

Thermische brandanalyse

Temperatuurveld

SectionPro-tutorial · Transiënte temperatuurprofielen
in een aan brand blootgestelde doorsnede, met eindige elementen

BridgeKernel · 2026

Inleiding

De brandtoetsing van een gewapendbetonnen doorsnede berust in de eerste plaats op de kennis van de temperatuur in elk punt van de doorsnede na een gegeven blootstellingsduur, bijvoorbeeld 30, 60, 90 of 120 minuten. Deze ruimtelijke verdeling, het temperatuurveld, bepaalt de rest van de berekening: de afname van de sterkte van het beton en het staal, en vervolgens de resterende draagkracht, volgen er rechtstreeks uit. Ze vormt niettemin een op zichzelf staande thermische stap, die SectionPro onafhankelijk van de mechanische toetsing oplost en weergeeft.

Dit artikel beperkt zich tot deze thermische stap. Het herhaalt de grondslagen ervan, beschrijft het in SectionPro gekozen model, en vergelijkt vervolgens de resultaten met de referentieprofielen uit Bijlage A van EN 1992-1-2.

Het thermische probleem

De transiënte warmteoverdracht in de doorsnede voldoet aan de niet-lineaire warmtevergelijking:

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

De thermische eigenschappen van beton variëren met de temperatuur. De warmtegeleidbaarheid $\lambda(\theta)$ neemt monotoon af, terwijl de soortelijke warmte $c_p(\theta)$ een uitgesproken piek vertoont rond 115 °C, samenhangend met de verdamping van het vrije water en met een amplitude die groter is naarmate het vochtgehalte hoger is. Deze piek absorbeert een belangrijk deel van de flux en vertraagt duidelijk de voortgang van het warmtefront naar de kern van de doorsnede.

Op de blootgestelde zijden combineert de nettoflux convectie en straling:

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

waarbij θ_g de gastemperatuur is (brandkromme), θ_m de oppervlaktetemperatuur, $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ en $\varepsilon_m = 0.7$ (standaardwaarden, aanpasbaar). De niet-blootgestelde zijden worden verondersteld adiabatisch te zijn ($\partial\theta/\partial n = 0$).

De genormaliseerde brandkromme ISO 834 geeft de gastemperatuur:

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

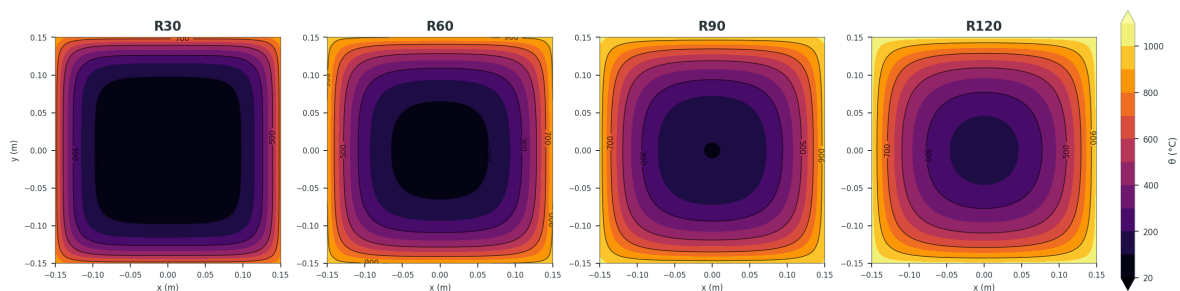
Deze vergelijkingen bevatten meerdere parameters: de brandkromme, de materiaalwetten $\lambda(\theta)$ en $c_p(\theta)$, de uitwisselingscoëfficiënten aan het oppervlak. Ze nemen standaard de waarden uit EN 1992-1-2 aan en blijven bij invoer aanpasbaar.

Het temperatuurveld in SectionPro

SectionPro lost het temperatuurveld op voor een doorsnede van willekeurige vorm, of ze nu vol, uitgehold of uit meerdere materialen is samengesteld, zonder zich te beperken tot de in de norm getabelleerde geometrieën. De belangrijkste mogelijkheden:

- **Brandkrommen.** ISO 834 (genormaliseerde brand), koolwaterstof, buitenbrandkromme, of een door de gebruiker gedefinieerde kromme in de vorm van tijd-temperatuurpunten.
- **Blootstelling per zijde.** Elke zijde is onafhankelijk al dan niet blootgesteld. Een balk die in een plaat is gestort telt drie aan brand blootgestelde zijden, waarbij de bovenzijde adiabatisch blijft; een kolom telt er vier.
- **Beschermingen.** Een beschermingslaag kan zijde per zijde worden gedefinieerd (dikte d_p , warmtegeleidbaarheid λ_p , dichtheid ρ_p , soortelijke warmte $c_{p,p}$): gipsplaten, spuitpleisters of isolatiematerialen. De thermische weerstand ervan gaat mee in de randvoorwaarde.
- **Materialen en geometrie.** Siliciumhoudend of kalksteenhoudend beton, vochtgehalte, dichtheid en grens van de warmtegeleidbaarheid zijn instelbaar. De doorsnede kan gaten en holtes, zones met meerdere materialen en ingebedde wapeningsstaven bevatten.

