

23-5-2022

Variantenstudie voor de vluchtveiligheid in luchtdichte appartementen

Hanzehogeschool Groningen

Institute of Future Environments

Built Environment

Zernikeplein 11, 9701 DA Groningen

abtWassenaar

Afdeling Bouwfysica en brandveiligheid

050 534 7345

Rummerinkhof 6, 9751 SL Haren

Student

Jesse Munnik

E-Mail: jjw.1998.27@gmail.com

Studentnummer: 390363

Praktijkbegeleider

Michel Dittrich

E-Mail: mdittrich@abtwassenaar.nl

Functie: Adviseur bouwfysica en brandveiligheid

Docentbegeleider

Marcel Wester

E-mail: m.h.p.wester@pl.hanze.nl

VOORWOORD

Voor u ligt het afstudeeronderzoek “Variantenstudie voor de vluchtveiligheid in luchtdichte appartementen”. Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van ingenieursbureau abtWassenaar. Dit onderzoek heb ik uitgevoerd in het kader van het afstuderen aan de opleiding Built Environment aan de Hanzehogeschool te Groningen.

Bij dezen wil ik de gelegenheid nemen om iedereen te bedanken die mij heeft geholpen, of heeft ondersteund, bij het maken van mijn scriptie. Mijn interesse ligt bij de brandveiligheid, vanaf het moment dat ik de middelbare school heb afgemaakt. Hoe cliché het ook klinkt, ik ben ontzettend blij dat ik mijn afstudeeropdracht binnen dit werkveld heb kunnen uitvoeren (aangezien dit nog lastig bleek aan het begin van het schooljaar). Daarbij heb ik grote dank voor de mensen van abtWassenaar, die dit mogelijk hebben gemaakt.

Ik dank Bas van der Heiden voor het uitlenen van zijn meetapparatuur en Bart Struiksmā voor het openstellen van zijn woning voor de luchtdichtheidsmetingen. Daarnaast dank ik Gosse Boon, Jacob de Borst, Charles Boks en Ruud van Herpen voor de beantwoording van alle vragen die ik had tijdens dit onderzoek. In het bijzonder wil ik Roy Vos noemen, voor de tijd die hij heeft vrijgemaakt om mijn werk te verifiëren. Daarnaast wil ik Harrie Munnik bedanken voor alle tijd, hulp en middelen die hij heeft geboden. Het was ontzettend fijn om te kunnen sparren over alle verschillende onderwerpen die aan bod kwamen tijdens het schrijven van dit onderzoek.

Daarnaast wil ik mijn studiegroep en mijn afstudeerbegeleider bedanken. Lisette, Klaas, Inez, Joeri en Marcel, hartstikke bedankt voor alle adviezen en hulp die jullie hebben geboden deze periode.

Tot slot wil ik Michel Dittrich bedanken voor alle begeleiding en hulp die hij mij het afgelopen jaar heeft geboden. Hij stond altijd voor mij klaar om te helpen of te sparren, zelfs als het wat lastiger uitkwam.

Met het dankwoord achter de rug, wens ik u veel leesplezier toe.

Jesse Munnik

20 mei 2022

SAMENVATTING

Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van het effect van luchtdichtheid van appartementen op de vluchtveiligheid. Doordat appartementen luchtdichter worden gebouwd, ontstaan er hogere drukken in het appartement, waardoor het niet mogelijk is om de woningvoordeur te openen. Het doel van dit onderzoek is om kennis te vergaren omtrent oplossingen om de vluchtveiligheid in luchtdichte woningen te verhogen, rekening houdend met de praktische inpasbaarheid van de varianten. Door de toepassing van een dergelijke aanpassing zal het mogelijk zijn om, tijdens een woningbrand in een luchtdichte woning, de voordeur van de woning te openen en wordt het mogelijk voor de bewoners om te ontvluchten.

De getoetste varianten omvatten:

- De inpassing van een woningsprinklerinstallatie.
- De inpassing van een rookmelder gestuurde bypass in een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem.
- De inpassing van een rookmelder gestuurde passieve zomernachtventilatie.

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van ingenieursbureau abtWassenaar, om meer informatie te verkrijgen over toe te passen ingrepen in de onderhavige situatie en om een werkmethode voor de bepaling hiervan op te stellen.

De volgende vraag wordt in dit onderzoek behandeld:

Welke brandtechnische ingreep is in de praktijk, conform een multicriteria-analyse, geschikt om de vluchtveiligheid van bewoners in luchtdichte appartementen te waarborgen, op basis van de voorgestelde varianten?

Om dit onderzoek uit te voeren, zijn simulaties uitgevoerd in CFast. Om deze simulaties te verifiëren, zijn interviews gehouden met brandveiligheidsexperts. Daarnaast zijn metingen uitgevoerd, voor de bepaling van de capaciteit van een bypasskanaal, middels blowerdoortesten. Om te bepalen welke variant het meest geschikt is in de praktijk, is een multicriteria-analyse uitgevoerd.

Uit het onderzoek blijkt dat de sprinklerinstallatie het brandvermogen verlaagd, waardoor de optredende temperaturen en de optredende drukpiek worden verlaagd. Daarnaast neemt het zuurstofpercentage toe, in relatie tot de basissituatie. De inpassing van een rookmelder gestuurde bypass heeft relatief weinig effect op het brandscenario. De inpassing van een rookmelder gestuurde zomernachtventilatie heeft een positief effect op de drukpiek. Echter zijn de optredende temperaturen letaal.

Uit de resultaten van het onderzoek blijkt dat de inpassing van een sprinklerinstallatie, in de praktijk, het meeste geschikt is om de vluchtveiligheid van de bewoners te waarborgen.

Als vervolgonderzoek wordt aanbevolen om het effect van andere, niet behandelde varianten, te simuleren. Daarnaast zal het effect van een iteratief proces, in relatie tot de bepaling van het equivalente oppervlak, kunnen worden uitgevoerd. Mogelijk kan een aanpassing in de wet- en regelgeving omtrent luchtdichte woongebouwen worden doorgevoerd of kunnen normcommissies worden opgesteld om handvatten te bieden aan de ingenieurswereld voor de bepaling van de vluchtveiligheid.

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord.....	1
Samenvatting.....	2
Figuren- en Tabellenlijst.....	7
Symbolen en afkortingen.....	9
Formulelijst.....	10
Begrippenlijst.....	11
1. Inleiding.....	12
1.1 Organisatieomschrijving.....	12
1.2 Relevantie.....	13
1.3 Probleemstelling en doel.....	14
1.4 Onderzoeksvragen.....	14
1.5 Leeswijzer.....	14
2. Methodologie.....	16
2.1 Type onderzoek en Dataverzameling per deelvraag.....	16
3. Vluchtveiligheid.....	20
3.1 ASET-RSET.....	20
3.2 Bepaling ASET.....	20
3.2.1 Zichtlengte.....	21
3.2.2 Thermische straling.....	22
3.2.3 Temperatuur.....	23
3.2.4 Giftigheid.....	23
3.2.5 Druk.....	23
3.3 Bepaling RSET.....	23
3.4 Deelconclusie.....	24
4. Brandontwikkeling.....	25
4.1 Modelleringscasestudy.....	25
4.1.1 Compartimentering.....	25
4.1.2 Materialen.....	26
4.1.3 Luchtdichtheid.....	26
4.1.4 Brandscenario's.....	28
4.1.5 Detectie.....	30
4.1.6 Gevelopeningen.....	30
4.2 Uitkomsten basissituatie.....	31
4.3 Deelconclusie.....	35
5. Variantenstudie.....	36
5.1 Variant 1 - Wooningsprinkler.....	36
5.1.1 Ontwerpuitgangspunten.....	36
5.1.2 Modelleringscasestudy.....	37

5.1.3	Uitkomsten variant 1.....	38
5.1.4	Mogelijkheid tot veilig vluchten.....	42
5.2	Variant 2 – Rookmelder gestuurde bypass	42
5.2.1	Ontwerputgangspunten	44
5.2.2	Modellering in Cfast.....	44
5.2.3	Uitkomsten variant 2.....	47
5.2.4	Mogelijkheid tot veilig vluchten.....	48
5.3	Variant 3 – Aangestuurde passieve zomernachtventilatie	48
5.3.1	Ontwerputgangspunten	49
5.3.2	Modellering in CFast	50
5.3.3	Uitkomsten variant 3.....	52
5.3.4	Mogelijkheid tot veilig vluchten.....	54
5.4	Deelconclusie	54
6.	Multicriteria analyse	55
6.1	Algemeen.....	55
6.2	Kwantificering van de score en de weegfactoren.....	55
6.2.1	Mogelijkheid tot veilig vluchten.....	55
6.2.2	Aantal bouwkundige ingrepen.....	56
6.2.3	Aantal installatietechnische ingrepen.....	56
6.2.4	Ontwerpkosten.....	56
6.2.5	Aanlegkosten.....	57
6.2.6	Jaarlijkse onderhoudskosten	57
6.2.7	Effect op brandoverslag	57
6.2.8	Visueel effect	58
6.2.9	Klimatologisch effect	58
6.2.10	Certificering.....	58
6.2.11	Faalkans	59
6.2.12	KAns op schade.....	59
6.3	Gegevens variant 1.....	59
6.3.1	Mogelijkheid tot veilig vluchten.....	59
6.3.2	Aantal bouwkundige ingrepen.....	59
6.3.3	Aantal installatietechnische ingrepen.....	60
6.3.4	Ontwerpkosten.....	60
6.3.5	Aanlegkosten.....	60
6.3.6	Jaarlijkse onderhoudskosten	62
6.3.7	Effect op brandoverslag	63
6.3.8	Visueel effect	63
6.3.9	Klimatologisch effect	64
6.3.10	Certificering.....	64
6.3.11	Faalkans	64

6.3.12	Kans op schade	64
6.4	Gegevens variant 2.....	65
6.4.1	Mogelijkheid tot veilig vluchten.....	65
6.4.2	Aantal bouwkundige ingrepen.....	65
6.4.3	Aantal installatietechnische ingrepen.....	65
6.4.4	Ontwerpkosten.....	65
6.4.5	Aanlegkosten.....	65
6.4.6	Jaarlijkse onderhoudskosten	66
6.4.7	Effect op brandoverslag	66
6.4.8	Visueel effect	66
6.4.9	Klimatologisch effect	66
6.4.10	Certificering.....	66
6.4.11	Faalkans	66
6.4.12	Kans op schade	66
6.5	Gegevens variant 3.....	66
6.5.1	Mogelijkheid tot veilig vluchten.....	66
6.5.2	Aantal bouwkundige ingrepen.....	67
6.5.3	Aantal installatietechnische ingrepen.....	67
6.5.4	Ontwerpkosten.....	67
6.5.5	Aanlegkosten.....	67
6.5.6	Jaarlijkse onderhoudskosten	67
6.5.7	Effect op brandoverslag	67
6.5.8	Visueel effect	67
6.5.9	Klimatologisch effect	68
6.5.10	Certificering.....	68
6.5.11	Faalkans	68
6.5.12	Kans op schade	68
6.6	Deelconclusie	69
7.	Conclusie.....	70
8.	Discussie	71
8.1	Validiteit.....	71
8.2	Interpretatie van resultaten	71
8.3	Beperkingen	71
8.4	Implicaties	72
8.5	Suggesties voor vervolgonderzoek en aanbevelingen.....	72
9.	Literatuurlijst	74

Bijlage A.	Tekeningen casestudy
Bijlage B.	Invoer basissituatie CFast
Bijlage C.	Toetsing vluchtveiligheid basissituatie
Bijlage D.	Invoer variant 1 CFast
Bijlage E.	Toetsing vluchtveiligheid variant 1
Bijlage F.	Meetresultaten luchtdichtheidsmeting
Bijlage G.	Grafieken parameters vluchtveiligheid op basis van meting
Bijlage H.	Invoer variant 2 CFast
Bijlage I.	Toetsing vluchtveiligheid variant 2
Bijlage J.	Invoer variant 3 CFast
Bijlage K.	Toetsing vluchtveiligheid variant 3
Bijlage L.	Grafieken parameters vluchtveiligheid alle varianten
Bijlage M.	Multicriteria-analyse
Bijlage N.	Samenvatting interviews experts

FIGUREN- EN TABELLENLIJST

Figurenlijst

Figuur 1 Bedrijven binnen Oosterhoff.....	13
Figuur 2 Disciplines abtWassenaar	13
Figuur 3 Element voor luchtdichtheidsmeting	17
Figuur 4 Geplaatste blowerdoor.....	18
Figuur 5 Afplakken van ventilatiekanaal	18
Figuur 6 Plaatsing meetelement.....	19
Figuur 7 Relatie tussen rookdichtheid en loopsnelheid volgens onderzoek van Jin (SBR, geciteerd in Tromp en Van Mierlo, 2013)	22
Figuur 8 Gemodelleerde compartimenten.....	25
Figuur 9 Typical upholstered furniture energy releases (Babrauskas, geciteerd in Karlsson en Quintiere, 2000) ..	29
Figuur 10 Typical mattress energy release rate (Särdqvist, geciteerd in Karlsson en Quintiere, 2000).....	30
Figuur 11 3D model basissituatie.....	31
Figuur 12 Relatie druk en zuurstofpercentage compartiment 4	33
Figuur 13 Temperatuurverloop compartiment 4.....	34
Figuur 14 Relatie zuurstofpercentage en HRR compartiment 1	35
Figuur 15 Locatie en nummering sprinklerkoppen.....	38
Figuur 16 HRR basissituatie en variant 1 in compartiment 1.....	39
Figuur 17 Zichtlengte basissituatie en variant 1 in compartiment 4.....	39
Figuur 18 Temperatuur basissituatie en variant 1 in compartiment 4	40
Figuur 19 Druk basissituatie en variant 1 in compartiment 4.....	41
Figuur 20 Zuurstofpercentage basissituatie en variant 1 in compartiment 4.....	41
Figuur 21 Luchtstromen ventilatiesysteem zonder gebruik van bypass.....	42
Figuur 22 Luchtstromen ventilatiesysteem met bypass functioneel	43
Figuur 23 Luchtstromen ventilatiesysteem onder brandomstandigheden zonder bypass	43
Figuur 24 Luchtstromen ventilatiesysteem onder brandomstandigheden met bypass.....	44
Figuur 25 Weerstandsfactoren voor verschillende inlaten van ventilatiekanalen (Van Herpen, 2005a)	45
Figuur 26 Locaties rookmelders variant 2	47
Figuur 27 3D-model variant 2.....	47
Figuur 28 HRR basissituatie en variant 2 in compartiment 4.....	48
Figuur 29 Gevelopening die wordt vervangen door de DucoGrille Nightvent	49
Figuur 30 Schematisatie doorlaatoppervlakten (Duco, 2016b)	50
Figuur 31 Locaties rookmelders variant 3	51
Figuur 32 3D-model variant 3.....	51
Figuur 33 HRR basissituatie en variant 3 in compartiment 4	52
Figuur 34 Temperatuur basissituatie en variant 3 in compartiment 4	53
Figuur 35 Druk basissituatie en variant 3 in compartiment 4.....	53
Figuur 36 Relatie zuurstofpercentage en druk in compartiment 4 variant 3.....	54
Figuur 37 Directe kosten met sprinklerinstallatie.....	61

Figuur 38 Directe kosten zonder sprinklerinstallatie.....	62
Figuur 39 Concealed-sprinklerhead (Spectrum Fire Protection, 2017).....	63
Figuur 40 Voorbeeld van sprinklerkoppen in de woonomgeving (Waterleidingsprinkler, 2017).....	64
Figuur 41 Buitenzijde DucoGrille Nightvent (Duco, z.d.).....	68
Tabellenlijst	
Tabel 1 Onderzoeksmethoden en resultaten per deelvraag.....	16
Tabel 2 Aanvaardbare omstandigheden om veilig te vluchten (The Swedish National Board of Housing, Building and Planning, 2013).....	21
Tabel 3 Uitgangspunten Excelformule van loopsnelheid op basis van zichtlengte.....	24
Tabel 4 Bepaling veiligheidsfactor voor niveau nieuwbouw (Normcommissie 351007 “Brandveiligheid van bouwwerken”, 2015).....	24
Tabel 5 Invoergegevens materialen CFast.....	26
Tabel 6 Afmetingen openingen per compartiment.....	28
Tabel 7 Moment van overschrijding van parameters casestudy.....	32
Tabel 8 Typen sprinklerinstallaties conform NEN 2077 en eisen per type (Verenigde Woningsprinkler Installateurs, 2014, geciteerd in Instituut Fysieke Veiligheid, 2016).....	37
Tabel 9 Afmetingen openingen per compartiment met ventilatievoorziening.....	46
Tabel 10 Afmetingen gevelopening.....	49
Tabel 11 Criteria MCA met bijbehorende wegingsfactoren.....	69

SYMBOLEN EN AFKORTINGEN

Symbolen

A:	Bruto doorlaat (van een opening)	[m ²]
A _e :	Netto doorlaat (van een opening)	[m ²]
C:	Capaciteit van een opening bij 1 pa drukverschil	[m ³ / (s * pa ⁿ)]
C _s :	rookdeeltjesconcentratie	[kg / m ³]
D:	Hydraulische diameter	[m]
F:	Fysische vrije doorlaat	[%]
HRR:	Brandvermogen	[kW]
h _c :	Factor voor convectieve warmte uitwisseling	[-]
k:	Extinctiecoëfficiënt per eenheid rookdeeltjes	[m ⁻¹ / (kg / m ³), ofwel m ² / kg]
l:	Lengte (van het ventilatiekanaal)	[m]
n:	Stromingsexponent	[-]
OD:	Optische rookdichtheid	[m ⁻¹]
p:	druk	[Pa]
q:	Stralingsintensiteit	[kW / m ²]
q _{v,10} :	Luchtdichtheid	[l / s, of l / (s * m ²)]
T:	Temperatuur	[°C]
T _i :	Temperatuur van de hittebron	[K]
T _m :	Oppervlaktetemperatuur van het aangestraalde materiaal	[K]
t _d :	Detectietijd	[s]
t _r :	Reactietijd	[s]
t _v :	Vluchttijd	[s]
x:	Kleinste doorlaatooppervlakte	[m ²]
y:	Lamelstap	[m ²]
Z _L :	Zichtlengte	[m]
α:	Brandontwikkelingssnelheid	[kW / s]
ε:	Emissiviteit	[-]
ζ _e :	Weerstandsfactor van element e	[-]
ζ _i :	Weerstandsfactor van de inlaat van het kanaal	[-]
λ:	Wandwrijvingscoëfficiënt	[-]
μ:	Contractiecoëfficiënt	[-]
ρ:	Dichtheid	[kg / m ³]
σ:	Stefan Boltzmann constante van een zwarte straler	[kW / (m ² * K ⁴)]

Afkorting

ASET	Available Safe Egress Time. De beschikbare tijd om te ontvluchten.
BENG	Bijna Energie Neutraal Gebouw.
HRR	Heat Release Rate. Brandvermogen.
MCA	Multicriteria-analyse.
RSET	Required Safe Egress Time. De benodigde tijd om te ontvluchten.
RWA	Rook- en warmteafvoer.
TCO	Total cost of ownership. Totale kosten van het eigenaarschap.
WTW	Warmteterugwinning.

FORMULELIJST

1	$Z_L = \frac{1}{OD}$	Zichtlengte
2	$OD = k * C$	Optische rookdichtheid
3	$q = \varepsilon * \sigma_{zwart} * (T_i^4 - T_m^4) + h_c (T_i - T_m) / 1000$	Straling op de huid terwijl door rook wordt gevlucht
4	$RSET = (t_d + t_r + t_v) * veiligheidsfactor$	Benodigde vluchttijd
5	$C = A * \mu * \sqrt{\frac{2}{\rho}}$	Capaciteit van een opening
6	$q_{v,p} = \sum_C (C) * \Delta p^n$	Luchtvolumestroom
7	$A_e = \frac{C}{0,833} * \Delta p^{n-0,5}$	Netto doorlaat
8	$HRR = \alpha * t^2$	Brandvermogen bij een t ² -curve
9	$t = \frac{5,33 * 10^8}{T^{3,66}}$	Maximale blootstellingsduur aan temperaturen tussen de 70°C en 150°C
10	$C = \frac{A * \sqrt{\frac{2}{\rho}}}{1 + \sqrt{\frac{\lambda l}{D} + \sum \zeta_e}}$	Capaciteit van een kanaal
11	$\mu = \frac{1}{1 + \sqrt{\zeta_i}}$	Contractiefactor
12	$F = \frac{x}{y}$	Fysische vrije doorlaat
13	$A_e = A * F$	Netto doorlaattooppervlakte DucoGrille Nightvent

BEGRIPPENLIJST

<i>Backdraft</i>	Explosie die voorkomt bij de spontane toevoeging van zuurstof bij de pyrolysegassen, die zijn ontstaan tijdens een zuurstofbeheerste brand.
<i>Brandvermogensontwikkeling</i>	Vermogen in watt dat vrijkomt bij verbranding als functie van tijd.
<i>Equivalentie ratio</i>	Ratio waarmee aangetoond wordt wanneer een brand zuurstofbeheerst wordt.
<i>Gelijkwaardigheid</i>	Alternatieve invulling, anders dan de prestatie-eisen van het Bouwbesluit, voor het behalen van functionele Bouwbesluiteisen.
<i>Laminaire stroming</i>	Stroming waarbij de lagen van een gas of vloeistof zich parallel van elkaar voortbewegen. Dit is de tegenhanger van turbulente stroming.
<i>Pyrolysegassen</i>	Rookgassen die ontstaan door de ontleding van brandstof middels vuur.
<i>Rookdichtheid</i>	Aantal deeltjes in kg per m ³ rook.
<i>Sproeidichtheid</i>	Minimale sproeidichtheid in millimeter per minuut water, bepaald door de opbrengst van de sprinklers in liter per minuut, gedeeld door de bestreken oppervlakte in m ² .
<i>Twee-zone model</i>	Brandmodel waarbij twee zones worden verondersteld: een bovenste en een onderste laag. De bovenste laag is veelal de rooklaag.
<i>Turbulente stroming</i>	Stroming die in wervels plaatsvindt. Dit is de tegenhanger van laminaire stroming.
<i>Verbrandingswarmte</i>	Energie in MJ die vrijkomt bij verbranding van een kilogram brandstof.
<i>Warmtestralingsflux</i>	Aantal kW hittestraling per m ² ten gevolge van een brand.

1. INLEIDING

Tegenwoordig is luchtdicht bouwen steeds relevanter in de gebouwde omgeving. Door de ingang van de BENG-eisen in 2021 wordt er meer aandacht besteed aan het energiezuinig construeren van gebouwen. Doordat gebouwen luchtdichter worden uitgevoerd, worden ongewenste luchtstromen door de thermische schil verminderd en wordt onnodig energieverbruik voorkomen (Nieman Raadgevende Ingenieurs, 2021). Naast het verbeteren van de thermische schil, neemt de inwendige luchtdichtheid toe door de inpassing van de nieuwe rookwerendheidseisen.

In 2015 is aangetoond dat het luchtdicht bouwen van woningen een grote impact heeft op de veiligheid van bewoners en de brandweer bij een brand (Van Den Brink, 2015). Van Den Brink heeft middels experimenten en simulaties aangetoond dat tijdens de ontwikkeling van een brand, overdruk ontstaat in de woning ten opzichte van buiten. Hierdoor wordt het vluchten vanuit de woning voor een bewoner bemoeilijkt. Aangezien woningtoegangsdeuren naar binnen opendraaien, krijgt de bewoner tijdens de overdruk, die door een ontwikkelende brand ontstaat, de deur niet meer open. De vluchtroute uit de woning is daardoor geblokkeerd. Echter zijn de uitgevoerde simulaties van Back draft Den Brink versimpeld en houden deze onvoldoende rekening met de realiteit (Tenbült, 2017). In 2017 is door Tenbült onderzoek uitgevoerd naar de openingen van een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem en of deze een significante bijdrage leveren aan het afnemen van de overdruk tijdens de brandontwikkeling. Middels metingen en simulaties heeft Tenbült aangetoond dat de ventilatiekanalen geen significante bijdrage leveren aan het verminderen van de drukpiek bij brandontwikkeling. De ventilatiekanalen verbeteren de vluchtveiligheid in een luchtdichte woning slechts met een paar seconden. Tot op heden zijn er geen brandtechnische ingrepen bekend om de vluchtveiligheid in luchtdichte woningen te verhogen.

