

Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 1

**Deel 1B:**  
**Effecten van brand op constructies**

Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties



Ministerie van Verkeer en Waterstaat

<b>Inhoudsopgave</b>		pagina
<b>Samenvatting</b>		<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>De kritische stralingsintensiteit</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Nadere uitwerking voor materiële schade</b>	<b>9</b>
3.1	Algemeen	9
3.2	Hout	11
3.3	Kunststoffen	12
3.4	Glas	12
3.5	Staal	13
3.6	Evaluatie	15
<b>4</b>	<b>Materiële schade door een wolkbrand</b>	<b>17</b>
<b>Literatuurreferenties</b>		<b>18</b>
<b>Symbolenlijst</b>		<b>19</b>
<b>Bijlage 1: Overwegingen met betrekking tot het niet-stationaire karakter van de warmtestroom</b>		<b>20</b>

---

## Samenvatting

Bij het berekenen van materiële schade door warmtestraling wordt onderscheid gemaakt tussen twee niveaus:

- schadeniveau 1: het in brand geraken van aan de warmtestraling blootgestelde oppervlakken, dan wel het breken of anderszins bezwijken van constructieonderdelen.
- schadeniveau 2: het optreden van schade zoals ernstige verkleuring van het materiaaloppervlak, afbladderen van de verf en/of het belangrijk vervormen van constructieonderdelen.

Voor de materialen: hout, kunststoffen, glas en onbekleed staal worden globale waarden voor de stralingsintensiteit aangegeven, waarbij voor verschillende materialen toegepast aan de buitenzijde van gebouwen en installaties, op schade moet worden gerekend. Hiertoe is het begrip "kritische stralingsintensiteit" geïntroduceerd, waaronder die stralingsintensiteit wordt verstaan die bij langdurige expositie nog juist schade oplevert.

De gevonden waarden voor de kritische stralingsintensiteit zijn samengevat in Tabel 1-1. Hieruit blijkt dat glas op basis van een niveau 1 beoordeling het meest kritisch is ( $q_{i(1)} = 4 \text{ kW/m}^2$ ). De kritische waarde voor hout of kunststoffen en staal, respectievelijk 15 en  $100 \text{ kW/m}^2$ , liggen aanzienlijk hoger.

Beschouwt men de schade op niveau 2, dan blijken geveerd hout en kunststoffen het meest kwetsbaar ( $q_{i(2)} = 2 \text{ kW/m}^2$ ). Voor staal worden kritische stralingsintensiteiten gevonden die een orde van grootte hoger liggen ( $= 25 \text{ kW/m}^2$ ). Voor glas wordt een beoordeling op niveau 2 niet relevant geacht.

De in Tabel 1-1 opgenomen waarden moeten gezien worden als globale uitkomsten, geldend voor niet al te korte expositieduren, bijvoorbeeld meer dan 30 minuten. Voor korter durende branden, kan een meer gedetailleerde beschouwing noodzakelijk zijn, waarbij rekening wordt gehouden met de geometrie van het beschouwde constructie-element en de oriëntatie ervan op de straling. Zie bijlage 1. Dit kan met name van belang zijn voor de schadebeoordeling van staalconstructies op niveau 2.

**Tabel 1-1: Globale waarden voor de kritische temperatuur en kritische stralingsintensiteit van de beschouwde materialen**

Materiaal	Kritische temperatuur [K absoluut]		Kritische stralingsintensiteit [ $\text{kW/m}^2$ ]	
	Schadeniveau 1	Schadeniveau 2	Schadeniveau 1	Schadeniveau 2
hout	683	373	15	2
kunststoffen	-	373	15	2
glas	393	-	4	-
staal	773	473	100	25

Naast materiële schade door warmtestraling is ook mogelijk schade door een wolkbrand.

De materiële schade ten gevolge van een "wolkbrand" zal binnen de wolk vrijwel volledig zijn. Door het directe vlamcontact zullen op uitgebreide schaal secundaire branden ontstaan. Door de korte duur van de warmtestraling buiten de wolk zal de materiële schade daar gering zijn.

## 1 Inleiding

Onder materiële schade wordt verstaan de schade aan de bebouwde omgeving, waaronder begrepen installaties. De materialen zoals die toegepast worden in gevels van gebouwen spelen vanzelfsprekend een belangrijke rol. Als kritisch kunnen worden aangemerkt:

- hout
- kunststoffen
- glas
- staal.

De eerst genoemde materialen (hout, kunststoffen) zijn brandbaar en kunnen als zodanig aanleiding geven tot secundaire branden.

Glas is onbrandbaar, maar glazen ruiten kunnen onder invloed van optredende temperatuurverschillen breken. Te meer daar glas in grote hoeveelheden in gevels wordt toegepast, kan glasbreuk tot een aanzienlijke gevolgschade leiden.

Staal is eveneens een onbrandbaar materiaal. Bij toenemende temperatuur nemen de sterkte en stijfheid van staal echter betrekkelijk snel af. Daarom is het denkbaar dat een stalen constructieonderdeel onder invloed van warmtestraling zal bezwijken. Met name in installaties (bijvoorbeeld hoogspanningsmasten) kan dit tot aanzienlijke gevolgschade leiden. Om deze reden wordt in deze studie ook enige aandacht geschonken aan staal dat niet tegen verhitting beschermd is (zogenaamd onbekleed staal).

Onbrandbare en hittebestendige materialen zoals metselwerk blijven buiten beschouwing. Dit geldt ook voor gewapend beton en bekleed staal omdat in deze gevallen warmtestraling slechts in extreme situaties problemen oplevert, bijvoorbeeld indien het beschouwde object zich in of direct naast de brand bevindt. Bovendien zal de straling waarbij schade optreedt dan in zeer belangrijke mate afhangen van de toegepaste betondekking respectievelijk bekledingsdikte, waardoor een globale beschouwing vrijwel onmogelijk wordt. Voor een beoordeling van beklede staalconstructies onder willekeurige brandomstandigheden wordt verwezen naar [1].

Ten aanzien van de schade zullen twee niveaus worden onderscheiden:

- schadeniveau 1: het in brand geraken van aan warmtestraling blootgestelde oppervlakken, dan wel het breken of anderszins bezwijken van constructie onderdelen.
- schadeniveau 2: het optreden van schade zoals ernstige verkleuring van het materiaaloppervlak, afbladderen van de verf en/of het belangrijk vervormen van constructie onderdelen.

Duidelijk zal zijn dat, voor een gegeven situatie, de straling om schadeniveau 1 te bereiken hoger ligt dan voor schadeniveau 2.

