

# Brandveiligheid hoge gebouwen

Fase 2: De beschikbare veilige tijd voor  
de brandweerinzet (AST)



Nederlandse Academie voor  
Crisisbeheersing en Brandweezorg  
Postbus 7010  
6801 HA Arnhem  
Kemperbergerweg 783, Arnhem  
[www.nipv.nl](http://www.nipv.nl)  
[info@nipv.nl](mailto:info@nipv.nl)  
026 355 24 00

## Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2026

Auteurs	P. van Rede, A. Barreveld, G. Janssen, J. van der Graaf, L. De Witte, R. Weewer, R. van Herpen (TU/e)
Contactpersoon	G. Janssen
Opdrachtgever	Taskforce Veilige Hoogbouw
Contactpersoon	E. Lieben
Datum	30 maart 2026
Foto cover	Brandweer Rotterdam-Rijnmond/Megin Zondervan

Wij hechten veel belang aan kennisdeling. Delen uit deze publicatie mogen dan ook worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding.

Het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid is bij wet vastgelegd onder de naam Instituut Fysieke Veiligheid.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
	<b>Abstract</b>	<b>6</b>
	<b>Inleiding</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Theoretisch kader</b>	<b>10</b>
1.1	Brandveiligheidsvoorzieningen	10
1.2	Plattegrondontwerp van woongebouwen	11
1.3	Probabilistische risicoanalyses	12
1.4	Gevolgen van brand en rook op brandweermensen	13
1.5	Bezwijken van bouw- en constructiedelen	16
<b>2</b>	<b>Methodologie</b>	<b>18</b>
2.1	Opzet en methode	18
2.2	Uitgangspunten en variabelen	21
2.3	Kwaliteit van het onderzoek	29
<b>3</b>	<b>Betrouwbaarheid van de draagconstructie en brandscheidingen</b>	<b>31</b>
3.1	Gastemperatuur in de brandruimte	31
3.2	Equivalente brandduur en betrouwbaarheid	33
3.3	Conclusie	36
<b>4</b>	<b>AST persoonlijke veiligheid</b>	<b>39</b>
4.1	Gastemperaturen	39
4.2	AST betrokken op persoonlijke veiligheid	43
4.3	Conclusie AST persoonlijke veiligheid	46
<b>5</b>	<b>Conclusie</b>	<b>48</b>
5.1	Betrouwbaarheid draagconstructies en brandscheidingen	48
5.2	AST persoonlijke veiligheid	49
<b>6</b>	<b>Discussie</b>	<b>51</b>
6.1	Algemene uitgangspunten	51
6.2	Methode	52
6.3	Slotbeschouwing: risicoacceptatie	53
<b>7</b>	<b>Literatuur</b>	<b>54</b>
	<b>Bijlage 1: Aangehouden kansverdelingen</b>	<b>56</b>
	<b>Bijlage 2: Beoordeling aantal iteraties</b>	<b>69</b>
	<b>Bijlage 3: Beschouwing rekenresultaten persoonlijke veiligheid</b>	<b>71</b>

# Samenvatting

In dit onderzoek wordt onderzocht welke aanpassingen in de regelgeving nodig zijn om de brandveiligheid, gezien vanuit de brandweerinzet, te verbeteren. Dit onderzoek richt zich op de analyse en kwantificering van de brandweerinzet in hogere gebouwen (tot 400 meter hoog). De hoofdvraag van het onderzoek is als volgt:

*Welke aanpassingen in de regelgeving zijn nodig om de brandveiligheid in hoge gebouwen te verbeteren?*

Om de hoofdvraag te beantwoorden wordt een vergelijking uitgevoerd tussen de beschikbare veilige tijd voor brandweerinzet (Available Safe Time, AST) en de benodigde veilige tijd voor brandweerinzet uitgevoerd (Required Safe Time, RST). In fase I van dit onderzoek is de RST bepaald. Dit rapport (fase II) richt zich op de AST. In fase III worden de AST en RST vergeleken en worden oplossingsrichtingen beschreven gedaan.

## Methodologie

De AST wordt bepaald met een probabilistische methode waardoor er een beeld ontstaat van de statistische spreiding van de AST. Er wordt gebruikgemaakt van Monte-Carlo-simulaties waarbij een rekenkundige bewerking (een 'iteratie') veelvuldig wordt uitgevoerd. De rekenkundige bewerking is in dit onderzoek het uitvoeren van een berekening met een brandmodel (zonemodel CFAST is gebruikt). Bij elke iteratie wordt een willekeurige input gekozen uit vooraf ingestelde inputvariabelen in de vorm van kansverdelingen.

Bij de bepaling van de AST worden twee brandveiligheidsaspecten beschouwd:

1. *De betrouwbaarheid van de draagconstructies en brandscheidingen.* De AST kwantificeert de kans dat draagconstructies en brandscheidingen tijdens een volledige natuurlijke brandduur falen.
2. *De condities in de aanvalsroute tijdens repressief optreden in het gebouw.* De AST kwantificeert de tijd tot dat omstandigheden in de aanvalsroute onacceptabel worden in het kader van fysiologische effecten op brandweerpersoneel.

## Resultaten AST bepaling

### *AST betrokken op draagconstructies en brandscheidingen*

Uit de rekenresultaten blijkt dat draagconstructies in het kader van een natuurlijke brandduur vrijwel een betrouwbaarheid hebben die ligt tussen 92% en 99,9%. De kans op bezwijken is daardoor klein. De betrouwbaarheid van brandscheidingen is lager dan die van draagconstructies door lagere brandwerendheidseisen. Deze lopen uiteen van 0% tot 99%. De brandwerendheid van de brandscheiding en de aanwezigheid van een sprinklerinstallatie zijn hierin bepalend. Ook de opbouw van de omhulling (thermisch accumulerend of isolerend) is van belang voor het rekenresultaat. Opvallend is de lage betrouwbaarheid van brandscheidingen met een brandwerendheid van 30 minuten. Deze bedraagt 0%, waardoor deze scheidingen altijd falen gedurende een volledige natuurlijke brandduur.

### *AST betrokken op een veilige brandweerinzet<sup>1</sup>*

Uit de rekenresultaten blijkt dat de AST van een veilige brandweerinzet (kans op veilig inzetten) in de brandruimte in gebouwen lager dan 70 meter beperkt is tot maximaal 2-15 minuten, afhankelijk van het gebruikte acceptatiecriterium. In gebouwen hoger dan 70 meter is die AST hoger (10 -  $\geq$  120 minuten) door aanwezigheid van een sprinklerinstallatie. In de corridor waarop de brandruimte uitgeeft is de AST van een veilige brandweerinzet hoger (10 -  $\geq$  120 minuten) door de aanwezigheid van een zelfsluitende deur tussen de woning en de corridor. In de sluis en het trappenhuis is AST hoger ( $\geq$  120 minuten) vanwege de aanwezigheid van scheidingen met zelfsluitende deuren tussen de ruimten onderling.

### **Conclusie**

Uit de rekenresultaten blijkt dat de AST met betrekking tot draagconstructies en brandscheidingen afhangt van de aanwezige brandveiligheidsvoorzieningen in het pand. De brandwerendheid van draagconstructies en brandscheidingen is bepalen voor de AST (hogere brandwerendheid = hogere AST of betrouwbaarheid). Ook de aanwezigheid van een sprinklerinstallatie heeft invloed op de AST. De opbouw van de omhulling (thermisch accumulerend of isolerend) is daarin van belang. Bij een accumulerende omhulling is de AST of betrouwbaarheid hoger dan bij een isolerende omhulling.

Daarnaast blijkt uit de rekenresultaten dat de AST betrokken op persoonlijke veiligheid van de hulpverleners verschilt per ruimte van de aanvalsroute. Met name in de brandruimte is de AST relatief laag. In de corridor is de AST hoger door de aanwezigheid van een brandscheiding tussen de woning en de corridor. In de sluis en het trappenhuis is de AST nog hoger. De AST is daarnaast afhankelijk van het gebruikte acceptatiecriterium. Ten slotte is de opbouw van de omhulling (thermisch accumulerend of isolerend) is van belang. Bij een accumulerende omhulling is de AST of betrouwbaarheid hoger dan bij een isolerende omhulling.

---

<sup>1</sup> Genoemde waarden betreffen het 20<sup>ste</sup> percentiel van de kansverdeling van de AST.

# Abstract

## Introduction

This study examines the regulatory changes necessary to enhance fire safety, particularly from the perspective of fire department deployment. It focuses on analyzing and quantifying fire department operations in tall buildings (up to 400 meters high). The main research question is:

*Which regulatory changes are necessary to improve fire safety in tall buildings?*

To answer this question, a comparison is made between the Available Safe Time (AST) and the Required Safe Time (RST) for fire department operations. In phase I of this study, the RST was determined. This report (phase II) focuses on the AST. In phase III, AST and RST are compared, possible solutions are described and the main research question is answered.

## Methodology

AST is determined using a probabilistic method to provide an overview of its statistical spread. Monte Carlo simulations are used, where a calculation (an 'iteration') is performed repeatedly. In this study, the calculation involves using a fire model (the CFAST zone model). For each iteration, a random input is chosen from preset input variables represented as probability distributions.

When determining AST, two fire safety aspects are considered:

3. *The reliability of load-bearing structures and fire separations.* AST quantifies the probability that load-bearing structures and fire separations will fail during a full natural fire duration.
4. *The conditions in the attack route during active firefighting inside the building.* The AST quantifies the time until conditions in the attack route become unacceptable in terms of physiological effects on fire personnel.

## Results of AST calculations

### *AST for load-bearing structures and fire separations*

The calculations show that, in terms of natural fire duration, load-bearing structures almost always have a reliability between 92% and 99.9%. Thus, the probability of collapse is low. The reliability of fire separations is lower than that of load-bearing structures due to lower fire resistance requirements, ranging from 0% to 99%. The fire resistance of the separation and the presence of a sprinkler system are decisive in this. The construction of the enclosure (thermally accumulating or insulating) is also important for the results. Notably, fire separations with 30 minutes of fire resistance have a reliability of 0%, meaning these separations always fail during a full natural fire duration.

### *AST for safe fire department deployment<sup>2</sup>*

Calculations show that the AST for safe fire department deployment (chance of safe operations) in the fire room of buildings below 70 meters is limited to 2-15 minutes, depending on the acceptance criterion used. In buildings taller than 70 meters, AST is higher (10 to  $\geq 120$  minutes) due to the presence of a sprinkler system. In the corridor adjacent to the fire room, AST is higher (10 to  $\geq 120$  minutes) due to a self-closing door between the apartment and the corridor. In the airlock and stairwell, AST is even higher ( $\geq 120$  minutes) thanks to partitions with self-closing doors between the spaces.

### **Conclusion**

The results show that AST for load-bearing structures and fire separations depends on the fire safety provisions present in the building. The fire resistance of load-bearing structures and fire separations determines AST (higher fire resistance = higher AST or reliability). The presence of a sprinkler system also positively affects AST. The structure of the enclosure (thermally accumulating or insulating) is relevant, with accumulating enclosures resulting in higher AST or reliability than insulating ones.

Furthermore, AST related to the personal safety of fire fighters differs per space in the attack route. Notably, AST is relatively low in the fire room. In the corridor, AST is higher due to the fire separation between the apartment and corridor. In the lobby and stairwell, AST is even higher. AST also depends on the acceptance criterion used. Lastly, the construction of the enclosure remains important, with accumulating enclosures resulting in higher AST or reliability than insulating ones.

---

<sup>2</sup> Mentioned values are 20th percentiles from the distribution of the AST.

# Inleiding

## Aanleiding

De afgelopen decennia is het aantal hoge gebouwen steeds verder toegenomen en neemt bovendien de hoogte van gebouwen toe. Een analyse van de vijfhonderd hoogste gebouwen in Nederland laat zien dat er steeds vaker meerdere gebruiksfuncties binnen een gebouw voorkomen en dat hoge gebouwen complexer worden (*Hoog 500*, 2026). Samen met een aantal recente branden in het buitenland heeft deze ontwikkeling geleid tot zorgen bij de brandweer.<sup>3</sup> De brandweer vraagt zich af of een inzet nog voldoende ondersteund wordt door de brandveiligheidsvoorzieningen in het gebouw, en of een veilige en effectieve brandbestrijding in hoge gebouwen überhaupt nog mogelijk is.

De Raad van Commandanten en Directeuren Veiligheidsregio (RCDV) van de brandweer ziet voor zichzelf een opgave om te zoeken naar mogelijkheden om de brandveiligheid in hoge gebouwen te verbeteren, gezien vanuit het repressieve optreden. In de startnotitie *Veilige Hoogbouw*<sup>4</sup> is dit toegelicht. Vanwege deze opgave is de Taskforce Veilige Hoogbouw opgericht. In opdracht van deze taskforce hebben de lectoraten Brandweerkunde en Brandveiligheidskunde van het Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV) in 2022 een vooronderzoek gedaan naar de brandveiligheid in hoogbouw (Leene et al., 2022, p. 45). De conclusie uit dit onderzoek (p.45) was de volgende:

*“Een brand in hoge gebouwen kan niet adequaat worden bestreden met de huidige tactische en operationele doctrine brandbestrijding, en bestaande bouwregels zijn ontoereikend.”*

Welke aanpassingen in de bouwregelgeving nodig zijn om adequate brandbestrijding wél mogelijk te maken, kon op basis van dit vooronderzoek nog niet worden beantwoord. In het voorliggende rapport, dat deel uitmaakt van een serie van drie samenhangende rapporten, wordt daar invulling aan gegeven.

## Doel, hoofd- en deelvragen

Door de brandweerinzet in hoge gebouwen te analyseren en in tijd kwantificeren wordt bepaald of er aanvullende voorzieningen voor een snelle en effectieve brandweerinzet nodig zijn. Om dit doel te bereiken, is de volgende overkoepelende hoofdvraag geformuleerd:

*Welke aanpassingen in de regelgeving zijn nodig om de brandveiligheid in hoge gebouwen te verbeteren?*

In overleg met de Taskforce Veilige Hoogbouw is besloten om deze hoofdvraag op te delen in drie onderzoeksfasen, die elk met een eigen rapportage afgesloten worden. De drie fasen zijn de volgende:

<sup>3</sup> Grenfell tower, London (2017) Twin Parks, New York (2022) Residential complex, Valencia (2024).

<sup>4</sup> Agendapunt 14 vergadering RCDV d.d. 18 juni 2021.

- > *Fase I:* heeft betrekking op de benodigde tijd voor brandweerinzet (RST).
- > *Fase II:* heeft betrekking op de beschikbare tijd voor brandweerinzet (AST).
- > *Fase III:* gaat in op de vergelijking tussen de AST en RST. Er wordt beoordeeld waar knelpunten ontstaan en hoe deze kunnen worden geminimaliseerd.

Dit rapport omvat de tweede fase van het onderzoek, waarin de ontwikkeling van brand in een hoog woongebouw wordt bekeken en de gevolgen van die brand voor een veilige brandweerinzet worden gekwantificeerd. Hiertoe is de volgende deelvraag geformuleerd:

*Wat is de benodigde veilige tijd (Available Safe Time - AST) van een brandweerinzet bij een toenemende hoogte van gebouwen?*

## Afbakening

De kaders van dit onderzoek hebben zowel betrekking op het gebouw als op de uit te voeren onderzoeksactiviteiten:

- > De voorschriften voor een 'nieuw te bouwen bouwwerk' uit het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl) bepalen welke brandveiligheidsvoorzieningen geacht worden aanwezig te zijn.
- > Het onderzoek beperkt zich tot woongebouwen (woonfuncties). Gebouwen waarin zich (ook) andere functies bevinden, zoals kantoren, winkels en hotels, blijven in dit onderzoek buiten beschouwing.
- > Het onderzoek beperkt zich tot een brand die ontstaat in een woning. Een brand in een andere ruimte, zoals de gemeenschappelijke verkeersruimte of in een constructie zoals de gevel, worden in dit onderzoek niet beoordeeld.
- > Het onderzoek beperkt zich tot de tijd die nodig is voor het bestrijden van brand. Andere taken, zoals de ondersteuning bij een eventuele gebouwontruiming, zijn buiten beschouwing gelaten.
- > Het onderzoek beperkt zich als gevolg van voorgaand punt tot de omstandigheden die bij een brand kunnen worden verwacht in ruimten die onderdeel zijn van de aanvalsroute van de brandweer. De omstandigheden in bijvoorbeeld woningen waarin de brand zich niet bevindt, worden niet meegenomen.

## Leeswijzer

Hoofdstuk 1 bevat het theoretisch kader van het onderzoek. In dit hoofdstuk wordt informatie gegeven die nodig is voor het doorgronden van de onderzoeksmethode en de resultaten daarvan. In hoofdstuk 2 worden de verschillende toegepaste onderzoeksmethoden nader toegelicht. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 de invloed van brand op draagconstructie en brandscheidingen geanalyseerd. Er wordt bepaald wat de betrouwbaarheid van de draagconstructies en brandscheidingen onder brandomstandigheden is. In hoofdstuk 4 wordt de invloed van brand op persoonlijke veiligheid van hulpverleners geanalyseerd. Dit leidt uiteindelijk tot een AST voor een brandweerinzet. In hoofdstuk 5 worden de deelvragen beantwoord en worden de eerste voorlopige conclusies getrokken. Tot slot is in hoofdstuk 6 een discussie opgenomen.

# 1 Theoretisch kader

## 1.1 Brandveiligheidsvoorzieningen

In het rapport *Brandveiligheid hoge gebouwen, fase I: De benodigde veilige tijd voor de brandweerinzet (RST)* (van Rede et al., 2025) is reeds een beschrijving gegeven van het juridisch kader waaraan hoge woongebouwen moeten voldoen. In dit onderzoek wordt als juridisch kader aangehouden:

- > *Woongebouwen tot 70 meter*: De verschillende voorschriften van het Besluit bouwwerken leefomgeving (Bbl)
- > *Woongebouwen hoger dan 70 meter*: Artikel 4.89, lid 1 sub b van het Bbl waarbij de *Handreiking brandveiligheid in hoge gebouwen, 2014* (SBRCURnet, 2014) wordt aange-stuurd.

Brandveiligheidsvoorzieningen uit beleidsdocumenten, zoals de *Rotterdamse Brandveiligheidsvisie Hoogbouw & Hoogbouw-plus* (van Houwelingen et al., 2022) zijn in dit onderzoek niet meegenomen, omdat ze geen juridisch draagvlak hebben.

### Woongebouwen hoger dan 200 meter

Het toepassingsgebied van de handreiking die hierboven is genoemd, reikt maar tot een gebouwhoogte van 200 meter. Bij gebrek aan eenduidigheid in de bouwregelgeving worden in dit onderzoek de voorzieningen die uit die richtlijn volgen ook aangehouden voor gebouwen hoger dan 200 meter.

In de onderstaande tabellen worden voor verschillende gebouwhoogten de relevante brandveiligheidsvoorzieningen weergegeven die overeenkomstig het juridisch kader gelden voor nieuwe gebouwen.

**Tabel 1.1 Installatie- en ontwerptechnische brandveiligheidsvoorzieningen**

0-20 meter	20-70 meter	70-200 meter*
Geen	Brandweerlift	2 brandweerliften
	Droge blusleiding	2 natte blusleidingen
	Voorportalen voor trappenhuizen	Voorportalen voor trappenhuizen
		Automatische sprinklerinstallatie
		Overdrukinstallatie in trappenhuis/sluis

**Tabel 1.2 Brandwerendheid van bouwconstructie en brandscheidingen**

	0-7 meter	7-13 meter	13-70 meter	70-400 meter
Brandwerendheid van de draagconstructie [min]	60*	90	120	120
Brandwerendheid van brandscheidingen tussen woningen [min]	60*	60	60	30
Brandwerendheid van brandscheidingen tussen woning en extra beschermde vluchtroute [min]	30	30	30	30

\* Hierbij is geen rekening gehouden met reductie van de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag (WBDBO) op basis van vuurbelasting.

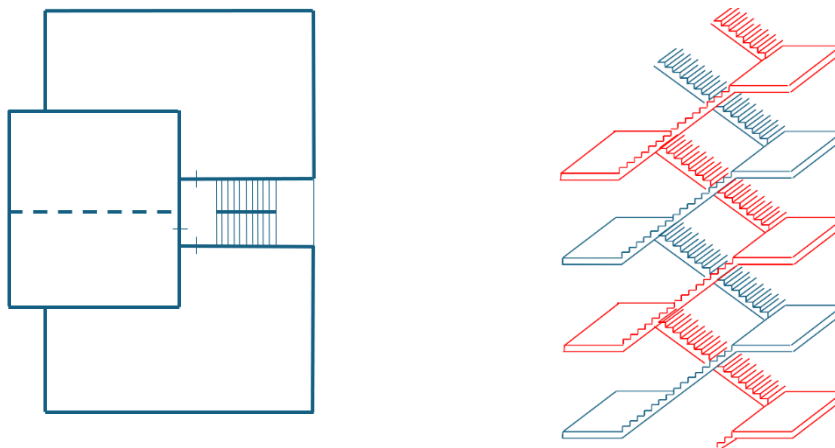
In de regelgeving staan meer brandveiligheidseisen die afhankelijk zijn van de gebouwhoogte. Die eisen zijn niet opgenomen in dit overzicht, omdat ze niet direct relevant zijn voor dit onderzoek. Een volledig overzicht is opgenomen in bijlage 1 van het rapport van fase I (van Rede et al., 2025) van dit onderzoek.

## 1.2 Plattegrondontwerp van woongebouwen

De wijze waarop een woongebouw wordt ontsloten, is deels bepalend voor de wijze waarop de brandweer een inzet uitvoert. In deze paragraaf wordt daarom stilgestaan bij de wijze waarop de gebouwontsluiting kan zijn geregeld. Normaliter kan onderscheid worden gemaakt tussen een van de drie generieke ontsluitingsprincipes:

- > **Portiekontsluiting:** Tot 12,5 meter hoogte is het volgens artikel 4.69, lid 4 van het Bbl mogelijk om woningen met één enkele (extra beschermde) vluchtroute te realiseren. Woningen komen rechtstreeks uit op het trappenhuis. Dit is schematisch weergegeven in figuur 1.1.
- > **Galerij- of corridorontsluiting:** Boven de 12,5 meter zijn vanuit woningen doorgaans twee onafhankelijke vluchtroutes vereist. Indien het perceeloppervlak dit toestaat, zijn gebouwen daartoe voorzien van twee onafhankelijke trappenhuisen die aan weerszijden van het gebouw gelegen. Tussen de trappenhuisen bevindt zich een galerij of corridor.
- > **Ontsluiting met een wokkeltrappenhuis:** Bij een beperkt beschikbaar bouwoppervlak bevinden beide trappenhuis zich vaak in één kern waaromheen de woningen zijn gegroepeerd. Beide trappenhuisen zijn brandwerend van elkaar afgescheiden en lopen om elkaar heen. Dit is in figuur 1.2 schematisch weergegeven middels een blauwe en een rode trap die 'als een wokkel' om elkaar heen draaien.

In de regel zullen woongebouwen met enige hoogte worden uitgevoerd met een corridor- of wokkeltrapontsluiting.



**Figuur 1.1** Plattegrond van een portiekontsluiting (links) en schematische weergave van een wokkeltrap (rechts)

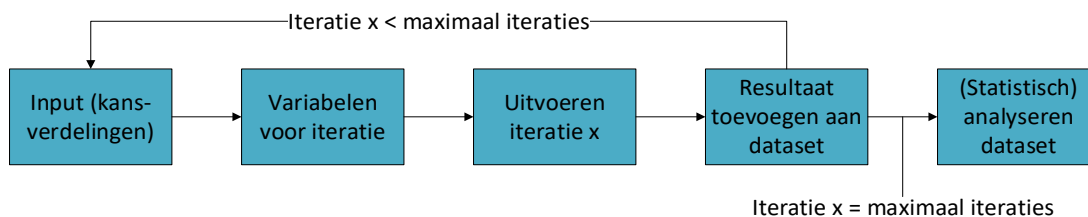
## 1.3 Probabilistische risicoanalyses

### 1.3.1 Algemene werking

In het veiligheidsdomein en meer in het bijzonder in de toegepaste brandveiligheidskunde is het gebruikelijk een vorm van risicoanalyse te gebruiken om de ernst van mogelijke incidenten in te schatten. Daartoe bestaan meerdere manieren die elk specifieke voor- en nadelen hebben (van Rede et al., 2024). Net als in fase I van dit onderzoek is in fase II gebruikge- maakt van een (semi-)probabilistische risicoanalyse. Voor een beschrijving van een dergelijke risicoanalyse wordt verwezen naar het rapport van fase I van dit onderzoek (van Rede et al., 2025).

### 1.3.2 Monte-Carlo-simulaties

Bij het bepalen van de AST (beschikbare veilig tijd) voor een brandweerinzet is gebruikge- maakt van een statistische methodiek die Monte-Carlo-simulatie wordt genoemd. Bij een Monte-Carlo-simulatie wordt een rekenkundige handeling, zoals de bepaling van de AST in dit onderzoek, veelvuldig opeenvolgend herhaald. Bij elke herhaling (iteratie) worden uit de aangenomen kansverdelingen willekeurig inputwaardes gekozen. Hoe waarschijnlijk het is dat een waarde gekozen wordt, is afhankelijk van de aangenomen kansverdeling. Met de gekozen waarden wordt de berekening uitgevoerd (in dit geval een effectmodellering); het resultaat wordt vervolgens toegevoegd aan een dataset. Daarna wordt gestart met de vol- gende iteratie. Dat proces wordt herhaald tot het maximum aantal iteraties wordt bereikt dat is ingegeven. Als het proces uit voldoende iteraties bestaat, ontstaat een beeld van de statis- tische spreiding van de uitkomst in de vorm van een kansverdeling. In dit onderzoek is de uitkomst een kansverdeling van de AST. Op deze manier kunnen veel scenario's in een risi- coanalyse worden meegenomen, elk met hun eigen kans en effect.



**Figuur 1.2 Generiek processchema Monte-Carlo-simulaties**

### Iteraties en kwaliteit van het rekenresultaat

De kwaliteit van een Monte-Carlo-simulatie is afhankelijk van de kwaliteit van de inputgegevens. Daarnaast wordt de nauwkeurigheid van de Monte-Carlo-simulatie bepaald door het aantal iteraties dat wordt uitgevoerd. Hoe meer iteraties worden uitgevoerd, hoe nauwkeuriger de uitkomst is. In het rapport van fase I van dit onderzoek is beschreven hoe het aantal iteraties de kwaliteit van het rekenresultaat beïnvloeden (van Rede et al., 2025).

### Kansverdelingen

De inputgegevens bij een Monte Carlo-simulatie bestaan uit kansverdelingen. Binnen dit onderzoek worden kansverdelingen gebruikt die betrekking hebben op bijvoorbeeld de brandontwikkeling of de woningoppervlakte. De kansverdeling beschrijft hoe waarschijnlijk het is dat een bepaalde parameter zich voordoet. Een voorbeeld is opgenomen in het rapport van fase I van dit onderzoek (van Rede et al., 2025).

### Betrouwbaarheid van voorzieningen

In dit onderzoek staat het wel of niet correct functioneren van voorzieningen zoals een automatische brandbestrijdingsinstallatie(sprinkler) centraal. Het niet correct functioneren (falen) van voorzieningen resulteert in een ander brandverloop. De kans dat een voorziening correct functioneert (succesvol is), wordt hier de betrouwbaarheid genoemd. Die betrouwbaarheid ( $P_{\text{succes}}$ ) wordt weergegeven als één getal. De kans dat een systeem niet correct functioneert, is dan  $1-P_{\text{succes}}$ . Een voorbeeld is hieronder gegeven.

#### Voorbeeld betrouwbaarheid sprinklerinstallatie

Een sprinklerinstallatie in een gebouw heeft een (arbitrair gekozen) betrouwbaarheid van  $P_{\text{succes}} = 0,98$ . De kans op correct functioneren is dan 98 %. De kans op het niet correct functioneren bedraagt  $1-0,98 = 0,02$  of 2 %.

## 1.4 Gevolgen van brand en rook op brandweermensen

Uit fase I van dit onderzoek blijkt dat in hogere gebouwen de brandweerinzet beperkt is tot een binneninzet. Een brand kan leiden tot omstandigheden in het gebouw die de binneninzet negatief beïnvloeden. Denk bijvoorbeeld aan rookverspreiding of thermische belasting. Deze omstandigheden worden in onderstaande paragrafen kort behandeld, waarna aan de hand van verschillende bronnen de beperkende factoren en de hiermee samenhangende criteria nader beschouwd worden.

### 1.4.1 Persoonlijke beschermingsmiddelen

Een brandweerinzet gebeurt altijd met persoonlijke beschermingsmiddelen (PBM's). Deze beschermingsmiddelen beschermen tegen de omstandigheden die samenhangen met brand. Sommige PBM's worden in principe gedurende de gehele inzet gedragen. Andere

worden enkel gebruikt wanneer de omstandigheden hierom vragen. Adembescherming wordt (doorgaans) niet al bij gebouwtoetreding, maar pas bij blootstelling aan giftige gassen gebruikt.

#### **Voorbeelden van PBM's**

- > Brandweer (uitruk)pak inclusief laarzen, helm, gelaatsmasker en handschoenen
- > Balaclava (afhankelijk van regio)
- > Ademluchttoestel
- > CO-meter
- > Warmtebeeldcamera
- > Zaklamp.