In dit onderzoek wordt onderzocht en onderbouwt welke mogelijke ingrepen, in de praktijk, het beste de vluchtveiligheid in luchtdichte woningen zal verhogen. In dit onderzoek wordt specifiek onderzoek gedaan naar luchtdichte appartementen in een woongebouw. Daarnaast wordt een werkmethode voor abtWassenaar ontwikkeld om een beoordeling, van een toe te passen variant, uit te kunnen voeren.

De te onderzoeken brandtechnische ingrepen zijn afgestemd met Michel Dittrich (adviseur bouwfysica en brandveiligheid, abtWassenaar) en Ruud van Herpen (Lector brandveiligheid, Technische universiteit Eindhoven) d.d. 24 januari 2022. De volgende brandtechnische ingrepen worden onderzocht in dit onderzoek:

- De toepassing van woningsprinklers;
- Het gebruik van een aangestuurde bypass van een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem;
- Aangestuurde passieve zomernachtventilatie.

In hoofdstuk 5 is een omschrijving van de verschillende varianten opgenomen.

1.1 ORGANISATIEOMSCHRIJVING

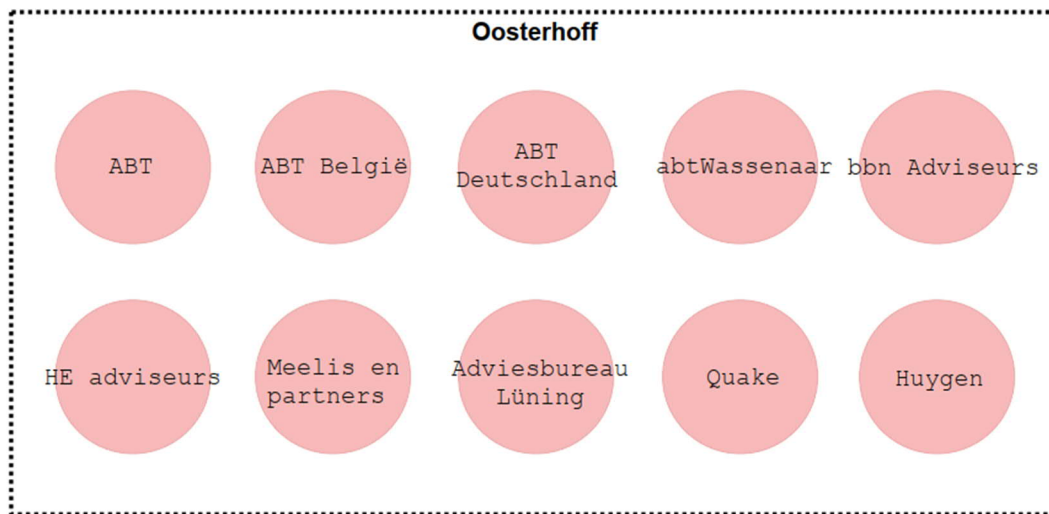
Het onderhavige onderzoek wordt uitgevoerd voor ingenieursbureau abtWassenaar.

abtWassenaar is een multidisciplinair, bouwtechnisch ingenieursbureau, welke op integrale wijze adviseert binnen verschillende bouwprojecten in Nederland. Doordat zij expertise heeft van verschillende disciplines, weet zij op efficiënte wijze met integrale oplossingen te komen voor problemen in een bouwproject. Hierdoor, fungeert zij als één aanspreekpunt voor een opdrachtgever, wat haar een unieke marktpositie geeft (M. Dittrich, H. Gietema, Y. Schuur, persoonlijke communicatie, 21 september 2021).

De missie van abtWassenaar luidt: "Ingenieursbureau abtWassenaar wil een creatieve en innovatieve bijdrage leveren aan de kwaliteit en duurzaamheid van de gebouwde omgeving met respect voor de menselijke en natuurlijke normen en waarden." (abtWassenaar, 2021).

abtWassenaar maakt deel uit van Oosterhoff. Oosterhoff bestaat uit verschillende werkmaatschappijen welke gezamenlijk het doel hebben om een kwalitatieve bijdrage te leveren aan de gebouwde omgeving op eigen vakgebied (abtWassenaar, 2021). De organisaties die deel uitmaken van Oosterhoff zijn geschematiseerd in het diagram, zoals weergegeven in Figuur 1.

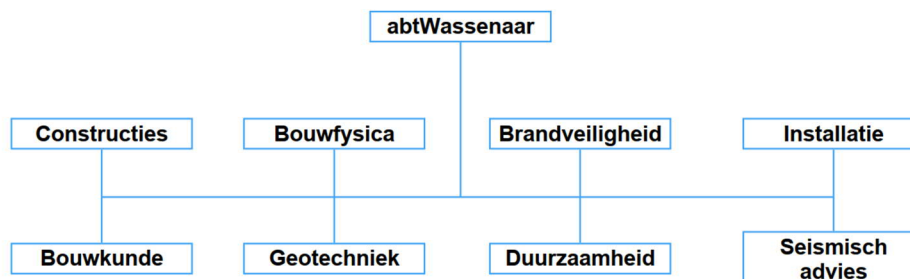
Bedrijven binnen Oosterhoff



abtWassenaar opereert binnen verschillende vakgebieden, die zowel integraal als afzonderlijk van elkaar werken aan bouwprojecten. De verschillende disciplines zijn geschematiseerd in het organogram, welke zichtbaar is in Figuur 2.

Figuur 2

Disciplines abtWassenaar



Het organisatieonderdeel 'brandveiligheid' is het specifieke organisatieonderdeel waarvoor het afstudeeronderzoek wordt uitgevoerd. Daarnaast wordt kennisgenomen van onderdelen uit de afdelingen 'bouwfysica' en 'installaties'.

1.2 RELEVANTIE

Dit onderzoek is relevant, omdat op basis van de uitkomsten in hoofdlijnen een brandtechnische ingreep wordt onderzocht, welke de vluchtveiligheid in luchtdichte woningen kan verbeteren. Door het aantonen van de meest praktisch relevante brandtechnische ingreep, is het mogelijk voor ingenieursbureau abtWassenaar om adviezen op maat aan te bieden, welke verder gaan dan de wet- en regelgeving. Dit sluit aan bij missie van het bedrijf om op innovatieve wijze een bijdrage te leveren aan de kwaliteit en duurzaamheid van de gebouwde omgeving. Daarnaast heeft abtWassenaar belang bij de uitkomsten van het onderzoek vanwege de multidisciplinaire aard (binnen de disciplines bouwfysica, brandveiligheid en installaties).

1.3 PROBLEEMSTELLING EN DOEL

Doordat woningen luchtdicht worden gebouwd, ontstaat in deze woningen onder brandomstandigheden, een drukpiek (Van Den Brink, 2015). Door deze drukpiek is de woningvoordeur niet meer te openen en kunnen bewoners niet uit de woning vluchten. Doordat de bewoners niet kunnen vluchten, is de kans groter op een dodelijke afloop door de inademing van giftige rookgassen. De probleemstelling luidt:

Bewoners van luchtdichte woningen kunnen bij een woningbrand niet ontvluchten, waardoor de kans op overlijden wordt vergroot.

Het doel van dit onderzoek is om kennis te vergaren omtrent oplossingen om de vluchtveiligheid in luchtdichte woningen te verhogen, rekening houdend met de praktische inpasbaarheid van de varianten. Door de toepassing van een dergelijke aanpassing zal het mogelijk zijn om, tijdens een woningbrand in een luchtdichte woning, de voordeur van de woning te openen en wordt het mogelijk voor de bewoners om te ontvluchten. Hierdoor zal het aantal slachtoffers van dit type woningbrand worden vermindert.

1.4 ONDERZOEKSVRAGEN

De hoofdvraag luidt:

Welke brandtechnische ingreep is in de praktijk, conform een multicriteria-analyse, geschikt om de vluchtveiligheid van bewoners in luchtdichte appartementen te waarborgen, op basis van de voorgestelde varianten?

De deelvragen met bijbehorende onderzoeksvragen luiden:

1. Op welk moment van de brand- en rookontwikkeling is het nog relevant om de vluchtveiligheid te verhogen?
 - Hoe wordt bepaald op welk moment het nog veilig is om te vluchten?
 - Onder welke condities kan nog veilig worden gevlucht?
 - Wat is de maximale druk die op een deur kan staan, zodat een persoon deze nog kan openen?
2. Kan er veilig worden gevlucht uit een luchtdicht appartement, op basis van een simulatie in CFast?
 - Hoe wordt een luchtdicht appartement gemodelleerd in CFast?
 - Welk brandscenario dient aangehouden te worden?
 - Hoe groot is de drukpiek bij een dergelijke brand?
 - Welke grenswaarde voor veilige ontvluchting is maatgevend voor de ontvluchting in een luchtdicht appartement?
 - Is een brandscenario in een luchtdicht appartement letaal voor een bewoner?
3. Wat is het effect van de varianten op het brandscenario en de vluchtveiligheid?
 - Wat is het effect op de temperatuurontwikkeling?
 - Wat is het effect op de warmtestraling?
 - Wat is het effect op de rookontwikkeling?
 - Wat is het effect op de drukpiek?
 - Wat is het effect op de HRR?
 - Is het brandscenario letaal voor een bewoner?
 - Is het mogelijk om veilig te vluchten?
4. Hoe kan, middels een multicriteria-analyse, bepaald worden welke variant in de praktijk toegepast dient te worden?
 - Welke criteria zijn van belang voor de variantkeuze?
 - Wat zijn de wegingsfactoren per criterium?
 - Welke variant is voor de casestudy het meest geschikt om de vluchtveiligheid te waarborgen?

1.5 LEESWIJZER

In hoofdstuk 2 wordt de methodologie van dit onderzoek omschreven. In hoofdstuk 3 wordt de bepalingmethode voor de vluchtveiligheid, alsmede de bijbehorende parameters, waaraan de vluchtveiligheid wordt getoetst,

weergegeven. In hoofdstuk 4 wordt de modellering van de casestudy, zonder brandtechnische ingrepen, behandeld. Hieruit volgt of het mogelijk is om veilig te vluchten uit een luchtdicht appartement. In hoofdstuk 5 wordt het effect van de brandtechnische ingrepen (de verschillende varianten) op de vluchtveiligheid behandeld. De resultaten worden vergeleken met de resultaten uit hoofdstuk 4. In hoofdstuk 6 wordt de opzet van de multicriteria-analyse behandeld. Hieruit volgt welke brandtechnische ingreep toegepast dient te worden in de casestudy. In hoofdstuk 7 is de conclusie van dit onderzoek weergegeven. Tot slot is de discussie weergegeven in hoofdstuk 8.

2. METHODOLOGIE

In dit hoofdstuk wordt de methodologie behandeld, welke voor het onderzoek is gebruikt. Het type onderzoek, de data verzameling en de data-kenmerken worden in dit hoofdstuk weergegeven.

2.1 TYPE ONDERZOEK EN DATAVERZAMELING PER DEELVRAAG

Het type onderzoek omvat een mixed methods onderzoek, waarin zowel kwantitatief en kwalitatief onderzoek werd uitgevoerd. In Tabel 1 zijn de onderzoeksmethoden per deelvraag weergegeven.

Tabel 1

Onderzoeksmethoden en resultaten per deelvraag

Deelvraag	Onderzoeksmethoden	Resultaten
Op welk moment van de brand- en rookontwikkeling is het nog relevant om de vluchtveiligheid te verhogen?	Literatuuronderzoek naar de parameters waaronder het tijdens een brand nog veilig is om te vluchten	Tijdstap in minuten waarin een brandtechnische ingreep werkzaam dient te zijn om de vluchtveiligheid te waarborgen Spreadsheet voor de toetsing van de vluchtparameters De uitkomsten van deze deelvraag gelden als randvoorwaarden voor de werking van de varianten die worden getoetst in deelvraag 3
Kan er veilig worden gevlucht uit een luchtdicht appartement, op basis van een simulatie in CFAST?	Luchtdichtheidsmetingen met bedrijf Meta-fys om Qv;10-waarde vast te stellen in luchtdichte woningen Modelleren en simuleren van de brand in CFAST, middels een casestudy Literatuuronderzoek naar reeds bekende berekeningen m.b.t. de modellering Vergelijking wanneer tijdens de brandontwikkeling de parameters van deelvraag 1 overschreden worden Semigestructureerd interview met Roy Vos van ABT en Ruud van Herpen (lector brandveiligheid TU Eindhoven) omtrent de juiste uitvoering van de simulaties	Fysisch brandmodel met bijbehorende parameters en uitkomsten De uitkomsten van deze deelvraag worden getoetst aan de parameters van deelvraag 1
Wat is het effect van de varianten op het brandscenario?	Beschrijving van de drie varianten Modelleren en simuleren van drie varianten in CFAST, middels een casestudy Semigestructureerd interview met Roy Vos van ABT omtrent de juiste uitvoering van de simulaties	Fysisch brandmodel met bijbehorende parameters en uitkomsten per variant De uitkomst van deze deelvraag kan getoetst en verwerkt worden in de multicriteria-analyse (deelvraag 4)
Hoe kan, middels een multicriteria-analyse, bepaald worden welke variant in de praktijk toegepast dient te worden?	Deskresearch middels Life Cycle Vision (ramingsprogramma installaties), kengetallen, O-prognose, offertes en communicatie met collega's van Oosterhoff om kostenverhoging per variant vast te stellen, met betrekking tot de te toetsen criteria. Multicriteria-analyse	Multicriteria-analyse van de in de praktijk beste brandtechnische ingreep

Voor het uitvoeren van de brandsimulaties wordt gebruikt gemaakt van het programma 'CFast' (The Consolidated model of Fire And Smoke Transport). CFast is een twee-zone model dat gebruikt kan worden om een voorspelling te doen van de omgeving in gebouwen onder brandomstandigheden. CFast calculeert de ontwikkeling in de tijd van de temperatuur, de verspreiding van rookgassen en gasvormige verbranding (Peacock et al., 2021). In dit onderzoek is gebruik gemaakt van CFast versie 7.2.1. De modellering van de casestudy in CFast wordt in hoofdstuk 4 behandeld. De modellering van de varianten wordt in hoofdstuk 5 behandeld.

Voor het verwerken van de resultaten uit CFast, en deze te toetsen aan de randvoorwaarden die zijn gesteld in hoofdstuk 3, is een spreadsheet opgesteld. Het spreadsheet toetst automatisch de vluchtveiligheid op basis van de output die geleverd wordt door CFast.

Om het effect van de bypass van een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem op de luchtdichtheid van een appartement te bepalen, zijn luchtdichtheidsmetingen uitgevoerd. De meting is uitgevoerd in een appartement dat is opgeleverd in maart 2021, ter plaatse van The House Of Groningen (Pleiadenlaan 1 te Groningen). Het appartement beschikte niet over een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem met bypass, waardoor een andere meetmethodiek benodigd was. Om het effect van een bypass te bepalen, is een meetelement gemaakt. Dit element bestaat uit een houten plaat waar een luchtkanaal doorheen gaat. Deze houten plaat wordt in een geopende gevelopening geplaatst en wordt afgeplakt met tape om deze luchtdicht te maken. Zodoende wordt de luchtstroom door een ventilatiekanaal nagebootst.

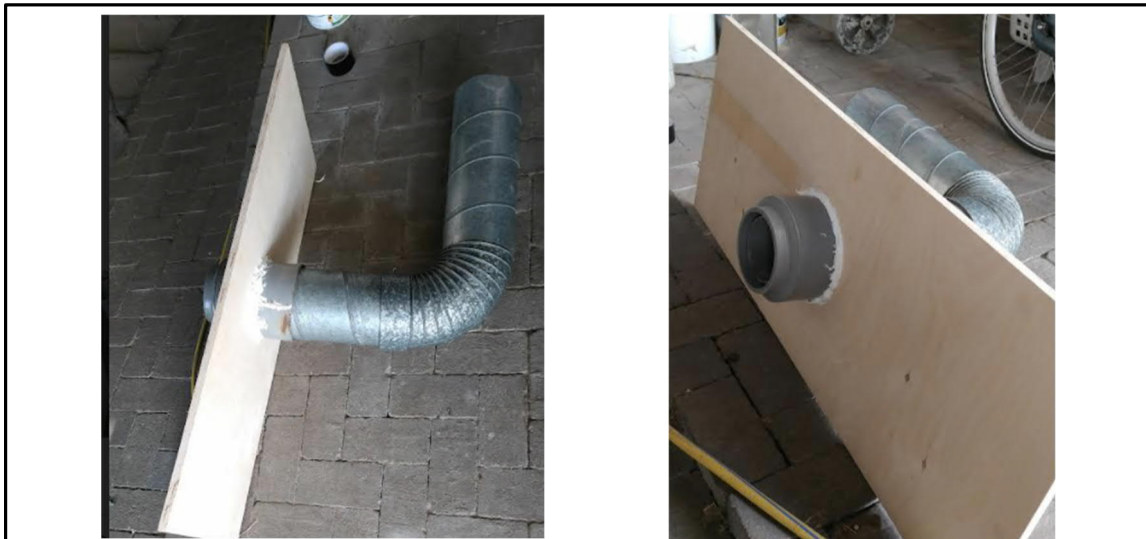
Het creëren van het meetelement is als volgt gedaan:

1. De houten plaat op maat zagen met een cirkelzaag.
2. De diameter van het ventilatiekanaal aftekenen op de plaat.
3. Een gat boren in de afgetekende zone.
4. Het gat uitzagen met een decoupeerzaag.
5. Het ventilatiekanaal aanbrengen in het gat.
6. De ruimte tussen het ventilatiekanaal en het gat afkitten.

Het prefab element is weergegeven in Figuur 3.

Figuur 3

Element voor luchtdichtheidsmeting



Tijdens de luchtdichtheidsmeting wordt het appartement op onderdruk gezet. Zodoende is het mogelijk om de $q_{v,10}$ -waarde te bepalen. Vervolgens wordt dezelfde meting uitgevoerd, maar met het meetelement in een geopende gevelopening en het ventilatiekanaal geopend. Door deze meting kan het verschil in de lucht volumestroom worden bepaald en vervolgens het aandeel van de bypass worden berekend (conform de methodiek zoals beschreven in hoofdstuk 4 en 5). Voor de uitvoering van de meting, zijn de volgende stappen uitgevoerd:

1. Plaatsing van de blowerdoor in de woningvoordeur. Zie Figuur 4.

Figuur 4

Geplaatste blowerdoor



2. Afplakken van de ventilatiekanalen. Zie Figuur 5.

Figuur 5

Afplakken van ventilatiekanaal



3. Meetelement plaatsen. Zie Figuur 6.

Plaatsing meetelement



4. Eerste luchtdichtheidsmeting uitvoeren, waarbij de luchtdichtheid wordt gemeten bij verschillende drukken.
5. Tape verwijderen van het meetelement.
6. Tweede luchtdichtheidsmeting uitvoeren, waarbij de luchtdichtheid wordt gemeten bij een constante luchtvolumestroom.

De meetresultaten zijn weergegeven in bijlage F.

Voor de verificatie van de rekenmethodiek van de vluchtveiligheid en het uitvoeren van de simulaties zijn drie semigestructureerde interviews uitgevoerd met dhr. Roy Vos (brandveiligheidsadviseur ABT) en dhr. Ruud van Herpen (lector brandveiligheid TU Eindhoven). In het eerste interview zijn de rekenmethodieken rondom het veilig vluchten en de simulatie geverifieerd en zijn er vragen gesteld rondom het uitvoeren van verschillende berekeningen. In het tweede interview is de berekening voor het bepalen van de lekverliezen en de gebruikte brandcurve geverifieerd. In het derde interview zijn de simulaties en uitkomsten geverifieerd. Een samenvatting van de interviews is weergegeven in bijlage N.

3. VLUCHTVEILIGHEID

Voordat de simulatie in CFast wordt uitgevoerd is het benodigd om de criteria inzichtelijk te maken waaraan een veilige ontvluchting wordt getoetst en op welk moment in de brandontwikkelingsfase het nog mogelijk is om te ontvluchten. Zodoende is het mogelijk om inzicht te krijgen in het moment dat het nog mogelijk is om de vluchtveiligheid te verhogen.

De volgende deelvraag wordt behandeld: "Op welk moment van de brand- en rookontwikkeling is het nog relevant om de vluchtveiligheid te verhogen?"

3.1 ASET-RSET

Om te bepalen op welk moment het nog relevant is om de vluchtveiligheid te verhogen, wordt een analyse gedaan middels de bepalingsmethode ASET-RSET, zoals beschreven in de NEN 6060. In deze methode wordt de beschikbare tijd voor het ontvluchten vergeleken met de benodigde tijd voor het ontvluchten. In deze analyse geldt de volgende randvoorwaarde:

$$\text{ASET} > \text{RSET} * \text{Veiligheidsfactor}$$

De Available Safe Egress Time (ASET) is de beschikbare tijd om te ontvluchten en wordt bepaald aan de hand van het vultijdenmodel of een alternatieve methode. Het vultijdenmodel wordt normaliter gebruikt om te bepalen hoe snel een grote ruimte zich vult met rook. Aangezien dit onderzoek zich richt op appartementen, zal het vultijdenmodel niet van toepassing zijn. Aangezien het vultijdenmodel niet van toepassing is (deze wordt veelal gebruikt voor hoge ruimten in de utiliteitsbouw), wordt een alternatieve methode gebruikt om ASET te bepalen. De ASET wordt bepaald middels de analysetechniek, zoals beschreven door The Swedish National Board of Housing, Building and Planning (2013). Middels deze analysetechniek wordt de vluchtveiligheid bepaald op basis van de optredende omstandigheden. Er wordt deels afgeweken van deze methode, zie 3.2. Daarnaast wordt de druk op de vluchtdoor als extra randvoorwaarde opgenomen.

De Required Safe Egress Time (RSET) is de benodigde tijd om te ontvluchten. Zoals beschreven in de NEN 6060, bestaat de RSET uit de detectietijd, de reactietijd en de vluchttijd (Normcommissie 351007 "Brandveiligheid van bouwwerken", 2015). De RSET kan bepaald worden middels de vuistregelmethode of een alternatieve methode. In de vuistregelmethode worden de detectie- en reactietijd als verwaarloosbaar geacht. Dit zal niet overeenkomen met een maatgevende situatie, waarin een bewoner mogelijk ligt te slapen of in een andere verblijfsruimte aanwezig is. In een dergelijke situatie zal de bewoner gealarmeerd worden door een rookmelder in de woning, vervolgens op verkenning uitgaan en tot slot vluchten naar de vluchtdoor. Zodoende wordt een alternatieve methode gebruikt om de RSET te bepalen op basis van de output van de simulatie in CFast, kengetallen en vuistregels.

3.2 BEPALING ASET

In het rapport van The Swedish National Board of Housing, Building and Planning (2013) staat beschreven onder welke brandomstandigheden het aanvaardbaar is om te vluchten. De bijbehorende criteria zijn weergegeven in Tabel 2.

Aanvaardbare omstandigheden om veilig te vluchten (The Swedish National Board of Housing, Building and Planning, 2013)

Parameter	Aanvaardbaar niveau
1. Rooklaag boven vloerniveau	Minimaal 1,6m + hoogte vanaf vloer tot plafond * 0,1 [m]
2. Zichtlengte, 2,0m boven vloerniveau	Minimaal 5,0m
3. Thermische straling	Maximaal 2,5 kW/m ²
4. Temperatuur	Maximaal 80°C
5. Giftigheid, 2,0m boven vloerniveau	CO concentratie <2000ppm CO ₂ concentratie <5% O ₂ concentratie >15%

Om veilig te ontvluchten dient voldaan te worden aan criteria 1 of 2 en criteria 3 tot en met 5 (The Swedish National Board of Housing, Building and Planning, 2013).

Hoewel criteria 1 en 2 een effect hebben op de vluchtveiligheid, maakt een hoge rooklaag of een lage zichtlengte het vluchten uit een appartement niet onmogelijk. Doordat de rooklaag tijdens de brandontwikkeling zal gaan zakken en de zichtlengte kleiner wordt, zal de loopsnelheid afnemen. De loopsnelheid heeft een effect op de RSET en derhalve zal deze lager zijn bij een mindere zichtlengte. Echter, er wordt verwacht dat veilig gevlucht kan worden in een situatie waarbij de rooklaaghoogte en de zichtlengte de grenswaarden hebben overschreden, maar de thermische straling, de temperatuur en de giftigheid van de rooklaag niet letaal zijn. Dit wordt aangenomen, aangezien in een dergelijke situatie gevlucht zal worden door rook, die niet giftig is en niet een zodanig hoge temperatuur heeft dat bewoners dit niet overleven. Zodoende zijn parameter 1 en parameter 2 niet bepalend voor de ASET, maar zullen deze waarden wel een effect hebben op de RSET.