Meer in het bijzonder is het doel van het onderzoek om voor de hierboven onderscheiden materialen en schadeniveaus, indicaties te geven voor de kritische warmtestralingsintensiteit. Bij de beoordeling van het effect van de straling zal steeds worden aangenomen dat er sprake is van een constante stralingsintensiteit en een zodanig lange expositieduur, dat zich aan het oppervlak van de beschouwde materialen een stationaire warmtetoestand instelt. Omdat het in deze studie gaat om een globale beoordeling van het schademechanisme, zal worden uitgegaan van sterk geschematiseerde warmtestroommodellen. Per hierboven onderscheiden materiaal zal op de aannamen worden

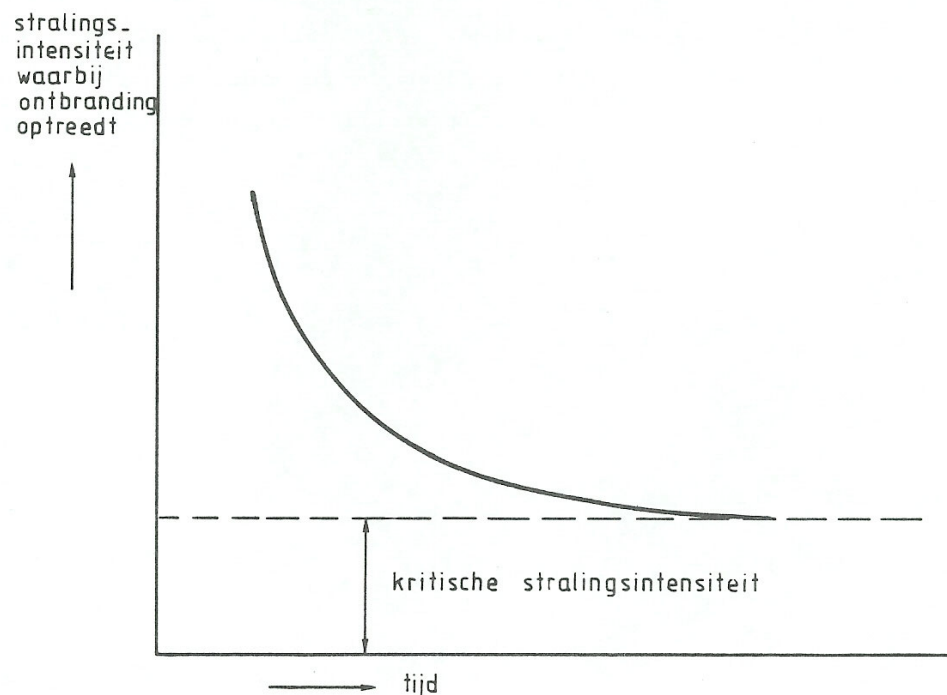
---

ingegaan en zullen kritische stralingsniveaus worden afgeleid, zie hoofdstuk 3. Eerst zal echter nader worden ingegaan op het begrip "kritische stralingsintensiteit" zoals dit in brandveiligheidsbeschouwingen in het algemeen wordt gehanteerd, als mede op de in het kader van deze studie noodzakelijke uitbreiding van dit begrip.

## 2 De kritische stralingsintensiteit

Materiaaloppervlakken kunnen onder invloed van warmtestraling ontbranden. Van belang hierbij zijn de stralingsintensiteit en de expositieduur. Naar mate de expositie langer aanhoudt zal in beginsel een steeds geringere stralingsintensiteit voldoende zijn om het materiaaloppervlak tot ontbranding te brengen. Beneden een bepaalde waarde van de stralingsintensiteit zal ontbranding uitblijven, ongeacht de lengte van de expositieduur. Deze grenswaarde wordt uitgeduid met het begrip "kritische stralingsintensiteit". Zie Figuur 2-1. De kritische stralingsintensiteit is, behalve van de aard van het beschouwde materiaal, afhankelijk van de omstandigheden. Met name het al of niet aanwezig zijn van primaire warmtebronnen ter plaatse van het materiaaloppervlak is hierbij van betekenis. In dit verband worden vaak de volgende mogelijkheden onderscheiden [2] [3]:

- a) aanwezigheid van vuur, in direct contact met het materiaaloppervlak;
- b) aanwezigheid van vuur, zonder dat er sprake is van direct contact met het materiaaloppervlak;
- c) afwezigheid van vuur.



**Figuur 2-1: Het begrip "kritische stralingsintensiteit".**

Een overzicht van experimenteel bepaalde waarden voor de aldus gedefinieerde kritische stralingsintensiteit van verschillende materialen is, voor de bovenomschreven omstandigheden, weergegeven in Tabel 2-1. Andere factoren die de kritische stralingsintensiteit beïnvloeden, zoals dikte en oppervlakgesteldheid van het aangestraalde materiaal, mogelijkheden voor convectieve warmteoverdracht (wind, positie materiaaloppervlak) zijn niet gespecificeerd. Daarom hebben de in Tabel 2-1 opgenomen waarden slechts een globale betekenis. Uit Tabel 2-1 blijkt wel dat tussen de materialen onderling belangrijke verschillen in kritische stralingsintensiteit kunnen optreden. Ook de invloed van primaire warmtebronnen is aanzienlijk. In dit verband wordt opgemerkt dat in een praktische brandsituatie de aanwezigheid van een primaire warmtebron ter plaatse van het aangestraalde oppervlak niet mag worden uitgesloten. Hierbij kan gedacht worden aan vonken of vliegvuur. In het algemeen is het echter niet zo dat voor de beoordeling van brandoverslag<sup>1</sup> gerekend hoeft te worden op een direct vlamcontact. Daarom worden voor de kritische stralingsintensiteit in brandveiligheidsbeschouwingen veelal de waarden genomen zoals weergegeven in de middelste kolom van Tabel 2-1. Aldus wordt voor de kritische stralingsintensiteit van hout in het algemeen aangehouden: 15 kW/m<sup>2</sup>.

**Tabel 2-1: Enkele kritische stralingsintensiteiten voor verschillende brandbare materialen [2], [3].**

Materiaal	Kritische stralingsintensiteit [kW/m <sup>2</sup> ]		
	Met aansteekvlam; wel contact met het oppervlak	Met aansteekvlam; zonder contact met het oppervlak	Zonder aansteekvlam
Hout	5	15	35
Hennep, jute, vlas			40
Dakmateriaal gedrenkt in asfaltbitumen	3		
Dakmateriaal afgedekt door aluminiumplaat	75		
Textiel			35
Zachtboard		6	25
Hardboard	5	10	30
Kurk		3	23

Uitgangspunt bij het boven behandelde concept voor kritische stralingsintensiteit is het tot ontbranding komen van het aangestraalde materiaaloppervlak.