De bescherming die wordt geboden door PBM's is echter niet zonder grenzen. Onderstaand worden de verschillende aspecten die een brandweerinzet kunnen beïnvloeden nader behandeld.

### **1.4.2 Beperkingen van zicht**

Bij brand komt roet vrij waardoor het zicht in het gebouw verslechtert. Beperkt zicht heeft doorgaans geen nadelige fysiologische gevolgen. De brandweer heeft de beschikking over zaklampen, mocht de rook niet te dicht zijn. Bovendien is zij ook bij beperkt of helemaal geen zicht in staat om een inzet uit te voeren. Adequate training is daarbij een randvoorwaarde. Wel kan beperkt zicht van invloed zijn op de effectiviteit van de brandweerinzet.

### **1.4.3 Verstikkende en irriterende gassen**

Bij brand komen gasvormige verbrandingsproducten vrij, die verstikkend of irriterend van aard zijn. Zij leiden tot verstikking van de lichaamscellen en irritatie van luchtwegen, ogen en huid. Veelvoorkomende verstikkende en irriterende gassen zijn koolstofmonoxide (CO), zwaveldioxide (SO<sub>2</sub>) en stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>). Vanwege de beschikbaarheid van brandweer(blus) kleding, gelaatsmasker en ademlucht spelen verstikkende en irriterende rookgassen een beperkte rol voor wat betreft de inzetmogelijkheden voor de brandweer. Wel moet de brandweer alert zijn op de risico's in specifieke situaties. Zo moet zij ademlucht gebruiken wanneer de lucht te sterk vervuild is. Omdat de cilinderinhoud van een ademluchttoestel beperkt is, kan het ademluchttoestel echter niet eindeloos worden gebruikt. Het kan daarom voorkomen dat gedurende de inzet wordt besloten terug te keren om de cilinder om te wisselen.

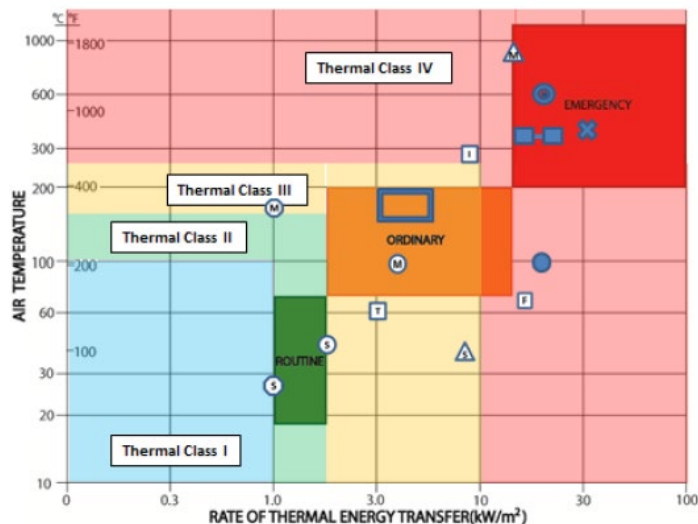
#### **Arbeidshygiëne**

PBM's kunnen na een brand vervuild zijn en tijdens hoge concentraties van giftige stoffen bevatten. Dit maakt dat er de laatste jaren veel aandacht bij de brandweer is voor het verwijderen en reinigen van PBM's zoals bluspakken, handschoenen en ademluchttoestellen na een brand.

### **1.4.4 Warmte**

Bij brand komt warmte vrij. Dit resulteert in een temperatuurverhoging in en nabij de brandruimte. Blootstelling (convectief of radiatief) aan deze hete gassen kan, afhankelijk van de blootstellingsduur, leiden tot hittestress en/of verbranding. Ook warmtestraling afkomstig van de brandhaard kan leiden tot hittestress en/of verbranding (SFPE, 2019). PBM's bieden hier tegen een zekere mate van bescherming. Deze bescherming is echter niet oneindig. Bij hoge temperaturen of stralingsfluxen kan de warmte door het pak dringen en kan er alsnog sprake zijn van hittestress en/of verbranding. Daarbij is niet alleen de totale warmteflux (convectief en straling) relevant, maar ook de blootstellingsduur. Het netto warmtetransport door

het pak zal immers zowel bij een grotere warmteflux als bij een langere blootstellingsduur hoger uitvallen. Er is weinig onderzoek uitgevoerd naar de gevolgen van thermische blootstelling voor brandweermensen. Wat er is onderzocht, is samengevat in het rapport *Fire Fighter Equipment Operational Environment: Evaluation of Thermal Conditions* van FSRI (Madrzykowski, 2017). In dat rapport is op basis van eerder onderzoek een aantal klassen onderscheiden waarbij een brandweerinzet met PBM's kan plaatsvinden. Een koppeling met een blootstellingsduur is in het rapport niet (direct) gemaakt, maar is wel af te leiden uit geciteerde onderzoeken (Donnelly et al., 2006). Deze klassen zijn weergegeven in onderstaande Figuur 1.3 en Tabel 1.3.



Figuur 1.3 'Thermal classes' voor veilig brandweeroptreden (Madrzykowski, 2017)

Tabel 1.3 'Thermal classes' (Donnelly et al., 2006)

'Thermal class'	Maximale tijd (min)	Maximale temperatuur (°C)	Maximale warmteflux (kW/m <sup>2</sup> )
I	25	100	1
II	15	160	2
III	5	260	10
IV	<1	>260	>10

#### Fysieke beperkingen brandweerpersoneel

In fase I van het onderzoek naar brandveiligheid in hoge gebouwen zijn reeds de fysieke beperkingen van brandweerpersoneel besproken. Een brandweerprofessional is maar gedurende een bepaalde tijd in staat om zware fysieke inspanning te leveren. Dit betekent dat wanneer een brandweerprofessional voorafgaand aan de daadwerkelijke brandweerinzet al een fysieke inspanning heeft moeten leveren (bijvoorbeeld door veel trappen te lopen), de te verwachten inzetduur verkort wordt.

## 1.5 Bezijken van bouw- en constructiedelen

In dit onderzoek worden twee gebouwonderdelen die van belang zijn voor een veilige brandweerinzet beschouwd:

- > **Draagconstructies:** de draagconstructie van een gebouw draagt belastingen (zoals het eigen gewicht en het gewicht van de inventaris) over naar de fundering zonder dat structurele instabiliteit optreedt. Een brand kan ervoor zorgen dat een draagconstructie (lokaal) bezwijkt. Als een draagconstructie instabiel wordt, bestaat er een direct risico voor de personen aanwezig in het gebouw.
- > **Brandscheidingen:** brandscheidingen hebben als doel een brand gedurende een bepaalde periode beperkt te houden tot een brandcompartiment. Daardoor is de brand eenvoudiger te bestrijden. Wanneer een brand zich uitbreidt over meerdere compartimenten, neemt de kans op een efficiënte brandbestrijding door de brandweer af. Bovendien zijn de meeste brandveiligheidsvoorzieningen in gebouwen niet ontworpen met het beheersen van een brand in meerdere brandcompartimenten als doel.

Een (voldoende) veilige draagconstructie en brandscheidingen zijn dus voorwaarden voor een veilige en efficiënte brandweerinzet. Er bestaan meerdere methoden om te bepalen of en wanneer een brandscheiding of draagconstructie bezwijkt als gevolg van een brand. Een van die methoden is de 'equivalente brandduur'. Deze methode wordt hieronder besproken.

### 1.5.1 Equivalente brandduur

De equivalente brandduur is een methode die het mogelijk maakt de betrouwbaarheid van brandscheidingen en draagconstructies in te schatten. Daarbij wordt beoordeeld hoe de thermische belasting van een scheiding of constructie onder natuurlijke brandomstandigheden zich verhouden tot de thermische belasting wanneer de scheiding of constructie wordt blootgesteld aan de standaard brandkromme. Er bestaan meerdere manieren om de thermische belasting te beoordelen, onder andere<sup>5</sup>:

1. De methode zoals opgenomen in de Eurocodes voor constructief ontwerp onder brandomstandigheden (CEN, 2021). De methode bestaat uit een tweetal formules die het mogelijk maken de equivalente brandduur in te schatten. De achtergrond van die formules is niet herleidbaar (Thomas et al., 1997).
2. De methode zoals gebruikt in onder andere het onderzoek *Rookverspreiding en persoonlijke veiligheid* (van Liempd et al., 2022). Hierbij wordt een vergelijking gemaakt tussen de interne gasenergie in de brandruimte onder natuurlijke brandomstandigheden en een gestandaardiseerde brand (de standaard brandkromme).
3. De methode zoals beschreven in (Thomas et al., 1997). Hierbij wordt beoordeeld wat de optredende temperaturen in de te beoordelen constructieonderdelen zijn onder natuurlijke brandomstandigheden en bij een gestandaardiseerde brand (de standaard brandkromme). De optredende temperaturen worden onderling vergeleken om de equivalente brandduur te bepalen.
4. De methode zoals beschreven in (Wade et al., 2014). Hierbij wordt een vergelijking gemaakt tussen de energie die door het constructie-element wordt geaccumuleerd tijdens een test met de standaard brandkromme en een natuurlijke brand. De geaccumuleerde energie wordt onderling vergeleken om de equivalente brandduur te bepalen.

De hiervoor beschreven methoden hebben voor- en nadelen:

---

<sup>5</sup> Andere methoden zijn beschreven in (Wade et al., 2014).

1. De methode uit de Eurocode (genummerd 1) is eenvoudig toepasbaar, maar de fysische grondslag ervan is niet herleidbaar en het is niet mogelijk om de equivalente brandduur direct te relateren aan de temperaturen die tijdens een natuurlijke brand optreden.
2. Dit in tegenstelling tot de tweede methode, waarbij de temperaturen in het brandcompartiment worden gebruikt om de interne gasenergie te berekenen. Het voordeel van deze methode is dat de thermische respons van de constructie wordt verwaarloosd in de bepaling van de equivalente brandduur<sup>6</sup>. Het nadeel is dat de interne gasenergie in een compartiment geen goede maatstaf kan zijn voor de thermische belasting van de constructie. Een hoge temperatuur in een klein volume kan immers een even grote interne gasenergie geven dan een lage temperatuur in een groot volume. De thermische belasting bepaalt uiteindelijk voor een deel de respons van de constructie. Het is daarom van belang dat deze nauwgezet wordt bepaald.
3. In de derde methode wordt de thermische belasting afgeleid van de optredende temperaturen in het materiaal. Die temperaturen zijn immers afhankelijk van de thermische belasting. De thermische respons wordt in deze aanpak wel meegewogen. Een nadeel is dat de respons in de constructie sterk afhangt van het type materiaal. Een voorbeeld is een betonconstructie, waarbij de brandwerendheid grotendeels wordt bepaald door de betondekking op het wapeningsstaal. Er moet daarom vrij gedetailleerde informatie over de constructie aanwezig zijn om deze methode te kunnen uitvoeren.
4. Bij de vierde methode wordt de thermische belasting van de constructie bepaald aan de hand van de geaccumuleerde energie tijdens een test met de standaard brandkromme of een natuurlijke brand. Het voordeel van deze aanpak is dat, in tegenstelling tot de derde methode, er alleen informatie over de fysische eigenschappen van de constructie nodig is om de equivalente brandduur te bepalen.

In geen van de methoden wordt er rekening gehouden met de mechanische respons van de constructie. Daarom kan er niet op worden vertrouwd dat er met de equivalente brandduur een nauwkeurige voorspelling van de faaltijd van de constructie kan worden gegeven. De equivalente brandduur kan wel worden gebruikt voor een grove bepaling van de betrouwbaarheid van draagconstructies en brandscheidingen en als basis voor het onderzoeken van de geschiktheid van brandwerendheidseisen (Wade et al., 2014). Daarnaast maakt het bepalen van de equivalente brandduur een onderlinge vergelijking van verschillende materialen en brandwerendheden mogelijk.

In alle genoemde methoden wordt de equivalente brandduur gerelateerd aan de volledige natuurlijke brandduur. Met andere woorden: de equivalente brandduur is een weergave van de thermische belasting die de constructie ontvangt tijdens een brand waarin alle brandstof in het compartiment wordt gebruikt voor de belasting gerelateerd aan de standaard brandkromme. Er wordt dus geen rekening gehouden met een mogelijke interventie. Deze aanpak strookt met de achtergronden in de bouwregelgeving van veel landen, waarin als uitgangspunt is gekozen dat een draagconstructie een volledige natuurlijke brandduur moet doorstaan (volledige 'burn-out' van het compartiment).

---

<sup>6</sup> Bij de bepaling van de interne gasenergie is de gastemperatuur relevant. Daarvoor is de thermische respons van de constructie wel relevant. De thermische respons wordt dus niet geheel verwaarloosd.

## 2 Methodologie

In dit hoofdstuk wordt de onderzoeksmethodologie en de daarbij gehanteerde uitgangspunten en variabelen uiteengezet en onderbouwd.

### 2.1 Opzet en methode

In dit onderzoek wordt de beschikbare veilige tijd voor brandweerinzet (AST) geanalyseerd. Daarbij is de volgende aanpak gebruikt, die in het vervolg van dit hoofdstuk nader zal worden toegelicht:

1. Verkennend literatuuronderzoek naar te gebruiken probabilistische inputvariabelen en acceptatiecriteria voor brandweerinzet. Het literatuuronderzoek is uitgevoerd in de ons bekende wetenschappelijke literatuur (vakbladen, normen, richtlijnen, et cetera). Bij het onderzoek zijn verschillende trefwoorden gebruikt. Het literatuuronderzoek is parallel uitgevoerd door twee onderzoekers om zo breed mogelijk te zoeken. De resultaten zijn opgenomen in hoofdstuk 1 en paragraaf 2.2 van dit rapport.
2. AST bepalen met Monte Carlo-simulaties in combinatie met effectenmodellering. De AST is bepaald voor verschillende gebouwhoogtes en betrokken op twee onderdelen:
  - > *brandscheidingen en draagconstructie*: hierbij is bepaald wat de betrouwbaarheid van brandscheidingen en de draagconstructie is.
  - > *persoonlijke veiligheid hulpverleners*: hierbij is bepaald hoelang het duurt voordat de condities in de aanvalsroute het repressieve optreden onveilig maken.

#### 2.1.1 Vergelijkende aard van het onderzoek

Vanwege de aard van het onderzoek waarin de beschikbare veilige tijd voor brandweerinzet (AST) voor verschillende gebouwhoogtes vergeleken wordt, kunnen onderdelen van de analyse worden vereenvoudigd of simpelweg worden weggelaten, omdat ze onafhankelijk zijn van de gebouwhoogte. Op die manier wordt het onderling vergelijken van verschillende gebouwhoogtes mogelijk. De resultaten zijn hierdoor geen volledige weergave van het brandveiligheidsrisico.

#### 2.1.2 (Semi-) probabilistische aanpak

In dit onderzoek is gebruikgemaakt van een probabilistische rekenmethode.<sup>7</sup> Bij deze methode wordt rekening gehouden met een spreiding voor wat betreft de invoerparameters in het model. Het is namelijk niet mogelijk om alle gebeurtenissen die zich gedurende brandontwikkeling kunnen voordoen, uit te drukken in één AST. Met een probabilistische methode worden de effecten en kansen van veel mogelijke scenario's bepaald. Die worden vervolgens gebruikt om een beeld te krijgen van een totaal brandveiligheidsrisico.

Het voordeel van een probabilistische methode is dat er rekening wordt gehouden met een breed scala aan kenmerken die de AST kunnen beïnvloeden, zoals brandkenmerken, gebouwkenmerken en menskenmerken. Er wordt bij een probabilistische methode rekening gehouden met zowel waarschijnlijke als onwaarschijnlijke gebeurtenissen tijdens een brand.

<sup>7</sup> Probabilistisch = 'gebaseerd op kansrekening' (bron: <https://nl.wiktionary.org/wiki/probabilistisch>).

Een nadeel van een probabilistische methode is dat de kwaliteit van het resultaat afhangt van de kwaliteit van de inputgegevens. En juist die inputgegevens (kansverdelingen) zijn op het gebied van brand en brandweer schaars. Toch kan met de beschikbare data, in combinatie met inschattingen, een goede risicoanalyse worden uitgevoerd.

De uitkomst van de probabilistische methode is in dit onderzoek de kansverdeling van de AST. Door die kans voor het spectrum aan gebouwhoogtes binnen de kaders van dit onderzoek te bepalen, ontstaat er een beeld van de kansverdeling van de AST per gebouwhoogte. Het spectrum aan gebouwhoogtes bedraagt 0-400 meter. Het onderling vergelijken van de AST met de verschillende gebouwhoogtes wordt dan mogelijk. Bovendien is het dan ook mogelijk om de AST te vergelijken met de RST die is bepaald in fase I van dit onderzoek.

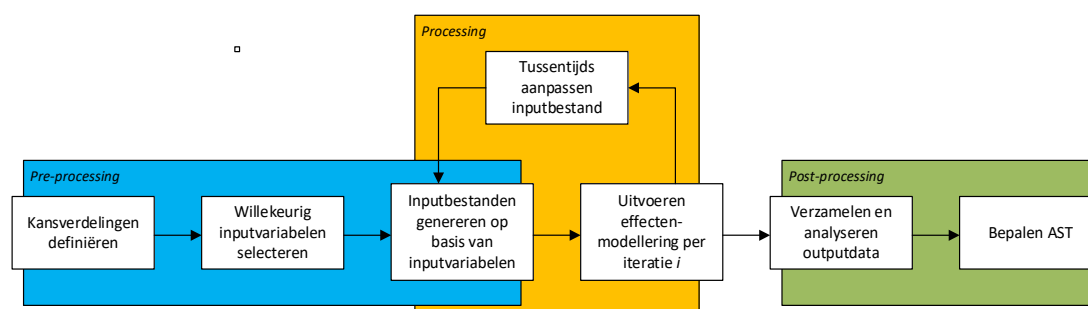
### 2.1.3 Aanpak middels Monte-Carlo-simulaties

In dit onderzoek is de probabilistische aanpak uitgevoerd met Monte-Carlo-simulaties. Wat dit zijn, is reeds toegelicht in paragraaf 1.3.2.. In het vervolg van deze paragraaf wordt toegelicht hoe de Monte-Carlo-simulaties zijn gebruikt in dit onderzoek.

De Monte-Carlo-simulaties bestaan in dit onderzoek uit een drietal fases:

1. *Pre-processing*: willekeurige inputvariabelen worden gekozen uit vastgestelde kansverdelingen. Op basis van deze variabelen worden inputbestanden samengesteld voor de te gebruiken tool voor effectenmodellering (zie paragraaf 2.1.4). Het aantal inputbestanden dat wordt gegenereerd is gelijk aan het aantal iteraties dat wordt uitgevoerd met de Monte-Carlo-simulaties.
2. *Processing*: de effectenmodellering wordt uitgevoerd. Als na het uitvoeren van de modellering blijkt dat er overgangsvoorwaarden voor bijvoorbeeld flashover worden overschreven, wordt de inputfile nogmaals aangepast om rekening te houden met dat fenomeen.
3. *Post-processing*: de resultaten van de effectenmodellering worden statistisch geanalyseerd om de beschikbare veilige tijd voor brandweerinzet te bepalen.

Bovengenoemde fases zijn in Figuur 2.1 weergegeven.



**Figuur 2.1 Toepassing van Monte-Carlo-simulaties in dit onderzoek**

De Monte-Carlo-simulaties zijn geprogrammeerd in de programmeertaal Python. De codes kunnen worden opgevraagd bij het NIPV. Bij bepaalde stappen tijdens de Monte Carlo-simulaties (zoals het draaien van de simulaties met het gekozen brandmodel) is gebruikgemaakt van multiprocessing om het proces te versnellen.

### 2.1.4 Zonemodel CFAST

In dit onderzoek wordt voor alle effectenmodelleringen een brandmodel gebruikt. Dit is het zonemodel CFAST van NIST (Peacock et al., 2023). CFAST is gevalideerd op basis van

verschillende experimenten (NIST, 2015). Daaruit blijkt dat het model in staat is om rooklaagtemperaturen en -dikten te benaderen tot binnen de experimentele onzekerheid van de experimenten waarmee de validatie is uitgevoerd. CFAST heeft de neiging temperaturen te overschatten. De effectmodellering binnen dit onderzoek beperkt zich primair tot het modelleren van temperaturen. De overschatting van temperaturen wordt hier gezien als conservatieve aanpak, omdat een hogere temperatuur leidt tot een hogere thermische belasting. Om die reden is gekozen CFAST te gebruiken als brandmodel.

#### **De 'bias' van CFAST voor temperaturen**

Specifiek loopt de bias van het model voor rooklaagtemperaturen voor eenvoudige geometrieën uiteen van 0,97 tot 1,45.<sup>8</sup> Dit betekent dat het model de temperaturen meer overschat (tot een overschatting van gemiddeld 45 %) dan onderschat (tot een onderschatting van gemiddeld 3 %).

### **2.1.5 Draagconstructie en brandscheidingen**

De AST wordt in dit onderdeel bepaald door de tijd tot het falen van de draagconstructie of de brandscheiding. Daarbij wordt de 'equivalente brandduur' gebruikt (zie voor meer informatie paragraaf 1.5).

Betrokken op de methodiek uit dit onderzoek, is de AST voor de draagconstructie en brandscheidingen als volgt bepaald:

1. Uitvoeren Monte-Carlo-simulaties met uitgangspunten en variabelen als beschreven in paragraaf 2.2.
2. Per iteratie de equivalente brandduur bepalen. De uitkomst van elke iteratie is toegevoegd aan een dataset.
3. De dataset statistisch analyseren. Hierbij zijn de rekenresultaten van de equivalente brandduur vergeleken met de brandwerendheidseisen en vertaald naar een kansverdeling. Het percentiel van de kansverdeling waarop de equivalente brandduur hoger is dan de brandwerendheidseis, is gelijk aan de betrouwbaarheid van de brandscheiding of draagconstructie.

Op basis hiervan ontstaat er een beeld van de betrouwbaarheid van constructies met verschillende brandwerendheden. De resultaten laten zich echter niet vertalen naar een spreiding van de daadwerkelijke beschikbare veilige tijd (AST). De methode van de equivalente brandduur leent zich daar namelijk niet voor.

#### **Bepaling van de equivalente brandduur**

In dit onderzoek is de equivalente brandduur bepaald met de methode van Wade et al. zoals beschreven in paragraaf 1.5. Daarvoor is gekozen, omdat:

- > de methode de equivalente brandduur aan de hand van de geaccumuleerde thermische energie in de constructie bepaalt. Dit is een nauwkeuriger aanpak dan bijvoorbeeld de methode die de interne gasenergie gebruikt (genoemd methode 2).
- > de methode is toe te passen zonder dat er gedetailleerde informatie van de constructie nodig is.
- > de methode relatief eenvoudig toe te passen is. Zo wordt de mechanische respons verwaarloosd.

De methode is als volgt toegepast, waarbij per iteratie van de Monte-Carlo-simulatie:

<sup>8</sup> In complexere geometrieën zoals corridors en trappenhuizen ligt die bias waarschijnlijk hoger of lager.

1. de tijdafhankelijke thermische respons van de constructie voor blootstelling aan de standaardbrandkromme is bepaald (dit is de referentie). Hiervoor is gebruikgemaakt van de iteratieve methode als opgenomen in paragraaf 2.2.3 uit 'An Introduction to Fire Dynamics' (Drysdale, 2011, Chapter 2.2.3). Hieruit volgt de geaccumuleerde energie tijdens een test met de standaardbrandkromme.
2. de tijdafhankelijke gastemperatuur in het compartiment bij een natuurlijke brand met CFAST wordt bepaald.
3. de thermische respons van de constructie met dezelfde methode als beschreven onder 1) wordt bepaald. Dit is de iteratie waarmee de referentie wordt vergeleken.
4. de totale geaccumuleerde energie voor blootstelling aan de natuurlijke brand wordt bepaald, tot aan het moment dat de constructie start met afkoelen.
5. de equivalente brandduur gelijk is aan het tijdstip dat de geaccumuleerde energie bij de standaard brandkromme gelijk is aan de geaccumuleerde energie voor de natuurlijke brand.

### 2.1.6 Persoonlijke veiligheid van hulpverleners

De AST wordt in dit onderdeel bepaald door de tijd tot er vanwege de effecten van de brand geen veilige brandweerinzet meer kan worden uitgevoerd in de ruimten die onderdeel zijn van de aanvalsroute. De analyse is uitgevoerd met Monte-Carlo-simulaties, waarbij er per iteratie van de Monte-Carlo-simulatie:

1. de tijdafhankelijke gastemperatuur<sup>9</sup> wordt bepaald in de brandruimte en andere ruimtes in de aanvalsroute bij een natuurlijke brand met CFAST.
2. de AST in die ruimten aan de hand van acceptatiecriteria is bepaald. De uitkomst van elke iteratie is toegevoegd aan een dataset.
3. de dataset statistisch geanalyseerd is, zodat er zicht is ontstaan op de kansverdeling van de AST.

Deze analyse is voor verschillende gebouwhoogten uitgevoerd, zodat er een beeld is gevormd van de ontwikkeling van de AST met toenemende gebouwhoogte.

## 2.2 Uitgangspunten en variabelen

In deze paragraaf worden de uitgangspunten en variabelen beschreven die zijn gebruikt bij de bepaling en analyse van de beschikbare veilige tijd voor brandweerinzet (AST), eerst met betrekking tot de draagconstructie en brandscheidingen in een gebouw en vervolgens op de persoonlijke veiligheid van hulpverleners in een gebouw.

### 2.2.1 Draagconstructie en brandscheidingen

De rekenresultaten die op basis van onderstaande uitgangspunten en variabelen verkregen zijn, zijn vertaald naar een betrouwbaarheid van de draagconstructie en brandscheidingen.

#### Uitgangspunten

Hieronder worden de uitgangspunten beschreven die voor de uitgevoerde simulaties gelijk zijn. De uitgangspunten staan vast; ze zijn dus niet veranderd tijdens het onderzoek.

---

<sup>9</sup> In paragraaf 2.3 wordt uitgelegd waarom in dit onderzoek alleen de gastemperatuur bepalend is voor de AST.

### *Bouwkundige en installatietechnische brandveiligheidsvoorzieningen*

Voor de bouwkundige en installatietechnische brandveiligheidsvoorzieningen in het gebouw zijn de volgende uitgangspunten (Tabel 2.1) aangehouden:

**Tabel 2.1 Aangenomen brandveiligheidsvoorzieningen**

	<b>0-7 meter</b>	<b>7-13 meter</b>	<b>13-70 meter</b>	<b>70-400 meter</b>
Brandwerendheid van de draagconstructie [min]	60*	90	120	120
Brandwerendheid van brandscheidingen tussen woningen [min]	60*	60	60	30
Brandwerendheid van brandscheidingen tussen woning en extra beschermde vluchtroute [min]	30	30	30	30
Brandveiligheidsinstallaties	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	Automatische brandbestrijdingsinstallatie

\* Hierbij is geen rekening gehouden met reductie van de WBDBO op basis van vuurbelasting.

#### **Brandbestrijdingsinstallatie**

De term 'brandbestrijdingsinstallatie' zoals deze in de regelgeving wordt gebruikt, doet vermoeden dat de installatie bedoeld is voor het *blussen* van een brand. Dat is echter niet het geval. Brandbestrijdingsinstallaties zijn namelijk bedoeld om de brandontwikkeling te *beheersen*. In dit onderzoek wordt de term dan ook op die manier opgevat.

#### *Gemodelleerde geometrie en strategie modellering*

De gemodelleerde geometrie beperkt zich tot de woning waarin de brand zich bevindt. Er wordt geen nadere indeling in ruimten meegenomen. De oppervlakte van die woning is variabel verondersteld. Dit is beschreven in paragraaf 2.2.2. Omdat alle iteraties in de Monte-Carlo-simulaties overgaan in flashover, tenzij er sprinklers aanwezig zijn (zie 'brandkenmerken'), is in alle gevallen een éénzone-aanpak voor de brandruimte gebruikt.

#### *Verdiepingshoogte en bouwlagen waarvoor de betrouwbaarheid is bepaald*

Voor het bepalen van het aantal bouwlagen van een gebouw is in dit onderzoek een verdiepingshoogte van 3 meter aangehouden. Daarbij is aangesloten op fase I uit dit onderzoek. De betrouwbaarheid van de draagconstructie en brandscheidingen is bepaald voor een bouwlaag in elke categorie van de getoonde gebouwhoogtes tot 70 meter hoog. Voor gebouwen hoger dan 70 meter is aangenomen dat de betrouwbaarheid lager wordt naarmate het gebouw hoger wordt, omdat de betrouwbaarheid van de automatische brandbestrijdingsinstallatie (sprinkler) afneemt bij een toenemende gebouwhoogte. Voor gebouwen hoger dan 70 meter is de AST daarom bepaald voor de onderste en bovenste bouwlaag in het bereik. Daartussen is de AST elke 20 bouwlagen bepaald. Tussen de rekenresultaten wordt geïnterpoleerd. Dit resulteert in het overzicht zoals getoond in Tabel 2.2.