Naast de hiervoor genoemde criteria is de druk op de deur van belang in de ontvluchting. Indien deze druk te hoog is, is het niet mogelijk om de deur te openen en te vluchten. De maximale drukpiek waaraan getoetst zal worden, wordt vergeleken met een situatie in een overdruktrappenhuis, zoals beschreven in de NEN-EN 12101-6. Conform de hiervoor genoemde norm, mag de maximale druk op een deur nooit meer dan 100 newton zijn (Normcommissie 353 088 "Rookbeheersingssystemen", 2005). Uitgaande van een deur die ongeveer 2 m² is, zal dit overeenkomen met een drukpiek van 50 pascal.

Hoe de waarden van de verschillende parameters worden bepaald, volgt in paragraaf 3.2.1 tot en met 3.2.5.

3.2.1 ZICHTLENGTE

Voor het bepalen van de zichtlengte, op twee meter hoogte boven vloerniveau, dient het type rook bekend te zijn. In paragraaf 4.1.4 wordt het brandscenario uitgewerkt. Als een woningbrand wordt gesimuleerd, wordt uitgegaan van een kunststofbrand, waarbij polyurethaanschuim als brandstof wordt gebruikt. Bij een kunststofbrand wordt verwacht dat zwarte rook ontstaat. Echter, bij polyurethaanschuim ontstaat over het algemeen gele rook (Salasinska et al., 2017). De zichtlengte in witte en grijze rook is over het algemeen lager dan in zwarte rook en zodoende wordt voor de bepaling van de zichtlengte, uitgegaan van witte/grijze rook.

De zichtlengte wordt bepaald middels formule 1 (Stichting Kennisbank Bouwfysica, 2009b).

$$Z_L = \frac{1}{OD} \quad (1)$$

Waarbij:

Z_L: Zichtlengte [m]
OD: Optische rookdichtheid per meter [m⁻¹]

Om de optische rookdichtheid te bepalen kan formule 2 worden gebruikt (Tromp & Van Mierlo, 2013).

$$OD = k * C_s \quad (2)$$

Waarbij:

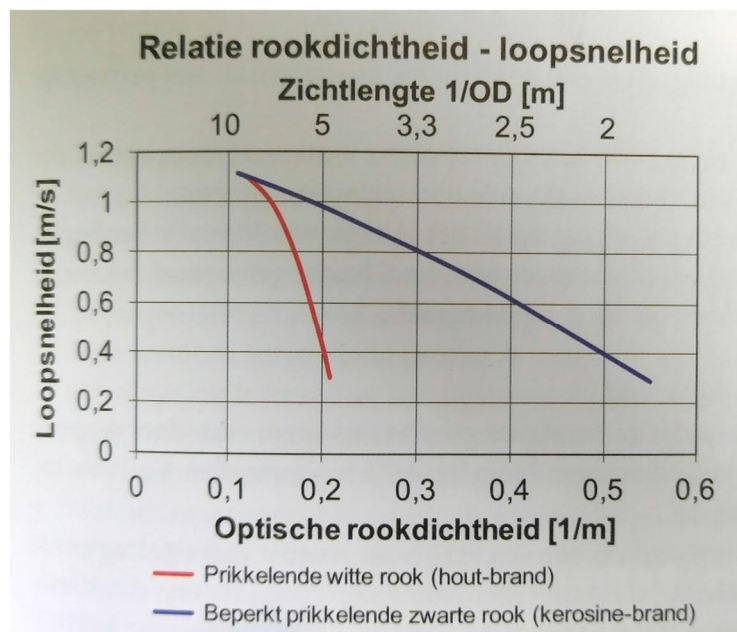
OD:	Optische rookdichtheid per meter	[m ⁻¹]
k:	Extinctiecoëfficiënt per eenheid rookdeeltjes	[m ⁻¹ /(kg/m ³), ofwel m ² /kg]
C _s :	rookdeeltjesconcentratie	[kg/m ³]

Voor de waarde van de extinctiecoëfficiënt kan 8700 m²/kg worden aangehouden (Hurley et al., 2015). Het aantal rookdeeltjes wordt in CFAST berekend in mg/m³ en kan zodoende worden ingevoerd in formule 2.

De zichtlengte heeft effect op de loopsnelheid door de rooklaag. In Figuur 7 is de relatie tussen de zichtlengte en de loopsnelheid weergegeven. Wanneer de rooklaaghoogte 2,0 meter boven vloerniveau ligt, zal de loopsnelheid worden bepaald op basis van de zichtlengte. Dit zal effect hebben op de RSET.

Figuur 7

Relatie tussen rookdichtheid en loopsnelheid volgens onderzoek van Jin (SBR, geciteerd in Tromp en Van Mierlo, 2013)



3.2.2 THERMISCHE STRALING

De maximale straling in een ruimte waardoor gevlucht wordt, mag niet meer bedragen dan 2,5 kW/m². Aangezien de temperatuur van de bovenste rooklaag berekend wordt in CFAST, kan met formule 3 de warmtestraling bepaald worden op de menselijke huid wanneer door rook wordt gevlucht (Hurley et al., 2015).

$$q = \varepsilon * \sigma_{zwart} * (T_i^4 - T_m^4) + h_c (T_i - T_m) / 1000 \quad (3)$$

Waarbij:

q:	Stralingsintensiteit	[kW/m ²]
ε:	Emissiviteit	[-]
σ:	Stefan Boltzmann constante van een zwarte straler	[kW/(m ² * K ⁴)]
T _i :	Temperatuur van de hittebron	[K]
T _m :	Oppervlaktetemperatuur van het aangestraalde materiaal	[K]
h _c :	Factor voor convectieve warmte uitwisseling	[-]

De emissiviteit van een rooklaag bedraagt 0,5 (Hurley et al., 2015). De T_m bedraagt de temperatuur van de menselijke huid. Voor deze waarde wordt 32,6°C aangehouden (Liu et al., 2014). De h_c is een waarde tussen de 5-8 (Hurley et al., 2015). De maatgevende waarde wordt hier aangehouden (factor 8).

3.2.3 TEMPERATUUR

De temperatuur van de rooklaag wordt berekend in CFast en kan zodoende getoetst worden aan de gestelde grenswaarde.

3.2.4 GIFTIGHEID

De hoeveelheid CO, CO₂ en O₂ in kg kan worden afgelezen uit de output van CFast.

Om het percentage CO₂ en O₂ in de rooklaag te bepalen is het volume van de rooklaag benodigd. Deze waarde is tevens af te lezen uit de output van CFast. Vervolgens kan het volume CO₂ of O₂ bepaald worden door het aantal kg van de stof te delen door de dichtheid van de stof. Om het percentage van de stof in de rooklaag te bepalen, wordt het volumeaantal gedeeld door het totale volume van de rooklaag.

Om het aantal PPM CO te bepalen wordt aantal kg stof gedeeld door het totale volume van de rooklaag en wordt dit vermenigvuldigd met 1000.

3.2.5 DRUK

De drukpiek in de ruimte wordt berekend in CFast. De maximale kracht die op een deur kan staan is 100 N. Aangezien een deur circa 2 m² is, kan worden gesteld dat de druk niet meer mag bedragen dan 50 pa. Deze waarde kan worden afgelezen uit de output van CFast.

3.3 BEPALING RSET

RSET is de gehele tijd die benodigd is om te ontvluchten en wordt bepaald door formule 4.

$$RSET = (t_d + t_r + t_v) * veiligheidsfactor \quad (4)$$

Waarbij:

t _d :	Detectietijd	[s]
t _r :	Reactietijd	[s]
t _v :	Vluchttijd	[s]

De detectietijd kan bepaald worden in CFast, door een optische rookmelder toe te voegen in de hal. Deze situatie komt overeen met zowel de tekeningen van de casestudy (bijlage A), als een situatie zoals beschreven in het Bouwbesluit artikel 6.21. De detectietijd wordt gerekend vanaf het moment dat de brand begint (t = 0), tot het moment dat de rookmelder afgaat.

Voor de reactietijd kunnen verschillende waarden aangehouden worden vanuit de literatuur. Veel brandveiligheidsingenieurs rekenen 15 tot 30 seconden voor de reactietijd, echter strijkt dit niet altijd met de realiteit (DiNenno et al., 2008). DiNenno et al. (2008) geven verschillende waarden aan voor reactietijden, gebaseerd op brandoefeningen en interviews. De waarden die worden aangehouden voor appartementen zijn echter alleen realistisch voor appartementen waarin de brand niet is ontstaan. Het is te verwachten dat de reactietijd in een dergelijk appartement altijd lager zal zijn dan in het appartement waar de brand ontstaat. DiNenno et al. (2008) geven de waarden voor reactietijden in de vorm van een vijf-getallensamenvatting. Hiervoor worden de waarden van de mediaan aangehouden om de reactietijd te bepalen. Voor een hoogbouw appartementengebouw of een middelhoog appartementengebouw met goede alarmering, kunnen waarden aangehouden worden van circa 1,3-1,4 minuut (DiNenno et al., 2008). Zodoende wordt voor de reactietijd 84 seconden aangehouden.

De vluchttijd kan worden bepaald op basis van de loopafstand naar de voordeur, waarbij een vaste loopsnelheid van 1,6 m/s kan worden aangehouden (Normcommissie 351007 "Brandveiligheid van bouwwerken", 2015). De loopsnelheid zal echter verlagen als de zichtlengte in de rooklaag lager wordt (zie hiervoor 3.2.1). Het moment dat een bewoner begint met vluchten, en de bijbehorende loopsnelheid (afhankelijk van de zichtlengte), zal worden bepaald nadat de detectie- en reactietijd zijn verstreken. Bij zichtlengtes lager

dan 5 meter wordt een loopsnelheid van 0,3 m/s aangehouden. De Excel formule is gebaseerd op Figuur 7 en is een benadering. De uitgangspunten zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3

Uitgangspunten Excel formule van loopsnelheid op basis van zichtlengte

Zichtlengte [m]	Loopsnelheid [m/s]
>9	1,6
>8, <9	1,1
>7, <8	1,05
>6, <7	0,8
>5, <6	0,4
<5	0,3

De veiligheidsfactor wordt conform de NEN 6060 bepaald door de RSET, de bouwwerkfase, de bepalingsmethode en de geschatte modelparameters (Normcommissie 351007 "Brandveiligheid van bouwwerken", 2015). In Tabel 4 is weergegeven welke veiligheidsfactor kan worden gehanteerd (enkel geldend voor nieuwbouw).

Tabel 4

Bepaling veiligheidsfactor voor niveau nieuwbouw (Normcommissie 351007 "Brandveiligheid van bouwwerken", 2015)

Bepalingsmethode	Modelparameters	RSET	
		RSET ≤ 180 s	RSET > 180 s
Alternatieve bepaling	Conservatief (80%)	1,2	1,5
	Nominaal (50%)	1,5	2,0

De modelparameters zijn afhankelijk van het conservatisme van de berekening. In de conservatieve bepaling worden de detectie- en reactietijd verwaarloosd en wordt enkel de vluchttijd gebruikt om de RSET te bepalen. Aangezien de RSET op niet conservatieve wijze is bepaald, wordt de nominale waarde gehanteerd. Zodoende geldt dat de veiligheidsfactor 1,5 beslaat, indien de RSET < 180 s of 2,0 beslaat als RSET > 180 s.

3.4 DEELCONCLUSIE

Het moment dat het nog relevant is om de vluchtveiligheid te verhogen is afhankelijk van de Available Safe Egress Time (ASET). Er wordt getoetst aan de randvoorwaarden van The Swedish National Board of Housing, Building and Planning, waarbij, om de aangegeven redenen, de rooklaaghoogte en de zichtlengte worden verwaarloosd. De ASET wordt bepaald door de warmtestraling op de huid, de temperatuur van de rooklaag, de giftigheid van de rooklaag en de drukpiek in de ruimte. Daarnaast mag de maximale druk op de deur nooit meer dan 100 N (50 pascal) zijn. De ASET mag nooit lager zijn dan de Required Safe Egress Time (RSET). De RSET wordt bepaald door de detectietijd door de rookmelder, de reactietijd en de loopsnelheid, welke afhankelijk is van de zichtlengte in de rooklaag.

Het moment dat het nog relevant is om de vluchtveiligheid te verhogen, is afhankelijk van de ASET en de RSET. De vluchtveiligheid dient zodanig verhoogd te worden, zodat RSET nooit ASET zal overschrijden.

4. BRANDONTWIKKELING

Om inzicht te verkrijgen in de manier waarop een brand zich ontwikkelt in een luchtdicht appartement, worden simulaties uitgevoerd in CFast (The Consolidated model of Fire And Smoke Transport). CFast is een twee-zone model dat gebruikt kan worden om een voorspelling te doen van de omgeving in gebouwen onder brandomstandigheden. CFast calculeert de ontwikkeling in de tijd van de temperatuur, de verspreiding van rookgassen en gasvormige verbranding (Peacock et al., 2021).

De casestudy kan vervolgens getoetst worden aan de randvoorwaarden, zoals gesteld in hoofdstuk 3. Op deze wijze kan bepaald worden welke randcondities het vluchten belemmeren.

De volgende deelvraag wordt in dit hoofdstuk behandeld: "Kan er veilig worden gevluht uit een luchtdicht appartement, op basis van een simulatie in CFast?"

4.1 MODELLERING CASESTUDY

De brandontwikkeling van een luchtdicht appartement is middels een casestudy onderzocht. abtWassenaar heeft een project aangeboden om als casestudy te gebruiken, namelijk het nieuw te bouwen woongebouw 'Hoog Dalem' te Gorinchem. Middels deze casestudy is het mogelijk om in CFast het effect van de luchtdichtheid te simuleren. Zodoende kan inzicht worden verkregen in de volgende parameters:

- Drukpiek;
- Brandontwikkeling;
- Concentratie (giftige) stoffen in de rooklaag;
- Temperatuur van de rooklaag;
- Detectietijd van de rookmelder.

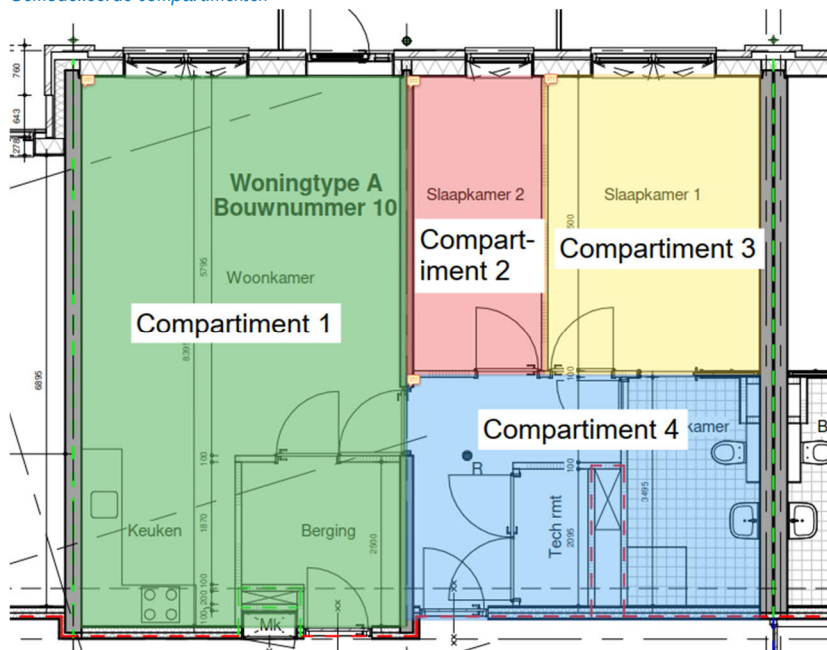
In paragraaf 4.1.1 tot en met 4.1.6 wordt behandeld hoe een luchtdicht appartement gemodelleerd dient te worden in CFast.

4.1.1 COMPARTIMENTERING

In CFast worden gebouwen ingedeeld in compartimenten, welke verschillen van de brandcompartimenten zoals beschreven in de Nederlandse bouwregelgeving (Bouwbesluit). De definitie van een compartiment komt in CFast ongeveer overeen met een ruimte. Aangezien CFast enkel vierkante ruimten kan modelleren, is een versimpeld model opgesteld, bestaande uit vier compartimenten. In Figuur 8 is weergegeven hoe het appartement in compartimenten is ingedeeld.

Figuur 8

Gemodelleerde compartimenten



In de simulatie is het uitgangspunt dat rook en hitte zich vrij kan verspreiden door het appartement, middels openstaande deuren. De deuren zijn gemodelleerd met een breedte van 0,93 m en een hoogte van 2,315 m.

4.1.2 MATERIALEN

De wanden, vloeren en het plafond van het compartiment dienen in CFast gespecificeerd te worden. CFast kan voor deze constructies enkel één constructieopbouw toewijzen, waardoor iedere wand met dezelfde constructieopbouw wordt gemodelleerd. Conform dhr. Harrie Munnik (persoonlijke communicatie, 4 maart 2022) kan de constructieopbouw bij een brand effect hebben op de temperatuurontwikkeling. Zoals Van Den Brink (2015) heeft aangetoond, wordt verwacht dat de drukpiek in het ontwikkelingsstadium van een brand zal voorkomen, waardoor een relatief korte simulatietijd afdoende is. Zodoende zal het niet benodigd zijn om de gehele constructieopbouw van de wanden, vloeren en plafonds te modelleren. Enkel de buitenste laag van deze constructies wordt gemodelleerd. Als uitgangspunt wordt aangehouden dat enkel de buitenste bouwkundige constructie wordt gemodelleerd, aangezien de inrichting van het appartement (zoals bijvoorbeeld vloerbedekking) niet permanent zijn en in de levensloop van het appartement kunnen veranderen. De constructieopbouw is af te leiden uit het detail, zoals weergegeven in bijlage A. In Tabel 5 zijn de invoergegevens van de materialen weergegeven.

Tabel 5

Invoergegevens materialen CFast

Constructie	Materiaal	Warmtegeleidings- coëfficiënt [kW/m²K]	Soortelijke warmte [kJ/kgK]	Dichtheid [kg/m³]	Dikte [m]	Emissiviteit [-]
Vloer	Beton ¹	1,831 (Programmaraad "Stelsel energieprestatie gebouwen", 2022)	0,84 (Stichting Kenniskbank Bouwfysica, 2009a)	2300	0,1000	0,9
Plafond	Beton ²	1,831 (Programmaraad "Stelsel energieprestatie gebouwen", 2022)	0,84 (Stichting Kenniskbank Bouwfysica, 2009a)	2300	0,2600	0,9
Wand	Gipsvezel- plaat ²	0,35 (Stichting Kenniskbank Bouwfysica, 2009a)	0,84 (Stichting Kenniskbank Bouwfysica, 2009a)	1100	0,0125	0,9

De uitgangspunten van de materialen zijn zodanig gekozen dat deze overeenkomen met in de praktijk voorkomende materialen.

4.1.3 LUCHTDICHTHEID

Conform Michel Dittrich (Persoonlijke communicatie, 24 januari 2022) kunnen nieuwe woningen worden opgeleverd met een $q_{v,10}$ waarde van circa 0,25 dm³/s per m² gebruiksoppervlakte. In CFast bestaat de mogelijkheid om de luchtdichtheid van een compartiment op te nemen in de simulatie, door middel van het creëren van gevelopeningen in de compartimenten. Middels berekeningen is het mogelijk om het aantal m² aan openingen te bepalen.

Conform Van Herpen (2005b) kan de capaciteit van een opening bepaald worden middels formule 5.

$$C = A * \mu * \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (5)$$

¹ Uitgaande van niet verdicht, gewapend grindbeton met een dichtheid van 2300 kg/m³.

² Uitgaande van de gemiddelde waarden zoals aangegeven in het Tabellarium Warmte.

Waarbij:

C:	Capaciteit van een opening bij 1 pa drukverschil	[dm ³ / (s * pa ⁿ)]
A:	Bruto doorlaat van de opening	[dm ²]
μ:	Contractiecoëfficiënt	[-]
ρ:	Dichtheid van lucht	[kg/m ³]

De dichtheid van lucht bij kamertemperatuur bedraagt 1,205 kg/m³. Voor de contractiecoëfficiënt kan 0,64 aangehouden worden (Van Herpen, 2022a).

De capaciteit van een openingen kan bepaald worden op basis van de q_{v,10}-waarde. De q_{v,10}-waarde geeft de luchtvolumestroom weer bij een drukverschil van 10 pa. Formule 6 kan gebruikt worden om de luchtvolumestroom te bepalen bij andere drukverschillen. Aangezien de q_{v,10}-waarde bekend is, kan formule 6 gebruikt en herschreven worden om de capaciteit van een opening te bepalen bij een drukverschil van 1 pa.

$$q_{v,p} = \Sigma(C) * \Delta p^n \quad (6)$$

Waarbij:

q _{v,p} :	luchtvolumestroom bij een bepaald drukverschil over de gevel	[dm ³ /s]
C:	Capaciteit van een opening bij 1 pa drukverschil	[dm ³ / (s * pa ⁿ)]
Δp:	drukverschil	[Pa]
n:	Stromingsexponent	[-]

De stromingsexponent heeft over het algemeen een waarde 0,5 ≤ n ≤ 1,0, waarbij 0,5 wordt gebruikt indien de luchtstroom turbulent is en 1,0 indien de stroming zuiver laminair is (Kuindersma & Nieman, 2013). Conform Van Herpen (2022b) kan een stromingsexponent van 0,80 aangehouden worden voor luchtdichte scheidsconstructies.

Aangezien bekend is dat p = 10 Pa, q_{v,10} = 0,25 dm³/s * m² en m² = 86,7725 kan C berekend worden. Derhalve geldt voor deze case:

$$C = 3,4381 \text{ dm}^3 / (\text{s} * \text{pa}^n)$$

De C-waarde komt overeen met de luchtvolumestroom bij een drukverschil van 1 Pa (de q_{v,1} waarde). Door de C-waarde in te vullen in formule 5, kan de equivalente oppervlakte aan luchtlekken worden bepaald. Formule 5 wordt herschreven om de equivalente oppervlakte te bepalen bij een drukverschil. Dit leidt tot formule 7 (Van Herpen, 2022b).

$$A_e = \frac{C}{0,833} * \Delta p^{n-0,5} \quad (7)$$

Waarbij:

A _e :	Netto doorlaat van de opening	[dm ²]
C:	Capaciteit van een opening bij 1 pa drukverschil	[dm ³ / (s * pa ⁿ)]
Δp:	drukverschil	[Pa]
n:	Stromingsexponent	[-]

De equivalente opening is dus mede afhankelijk van het drukverschil. Zodoende zijn er verschillende manieren om de equivalente oppervlakte in te voeren in CFast, namelijk als één constant oppervlak of een modellering in bepaalde drukstappen. In deze casestudy wordt ervoor gekozen om één constant oppervlak aan te houden. Dit scenario zal maatgevend zijn, aangezien hier de hoogste drukpieken worden verwacht.

In CFast wordt de totale luchtvolumestroom berekend door een opening te modelleren per compartiment. Het equivalente oppervlak van luchtlekken kan naar rato worden verdeeld over de compartimenten. De hoogte van de openingen omvat de compartimentshoogte (2,64 m). Zodoende kan de breedte van de openingen worden bepaald. Aangezien compartiment 4 grenst aan de corridor (binnenlucht) wordt deze oppervlakte niet meegerekend. De afmetingen van de openingen per compartiment zijn weergegeven in Tabel 6.

Compartiment	Oppervlakte openingen [m ²]	Breedte opening [m]
Compartiment 1	0,001768	0,019543
Compartiment 2	0,000404	0,00447
Compartiment 3	0,00065	0,007181

Naast de uitwendige gevelconstructie, ontstaan ook lekverliezen door de inwendige scheidingsconstructies. Het betreft hier de woningscheidende wanden, vloeren, plafonds en deurconstructies.