Zoals reeds in hoofdstuk 1 naar voren is gebracht, is dit echter slechts één van de mogelijke schademechanismen. Andere schademechanismen zijn:

<sup>1</sup> Onder brandoverslag wordt het zich uitbreiden via de buitenlucht van een brand naar andere objecten verstaan.

- het breken of bezwijken van constructieonderdelen zonder dat er sprake is van verbranding; samen met het in brand geraken van een oppervlak behoort deze schade tot het zogenaamde "schadeniveau 1" en is met name van belang voor glas en staal;
- het zodanig verkleuren of vervormen van het materiaaloppervlak dat, ook zonder het ontstaan van brand, de aangestraalde bouwelementen niet meer bruikbaar zijn en vervangen of hersteld moeten worden; deze schade behoort tot het zogenaamde "schadeniveau 2" en is met name van belang voor verflagen op hout en staal en voor kunststoffen.

Anders dan voor de kritische stralingsintensiteit met betrekking tot het optreden van brandoverslag, zijn voor de beide laatstgenoemde schademechanismen geen kritische stralingsintensiteiten bekend uit de literatuur. Wel kunnen globale waarden worden aangegeven voor het temperatuurniveau waarbij deze schademechanismen optreden. Op basis hiervan zullen in de volgende paragraaf schattingen gemaakt worden van de overeenkomstige kritische stralingsintensiteit.

---



### 3 Nadere uitwerking voor materiële schade

#### 3.1 Algemeen

Met behulp van een warmtebalans is het mogelijk een verband te leggen tussen de op een oppervlak invallende stralingsintensiteit ( $q_i$  in  $W/m^2$ ) en de temperatuur die aan zo'n oppervlak wordt bereikt ( $Y$  in K). Een belangrijke vereenvoudiging is mogelijk indien wordt aangenomen dat zich aan het oppervlak een stationaire warmtestroom instelt.

Beschouwt men bovendien materialen die de warmte slecht geleiden, zoals hout en kunststoffen, dan kan het opstellen van de warmtebalans verder worden vereenvoudigd door de warmtegeleiding in het materiaal te verwaarlozen. De warmtebalans neemt daarmee de volgende vorm aan:

$$a * q_i - \varepsilon \sigma (Y)^4 - \alpha (Y - Y_0) = 0 \quad (3.1)$$

met:

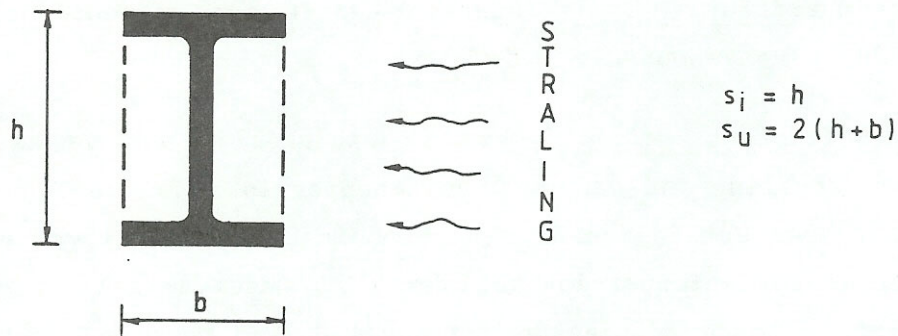
$q_i$	= invallende stralingsintensiteit	[ $W/m^2$ ]
$Y$	= temperatuur aan het oppervlak	[K]
$Y_0$	= omgevingstemperatuur	[K]
$a$	= absorptiecoëfficiënt	[-]
$\alpha$	= coëfficiënt voor convectieve warmteoverdracht	[ $W/(m^2K)$ ]
$\sigma$	= constante van Stephan Boltzmann	= $5,67 \times 10^{-8}$ [ $W/(m^2K^4)$ ]
$\varepsilon$	= emissiecoëfficiënt	[-]

Bij goed geleidende materialen, zoals glas en staal mag (3.1) niet gebruikt worden omdat er nu ook warmteverliezen zullen optreden aan de oppervlakken die niet aan de straling zijn blootgesteld.

Voor een glazen ruit is het oppervlak dat wordt blootgesteld aan straling (= buitenzijde) gelijk aan de helft van het totale oppervlak waarlangs warmte wordt afgevoerd (= binnenzijde + buitenzijde). Veronderstelt men verder dat in het glas de temperatuur uniform verdeeld is, dan wordt voor de warmtebalans gevonden:

$$a * q_i - 2 \{ \varepsilon \sigma * 2(T)^4 + \alpha (T - T_0) \} = 0 \quad (3.2)$$

Bij stalen constructie-elementen ligt de situatie iets gecompliceerder omdat de verhouding tussen het aan straling blootgestelde oppervlak en het oppervlak waarlangs warmte wordt afgevoerd, geen vaste waarde aanneemt, maar geheel bepaald wordt door de geometrie van het object. Uitgaande van een stalen constructie-element met een I-vormige doorsnede, is hiervan in Figuur 3-1 een illustratie gegeven.



**Figuur 3-1 Oppervlakken van een staalprofiel waaraan warmte wordt toegevoerd (=  $s_i$ ) en waarlangs warmte wordt afgevoerd (=  $s_u$ )**

Vanuit het oogpunt van warmteoverdracht door straling ligt het voor de hand het I-profiel te schematiseren door de omschreven rechthoek van dit profiel. Voor de situatie zoals weergegeven in Figuur 3-1 geldt nu dat, per lengte-eenheid, het oppervlak waaraan stralingswarmte wordt toegevoerd  $s_i = h$  bedraagt; voor het oppervlak waarlangs warmte wordt afgevoerd geldt:  $s_u = 2(h + b)$ . Om redenen van eenvoud wordt ook voor de convectieve warmteoverdracht het I-profiel geschematiseerd tot de rechthoek  $b \times h$ , hetgeen bovendien een conservatieve oplossing oplevert. Indien nu weer wordt uitgegaan van een uniforme temperatuurverdeling in het staal, geldt voor de warmtebalans in de stationaire toestand:

$$a * q_i - \left( \frac{s_i}{s_u} \right) \{ \epsilon \sigma (T)^4 + \alpha (T - T_0) \} = 0 \quad (3.3)$$

Voor  $s_i$  is  $1/2 s_u$  wordt uiteraard de voor de glazen ruit afgeleide (3.2) teruggevonden.

