

Thermo-mechanische brandanalyse

Resterende capaciteit van de verhitte doorsnede

SectionPro-tutorial · Resterende sterkte van een doorsnede bij brand,
volgens de 500 °C-isothermmethode van EN 1992-1-2

BridgeKernel · 2026

I Inleiding

De brandberekening verloopt in twee opeenvolgende stappen. De eerste stap is thermisch, zoals beschreven in het vorige artikel: SectionPro lost het warmteoverdrachtsprobleem op de werkelijke doorsnede op en levert het temperatuurveld in het beton, de wapening en een eventueel ingebed staalprofiel op elk gevraagd tijdstip.

De tweede stap is mechanisch. Voor elke gekozen brandduur vertrekken de mechanische modules van het overeenkomstige temperatuurveld en leiden daaruit de dragende doorsnede af die voor de toetsing wordt gebruikt. De bijdrage van het beton wordt verminderd naargelang de verhitte zone van de doorsnede, terwijl de wapeningsstaven en het ingebedde staalprofiel temperatuurafhankelijke mechanische eigenschappen krijgen. De aldus verkregen verhitte doorsnede wordt vervolgens in dezelfde geest geanalyseerd als een doorsnede bij omgevingstemperatuur: toetsing van een belastinggeval, interactiekrommen en -oppervlak, afstanden, stijfheidskrommen en bezwijktijd.

De 500 °C-isothermmethode

Voor het beton volgt SectionPro de 500 °C-isothermmethode van EN 1992-1-2. Beton dat boven 500 °C wordt verhit, wordt verworpen; beton dat onder 500 °C is gebleven, wordt behouden met zijn volledige sterkte bij omgevingstemperatuur en zijn gebruikelijke parabool-rechthoekwet ($\varepsilon_{cu2} = -2\text{‰}$, $\varepsilon_{cu2} = -3.5\text{‰}$). De dragende geometrie beperkt zich dus tot de zone die door de 500 °C-isotherm wordt omsloten, en die krimpt naarmate de blootstelling toeneemt.

Elke wapeningsstaaf wordt op haar eigen temperatuur gereduceerd: haar vloeigrens en modulus worden $f_y(\theta) = k_s(\theta) \cdot f_{yk}$ en $E_s(\theta) = k_E(\theta) \cdot E_s$, met de reductiefactoren van EN 1992-1-2 (Tabellen 3.2a en 3.2b). Een staaf die buiten de 500 °C-isotherm ligt, wordt niet verwijderd; ze draagt nog steeds bij met haar gereduceerde sterkte.

Dezelfde behandeling geldt voor een ingebed constructieprofiel wanneer het in de thermische stap in elementen is verdeeld: elk staalement wordt op zijn temperatuur afgelezen, gereduceerd met $k_y(\theta)$ en $k_E(\theta)$, en het beton dat het inneemt wordt verwijderd zodat het niet dubbel wordt geteld. Zodra de verhitte doorsnede is opgebouwd, verloopt de mechanische toetsing als een standaard

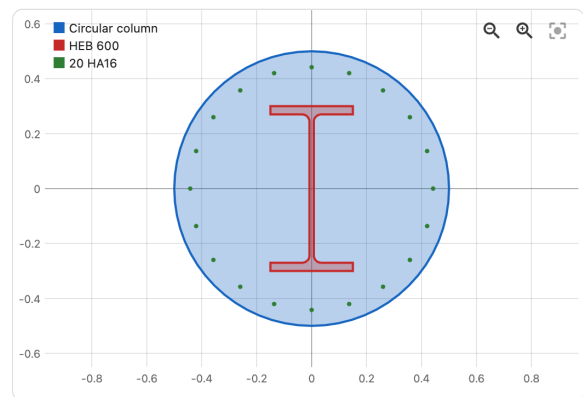
doorsnedeanalyse, waarbij de brand de dragende geometrie en de op het gekozen tijdstip gebruikte materiaalwetten beïnvloedt. Op deze gereduceerde doorsnede voert SectionPro het volgende uit:

- Doorsnedetoetsing: het evenwicht van een belastingeval, met het volledige spannings- en rekveld op een gegeven tijdstip.
- Interactiekromme: de weerstandsgrens in een gekozen krachtenvlak, met één component vast.
- Interactieoppervlak: het volledige 3D-weerstandsdomein in (N, M_z, M_y) .
- Afstanden: de benuttingsgraad van elke belasting door projectie op dat oppervlak.
- Stijfheid: de moment–kromming-respons en de secante en tangente buigstijfheid.
- Bezwijktijd: de blootstellingstijd waarop de belasting het weerstandsdomein verlaat.

De voorbeelddoorsnede

De berekeningen worden geïllustreerd op de composietkolom die met de SectionPro-voorbeelden wordt meegeleverd:

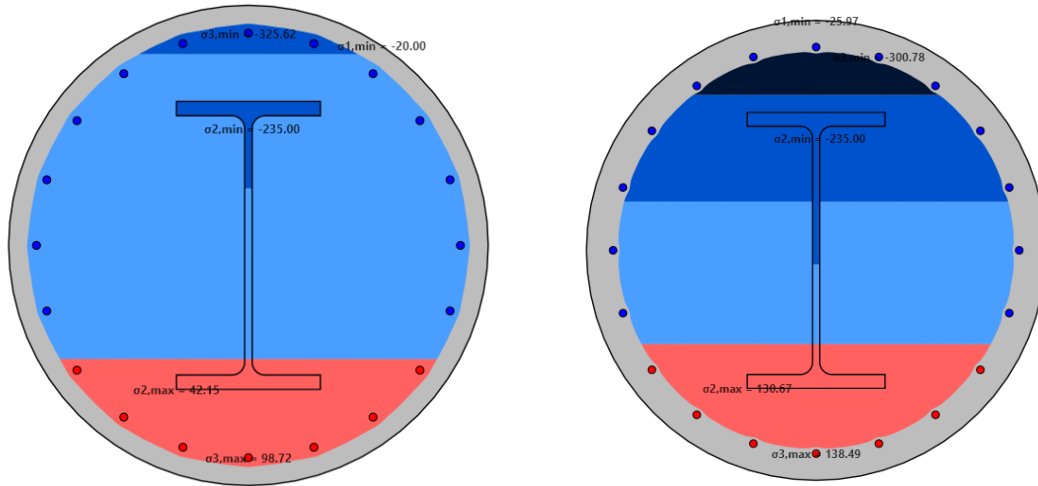
- Cirkelvormige doorsnede, $\varphi = 1000$ mm, C30/37.
- Ingebed HEB 600-profiel in staal S235.
- 20 Ø16 B500B-staven langs de omtrek.
- Genormaliseerde brandblootstelling ISO 834.



Doorsnedetoetsing

Voor een voor de toetsing opgegeven belasting (N, M_z, M_y) bepaalt SectionPro de rektoestand $(\varepsilon_0, \kappa_y, \kappa_z)$, één axiale rek en twee krommingen, die aan het inwendige evenwicht met de opgelegde krachten voldoet. Dit lost het iteratief op, waarbij bij elke stap de spanningen over de verhitte doorsnede worden geïntegreerd: het behouden beton over zijn contouren, de staven en het in elementen verdeelde profiel als vezels, elk beheerst door zijn gereduceerde wet.

Uit de geconvergeerde rektoestand haalt SectionPro de spanningen en rekken in elke vezel, de positie van de neutrale as en een benuttingsgraad die is gedefinieerd als de verhouding tussen de maatgevende vezelrek en de uiterste rek van dat materiaal. Een benuttingsgraad kleiner dan 1 betekent dat de belasting wordt gedragen; een waarde van 1 of meer betekent dat de gereduceerde doorsnede ze niet langer in evenwicht kan brengen.