Aan de luchtdichtheid van de inwendige scheidingsconstructies wordt in principe geen eis gesteld vanuit de Nederlandse wet- en regelgeving en hier wordt nauwelijks aan gemeten (Van Herpen, 2022b). Echter worden tijdens luchtdichtheidsmetingen in appartementen enkel deurconstructies naar aangrenzende verkeersruimten voorzien van extra luchtdichting (zoals bijvoorbeeld tape). Zodoende is het niet benodigd om de lekheid van de inwendige scheidingsconstructies in te voeren in CFast, aangezien de lekverliezen al zijn verdisconteerd in de oppervlakten van de openingen.

Enkel de openingen onder de deuren dienen nog gemodelleerd te worden, aangezien deze worden afgeplakt tijdens een meting. In de casestudy grenzen de deuren aan de corridor. Op basis van de Nederlandse wet- en regelgeving (Bouwbesluit, afdeling 2.12) dient de corridor een extra beschermde vluchtroute te zijn. Deuren van een woonfunctie die grenzen aan een extra beschermde vluchtroute dienen uitgevoerd te worden als ten minste 30 minuten brandwerend en rookwerend conform het S200 criterium. Aangezien de deuren brandwerend worden uitgevoerd, zullen deze niet bezwijken binnen de simulatietijd. Zodoende zullen enkel de kieren en naden van deze deur worden gemodelleerd.

Voor een S200 deur geldt dat het lekverlies niet meer dan 20 m³/h mag zijn, bij verschillende drukken (waaronder 10 pa). Zodoende geldt:

$$q_{v,10;deur} = 5,56 \text{ dm}^3/\text{s}$$

Door de $q_{v,10;deur}$ in formule 6 te plaatsen, wordt de capaciteit van de opening bepaald. Voor een deur kan een stromingsexponent van $n = 0,7$ aangehouden worden (Van Herpen, 2022b). Vervolgens kan de capaciteit worden ingevoerd in formule 7 om het oppervlak te bepalen.

Zodoende geldt voor de deuren, grenzend aan de corridor:

$$A_e = 0,0211 \text{ m}^2$$

Voor de breedte van de deuren is 0,93 m aangehouden. Zodoende geldt dat de hoogte van de kieren 0,022688 m is.

In de casestudy zijn twee deuren aanwezig richting de corridor, namelijk in compartiment 1 en compartiment 4.

4.1.4 BRANDSCENARIO'S

Om de vluchtveiligheid in het gehele appartement te bepalen, dienen de verschillende brandscenario's beoordeeld te worden. Het model is opgedeeld in vier verschillende compartimenten. Compartiment 4 is het compartiment waardoor gevlucht wordt naar de aansluitende corridor. Zodoende zullen de vluchtcondities in compartiment 4 altijd getoetst moeten worden, onafhankelijk welk compartiment als brandruimte fungeert. Er wordt verwacht dat een brand in compartiment 1, 2 of 3 ontstaat. In compartiment 1 zou een mogelijke wasmachine of droger (aanwezig in de berging) of een bankstel kunnen ontsteken. In compartiment 2 of 3 zou een matras een ontstekingsbron kunnen zijn. Het maatgevende brandscenario is afhankelijk van de brandcurve van het te verwachten brandscenario en de bijbehorende brandcurve.

Normaliter wordt bij brandsimulaties gebruik gemaakt van de t²-brandcurve conform NEN-EN 1991-1-2. Het brandvermogen wordt bepaald door formule 8 (Normcommissie 351 001 "Technische grondslagen voor Bouwconstructies", 2019).

$$HRR = \alpha * t^2 \quad (8)$$

Waarbij:

HRR:	Brandvermogen	[kW]
α :	Brandontwikkelingssnelheid	[kW/s]
t:	Tijd	[s]

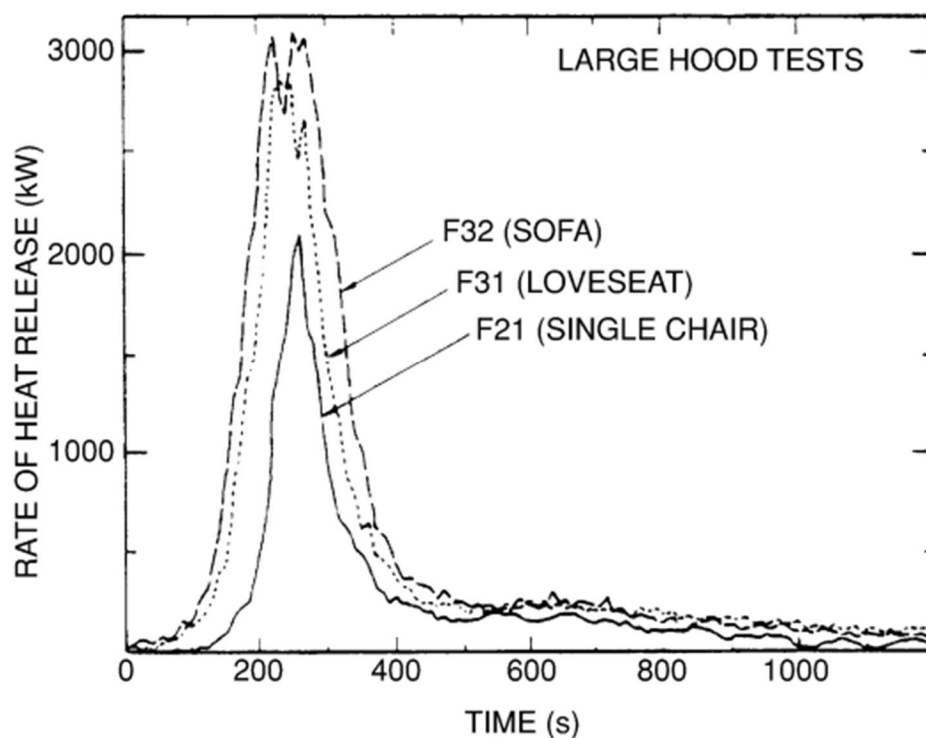
De maximale brandvermogensdichtheid per m² bedraagt 250 kW/m² voor woonfuncties, waarbij op t = 300 seconden het vermogen van de brand 1 MW bedraagt (Normcommissie 351 001 "Technische grondslagen voor Bouwconstructies", 2019). Dit brandscenario strookt echter niet met een realistische brand in een woonfunctie. Een maatgevend brandscenario in een woonfunctie omvat een scenario waarin een bankstel of een matras in brand raakt (Ebus et al., 2020). Op een aangewezen plek in het compartiment is dus een piekvuurlast aanwezig, geen gelijkmatig verdeelde vuurbelasting. Bij een bankstel- of matrasbrand neemt het brandvermogen sneller toe dan bij een t²-curve. Zodoende zal voor de verschillende brandscenario's een brandcurve worden gehanteerd die aansluit op een reëel woningbrandscenario.

Om het maatgevende brandscenario te bepalen worden de brandcurven van een matras- en een bankstelbrand geanalyseerd. Het scenario waarin een wasmachine of droger in brand raakt, wordt buiten beschouwing gelaten, aangezien wordt verwacht dat de aanwezige vuurlast (circa 5 kilo kleding en de vuurlast van de machine) lager is dan de vuurlast van een bankstel of een matras. Zodoende zal de piek van het brandvermogen lager zijn dan deze andere scenario's en zal het vluchten in mindere mate belemmerd worden.

De brandcurve van een bankstel wordt beschreven door Karlsson en Quintiere (2000). In Figuur 9 is het verloop van deze brandcurve weergegeven. Uit de figuur valt te concluderen dat de piek van het brandvermogen (3 MW) na 200 seconden wordt bereikt.

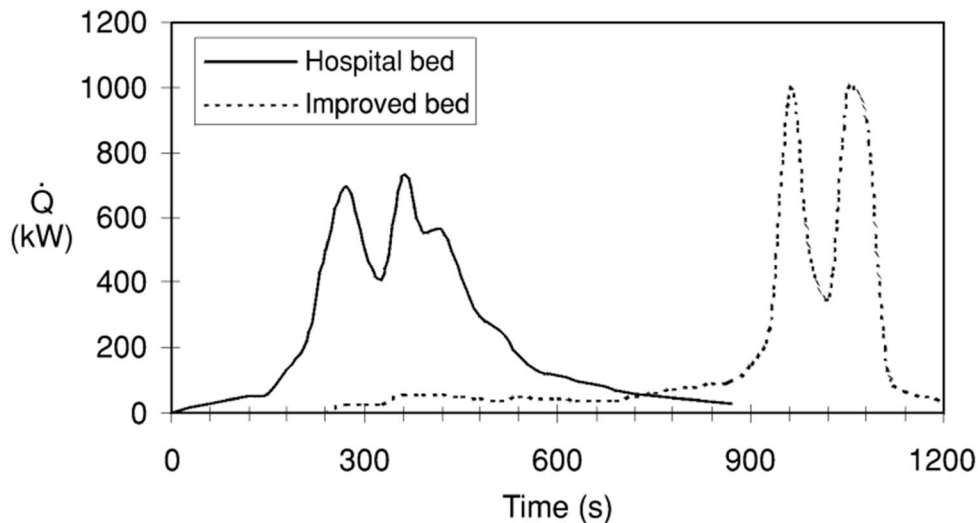
Figuur 9

Typical upholstered furniture energy releases (Babrauskas, geciteerd in Karlsson en Quintiere, 2000)



Daarnaast beschrijven Karlsson en Quintiere (2000) een scenario waarbij een matras in brand raakt. In Figuur 10 is het verloop van deze brandcurve weergegeven. Uit Figuur 10 valt te concluderen dat de piek van het brandvermogen (700 kW) bereikt wordt na 240 seconden.

Typical mattress energy release rate (Särdqvist, geciteerd in Karlsson en Quintiere, 2000)



Aangezien de brandcurve met de bankstelbrand de hoogste brandvermogenspiek heeft en het snelst de piek bereikt, wordt de bankstelbrand als maatgevend scenario gehanteerd. Als conservatieve waarde voor de oppervlakte van het bankstel, en dus de oppervlakte van de brand, wordt 2 m² gehanteerd (Karlsson & Quintiere, 2000).

Om gegevens te kunnen verzamelen over de toxiciteit en rookdichtheid van de brand, dient een brandstof op molecuulniveau ingevoerd te worden in CFast. De meeste matrassen en bankstellen worden tegenwoordig uitgevoerd met schuimvulling (Ebus et al., 2020). Conform dhr. Ruud van Herpen (persoonlijke communicatie, 15 april 2022) kan Purschuim worden aangehouden als brandstof. De molecuulformule van Purschuim is CH_{1,8}O_{0,3}N_{0,07} (Staffansson, 2010).

Voor de verbrandingswarmte van Purschuim wordt uitgegaan van 23,90 MJ/kg (DiNenno et al., 2008).

Om meer informatie uit de simulatie van CFast te verkrijgen, dient de soot yield van de brandstof bekend te zijn. De soot yield is de massafractie van de brandstof die in rookdeeltjes wordt omgezet. Conform Staffansson (2010) kan voor de soot yield 0,131 kg/kg aangehouden worden.

Naast de soot yield kan ook de CO yield in CFast ingevoerd worden. De CO yield is de massafractie van de brandstof die in CO wordt omgezet. Conform Staffansson (2010) bedraagt deze waarde 0,10.

4.1.5 DETECTIE

Conform het Bouwbesluit artikel 6.21 lid 1 dienen in appartementen optische rookmelders geplaatst te worden ter plaatse van ruimten waardoor gevlucht wordt, vanuit een verblijfsruimte. De rookmelder dient te voldoen aan, en dient geplaatst te worden, conform de primaire inrichtingseisen zoals beschreven in de NEN 2555. In de casestudy betekent het voorgaande dat een rookmelder aanwezig dient te zijn in de hal.

Om het werkingsprincipe van de rookmelder vast te stellen is de NEN 2555 geraadpleegd, waarin wordt verwezen naar de EN-14604. Echter, in beide normen zijn geen standaardwaarden weergegeven met betrekking tot de concentratie van de rooklaag die benodigd is om een rookmelder af te laten gaan. Zodoende wordt de standaardwaarde, zoals geleverd in CFast, aangehouden voor het werkingsprincipe van de rookmelder. Hierin wordt een activatiewaarde van circa 24 %/m obscuratie (concentratie van de rooklaag) aangehouden.

4.1.6 GEVELOPENINGEN

Het appartement in de casestudy beschikt over gevelopeningen, welke kunnen bezwijken tijdens een brand. Normaliter bezwijken deze tijdens een brand tijdens de flashover-fase, waarbij temperaturen rond de

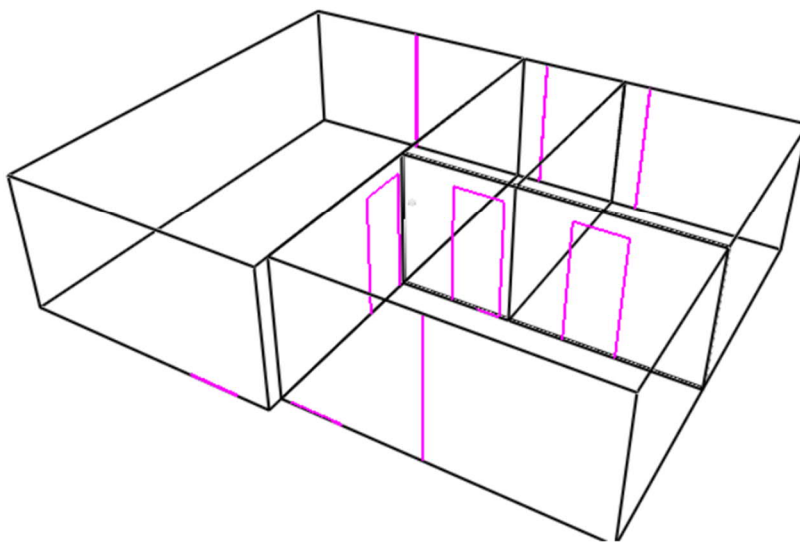
400-600 °C liggen. Wanneer de gevelopeningen bezwijken, zullen de luchtstromen richting de buitenlucht gaan toenemen en zal de drukpiek in het appartement worden verlaagd. Echter, in sommige scenario's kan glas brandwerend worden uitgevoerd en zullen de gevelopeningen gedurende 30 of 60 minuten niet bezwijken. In dit geval zal de drukpiek in het appartement niet worden verlaagd. Dit is het maatgevende scenario met betrekking tot de drukpiek en zodoende zal dit scenario worden aangehouden.

De druk die uitgeoefend kan worden op een gevelopening kan de gevelopeningen ook doen bezwijken (Jongeleen, 2015). Uitgaande van HR++ of HR+++ beglazing zullen de gevelopeningen bezwijken bij ongeveer 1600 N/m² (Glaswebwinkel, 2021). Dit komt overeen met 1600 pa. De drukken ten gevolge van brand in een luchtdicht appartement zullen echter niet zo groot zijn. Zodoende wordt in de simulatie aangenomen dat de gevelopeningen niet zullen bezwijken binnen de simulatietijd. De gevelopeningen worden zodoende niet gemodelleerd.

Nadat het model is opgezet, kan de simulatie worden uitgevoerd. In Figuur 11 is een 3D weergave van het model weergegeven, waarbij alle openingen worden gerepresenteerd door roze lijnen. De verticale lijnen ter plaatse van de gevel zijn de luchtlekken ten gevolge van de $q_{v,10}$ -waarde. De horizontale lijnen zijn de luchtlekken ter plaatse van de S200 deurconstructies.

Figuur 11

3D-model basissituatie



4.2 UITKOMSTEN BASISSITUATIE

Nadat het model is ingevoerd in CFast, is het mogelijk om een brandsimulatie uit te voeren en de uitkomsten van de simulatie te toetsen aan de randvoorwaarden, zoals gesteld in hoofdstuk 3. De invoer in CFast is weergegeven in bijlage B.

Er wordt getoetst aan het maatgevende brandscenario's, zoals beschreven in paragraaf 4.1.4. De ruimten waardoor gevluht wordt zullen worden beschouwd. Dit houdt in dat de slaapkamers (compartiment 2 en 3) en de hal (compartiment 4) worden getoetst.

Om de ASET aan de RSET te toetsen is een spreadsheet opgesteld die, middels de berekende waarden in CFast, de verschillende parameters toetst en bepaald of wordt voldaan aan de verschillende randvoorwaarden. In bijlage C is de toetsing van de casestudy middels het spreadsheet weergegeven.

In Tabel 7 is weergegeven op welk moment de verschillende parameters worden overschreden in de casestudy.

Moment van overschrijding van parameters casestudy

Parameter	Grenswaarde	Moment van overschrijding [s]
1. Thermische straling	2,5 kW/m ²	400
2. Temperatuur	80°C	146
3. Concentratie CO	2000ppm CO	400
4. Concentratie CO ₂	<5% CO ₂	277
5. Concentratie O ₂	>15% O ₂	145
6. Druk	50 Pa	122

In de casestudy geldt derhalve:

$$ASET = 122 \text{ s}$$

RSET is afhankelijk van het moment dat de rookmelder in het compartiment afgaat en van de loopafstand vanaf de compartimenten. De rookmelder gaat af op $t = 26 \text{ s}$. De maximale loopafstand vanaf compartiment 2 is 8,36 m en de maximale loopafstand vanaf compartiment 3 is 9,90 m. De grootste loopafstand is maatgevend. Derhalve geldt:

$$RSET = 213 \text{ s}$$

Dit betekent dat de stelling

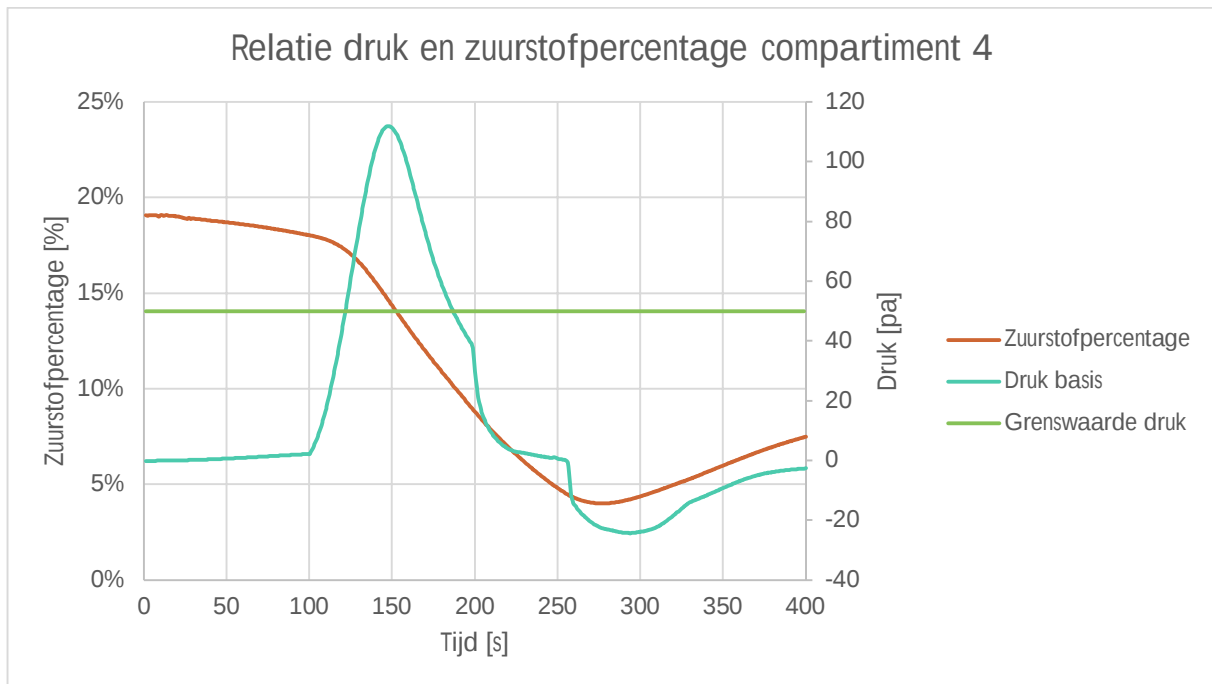
$$ASET > RSET \cdot \text{veiligheidsfactor}$$

incorrect is. Het is niet mogelijk om veilig te vluchten.

Het blijkt dat tijdens een brand in een luchtdicht appartement allereerst de rooklaag zich verspreid. In deze rooklaag is de zichtlengte al zodanig beperkt, dat oriëntatie vrijwel niet mogelijk is. Vervolgens zal de druk op de deur binnen twee minuten zodanig hoog zijn dat deze niet meer valt te openen. Daarna neemt het zuurstofpercentage af. Wanneer het zuurstofpercentage onder de 14-15% ligt, dan wordt ongecoördineerd gedrag mogelijk (Tromp & Van Mierlo, 2013). Wanneer het zuurstofpercentage onder de 5% ligt, dan is men na 10 seconden bewusteloos (Tromp & Van Mierlo, 2013). Tevens zorgt een lager zuurstofpercentage in het lichaam voor lagere spierprestaties. Uit Figuur 12 volgt dat de drukpiek in deze casestudy lager zal zijn dan 50 pa voordat men bewusteloos raakt. Echter zal het openen van de deur bemoeilijkt worden doordat het zuurstofpercentage lager ligt. Er wordt verwacht dat het onmogelijk is om de deur in deze situatie te openen. De maximale druk in het compartiment bedraagt 112 pascal.

Figuur 12

Relatie druk en zuurstofpercentage compartiment 4



De temperatuur van 80 °C is de maximum voor effectief vluchten, echter is de temperatuurgrens voor letaliteit hoger. De maximale temperatuur in compartiment 4 bedraagt 187 °C. Conform Stichting Kennisbank Bouwfysica (2009b) kan formule 9 gebruikt worden om de maximale blootstellingsduur van een persoon te bepalen, bij temperaturen tussen de 70-150 °C. Om een indicatie te geven van de letaliteit van de temperatuur zal deze formule worden ingevuld met een temperatuur van 150 °C.

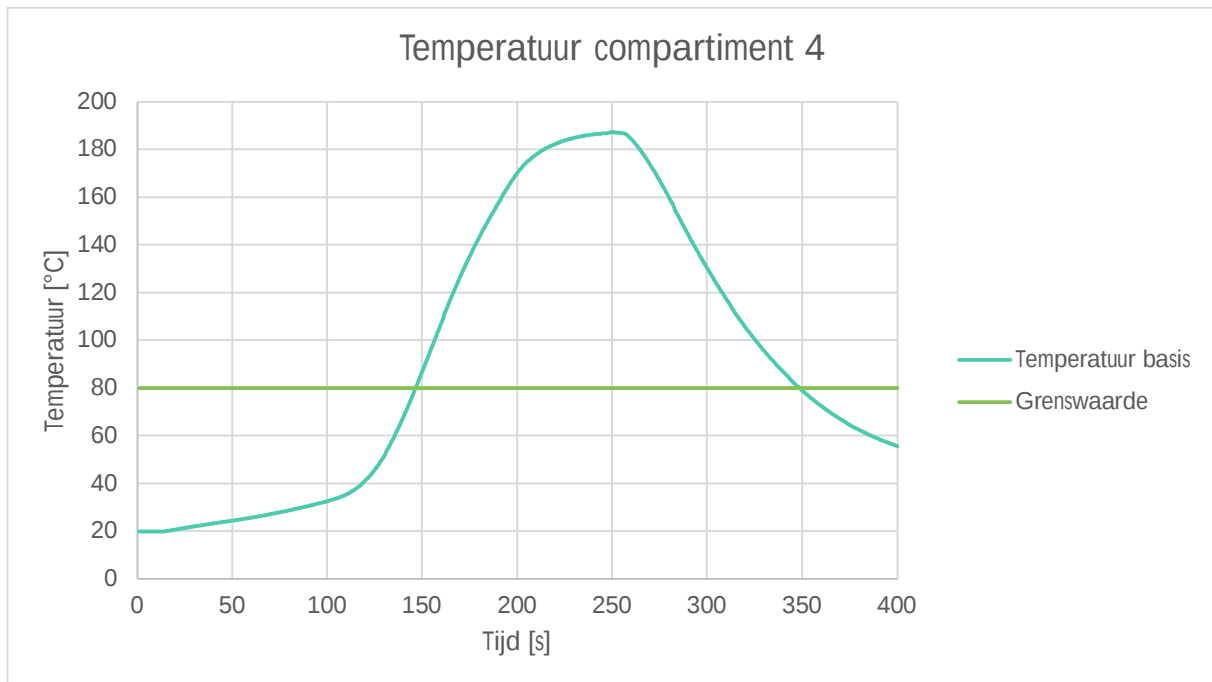
$$t = \frac{5,33 \cdot 10^8}{T^{3,66}} \quad (9)$$

Waarbij:

t: Tijd [s]
T: Temperatuur [°C]

Bij een temperatuur van 150 °C is de maximale blootstellingsduur circa 5,8 s. In Figuur 13 is het temperatuurverloop in compartiment 4 weergegeven. Uit Figuur 13 is de duur van de blootstelling aan temperaturen boven de 150 °C te concluderen. Deze tijd bedraagt meer dan 5,8 seconden. Zodoende kan geconcludeerd worden de temperatuur letaal is.