Met behulp van (3.1), (3.2) of (3.3) kan nu de invallende straling  $q_i$  worden uitgedrukt in de oppervlaktetemperatuur  $T$ , indien schattingen gemaakt kunnen worden van de omgevingstemperatuur ( $= T_0$ ), de absorptiecoëfficiënt ( $= a$ ), de emissiecoëfficiënt ( $= \epsilon$ ) en de coëfficiënt voor convectieve warmteoverdracht ( $= \alpha$ ).

Ten aanzien van genoemde parameters worden de volgende aannamen gedaan:

omgevingstemperatuur ( $= T_0$ ):

Hiervoor wordt een conventionele waarde van  $T_0 = 293$  K aangehouden.

absorptiecoëfficiënt ( $= a$ ):

Deze is afhankelijk van de aard van de invallende straling en van het buitenoppervlak van de aangestraalde materialen. Voor schadeniveau 1 (verbranding, bezwijken) wordt aangenomen dat het materiaaloppervlak geblakerd is. Onder dergelijke omstandigheden dient te worden uitgegaan van  $a = 1,0$ . Bij beoordeling van schade op niveau 2 geldt een gunstiger waarde. Uitgaande van de gegevens

voor zonnestraling wordt, als conservatieve schatting, aangehouden:  $a = 0,7$  [4].

emissiecoëfficiënt ( $=\varepsilon$ ):

Deze is afhankelijk van de temperatuur en van de aard van het aangestraalde oppervlak. Voor de beschouwing van de schade op zowel niveau 1 als niveau 2 zal worden aangehouden:  $\varepsilon = 1$ .

convectiecoëfficiënt ( $=\alpha$ ):

Deze wordt bepaald door de luchtstroming langs het aangestraalde oppervlak en is daarmee onder meer afhankelijk van de temperatuur en de positie van het oppervlak en van de windcondities. Ten aanzien van de windcondities zal worden uitgegaan van de conservatieve aanname dat de windsnelheid verwaarloosbaar is (zogenaamde vrije convectie). Onder deze omstandigheden kan voor een oppervlaktetemperatuur van 293 K worden afgeleid, dat  $\alpha = 2$  à  $3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bedraagt. Bij een oppervlaktetemperatuur van 373 à 473 K wordt gevonden:  $\alpha = 7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  [5]. De betekenis van de convectieve warmteoverdracht bij toenemende oppervlaktetemperatuur neemt sterk af ten opzichte van de warmteoverdracht door straling, zie betr. (3.1)-(3.3). Daarom zal in het navolgende, voor de schadebeoordeling op zowel niveau 1 als niveau 2, worden uitgegaan van  $\alpha = 7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Opmerking:

De totale invallende stralingsintensiteit is in feite afkomstig van twee bronnen:

- a) de primaire stralingsbron;
- b) secundaire stralingsbronnen ten gevolge van reflecties en emissies van oppervlakken in de omgeving.

In verband met het in het algemeen onbekende karakter van de omgeving van het aangestraalde oppervlak, wordt de bijdrage van de secundaire bronnen verwaarloosd, gezien ook de onzekerheid in de intensiteit van de primaire bron. (N.B.: impliciet is het uitgangspunt dat het aangestraalde oppervlak niet gedeeltelijk wordt afgeschermd).

## 3.2 Hout

Het is gebruikelijk om bij de schadebeoordeling van hout op niveau 1 (= ontbranding) uit te gaan van een kritische stralingsintensiteit van  $15 \text{ kW}/\text{m}^2$ . Op basis van in de vorige paragraaf gedane aannamen kan worden nagegaan met welke oppervlaktetemperatuur deze stralingsintensiteit correspondeert. Substitueer daartoe in vergelijking (3.1):

$$\begin{aligned}q_i &= 15 \text{ kW}/\text{m}^2 \\T_0 &= 293 \text{ K} \\a &= 1,0 \\ \varepsilon &= 1,0 \\ \alpha &= 7 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}.\end{aligned}$$

Voor de oppervlaktetemperatuur wordt gevonden:  $T_{(1)} = 683 \text{ K}$ .

Bij de beoordeling van schade op niveau 2 (= ernstige verkleuring) speelt met name het gedrag van op het hout aangebrachte verf een belangrijke rol. Voor hout worden in Nederland voornamelijk verven op alkydhars-basis toegepast. Deze verfsoort begint te verkleuren bij temperaturen hoger dan 343 K. Verweking treedt op bij een temperatuur van 373 à 393 K. Het lijkt daarom redelijk om als kritieke

---

oppervlaktetemperatuur voor een schadebeoordeling op niveau 2 te nemen:  $T = 373 \text{ K}$ .

Met behulp van vergelijking (3.1) en met  $a = 0,7$  (!) wordt nu voor de overeenkomstige kritische stralingsintensiteit gevonden:  $q_{i(2)} = 2 \text{ kW/m}^2$

### 3.3 Kunststoffen

Kunststoffen die veelvuldig aan de buitenzijde van gebouwen worden toegepast zijn:

- gewapend polyester in gevelpanelen;
- PVC in raamprofielen en schrootjes;
- perspex in kunststoframen.

Het brandgedrag van kunststoffen vertoont een vrij grote variatie, een en ander afhankelijk van de aard en de precieze samenstelling van het materiaal. Als een redelijk gemiddelde mag worden aangenomen dat ontbranding of ernstige desintegratie van bovengenoemde kunststoffen optreedt onder vergelijkbare omstandigheden als waarbij hout tot ontbranding komt [5]. Hieruit volgt dat voor de kritische stralingsintensiteit voor een schadebeoordeling op niveau 1 mag worden aangehouden:  $q_{i(1)} = 15 \text{ kW/m}^2$ .

Verkleuring en, bij thermoplasten, verweking van kunststoffen treedt op bij ca.  $373 \text{ K}$ . Bovendien blijkt bij sommige kunststoffen reeds vanaf ca.  $343 \text{ K}$  degradatie (= fysische veroudering) op te treden. Daar dit verschijnsel eerst bij zeer langdurige expositie optreedt, zal het hier verder buiten beschouwing blijven. De kritische temperatuur voor kunststoffen met betrekking tot een schadebeoordeling op niveau 2 komt daarmee, als in het geval van geveerd hout, op  $T = 373 \text{ K}$ . Met behulp van vergelijking (3.1) levert dit weer een kritische stralingsintensiteit op van  $= 2 \text{ kW/m}^2$ .