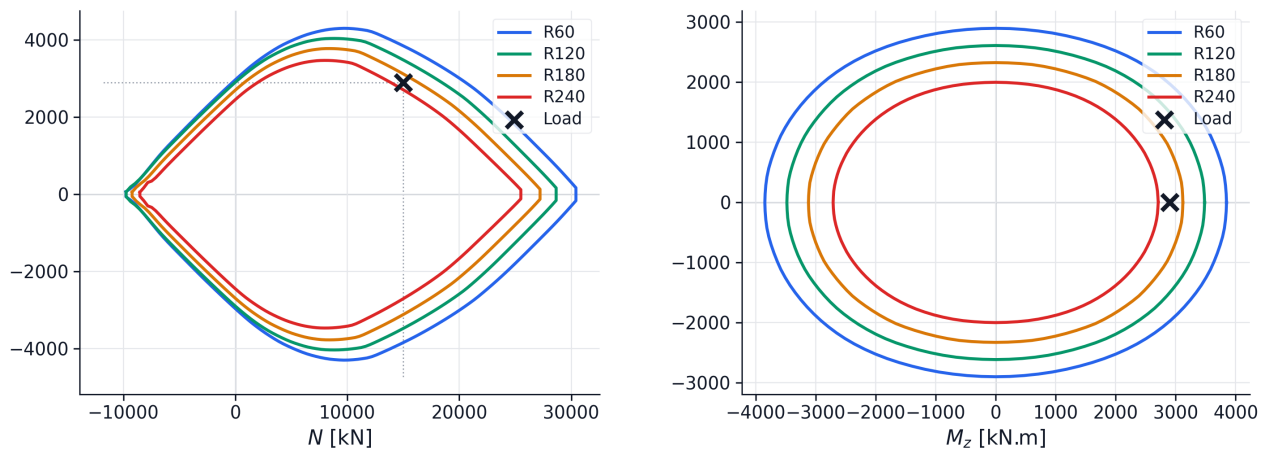


Figuur 1: Geconvergeerde spannings- en rektoestand bij R120 en R240 onder de belasting $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, in kN en kN · m.

In het voorbeeld is de belasting $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, in kN en kN · m. De aanzichten R120 en R240 plaatsen dezelfde belasting op een doorsnede waarvan het dragende oppervlak met de blootstelling krimpt: het beton binnen de 500 °C-isotherm neemt de druk op, terwijl de staven en het ingebedde profiel, die nog koel zijn, de buiging in evenwicht brengen. Bij R240 bezwijkt de doorsnede door verbrijzeling van het behouden beton.

N- M_z -interactiekromme

De N - M_z -interactiekromme is de weerstandsgrens van de doorsnede bij eenassige buiging: de verzameling van paren normaalkracht en buigend moment die ze om de beschouwde as kan dragen. Voor elke brandduur opnieuw berekend op de gereduceerde doorsnede, geven de over elkaar gelegde krommen een rechtstreeks beeld van de door de verhitting verloren capaciteit.