Temperatuurverloop compartiment 4



De giftigheid van de rooklaag is niet de maatgevende parameter in relatie tot het onveilig vluchten. De concentratie CO is maximaal 7,34 PPM. Dit is ver onder de grenswaarde van 2000 PPM en wordt zodoende niet als een gevaar geacht. Het percentage CO₂ bedraagt na 276 seconden 5% en loopt op naar een maximum van 5,37%. Hoewel het percentage CO₂ het vluchten belemmerd, is CO₂ in deze concentratie niet fataal. Uit onderzoek van Hurley et al. (2015), blijkt dat de CO₂ concentratie grotendeels zorgt voor een snellere opname van CO of andere giftige stoffen. Aangezien de concentratie CO niet letaal is, zal CO₂ geen significante bedrage leveren aan de letaliteit van de rooklaag.

De brandcurve in de basissituatie verschilt van de gemodelleerde brandcurve in CFast. Zoals vermeld in paragraaf 4.1.4, zal de piek HRR van 3 MW na 200 seconden worden bereikt en vervolgens voor 100 seconden worden aangehouden. Uit Figuur 14 valt het verschil in HRR te herleiden, tussen de gemodelleerde HRR en de gesimuleerde HRR. Op 199 seconden na het begin van de brand neemt de gesimuleerde HRR af. Dit komt waarschijnlijk doordat de brand zuurstofbeheerst wordt. Het zuurstofpercentage op dit tijdstip is namelijk relatief laag (<5%). Het moment dat het zuurstofpercentage toeneemt, neemt de HRR af, totdat deze 0 bedraagt. Hoogstwaarschijnlijk is de brand gesmeuld op het moment dat het zuurstofpercentage minimaal is. Vervolgens neemt het zuurstofpercentage in de ruimte toe, doordat de ruimte op onderdruk komt te staan.

Relatie zuurstofpercentage en HRR compartiment 1



4.3 DEELCONCLUSIE

Door een simulatie uit te voeren in CFast is het mogelijk om te bepalen of veilig uit een luchtdicht appartement kan worden gevlucht. Door een casestudy wordt dit in dit onderzoek bepaald. Om te simuleren in CFast dienen de ruimten gemodelleerd te worden, alsmede de materialen waaruit de scheidingsconstructies bestaan. Vervolgens kan middels formule 5, 6 en 7 de luchtdichtheid van een appartement omgerekend worden in een equivalent oppervlak aan openingen. Daarnaast dient de lekheid van deuren ingevoerd te worden in CFast. Gevelopeningen behoeven niet gemodelleerd te worden. Rookmelders kunnen gemodelleerd worden conform tekening of conform de projectering zoals aangegeven in Bouwbesluit artikel 6.21.

Een reëel brandscenario om aan te houden omvat een bankstelbrand, in tegenstelling tot een genormeerde brand conform NEN-EN 1991-1-2.

Na een simulatie in CFast en een toetsing op de vluchtveiligheid blijkt dat een drukpiek van circa 112 pascal verwacht kan worden in de gehanteerde casestudy. Aangezien het zuurstofpercentage zodanig laag is dat ongecoördineerd gedrag mogelijk is en de spierprestaties worden verminderd, wordt verwacht dat de deur niet te openen is. De combinatie met de optredende temperatuur zorgt ervoor dat een brand in een luchtdicht appartement letaal is voor een bewoner. Zodoende is het niet mogelijk om veilig te vluchten uit een luchtdicht appartement.

5. VARIANTENSTUDIE

In hoofdstuk 4 is middels een casestudy aangetoond dat veilige ontvluchting in een luchtdicht appartement niet mogelijk is. In een situatie zonder brandtechnische ingrepen overschrijdt RSET de ASET. Om te onderzoeken hoe de vluchtveiligheid verhoogd kan worden, wordt het effect van een aantal brandtechnische ingrepen in CFast gesimuleerd. De varianten omvatten:

- De toepassing van een woningsprinklerinstallatie;
- De toepassing van de bypass in een mechanisch gebalanceerd ventilatiesysteem, aangestuurd op rookmelders;
- De toepassing van een passieve zomernachtventilatie, aangestuurd op rookmelders.

Zodoende kan antwoord gegeven worden op de volgende deelvraag: "Wat is het effect van de varianten op het brandscenario?"

Dit hoofdstuk is ingedeeld per brandtechnische ingreep/variant. Allereerst worden de randvoorwaarden van het ontwerp van de variant weergegeven. Vervolgens wordt gedefinieerd hoe de variant gemodelleerd dient te worden in CFast. Tot slot wordt het effect van de variant op de vluchtveiligheid weergegeven.

5.1 VARIANT 1 - WONINGSPRINKLER

In deze paragraaf wordt variant 1 weergegeven. Deze variant omvat de toepassing van een woningsprinkler.

Variant 1 omvat een variant waarin woningsprinklers in het appartement worden aangebracht. De verwachting is dat het brandvermogen lager blijft dan in een situatie zonder sprinkler. Doordat brandvermogen lager is, zal de drukpiek in het appartement kleiner zijn dan in een woning zonder sprinklerinstallatie.

5.1.1 ONTWERPUITGANGSPUNTEN

De sprinkler dient zodanig gedimensioneerd te zijn, dat bij een brand de sprinklerinstallatie vroegtijdig in werking zal treden. In het basisontwerp van de sprinklervariant wordt een vergelijking gemaakt met hetgeen gesteld in de NEN 2077:2014³. In Tabel 8 worden de verschillende typen sprinkler weergegeven, zoals benoemd in de NEN 2077:2014.

³ De NEN 2077:2014 wordt gebruikt voor het ontwerp, de installatie en het onderhoud van sprinklerinstallaties in de woonomgeving.

Tabel 8

Typen sprinklerinstallaties conform NEN 2077 en eisen per type (Verenigde Woningssprinkler Installateurs, 2014, geciteerd in Instituut Fysieke Veiligheid, 2016)

Type	Toepassing (grote lijnen)	Minimum ontwerp sproeidichtheid [mm/min]	Aantal ontwerp sprinklers	Minimale sproeitijd [min]	Eisen watervoorziening
1	Woningen/losse appartementen/ woning in een woongebouw waar een sprinkler niet als gelijkwaardigheid wordt ingezet	2,04	1-2	10	Geminimaliseerd
2	Woongebouwen t/m 8 etages	2,04	1-4	30	NEN-EN 12845 + NEN 1073
3	Woongebouwen >8 etages/ Woongebouwen met minder zelfredzame mensen	4,08	4	30	NEN-EN 12845 + NEN 1073

In dit onderzoek worden appartementen in een woongebouw onderzocht, waarbij een sprinklerinstallatie niet als gelijkwaardigheid zal worden ingezet. Het betreft hier immers een extra voorziening, die niet vanuit de wet- en regelgeving is vereist. Zodoende zal sprinklertype 1 worden aangehouden in de variantenstudie, met enkele uitzonderingen:

-Conform de NEN 2077:2014 is het maximale sproeivlak van één sprinklerkop 37 m². In deze variantenstudie wordt deze maximale grenswaarde aangehouden. Enkel in de maatgevende brandruimte (compartiment 1) worden sprinklerkoppen geplaatst;

-De minimale sproeitijd bedraagt 10 minuten voor een type 1 sprinkler. Aangezien het doel van dit type sprinkler is om in vroegtijdig stadium bewoners veilig te laten ontluchten, kan de minimale sproeitijd mogelijk verlaagd worden.

De minimale sproeidichtheid, zoals weergegeven in Tabel 8, wordt aangehouden in de variantenstudie.

Gesloten verticale schachten worden niet gesprinklerd, aangezien deze brandwerend zijn afgeschermd van het appartement.

Met betrekking tot de watervoorziening wordt aangehouden dat de sprinklerinstallatie in verbinding staat met het leidingnet van een drinkwaterbedrijf. Dit uitgangspunt is afgestemd met Michel Dittrich van abtWassenaar d.d. 21 februari 2022.

De woningsprinklers zijn gestuurd middels een glasbulb. Aangezien de sprinklers bij brand in vroegtijdig stadium dienen te functioneren, zal een quick-response sprinkler worden toegepast in de variantenstudie. Een quick-response sprinkler houdt in dat de reactiesnelheid van de sprinkler relatief hoog moet zijn. De reactiesnelheid van een sprinkler is uit te drukken in de Response Time Index waarde (RTI-waarde), wat de warmtegevoeligheid van de sprinkler weergeeft. Een quick-response sprinkler heeft een RTI-waarde van $\leq 50 \text{ ms}^{0.5}$ (Unica, 2019). In de variantenstudie wordt uitgegaan van een RTI-waarde van $50 \text{ ms}^{0.5}$. De activeringstemperatuur van de sprinkler is 68°C. Bij deze temperatuur zal de glasbulb in de sprinklerkop bezwijken waardoor de sprinkler in werking zal treden.

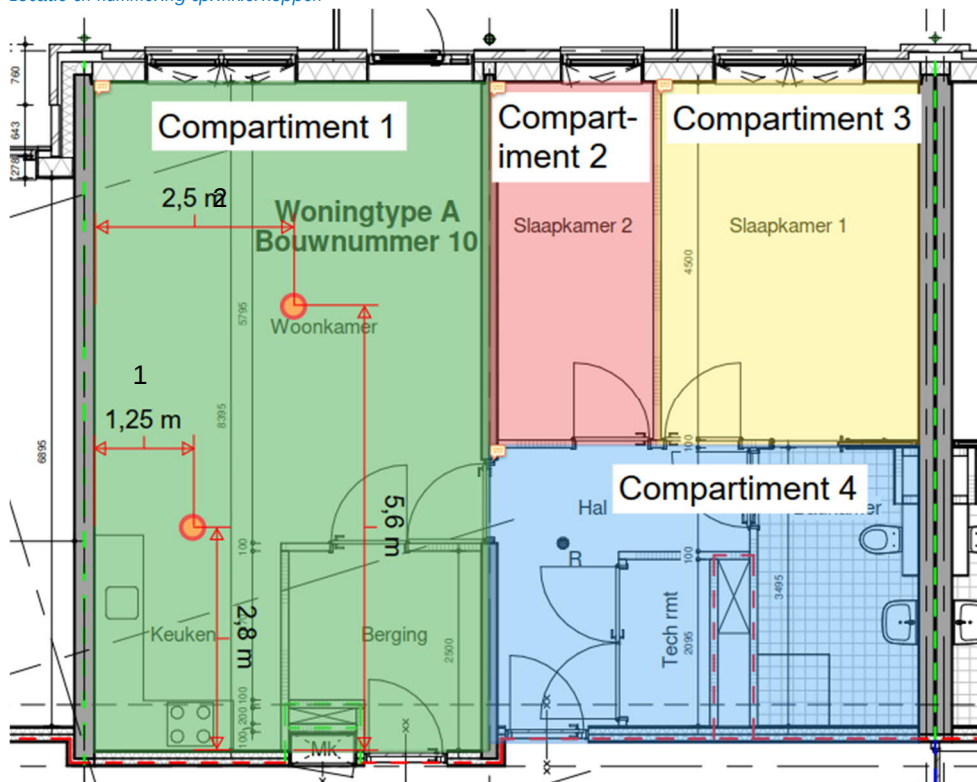
5.1.2 MODELLERING IN CFAST

Variant 1 kan in CFast gemodelleerd worden door in de basissituatie van de casestudy (de situatie zonder brandtechnische ingrepen) de sprinklerkoppen te modelleren. De sproeidichtheid en RTI-waarde dienen ingevoerd te worden. Daarnaast zal de locatie van de sprinklerkop ingevoerd dienen te worden.

Compartiment 1 heeft een gebruiksoppervlakte van 41,975 m², waardoor twee sprinklerkoppen benodigd zijn. De locatie van de sprinklerkoppen is mede afhankelijk van obstructies in het compartiment. De berging kan als obstructie fungeren, waardoor de sprinklerkoppen niet gelijkmatig verdeeld kunnen worden over het compartiment. Hoewel de berging niet gemodelleerd kan worden in CFast, wordt met deze modellering gestreefd naar het benaderen van de werkelijkheid. In Figuur 15 is de locatie en de nummering van de sprinklerkoppen weergegeven.

Figuur 15

Locatie en nummering sprinklerkoppen



In bijlage D is de invoer van variant 1 in CFast weergegeven.

5.1.3 UITKOMSTEN VARIANT 1

Variant 1 is getoetst aan de randvoorwaarden van hoofdstuk 3. De toetsing van variant 1 is weergegeven in bijlage E. Waaruit valt te herleiden dat:

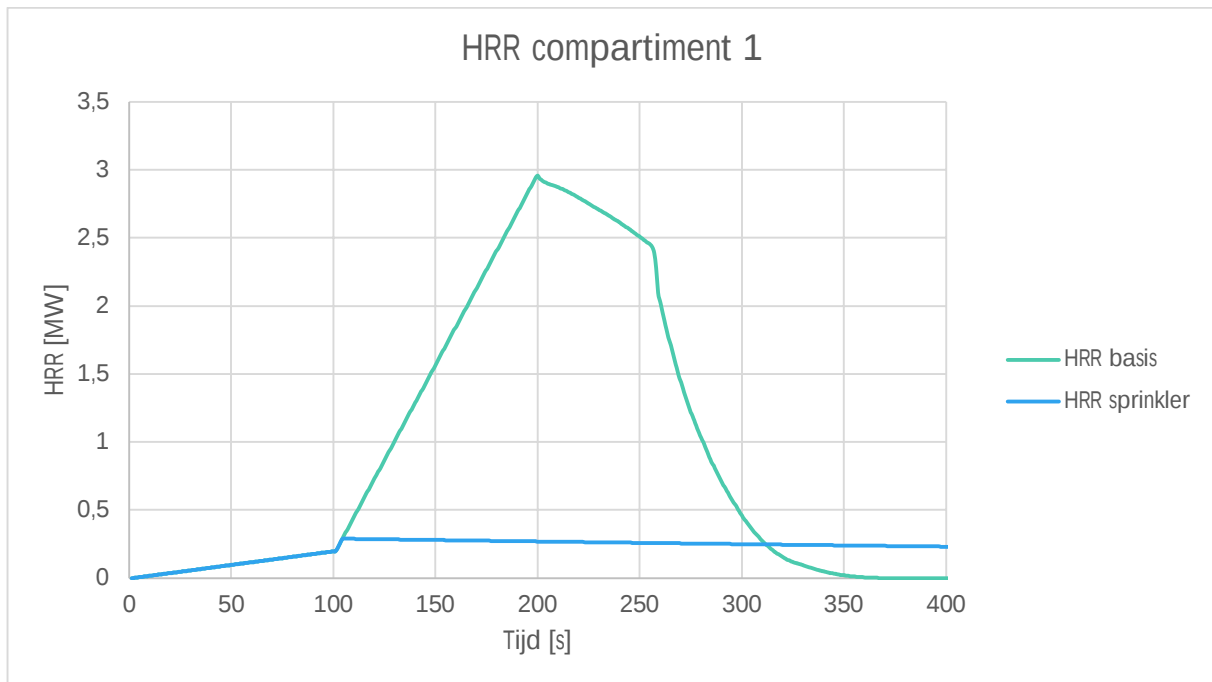
$$\text{RSET} = 213 \text{ s}$$
$$A_{SET} = 399 \text{ s}$$

Uit de simulatie blijkt dat de sprinklerkoppen onafhankelijk van elkaar in werking treden. Sprinklerkop 1 treedt in werking na 110 seconden en sprinklerkop 2 na 103 seconden.

In Figuur 16 is de HRR in compartiment 1 weergegeven. Middels Figuur 16 kan het verschil in HRR worden bepaald. Hieruit valt te concluderen dat de HRR van variant 1 significant lager ligt dan de HRR in de basissituatie. Het verschil ontstaat op het moment dat de eerste sprinklerkop wordt geactiveerd. Zodoende kan gesteld worden dat de sprinklerinstallatie de HRR van de brand verlaagd.

Figuur 16

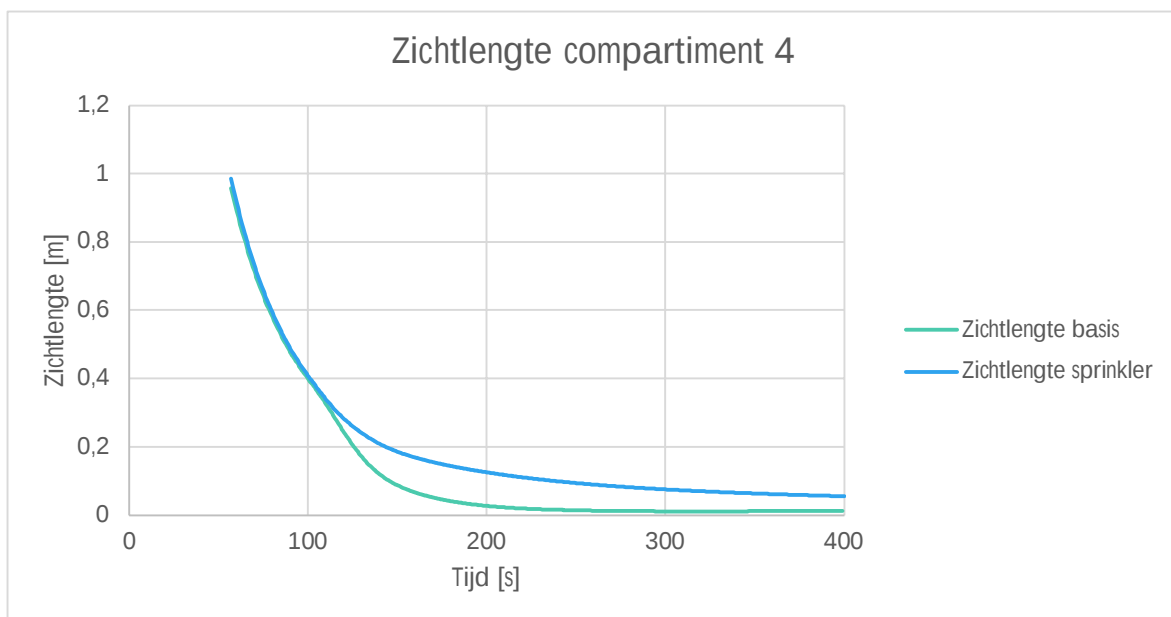
HRR basissituatie en variant 1 in compartiment 1



In Figuur 17 is de zichtlengte in compartiment 4 weergegeven. Uit Figuur 17 kan het verschil in zichtlengte tussen variant 1 en de basissituatie herleid worden. Vanaf het moment dat de sprinklerinstallatie wordt geactiveerd neemt de reductie in de zichtlengte af, in relatie tot de basissituatie. De loopsnelheid door de rook wordt niet verbeterd door de werking van de sprinklerinstallatie, aangezien deze minder dan 0,4 meter bedraagt, voordat de sprinklerinstallatie in werking treedt. Zodoende kan geconcludeerd worden dat de sprinklerinstallatie geen effect heeft op de zichtlengte en loopsnelheid in relatie tot de vluchtveiligheid.

Figuur 17

Zichtlengte basissituatie en variant 1 in compartiment 4

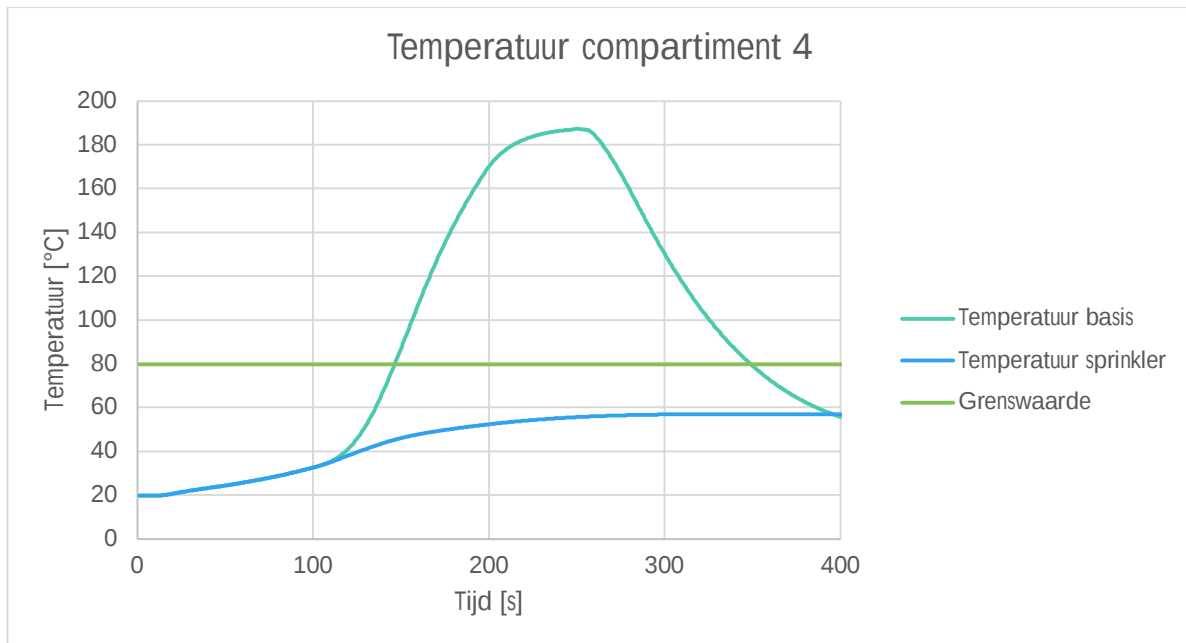


In Figuur 18 is de temperatuur van de rooklaag in compartiment 4 weergegeven. Uit Figuur 18 kan het verschil in de temperatuur worden bepaald. Het temperatuurverloop van variant 1 verschilt van het temperatuurverloop van

de basissituatie. De temperatuur van de bovenste rooklaag neemt gering toe na de activering van de sprinkler. Vervolgens blijft de temperatuur stabiel op circa 57 °C. Conform Tromp en Van Mierlo (2013) is het mogelijk om voor perioden > 10 minuten veilig te kunnen vluchten, als de temperatuur circa 60 °C is. Zodoende kan gesteld worden dat de temperatuur niet letaal is voor bewoners. Derhalve kan geconcludeerd worden dat de sprinklerinstallatie een positief effect heeft op de temperatuur van de rooklaag in relatie tot ontvluchting en letaliteit.

Figuur 18

Temperatuur basissituatie en variant 1 in compartiment 4

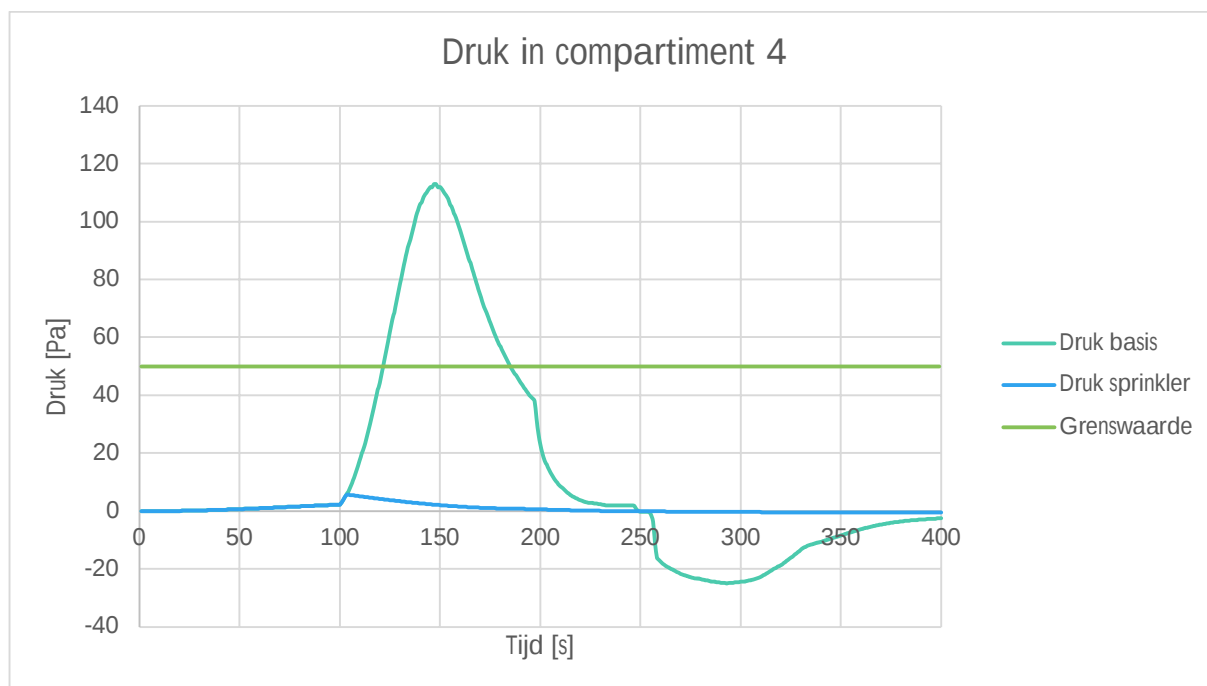


Aangezien de temperatuur van de rooklaag in relatie staat tot de warmtestraling van de rooklaag, neemt de warmtestraling ook af. Zodoende kan gesteld worden dat een sprinklerinstallatie ook een positief effect heeft op de warmtestraling in relatie tot het ontvluchten.