**Tabel 2.2 Bouwlagen waarvoor AST is bepaald**

Bereik verdiepingshoogte	Bouwla(a)g(en) waarop AST is bepaald
0-7	Willekeurig
7-13	Willekeurig
13-70	Willekeurig
70-400 meter	24, 40, 60, 80, 100, 120, 133

### *Brandkenmerken*

Bij de bepaling van de AST betrokken op draagconstructies en brandscheidingen is uitgegaan van de volgende (generieke) brandkenmerken:

- > De brand ontstaat in een woning.
- > De brand ontwikkelt zich in alle scenario's tot een volledig ontwikkelde brand (flashover). Uitgangspunt daarbij is dat een brand overgaat tot flashover als de rooklaagtemperatuur 500°C bedraagt. Op het moment van flashover wordt het brandvermogen maximaal.
- > De brand dooft (volledig) als er geen vuurlast meer in de ruimte aanwezig is. De doof-fase van de brand start wanneer het criterium daarvoor wordt bereikt (zie bijlage 2).
- > Voor de chemische samenstelling van de brandstof is een flexibel polyurethaanschuim (CH<sub>1.8</sub>N<sub>0.05</sub>O<sub>0.3</sub>) aangehouden. De brandstofkenmerken daarvan komen overeen met die van de inrichting van veel woningen.
- > De brand heeft een effectieve verbrandingswarmte ( $\Delta H_{c,eff}$ ) van  $25 \cdot 0.8 = 20$  MJ/kg. Deze waarde is representatief voor schuimkunststoffen (Hurley, 2016).
- > Er wordt geen rekening gehouden met eventuele hoek- of wandeffecten op de inmening in de vuur- en rookpluim (de brand is gemodelleerd midden in de ruimte).

### *Ventilatie van de brandruimte*

De ventilatieopeningen in de brandruimte bepalen in grote mate de hoeveelheid zuurstof die beschikbaar is voor de verbranding in de brandruimte. Bij de berekeningen met CFAST zijn de afmetingen van de ventilatieopeningen in de omhulling van de brandruimte zodanig gekozen dat:

- > er voldoende zuurstof is om de brand over te laten gaan tot flashover. Als er sprinklers aanwezig zijn, wordt er geen flashover verondersteld en geldt dit criterium niet.
- > alle brandstof in het brandcompartiment ontbrandt. Er is geen sprake van een uitslaande brand.

Met deze aanpak worden constructies thermisch belast door een volledig ontwikkelde brand en worden convectieve warmteverliezen door openingen zo klein mogelijk gehouden.

### **Andere relevante variabelen**

Met bovengenoemde aanpak is een situatie beoogd waarbij de constructie thermisch belast wordt door een volledig ontwikkelde brand. Andere relevante variabelen gerelateerd aan openingen die effect kunnen hebben op de ontwikkeling van de gastemperatuur, zoals de aanwezigheid van schorten en borstweringen, zijn niet meegenomen in dit onderzoek.

### *Materiaaleigenschappen omhulling*

De materiaaleigenschappen van de omhulling van de brandruimte bepalen hoeveel warmte er door de constructie wordt geaccumuleerd. Ze zijn daardoor ook bepalend voor de temperatuur van de rooklaag in de brandruimte en hebben invloed op de thermische belasting van constructiedelen. In dit onderzoek is de betrouwbaarheid van draagconstructie en brandscheidingen bepaald voor twee verschillende omhullingen<sup>10</sup>, waarbij is gedifferentieerd voor wat betreft de materiaaleigenschappen daarvan. De uitgangspunten voor de twee constructies zijn weergegeven in Tabel 2.3.

**Tabel 2.3 Uitgangspunten materiaaleigenschappen constructies**

Con-structie	Thermische traagheid $r$ ( $\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1/2}$ )	Thermische geleiding $k$ (W/mK)	Dichtheid $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Soortelijke warmte $c$ (J/kgK)	Bijvoorbeeld
Accumulerend	2035 (Hoog)	2	2300	900	Beton
Isolerend	380 (Laag)	0,14	550	1880	Hout/metal-stud

Door voor een materiaal met een lage en hoge thermische traagheid de AST te bepalen, ontstaat een beeld van de mogelijke spreiding van de AST in moderne gebouwen.

#### Thermische traagheid

De thermische traagheid van een materiaal bepaalt hoe eenvoudig (warmte)energie naar de binnenzijde van het materiaal wordt geleid. De thermische traagheid ( $r$ ) van een materiaal wordt bepaald door de wortel van het product van de thermische geleiding ( $k$ ), de dichtheid ( $\rho$ ) en de soortelijke warmte ( $c$ ) van een materiaal:

$$r = \sqrt{k\rho c}$$

Een materiaal met een hoge thermische traagheid geleidt warmte eenvoudig naar de binnenzijde van het materiaal. Het materiaal kan daardoor snel veel energie accumuleren. Een voorbeeld hiervan is een betonvloer. Bij een materiaal met een lage thermische traagheid geldt het tegenovergestelde: de energiestroom naar de binnenzijde van het materiaal is beperkt. Als gevolg daarvan blijft veel energie aan de oppervlakte van het materiaal en stijgt de oppervlaktetemperatuur snel. Daardoor is de warmte-uitwisseling tussen de gassen in de ruimte en het materiaal beperkt. Een voorbeeld hiervan is een houtconstructie of een geïsoleerde binnenwand (metal-stud).

#### Variabelen bij Monte Carlo-simulaties

Een aantal relevante inputparameters van het brandmodel is bij de bepaling van de AST variabel verondersteld. Een overzicht is opgenomen in Tabel 2.4. Een nadere toelichting en onderbouwing zijn opgenomen in bijlage 1 van dit rapport.

**Tabel 2.4 Aangehouden verdelingen voor variabelen**

Soort verdeling	$\mu$	$\sigma$	$\beta$	Modus	Min	Max	$p_{\text{succes}}$
-----------------	-------	----------	---------	-------	-----	-----	---------------------

<sup>10</sup> Er wordt geen rekening gehouden met een brandbare constructie.

Inwendige hoogte woning [m]	Uniform	-	-	-	2,6	3,2	-
Oppervlakte van de woning [m <sup>2</sup> ]	Uniform	-	-	-	40	120	-
Response Time Index (RTI, m0 <sup>-5</sup> s <sup>0.5</sup> )	Uniform	-	-	-	50	120	-
Radiale afstand brand tot sprinklerkop [m]	Driehoeksverdeling	2,65	0	3,89	-	-	-
Brandgroeisnelheid ( $\alpha$ ) [kW/s <sup>2</sup> ]	Lognormaal	0,006	1,1	-	-	-	-
Brandvermogensdichtheid [kW/m <sup>2</sup> ]	Uniform	-	-	-	320	570	-
Vuurbelasting [MJ/m <sup>2</sup> ]	Gumbel (type 1/rechts)	780	-	58	-	-	-
Betrouwbaarheid sprinklerinstallatie [-]	Uniform	Afhankelijk van gebouwhoogte, zie onderstaand kader en bijlage 2					
Kans op brandbeheersing [-]	Discreet	-	-	-	-	-	0,5
Kans op brandblussing [-]	Discreet	-	-	-	-	-	0,5
Start dooffase [-]	Uniform	-	-	-	0,6	0,8	-
Radiatieve fractie [-]	Uniform	-	-	-	0,31	0,59	-

#### Toelichting bij statistische parameters

In de bovenstaande tabel zijn de volgende parameters weergegeven:

- >  $\mu$ : gemiddelde van de verdeling; bij een lognormaalverdeling is weergegeven e<sup>u</sup>
- >  $\sigma$ : standaardafwijking van de lognormaalverdeling
- >  $\beta$ : spreidingsmaat bij de gumbelverdeling
- > Modus: de meest voorkomende waarde, getoond voor driehoeksverdeling
- > min en max: minimum en maximum van de uniforme verdeling
- >  $p_{succes}$ : discrete kans op correct functioneren van de (sprinkler)installatie.

#### Automatische brandbestrijdingsinstallatie

Er wordt verondersteld dat in gebouwen hoger dan 70 meter een automatische brandbestrijdingsinstallatie aanwezig is. In dit onderzoek wordt uitgegaan van een automatische sprinklerinstallatie. De betrouwbaarheid van de installatie en de wijze waarop de sprinklerinstallatie de brand beïnvloedt, zijn beschreven in bijlage 2.

### 2.2.2 Persoonlijke veiligheid van hulpverleners

Veel van de uitgangspunten en alle variabelen die zijn beschreven in paragraaf 2.2.1 zijn ook gebruikt bij de bepaling van de AST betrokken op de persoonlijke veiligheid van hulpverleners tijdens een inzet. Het betreft de volgende uitgangspunten en variabelen:

- > Verdiepingshoogte en bouwlagen waarvoor de AST is bepaald
- > Brandkenmerken

- > Ventilatie van de brandruimte
- > Materiaaleigenschappen van de omhulling van de brandruimte of andere ruimten in de aanvalsroute
- > Automatische brandbestrijdingsinstallatie (sprinkler)
- > Alle variabelen.

Aanvullende uitgangspunten en variabelen worden hieronder nader toegelicht.

### Uitgangspunten

In deze paragraaf worden de uitgangspunten beschreven die voor de uitgevoerde simulaties gelijk zijn. De uitgangspunten staan vast; ze zijn dus niet veranderd tijdens het onderzoek.

#### *Bouwkundige en installatietechnische brandveiligheidsvoorzieningen*

De uitgangspunten met betrekking tot de bouwkundige en installatietechnische brandveiligheidsvoorzieningen die aanwezig zijn in de gebouwen, zijn weergegeven in Tabel 2.5.

**Tabel 2.5 Aangenomen brandveiligheidsvoorzieningen**

	0-20 meter	20-70 meter	70-400 meter
Zelfsluitende deuren	Ja	Ja	Ja*
Sluis voor trappenhuis	Nee	Ja	Ja
Overdrukinstallatie	Nee	Nee	Ja
Automatische brandbestrijdingsinstallatie	Nee	Nee	Ja

\* Door de SBR-richtlijn voor hoge gebouwen worden geen zelfsluitende woningtoegangsdeuren voorgeschreven. Dit is niet in lijn met de huidige nieuwbouwvoorschriften voor woonfuncties. Er is gekozen om in dit onderzoek wel uit te gaan van zelfsluitende woningtoegangsdeuren. Dit geldt overigens voor meer aspecten dan enkel zelfsluitendheid. Zie ook het rapport van fase I.

### Gemodelleerde geometrie en strategie modellering

Om de AST met betrekking tot de persoonlijke veiligheid van hulpverleners te bepalen, is rookverspreiding naar de aanvalsroute van de brandweer gemodelleerd. De geometrie van de aanvalsroute is zo gekozen dat deze een gegeneraliseerde weergave is van de mogelijke gebouwontsluitingen zoals beschreven in 1.1.2. Daartoe bestaat het model uit de volgende 'zones':

1. De woning, de oppervlakte en inwendige hoogte hiervan worden als variabel verondersteld.
2. Een inpandige corridor met een lengte en breedte van respectievelijk 20 meter en 2 meter. De hoogte is gelijk aan de hoogte van de woning.
3. Een sluis met een lengte en breedte van respectievelijk 2 meter en 2 meter bij gebouwen hoger dan 20 meter. De hoogte is gelijk aan de hoogte van de woning.
4. Het trappenhuis met een hoogte van 20 meter. De lengte en breedte zijn respectievelijk 4 meter en 2,5 meter.

### Variaties in de praktijk

In de praktijk zijn er legio variaties mogelijk op de gebruikte geometrie. Het is niet mogelijk om al die variaties mee te nemen in dit onderzoek. Dat is ook niet noodzakelijk om een goede vergelijking te kunnen uitvoeren tussen verschillende gebouwhoogtes met verschillende brandveiligheidsvoorzieningen. Sterker: juist een eenvoudige geometrie die hooguit op nuances wordt aangepast om uiting te geven aan brandveiligheidsvoorzieningen zorgt ervoor dat een goede vergelijking mogelijk is.

In alle gevallen wordt uitgegaan van een brand die zich ongehinderd kan ontwikkelen tot een volledig ontwikkelde brand (flashover), tenzij er sprake is van brandbeheersing door de automatische brandbestrijdingsinstallatie (sprinkler). Om die reden wordt er in de woning uitgegaan van een éénzone-aanpak. In de corridor en eventueel in de sluis wordt uitgegaan van een tweezone-aanpak.<sup>11</sup> Omdat rookverspreiding naar en in het trappenhuis gelet op de complexe geometrie niet goed met een zonemodel te bepalen is, is in het trappenhuis uitgegaan van een éénzone-aanpak. Het betreft een grove benadering van de werkelijkheid.

### **Deuren openen en sluiten**

Het ligt voor de hand dat de deuren in de aanvalsroute gedurende de brand worden geopend en gesloten door bijvoorbeeld de bewoners van de woning waarin de brand zich bevindt. Het openen en sluiten van deuren beïnvloedt de rookverspreiding door het gebouw en is daarom meegenomen in de simulaties. Daarbij zijn de volgende uitgangspunten gekozen:

- > De deur tussen de woning en de corridor gaat open op het moment dat de bewoners de vlucht- / aanvalsroute betreden. Als gevolg van het zelfsluitendheidsmechanisme op de deur sluit de deur weer na een bepaalde tijd (zie Tabel 2.6), tenzij dat mechanisme niet correct functioneert. In dat geval blijft de deur gedurende de resterende brandduur openstaan.
- > De bewoners verplaatsen zich naar het trappenhuis en openen daartoe de deuren tussen de corridor en het trappenhuis. Uitgangspunt is dat bewoners 20 seconden nodig hebben om zich te verplaatsen van de woning naar de sluis en/of trappenhuis. Ook in dit geval geldt dat deuren als gevolg van het zelfsluitendheidsmechanisme weer gesloten worden nadat ze geopend zijn, tenzij dat mechanisme niet correct functioneert. In dat geval blijft de deur gedurende de resterende brandduur openstaan
- > Het openen en sluiten van deuren door ander bewoners of door de brandweer tijdens de brandweerinzet wordt niet gemodelleerd.

### **Overdruksysteem**

In gebouwen hoger dan 70 meter wordt een overdruksysteem verondersteld aanwezig te zijn.

---

<sup>11</sup> Omdat er in de woning uitgegaan wordt van een éénzone-model, is in de corridor en de sluis snel na het openen van de deuren eveneens sprake van een situatie die een éénzone-model benadert.

### Werking overdruksysteem

Een overdruksysteem heeft tot doel om rookindringing in een of meerdere ruimten te beperken door die ruimten op overdruk te brengen ten opzichte van de omliggende ruimten. Hiertoe wordt lucht mechanisch toegevoerd in de overdrukruimte. Als gevolg hiervan zal er:

- > geen of beperkt lucht- en rooktransport plaatsvinden richting de overdrukruimte door kieren en naden in de omhulling.
- > beperkt rooktransport plaatsvinden wanneer een deur in de omhulling van de overdrukruimte open blijft staan. Het overdruksysteem zorgt in dat geval voor een luchtstroming vanuit de overdrukruimte door de deur.

Binnen de kaders van de hoogbouwrichtlijn is het toegestaan om het trappenhuis of de sluis voor het trappenhuis op overdruk te zetten. In dit onderzoek wordt uitgegaan van een situatie waarin de voorportalen op overdruk worden gezet, omdat:

- > de kans op een groot aantal open deuren wordt verminderd.
- > de onzekerheid met betrekking tot de lektheid van de omhulling wordt verminderd.
- > er minder lucht nodig is om de sluis op overdruk te brengen dan wanneer een trappenhuis op overdruk wordt gebracht.

Het heeft geen zin de werking van een overdruksysteem nauwkeurig te modelleren in een zonemodel. In alle gemodelleerde gevallen waarin het overdruksysteem correct werkt, zal deze namelijk elke vorm van rookverspreiding naar de sluis beperken. De door brand veroorzaakte overdruk in de corridor zal immers nooit hoger worden dan 50 Pa, zeker niet als er sprake is van voldoende gevelopeningen in de brandruimte zoals hier is aangenomen. Daarnaast kan eventuele rookverspreiding door lokale drukverschillen niet worden gemodelleerd in een zonemodel. Daarom is in dit onderzoek gekozen om in scenario's waarin het overdruksysteem correct werkt, de deur tussen de corridor en de sluis gesloten te houden. De betrouwbaarheid van het systeem wordt beschreven in bijlage 1.

### Acceptatiecriteria voor veilig brandweeroptreden

Om te bepalen of er gedurende de brand veilig kan worden opgetreden door de brandweer, zijn acceptatiecriteria gekozen. Acceptatiecriteria geven een grens voor wat nog acceptabele omstandigheden zijn. Als die grens overschreden wordt, wordt aangenomen dat veilig optreden niet meer mogelijk is. Er zijn weinig data beschikbaar over de invloed van brand en rook op brandweermensen. Daarom is aangesloten op de informatie die beschreven is in 1.4.4.

**Tabel 2.6 Acceptatiecriteria voor de gastemperatuur en stalingflux**

Max. blootstellingsduur [min]	Gastemperatuur [°C]	Beschrijving
25	100	Nablussing
15	150	Routine
5	260	Normaal
0.5	500	Noodsituatie

Als uitgangspunt is gekozen dat brandweerprofessionals enkel warmtestraling ontvangen van de rooklaag (en niet van de brandhaard). Dit is voor een inzet in andere ruimten dan de brandruimte een valide uitgangspunt. Daarom wordt er enkel getoetst aan de

acceptatiecriteria voor de gastemperatuur. De in paragraaf 1.4.4 genoemde stralingsfluxen zijn een min of meer directe vertaling van de gastemperaturen middels de wet van Stefan-Boltzman. Als het criterium voor gastemperatuur wordt overschreden, wordt gelijktijdig ook het criterium voor warmtestraling overschreden.

#### Indirecte fysiologische gevolgen en effectiviteit van de brandweerinzet

Er wordt in dit onderzoek niet gekeken naar aspecten zoals giftigheid van de rook of beperkt zicht tijdens de brandweerinzet. Die aspecten hebben geen *directe* nadelige fysiologische gevolgen voor brandweerprofessionals. Giftige stoffen kunnen echter wel *indirecte* nadelige gevolgen hebben. Daarnaast kan het beperkte zicht negatieve gevolgen hebben voor de effectiviteit van de brandweerinzet. De effecten van deze aspecten zijn lastig te kwantificeren, maar kunnen wel degelijk relevant zijn voor het brandweeroptreden.

#### Variabelen bij Monte-Carlo-simulaties

Een aantal relevante inputparameters van het brandmodel is bij de bepaling van de AST variabel verondersteld. Daarbij zijn de variabelen als getoond in Tabel 2.7 gekozen. Daarnaast zijn ook de variabelen die gebruikt zijn voor de simulaties betrokken op brandscheidingen en de draagconstructie gebruikt (zie Tabel 2.3). Een nadere toelichting en onderbouwing zijn opgenomen in bijlage 2 van dit rapport.

**Tabel 2.7 Aangehouden verdelingen voor variabelen**

	Soort verdeling	$\mu$	$\sigma$	Min	Max	$p_{\text{succes}}$
Betrouwbaarheid zelfsluitende deuren [-]	Discreet	-	-	-	-	0.8
Sluiten van de deur na geopend te zijn [s]	Lognormaal	11	4,7	-	-	-
Moment van openen deur [s]	Uniform	-	-	100	600	-
Betrouwbaarheid overdrukinstallatie	Discreet	Afhankelijk van gebouwhoogte, zie bijlage 2				

#### Toelichting bij statistische parameters

- >  $\mu$ : gemiddelde van de verdeling; bij een lognormaalverdeling is weergegeven e <sup>$\mu$</sup>
- >  $\sigma$ : standaardafwijking van de lognormaalverdeling
- > min en max: minimum en maximum van de uniforme verdeling
- >  $p_{\text{succes}}$ : discrete kans op correct functioneren (sprinkler)installatie.

## 2.3 Kwaliteit van het onderzoek

In deze paragraaf wordt ingegaan op de kwaliteit van het uitgevoerde onderzoek. Er wordt stilgestaan bij de interne en externe validiteit en betrouwbaarheid.

#### Interne en externe validiteit

Interne validiteit gaat over de geloofwaardigheid van het onderzoek: wordt er door de onderzoeksmethode en de (kwaliteit van) uitvoering daarvan een juist beeld verkregen van de

realiteit die wordt onderzocht? Externe validiteit gaat over de kwaliteit van de gebruikte data: hoe generaliseerbaar zijn die data over verschillende situaties en perioden?

De interne validiteit is in dit onderzoek zoveel mogelijk geborgd door te kiezen voor een probabilistische onderzoeksmethodiek. Daarmee wordt onderkend dat een brandincident in gebouwen niet te beschrijven is in één scenario, maar dat de realiteit gevormd wordt door tal van mogelijke scenario's. Op die wijze wordt een zo realistisch mogelijk beeld van de AST verkregen. De kwaliteit van de uitvoering van het onderzoek is zo goed mogelijk geborgd door het uitvoeren van peer-reviews van zowel de uitgevoerde berekeningen als de inhoud van deze rapportage. De peer-reviews zijn uitgevoerd door personen die onderlegd zijn in methodiek die gebruikt is in dit onderzoek en door personen die kennis hebben van de operationele brandweer. Ook is het onderzoek voorgelegd aan een klankbordgroep bestaande uit brandweerpersoneel dat werkzaam is in de risicobeheersing of incidentbestrijding.

De probabilistische aard van het onderzoek zorgt daarnaast voor een brede generaliseerbaarheid en dus externe validiteit van de onderzoeksresultaten.

### **Betrouwbaarheid**

De betrouwbaarheid van dit onderzoek is zo goed mogelijk geborgd door de methode en de uitgangspunten die daarbij gebruikt zijn grotendeels te baseren op wetenschappelijke literatuur. Als er geen data beschikbaar zijn, is duidelijk beschreven welke uitgangspunten en variabelen zijn gehanteerd en waarom deze zijn gehanteerd. De literatuurstudie is uitgevoerd door verschillende personen, waardoor het zoekbereik is vergroot. De geprogrammeerde Python-code is gearchiveerd en kan worden opgevraagd.

De variabelen die zijn gebruikt bij de uitvoering van de Monte-Carlo-simulaties zijn zoveel als mogelijk gebaseerd op beschikbare literatuur. Tijdens het literatuuronderzoek zijn echter beperkte statistische spreidingsdata gevonden voor de verschillende variabelen. Naast de resultaten uit het literatuuronderzoek zijn daarom inschattingen voor de spreiding van de variabelen gebruikt. Andere gegevens kunnen leiden tot andere resultaten.

# 3 Betrouwbaarheid van de draagconstructie en brandscheidingen

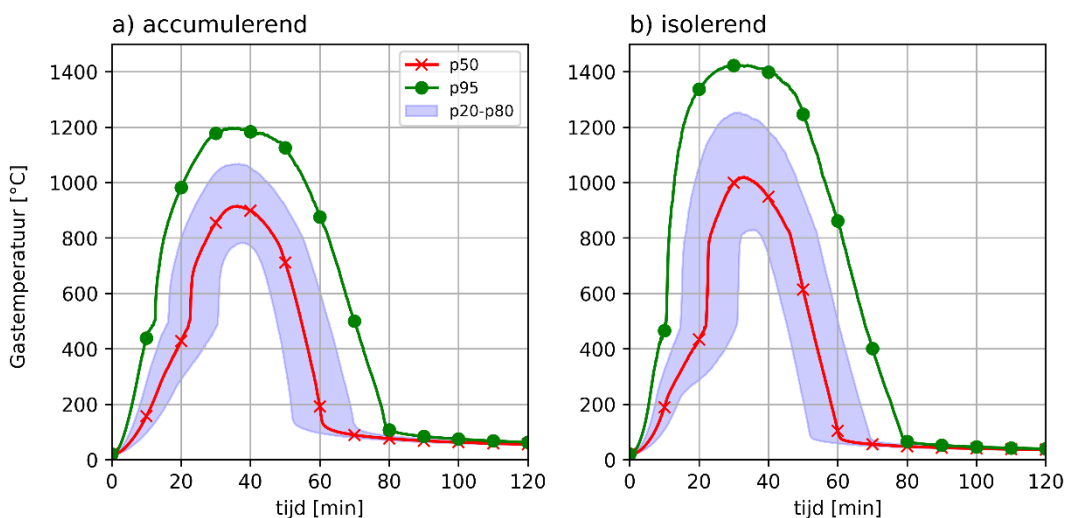
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de analyse van de betrouwbaarheid van draagconstructies en brandscheidingen gepresenteerd en toegelicht. Er is bij de berekeningen een onderscheid gemaakt tussen een geïsoleerde omhulling (zoals hout of een isolatiemateriaal) en een accumulerende omhulling (zoals beton). Tevens is onderscheid gemaakt tussen een gebouw dat niet en dat wel voorzien is van een automatische sprinklerinstallatie.

## 3.1 Gastemperatuur in de brandruimte

In dit onderzoek is gekozen om de thermische belasting van constructiedelen te bepalen op basis van de gastemperatuur in de brandruimte. Daarmee worden aspecten zoals directe straling van de brandhaard verwaarloosd. De gastemperatuur wordt in deze paragraaf beschreven.

### 3.1.1 Gebouwen lager dan 70 meter (geen sprinklerinstallatie)

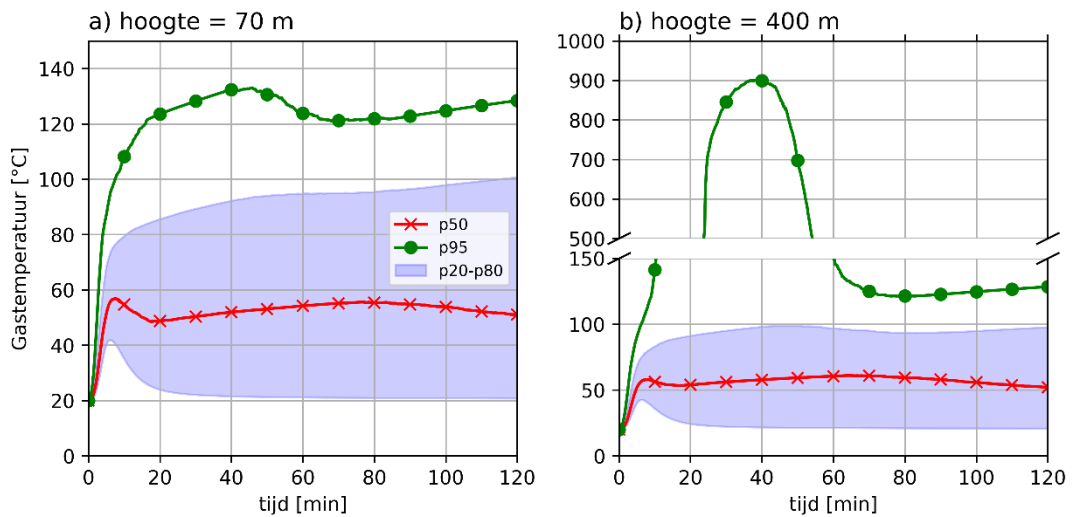
In een gebouw zonder sprinklerinstallatie ontwikkelen alle branden zich tot een volledig ontwikkelde brand. Er ontstaan temperaturen die uiteenlopen van 800°C tot 1400°C. Temperaturen in een compartiment met een isolerende omhulling liggen hoger dan de temperaturen in een compartiment met accumulerende omhulling. Een accumulerende omhulling kan meer energie opnemen, bijvoorbeeld uit de rooklaag. Dit resulteert in een lagere gastemperatuur.



**Figuur 3.1** Gastemperatuur in de brandruimte voor een a) accumulerende omhulling en (b) een isolerende omhulling

### 3.1.2 Gebouwen hoger dan 70 meter (met sprinklerinstallatie)

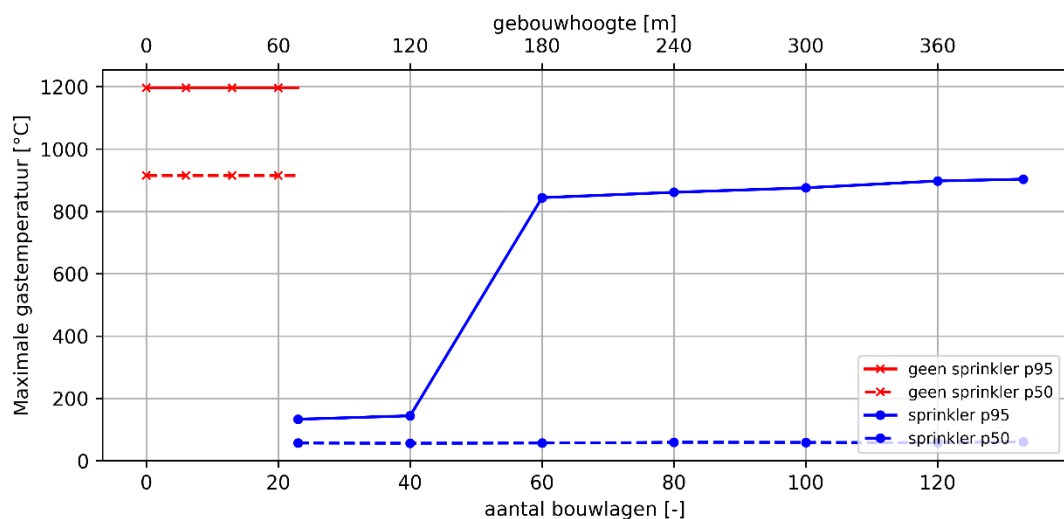
De temperaturen in de brandruimte volgen bij een gebouw met een automatische sprinklerinstallatie dezelfde trend als het brandvermogen (zie bijlage 2). De 50<sup>ste</sup>, 20<sup>ste</sup> en 80<sup>ste</sup> percentielen zijn bij de verschillende gebouwhoogtes op nuances na gelijk. Het 95<sup>ste</sup> percentiel is daarentegen sterk afhankelijk van de gebouwhoogte. Dit is weergegeven in Figuur 3.5 en wordt verklaard door de aangenomen afnemende betrouwbaarheid van de automatische sprinklerinstallatie met toenemende hoogte van het gebouw. De betrouwbaarheid van de sprinklerinstallatie is met name relevant voor de extremen van de resulterende kansverdeling.