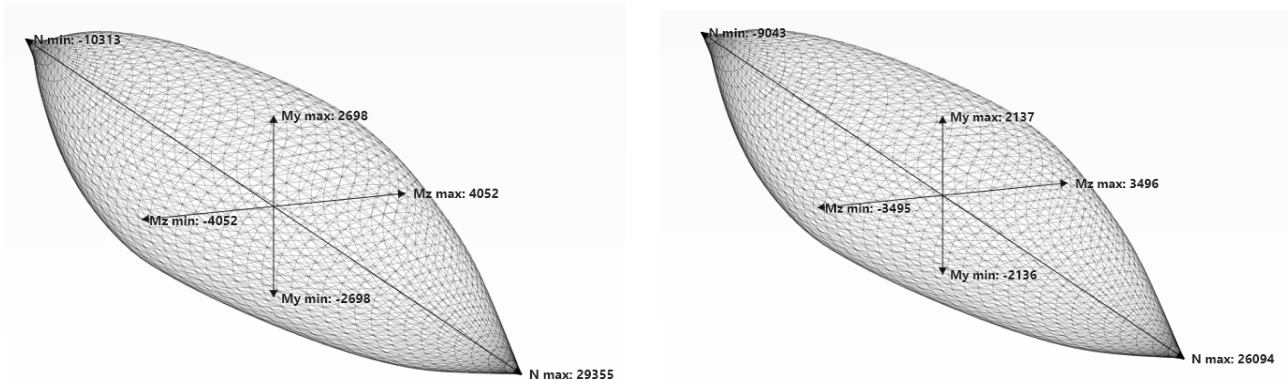


Figuur 2: N - M_z - en M_y - M_z -brandinteractiekrommen onder ISO 834.

De figuren tonen het capaciteitsverlies naarmate de temperatuur stijgt: de weerstandsdomeinen krimpen geleidelijk met de brandduur. Voor de gekozen belasting treedt het bezwijken op tussen R180 en R240.

3D-interactieoppervlak

Bij tweeassige buiging kan de weerstand niet langer door één enkele vlakke kromme worden weergegeven: ze wordt een gesloten oppervlak in de (N, M_z, M_y) -ruimte, het weerstandsdomein van de doorsnede. SectionPro berekent dit oppervlak rechtstreeks uit de uiterste rektoestanden van de doorsnede, genomen over elke buigrichting. Opgebouwd op de verhitte doorsnede, laat het toe om elke tweeassige belasting rechtstreeks te toetsen, zonder ze tot een voorkeursas te herleiden: een belasting binnen het oppervlak wordt gedragen, een belasting erbuiten overschrijdt de capaciteit.



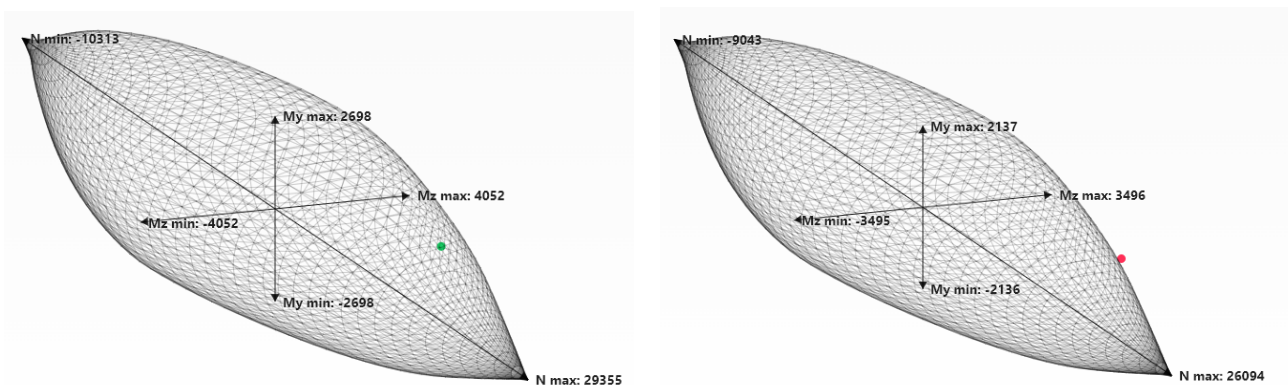
Figuur 3: Brandinteractieoppervlak $(N-M_z-M_y)$ bij R120 en R240.

Afstanden

De afstandsmodule toetst meerdere belastinggevallen met tweeassige buiging grafisch aan hetzelfde interactieoppervlak. Elke belasting (N, M_z, M_y) wordt op het oppervlak geprojecteerd en met een benuttingsgraad η teruggegeven, zodat de ingenieur in één oogopslag kan aflezen welke belastingen binnen het weerstandsdomein blijven en welke het overschrijden.