De druk in compartiment 4 is weergegeven in Figuur 19. Uit Figuur 19 kan het drukverschil tussen variant 1 en de basissituatie herleid worden. Vanaf het moment dat de sprinklerinstallatie in werking treedt, loopt de druk in de ruimte af. De druk overschrijdt nooit de grenswaarde van 50 pa, waardoor het mogelijk is om de voordeur te openen in een brandscenario. Zodoende kan geconcludeerd worden dat een sprinklerinstallatie het mogelijk maakt om de deur te openen bij een brand in een luchtdicht appartement.

Figuur 19

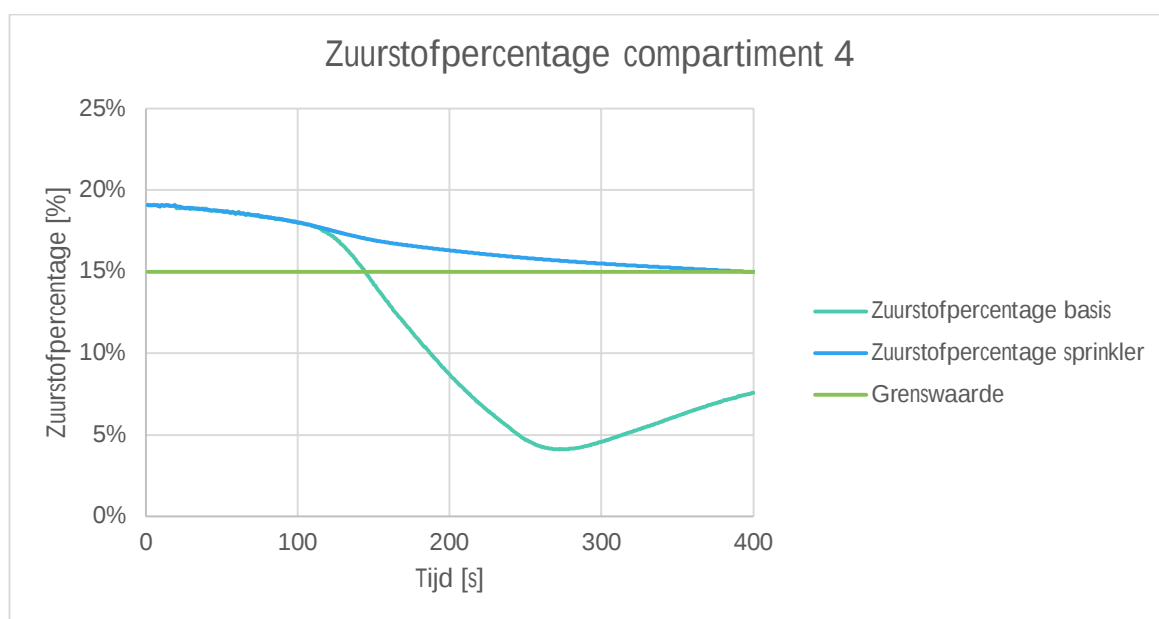
Druk basissituatie en variant 1 in compartiment 4



In Figuur 20 is het zuurstofpercentage in compartiment 4 weergegeven. Uit Figuur 20 kan het drukverschil tussen variant 1 en de basissituatie herleid worden. Bij het in werking treden van de sprinklerinstallatie neemt de reductie van het zuurstofpercentage af. Het zuurstofpercentage blijft tot $t = 399$ seconden boven de 15%. Ongecoördineerd gedrag zal mogelijk worden na 399 seconden, echter is dit zuurstofpercentage niet letaal. In tegenstelling tot de basissituatie zal het zuurstofpercentage niet zorgen voor het overlijden van een persoon. Zodoende kan geconcludeerd worden dat de sprinklerinstallatie een positief effect heeft op het zuurstofpercentage in de rooklaag.

Figuur 20

Zuurstofpercentage basissituatie en variant 1 in compartiment 4



Zoals aangetoond in paragraaf 4.2 is de giftigheid van de rooklaag niet relevant voor zowel de vluchtveiligheid als letaliteit. Zodoende wordt het verschil in giftigheid van de rooklaag niet relevant geacht.

5.1.4 MOGELIJKHEID TOT VEILIG VLUCHTEN

De sprinklerinstallatie heeft een positief effect, in relatie tot veilig vluchten, op de temperatuur van de rooklaag, de warmtestraling, het zuurstofpercentage en de drukpiek in de ruimte. Enkel de hoogte van de rooklaag en de zichtlengte in de rooklaag worden niet significant beïnvloed door de sprinklerinstallatie. De situatie is niet fataal voor een bewoner. Derhalve wordt verwacht dat met de toevoeging van een sprinklerinstallatie, de vluchtveiligheid in een luchtdicht appartement kan worden gewaarborgd.

5.2 VARIANT 2 – ROOKMELDER GESTUURDE BYPASS

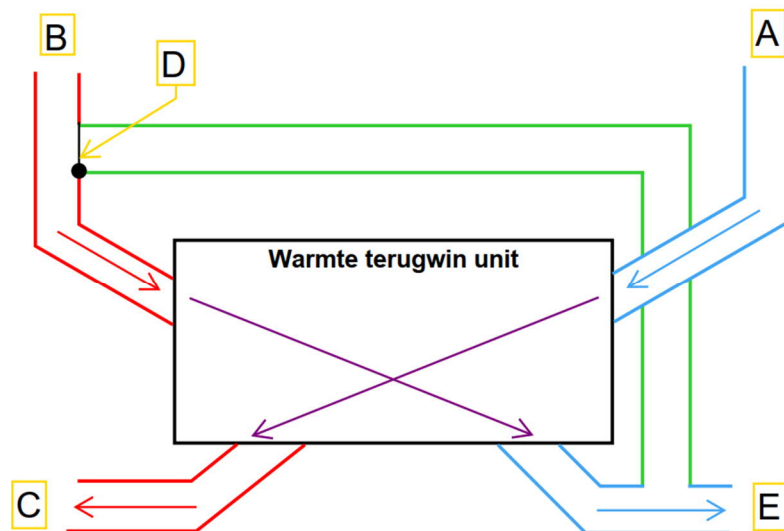
In deze paragraaf wordt variant 2 weergegeven. Deze variant omvat de toepassing van een rookmelder gestuurde bypass in een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem.

Zoals Tenbült (2019) heeft aangetoond, draagt een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem vrijwel niet bij aan de drukvermindering onder brandomstandigheden. Tenbült heeft echter het effect van een bypass in het ventilatiesysteem niet expliciet onderzocht.

Onder normale omstandigheden zal bij een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem koude buitenlucht worden aangevoerd om te ventileren. Deze koude lucht passeert de warmte terugwin unit (WTW-unit), waar warmteoverdracht plaatsvindt met warme retourlucht uit de woning. De koude buitenlucht wordt op deze wijze gedeeltelijk verwarmd door de retourlucht. In Figuur 21 is de luchtstroom van het ventilatiesysteem schematisch weergegeven, zonder dat de bypass functioneel is.

Figuur 21

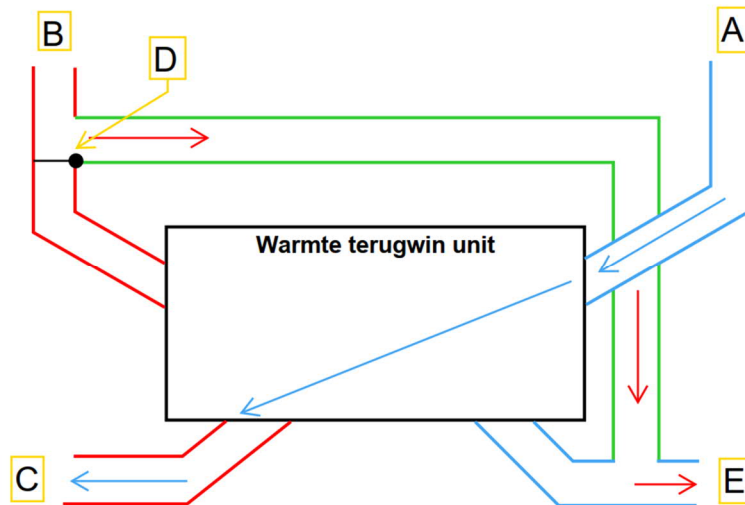
Luchtstromen ventilatiesysteem zonder gebruik van bypass



- A: Koude buitenlucht
- B: Warme retourlucht uit de woning
- C: Opgewarmde toevoerlucht naar de woning
- D: Bypass (niet functioneel)
- E: Afgekoelde vervuilde afvoerlucht naar buiten

In de zomerperiode wordt gebruik gemaakt van de bypass om een woning passief te koelen, zodat in de nachten koude lucht niet wordt opgewarmd. In Figuur 22 is de luchtstroom van het ventilatiesysteem schematisch weergegeven, waarbij de bypass functioneel is.

Luchtstromen ventilatiesysteem met bypass functioneel

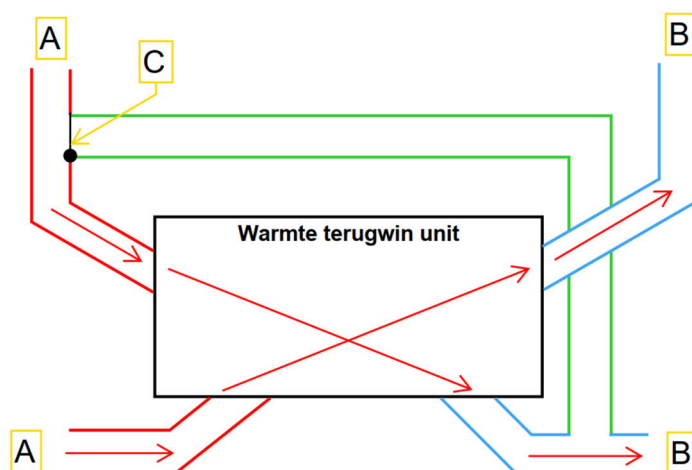


- A: Koude buitenlucht
- B: Warme retourlucht uit de woning
- C: Koude toevoerlucht naar de woning
- D: Bypass (functioneel)
- E: Warme vervuilde afvoerlucht naar buiten

Onder brandomstandigheden zal overdruk uit een luchtdicht appartement worden verminderd door de lekkage door de gebouwschil en door het ventilatiekanaal. De luchtstroom die door het ventilatiekanaal stroomt zal de warmte terugwin unit passeren. Op basis van de hiervoor genoemde omstandigheden heeft Tenbült de simulaties uitgevoerd. In Figuur 23 is weergegeven hoe de lucht door de ventilatiekanalen stroomt onder brandomstandigheden, waarbij de bypass niet functioneel is.

Figuur 23

Luchtstromen ventilatiesysteem onder brandomstandigheden zonder bypass



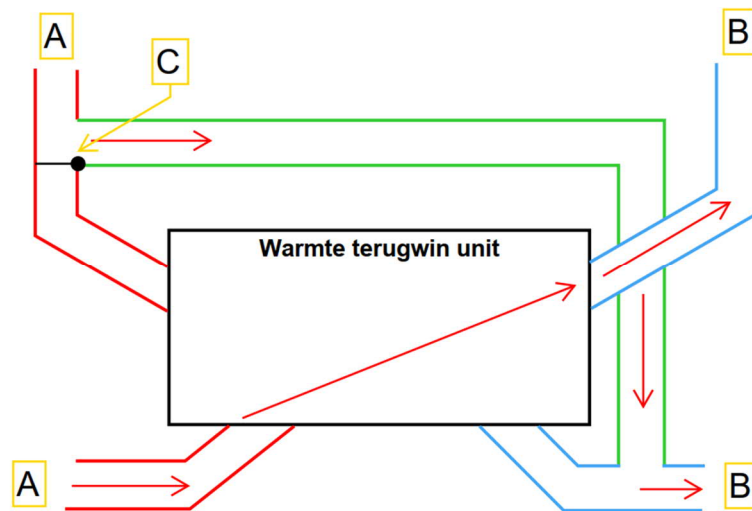
- A: Hete binnenlucht
- B: Afvoer hete binnenlucht
- C: Bypass (niet functioneel)

De verwachting is dat de drukweerstand door de WTW-unit hoger is, dan wanneer de lucht rechtstreeks naar buiten wordt afgevoerd middels de bypass. Door gebruik te maken van de bypass zal de drukweerstand lager zijn en kan de overdruk worden weggenomen middels het bypass kanaal. De luchtstroom van het ventilatiesysteem onder brandomstandigheden, waarbij de bypass functioneel is, wordt weergegeven in

Figuur 24.

Figuur 24

Luchtstromen ventilatiesysteem onder brandomstandigheden met bypass



A: Hete binnenlucht
B: Afvoer hete binnenlucht
C: Bypass (functioneel)

5.2.1 ONTWERPUITGANGSPUNTEN

Tijdens een brand in de woning dient de bypass geopend te worden. Middels branddetectie kan de bypass aangestuurd worden. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een optische rookmelder conform NEN 2555.

De ventilatiekanalen dienen opgebouwd te zijn uit hittebestendige materialen, zodat deze niet bezwijken/smelten tijdens een brand.

De bijdrage van de afzuiging van het ventilatiesysteem wordt verwaarloosd, aangezien wordt verwacht dat het ventilatiesysteem onder brandomstandigheden zal stoppen met werken. De werking zal waarschijnlijk stoppen vanwege de hoge optredende temperaturen. Hoewel het ventilatiesysteem niet direct zal stoppen met werken, kan de bijdrage hiervan verwaarloosd worden (Tenbült, 2017).

Een bypass is veelal aangesloten op een gemeenschappelijk kanaal, waar de bypasses van andere woningen ook op zijn aangesloten. Door de bypasses van andere woningen uit te voeren met een rookmelder gestuurde klep, wordt rookverspreiding naar andere appartementen verholpen.

5.2.2 MODELLERING IN CFAST

De bijdrage van de bypass tijdens een brandsituatie kan rekentechnisch bepaald worden. Dit wordt gedaan door de capaciteit van het kanaal en de roosters te berekenen en om te rekenen naar een equivalent oppervlak aan openingen. Formule 10 wordt gebruikt om de capaciteit van een kanaal te bepalen.

$$C = \frac{A \sqrt{\frac{2}{\rho}}}{1 + \sqrt{\frac{\lambda L}{D} + \sum \zeta_e}} \quad (10)$$

Waarbij:

C:	Capaciteit van het kanaal	$[m^3/(s \cdot pa^n)]$
A:	Oppervlakte van het kanaal	$[m^2]$
ρ :	Dichtheid van lucht	$[kg/m^3]$
λ :	Wandwrijvingscoëfficiënt	$[-]$
l:	Lengte van het kanaal	$[m]$
D:	Hydraulische diameter	$[m]$
$\sum \zeta_i$:	Som van de weerstandfactoren van elementen	$[-]$
e:	Het aantal weerstandverhogende elementen in het kanaal	

Hoewel het mogelijk is om op deze wijze het equivalente oppervlak te bepalen, maakt abtWassenaar over het algemeen gebruik van productspecificaties om de capaciteit van een ventilatiesysteem te bepalen. De lucht volumestroom kan dan vervolgens in formule 5 worden ingevuld, om daarna de equivalente oppervlakte te bepalen.

De contractiefactor dient bepaald te worden middels formule 11.

$$\mu = \frac{1}{1 + \sqrt{\sum \zeta_i}} \quad (11)$$

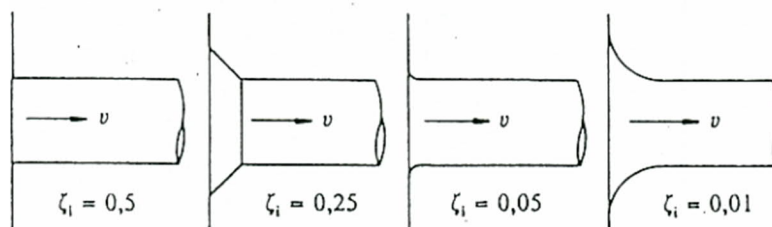
Waarbij:

μ :	Contractiefactor	$[-]$
ζ_i :	Weerstandsfactor van de inlaat van het kanaal	$[-]$

Om de weerstandsfactor van de inlaat van het kanaal te bepalen kan, Figuur 25 worden geraadpleegd.

Figuur 25

Weerstandsfactoren voor verschillende inlaten van ventilatiekanalen (Van Herpen, 2005a)



Een andere mogelijkheid om te bepalen wat de bijdrage is van de bypass tijdens een brandscenario, is om luchtdichtheidsmetingen uit te voeren. Middels deze metingen is het mogelijk om het verschil in $q_{v,10}$ -waarde en C-waarde te bepalen tussen de situatie waarin de ventilatiekanalen gesloten zijn en de variant waarin de ventilatiekanalen geopend zijn en tevens de bypass actief is. In dit onderzoek is ervoor gekozen om luchtdichtheidsmetingen uit te voeren, aangezien niet alle gegevens bekend zijn van de ventilatiekanalen. Hoofdstuk 2 kan worden geraadpleegd voor de methodologie van de luchtdichtheidsmeting. De resultaten van de luchtdichtheidsmetingen zijn weergegeven in bijlage F.

Allereerst wordt de equivalente oppervlakte aan openingen bepaald voor de situatie waarin de ventilatiekanalen gesloten zijn. Dit wordt gedaan middels formule 5, 6 en 7. Om vervolgens de equivalente oppervlakte van de ventilatiekanalen te bepalen worden formule 5, 6 en 11 gebruikt. In formule 5 wordt de C-waarde ingevoerd als ΔC van de situatie waarin de ventilatiekanalen geopend en gesloten zijn. Om deze te bepalen wordt formule 6 gebruikt, waarvoor aangehouden kan worden dat $n = 0,5$ (Tenbült, 2017). Derhalve geldt:

$$C = 0,00319 \text{ m}^3/\text{s}$$

De μ kan vervolgens bepaald worden middels formule 11, waarvoor aangehouden kan worden dat $\zeta = 0,5$. De toe te voegen equivalente oppervlakte bedraagt:

Vervolgens kunnen de openingen verdeeld worden over de compartimenten waarin mechanische afzuiging plaatsvindt. In de casestudy wordt aangenomen dat de ventilatiekanalen zich bevinden in compartiment 1 en compartiment 4. Dit zal overeenkomen met een situatie zoals beschreven in de Nederlandse wet- en regelgeving (Bouwbesluit artikel 3.29), waarin de opstelplaats voor een kooktoestel en de bad-/toiletruimte een voorziening voor luchtverversing hebben. Er wordt verwacht dat de overige ruimten worden geventileerd middels overstroomvoorzieningen.

Om het effect van de bypass te bepalen, worden de simulaties uitgevoerd middels de casestudy. Derhalve geldt dat een $q_{v,10}$ -waarde van $0,25 \text{ l/s} \cdot \text{m}^2$ gebruiksoppervlakte wordt gehanteerd. De equivalente oppervlakte aan openingen van de bypass wordt bepaald middels de metingen. Daarnaast zijn simulaties uitgevoerd op basis van de metingen, waarbij een $q_{v,10}$ -waarde van $0,413234$ is aangehouden. De uitkomsten van deze simulatie zijn uitgedrukt in grafieken en zijn weergegeven in bijlage G. Aangezien deze waarden niet te vergelijken zijn met de overige varianten, wordt verder niet ingegaan op deze resultaten.

De hoogte van de openingen omvat compartimentshoogte (2,64 meter). In Tabel 9 worden de oppervlakte en de breedte van de openingen weergegeven. De breedte van de opening kan in CFast worden ingevoerd.

Tabel 9

Afmetingen openingen per compartiment met ventilatievoorziening

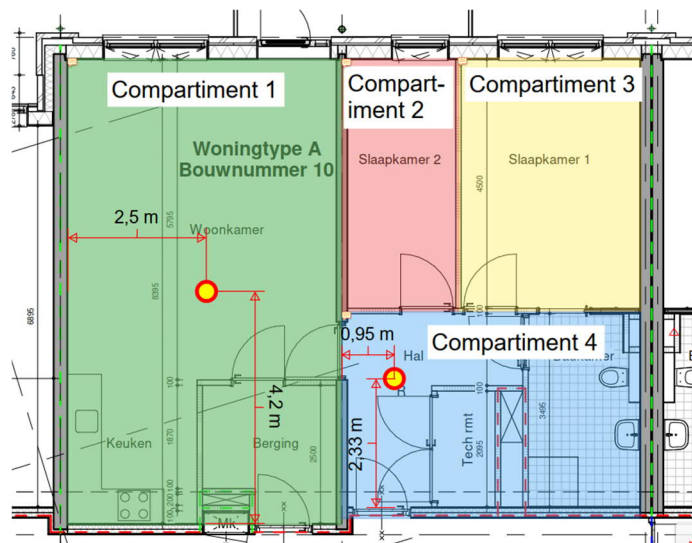
Compartiment	Oppervlakte openingen [m^2]	Breedte opening [m]	Oppervlakte opening ventilatie [m^2]	Breedte opening ventilatie [m]
Compartiment 1	0,001768	0,019543	0,002873	0,001088
Compartiment 2	0,000404	0,00447	-	-
Compartiment 3	0,00065	0,007181	-	-
Compartiment 4	-	-	0,001354	0,001354

Tijdens een brand in de woning dient de bypass geopend te worden. Middels branddetectie kan de bypass aangestuurd worden. Om te bepalen op welk moment de rookmelder afgaat, en de bypass wordt geopend, kan een aparte rookmelder worden gemodelleerd in CFast. Deze rookmelder wordt gekoppeld aan de opening van de bypass. Dit kan in CFast gemodelleerd worden door de fractie van de openingen aan te passen. Een percentage van de opening wordt dan als 'open' gemodelleerd. Welke fractie van de opening als 'open' wordt beschouwd, kan op basis van tijd. Door de fractie van de opening allereerst te modelleren op '0' en vervolgens te modelleren op '1', als de rookmelder afgaat, kan het effect van de bypass worden gesimuleerd.

Als uitgangspunt wordt de rookmelder midden in compartiment 1 geplaatst. Voor compartiment 4 wordt als uitgangspunt aangehouden dat de rookmelder, die reeds op tekening is aangegeven, wordt gebruikt voor de aansturing van de bypass. De locaties van de rookmelders zijn aangegeven in Figuur 26.