**Figuur 3.2** Ontwikkeling gastemperatuur in met sprinklers beveiligde brandruimte met een accumulerende omhulling

#### Nadere analyse hoogte-afhankelijkheid van de gastemperatuur

Uit Figuur 3.3 blijkt dat de betrouwbaarheid van de sprinklerinstallatie vanaf een gebouwhoogte van circa 40 bouwlagen (of 120 meter) van invloed is voor het 95<sup>ste</sup> percentiel van de gastemperatuur.



**Figuur 3.3** Ontwikkeling van de maximale gastemperatuur in een brandruimte met een accumulerende omhulling bij een toenemende gebouwhoogte

## 3.2 Equivalente brandduur en betrouwbaarheid

In deze alinea zijn de resultaten voor de equivalente brandduur opgenomen. De wijze waarop deze is bepaald, is beschreven in paragrafen 1.5.1 en 2.1.6.

### Leeswijzer bij resultaten voor equivalente brandduur

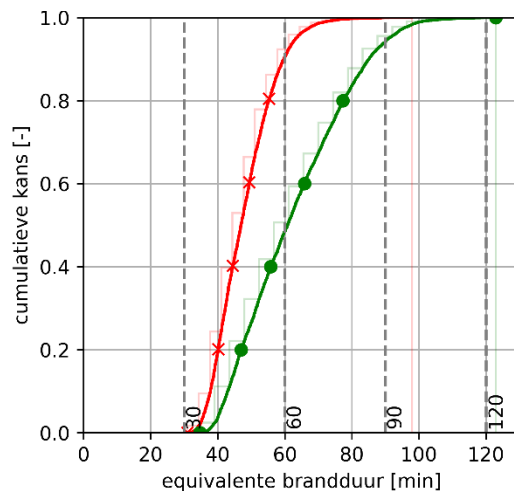
Zoals beschreven in paragraaf 1.1.1 is de vereiste brandwerendheid van brandscheidingen en draagconstructies afhankelijk van (onder meer) de hoogte van een gebouw. Uit verschillende figuren in dit hoofdstuk kan worden afgeleid wat de kans is dat die vereiste brandwerendheid hoger of lager is dan de equivalente brandduur. Bij een hogere equivalente brandduur dan de vereiste brandwerendheid wordt aangenomen dat de brandwerendheid onvoldoende is. Bij een lagere equivalente brandduur dan de vereiste brandwerendheid wordt aangenomen dat de brandwerendheid voldoende is.

### Voorbeeld

In Figuur 3.4 zijn de resultaten voor de equivalente brandduur weergegeven. In de grafiek zijn de cumulatieve kans en de verschillende brandwerendheden (verticale lijnen gelabeld '30', '60' et cetera) weergegeven. Zo is de kans dat een draagconstructie of brandscheiding met een brandwerendheid van 90 minuten voldoende brandwerend is 94 % (isolerend) of 99 % (accumulerend).

### 3.2.1 Gebouwen lager dan 70 meter (geen sprinklerinstallatie)

In Figuur 3.4 en Tabel 3.1 zijn de resultaten voor de equivalente brandduur gepresenteerd.



Figuur 3.4 Rekenresultaten voor de equivalente brandduur voor een accumulerende (rood) en geïsoleerde (groen) omhulling

**Tabel 3.1 Resultaten voor de betrouwbaarheid van brandscheidingen en draagconstructie zonder sprinklerinstallatie (gebouwhoogte 0-20 meter en 20-70 meter)**

Brandwerendheid (draagconstructie of brandscheiding) [min]	Betrouwbaarheid [%]	
	Accumulerend	Isolerend
30	≈ 0	≈ 0*
60	90,5	48,5
90	≈ 100	94,2
120	≈ 100	99,5

\* Een resultaat zoals ≈ 0 betekent dat er met de gekozen uitgangspunten en variabelen geen scenario's zijn gemodelleerd waarin de betreffende brandscheiding voldoende brandwerend is. Voor ≈ 100 geldt het omgekeerde: er zijn geen scenario's gemodelleerd waarin de brandwerendheid onvoldoende is.

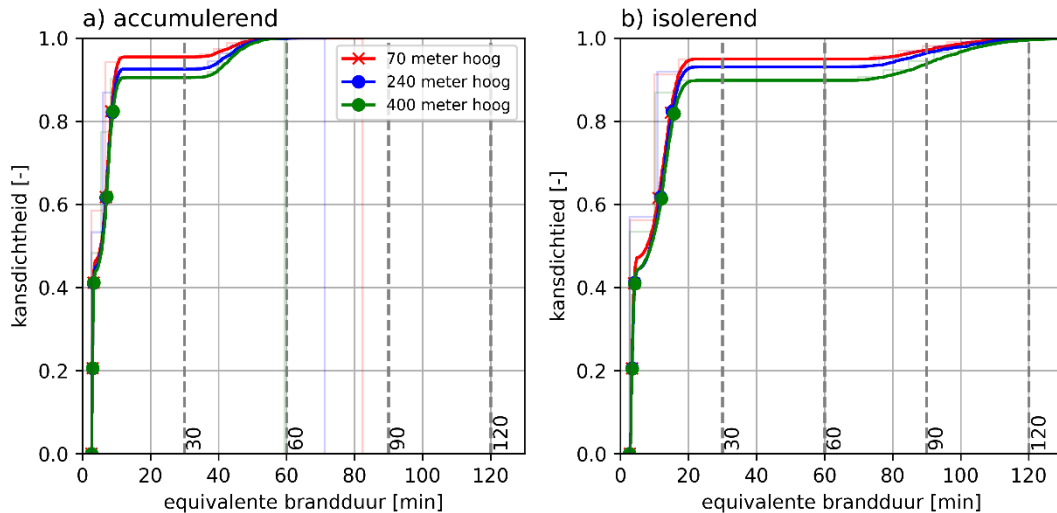
Opvallend aan de rekenresultaten is dat de betrouwbaarheid van brandscheidingen en draagconstructies beïnvloed wordt door de materiaaleigenschappen van de omhulling. Een isolerende omhulling resulteert in een hogere thermische belasting en daardoor in een lagere betrouwbaarheid van de constructie. Ook is de berekende spreiding bij een isolerende omhulling groter. Dit betekent dat, op basis van de gebruikte methode, de betrouwbaarheid van draagconstructies en brandscheidingen onder brandomstandigheden onzekerder is in gebouwen met een isolerende omhulling dan in gebouwen met een accumulerende omhulling.

Een constructiedeel (brandscheiding of draagconstructie) met een brandwerendheid van 60 minuten heeft een betrouwbaarheid die varieert tussen 49 % en 90 %. Dit betekent dat het constructiedeel in 10 % tot 51 % van de beschouwde scenario's onvoldoende brandwerendheid bezit om een volledige natuurlijke brand te doorstaan. Vanaf een brandwerendheid van 90 minuten benadert de betrouwbaarheid 100 %. Dit wil zeggen dat een brandscheiding of draagconstructie met een brandwerendheid van 90 minuten in vrijwel alle beschouwde brandscenario's voldoende brandwerendheid bezit om een volledige natuurlijke brand te doorstaan.

Ten slotte is opvallend dat de brandscheiding tussen een woning en een vluchtroute met een brandwerendheid (en aanvalsroute) voor beide constructies onbetrouwbaar is (de betrouwbaarheid is bijna 0 %). Dit terwijl deze scheiding van belang is voor het beschermen van de aanvalsroute van de brandweer (en vluchtende personen).

### 3.2.2 Gebouwen hoger dan 70 meter (met sprinkler)

In Figuur 3.5 en Tabel 3.2 zijn de rekenresultaten voor de equivalente brandduur weergegeven voor een gebouw met sprinklerinstallatie en accumulerende omhulling. De betrouwbaarheid van brandscheidingen en constructies neemt af naarmate de hoogte van een gebouw toeneemt.



**Figuur 3.5 Rekenresultaten voor de equivalente brandduur voor een gebouw van 70, 240 en 400 meter hoog met sprinkler**

Conform de huidige regelgeving moeten brandscheidingen in dit gebouwen hoger dan 70 meter een brandwerendheid van 30 minuten bezitten. De betrouwbaarheid daarvan, uitgaande van een accumulerende omhulling, varieert van circa 90 % tot 95 %. Draagconstructies moeten een brandwerendheid van 120 minuten bezitten. Binnen de kaders van dit onderzoek zijn die altijd betrouwbaar, ongeacht de gebouwhoogte. Dit geldt ook voor een brandwerendheidseis van 90 minuten. Een brandwerendheidseis van 60 minuten benadert in alle gevallen een betrouwbaarheid van 100 %.

**Tabel 3.2 Resultaten voor de betrouwbaarheid van brandscheidingen en draagconstructies met sprinklerinstallatie**

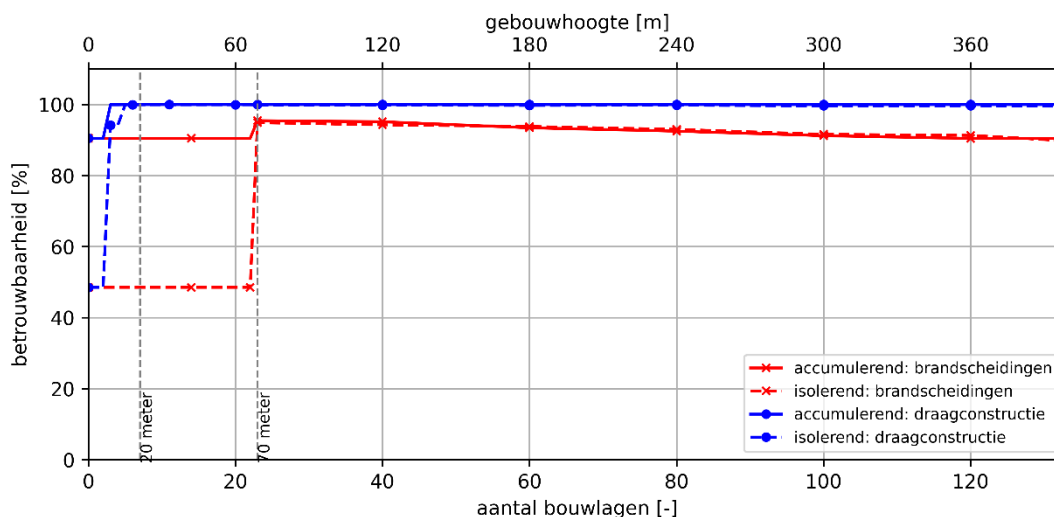
Brandwerendheid [min]	Betrouwbaarheid [%]							
	30		60		90		120	
Accumulerend (1) of isolerend (2)	1	2	1	2	1	2	1	2
Gebouwhoogte [m]								
70	95,5	94,9	> 99,9	94,9	≈ 100	97,1	≈ 100	99,9
120	95,2	94,3	> 99,9	94,3	≈ 100	96,7	≈ 100	99,8
180	93,5	93,8	> 99,9	93,8	≈ 100	96,6	≈ 100	99,8
240	92,5	93,0	> 99,9	93,0	≈ 100	96,4	≈ 100	99,8
300	91,2	91,6	> 99,9	91,6	≈ 100	95,2	≈ 100	99,7
360	90,5	91,3	> 99,9	91,3	≈ 100	94,7	≈ 100	99,7
400	90,3	89,8	> 99,9	89,8	≈ 100	93,8	≈ 100	99,6

In het geval van een isolerende omhulling laten de resultaten voor de equivalente brandduur op hoofdlijnen dezelfde trend zien als bij een accumulerende omhulling, zie ook Figuur 3.8.. De betrouwbaarheid van brandscheidingen of draagconstructies is in een isolerende omhulling lager dan wanneer er sprake is van een accumulerende omhulling. Desalniettemin zijn de betrouwbaarheden vergeleken met de resultaten zonder sprinklerinstallatie hoog.

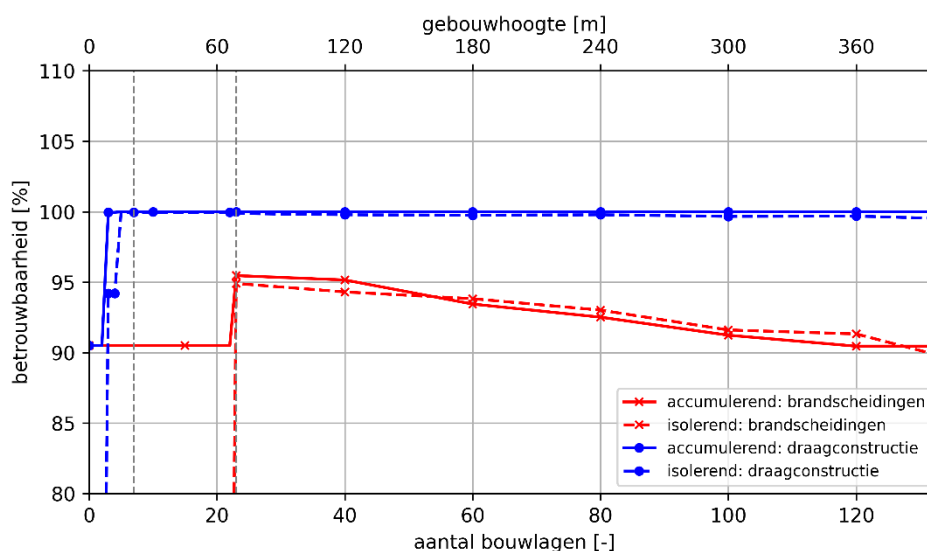
### 3.3 Conclusie

In Figuur 3.6 is de betrouwbaarheid van draagconstructies en brandscheidingen weergegeven als functie van de gebouwhoogte, waarbij is uitgegaan van de vigerende brandwerendheidseisen. Daaruit valt het volgende op te maken:

- > De betrouwbaarheid van de brandwerende constructies neemt toe naarmate een gebouw hoger wordt als gevolg van hogere brandwerendheidseisen en de installatie van een automatische sprinklerinstallatie vanaf 70 meter.
- > Tegelijkertijd neemt de betrouwbaarheid vanaf 70 meter af met de hoogte van een gebouw door de afnemende betrouwbaarheid van de sprinklerinstallatie.
- > Vanaf een brandwerendheid van 120 minuten (vanaf 14 meter) benadert de betrouwbaarheid van draagconstructies in woongebouwen 100 %. Dit wil zeggen dat in geen van de gesimuleerde scenario's de equivalente brandduur hoger is dan de gestelde brandwerendheidseis. Voor gebouwen hoger dan 14 meter en lager dan 70 meter wordt dit al behaald met een brandwerendheidseis van 90 minuten. In gebouwen hoger dan 70 meter wordt dit ingevuld door een brandwerendheidseis van 120 minuten en een automatische sprinklerinstallatie.
- > De betrouwbaarheid van brandscheidingen is lager dan die van draagconstructies. De betrouwbaarheid van brandscheidingen ligt tussen de 49 % en 95 % en is afhankelijk van de gebouwhoogte, de brandwerendheid en of de omhulling geïsoleerd is of niet.
- > In gebouwen hoger dan 70 meter kan conform de regelgeving worden volstaan met een brandwerendheid van 30 minuten in combinatie met de aanwezige sprinklerinstallatie. Dit is een reductie ten opzichte van gebouwen lager dan 70 meter, waar een brandwerendheid van 60 minuten geldt, maar waar niet in sprinklerinstallatie is voorzien. Een brandwerendheid van 30 minuten gecombineerd met een sprinklerinstallatie is betrouwbaarder dan een brandwerendheid van 60 minuten. De brandwerendheid neemt af met de toenemende hoogte van het gebouw, omdat aangenomen is dat betrouwbaarheid van de sprinklerinstallatie tevens afneemt naarmate het gebouw hoger wordt.
- > Opvallend is dat brandscheidingen met een brandwerendheid van 30 minuten een lage betrouwbaarheid hebben. De kans dat deze een volledige brandduur doorstaan is (zonder een automatische sprinklerinstallatie) vrijwel 0 %. Als er wel een sprinklerinstallatie aanwezig is, wordt de betrouwbaarheid van een scheiding met een brandwerendheid van 30 minuten grofweg gelijk aan de betrouwbaarheid van de sprinklerinstallatie.



**Figuur 3.6 Betrouwbaarheid brandscheidingen en draagconstructie met toenemende gebouwhoogte**



**Figuur 3.7 Uitsnede van Figuur 3.6**

### Rol van de isolatie van de omhulling

Of de omhulling accumulerend of isolierend is, speelt een rol voor wat betreft de betrouwbaarheid van brandscheidingen en draagconstructies. Een accumulerend materiaal neemt doorgaans meer energie op uit de brandruimte. Dit resulteert in een lagere gastemperatuur. Voor een isolerend materiaal geldt het omgekeerde. Een geïsoleerde omhulling (zoals hout of een metal-stud wand) resulteert daardoor in een lagere betrouwbaarheid dan een accumulerende omhulling (zoals beton). Dit is zichtbaar in Figuur 3.9. Opgemerkt wordt dat de aanwezigheid van een automatische sprinklerinstallatie het effect van het wel of niet geïsoleerd zijn van de omhulling min of meer opheft.

#### Betrouwbaarheid betrokken op de brandweerinzet

In dit onderzoek is beoordeeld wat de betrouwbaarheid van brandscheidingen en bouwconstructies is, betrokken op een volledige natuurlijke brandduur. Het ligt echter voor de hand dat de brandweer voordat de brand is uitgebrand ter plaatse en operationeel is. Omdat de constructies in die kortere tijd minder energie hebben geaccumuleerd dan bij een volledige natuurlijke brandduur, is de

betrouwbaarheid van brandscheidingen en bouwconstructies betrokken op het deel van de inzet waar de RST op is gebaseerd naar verwachting hoger. Tijdens de vergelijking tussen de AST en RST in fase 3 wordt die betrouwbaarheid gekwantificeerd.

# 4 AST persoonlijke veiligheid

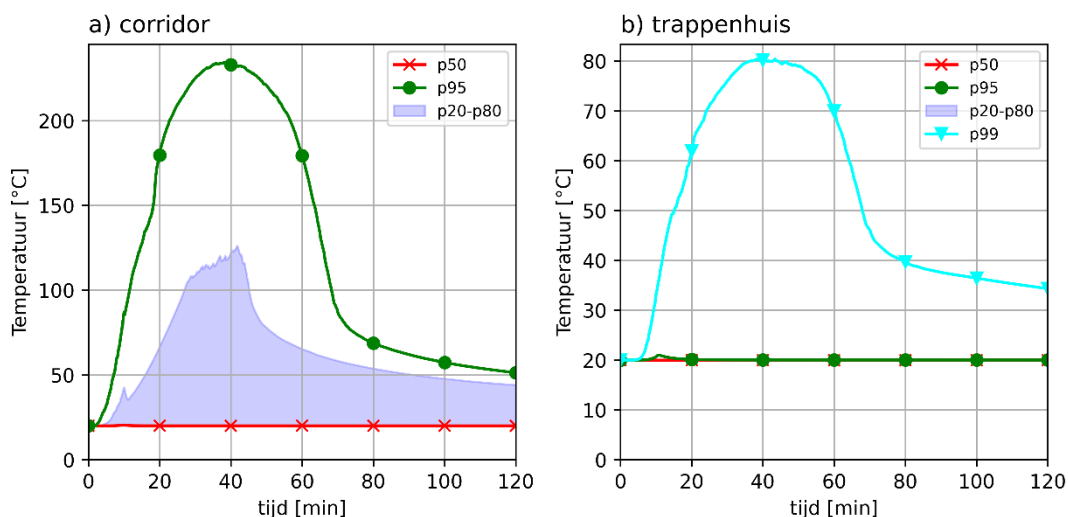
In dit hoofdstuk worden de resultaten van de analyse van de beschikbare veilige tijd voor brandweerinzet (AST) betrokken op de persoonlijke veiligheid van hulpverleners gepresenteerd en toegelicht. Er is bij de berekeningen een onderscheid gemaakt tussen een accumulerende en geïsoleerde omhulling. Tevens is onderscheid gemaakt tussen een gebouw dat niet en dat wel beveiligd is met een automatische sprinklerinstallatie en een overdrukinstallatie.

## 4.1 Gastemperaturen

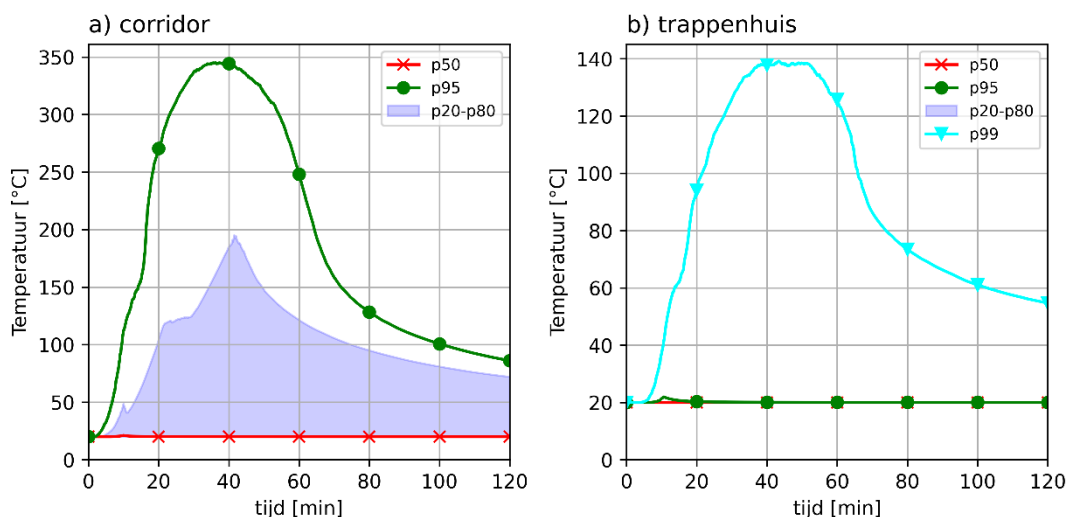
In deze paragraaf worden de berekende gastemperaturen in de corridor, het trappenhuis en eventueel (indien aanwezig) in de sluis gepresenteerd. De gastemperaturen in de brandruimte zijn niet opgenomen in deze paragraaf, omdat deze grotendeels gelijk zijn aan de gastemperaturen zoals getoond in paragraaf 3.3.

### 4.1.1 Gebouwen lager dan 20 meter

In gebouwen lager dan 20 meter zijn er buiten brand- en rookscheidingen tussen de woning en de inpandige corridor en de corridor en het trappenhuis geen aanvullende brandveiligheidsvoorzieningen aanwezig die invloed kunnen hebben op de AST. De ontwikkeling van de gastemperatuur in de corridor en het trappenhuis is hieronder weergegeven voor een gebouw met een accumulerende (Figuur 4.2) en isolerende omhulling (Figuur 4.3).



**Figuur 4.1** Gastemperatuur bij accumulerende omhulling in een gebouw van 0-20 meter hoog



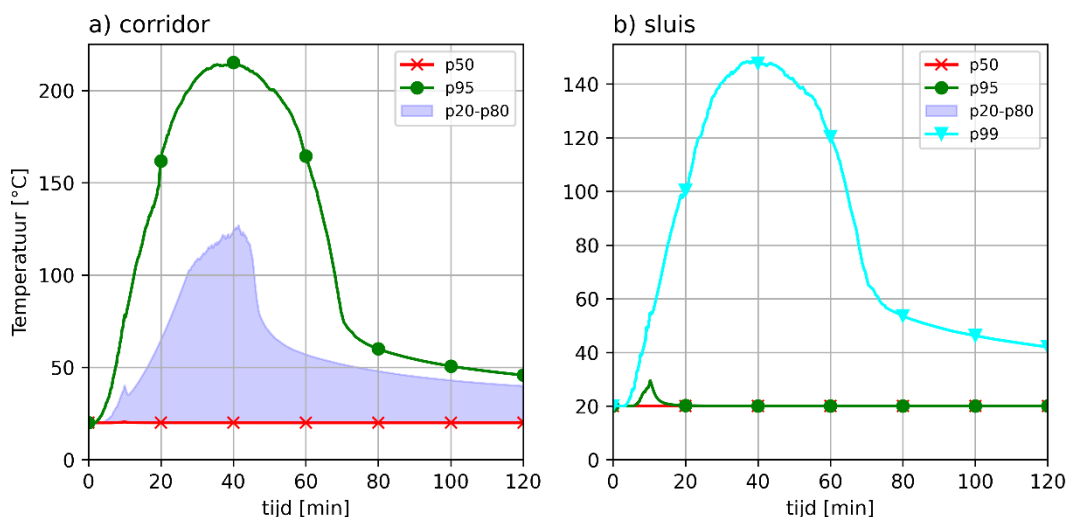
**Figuur 4.2 Gastemperatuur bij een isolerende omhulling in een gebouw van 0-20 meter hoog**

Met name het 80<sup>ste</sup>, 95<sup>ste</sup> en 99<sup>ste</sup> percentiel van de gastemperatuur zijn hoger bij een gebouw met isolerende omhulling dan bij een gebouw met accumulerende omhulling. Dit is in lijn met de onderzoeksresultaten uit hoofdstuk 3 waarin hetzelfde voor de brandruimte is geconstateerd. In principe betekent dit dat brandweerpersoneel in gebouwen overwegend bestaande uit isolerende constructies geconfronteerd kan worden met hogere temperaturen.

Wat opvalt aan de resultaten voor de corridor is dat de gastemperaturen voor het 20<sup>ste</sup> en 50<sup>ste</sup> percentiel vrijwel geen verhoging laten zien. In de scenario's die relevant zijn voor die percentielen, opent de deur slechts kortstondig. Er kan maar heel beperkt rook van de brandruimte naar de corridor stromen. Alleen het 80<sup>ste</sup> en 95<sup>ste</sup> percentiel laten een verhoging zien gedurende de gehele brandduur. Ditzelfde is in verdergaande mate te zien in het trappenhuis; daarbij is voor de beeldvorming ook het 99<sup>ste</sup> percentiel getoond. De getoonde lagere percentielen laten ook geen substantieel verhoogde gastemperaturen zien. De betrouwbaarheid van de zelfsluitende deuren is hier de reden voor.

#### 4.1.2 Gebouwen 20-70 meter hoog

In gebouwen hoger dan 20 meter en lager dan 70 meter is er een sluis tussen het trappenhuis en de corridor aanwezig. De ontwikkeling van de gastemperatuur in de corridor en de sluis is hieronder weergegeven voor een accumulerende omhulling. In het trappenhuis is maar zeer beperkt sprake van een temperatuurverhoging, ook niet voor het 99<sup>ste</sup> percentiel. De resultaten voor een isolerende omhulling vertonen dezelfde trend als de resultaten voor een accumulerende omhulling.



**Figuur 4.3 Gastemperatuur bij een gebouw van 20-70 meter met accumulerende omhulling**

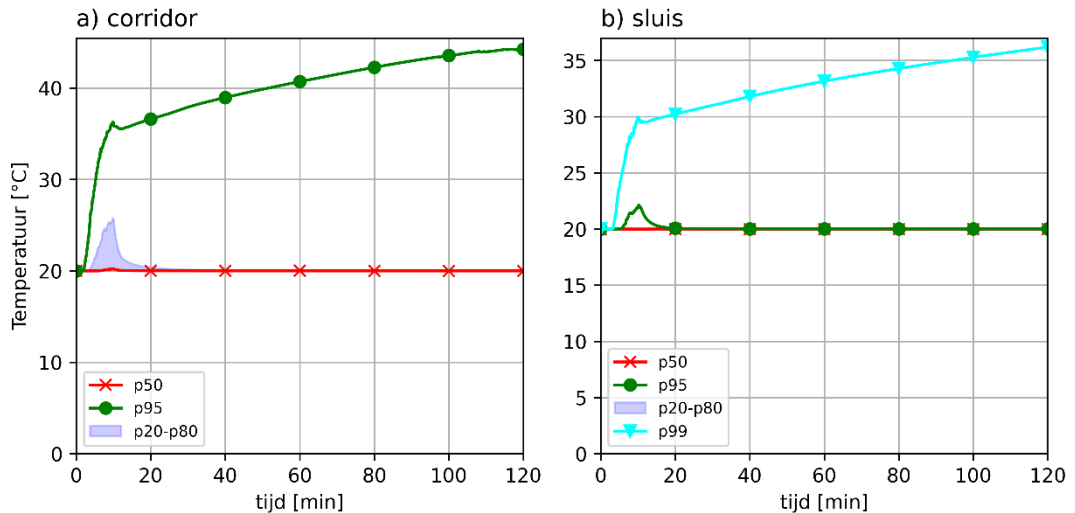
Een sluis vormt een extra barrière tussen de corridor en het trappenhuis. Als gevolg daarvan neemt de kans op rookverspreiding naar het trappenhuis af. Wat ten slotte opvalt, is dat de temperaturen in de corridor wat afwijken ten opzichte van die in gebouwen zonder sluis (20-70 meter hoog). Op basis van de gebruikte uitgangspunten is het te verwachten dat die temperaturen min of meer gelijk zouden zijn. Hoewel niet volledig onderzocht, kunnen de rekenresultaten te wijten zijn aan de volgende aspecten:

- > De gebruikte methodiek voor rookverspreiding. In de sluis is gebruikgemaakt van een tweezone-aanpak, terwijl in het trappenhuis gebruik is gemaakt van een éénzone-aanpak. Dit kan de mate van rookverspreiding beïnvloeden.
- > Het volume van de sluis is kleiner dan het volume van het trappenhuis. Dit kan de mate van rookverspreiding beïnvloeden.
- > Hogere percentielen zijn gevoelig voor de betrouwbaarheid van de zelfsluitende deur. Dit kan gevolgen hebben voor de rekenresultaten.