- $\eta < 1$: de belasting blijft **intern** en de doorsnede heeft reservecapaciteit.
- $\eta = 1$: de belasting ligt op de grens, precies op de limiet.
- $\eta > 1$: de belasting wordt **extern** en de capaciteit is overschreden.

Bij brand krimpt het domein met de blootstelling, zodat de status van eenzelfde belasting van binnen naar buiten kan omslaan naarmate de duur toeneemt.

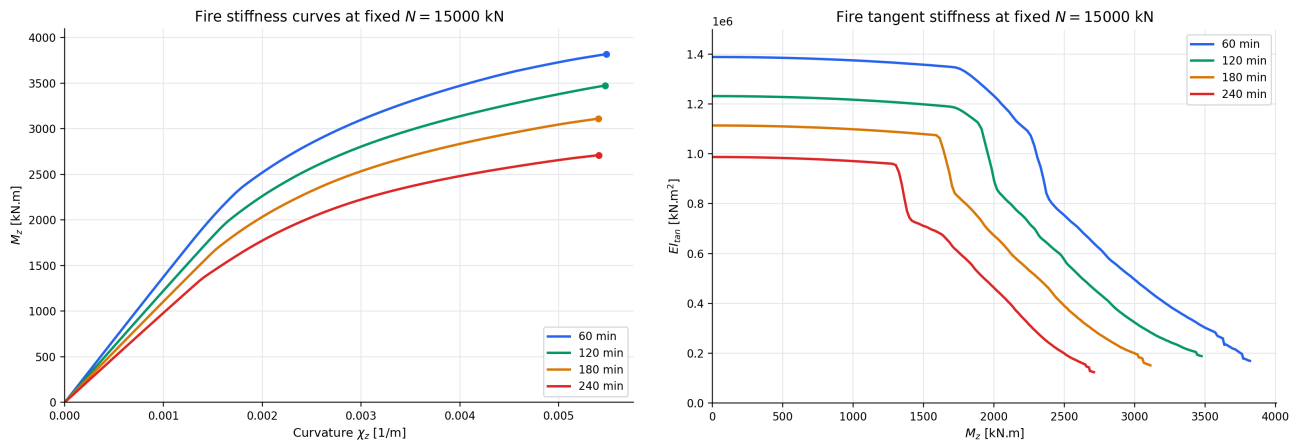


Figuur 4: Afstandsgebaseerde toetsing van een brandbelasting op het 3D-weerstandsdomein, bij R120 (links) en R240 (rechts). Het domein krimpt met de blootstelling; de genormaliseerde afstand η geeft aan of de belasting **intern** blijft ($\eta \leq 1$) of **extern** wordt ($\eta > 1$).

Het belastingpunt gaat van **intern** bij R120 naar **extern** bij R240, wat overeenstemt met de resultaten van de doorsnedetoetsing en de interactiekromme.

Stijfheid bij brand

De verhitting vermindert ook de buigstijfheid van kolommen. Naarmate de kromming toeneemt, kan dit stijfheidsverlies de tweede-orde-effecten versterken, nog voordat de uiterste weerstand wordt bereikt.