Figuur 26

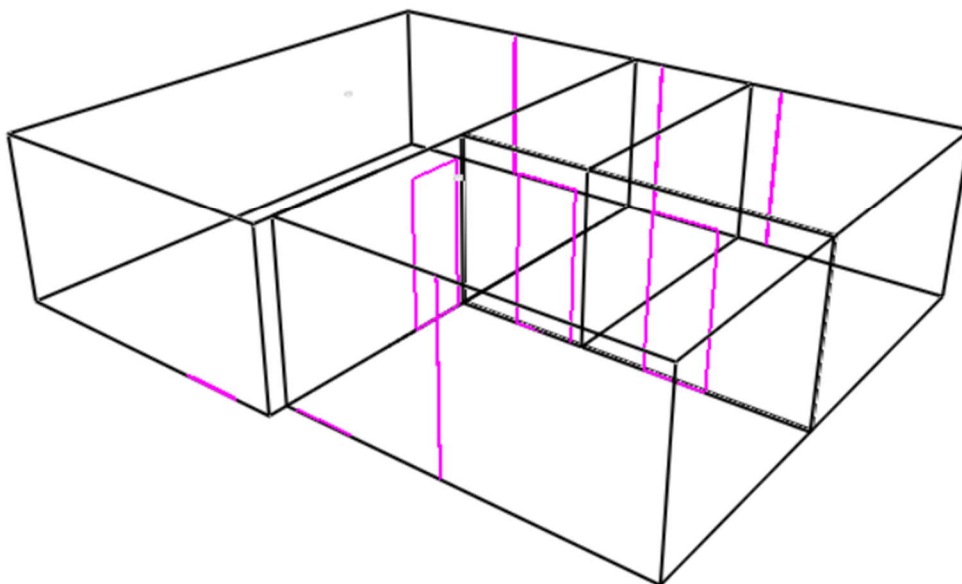
Locaties rookmelders variant 2



In Figuur 27 is het 3D-model van variant 2 weergegeven.

Figuur 27

3D-model variant 2



In bijlage H is de invoer van variant 2 in CFast weergegeven.

5.2.3 UITKOMSTEN VARIANT 2

Variant 2 is getoetst aan de randvoorwaarden van hoofdstuk 3. De toetsing van variant 2 is weergegeven in bijlage I, waaruit valt te herleiden dat:

De RSET is verlaagd ten opzichte van de basissituatie, aangezien de detectietijd lager is.

In Figuur 28 is de druk weergegeven van de basissituatie en variant 2. Middels Figuur 28 kan het verschil in de drukpiek worden bepaald. Het drukverschil is zichtbaar omtrent 125 seconden. Omstreeks dit punt neemt de druk in de basissituatie verder toe, dan de variant met geactiveerde bypass. Dit valt te verklaren door het grotere oppervlakte aan openingen. Doordat er meer openingen zijn gemodelleerd, treden er meer luchtstromen op, waardoor de druk in het appartement kleiner is dan in de basissituatie.

Hoewel de druk in variant 2 lager is dan in de basissituatie, is deze niet significant lager. De grenswaarde van 50 pascal wordt op hetzelfde moment overschreden. De drukpiek neemt ook niet zodanig af, dat een veilige ontvluchting wordt gewaarborgd.

Figuur 28

Druk basissituatie en variant 2 in compartiment 4



In bijlage L zijn de verschillende vluchtparameters van iedere variant, zoals gesimuleerd in CFast, in grafieken uitgedrukt. Hieruit valt te herleiden dat de bijdrage van de bypass aan de overige vluchtparameters (HRR, rooklaaghoogte, zichtlengte, temperatuur, warmtestraling en zuurstofpercentage), in relatie tot de vluchtveiligheid, niet significant is.

5.2.4 MOGELIJKHEID TOT VEILIG VLUCHTEN

Uit paragraaf 5.2.3 volgt dat de bypass geen significante bijdrage levert aan de vluchtveiligheid in een appartement. Zodoende zal het niet mogelijk zijn om veilig te vluchten, door de inpassing van deze variant.

5.3 VARIANT 3 – AANGESTUURDE PASSIEVE ZOMERNACHTVENTILATIE

In deze paragraaf wordt variant 3 weergegeven. Variant 3 omvat passieve zomernachtventilatie, die aangestuurd wordt middels een optische rookmelder. In een vroegtijdig stadium zal de brand ontdekt worden en zal een gevelopening worden geopend. De verwachting is dat door de relatief grote opening, de druk in het compartiment wordt verminderd. Een aandachtspunt bij deze variant is dat de gevelopening tevens een toevoer is voor zuurstof, waardoor de brand op een natuurlijk wijze zal ontwikkelen (de brand zal niet zuurstofbeheerst zijn). Tevens dient rekening gehouden te worden met backdraft: de sturing moet zodanig zijn dat de

gevelopening eerder is geopend dan dat de brand zuurstofbeheerst is. Hierdoor zal backdraft voorkomen worden.

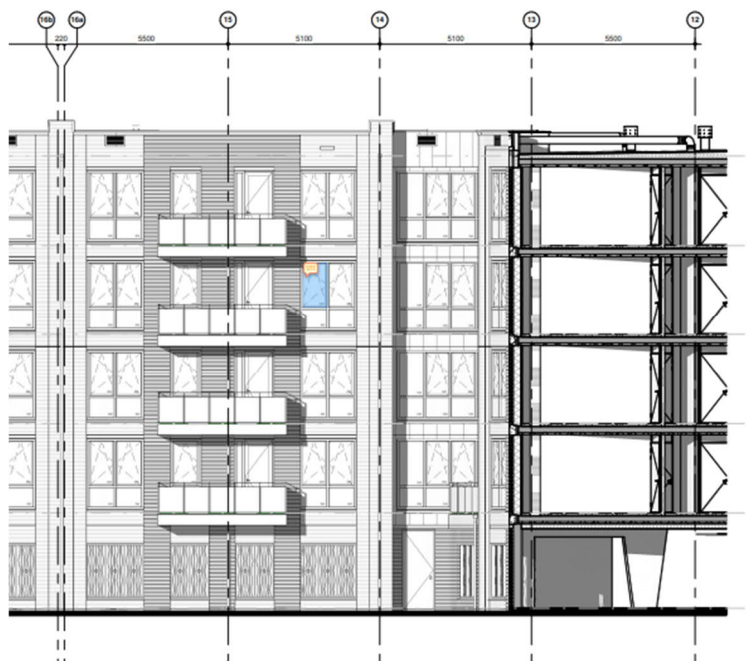
5.3.1 ONTWERPUITGANGSPUNTEN

Met Michel Dittrich d.d. 13 april 2022, is afgesteld dat een passief zomernachtventilatiesysteem van Duco wordt aangehouden bij het uitwerken van deze variant. Duco heeft een assortiment aan verschillende systemen voor zomernachtventilatie. Er is in deze variantenstudie gekozen om een lamellenroostersysteem te berekenen, vanwege de relatief grote openingen die deze systemen bezitten. Van de verschillende systemen die worden aangeboden door Duco, sluit een DucoGrille Nightvent met automatische sturing het meest aan op de aard van dit onderzoek. Dit komt mede doordat de sturing gekoppeld kan worden aan een gebouwbeheersysteem.

De DucoGrille Nightvent zal één van de gevelopeningen in de brandruimte vervangen. Het betreft de gemarkeerde gevelopening, zoals aangegeven in Figuur 29. De afmetingen van de opening zijn weergegeven in Tabel 10.

Figuur 29

Gevelopening die wordt vervangen door de DucoGrille Nightvent



Tabel 10

Afmetingen gevelopening

Hoogte [m]	Breedte [m]	Oppervlakte [m²]
1,50	0,80	1,2

De afmetingen van de roosters in de DucoGrille Nightvent kunnen vooraf bepaald worden. Hierbij wordt een breedte aangehouden van 0,80m en een hoogte van 0,30m. Zodoende worden er vijf roosters boven elkaar geplaatst in deze casestudy.

De DucoGrille Nightvent wordt aangestuurd middels een optische rookmelder conform NEN 2555.

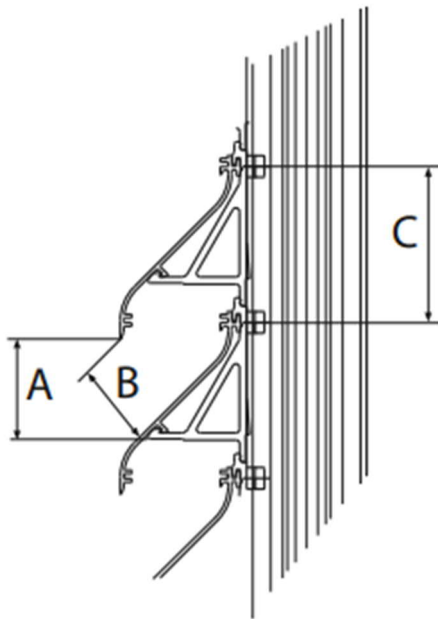
Daarnaast moet zijn aangetoond dat er geen brandoverslag optreedt vanuit de gevelopening richting het bovengelige appartement. In deze casestudy wordt ervan uitgegaan dat geen brandoverslag optreedt.

5.3.2 MODELLERING IN CFAST

Conform de brochure van Duco (2016a) voor muur- en raamroosters kan de netto doorlaatoppervlakte van de roosters bepaald worden middels de fysische vrije doorlaat. De fysische vrije doorlaat is een percentage van de oppervlakte van de stap van de lamellen. Dit percentage is gebaseerd op de kleinste doorlaatoppervlakte van het rooster. In Figuur 30 zijn de luchtdoorlaatoppervlakten geschematiseerd.

Figuur 30

Schematisatie doorlaatoppervlakten (Duco, 2016b)



A: Grootste doorlaatoppervlakte
B: Kleinste doorlaatoppervlakte
C: Stap van de lamellen

De fysische vrije doorlaat wordt bepaald middels formule 12 (Duco, 2016a).

$$F = \frac{x}{y} \quad (12)$$

Waarbij:

F:	Fysische vrije doorlaat	[%]
x:	Kleinste doorlaatoppervlakte	[mm ²]
y:	Lamelstap	[mm ²]

Conform het productblad van de DucoGrille Nightvent bedraagt de fysische vrije doorlaat 36% (Duco, 2021).

De netto doorlaatoppervlakte kan vervolgens bepaald worden middels formule 13.

$$A_e = A * F \quad (13)$$

Waarbij:

A _e :	Netto doorlaatoppervlakte	[m ²]
A:	Bruto doorlaatoppervlakte	[m ²]
F:	Fysische vrije doorlaat	[%]

Zodoende geldt voor de modellering van deze variant:

$$A_{\text{netto}} = 0,432 \text{ m}^2$$

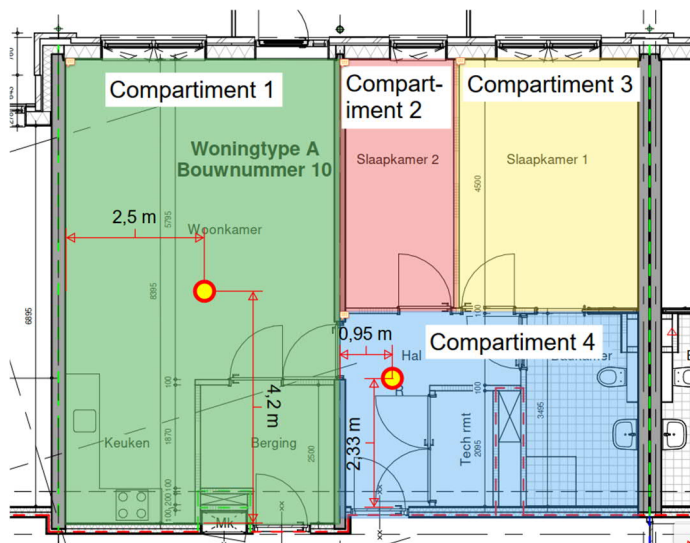
$$A_{\text{netto}} = 0,432/5 = 0,0864 \text{ m}^2$$

Het ventilatierooster wordt gemodelleerd als 5 openingen met een breedte van 0,8 meter. De hoogte wordt aangepast op basis van de netto oppervlakte en bedraagt 0,108 meter.

Aangezien de passieve zomernachtventilatie wordt aangestuurd middels een optische rookmelder, dient deze in CFast gemodelleerd te worden. Deze rookmelder wordt midden in de brandruimte geplaatst. In Figuur 31 zijn de locaties van de rookmelders aangegeven. Na een simulatie in CFast blijkt dat deze rookmelder na 5 seconden afgaat. Er wordt verwacht dat de passieve zomernachtventilatie na 10 seconden, na het afgaan van de rookmelder, automatisch is geopend.

Figuur 31

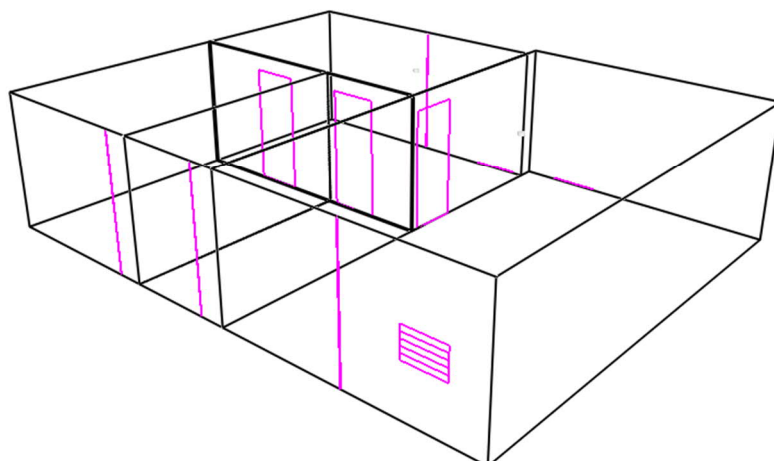
Locaties rookmelders variant 3



In Figuur 32 is het 3D-model van variant 3 weergegeven.

Figuur 32

3D-model variant 3



5.3.3 UITKOMSTEN VARIANT 3

Variant 3 is getoetst aan de randvoorwaarden van hoofdstuk 3. De toetsing van variant 3 is weergegeven in bijlage K, waaruit valt te herleiden dat:

RSET = 176 seconden

ASET = 147 seconden

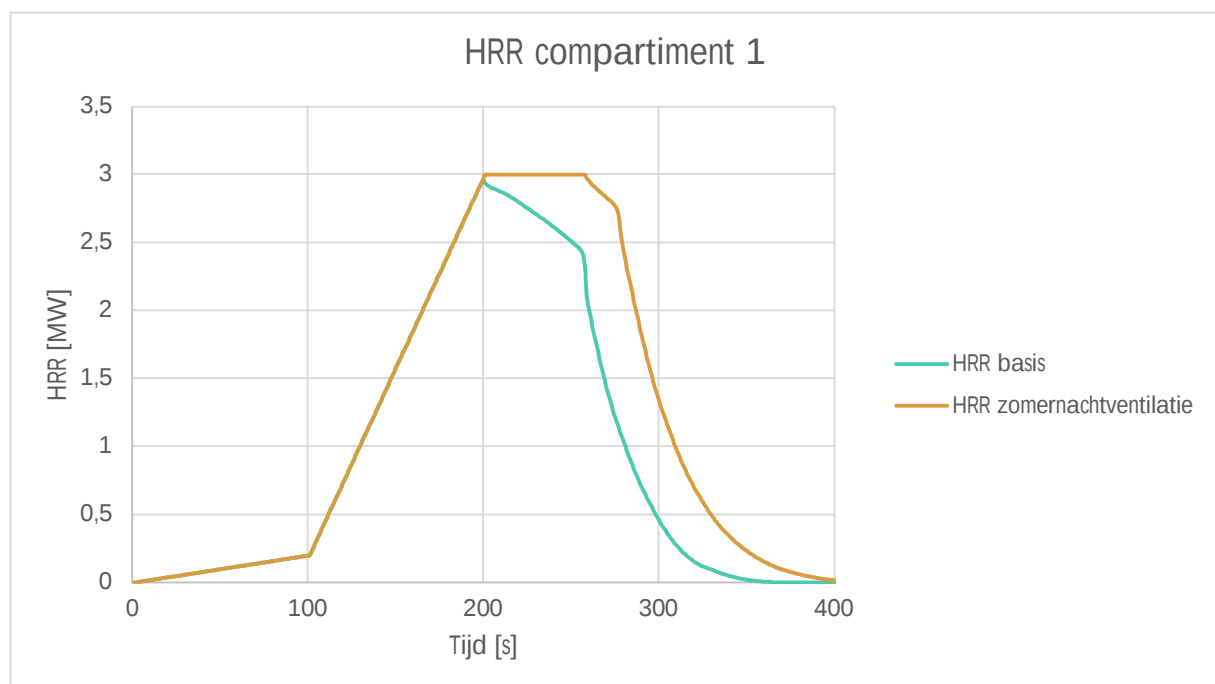
De RSET is verlaagd ten opzichte van de basissituatie, aangezien de detectietijd lager is.

In bijlage L zijn de verschillende vluchtparameters in grafieken uitgedrukt. De verschillen in vluchtparameters zijn beperkt tussen de basissituatie en variant 3. Er is geen significant verschil in de rooklaaghoogte, het zuurstofpercentage en de zichtlengte. Zoals aangetoond in paragraaf 4.2 is de giftigheid van de rooklaag niet relevant voor zowel de vluchtveiligheid als letaliteit. Zodoende wordt het verschil in giftigheid van de rooklaag niet relevant geacht.

In Figuur 33 is de HRR weergegeven van de basissituatie en variant 3. Middels Figuur 33 kan het verschil in HRR worden bepaald. Het verschil in HRR is zichtbaar omtrent 200 seconden. Omstreeks dit punt neemt de HRR in de basissituatie af en blijft deze in de variant met zomernachtventilatie toenemen tot de piek van 3 MW. Hoogstwaarschijnlijk komt dit doordat in de basissituatie de brand zuurstofbeheerst wordt (zie ook paragraaf 4.2). In variant 3 zijn meer openingen aanwezig, die meer zuurstoftoevoer verzorgen. Hierdoor blijft de brand brandstofbeheerst en zal het brandvermogen minder snel afnemen.

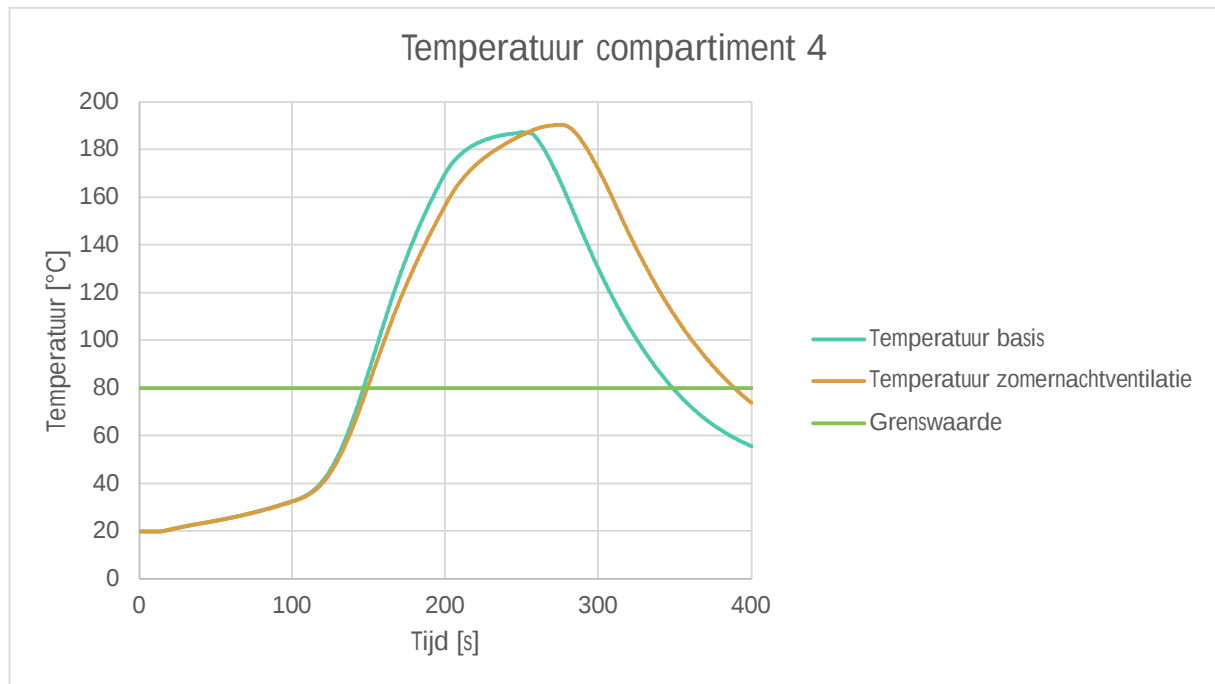
Figuur 33

HRR basissituatie en variant 3 in compartiment 4



In Figuur 34 is de temperatuur van de bovenste rooklaag in compartiment 4 weergegeven. Middels Figuur 34 is het temperatuurverschil tussen de basissituatie en variant 3 te herleiden. De temperatuur in variant 3 loopt voor een langere tijd op en heeft later een piek. De temperatuurgrens van 80°C wordt na 147 seconden overschreden in variant 4. De RSET is bepaald op 176 seconden. Tussen 149 seconden en 176 seconden treedt een gemiddelde temperatuur op van 107,53 °C. Door deze temperatuur in te vullen in formule 9, blijkt dat de maximale blootstellingsduur 19,6 seconden is. De optredende temperatuur zal letaal zijn voor bewoners.

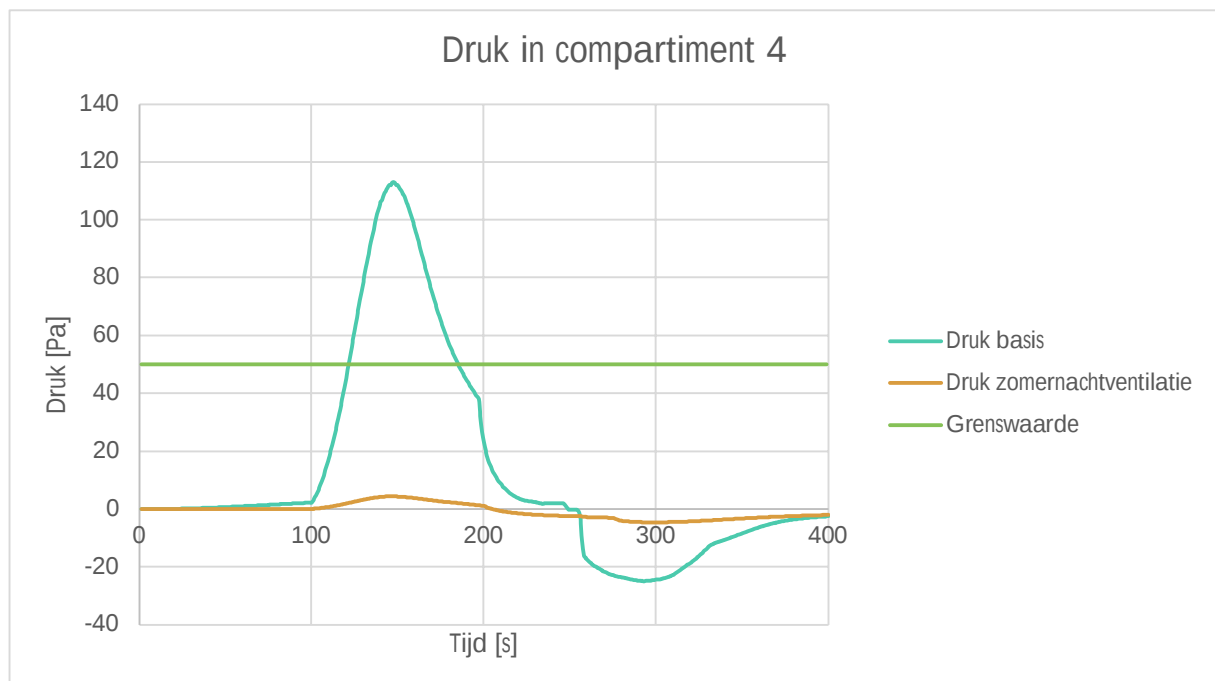
Temperatuur basissituatie en variant 3 in compartiment 4



In Figuur 35 is de druk in compartiment 4 weergegeven. Uit Figuur 35 valt het drukverschil tussen de basissituatie en variant 3 te herleiden. De druk in variant 3 behaalt de grenswaarde van 50 pa niet, waardoor het mogelijk is om de deur te openen.