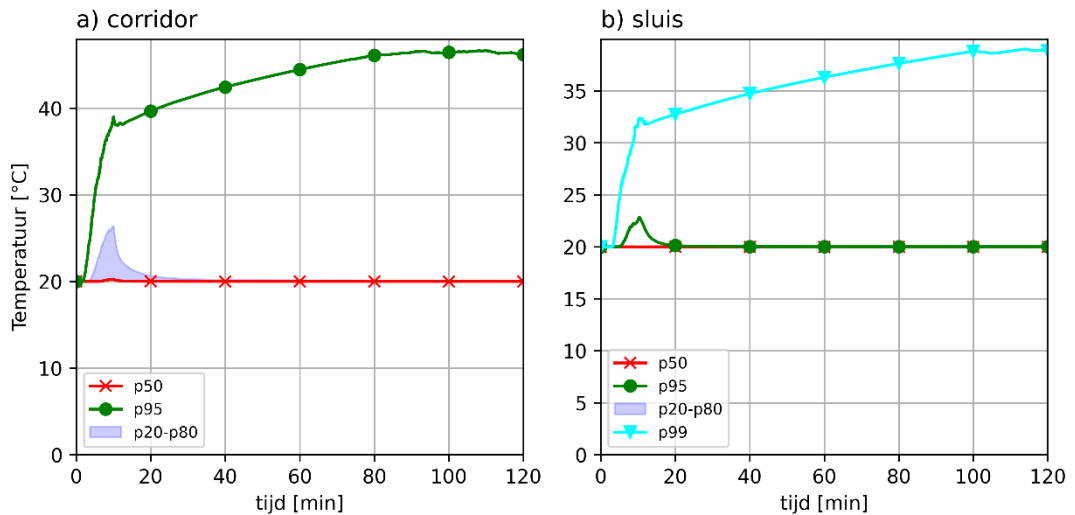
Desondanks hebben de temperaturen een gelijke ordegrrootte.

### 4.1.3 Gebouwen 70-400 meter hoog

In gebouwen hoger dan 70 meter maar lager dan 400 meter is een automatische brandbestrijdingsinstallatie (sprinkler) aanwezig. Bij correct functioneren beheerst die installatie het vermogen van de brand, wat resulteert in lagere gastemperaturen in de corridor in vergelijking met een situatie zonder sprinklerinstallatie. Daarnaast is een overdrukinstallatie aanwezig in de sluis die de rookverspreiding van de corridor naar de sluis en het trappenhuis beperkt. Als gevolg daarvan wordt de kans op rookverspreiding naar de sluis (verder) verkleind. De resultaten voor een accumulerende omhulling zijn weergegeven in Figuur 4.5 (gebouwhoogte 70 meter) en Figuur 4.6 (gebouwhoogte 400 meter). De gevolgen van een isolerende omhulling zijn vergelijkbaar met die behorend bij gebouwen lager dan 70 meter. Daarom zijn alleen de rekenresultaten voor een accumulerende omhulling weergegeven.



**Figuur 4.4 Gastemperatuur bij een accumulerende omhulling in een gebouw van 70 meter**



**Figuur 4.5 Gastemperatuur bij een accumulerende omhulling in een gebouw van 400 meter**

Uit een onderlinge vergelijking van de resultaten van de getoonde gebouwhoogtes (Figuur 4.5 en Figuur 4.6) valt op dat de gastemperatuur vooral in de corridor hoger is in hogere gebouwen (met name het 95<sup>ste</sup> percentiel). Dit komt door de aangenomen betrouwbaarheid van de automatische sprinklerinstallatie, die afneemt met een toenemende gebouwhoogte. Als gevolg daarvan zijn er in hogere gebouwen meer scenario's waarin de sprinklerinstallatie niet correct werkt. Deze effecten zijn alleen relevant voor de rekenresultaten met betrekking tot hogere percentielen in de corridor. Bij lagere percentielen en in de sluis en trappenhuis is er geen sprake van een groot verschil. Dit komt ook doordat er in de sluis tevens een overdrukinstallatie aanwezig is die de kans op rookverspreiding van de corridor naar de sluis en het trappenhuis verder verkleint. Ook de betrouwbaarheid van die overdrukinstallatie neemt af met een toenemende hoogte van het gebouw. Dit draagt bij aan nuanceverschillen tussen de verschillende gebouwhoogtes.

## 4.2 AST betrokken op persoonlijke veiligheid

In deze paragraaf wordt de beschikbare veilige tijd voor brandweerinzet (AST) betrokken op de persoonlijke veiligheid van hulpverleners gepresenteerd. Bij de bepaling van de AST is gebruikgemaakt van een viertal acceptatiecriteria, die elk gekoppeld zijn aan een specifieke mogelijke blootstellingsduur aan die omstandigheden, zie Tabel 4.1. De acceptatiecriteria zijn beschreven in paragraaf 2.1.6. Een nadere beschouwing van de rekenresultaten is opgenomen in bijlage 3.

In de volgende tabellen is het 20<sup>ste</sup> percentiel van de berekende AST weergegeven. De verwachting is dat dit percentiel het interessantst is vanwege de gekozen betrouwbaarheden van brandveiligheidsvoorzieningen (zelfsluitende deuren en sprinklerinstallatie).

### Simulatieduur

Er is uitgegaan van een simulatieduur van 120 minuten. Als een acceptatiecriterium gedurende die 120 minuten niet wordt overschreden, is aangegeven dat de AST groter of gelijk aan 120 minuten is ( $\geq 120$ ).

**Tabel 4.1 AST voor een gebouw met een hoogte tussen 0-20 meter**

Ruimte in gebouw	20 <sup>ste</sup> percentiel AST [min]					
	Brandruimte		Corridor		Trappenhuis	
Geïsoleerde omhulling?	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Acceptatiecriterium [°C]						
100	5,2	5	21	14,4	$\geq 120$	$\geq 120$
150	6,8	6,2	41,9	23	$\geq 120$	$\geq 120$
260	9,6	8,2	$\geq 120$	42,3	$\geq 120$	$\geq 120$
500	16,6	12,8	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$

**Tabel 4.2 AST voor een gebouw met een hoogte tussen 20-70 meter**

Ruimte in gebouw	20 <sup>ste</sup> percentiel AST [min]							
	Brandruimte		Corridor		Sluis		Trappenhuis	
Geïsoleerde omhulling?	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Acceptatiecriterium [°C]								
100	5,7	4,5	22,5	10,7	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$
150	7,3	5,7	43,3	18,6	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$
260	10,3	7,3	$\geq 120$	29,7	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$
500	16,7	11,1	$\geq 120$	120	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$	$\geq 120$

Uit de rekenresultaten blijkt dat de AST weinig verschilt voor gebouwen met een hoogte van 0-20 meter of 20-70 meter, met name voor de brandruimte en de corridor. Verschillen zijn voornamelijk te herleiden tot de aanwezigheid van de sluis aan het einde van de corridor (zie ook paragraaf 4.1.2). Een onveilige inzet in de sluis en het trappenhuis is op basis van de rekenresultaten niet waarschijnlijk.

**Tabel 4.3 AST voor een gebouw met een hoogte van 70 meter**

20 <sup>ste</sup> percentiel AST [min]								
Ruimte in gebouw	Brandruimte		Corridor		Sluis		Trappenhuis	
Geïsoleerde omhul- ling?	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Acceptatiecriterium [°C]								
100	≥ 120	9,9	≥ 120	83,9	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120
150	≥ 120	42,5	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120
260	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120
500	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120

**Tabel 4.4 AST voor een gebouw met een hoogte van 400 meter**

20 <sup>ste</sup> percentiel AST [min]								
Ruimte in gebouw	Brandruimte		Corridor		Sluis		Trappenhuis	
Geïsoleerde omhul- ling?	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Acceptatiecriterium [°C]								
100	101,3	8,7	≥ 120	71,1	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120
150	≥ 120	32,8	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120
260	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120
500	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120

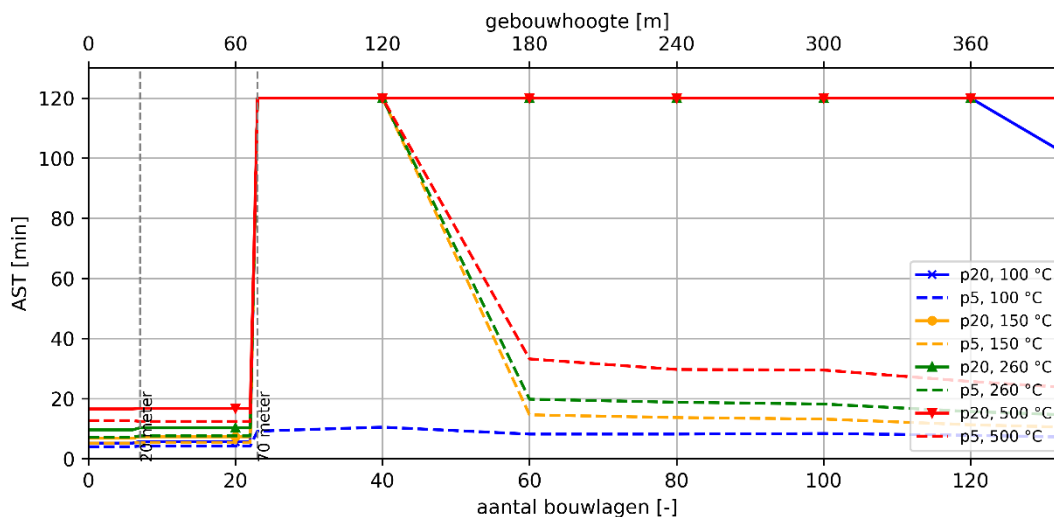
De AST in gebouwen hoger dan 70 meter (zie Tabel 4.3 en Tabel 4.4) is langer dan in lagere gebouwen. Dit komt door de aanwezigheid van de automatische sprinklerinstallatie. Door het onderdrukkend effect op het brandvermogen neemt de AST toe. De opbouw van de omhul-  
ling is in dit geval minder relevant.

In Figuur 4.7 en Figuur 4.8 is de ontwikkeling van de AST in de brandruimte over de hoogte van een gebouw weergegeven. Uit de grafieken valt te concluderen dat de AST in gebouwen

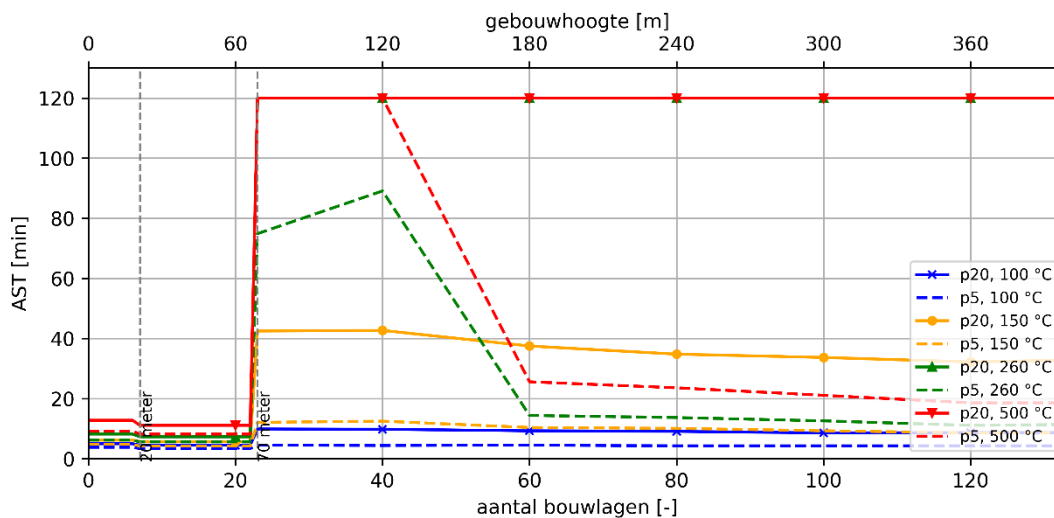
lager dan 20 meter heel weinig verschilt van de AST in gebouwen met een hoogte van 20-70 meter. Dit is logisch; de brandveiligheidsvoorzieningen zijn immers in die gebouwen ongeveer gelijk, met de uitzondering van de aanwezigheid van een sluis.

#### Leeswijzer bij grafieken

De figuren in deze paragraaf laten de ontwikkeling van de AST met toenemende hoogte van een gebouw zien. Daarbij is, net als in de vorige paragraaf, het 20<sup>ste</sup> percentiel van de rekenresultaten getoond. Dit zijn de doorgetrokken lijnen. Om de bijbehorende mate van spreiding weer te geven, is tevens het 5<sup>e</sup> percentiel getoond. Dit zijn de gestreepte lijnen.

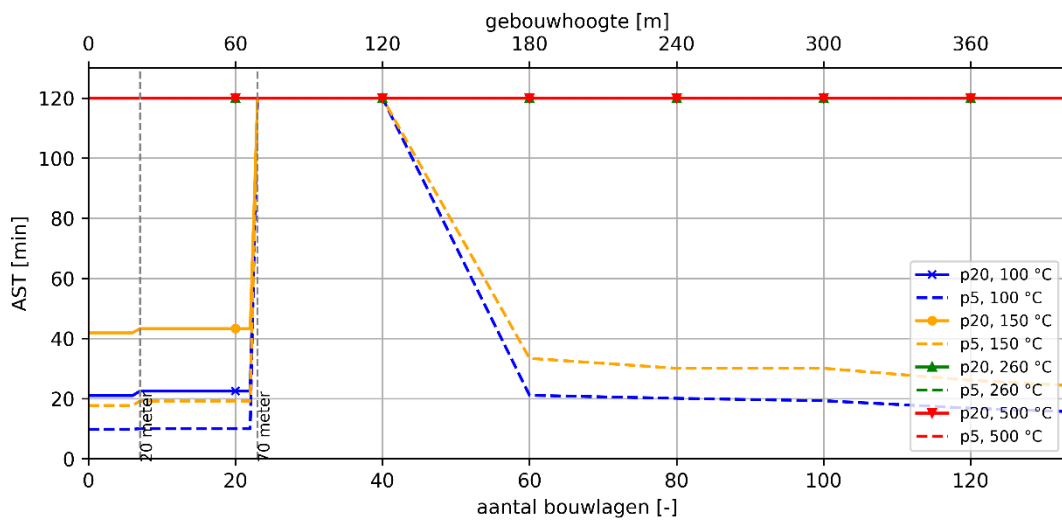


**Figuur 4.6** Ontwikkeling AST in de brandruimte over de hoogte van een gebouw met accumulerende omhulling



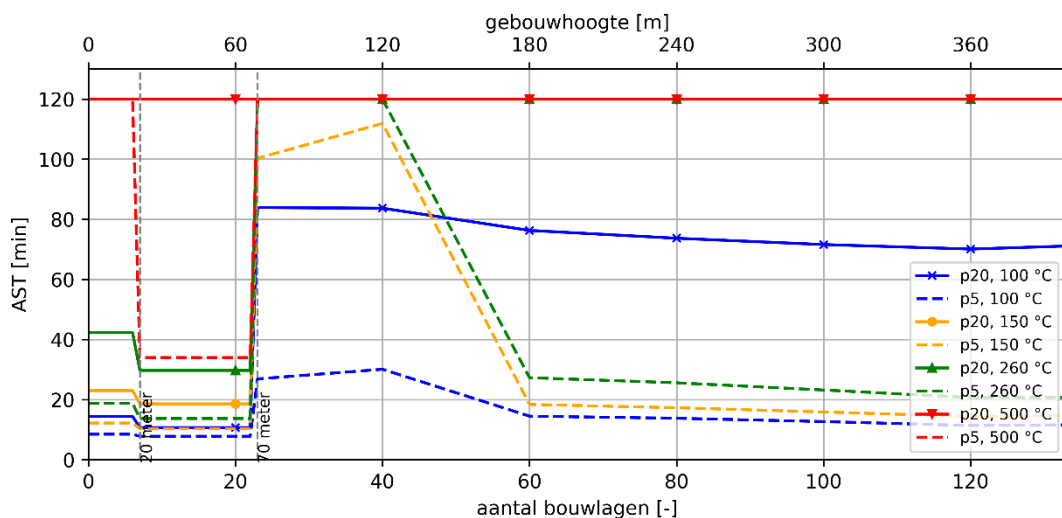
**Figuur 4.7** Ontwikkeling AST in de brandruimte over de hoogte van een gebouw met geïsoleerde omhulling

In Figuur 4.8 en Figuur 4.9 is de ontwikkeling van de AST voor de corridor weergegeven. De kans op het veilig betreden van de corridor is een stuk groter, met name door de aanwezigheid van een zelfsluitende deur tussen de woning en de corridor. Daarnaast is ook het effect van de automatische sprinklerinstallatie zichtbaar.



**Figuur 4.8** Ontwikkeling AST in de corridor over de hoogte van een gebouw met accumulerende scheidingsconstructies

Hoewel het effect van een geïsoleerde omhulling in de corridor minder uitgesproken is dan in de brandruimte, bestaan er nog steeds belangrijke verschillen met een accumulerende constructie. Zo is voor geïsoleerde constructies de AST over het algemeen korter en worden ook de 260 °C soms overschreden, terwijl dit in een gebouw met accumulerende constructies minder vaak het geval is.



**Figuur 4.9** Ontwikkeling AST in de corridor over de hoogte van een gebouw met geïsoleerde scheidingsconstructies

De overdrukinstallatie heeft weinig effect: ongeacht de gebouwhoogte is in de sluis en het trappenhuis de kans op een onveilige inzet klein.

### 4.3 Conclusie AST persoonlijke veiligheid

Uit paragraaf 4.4 blijkt dat de AST afhangt van de brandveiligheidsvoorzieningen die in een gebouw aanwezig zijn. Omdat de bouwregelgeving meer voorzieningen eist in hogere

gebouwen, is de AST in hogere gebouwen ook langer dan de AST in lagere gebouwen. Een duidelijk kantelpunt ligt op een gebouwhoogte van 70 meter:

- > In gebouwen lager dan 70 meter is de kans op een veilige offensieve binneninzet in de brandruimte klein (< 15%), terwijl in hogere gebouwen de automatische sprinklerinstallatie de brand in omvang beperkt, waardoor de kans groot is dat er offensief binnen kan worden ingezet (> 90%).
- > In gebouwen lager dan 70 meter is de kans op een lange AST laag in vergelijking met hogere gebouwen. Dit is het gevolg van de aanwezige sprinklerinstallatie.
- > Er is aangenomen dat de betrouwbaarheid van de automatische sprinklerinstallatie afneemt met een toenemende gebouwhoogte. Het effect daarvan is echter beperkt; de AST wordt in hogere gebouwen nooit even laag als de AST in lagere gebouwen.
- > De betrouwbaarheid van de zelfsluitende toegangsdeur van de woning is van belang voor de AST in de corridor. Als de deur sluit nadat deze is geopend, is het vrijwel altijd mogelijk de corridor veilig te betreden. Als de deur geopend blijft (en de sprinklerinstallatie niet correct functioneert), kan het voorkomen dat de corridor slechts kortstondig veilig betreden kan worden.
- > De sluis kan worden gebruikt als veilige plek waar de inzet door de corridor kan worden voorbereid. De kans dat de sluis daar niet veilig voor kan worden gebruikt, is klein. In slechts enkele gevallen worden daar acceptatiecriteria overschreden. De beoordeling is enkel uitgevoerd voor wat betreft thermische blootstelling. Blootstelling aan giftige gasen is wel mogelijk als er een of meerdere brandveiligheidsvoorzieningen falen. In die scenario's is ademlucht noodzakelijk.
- > De overdrukinstallatie die aanwezig is in de sluis werkt in feite als extra barrière tussen de corridor en het trappenhuis. Ze verkleint de kans dat de sluis niet veilig gebruikt kan worden. Vanwege de brandscheidingen tussen de brandruimte en het trappenhuis en de aanwezige sprinklerinstallatie is de kans op een korte AST ook zonder de overdrukinstallatie klein. De overdrukinstallatie heeft in het kader van dit onderzoek dan ook weinig effect.

#### **Risicoreductie van een overdrukinstallatie**

Als andere acceptatiecriteria worden gekozen (bijvoorbeeld de rookdichtheid) of een ander doel wordt nagestreefd met de brandbeveiliging (bijvoorbeeld veilig vluchten) kan het zijn dat een overdrukinstallatie wél een positief effect heeft.

# 5 Conclusie

In deze paragraaf wordt de vraag die centraal stond in fase 2 van het onderzoek beantwoord. Deze vraag luidt:

*Wat is de AST van een brandweerinzet bij een toenemende hoogte van gebouwen?*

Uit de resultaten is gebleken dat de AST toeneemt met de hoogte van een gebouw als gevolg van de aanwezige brandveiligheidsvoorzieningen. In hoge gebouwen wordt de veiligheid van de brandweerinzet in belangrijke mate bepaald door die voorzieningen. De betrouwbaarheid is bepaald voor draagconstructies en brandscheidingen en voor een veilige brandweerinzet.

## 5.1 Betrouwbaarheid draagconstructies en brandscheidingen

De draagconstructie van en brandscheidingen in het pand zijn relevant voor de brandweerinzet (zie paragraaf 2.1.6). In de onderstaande Tabel 5.1 is de betrouwbaarheid van de draagconstructie en brandscheidingen gegeven als functie van de hoogte van het pand. Er is daarbij een onderscheid gemaakt tussen een isolerende en accumulerende omhulling.

**Tabel 5.1 Betrouwbaarheid van de draagconstructie en brandscheidingen**

	Draagconstructie*		Type brandscheiding			
			Woning-extra beschermde vluchtroute		Woning-Woning*	
Omhulling**	1	2	1	2	1	2
Hoogte [m]	Betrouwbaarheid [%]					
0-7	90,5	48,5	≈ 0	≈ 0	90,5	48,5
7-13	≈ 100	94,2				
13-70	≈ 100	99,1				
70	≈ 100	99,9	95,5	94,9	95,5	94,9
120	≈ 100	99,8	95,2	94,3	95,2	94,3
180	≈ 100	99,8	93,5	93,8	93,5	93,8
240	≈ 100	99,8	92,5	93,0	92,5	93,0
300	≈ 100	99,7	91,2	91,6	91,2	91,6
360	≈ 100	99,7	90,5	91,3	90,5	91,3
400	≈ 100	99,5	90,3	89,8	90,3	89,8
*	brandwerendheid afhankelijk van gebouwhoogte					
**	1 = accumulerend, 2= isolerend					

Sprongen in de betrouwbaarheid worden veroorzaakt door hogere WDBO-eisen en daaruit volgende brandwerendheden en door de aanwezigheid van een automatische sprinklerinstallatie vanaf 70 meter. Vooral de automatische sprinklerinstallatie heeft positieve gevolgen voor met name de betrouwbaarheid van brandscheidingen. Vanaf een brandwerendheid van 90 minuten benaderd de betrouwbaarheid in alle gevallen 100 %, ongeacht de aanwezigheid van een sprinklerinstallatie.

## 5.2 AST persoonlijke veiligheid

In dit onderdeel wordt beoordeeld of hulpverleners een veilige inzet kunnen doen. Bij die beoordeling zijn acceptatiecriteria gebruikt met betrekking tot thermische blootstelling in relatie tot de blootstellingsduur (zie paragraaf 1.4.4). De hier gepresenteerde resultaten hebben betrekking op het 20<sup>ste</sup> percentiel van de rekenresultaten. Het gebruik van lagere percentielen resulteert in een kortere AST.

In Tabel 5.2 is de ontwikkeling van de AST in de brandruimte over de hoogte van een gebouw weergegeven. Uit de tabel valt op te maken dat de AST in gebouwen met een hoogte tussen de 0 en 20 meter en tussen de 20 en 70 meter grofweg gelijk is. In gebouwen hoger dan 70 meter is een automatische sprinklerinstallatie aanwezig. Deze zorgt voor een toename van de AST. In gebouwen met een geïsoleerde omhulling valt de AST iets lager uit, maar volgt wel dezelfde trend als in gebouwen met accumulerende constructies.

**Tabel 5.2 AST in de brandruimte voor verschillende gebouwhoogtes**

Acceptatiecriterium	20 <sup>ste</sup> percentiel AST [min]							
	100		150		260		500	
Geïsoleerde omhulling?	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Gebouwhoogte [m]								
0-20	5.2	5	6.8	6.2	9.6	8.2	16.6	12.8
20-70	5.7	4.5	7.3	5.7	10.3	7.3	16.7	11.1
70	≥ 120	9.9	≥ 120	42.5	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120
400	101.3	8.7	≥ 120	32.8	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120

In de corridor (zie Tabel 5.3) worden in veel gevallen alleen de lagere acceptatiecriteria overschreden. Dit betekent dat er in vrijwel alle gevallen in ieder geval voor een korte duur veilig ingezet kan worden in de corridor. Het open blijven staan van de deur naar de woning waarin zich de brand bevindt, is hierbij essentieel: als deze open blijft staan, worden de lagere acceptatiecriteria overschreden en is gedurende langere tijd inzetten in de corridor niet veilig mogelijk. De gevolgen van de automatische sprinklerinstallatie zijn gelijk aan de rekenresultaten voor de brandruimte. Vanaf een gebouwhoogte van 70 meter is de kans op overschrijding van acceptatiecriteria klein. Dit komt door de combinatie met de zelfsluitende woningtoegangsdeur.

**Tabel 5.3 AST in de corridor voor verschillende gebouwhoogtes**

Acceptatiecriterium	20 <sup>ste</sup> percentiel AST [min]							
	100		150		260		500	
Geïsoleerde omhulling?	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja	Nee	Ja
Gebouwhoogte [m]								
0-20	21	14,4	41,9	23	≥ 120	42,3	≥ 120	≥ 120
20-70	22,5	10,7	43,3	18,6	≥ 120	29,7	≥ 120	≥ 120
70	≥ 120	83.9	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120
400	≥ 120	71.1	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120	≥ 120

De AST voor geïsoleerde constructies ligt over het algemeen lager. In sommige gevallen wordt ook het acceptatiecriterium van 260 °C overschreden, terwijl dit in een gebouw met accumulierende constructies minder vaak het geval is. Dit betekent dat de kans op onveilige omstandigheden groter is in gebouwen die zijn opgebouwd uit isolerende materialen zoals metal-studwanden of hout, dan in gebouwen die zijn opgebouwd uit niet-isolerende materialen zoals beton.

Op basis van de uitgevoerde beoordeling is de kans op overschrijding van grenswaarden in de sluis en het trappenhuis van gebouwen lager dan 70 meter erg klein. De combinatie van zelfsluitende deuren naar de sluis en trappenhuis en de overdrukinstallatie zorgt in gebouwen hoger dan 70 meter voor een situatie waarin die kans nog kleiner is.

# 6 Discussie

Dit hoofdstuk bevat een beschouwing van het uitgevoerde onderzoek. Hierin worden onder andere de beperkingen van de gebruikte (reken)methode beschreven.

## 6.1 Algemene uitgangspunten

### 6.1.1 Escalatiescenario's

Het uitgangspunt van dit onderzoek is een brandontwikkeling volgens een 'normaal' brandverloop. Dit houdt in dat een brand ontstaat in de woning en beperkt blijft tot het brandcompartiment waarin hij is ontstaan. Met snelle branduitbreiding via bijvoorbeeld de gevel of snelle rookverspreiding door bijvoorbeeld ventilatiekanalen is geen rekening gehouden. Recente incidenten zoals de brand in de Grenfell-toren (2017) of in een torenflat in Valencia (2024) laten zien dat er wel degelijk scenario's mogelijk zijn waarbij snelle branduitbreiding of rookverspreiding mogelijk is. Dit bemoeilijkt de brandweerinzet tot op het niveau dat repressief optreden eigenlijk niet goed en veilig mogelijk meer is.

### 6.1.2 Nadere beperkingen aan de brandweerinzet

In paragraaf 1.4.1 zijn verschillende omstandigheden besproken die van invloed zijn op een veilige brandweerinzet. De thermische blootstelling blijkt vaak maatgevend te zijn. Hoewel niet beschouwd in dit onderzoek, kan ook beperkt zicht van invloed zijn op (de efficiëntie van) de brandweerinzet. Daarnaast kan blootstelling aan toxische stoffen in de rook met name langetermijnrisico's met zich meedragen.

### 6.1.3 Bestaande gebouwen

Dit onderzoek beperkt zich tot de beschikbare veilige tijd voor brandweerinzet (AST) in woongebouwen die voldoen aan de huidige nieuwbouwvoorschriften. Deze keuze is gemaakt om het onderzoek overzichtelijk te houden. In de bestaande bouwvoorraad staan naar verwachting echter veel gebouwen die hoger zijn dan 20 meter, maar waarvan de brandveiligheidsvoorzieningen niet voldoen aan de nieuwbouweisen.