### 3.4 Glas

Voor glas kan volstaan worden met schadebeoordeling op niveau 1 (= breuk). Immers, op verkleuring van glas onder warmtestraling hoeft niet gerekend te worden, terwijl eventuele roetaanslag op eenvoudige wijze te verwijderen is.

Het scheuren (springen) van glas onder invloed van warmtestraling wordt veroorzaakt door het optreden van een niet-homogene temperatuurverdeling in het glas. Omdat de vervormingen die hiervan in beginsel het gevolg zijn geheel of gedeeltelijk worden verhinderd, zullen spanningen in het glas ontstaan. Met name de trekspanningen ter plaatse van de sponningen, die optreden omdat het glas daar beschermd is tegen de straling en dus in temperatuur achter blijft, zijn in dit verband van belang.

Zowel op theoretische gronden als ook uit proeven blijkt dat een temperatuurverschil van  $100 \text{ K}$  tot scheurvorming leidt [6]. Wordt nu aangenomen dat het glas ter plaatse van de sponningen in het geheel niet in temperatuur stijgt en dat de begintemperatuur  $293 \text{ K}$  bedraagt, dan volgt de kritieke temperatuur voor een niveau 1 beoordeling van glas uit:  $T = 393 \text{ K}$ . Met behulp van (3.2) is nu de kritische stralingsintensiteit te berekenen, waarbij voor de absorptiecoëfficiënt van glas  $a = 1$  wordt aangehouden. Er volgt:  $q_{i(1)} = 4 \text{ kW/m}^2$ .

### 3.5 Staal

Bij de beoordeling van stalen constructie-elementen is in beginsel zowel het schadeniveau 1 als het schadeniveau 2 van belang.

Bezwijken van een stalen constructie-element onder invloed van warmtestraling treedt praktisch gesproken slechts op bij elementen met een dragende functie. De bezwijktemperatuur is afhankelijk van de belasting en ligt voor een op de gebruikelijke wijze gedimensioneerde staalconstructie tussen de 673 en 873 K; voor een gemiddelde, globale waarde kan 773 K worden aangehouden [7]. Met behulp van vergelijking (3.3) en voor  $a = 1,0$  kan nu de bijbehorende waarde voor de kritische stralingsintensiteit worden berekend. Deze blijkt afhankelijk van de verhouding  $s_i/s_u$ , waarbij  $s_i$  en  $s_u$  in paragraaf 3.1 zijn gedefinieerd. In is het bedoelde verband weergegeven.

Schade op niveau 2 treedt op indien het op een stalen constructiedeel aangebrachte verfsysteem zodanig beschadigd wordt, dat overschilderen noodzakelijk is. Op staal worden in het algemeen moffellakken toegepast. Verkleuring en/of verweking van dergelijke lakken vindt plaats bij een temperatuur van ca. 473 K. Uitgaande van deze grenswaarde is voor  $a = 0,7$  de kritische stralingsintensiteit  $q_{i(2)}$  weer met behulp van (3.3) te berekenen. Het aldus gevonden verband tussen  $q_{i(2)}$  en de factor  $s_i/s_u$  is eveneens in Figuur 3-2 weergegeven.

Voor een goed begrip van Figuur 3-2 is het noodzakelijk enige notie te hebben van de waarden van  $s_i/s_u$  die in de praktijk kunnen voorkomen. Beschouw hiertoe Figuur 3-3a. Voor profielen waarvan de hoogte (= h) gelijk is aan de breedte (= b), zoals bij de voor kolommen veel toegepaste HEA- en HEB-profielen met dwarsafmetingen kleiner dan 300 mm of bij vierkante buisprofielen, wordt bij eenzijdige bestraling gevonden:  $s_i/s_u = 0,25$ . Bij profielen waarvan de breedte-hoogte verhouding ongelijk aan 1 is, is de oriëntatie van de straling ten opzichte van het profiel van belang. Zo geldt voor in de praktijk veel toegepaste IPE-liggerprofielen met een hoogte kleiner dan = 400 mm:  $h/b = 2$ . Indien de straling op het lijf van een dergelijk profiel is gericht, wordt gevonden (zie Figuur 3-3b):

$$\frac{s_i}{s_u} = \frac{2}{6} = 0,33$$

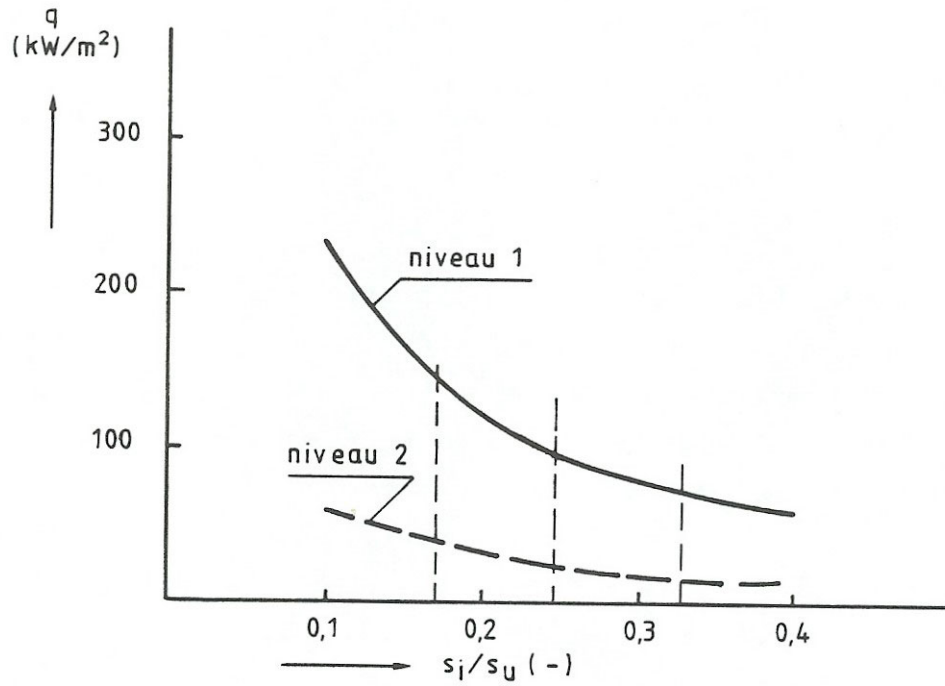
Is daarentegen de straling gericht op één van de flenzen, dan wordt gevonden (zie Figuur 3-3c):