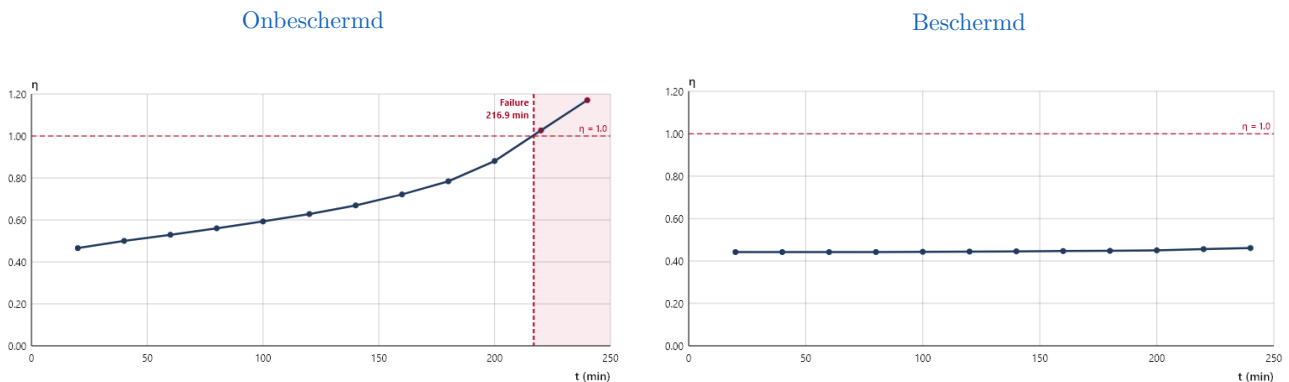
Figuur 5: Stijfheid bij brand bij $N = 15000$ kN en $M_y = 0$. Links de moment–kromming-respons M_z – χ . Rechts de tangent–stijfheid EI_{tan} ten opzichte van M_z .

De krommen tonen een sterke stijfheidsdegradatie met de brandduur: de moment–kromming-respons vlakkt af en de tangentstijfheid daalt abrupt naarmate de verhitte doorsnede het bezwijken nadert.

Bezwijktijd

De bezwijktijd is de berekening die het meest specifiek is voor brand. Voor een vaste gebruiksbelasting bouwt SectionPro de gereduceerde doorsnede op elk thermisch uitvoertijdstip opnieuw op en lost daarop het evenwicht op. De capaciteit daalt naarmate de 500 °C-isotherm krimpt en de staaltemperaturen stijgen; de bezwijktijd is het tijdstip waarop de belasting het weerstandsdomein verlaat, wanneer de gereduceerde doorsnede ze niet langer binnen de rekgrenzen van de materialen in evenwicht kan brengen.

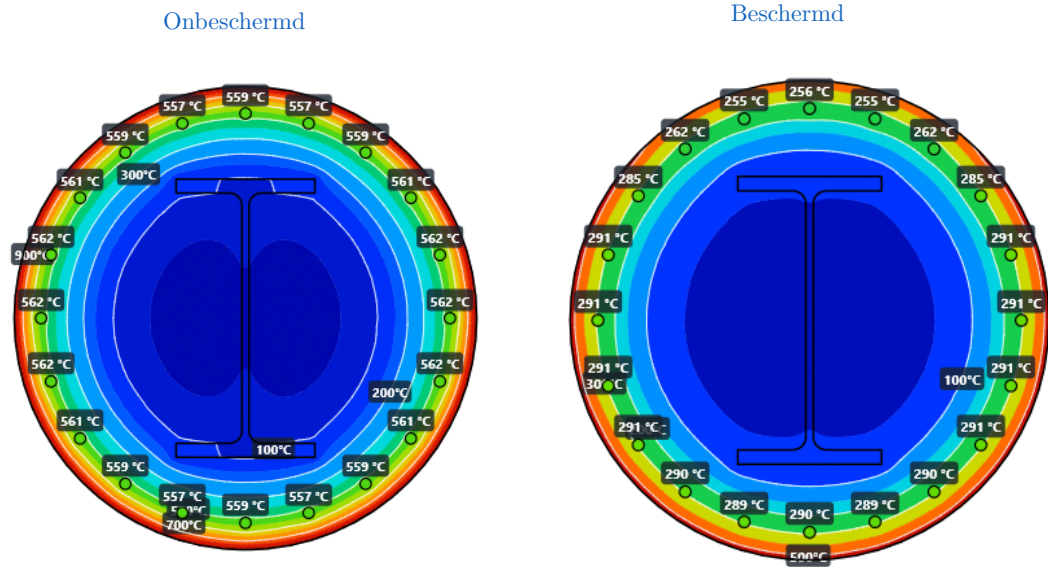
Vervolgens wordt op dezelfde doorsnede een isolatietest uitgevoerd om na te gaan of een passieve bescherming dit specifieke brandwerendheidsprobleem oplost. Dezelfde belasting wordt eerst op de kale doorsnede geëvalueerd, en vervolgens met een doorlopende isolatielaag over de omtrek van het beton.