Een voorbeeld van mogelijke afwijkingen is het ontbreken van deurdrangers, waardoor de kans dat deuren gedurende de ontvluchting van het gebouw open blijven staan, hoger is dan aangenomen in dit onderzoek. Ook het ontbreken van rooksluizen kan gevolgen hebben voor de brandweerinzet. Daarnaast zijn in veel gevallen ook lagere WBDBO-eisen van toepassing, wat een negatief gevolg op de betrouwbaarheid van de draagconstructie en brand-scheidingen kan hebben.

## 6.2 Methode

### 6.2.1 (Semi-) probabilistische aanpak

De gebruikte probabilistische aanpak kenmerkt zich door het brede spectrum aan variabelen dat wordt gebruikt. Daardoor ontstaat een beeld van de mogelijke effecten die bij een scenario (een woningbrand) kunnen optreden.

#### Uitgangspunten

Bij een aantal onderdelen van de aanpak is gekozen om geen probabilistische uitgangspunten te kiezen, dit zijn onder andere:

- > De locatie waar de brand ontstaat. Er is uitgegaan van een woningbrand. Hoewel dit de meest gangbare ontstaansplek van een brand in een woongebouw is, is een andere brandlocatie, zoals in ondersteunende gebruiksfuncties of vluchtroutes, niet ondenkbaar. Met name een brand in een vluchtroute heeft waarschijnlijk veel maatgevender gevolgen dan de hier beschouwde woningbrand.
- > De hoeveelheid beschikbare ventilatie. De hoeveelheid beschikbare ventilatie is zo gekozen dat de brand zich altijd kan ontwikkelen tot flashover, tenzij er een automatische brandbestrijdingsinstallatie in het gebouw aanwezig is. Naar verwachting is de kans op een ondergeventileerde brand echter groot door de uitvoering van moderne gevels. De aanname dat er altijd een volledig ontwikkelde brand ontstaat, is daardoor conservatief.
- > De ontstaanskans van brand. Hiervoor is feitelijk een waarde van 1 aangehouden (er ontstaat brand). Er wordt hier geen onderscheid gemaakt voor wat betreft de hoogte en omvang van een gebouw. Naar verwachting neemt de ontstaanskans van brand echter toe met de omvang van een gebouw. Als dit wordt meegewogen in de risicobenadering, resulteert dat in een toenemend brandveiligheidsrisico bij een hoger gebouw, ook als de brandveiligheidsvoorzieningen verder gelijk zijn.

#### Variabelen

Er bestaan nog weinig data over bijvoorbeeld brandontwikkeling of de betrouwbaarheid van brandbestrijdingsinstallaties. Veel van de gekozen variabelen zijn daardoor gebaseerd op een of enkele onderzoeken of op een expert-oordeel. De kwaliteit van de gebruikte data is daarom onzeker. Voor de variabelen die onafhankelijk zijn van de gebouwhoogte (bijvoorbeeld brandontwikkelingsnelheid of vuurbelasting) is de kwaliteit minder relevant vanwege het vergelijkende karakter van het onderzoek. Voor andere variabelen kan de kwaliteit echter wél relevant zijn, zoals de betrouwbaarheid van een sprinklerinstallatie, omdat deze niet in alle gebouwhoogtes wordt toegepast. Een gevoeligheidsanalyse kan uitwijzen hoe belangrijk variabelen zijn voor de uitkomst. Een gevoeligheidsanalyse is voornamelijk niet uitgevoerd.

### 6.2.2 Effectmodellering

De effectmodellering in de Monte-Carlo-simulaties is uitgevoerd met een zonemodel. Deze keuze is gemaakt vanwege de gewenste nauwkeurigheid van de resultaten in combinatie met de bij het model behorende benodigde rekentijd. Een nadeel van een zonemodel is dat het niet mogelijk is om nauwkeurig rookverspreiding in bijvoorbeeld corridors of trappenhuisen te modelleren. Die resultaten hebben daardoor slechts een indicatief karakter. Omdat de resultaten van de Monte-Carlo-simulaties worden gebruikt om verschillende situaties onderling te vergelijken, is een hele nauwkeurige effectmodellering echter minder van belang. De beperkingen van een zonemodel gelden dan immers voor alle situaties.

### 6.3 Slotbeschouwing: risicoacceptatie

Door het nemen van maatregelen kunnen brandveiligheidsrisico's in gebouwen worden beperkt. Er blijft na het nemen van maatregelen echter altijd een restrisico over. Voor wat betreft deze restrisico's is het belangrijk dat goed wordt afgewogen welke acceptabel worden gevonden en welke niet. Het is onrealistisch om geen enkel risico te accepteren. Er zijn immers scenario's denkbaar waarbij een effectieve brandweerinzet onmogelijk is. In vervolgonderzoek (fase 3) zal nader worden ingegaan op dit acceptabele risico door een vergelijking te maken tussen de beschikbare veilige tijd (AST) en de benodigde veilige tijd (RST). Hierbij kan worden gedacht aan een acceptabel percentage aan scenario's waarbij er geen brandweerinzet mogelijk is (het 'acceptabele risico'). In die scenario's is de beschikbare veilige tijd voor brandweerinzet (AST) lager dan de benodigde veilige tijd voor brandweerinzet (RST).

Hierbij moet ook rekening worden gehouden met het feit dat het falen van de brandweerinzet in een hoger gebouw waarschijnlijk gevolgen heeft die groter zijn dan de gevolgen van een brand in een lager gebouw. Mogelijk moet het percentage aan scenario's waarin geen brandweerinzet mogelijk is daarom afnemen met een toenemende hoogte van het gebouw (het acceptabele risico neemt af).

# 7 Literatuur

- British Standards Institution. (2019). *Application of fire safety engineering principles to the design of buildings. Part 7 Probabilistic risk assessment*. 3, 54.
- CEN. (2021). *NEN-EN 1991-1-1\_C1\_C11\_2019 nl Eurocode 1: belastingen op constructies*. 11(november 2019).
- Cowlard, A., Bittern, A., Abecassis-Empis, C., & Torero, J. (2013). Fire safety design for tall buildings. *Procedia Engineering*, 62, 169–181.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.053>
- Donnelly, M. K., Davis, W. D., Lawson, J., & Selepak, M. (2006). Thermal Environment for Electronic Equipment Used by First Responders. *National Institute of Standards and Technology Special Publication 1474*, 41.
- Drysdale, D. (2011). *An introduction to fire dynamics* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Ltd.
- Frank, K., Gravestock, N., Spearpoint, M., & Fleischmann, C. (2013). A review of sprinkler system effectiveness studies. *Fire Science Reviews*, 2(1), 6.  
<https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-6>
- Hepgzuel Acikyol, B., Balik, G., & Kilic, A. (2017). Experimental Investigation of the Effect of Fire Protection Lobby on Stair Pressurization System in a High-Rise Building. *Fire Technology*, 53(1), 135–151. <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0560-4>
- Hopkin, C. G. (2022). *Probabilistic Distribution Functions for Use in the Fire Safety Design of Residential Buildings*. February.
- Hopkin, C., & Spearpoint, M. (2021). Numerical simulations of concealed residential sprinkler head activation time in a standard thermal response room test. *Building Services Engineering Research and Technology*, 42(1), 98–111.  
<https://doi.org/10.1177/0143624420953302>
- Hopkin, C., Spearpoint, M., Hopkin, D., & Wang, Y. (2022). Using Probabilistic Zone Model Simulations to Investigate the Deterministic Assumptions of UK Residential Corridor Smoke Control Design. *Fire Technology*, 58(3), 1711–1736.  
<https://doi.org/10.1007/s10694-022-01221-6>
- Hopkin, C., Spearpoint, M., Wang, Y., & Hopkin, D. (2020). Design Fire Characteristics for Probabilistic Assessments of Dwellings in England. *Fire Technology*, 56(3), 1179–1196. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00925-6>
- Hurley, M. J. (Ed.). (2016). Appendix 3: Fuel Properties and Combustion Data. In *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5th ed.). Springer.
- Ikehata, Y., Yamaguchi, J., Deguchi, Y., & Tanaka, T. (2017). *Statistical Analysis on the Reliability of Sprinkler Systems: Study on a Risk-Based Evacuation Safety Design Method BT - Fire Science and Technology 2015* (K. Harada, K. Matsuyama, K. Himoto, Y. Nakamura, & K. Wakatsuki (Eds.); pp. 331–339). Springer Singapore.
- Leene, M., van Liempd, R., van den Dikkenberg, R., Graaf, J. van der, De Witte, L., & Weewer, R. (2022). *Brandveiligheid in hoogbouw: Een verkennend onderzoek naar de (on)mogelijkheden bij het repressief brandweeroptreden in hoge gebouwen*. NIPV.
- Madrzykowski, D. (2017). Fire Fighter Equipment Operational Environment: Evaluation of Thermal Conditions. *Research for the NFPA Mission, August*, 90.  
<https://ulffirefightersafety.org/assets/RFEvaluationThermalConditions-1f3eccb44de953a7e5cedbdea26a1c11362cdf023ba9626b7a7e54b0c1378780.pdf>
- NIST. (2015). *NIST Technical Note 1889v3 CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport ( Version 7 ) Volume 3: Verification and Validation Guide*. 3(Version 7).  
<https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1889v2>
- Peacock, R. D., Forney, G. P., & Reneke, P. A. (2023). *NIST Technical Note 1889v1 CFAST – Consolidated Fire And Smoke Transport ( Version 7 ) Volume 1: Technical Reference Guide*. 1(Version 7).
- SBRCURnet. (2014). *Handreiking brandveiligheid in hoge gebouwen*. SBRCURnet.
- SFPE. (2019). *SFPE Guide to Human Behavior in Fire*. Springer.

- Society of Fire Protection Engineers. (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (M. J. Hurley (Ed.); 5th ed.). Springer.
- Thomas, G., Buchanan, A., & Fleischmann, C. (1997). Structural Fire Design: The Role Of Time Equivalence. *Fire Safety Science*, 5, 607–618. <https://doi.org/10.3801/iafss.fss.5-607>
- van Houwelingen, M., de Jonge, L., Termijn, V., & Torabi, S. (2022). *Rotterdamse Brandveiligheidsvisie Hoogbouw & Hoogbouw-plus* (Vol. 1).
- van Liempd, R., de Witte, L., Karemaker, M., van Herpen, R., & Jansen, V. (2022). *Rookverspreiding en persoonlijke veiligheid*. NIPV.
- van Rede, P., Janssen, G., Barreveld, A., van der Graaf, P. J., De Witte, L., Weewer, R., & van Herpen, R. (2025). *Brandveiligheid hoge gebouwen - Fase I*.
- van Rede, P., van Liempd, R., & de Witte, L. (2024). *Handreiking proces doelgerichte brandveiligheidsaanpak voor gebouwen*. NIPV.
- Wade, C. A., Gerlich, J. T., & Abu, A. (2014). *Study report SR314 The Relationship Between Fire Severity and Time-Equivalence* (Vol. 314).

# Bijlage 1: Aangehouden kansverdelingen

## Draagconstructie en brandscheidingen

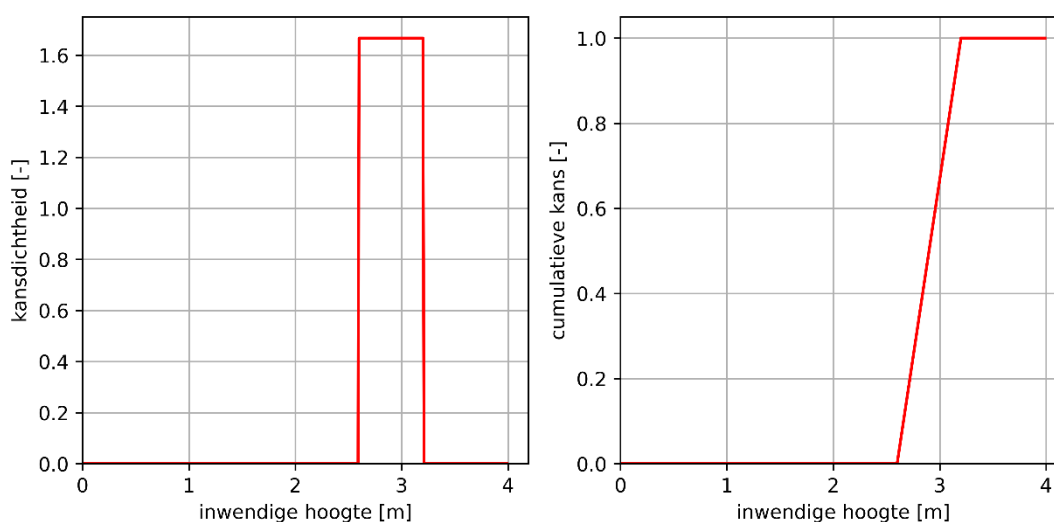
### Geometrie van de woning

De geometrie van de woning heeft gevolgen voor onder meer de temperatuur van de warme rooklaag en de drukopbouw in de woning. De volgende aspecten zijn in dit onderzoek variabel verondersteld:

- > De inwendige hoogte van de woning
- > De oppervlakte van de woning.

#### *Inwendige hoogte woning*

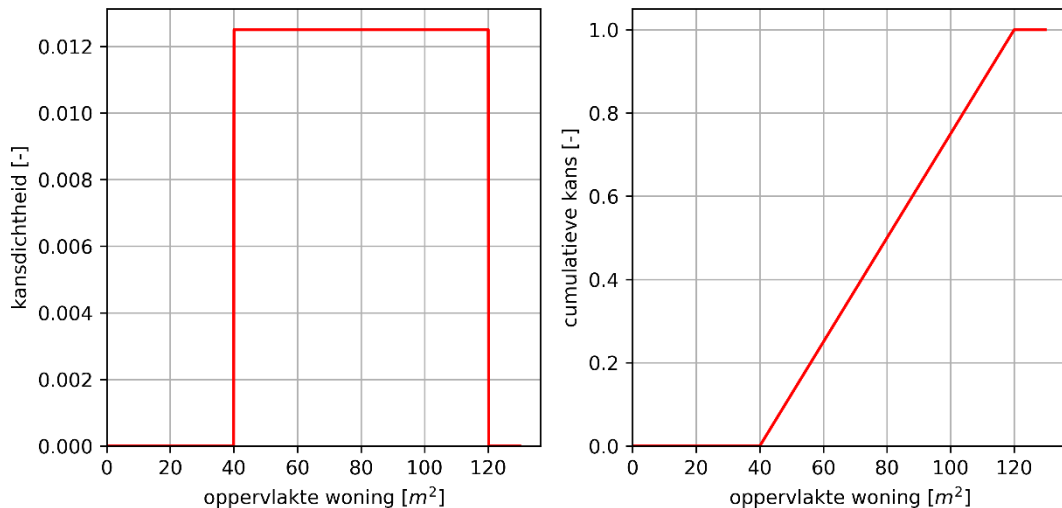
Er zijn geen gegevens gevonden voor wat betreft de inwendige hoogte van woningen. Er is daarom uitgegaan van een minimale inwendige hoogte van 2,6 meter (minimaal vereist volgens Bbl) en een maximale inwendige hoogte van 3,2 meter. De inwendige hoogte is in dit onderzoek gelijk genomen aan de verdiepingshoogte minus de dikte van de constructieve vloer en een eventueel verlaagd plafond. Voor wat betreft het type verdeling is aangesloten op fase I van dit onderzoek (uniforme verdeling). De verdeling is weergegeven in figuur B1.1.



**Figuur B1.1** Aangehouden inwendige hoogte voor woningen

#### *Oppervlakte woning*

De oppervlakte van de woning zal in werkelijkheid variëren per gebouwontwerp. Om die variatie mee te nemen in dit onderzoek is de woningoppervlakte variabel verondersteld. Er zijn geen gegevens gevonden met betrekking tot de woningoppervlakte. Er is uitgegaan van een uniforme verdeling met een minimum van 40 m<sup>2</sup> en een maximum van 120 m<sup>2</sup>. De verdeling is weergegeven in figuur B1.2.



**Figuur B1.2 Gehanteerde kansverdeling voor de oppervlakte van de woning**

Bij een zonemodel zijn de lengte- en diepteverhouding van een ruimte maar beperkt van invloed op de uiteindelijke rekenresultaten. Daarom is een (arbitrair gekozen) breedte/diepte-verhouding van 0,7 ( $b/d=0,7$ ) aangehouden. De uiteindelijke afmetingen zijn als volgt bepaald:

$$\begin{aligned}
 b &= 0,7d \\
 A &= 0,7d * d = 0,7d^2 \\
 d &= \sqrt{\frac{A}{0,7}} \text{ en } b = \frac{A}{d}
 \end{aligned}$$

### Brandkenmerken

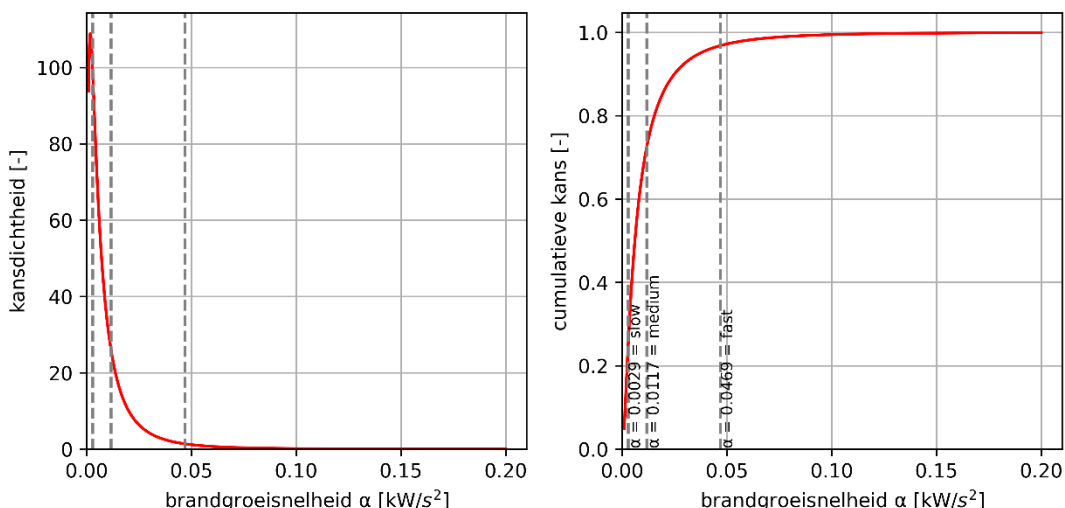
Bij het modelleren van de brand en de effecten daarvan zijn verschillende parameters gebruikt. Veel van die parameters zijn variabel verondersteld.

#### *Branduitbreidingssnelheid ( $\alpha$ )*

De branduitbreidingssnelheid ( $\alpha$  in  $\text{kW/s}^2$ ) is bepalend voor de ontwikkeling van het brandvermogen via:

$$\dot{Q} = \alpha t^2$$

Hierin is  $\dot{Q}$  het totale brandvermogen en  $t$  de tijd in seconden na het ontstaan van de brand. De aangehouden kansverdeling is overgenomen uit literatuur (Hopkin et al., 2020). Uit de kansverdeling worden alleen  $\alpha$ -waarden geselecteerd die liggen tussen  $0.0029 \text{ kW/s}^2$  en  $0.0469 \text{ kW/s}^2$ . Op deze wijze worden branden die heel traag of snel groeien uitgesloten. De verdeling is weergegeven in figuur B1.3.



**Figuur B1.3 Aangehouden kansverdeling voor  $\alpha$**

#### Brandvermogensdichtheid (HRRPUA)

De brandvermogensdichtheid (of Heat Release Rate per unit area, HRRPUA in kW/m<sup>2</sup>) bepaalt de oppervlakte van de brand door:

$$A_{fire} = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}''}$$

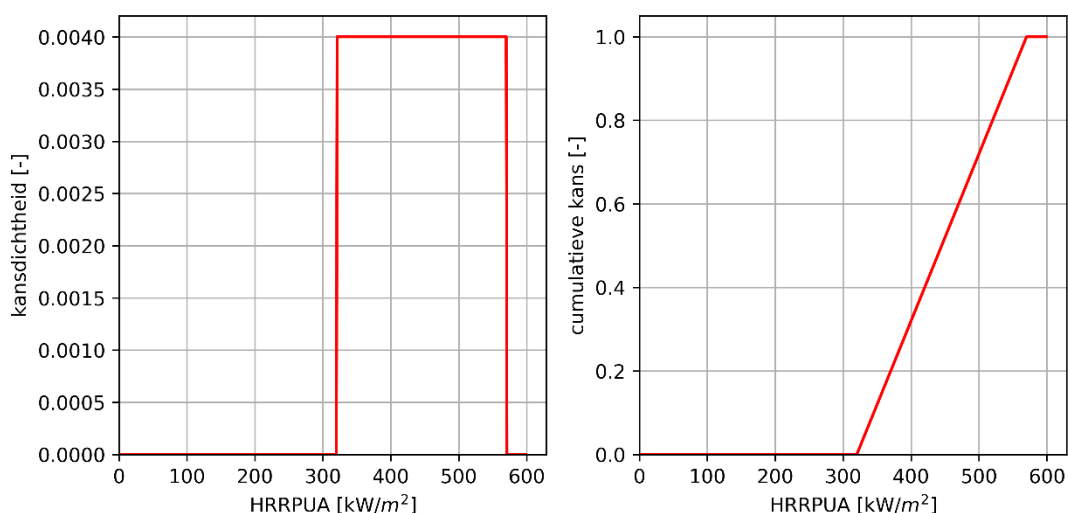
Daarin is  $A_{fire}$  de oppervlakte van de brand (in m<sup>2</sup>),  $\dot{Q}$  het totale brandvermogen (in kW) en  $\dot{Q}''$  de brandvermogensdichtheid (in kW/m<sup>2</sup>). Daarnaast bepaalt de brandvermogensdichtheid het maximale brandvermogen dat kan vrijkomen bij een volledig ontwikkelde brand (na flashover). Dit wordt bepaald door:

$$\dot{Q}_{flashover} = \dot{Q}'' * A_{woning}$$

Daarin is  $\dot{Q}_{flashover}$  het vermogen dat maximaal kan vrijkomen na flashover (in kW) en  $A_{woning}$  de oppervlakte van de woning. Er zijn slechts beperkt data gevonden over de verdeling van de brandvermogensdichtheid. Data die voorhanden zijn (Hopkin, 2022) gaan uit van een uniforme verdeling met een minimum van 320 kW/m<sup>2</sup> en een maximum van 570 kW/m<sup>2</sup>. De verdeling is weergegeven in figuur B2.4.

#### Gegevens uit de Eurocode

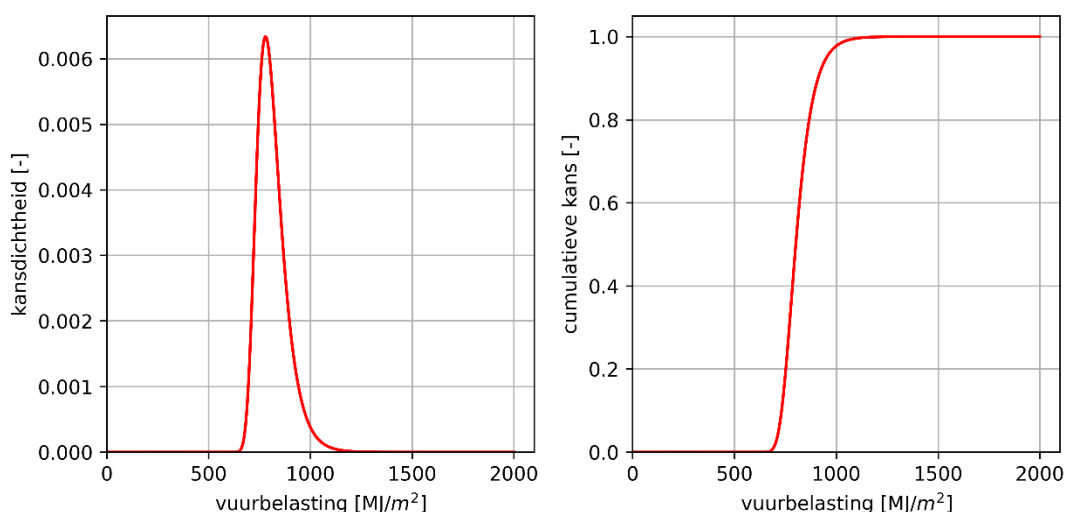
Een veelgebruikte waarde voor de brandvermogensdichtheid in woningen komt uit de Eurocode (250 kW/m<sup>2</sup>). Ook in eerdere onderzoeken van het NIPV is die waarde gebruikt. De wetenschappelijk basis van de waarde, die dateert uit de jaren '90, is echter niet bekend. Daarom is besloten in dit onderzoek niet uit te gaan van de data uit de Eurocode, maar aan te sluiten op data uit recenter onderzoek.



**Figuur B1.4 Aangehouden verdeling voor de brandvermogensdichtheid (HRRPUA)**

#### *Vuurbelasting*

De vuurbelasting van een compartiment ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) bepaalt samen met het brandvermogen de brandduur van een brand. Het vermenigvuldigen van de vuurbelasting met de oppervlakte van de woning geeft de vuurlast ( $\text{MJ}$ ). Als alle vuurbelasting is opgebrand dooft de brand. Voor de vuurbelasting zijn data uit de PD 7974-7 aangehouden (British Standards Institution, 2019). Het betreft een Gumbel-verdeling (type 1), die is weergegeven in Figuur 2.6. De totale vuurlast in een brandcompartiment wordt bepaald door de vermenigvuldiging van de vuurbelasting met de oppervlakte van het compartiment. De verdeling is weergegeven in figuur B2.5.

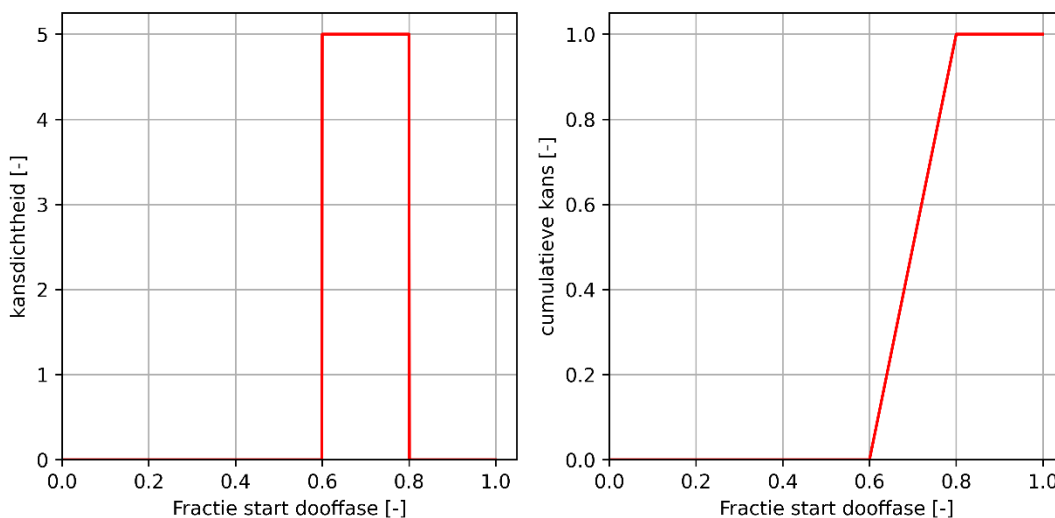


**Figuur B1.5 Aangehouden kansverdeling voor de vuurbelasting**

#### *Start dooffase*

Gedurende de brand brandt de vuurlast op. Als een bepaalde hoeveelheid van de vuurlast is opgebrand, start de dooffase van de brand. In de dooffase loopt het brandvermogen van de brand (lineair) terug naar 0. Het moment waarop de dooffase start, is genomen als het tijdstip waarop een fractie van de totale vuurlast is opgebrand. Er is gekozen om die fractie als variabele te veronderstellen. Daarbij is een uniforme kansverdeling gehanteerd met een

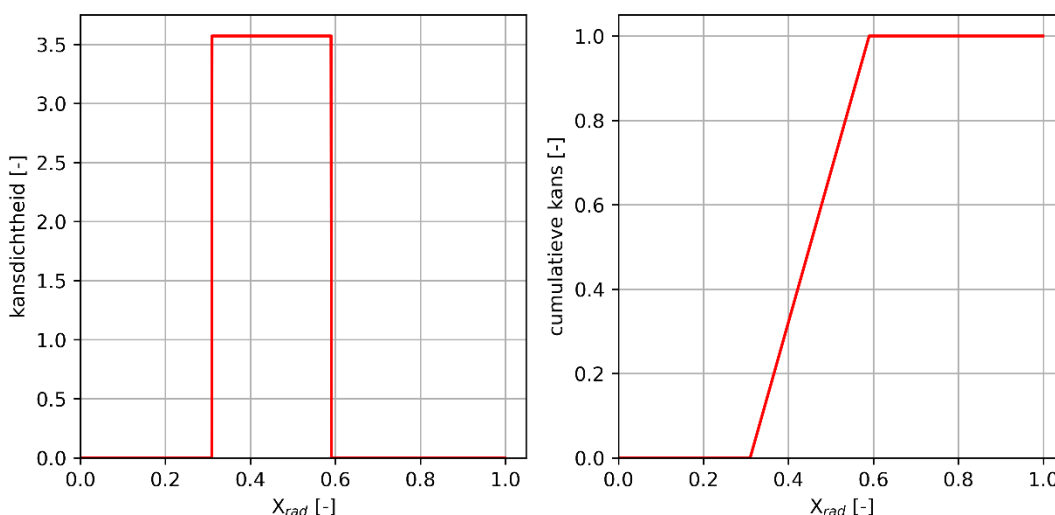
minimum van 0,6 en een maximum van 0,8. Dit is gebaseerd op een inschatting. De verdeling is weergegeven in figuur B1.6.