$$\frac{s_i}{s_u} = \frac{1}{6} = 0,17$$

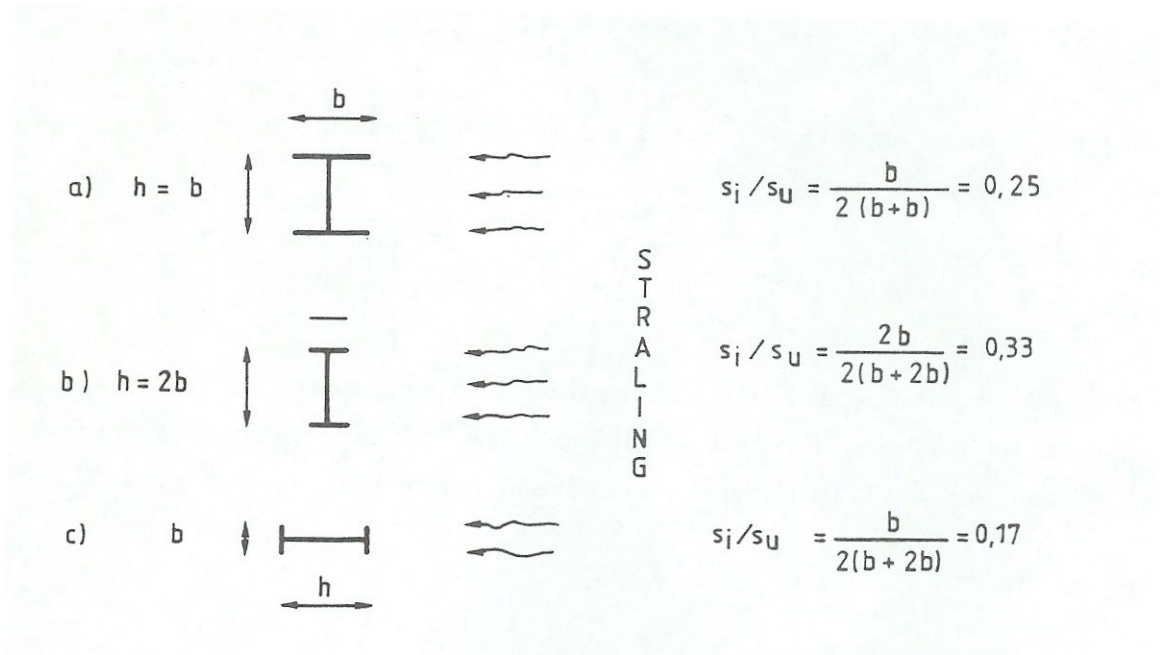
Voorgesteld wordt nu als globaal gemiddelde voor staalprofielen aan te houden:  $s_i/s_u = 0,25$ . Daarmee wordt voor de kritische stralingsintensiteit op respectievelijk niveau 1 en niveau 2 gevonden (zie Figuur 3-2):

$$q_{i(1)} = 100 \text{ kW/m}^2$$

$$q_{i(2)} = 25 \text{ kW/m}^2$$



**Figuur 3-2 Kritische stralingsintensiteiten voor staal voor een schadeniveau 1,2 beoordeling, als functie van de factor  $s_i/s_u$ .**



**Figuur 3-3 Effect van de oriëntatie van de straling t.o.v. het staalprofiel op de waarde van de factor  $s_i/s_u$ .**

### 3.6 Evaluatie

In de voorgaande paragrafen zijn waarden afgeleid voor de kritische stralingsintensiteit van hout, kunststoffen, glas en staal. Conform de in hoofdstuk 2 gegeven omschrijving van het begrip "kritische stralingsintensiteit" is daarbij verondersteld dat de straling voor onbepaald lange tijd aanhoudt, zodat zich aan het materiaaloppervlak een stationaire warmtestroom in kan stellen. Met name bij materialen die makkelijk warmte geleiden, zoals glas en staal, zal naar verhouding een belangrijke warmteoverdracht naar de omgeving plaatsvinden. Hierdoor duurt het enige tijd voordat de stationaire warmtetoestand een feit is. Ter illustratie is in bijlage 1 het opwarmgedrag van zowel een glazen ruit als een tweetal staalprofielen nader uitgewerkt. Uitgegaan is daarbij van representatieve situaties.

Het blijkt dat in het glas, blootgesteld aan een (kritische) stralingsintensiteit van  $4 \text{ kW/m}^2$  reeds na ca. 10 minuten, 90% van de (kritieke) eindtemperatuur van 393 K wordt bereikt. Zie figuur C.1.

Voor een niveau 1 beoordeling van staal en uitgaande de beschouwde praktische gevallen wordt, voor een kritieke temperatuur van 773 K en een stralingsintensiteit van  $100 \text{ kW.m}^2$ , deze 90% grens na ca. 20 minuten gehaald. Zie figuur C.2. Een niveau 2 beoordeling van een IPE 200 profiel (stralingsintensiteit  $25 \text{ kW/m}^2$ , kritieke temperatuur 473 K) levert op dat reeds na ca. 15 minuten de staaltemperatuur 90% van de eindwaarde bedraagt. Voor zwaardere profielen kan deze tijd echter belangrijk toenemen. Zo wordt voor een HE-B 200 profiel onder overigens dezelfde omstandigheden 50 minuten gevonden. Zie figuur C.3.

Een volledig ontwikkelde brand zal al gauw meer dan een half uur duren. Hantering van het in dit rapport gebruikte begrip "kritische stralingsintensiteit" lijkt daarom alleszins verantwoord voor het verkrijgen van een eerste, globale indruk. In het geval van relatief korte expositieduren kan een meer gedetailleerde beschouwing noodzakelijk zijn, rekening houdend met de geometrie van het constructie-element en de oriëntatie ervan op de straling. Dit geldt met name voor een niveau 2 beoordeling van staalconstructies.

Ter oriëntatie is tenslotte in Tabel 3-1 nog een overzicht gegeven van de maximale warmtestraling (= zonnestraling) die van nature in Nederland aanwezig is [4]. Deze blijkt maximaal  $0,9 \text{ kW/m}^2$  te bedragen, dat wil zeggen ruim een factor 2 kleiner dan de kleinste kritische stralingsintensiteit zoals gevonden voor de in dit rapport besproken situaties.