Voor elk gevraagd tijdstip verkrijgt men het volledige temperatuurveld: isothermenkaart, temperaturen ter plaatse van de wapening en samenvattende grootheden (maximale temperatuur aan het oppervlak, gemiddelde temperatuur, kerntemperatuur). Deze gegevens dienen vervolgens als invoer voor de berekening van de resterende capaciteit, die het onderwerp van het volgende artikel zal zijn.



Figuur 1: Voorbeeld van een door SectionPro berekend veld: kolom 300×300 blootgesteld op zijn vier zijden, isothermen bij de tijdsduren R30 / R60 / R90 / R120.

Validatie volgens Bijlage A van EN 1992-1-2

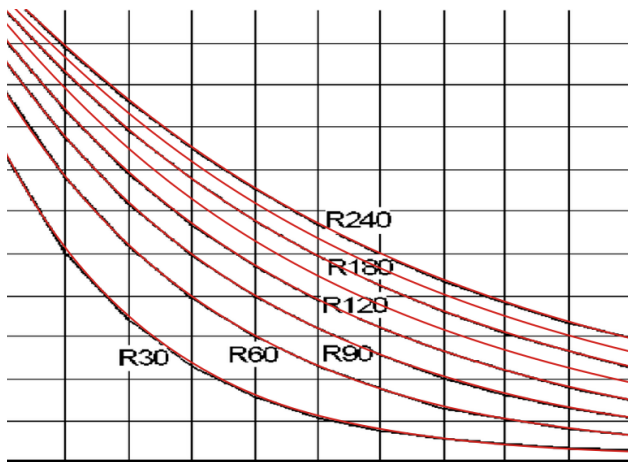
Bijlage A van EN 1992-1-2 levert referentietemperatuurprofielen voor courante doorsneden die blootgesteld zijn aan de genormaliseerde brand ISO 834: een plaat (Fig A.2), balken (Fig A.3 tot A.10) en kolommen (Fig A.11 tot A.20). Deze profielen zijn opgesteld voor een vochtgehalte van 1,5% en

de ondergrens van de warmtegeleidbaarheid. Het zijn deze aannames die wij als validatiereferentie hanteren.

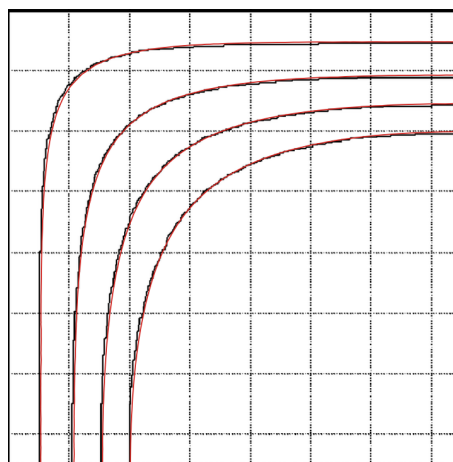
Twee voor de norm representatieve geometrieën worden met diezelfde aannames gereproduceerd: de plaat, een eendimensionaal geval dat op één zijde is blootgesteld, en de kolom die op zijn vier zijden is blootgesteld, waarvoor de norm rechtstreeks de positie van de 500 °C-isotherm levert die het als dragend beschouwde beton begrenst. Op elk diagram worden de door SectionPro berekende isothermen, in het rood, over de in Bijlage A gepubliceerde profielen, in het zwart, gelegd, getekend in hetzelfde assenstelsel. De vergelijking heeft zo rechtstreeks betrekking op dezelfde krommen.

— EN 1992-1-2, Bijlage A — SectionPro

De warmteoverdracht in de plaat blijft nagenoeg eendimensionaal vanaf de blootgestelde zijde, terwijl de kolom een dubbel symmetrisch veld ontwikkelt waarvan de koude kern krimpt naarmate de blootstelling langer duurt.



Figuur 2: Plaat $h = 200$ mm blootgesteld aan de onderzijde, van R30 tot R240 (diepte 0 tot 100 mm op de horizontale as, temperatuur op de verticale as).