Figuur 6: Bezwijktijd onder de belasting $(N, M_z, M_y) = (15000, 2900, 0)$, in kN en kN·m. De passieve bescherming verschuift het verlaten van het weerstandsdomein in dit geval voorbij R240.

De bescherming wordt gemodelleerd als een doorlopende passieve laag die door vier thermische parameters wordt beschreven. Voor deze isolatietest werden de volgende waarden gebruikt:

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



Figuur 7: Temperatuurveld bij R240, kaal en beschermd.

De bescherming is in dit geval zeer doeltreffend: de passieve wapeningsstaven dalen van ongeveer 560 °C naar ongeveer 300 °C, en het beton blijft ook na 240 min onder 500 °C, zodat de volledige betondoorsnede mechanisch behouden blijft.

Softwareprestaties

De hoofdtaak is de berekening van het thermische veld bij de gevraagde brandduren. Zodra deze temperatuurvelden beschikbaar zijn, verlopen de mechanische toetsingen snel en blijft de volledige workflow voor dit voorbeeld onder één seconde.

Berekening	Tijd
Thermisch veld (2 stappen, R120/R240)	0,20 s
Doorsnedetoetsing (spanning-rek)	+ 4 ms
N-Mz-interactiekromme (160 punten)	+ 31 ms
My-Mz-domein bij vaste N	+ 35 ms
3D-interactieoppervlak (50 × 50)	+ 134 ms
Stijfheidskromme (moment-kromming)	+ 11 ms
Bezwijktijd (volledige sweep)	+ 52 ms

Composietkolom uit het artikel, gemeten op een desktopmachine. De mechanische tijden zijn gegeven na het oplossen van het thermische veld.

Conclusie

De 500 °C-isothermmethode zet het thermische veld om in een gereduceerde dragende doorsnede: het beton behoudt zijn sterkte binnen de isotherm, de staven en het ingebedde staal worden verzwakt

door hun lokale temperatuur. Vanuit deze verhitte toestand levert de analyse de weerstand tegen de opgelegde belasting, de interactiedomeinen, de afstanden van de belastingen, het stijfheidsverlies en het tijdstip waarop de belasting het weerstandsdomein verlaat.

Bij de bestudeerde composietkolom blijft het ingebedde profiel afgeschermd door het omringende beton en behoudt het een aanzienlijk deel van de capaciteit bij de tussenliggende duren. De doorlopende passieve bescherming verlaagt de temperaturen aanzienlijk bij R240 en verschuift de bezwijktijd van de bestudeerde belasting naar achteren.

De verschillende berekeningen zijn onderling consistent: ze wijzen alle op hetzelfde capaciteitsverlies en op hetzelfde bezwijkbereik. De doorsnedetoetsing geeft de gedetailleerde spannings- en rektoestand voor één belasting. De interactiekromme is het geprefereerde ingenieursbeeld wanneer een weerstandsdomein in een vlak nodig is. Het interactieoppervlak geeft het globale tweeassige domein. De afstandscontrole geeft een snelle OK/KO-status voor meerdere belastingen. De stijfheidskrommen tonen of de doorsnede in een regime van sterke stijfheidsdegradatie is beland. De bezwijktijdanalyse geeft ten slotte een benaderende blootstellingstijd voordat de belasting niet langer kan worden gedragen. Elk beeld heeft zijn eigen sterkte, en samen geven ze een coherente lezing van het brandgedrag.