De gevonden waarden voor de kritische stralingsintensiteit zijn samengevat in Tabel 3-2. De in Tabel 3-2 opgenomen waarden moeten gezien worden als globale uitkomsten, geldend voor niet al te korte expositieduren, bijvoorbeeld meer dan 30 minuten.

**Tabel 3-1: Maximale warmtestraling door de zon, per maand in Nederland [4]**

Maand	Max. straling [ $W/m^2$ ]
januari	261
februari	420
maart	595
april	767
mei	865
juni	895
juli	876
augustus	799
september	666
oktober	489
november	311
december	221

**Tabel 3-2: Globale waarden voor de kritische stralingsintensiteit van de beschouwde materialen**

Materiaal	Kritische temperatuur [K absoluut]		Kritische stralingsintensiteit [ $kW/m^2$ ]	
	Schadeniveau 1	Schadeniveau 2	Schadeniveau 1	Schadeniveau 2
hout	683	373	15	2
kunststoffen	-	373	15	2
glas	393	-	4	-
staal	773	473	100	25



#### **4 Materiële schade door een wolkbrand**

In hoofdstuk 7 van Deel 1A zijn de eigenschappen van een zogenoemde 'wolkbrand' beschreven. Een wolkbrand laat zich omschrijven als een zeer snelle verbranding in een gevormde gaswolk, waarbij geen overdrukeffecten optreden.

Gebouwen en andere obstakels binnen de wolk zullen gedurende korte tijd zijn omgeven door het brandende deel van de gaswolk. Brandbare delen ervan zullen hierdoor vlam vatten. Brandbare materialen binnen gebouwen zullen (gedeeltelijk) door aanstraling via ramen en dergelijke vlam vatten. Een en ander zal leiden tot secundaire branden binnen de wolk.

Als aangenomen wordt dat de materiële schade binnen de wolk volledig is, dan is de schadeomvang buiten de wolk (secundaire brand door warmtestraling) vrijwel zeker verwaarloosbaar in de situatie van een "wolkbrand" .

## Literatuurreferenties

1. Twilt, L. Beoordelingsmethode voor brandbeschermende bekleding op staalconstructies onder verschillende brandomstandigheden. TNO-IBBC-rapportnr. B-85-541, november 1985.
  2. Lie, T.T. Brandoverslag door straling. Polytechnische Tijdschrift, uitg. A, 12e jaargang nr. 11-12, 1957
  3. Lie, T. T. Fire in Buildings. Applied Science Publishers Ltd, London, 1972.
  4. NEN 5067: Ontwerpberekening koellast. Nederlands Normalisatie Instituut, Delft.
  5. Zorgman, H. Brandgedrag van kunststoffen. Plastica 31, nr. 6, juni 1979.
  6. Dekker, J. Gedrag van glas bij brand. De Brandweer, juni 1972.
  7. Twilt, L. en J. Witteveen. Brandveiligheid Staalconstructies. Staalbouwkundig Genootschap, 2e druk, september 1985.
-

## Symbolenlijst

A	: staalinhoud per lengte-eenheid ( $m^3$ )	
a	: absorptiecoëfficiënt	
b	: breedte	[m]
c	: soortelijke warmte	[J/(kg*K)]
d	: dikte	[mm]
h	: hoogte	[m]
q	: (opgenomen) warmtestroom	[W/m <sup>2</sup> ]
q <sub>i</sub>	: invallende warmtestroom	[W/m <sup>2</sup> ]
s <sub>i</sub>	: zie Figuur 3-1	[m]
s <sub>u</sub>	: zie Figuur 3-1	[m]
Y	: oppervlaktetemperatuur voor slecht geleidende materialen	[K]
Y <sub>0</sub>	: omgevingstemperatuur	
t	: tijd	[s]
Δt	: tijdsinterval	[s]
T	: oppervlaktetemperatuur voor goed geleidende materialen	[K]
T <sub>0</sub>	: omgevingstemperatuur	[K]
ΔT	: toename temperatuur over het tijdsinterval Δt	[K]
α	: coëfficiënt voor convectieve warmteoverdracht	[W/m <sup>2</sup> K]
σ	: constante van Stephan Boltzman	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
ε	: emissiecoëfficiënt	[-]
ρ	: soortelijke massa	[kg/m <sup>3</sup> ]

---

## Bijlage 1: Overwegingen met betrekking tot het niet-stationaire karakter van de warmtestroom

Uitgegaan wordt van een niet-stationaire warmtetoestand van een aan warmtestraling blootgesteld stalen I-profiel volgens Figuur 3-1. Beschouwt men nu het warmtetransport over het tijdvak tussen 5 en 5 + Δt, dan geldt

toegevoerd aan profiel, :  $aq_i h * \Delta t$

onttrokken aan profiel :  $\{\varepsilon(T)^4 + \alpha(T - T_0)\}(b + h)2 * \Delta t$

opgeslagen in profiel :  $\rho c A * \Delta T$

waarbij

t : tijd aan het begin van het beschouwde tijdinterval (s)

Δt : tijdinterval (s)

T : straaltemperatuur aan het begin van het beschouwde tijdinterval (K)

ΔT : toename straaltemperatuur over het tijdinterval Δt (K)

ρ : soortelijke massa staal (= 7850 kg/m<sup>3</sup>)

c : soortelijke warmte staal (= 510 J/kg\*K)

A : staalinhoud per lengte-eenheid (m<sup>3</sup>)

Hierbij is aangenomen dat de warmtestroom steeds loodrecht op het staalprofiel staat.

Toepassing van de warmtebalans levert:

$$aq_i h * \Delta t - \{\varepsilon\sigma(T)^4 + \alpha(T - T_0)\}(b + h)2 * \Delta t = \rho c A * \Delta T \quad (C.1)$$

Na enige herschikking wordt, met  $s_i = h$  en  $s_u = 2(b + h)$ , gevonden:

$$\Delta T = \frac{s_i}{\rho c A} \left[ aq_i - \frac{s_u}{s_i} \{\varepsilon\sigma(T)^4 + \alpha(T - T_0)\} \right] * \Delta t \quad (C.2)$$

Met behulp van (C.2) is het verloop van de staaltemperatuur met de tijd te berekenen. Om praktische redenen zal men hierbij gebruik maken van een computer.