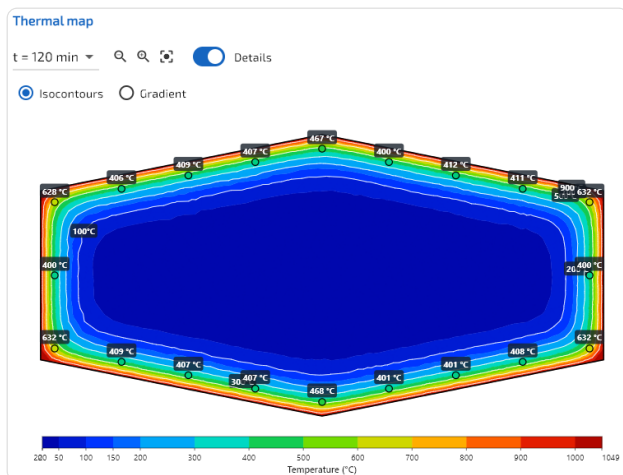


Figuur 3: Kolom 300×300 , 500 °C-isotherm bij R30, R60, R90 en R120 (kwart van de doorsnede, 0 tot 150 mm per zijde).

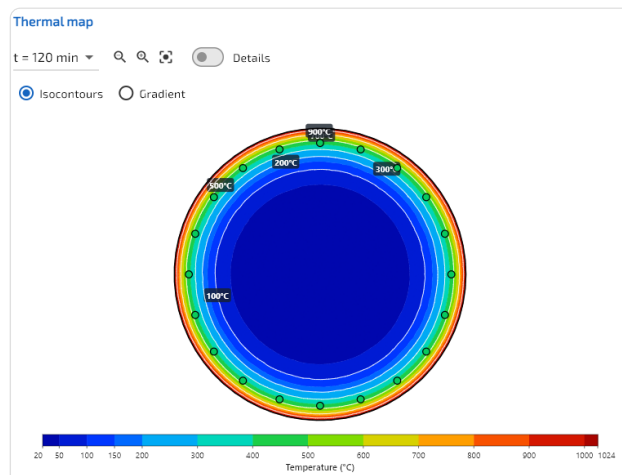
Validatiebalans. Voor de plaat, het eendimensionale referentiegeval, valt het berekende profiel samen met dat van Fig A.2 over het volledige bereik van nuttige dekkingen en tot in de kern. Voor de kolom die op zijn vier zijden is blootgesteld, volgt de positie van de 500 °C-isotherm de norm bij elke tijdsduur. De thermische solver is zo gevalideerd voor deze twee blootstellingsconfiguraties.

Toepassingsvoorbeeld

Naast de door de norm getabelleerde vormen behandelt SectionPro een willekeurige geometrie. De twee onderstaande voorbeelden, een zeshoekige doorsnede en een cirkelvormige doorsnede, zijn over hun volledige omtrek blootgesteld.



Figuur 4: Zeshoekige doorsnede, temperatuurveld bij $t = 120$ min. De modus „Details“ toont de temperaturen ter plaatse van de wapening (bolletjes): koude centrale kern, warme hoeken aan het oppervlak.



Figuur 5: Cirkelvormige doorsnede die over haar volledige omtrek is blootgesteld, isothermen bij $t = 120$ min. De referentiecontouren (100, 200, 300, 500 en 900 °C) zijn in het wit getekend.

Prestaties

De berekening van het temperatuurveld is nagenoeg ogenblikkelijk: minder dan een seconde, ook voor de langste brandwerendheidsduren. De op de validatiegevallen gemeten tijden zijn hieronder weergegeven.

Doorsnede	Zijden	Gesimuleerde duur	Rekentijd
Balk 300×160	3	R90 (3 tijdstippen)	0,12 s
Kolom 300×300	4	R120 (4 tijdstippen)	0,35 s
Balk 600×300	3	R120 (4 tijdstippen)	0,52 s
Plaat 200	1	R240 (8 tijdstippen)	0,57 s

Export

Het temperatuurveld kan worden geëxporteerd als afbeelding (isothermenkaart, in licht of donker thema), in CSV-formaat (coördinaten van de knopen, nodale temperaturen op elk tijdstip, wapeningstemperaturen) en in de door SectionPro geproduceerde PDF-rekennota. De uitvoertijdstippen zijn vrij te kiezen, uniform of één voor één, wat toelaat om nauwkeurig te richten op de reglementaire brandwerendheidsduren R30, R60, R90 en R120.

Conclusie

Het temperatuurveld vormt de basis van elke brandtoetsing. SectionPro berekent het met transiënte eindige elementen, door de niet-lineaire warmtevergelijking op te lossen die de temperatuurafhankelijke warmtegeleidbaarheid, de soortelijke warmte met vochtpeik en de straling in θ^4 koppelt, voor een willekeurige geometrie en een zijde per zijde gedefinieerde blootstelling, beschermingen inbegrepen. De materiaalwetten en de brandkromme nemen er standaard de waarden van EN 1992-1-2 aan, aanpasbaar bij invoer.

De vergelijking met de profielen van Bijlage A bevestigt deze aanpak: het berekende profiel valt samen met de referentie voor het eendimensionale geval van de plaat, en de positie van de 500 °C-isotherm in de op zijn vier zijden blootgestelde kolom volgt de norm bij elke tijdsduur. Het aldus verkregen veld levert een betrouwbare basis voor de berekening van de resterende draagkracht in brandsituatie.