**Figuur B1.6** Gekozen kansverdeling voor de start van de dooffase

#### *Radiatieve fractie ( $\chi_{rad}$ )*

Tijdens een brand zal een deel van het brandvermogen worden uitgestraald door de vlammen. Het andere deel stijgt op in de warme rook. Het deel dat wordt uitgestraald, wordt de radiatieve fractie ( $\chi_{rad}$ ) van het brandvermogen genoemd. De radiatieve fractie is onder andere afhankelijk van de soort brandstof en de mate van ventilatie. In dit onderzoek is de radiatieve fractie variabel verondersteld. De data zijn afkomstig uit literatuur (Hopkin, 2022). Er is uitgegaan van een uniforme verdeling met een minimum van 0,31 en een maximum van 0,59. De verdeling is weergegeven in figuur B1.7.



**Figuur B1.7** Aangenomen kansverdeling voor de radiatieve fractie

#### **Automatische brandbestrijdingsinstallatie (sprinkler)**

##### *Betrouwbaarheid installatie*

Van gebouwen hoger dan 70 meter is aangenomen dat er een sprinklersinstallatie aanwezig is. Een sprinklerinstallatie zal in veel gevallen een beginnende brand signaleren, detecteren en bestrijden. In sommige gevallen zal de brand worden geblust. De betrouwbaarheid van

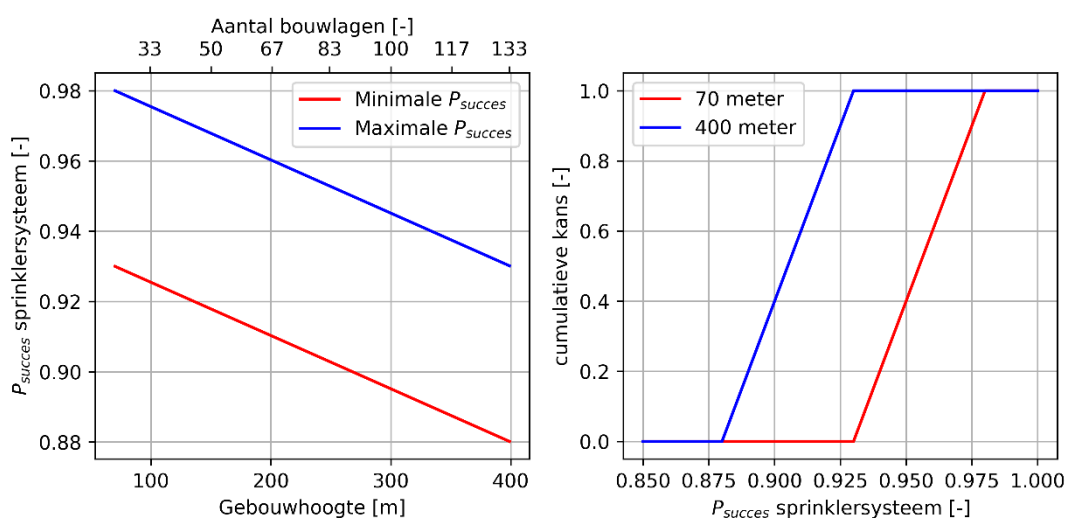
een sprinklerinstallatie is doorgaans hoog. In NEN 6079 wordt een waarde van ongeveer 0.98-0.99 % aangehouden, afhankelijk van de technische uitvoering. Die data zijn afkomstig van en toepasbaar op gebouwen in de industrie- en opslagsector. Voor wat betreft de betrouwbaarheid in woongebouwen zijn in Nederland geen data voorhanden.

Data uit de Verenigde Staten en Nieuw Zeeland zijn gebruikt bij de totstandkoming van de Britse PD 7974-7:2019 (British Standards Institution, 2019). Daaruit blijkt dat de betrouwbaarheid van een sprinklersinstallatie in een woongebouw naar verwachting tussen de 0.89 en 0.96 ligt. In een ander onderzoek naar de betrouwbaarheid van sprinklersystemen wordt gesteld dat de betrouwbaarheid in woongebouwen uiteenloopt van 0.70 tot 0.995. Voor de meeste nieuwe gebouwen ligt het volgens dat onderzoek voor de hand de betrouwbaarheid van de installatie als variabel te veronderstellen. Daarbij kan een uniforme verdeling worden gebruikt, waarbij de ondergrens en bovengrens respectievelijk 0.9 en 0.95 bedragen (Frank et al., 2013). Deze benadering past het beste bij een probabilistische aanpak en is daarom in dit onderzoek gevolgd.

Het ligt in de lijn der verwachting dat de betrouwbaarheid van een sprinklerinstallatie afneemt met de omvang van die installatie. Een grotere installatie bestaat immers uit meer installatieonderdelen die kunnen falen. Daarom is in dit onderzoek gekozen om de betrouwbaarheid van de installatie te laten afnemen naarmate het gebouw hoger wordt. Daarbij zijn de waarden als weergegeven in tabel B1.1. Tussen de waarden in wordt geïnterpoleerd. Dit resulteert in de betrouwbaarheden en kansverdelingen die zijn weergegeven in figuur B1.8.

**Tabel B1.1 Aangehouden spreiding betrouwbaarheid sprinklerinstallatie**

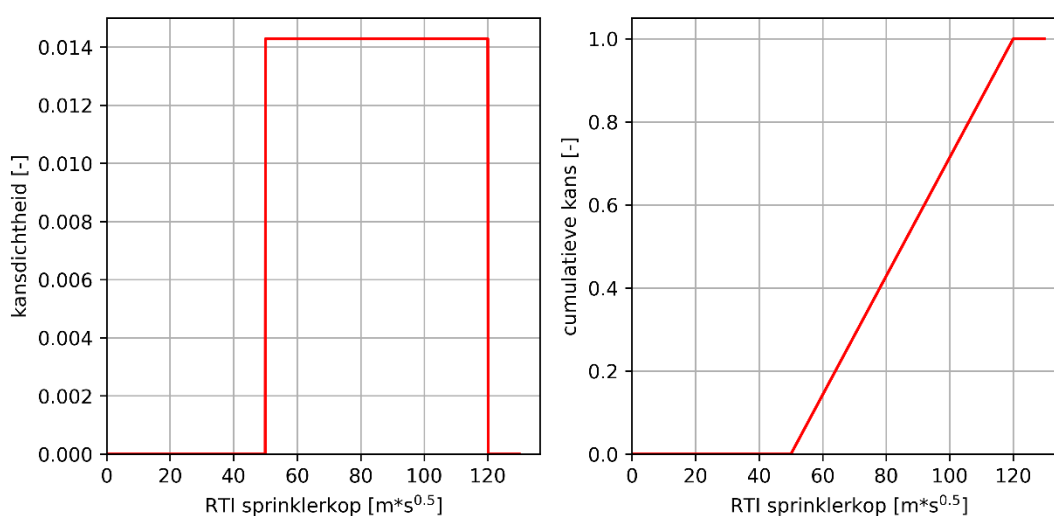
Gebouwhoogte	$P_{succes}$ ondergrens	$P_{succes}$ bovengrens
70 (23 bouwlagen)	0.93	0.98
400 (133 bouwlagen)	0.88	0.93



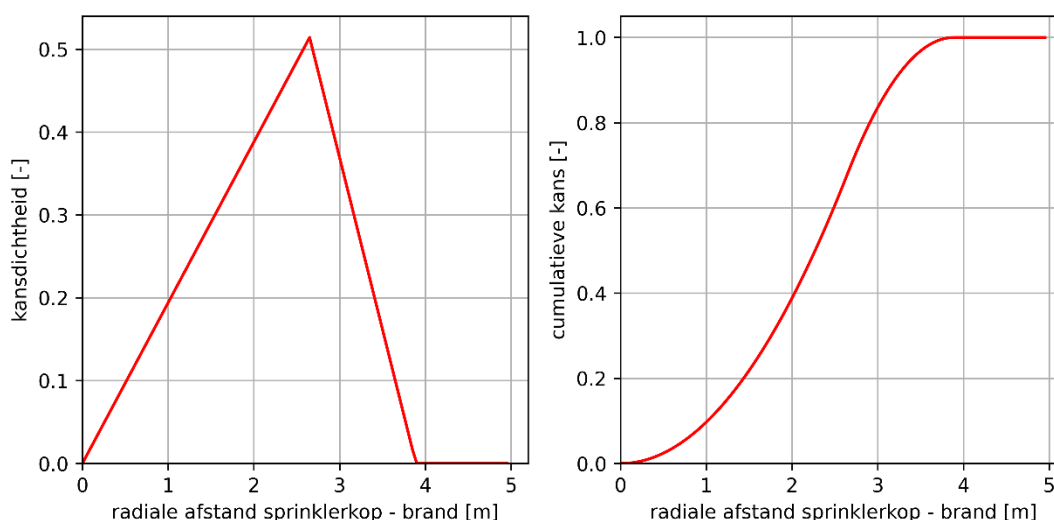
**Figuur B1.8 Aangenomen betrouwbaarheden sprinklerinstallatie**

### Aanspreken sprinklerinstallatie

Een sprinklerinstallatie zal in werking treden wanneer het thermische element in een sprinklerkop de aanspreektemperatuur bereikt. Om te bepalen wanneer dit gebeurt, is gebruikgemaakt van 'ceiling-jet'-berekeningen (Society of Fire Protection Engineers, 2016, Chapter 14). De variabelen die daarbij gebruikt zijn, zijn weergegeven in Tabel 2.3. De gebruikte data zijn ontleend aan literatuur (C. Hopkin et al., 2022; C. Hopkin & Spearpoint, 2021). Voor de RTI-waarde wordt een uniforme verdeling voorgesteld met een minimum van  $50 \text{ m}^*\text{s}^{0.5}$  en een maximum van  $120 \text{ m}^*\text{s}^{0.5}$ . Deze spreiding is groot vanwege de mogelijke toepassing van verholen sprinklerkoppen.<sup>12</sup> In dit onderzoek is het maximum naar beneden bijgesteld naar  $120 \text{ m}^*\text{s}^{0.5}$ . Voor wat betreft de afstand van de haard tot de sprinklerkop wordt een driehoeksverdeling geadviseerd met een minimum en maximum van respectievelijk 0 meter en 3.89 meter. De modus van de verdeling bedraagt 2.65 meter. De verdelingen van de RTI en de radiale afstand zijn weergegeven in respectievelijk figuur B1.9 en B1.10.



**Figuur B1.9** Aangehouden verdeling voor de RTI van de sprinklerkop



<sup>12</sup> RTI van een sprinklerkop is een producteigenschap die wordt bepaald onder gestandaardiseerde omstandigheden. De responstijd in de praktijk kan hiervan verschillen door afscherming van de bulb door de poten van de spreidplaat en verholen sprinklerkoppen. Om daarmee rekening te houden is in de literatuur de bovengrens van de RTI hoger gekozen dan doorgaans wordt voorgeschreven door sprinklernormen.

## Figuur B1.10 Aangehouden verdeling voor de radiale afstand tussen de sprinklerkop en de brand

### *Kansen op brandbeheersing en -blussing en effecten daarvan*

In het geval dat een automatische sprinklerinstallatie de brand bestrijdt, wordt het brandvermogen van de brand beperkt. De brand wordt vaak niet volledig geblust. Dit kan bijvoorbeeld het geval zijn als een installatie onvoldoende water op het vuur kan brengen of als (een deel van) de brand niet bereikbaar is voor het bluswater. De brandweer zal in dit geval de brand nog moeten blussen. Er zijn slechts beperkt (betrouwbare) gegevens beschikbaar over de kans op blussing of bestrijding. De gegevens die zijn gevonden, zijn niet van toepassing op woongebouwen (Ikehata et al., 2017). Daarom is in dit onderzoek aangenomen dat de betrouwbaarheid ( $P_{\text{succes}}$ ) op brandbestrijding en -blussing respectievelijk 0.5 en 0.5 bedraagt bij een correct werkende sprinklerinstallatie. De aangehouden betrouwbaarheid is weergegeven in tabel B1.2.

**Tabel B1.2 Aangehouden betrouwbaarheid blussing of bestrijding door sprinklerinstallatie**

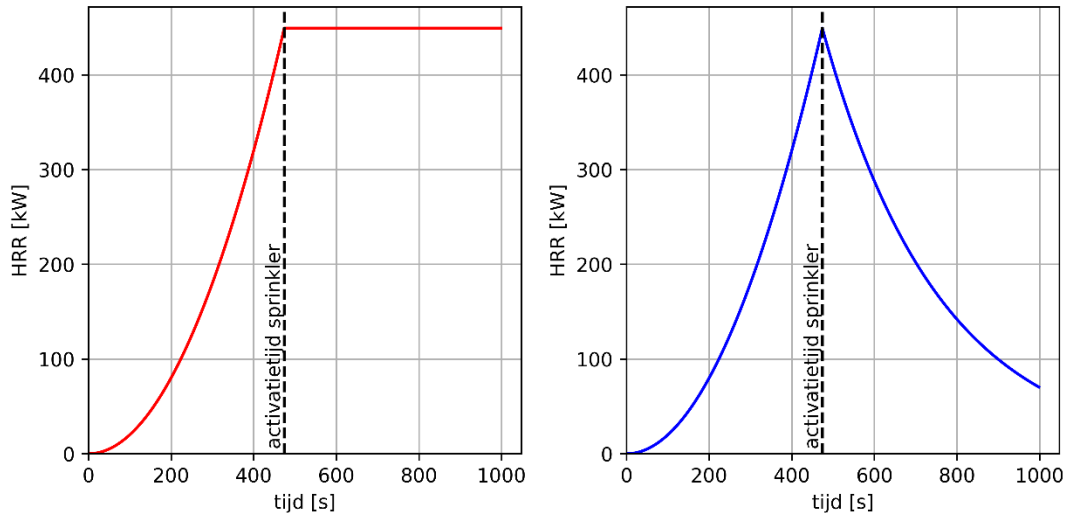
Onderdeel	$P_{\text{succes}}$	Ontwikkeling HRR
Beheersen	0.5	Blijft gelijk*
Blussing	0.5	Loopt terug naar 0 kW*

\* na aanspreken sprinklerinstallatie

De ontwikkeling van het brandvermogen van de brand na het aanspreken van de sprinklerinstallatie is als volgt bepaald:

- > In het geval dat de brand wordt beheerst, blijft het brandvermogen gedurende de simulatietijd gelijk na het aanspreken van de sprinklerkop.
- > In het geval dat de brand wordt geblust, loopt het brandvermogen terug naar 0 kW. Het model voor blussing zoals dat wordt gebruikt door CFAST wordt daarvoor in dit onderzoek gebruikt (Peacock et al., 2023).

Een voorbeeld van beide situaties is grafisch weergegeven in figuur B1.11.



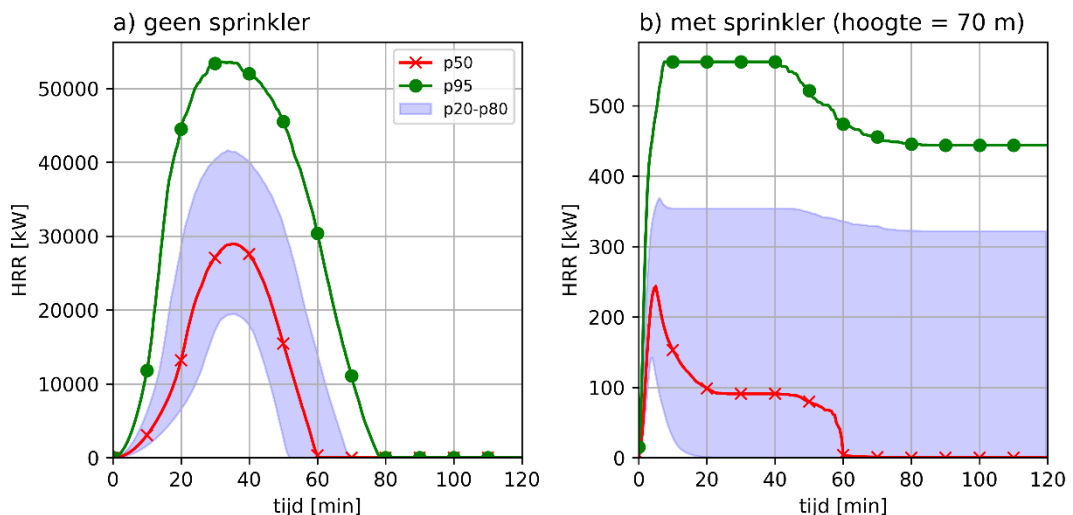
**Figuur B1.11** Voorbeeld brandbeheersing door sprinklers (links) en brandblussing door sprinklers (rechts)

### Brandvermogen

Op basis van de willekeurig gekozen waarden is per iteratie een brandvermogenscurve opgesteld. Die brandvermogenscurves dienen als uitgangspunt bij de effectmodellering met CFAST. In deze paragraaf worden die brandvermogenscurves kort beschreven. De figuren in deze paragraaf tonen het 20<sup>e</sup>, 50<sup>e</sup>, 80<sup>e</sup> en 95<sup>e</sup> percentiel van de brandvermogenscurves.

### Zonder automatische brandbestrijdingsinstallatie(sprinkler)

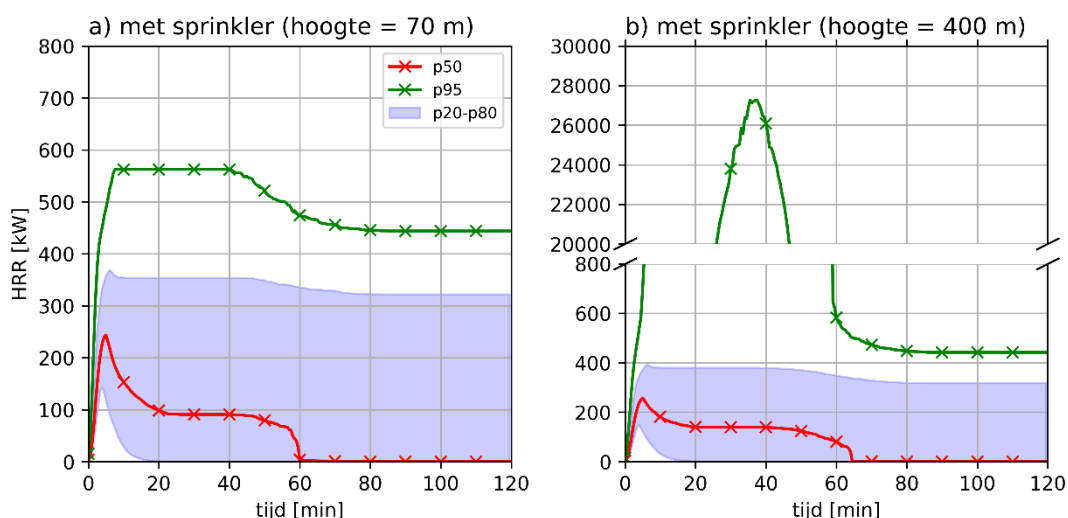
In een gebouw waar geen automatische brandbestrijdingsinstallatie(sprinkler) aanwezig is, resulteren de gehanteerde uitgangspunten in een verdeling van het brandvermogen zoals weergegeven in Figuur 1.12. Het maximale brandvermogen loopt uiteen van grofweg 20 MW (20<sup>e</sup> percentiel) tot 55 MW (95<sup>e</sup> percentiel). In 20 % van de gevallen is de brand binnen 60 minuten uit en in 95% van de gevallen binnen ongeveer 80 minuten.



**Figuur B1.12** Brandvermogen (HRR) in de tijd voor een situatie zonder sprinklerinstallatie (a) en met sprinklerinstallatie in een gebouw van 70 meter hoog (b)

### Met automatische brandbestrijdingsinstallatie(sprinkler)

In een gebouw met een automatische brandbestrijdingsinstallatie(sprinkler) is het brandvermogen substantieel lager dan in een gebouw waarin geen sprinklerinstallatie aanwezig is. De maximale brandvermogens liggen hier een factor 100 lager dan in een gebouw waarin geen sprinklerinstallatie aanwezig is. Een sprinklerinstallatie heeft een onderdrukkend effect op het maximale brandvermogen. Doordat de betrouwbaarheid van de sprinklerinstallatie binnen de kaders van dit onderzoek afneemt met de hoogte van een gebouw, neemt het aantal scenario's in de Monte-Carlo-simulatie waarin de installatie niet correct functioneert toe. Dat heeft een verhogend effect op het (statistisch gewogen) brandvermogen. Dit is hieronder grafisch weergegeven in Figuur B1.13.



**Figuur B1.13 Brandvermogen (HRR) in de tijd voor een situatie met sprinklerinstallatie in een gebouw van 70 meter hoog (a) en met sprinklerinstallatie in een gebouw van 400 meter hoog (b)**

## Persoonlijke veiligheid hulpverleners

### Deuren in brand- en rookscheidingen open of dicht

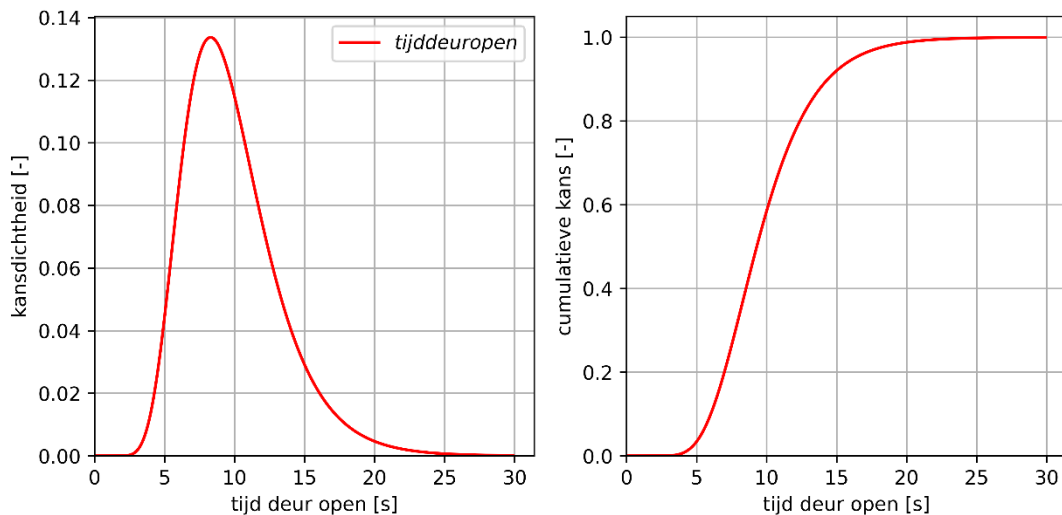
Het openen of sluiten van deuren in brand- en rookscheidingen bepaalt in grote mate de rookverspreiding naar de gang, het eventuele sluis en het trappenhuis.

#### *Betrouwbaarheid van zelfsluitende deuren*

Het kan voorkomen dat het zelfsluitmechanisme niet correct werkt door bijvoorbeeld vandalisme. Als daar sprake van is, is het niet vanzelfsprekend dat de deur sluit nadat deze is geopend. In dit onderzoek is als uitgangspunt genomen dat, indien het mechanisme niet correct werkt, de betreffende deur gedurende de brandduur open blijft staan. Hierdoor is rookverspreiding door de deuropening mogelijk. Voor de betrouwbaarheid van zelfsluitende deuren zijn weinig bronnen voorhanden. Een bron gaat uit van een betrouwbaarheid van grofweg 0,8 (British Standards Institution, 2019). In dit onderzoek is daar eveneens van uitgegaan. Dit betekent dat in 80 % van de scenario's een deur gesloten wordt nadat deze is geopend en in 20 % van de gevallen de deur geopend blijft. Of een deur sluit of geopend blijft, wordt voor elke deur in de modellering apart bepaald.

### Sluiten van deuren na geopend te zijn

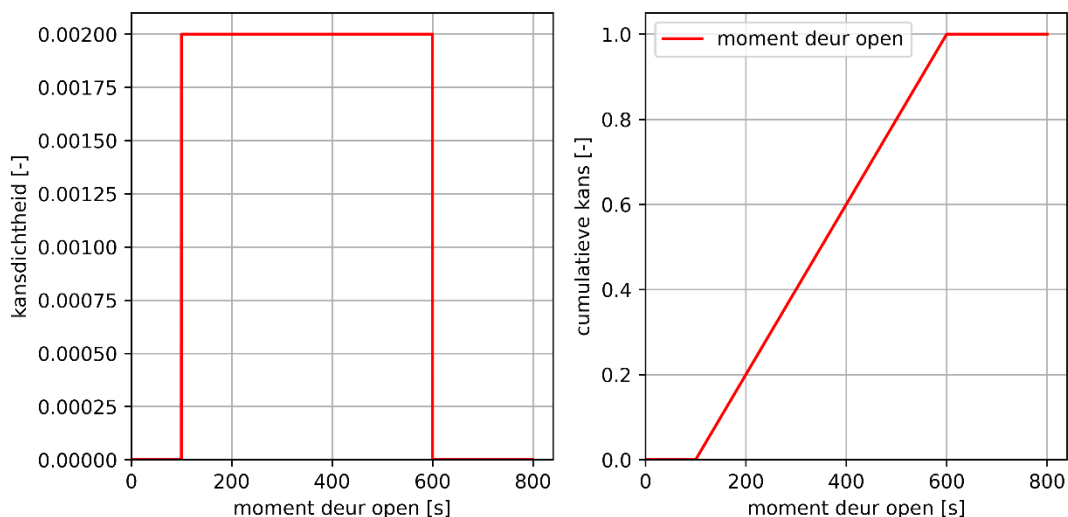
Als uitgangspunt is aangenomen dat alle deuren in brandscheidingen zelfsluitend zijn uitgevoerd. In de meeste gevallen zal de deur automatisch sluiten nadat deze is geopend. In die gevallen zal de rookverspreiding door de deur grotendeels worden bepaald door de tijd dat de deur open staat. Uit literatuur (C. Hopkin et al., 2020) blijkt dat de tijd dat die deur openstaat een lognormaal verdeling volgt, met een gemiddelde van 11 seconden en een standaardafwijking van 4,7 seconden. Dit resulteert in de kansverdeling die in dit onderzoek is aangehouden en die is weergegeven in figuur B1.14.



**Figuur B1.14** Tijd waarin de deur geopend is

### Moment van openen deuren

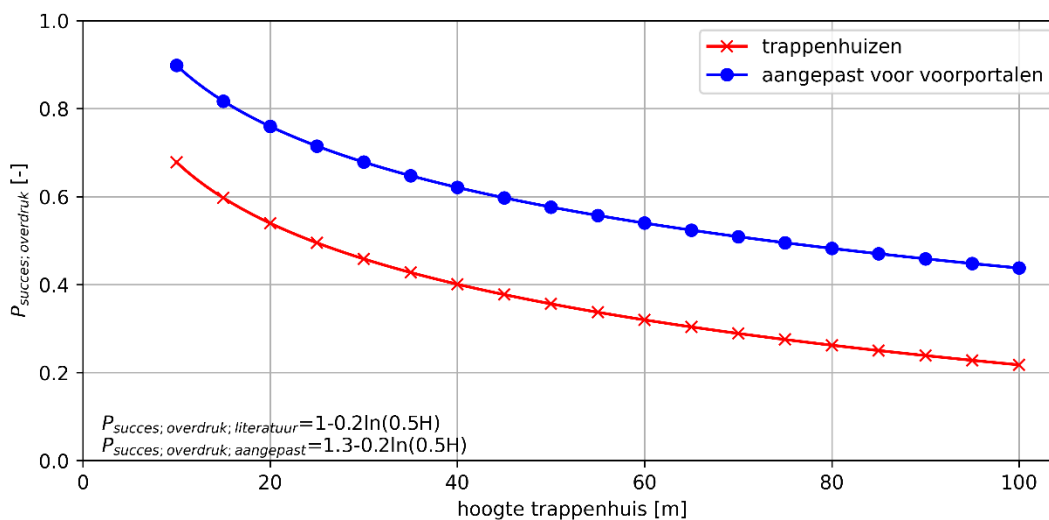
Het moment waarop een deur geopend wordt, kan veel gevolgen hebben voor de rookverspreiding. Er zijn in de literatuur hierover geen gegevens gevonden. Daarom is uitgegaan van een uniforme verdeling met een minimum van 100 seconden en een maximum van 600 seconden. Dit past op hoofdlijnen bij de uitgangspunten die zijn gebruikt bij de bepaling van de signaleringstijd in fase I van dit onderzoek. De gebruikte kansverdeling is weergegeven in Figuur 2.3. Wanneer andere deuren in het model worden geopend, is beschreven in paragraaf 2.3.1. De verdeling is weergegeven in figuur B1.15. Hoewel de signaleringstijd in hogere gebouwen mogelijk iets korter is vanwege de automatische sprinklerinstallatie, is er geen verdere differentiatie gedaan voor wat betreft de gebruikte kansverdelingen.