Merk op dat voor een éézijdig aangestraalde glazen ruit geldt:

$$s_u = 2 s_i$$

en

$$A/s_i = d \quad (= \text{dikte ruit})$$

Daarmee gaat (C.2) over in:

$$\Delta Y = \frac{1}{\rho c d} \left[ aq_i - 2\{\varepsilon\sigma(T)^4 + \alpha(T - T_0)\} \right] * \Delta t \quad (C.3)$$

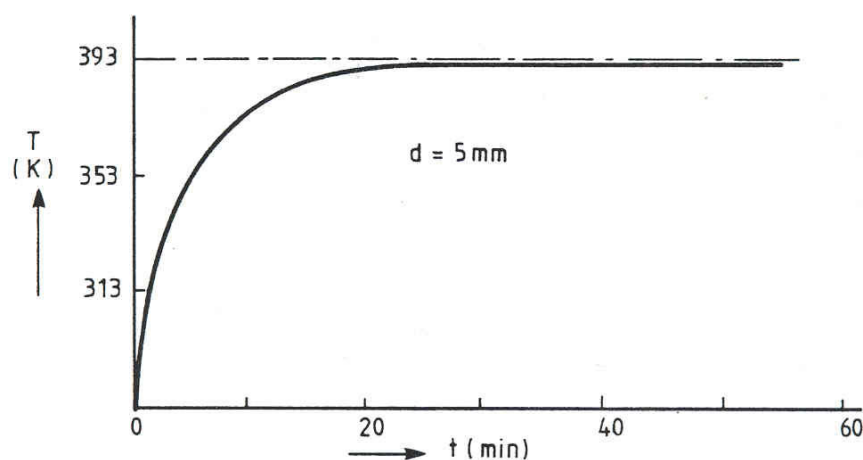
Vooropgesteld dat voor  $\rho$  en  $c$  voor glas geldende waarden worden ingevoerd (respectievelijk  $2600 \text{ kg/m}^3$  en  $840 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ ), kan met behulp van vergelijking (C.3) het temperatuurverloop in een éézijdig aangestraalde glazen ruit worden berekend.

Voor een praktische ruitdikte van  $d = 5 \text{ mm}$  is het verloop van de glastemperatuur berekend, uitgaande van de in paragraaf 3.4 gevonden kritische stralingsintensiteit van  $4 \text{ kW/m}^2$ . Zie figuur C.1. Zoals te verwachten was, nadert de glastemperatuur tot een vaste eindwaarde van  $\approx 393^\circ \text{ K}$ . Deze waarde wordt theoretisch pas na een oneindig lange tijd bereikt. Na 10 minuten bedraagt de afwijking echter reeds minder dan 10%.

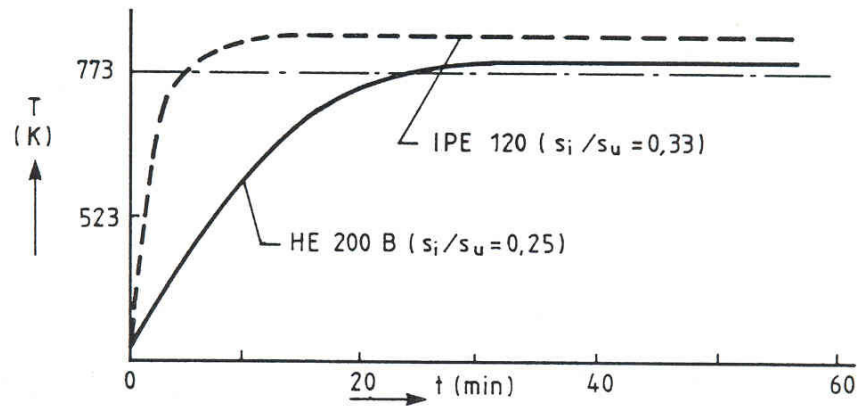
In figuur C.2 zijn de resultaten van soortgelijke berekeningen gepresenteerd, nu echter geldend voor aan warmtestraling blootgestelde staalprofielen. Uitgegaan is van een praktisch kolomprofiel (HE 200B, aangestraald op een van de flenzen) en een praktisch liggerprofiel (IPE 120, aangestraald op het lijf) bij een in paragraaf 3.5 als kritisch gevonden stralingsintensiteit van  $100 \text{ kW/m}^2$ . Nu wordt na maximaal ca. 20 minuten een staaltemperatuur gevonden die minder dan 10% van de eindwaarde ( $\approx 773^\circ \text{ K}$ ) afwijkt.

Voor dezelfde twee staalprofielen is in figuur C.3 het berekende temperatuurverloop voor een kritische stralingsintensiteit van  $25 \text{ kW/m}^2$  (schadeniveau 2) getekend. Het blijkt dat het, met name voor het naar verhouding zware HE 200B profiel, relatief lang duurt voordat de eindtemperatuur van  $473^\circ \text{ K}$  benaderd wordt.

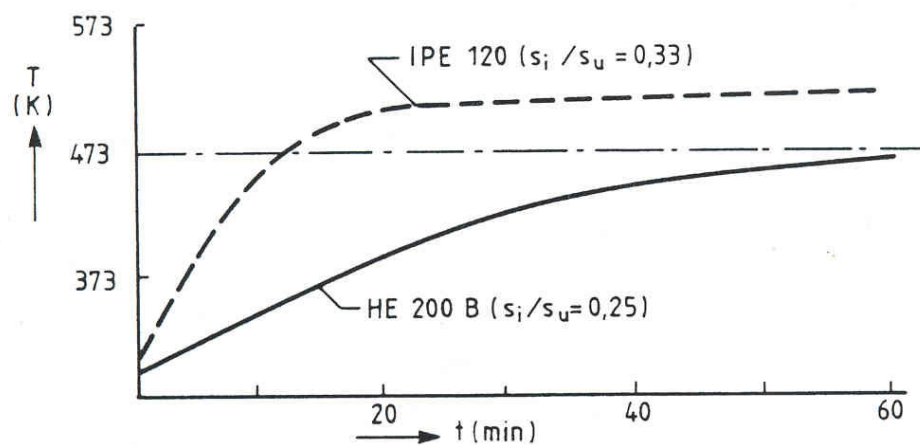
N.B. Bij een gegeven stralingsintensiteit is de eindtemperatuur van het staalprofiel afhankelijk van het gebruikte materiaal. Slechts voor 1 staalprofiel is de theoretische eindtemperatuur in de figuren getekend.



Figuur C.1: Temperatuurverloop in een glazen ruit ( $q_i = 4 \text{ kW/m}^2$ )



Figuur C.2: Temperatuurverloop in twee stalen I-profielen ( $q_i = 100 \text{ kW/m}^2$ )



Figuur C.3: Temperatuurverloop in twee stalen I-profielen ( $q_i = 25 \text{ kW/m}^2$ )