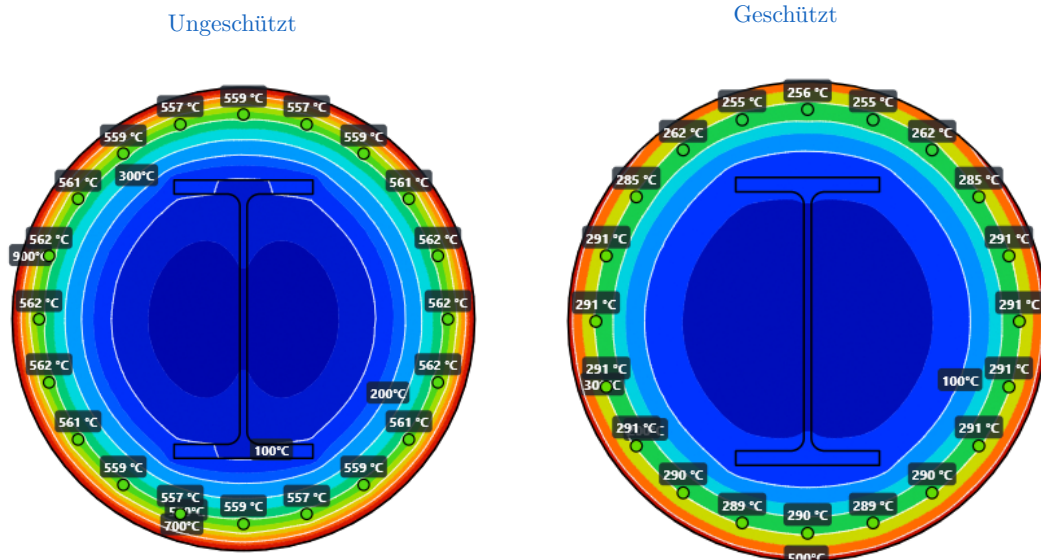


Abbildung 7: Temperaturfeld bei R240, ungeschützt und geschützt.

Der Schutz ist in diesem Fall sehr wirksam: Die geschützten Bewehrungsstäbe sinken von etwa 560 °C auf etwa 300 °C, und der Beton bleibt selbst nach 240 min unter 500 °C, sodass der gesamte Betonquerschnitt mechanisch beibehalten wird.

Rechenleistung

Die Hauptaufgabe ist die Berechnung des Temperaturfeldes bei den angeforderten Branddauern. Sobald diese Temperaturfelder vorliegen, sind die mechanischen Nachweise schnell, und der gesamte Arbeitsablauf bleibt für dieses Beispiel unter einer Sekunde.

Berechnung	Zeit
Temperaturfeld (2 Schritte, R120/R240)	0,20 s
Querschnittsnachweis (Spannung-Dehnung)	+ 4 ms
Interaktionskurve N-Mz (160 Punkte)	+ 31 ms
My-Mz-Bereich bei festem N	+ 35 ms
3D-Interaktionsfläche (50 × 50)	+ 134 ms
Steifigkeitskurve (Momenten-Krümmung)	+ 11 ms
Zeit bis zum Versagen (vollständiger Durchlauf)	+ 52 ms

Verbundstütze des Artikels, gemessen auf einem Desktop-Rechner. Die mechanischen Zeiten sind nach der Lösung des Temperaturfeldes angegeben.

Fazit

Das 500-°C-Isothermenverfahren verwandelt das Temperaturfeld in einen reduzierten tragenden Querschnitt: Beton, der innerhalb der Isotherme seine Festigkeit behält, Stäbe und eingebetteter Stahl, geschwächt durch ihre lokale Temperatur. Aus diesem brandbeanspruchten Zustand liefert die Analyse den Widerstand gegenüber der aufgebrachten Last, die Interaktionsbereiche, die Lastdistanzen, den Steifigkeitsverlust und den Zeitpunkt, zu dem die Last den Widerstandsbereich verlässt.

Bei der untersuchten Verbundstütze bleibt das eingebettete Profil durch den umgebenden Beton abgeschirmt und behält bei den mittleren Branddauern einen erheblichen Anteil der Tragfähigkeit. Der durchgehende passive Brandschutz senkt die Temperaturen bei R240 deutlich und verschiebt die Zeit bis zum Versagen der betrachteten Last nach hinten.

Die verschiedenen Berechnungen stimmen untereinander überein: Sie deuten alle auf denselben Tragfähigkeitsverlust und denselben Versagensbereich hin. Der Querschnittsnachweis liefert den detaillierten Spannungs- und Dehnungszustand für eine Last. Die Interaktionskurve ist die bevorzugte ingenieurmäßige Darstellung, wenn ein Widerstandsbereich in einer Ebene benötigt wird. Die Interaktionsfläche liefert den globalen zweiachsigen Bereich. Der Distanznachweis liefert einen schnellen OK/KO-Status für mehrere Lasten. Die Steifigkeitskurven zeigen, ob der Querschnitt in einen Bereich starken Steifigkeitsabbaus eingetreten ist. Die Analyse der Zeit bis zum Versagen liefert schließlich eine näherungsweise Branddauer, bevor die Last nicht mehr getragen werden kann. Jede Darstellung hat ihre eigene Stärke, und zusammen ergeben sie ein stimmiges Bild des Brandverhaltens.