**Figuur B1.15** Moment waarop de deur tussen de woning waarin de brand zich bevindt en de corridor geopend wordt

### Betrouwbaarheid overdrukinstallatie

Een overdrukinstallatie voorkomt bij een correcte werking de verspreiding van rook naar voorportalen of trappenhuizen. In verschillende bronnen is de betrouwbaarheid van overdrukssystemen onderzocht op basis van casuïstiek en experimenten (Cowlard et al., 2013; Hepguzel Acikyol et al., 2017). Op basis van die data kan de betrouwbaarheid van een overdrukinstallatie in een trappenhuis als weergegeven in figuur B1.16 worden gemodelleerd (zie de rode lijn).



**Figuur B1.16** Betrouwbaarheid ( $P_{succes}$ ) overdrukssystemen in trappenhuizen

De betrouwbaarheid van een overdrukinstallatie wordt volgens de genoemde literatuur beïnvloed door het aantal mogelijke openstaande deuren in het trappenhuis. Dat wijkt in de praktijk af van de ontwerpuitgangspunten die vaak worden gekozen voor de installaties. Een ander belangrijk punt dat de betrouwbaarheid beïnvloedt, heeft te maken met het feit dat de ontwerpuitgangspunten geen of beperkt rekening houden met de branddynamica in het gebouw. Met name de drukontwikkeling door de brand wordt niet meegenomen, terwijl deze

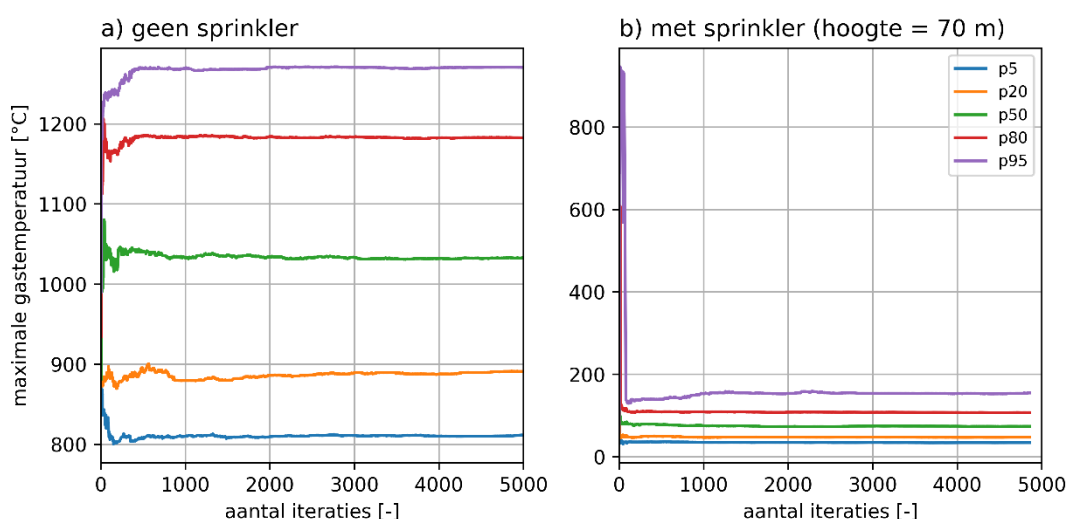
bepalend is voor een correcte werking van de overdrukinstallatie. Ten slotte worden effecten door winddruk onvoldoende meegenomen in het installatieontwerp.

In dit onderzoek is uitgegaan van een situatie waarin de sluis van een trappenhuis op overdruk wordt gezet in plaats van het trappenhuis zelf. De gevonden gegevens uit de literatuur passen daar niet goed bij, omdat die van toepassing zijn op overdrukinstallaties in trappenhuisen. Een sluis heeft immers minder deuren dan een trappenhuis. Dit beïnvloedt de betrouwbaarheid naar verwachting positief. Anderzijds is voor een installatie in voorportalen meer regeltechniek zoals sturingen en kleppen nodig. Dit geldt in toenemende mate voor hogere gebouwen. Dit beïnvloedt de betrouwbaarheid naar verwachting negatief. Omdat er geen data beschikbaar zijn van overdrukinstallaties in voorportalen is de betrouwbaarheid gemodelleerd overeenkomstig de blauwe curve in figuur B1.16. In deze curve is de betrouwbaarheid ten opzichte van de data uit de literatuur simpelweg verhoogd met 0,22, zodat het beginpunt (op 10 meter hoogte) een betrouwbaarheid van 0,9 is.

# Bijlage 2: Beoordeling aantal iteraties

## Betrouwbaarheid van draagconstructie en brandscheidingen

In paragraaf 1.2.2 is beschreven dat het aantal iteraties van de Monte Carlo-simulaties belangrijk is voor het resultaat. In Figuur B2.1 is daarom de ontwikkeling van de maximale gastemperatuur in de brandruimte weergegeven als functie van het uitgevoerde aantal iteraties. De resultaten voor een accumulerende omhulling zonder en met automatische brandbestrijdingsinstallatie (voor een gebouw van 70 meter hoog) zijn getoond.

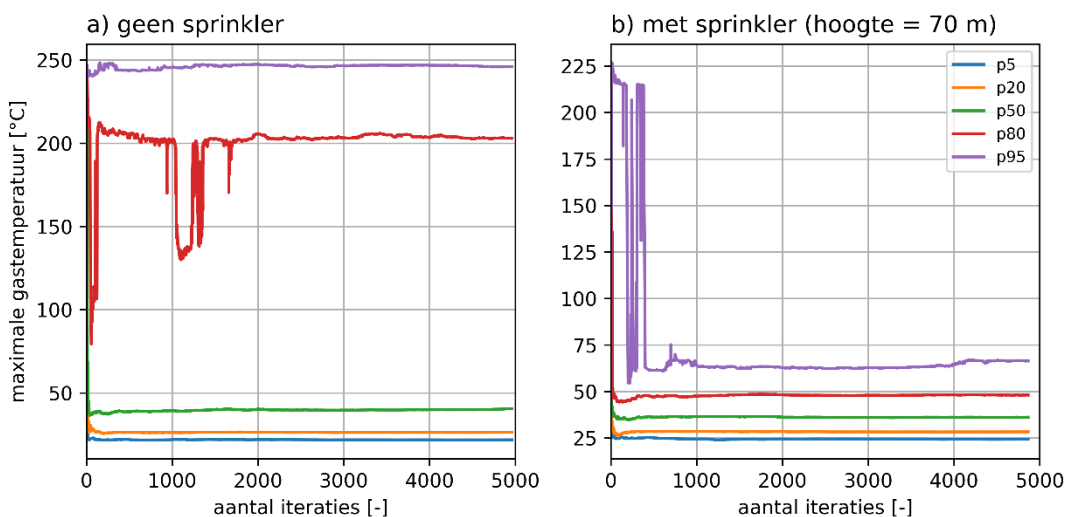


**Figuur B2.1 Ontwikkeling maximale gastemperatuur in de brandruimte met een accumulerende omhulling bij toenemend aantal iteraties**

Uit de figuur blijkt dat in beide gevallen na ongeveer 2000 iteraties de uitkomst stabiel is. Het gekozen aantal iteraties (5000) is daarom voldoende. Hoewel de betreffende resultaten hier niet zijn getoond, geldt dit ook voor de resultaten voor een geïsoleerde omhulling.

## Persoonlijke veiligheid hulpverleners

Dit deel van de AST-analyse heeft betrekking op de thermische blootstelling van brandweermensen. Een belangrijk deel van de blootstelling vindt in dit onderzoek plaats in de corridor of het trappenhuis. Zodoende is de beoordeling van het aantal iteraties in de Monte-Carlo-simulatie uitgevoerd voor de maximale temperatuur in de corridor en het trappenhuis. Vrijwel alle percentielen laten in Figuur B2.2 na circa 1500 simulaties een stabiel resultaat zien.



**Figuur B2.2 Ontwikkeling maximale gastemperatuur in de corridor met toenemend aantal iteraties**

Opvallend is dat in de corridor respectievelijk het 80<sup>ste</sup> en 95<sup>ste</sup> percentiel meer simulaties nodig hebben om stabiel te worden en bovendien erg gevoelig zijn. Dit komt door het gekozen uitgangspunt dat de betrouwbaarheid van een zelfsluitende deur precies 0,8 bedraagt. Ditzelfde geldt ook voor de resultaten in het trappenhuis of de sluis voor het 95<sup>ste</sup> percentiel (niet getoond). De kans dat zowel de deur van de woning als de deur van het trappenhuis geopend zijn, is dan  $1-(1-0,8)^2 = 0,94$ . De betrouwbaarheid van de zelfsluitende deuren beïnvloedt daardoor het 80<sup>ste</sup> en 95<sup>ste</sup> percentiel meer dan de andere percentielen. In beide gevallen zijn 5000 simulaties voldoende voor een stabiel resultaat.

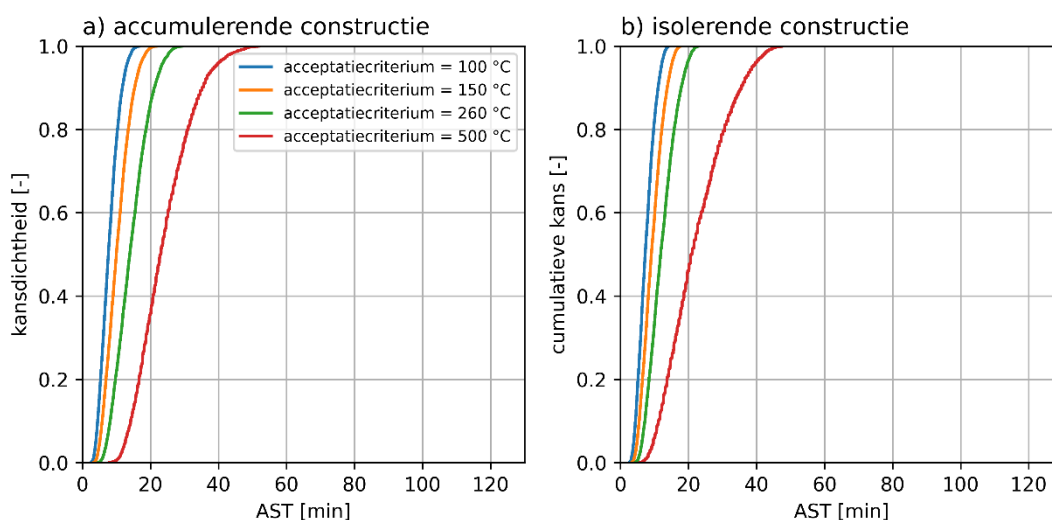
# Bijlage 3: Beschouwing rekenresultaten persoonlijke veiligheid

## Gebouwen lager dan 20 meter

In gebouwen lager dan 20 meter zijn er buiten brand- en rookscheidingen tussen de woning en de inpandige corridor en de corridor en het trappenhuis geen aanvullende brandveiligheidsvoorzieningen aanwezig die invloed kunnen hebben op de AST.

### In de brandruimte

De berekende spreiding met betrekking tot de AST in de brandruimte is in Figuur B3.1 weergegeven. Voor een gebouw met een accumulerende omhulling kan worden gesteld dat in 80 % van de gesimuleerde gevallen de AST bij een langere blootstellingsduur (5-25 minuten) kleiner is dan 20 minuten. Enkel in het geval van een hele korte blootstellingsduur (0,5 minuut blootstelling aan 500°C) is de brandruimte tot grofweg 32 minuten toegankelijk. In het geval van een gebouw met een isolerende omhulling is de AST korter als gevolg van de snelle temperatuuropbouw in de brandruimte.

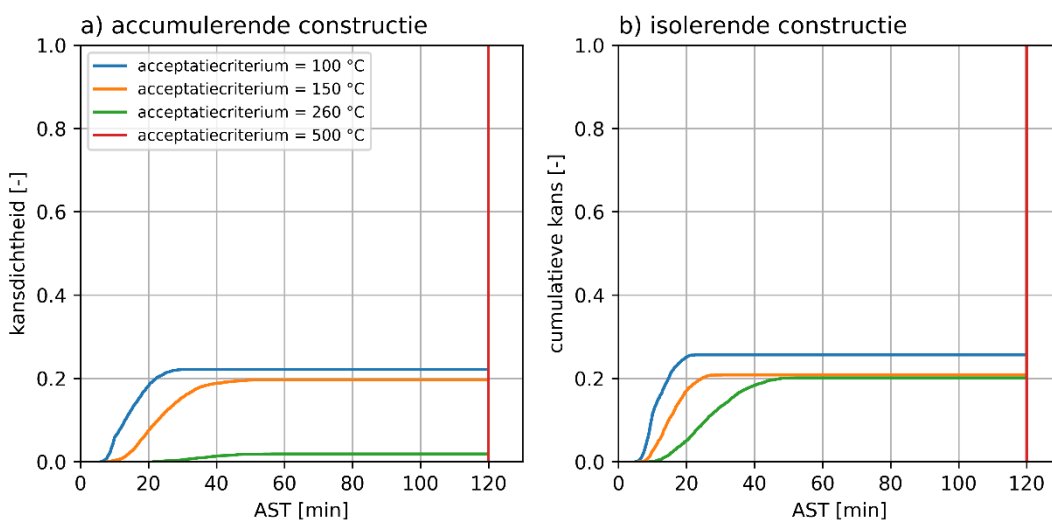


Figuur B3.1 Verdeling AST in de brandruimte in een gebouw van 0-20 meter

### In de corridor

In de corridor wordt de AST sterk bepaald door de betrouwbaarheid van de (zelfsluitende) deur tussen de brandruimte en de corridor. Als deze gesloten is, is vaak sprake van een AST hoger dan 120 minuten, ongeacht de blootstellingsduur. In andere gevallen blijft de deur openstaan en is veilig inzetten in de corridor niet meer vanzelfsprekend. Daarnaast zijn er scenario's gesimuleerd waarbij de deur tussen de brandruimte en de corridor sluit, maar er toch sprake is van overschrijding het 100°C-acceptatiecriterium. In die gevallen staat de

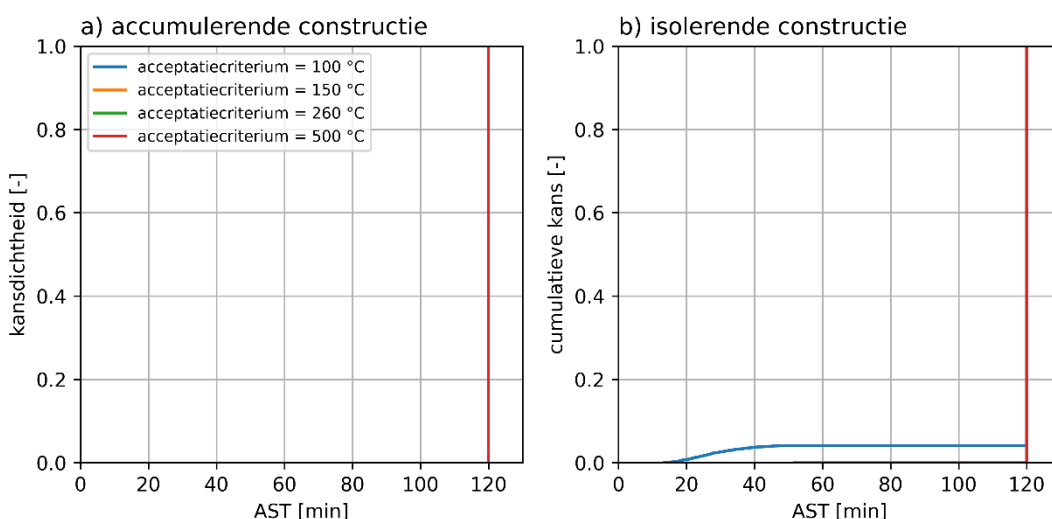
deur lang open, terwijl er sprake is van een snelle brandontwikkeling in de brandruimte. De verschillen tussen een gebouw met een respectievelijk isolerende en accumulerende omhulling zijn daarnaast opvallend groot, met name voor het acceptatiecriterium van 260°C. Dit laat zien dat de kans op een succesvolle brandweerinzet in een gebouw opgebouwd uit isolerende materialen kleiner is dan in een gebouw van bijvoorbeeld beton. De AST is weergegeven in figuur B3.2.



**Figuur B3.2** Verdeling AST in de corridor in een gebouw van 0-20 meter

### In het trappenhuis

Alleen in specifieke gevallen worden de laagste acceptatiecriteria (25 minuten blootstelling aan 100°C en 15 minuten blootstelling aan 150°C) in het trappenhuis overschreden. Dit is alleen het geval in een gebouw met een lage thermische traagheid. De verdeling is weergegeven in figuur B3.3.



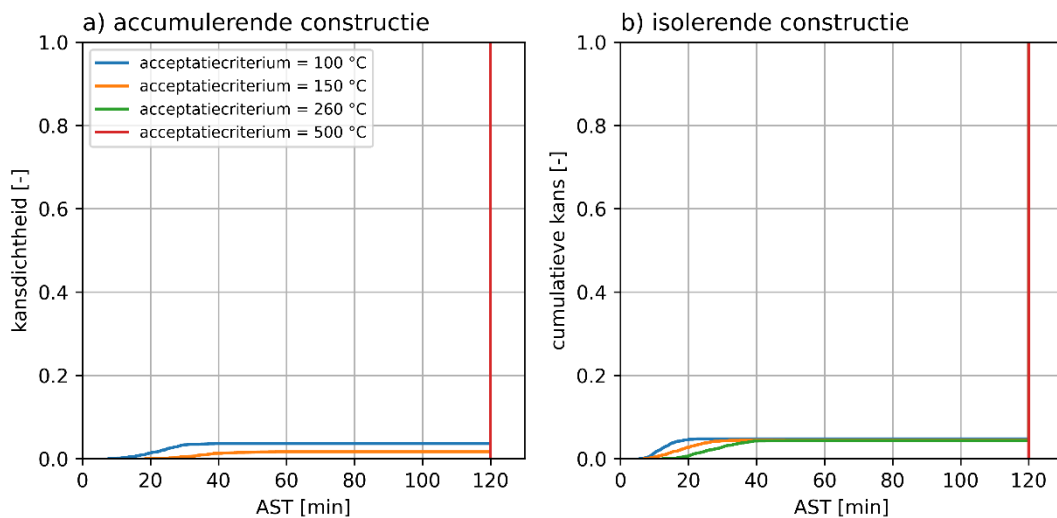
**Figuur B3.3** Verdeling AST in het trappenhuis in een gebouw van 0-20 meter

## Gebouwen 20-70 meter hoog

In gebouwen lager dan 20 meter is er buiten brand- en rookscheidingen tussen de woning en de inpandige corridor en de corridor en het trappenhuis een sluis aanwezig tussen de corridor en het trappenhuis. De resultaten voor de brandruimte en de corridor lijken op de resultaten voor gebouwen lager dan 20 meter en worden hier niet behandeld.

### In de sluis

De kans op een veilige brandweerinzet in de sluis is hoger dan in de corridor. Er zijn zowel in gebouwen met geïsoleerde omhulling als in gebouwen met accumulerende omhulling situaties denkbaar waarin de sluis gedurende een 5 tot 25 minuten veilig bruikbaar is. Dit is het geval wanneer de deuren tussen de brandruimte en corridor en tussen de corridor en de sluis open blijven staan. De verdeling is weergegeven in Figuur B3.4.



Figuur B3.4 Verdeling AST in de sluis in een gebouw van 20-70 meter

### In het trappenhuis

In het trappenhuis doen er zich geen situaties voor waarin de grenswaarden worden overschreden.

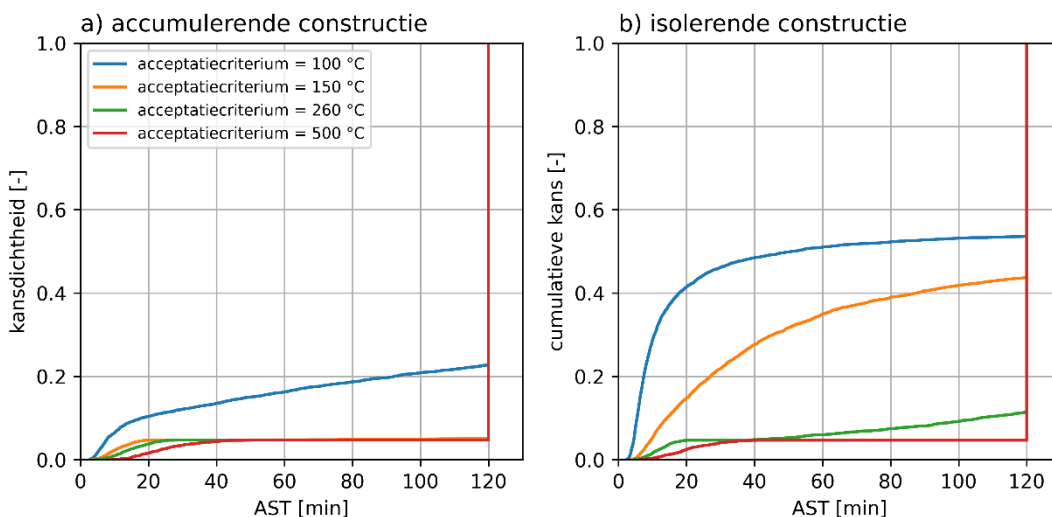
## Gebouwen 70-400 meter hoog

In gebouwen hoger dan 70 meter is er buiten brand- en rookscheidingen tussen de woning en de inpandige corridor en de corridor en het trappenhuis een sluis aanwezig tussen de corridor en het trappenhuis. Daarnaast is het gebouw voorzien van een automatische sprinklerinstallatie en is een overdrukinstallatie aanwezig in de sluis. De resultaten van een gebouw van 70 meter hoog en een gebouw van 400 meter hoog worden getoond.

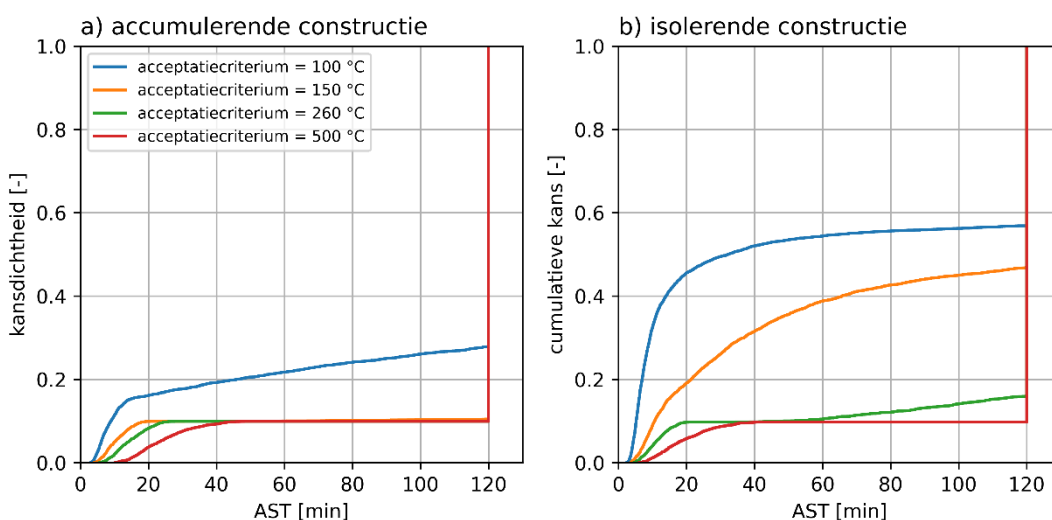
### In de brandruimte

Uit de rekenresultaten blijkt dat er slechts in een beperkt aantal gevallen acceptatiecriteria worden overschreden. Dit is met name het geval voor situaties waarin de sprinklerinstallatie faalt. Als deze wel correct werkt, worden hooguit de acceptatiecriteria voor 100°C en 150°C overschreden. Er bestaan duidelijke verschillen tussen gebouwen bestaande uit accumulerende constructies en gebouwen met geïsoleerde constructies. In het geval van een

geïsoleerde constructie is de kans op overschrijden van een van de acceptatiecriteria hoger. Doordat de betrouwbaarheid van de sprinklerinstallatie afneemt met de hoogte van het gebouw, neemt ook de kans op het overschrijven van een van de acceptatiecriteria toe. De resultaten zijn weergegeven in figuren B3.5 en B3.6.



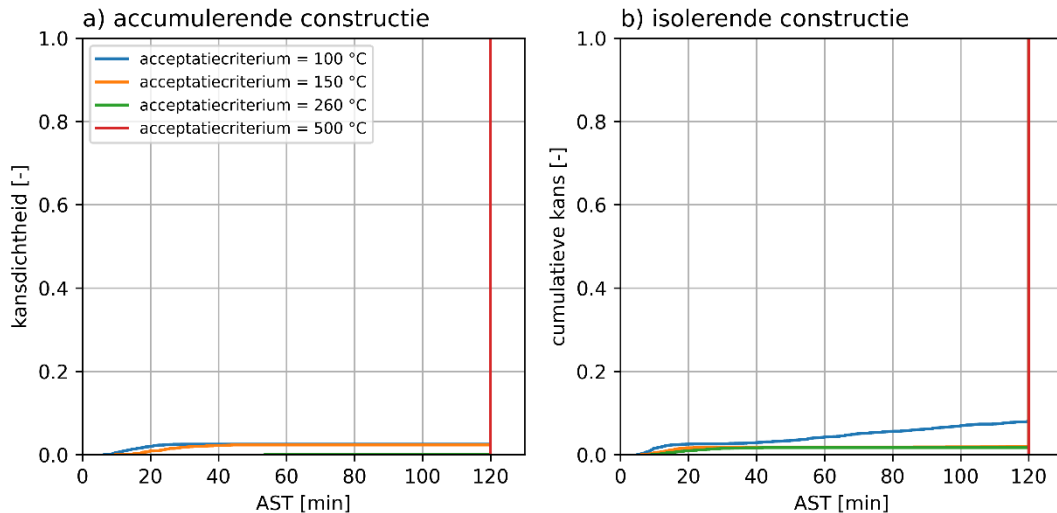
**Figuur B3.5** Verdeling AST in de brandruimte van een gebouw van 70 meter



**Figuur B3.6** Verdeling AST in de brandruimte van een gebouw van 400 meter

### In de corridor

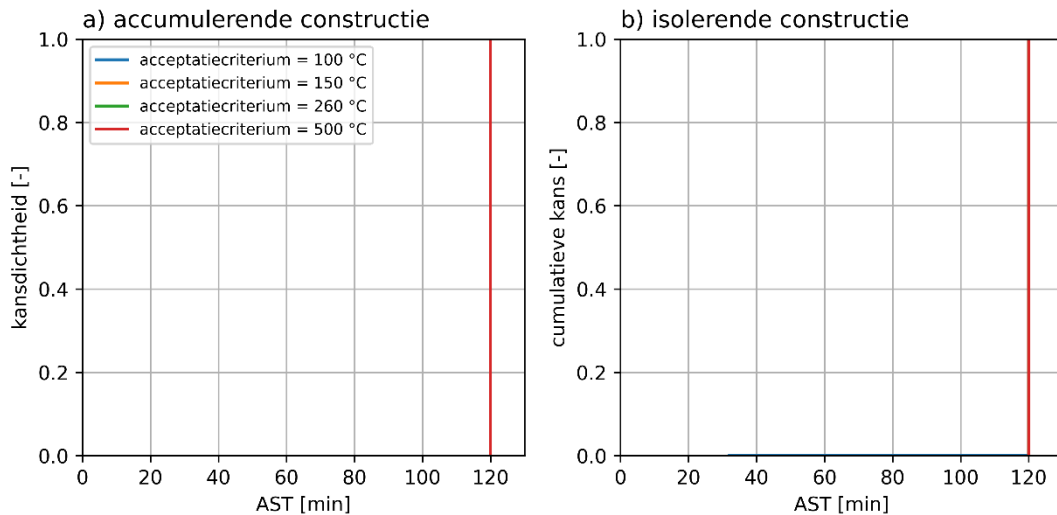
In vergelijking met lagere gebouwen is de kans dat een van de acceptatiecriteria wordt overschreden in de corridor van een gebouw hoger dan 70 meter fors kleiner. Dit is met name het gevolg van de automatische sprinklerinstallatie. In principe is overschrijding alleen mogelijk als de sprinklerinstallatie niet correct functioneert en de deur tussen de brandruimte en de corridor open blijft staan. Dit verhoogt de kans op een veilige brandweerinzet door de corridor substantieel. In een gebouw van 70 meter hoog is de kans op de overschrijding van een van de acceptatiecriteria iets kleiner dan in een gebouw van 400 meter hoog, zoals getoond in figuur B3.7.



**Figuur B3.7** Verdeling AST in de corridor van een gebouw van 400 meter

### In de sluis

Slechts in hele uitzonderlijke gevallen worden in de sluis grenswaarden overschreden. Dit gebeurt alleen wanneer de sprinklerinstallatie faalt en alle deuren tussen de brandruimte en de sluis open blijven staan. Ook de overdrukinstallatie heeft een positief effect op de kans op een veilige brandweerinzet. Dat effect is echter klein in vergelijking met het effect van de automatische sprinklerinstallatie. In een gebouw van 70 meter hoog is de kans op de overschrijding van een van de acceptatiecriteria iets kleiner dan in een gebouw van 400 meter hoog, zoals getoond in Figuur B3.8.



**Figuur B3.8** Verdeling AST in de sluis van een gebouw van 400 meter

### In het trappenhuis

In het trappenhuis doen er zich geen situaties voor waarin de grenswaarden worden overschreden.