Figuur 35

Druk basissituatie en variant 3 in compartiment 4

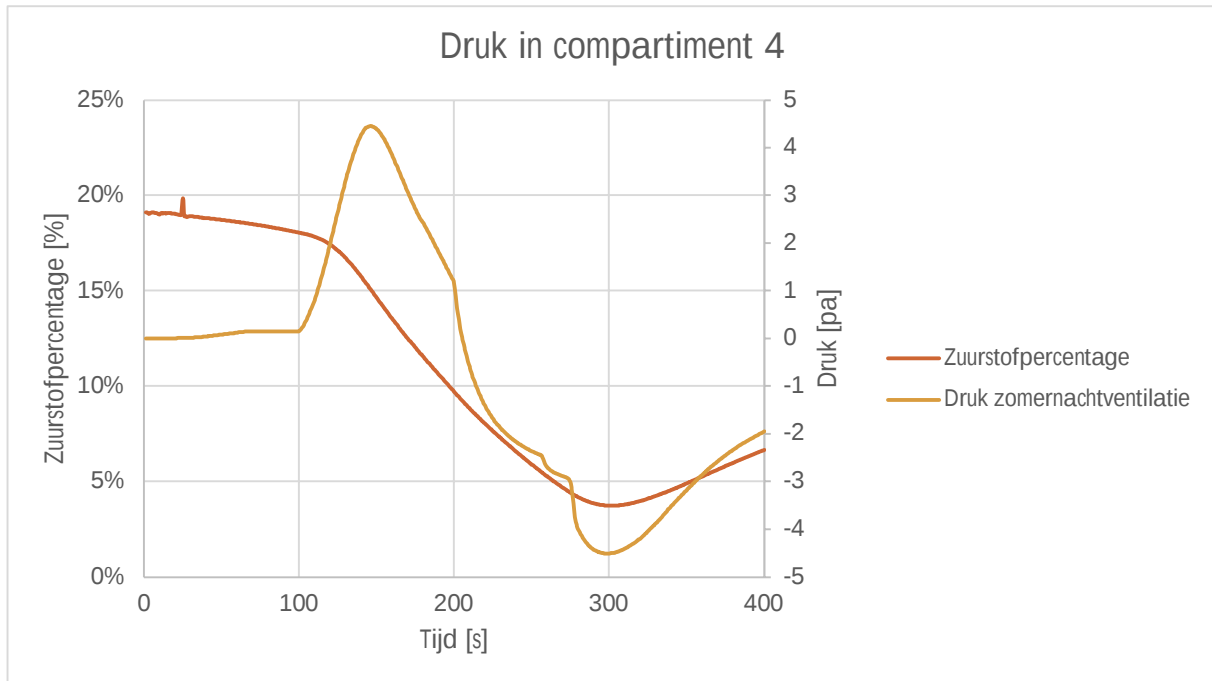


In Figuur 36 is de relatie tussen het zuurstofpercentage en de druk weergegeven in compartiment 4 voor variant 3. Op $t = 176$ seconden (RSET), bedraagt de druk in de ruimte 2,65 pascal. Het zuurstofpercentage bedraagt 11,93%. Hoewel ongecontroleerd gedrag mogelijk is, vanwege het zuurstofpercentage, zal de deur te

openen zijn. De druk op de deur is namelijk relatief laag en hoewel de spierkracht in het lichaam is verminderd door het lage zuurstofpercentage, is het aannemelijk dat de spierkracht niet zodanig laag is dat de deur niet meer valt te openen.

Figuur 36

Relatie zuurstofpercentage en druk in compartiment 4 variant 3



5.3.4 MOGELIJKHEID TOT VEILIG VLUCHTEN

De aangestuurde passieve zomernachtventilatie heeft een positief effect in relatie tot veilig vluchten de drukpiek in de ruimte. Daarnaast wordt de RSET verlaagd, aangezien een extra rookmelder wordt toegevoegd in de brandruimte zelf.

De temperatuur van de rooklaag, het zuurstofpercentage, de warmtestraling, de hoogte van de rooklaag en de zichtlengte in de rooklaag veranderen niet significant in relatie tot de basissituatie. Het is mogelijk om de deur te openen in variant 3, vanwege het zuurstofpercentage in combinatie met de druk in de ruimte. Echter, de temperatuur in compartiment 4 is zodanig hoog dat deze letaal zal zijn. Zodoende wordt verwacht dat de toevoeging van passieve zomernachtventilatie, niet voldoende is om bewoners veilig te laten ontvluchten.

5.4 DEELCONCLUSIE

Uit paragraaf 5.1 blijkt dat de inpassing van een sprinklerinstallatie een positief effect heeft, in relatie tot de vluchtveiligheid, op de temperatuurontwikkeling, de warmtestraling, de drukpiek, het zuurstofpercentage en het brandvermogen. De sprinklerinstallatie levert geen significante bijdrage aan het verminderen van de rooklaaghoogte of het verhogen van de zichtlengte. Het brandscenario wordt door de toepassing van een sprinklerinstallatie niet letaal geacht, waardoor het mogelijk is om veilig te vluchten uit het appartement.

Uit paragraaf 5.2 blijkt dat de inpassing van een rookmelder gestuurde bypass, vrijwel geen effect heeft op de brandontwikkeling. Er is enkel een bijdrage aan de drukontspanning en de RSET, welke niet zodanig groot is dat veilig vluchten mogelijk wordt. De temperatuur, warmtestraling, rooklaaghoogte, zichtlengte, zuurstofpercentage en het brandvermogen blijven vrijwel gelijk. De letaliteit van de brand wordt niet verlaagd en zodoende is het niet mogelijk om veilig te vluchten.

Uit paragraaf 5.3 blijkt dat de inpassing van rookmelder gestuurde passieve zomernachtventilatie een positief effect heeft, in relatie tot de vluchtveiligheid, op de drukpiek. De passieve zomernachtventilatie levert geen

significante bijdrage aan het verminderen van de rooklaaghoogte, de temperatuur, warmtestraling of het verhogen van de zichtlengte en het zuurstofpercentage. Tevens heeft de zomernachtventilatie een negatief effect op het brandvermogen. Doordat de temperatuur te hoog is in het appartement, is het brandscenario letaal en is het niet mogelijk om veilig te vluchten.

6. MULTICRITERIA-ANALYSE

In dit hoofdstuk wordt een multicriteria-analyse (MCA) uitgevoerd om te bepalen welke van de varianten, die zijn uitgewerkt in hoofdstuk 5, het beste zou kunnen worden geadviseerd. De MCA kan voor abtWassenaar dienen als een beslismodel voor eventuele variantkeuzes in de toekomst. De MCA wordt ingevuld aan de hand van de casestudy, om te bepalen welke variant het meest geschikt zou zijn voor dit gebouw.

De volgende deelvraag wordt behandeld: "Hoe kan, middels een multicriteria-analyse, bepaald worden welke variant in de praktijk toegepast dient te worden?"

6.1 ALGEMEEN

De MCA die wordt opgezet in dit hoofdstuk kan worden gebruikt als beslismodel voor de variantkeuze. De MCA wordt ingevuld middels de verkregen waarden uit hoofdstuk 5 en deskresearch. Hoewel deze MCA een bepaalde variantkeuze zal verzorgen, betekent dit niet dat deze variantkeuze voor ieder project geschikt is. Ieder project is namelijk maatwerk. Zodoende dient voor ieder project van abtWassenaar dat in aanmerking komt voor de onderhavige analysemethode, de simulaties alsmede de MCA opnieuw uitgevoerd te worden. De uitkomst van de MCA, van de in dit onderzoek uitgewerkte casestudy, zijn geen vuistregels en bieden niet voor ieder project dezelfde uitkomsten.

Voor het bepalen van de gegevens is een basissituatie aangehouden. In deze basissituatie is geen sprinklerinstallatie aanwezig. Het ventilatiesysteem omvat type D (mechanische toevoer, mechanische afvoer), met WTW en met bypass. Conform dhr. Michel Dittrich (persoonlijke communicatie, 12 mei 2022) is het aannemelijk dat een luchtdicht appartement een dergelijk type ventilatiesysteem heeft, om te voldoen aan de gestelde BENG-eisen van het Bouwbesluit. Enkel de rookmelders, zoals vereist vanuit Bouwbesluit artikel 6.21, zijn geplaatst. Er zijn geen ventilatieroosters aangebracht.

Hoewel in hoofdstuk 5 is aangetoond dat veilig vluchten, in deze casestudy, niet wordt geborgd door de inpassing van variant 2 en variant 3, worden de verschillende toetsingscriteria van deze varianten wel onderzocht. Dit wordt gedaan, aangezien door de inpassing van variant 2 en/of 3, in andere projecten, het wellicht wel mogelijk is om veilig te vluchten. Zodoende heeft abtWassenaar de informatie tot haar beschikking voor het beslismodel (MCA). Tevens kan de MCA gebruikt worden door abtWassenaar om in de toekomst meerdere brandtechnische ingrepen te toetsen.

De toetsing van de varianten, middels de MCA, is weergegeven in bijlage M.

6.2 KWANTIFICERING VAN DE SCORE EN DE WEEGFACTOREN

Voordat de MCA kan worden ingevuld, dienen de verschillende toetsingscriteria te worden vastgesteld. Ieder toetsingscriterium heeft een wegingsfactor, wat de mate van importantie weergeeft. De wegingsfactoren worden in een driepuntschaal onderverdeeld, waarin '1' het minst belangrijk wordt geacht en '3' het meest belangrijk. In paragraaf 6.2.1 tot en met 6.2.12 worden de verschillende toetsingscriteria en de gekozen wegingsfactor per criterium behandeld.

Daarnaast dienen de scores, per criterium gekwantificeerd te worden. Voor de kwantificering van de score wordt een vijfpuntschaal gekozen, aangezien met een vijfpuntschaal verschillende nuances kunnen worden gekwantificeerd en gemeten (Tevreden.nl, z.d.).

De kwantificering van de scores, de weegfactoren, alsmede de gegevens van de varianten, zijn gevalideerd door dhr. Michel Dittrich, d.d. 18 mei 2022.

6.2.1 MOGELIJKHEID TOT VEILIG VLUCHTEN

Aangezien dit criterium als randvoorwaarde geldt, zijn twee scores afdoende:

Score 1: De ingreep borgt de vluchtveiligheid niet. $ASET > RSET \cdot \text{veiligheidsfactor}$ is niet waar.

Score 5: De ingreep borgt de vluchtveiligheid. $ASET > RSET \cdot \text{veiligheidsfactor}$ is waar.

Aangezien dit criterium als een randvoorwaarde geldt, heeft dit criterium geen wegingsfactor.

6.2.2 AANTAL BOUWKUNDIGE INGREPEN

Dit criterium wordt gekwantificeerd middels het aantal bouwkundige ingrepen en de grootte van de ingrepen, die benodigd zijn om de variant in te passen, ten opzichte van de basissituatie.

Er wordt onderscheid gemaakt in grote en kleine ingrepen. Een grote ingreep omvat:

- Aanpassingen aan de hoofd draagconstructie.
- Creëren van nieuwe ruimten.
- Aanbrengen van overstekken of balkons.

Overige bouwkundige ingrepen worden gezien als kleine ingrepen.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: Grote ingrepen benodigd, meer dan 4 ingrepen per woning.

Score 2: Grote ingrepen benodigd, 3-4 ingrepen per woning.

Score 3: Kleine ingrepen benodigd, 3-4 ingrepen per woning

Score 4: Kleine ingrepen benodigd, 1-2 ingrepen per woning.

Score 5: Geen ingrepen benodigd.

Dit criterium heeft wegingsfactor 2, aangezien extra bouwkundige ingrepen per appartement meer arbeid verzorgen dan in de basissituatie. Deze extra arbeid zorgt voor indirecte extra kosten en mogelijk nieuwe ontwerputgangspunten.

6.2.3 AANTAL INSTALLATIETECHNISCHE INGREPEN

Dit criterium wordt gekwantificeerd middels het aantal installatietechnische ingrepen en de grootte van de ingrepen, die benodigd zijn om de variant in te passen, ten opzichte van de basissituatie.

Er wordt onderscheid gemaakt in grote en kleine ingrepen. Een grote ingreep omvat:

- Aanbrengen van nieuwe installaties.

Overige installatietechnische ingrepen worden gezien als kleine ingrepen.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: Grote ingrepen benodigd, meer dan 4 ingrepen per woning.

Score 2: Grote ingrepen benodigd, 3-4 ingrepen per woning.

Score 3: Kleine ingrepen benodigd, 3-4 ingrepen per woning

Score 4: Kleine ingrepen benodigd, 1-2 ingrepen per woning.

Score 5: Geen ingrepen benodigd.

Dit criterium heeft wegingsfactor 2, aangezien de extra ingrepen per appartement meer arbeid en kosten verzorgen dan in de basissituatie. Deze extra arbeid zorgt voor indirecte extra kosten en mogelijk nieuwe ontwerputgangspunten.

6.2.4 ONTWERPKOSTEN

De ontwerpkosten omvatten de extra kosten, ten opzichte van de basissituatie, die de opdrachtgever dient uit te geven voor het ontwerp van de ingreep.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: >€10.000

Score 2: >€5.000, ≤€10.000

Score 3: >€1.000, ≤€5.000

Score 4: ≤€1.000

Score 5: Geen aanvullende kosten

Dit criterium heeft wegingsfactor 1, aangezien ontwerpkosten over het algemeen 5 tot 10% van de totale bouwkosten bedragen (Buro Maak, z.d.). Het ontwerp van de ingreep maakt daar slechts een onderdeel van uit.

6.2.5 AANLEGKOSTEN

De aanlegkosten omvatten de extra kosten, ten opzichte van de basissituatie, die de opdrachtgever dient uit te geven voor de aanleg van de ingreep, per appartement.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: >€2.000

Score 2: >€1.500, ≤€2.000

Score 3: >€1.000, ≤€1.500

Score 4: >€500, ≤€1.000

Score 5: ≤€500

Dit criterium heeft wegingsfactor 3, aangezien de aanlegkosten veelal de bepalende factor zijn voor een opdrachtgever om een ingreep in te passen.

6.2.6 JAARLIJSKE ONDERHOUDSKOSTEN

De jaarlijkse onderhoudskosten omvatten de extra kosten, ten opzichte van de basissituatie, die de opdrachtgever dient uit te geven voor het onderhoud van de ingreep, per appartement.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: >€150

Score 2: >€100, ≤€150

Score 3: >€75, ≤€100

Score 4: >€50, ≤€75

Score 5: ≤€50

Dit criterium heeft wegingsfactor 2, over het algemeen is dit criterium minder belangrijk voor de beslissing om de ingreep toe te passen. Wegingsfactor 1 is te laag, aangezien de kosten wel een wezenlijk onderdeel zijn van de total cost of ownership (TCO).

6.2.7 EFFECT OP BRANDOVERSLAG

Het effect op brandoverslag omvat de invloed die de inpassing van de variant heeft op het brandoverslagrisico, in relatie tot de basissituatie. Door de inpassing van een variant kan het brandoverslagrisico namelijk worden verminderd. Veelal zal de inpassing van de variant geen negatief effect hebben, aangezien in het ontwerp rekening gehouden kan worden met het brandoverslagrisico, door de plaatsing van gevelopeningen te veranderen.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: De inpassing van de variant heeft geen effect op het brandoverslagrisico.

Score 5: Door de inpassing van de variant wordt het brandoverslagrisico verminderd.

Dit criterium heeft wegingsfactor 1, aangezien de kans op een negatief effect zeer klein wordt geacht (Michel Dittrich, persoonlijke communicatie, 18 mei 2022).

6.2.8 VISUEEL EFFECT

Het visuele effect omvat de invloed die de variant heeft op de esthetica van het gebouw of het appartement, in relatie tot de basissituatie. Aangezien esthetica veelal subjectief is, wordt enkel uitgedrukt of de inpassing van de variant een effect heeft, of een aantoonbaar negatief effect.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: De inpassing van de variant heeft een aantoonbaar negatief effect op de esthetica van het gebouw of het appartement.

Score 3: De inpassing van de variant heeft een effect op de esthetica van het gebouw of het appartement.

Score 5: De inpassing van de variant heeft geen effect op de esthetica van het gebouw of het appartement.

Dit criterium heeft wegingsfactor 1, aangezien de borging van de (brand)veiligheid, de kosten van de variant en de klimatologische effecten van de variant, belangrijker worden geacht voor de advisering dan de esthetische effecten.

6.2.9 KLIMATOLOGISCH EFFECT

Dit criterium omschrijft de mate waarin de variant een effect heeft op de behaaglijkheid van een appartement, in relatie tot de basissituatie. Het betreft hier een effect op de luchtkwaliteit of temperatuurhuishouding in het appartement.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: De inpassing van de variant heeft een negatief effect op de temperatuurhuishouding en de luchtkwaliteit van het appartement.

Score 2: De inpassing van de variant heeft een negatief effect op de temperatuurhuishouding of de luchtkwaliteit van het appartement.

Score 3: De inpassing van de variant heeft geen klimatologisch effect.

Score 4: De inpassing van de variant verbeterd de temperatuurhuishouding of de luchtkwaliteit van het appartement.

Score 5: De inpassing van de variant verbeterd de temperatuurhuishouding en de luchtkwaliteit van het appartement.

Dit criterium heeft wegingsfactor 2, aangezien het klimatologische effect meerdere onderdelen van het ontwerp kunnen beïnvloeden. Door de toepassing van een variant kan mogelijk aan meerdere (Bouwbesluit)eisen, binnen andere disciplines dan brandveiligheid, worden voldaan.

6.2.10 CERTIFICERING

Dit criterium omschrijft in welke mate de variant, op het huidige moment, al een gecertificeerde oplossing is. Certificering van producten zorgt namelijk voor betrouwbaardere producten, doordat de risico's worden verminderd (Kiwa, z.d.).

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: De inpassing is een niet gecertificeerde ingreep.

Score 5: De inpassing is een gecertificeerde ingreep.

Dit criterium heeft wegingsfactor 1, aangezien de certificering van een installatie in mindere mate invloed heeft op de variantkeuze.

6.2.11 FAALKANS

De faalkans omschrijft een benadering van de kans dat de inpassing faalt, uitgedrukt in een percentage. De kwantificering van de scores wordt gebaseerd op de faalkans van mogelijke brandtechnische ingrepen, zoals beschreven in de NEN 6079.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: Geen waarde bekend

Score 2: >50%

Score 3: >25%, ≤50%

Score 4: >5%, ≤25%

Score 5: ≤5%

Dit criterium heeft wegingsfactor 1, aangezien de faalkans een benadering is.

6.2.12 KANS OP SCHADE

De kans op schade omvat een criterium waarbij de inpassing van de variant mogelijke schade kan verzorgen in het appartement, of mogelijk beschadigd kan raken, waardoor de werking niet meer wordt geborgd.

De scores zijn als volgt ingedeeld:

Score 1: Door de inpassing van de variant is er kans op schade in het appartement. Er is een aannemelijke kans dat de variant niet meer functioneert door schade.

Score 3: Door de inpassing van de variant is er kans op schade in het appartement of het is aannemelijk dat de variant niet meer functioneert door schade.

Score 5: Door de inpassing van de variant wordt de kans op schade in het appartement niet vergroot. Er is een aannemelijke kans dat de variant nog functioneert, ondanks dat deze beschadigd is.

Dit criterium heeft wegingsfactor 1, aangezien de kans op schade relatief beperkt is.

6.3 GEGEVENS VARIANT 1

De volgende gegevens zijn bekend over de inpassing van de sprinklerinstallatie in een woongebouw. De informatie voor de gegevens wordt verzameld middels persoonlijke communicatie, offertes, deskresearch, het programma Life Cycle Vision (Levenscycluskosten programma voor de bouw en installaties van gebouwen) en het programma O-prognose (programma voor de bepaling van onderhoudskosten).

6.3.1 MOGELIJKHEID TOT VEILIG VLUCHTEN

Zoals is gesteld in paragraaf 5.1.4, is door de toepassing van een sprinklerinstallatie $ASET > RSET$ * veiligheidsfactor waar.

6.3.2 AANTAL BOUWKUNDIGE INGEPEN

Het aantal bouwkundige ingrepen is afhankelijk van de capaciteit van de drinkwaterleiding. Deze dient zodanig aangelegd te zijn dat deze voldoende capaciteit levert om de brand te bestrijden. Als dit niet het geval is, dient een bufferreservoir met elektromotor aangedreven pomp aanwezig te zijn (Loss Prevention Certification Board et al., 2010). De geleverde capaciteit dient afgesproken te worden met het drinkwaterbedrijf. Conform dhr. Harrie Munnik (persoonlijke communicatie, 11 mei 2022), kan het in nieuwbouwprojecten mogelijk zijn dat het drinkwaterbedrijf de benodigde capaciteit niet kan leveren, waardoor een bufferreservoir benodigd zal zijn.

Leidingen dienen door bouwkundige scheidingsconstructies gelegd te worden, echter wordt verwacht dat de bestaande schachten en/of sparingen voldoende zijn.

Voor de opstelling van de pomp, dient een aparte pompkamer aanwezig te zijn in het gebouw. Deze pompkamer dient 60 minuten brandwerend afgescheiden te worden.

Zodoende zijn minimaal twee bouwkundige ingrepen benodigd voor de inpassing van een sprinklerinstallatie, aangesloten op het waterleidingnet. Deze ingrepen zijn relatief groot, waardoor de score van voor het aantal bouwkundige ingrepen niet hoger kan zijn dan 2.

6.3.3 AANTAL INSTALLATIETECHNISCHE INGREPEN

Om de sprinklerinstallatie aan te leggen, zijn een aantal installatietechnische ingrepen benodigd. Allereerst dient een aansluiting aanwezig te zijn vanaf de drinkwaterleiding naar de sprinklerkoppen, middels leidingwerk. Daarnaast dienen de sprinklerkoppen aangesloten te worden op dit leidingwerk. Daarnaast wordt verwacht dat het waterleidingnet groter gedimensioneerd dient te worden om de capaciteit van de sprinklerinstallatie te borgen. Om de capaciteit te waarborgen is een pomp benodigd. Daarnaast zijn verschillende onderdelen benodigd, waaronder afsluiters, kleppen en zone-afsluiters.

Het aantal ingrepen omvat meer dan 4 installatietechnische ingrepen per appartement.

6.3.4 ONTWERPKOSTEN

Voor het ontwerp van de sprinkler is het benodigd om een uitgangspuntendocument op te stellen, hydraulische berekeningen te maken, werktekeningen op te stellen, het bestek op te stellen en overleggen met het drinkwaterbedrijf te houden. Conform dhr. Jacob de Borst (sprinklertechnicus bij Huygen installatietechniek) kost het opstellen van een UPD €2.500. Om de sprinkler uit te werken tot het uitvoeringsgereed ontwerp (UO) is circa 60 uur benodigd. Uitgaande van een uurloon van circa €120 voor een adviseur, zullen de gehele kosten €9.700 bedragen.

Conform dhr. Harrie Munnik (persoonlijke communicatie, 5 mei 2022) bedragen de kosten van de totale engineering van een woningsprinkler, aangesloten op het waterleidingnet, circa €10.000.

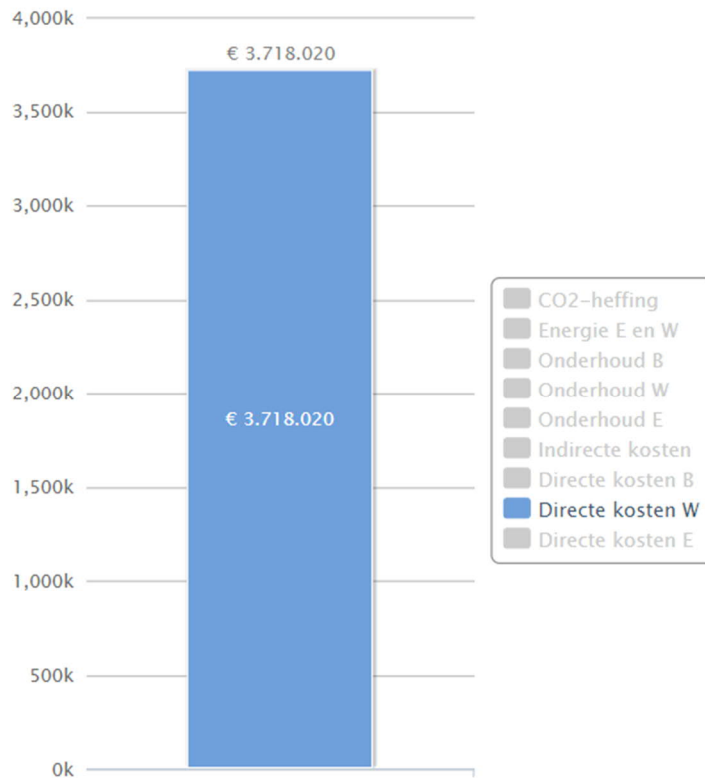
De prijzen, zoals aangegeven door dhr. Munnik en dhr. De Borst, zijn vergelijkbaar. In de MCA zal gerekend worden met een afgerond bedrag, namelijk €10.000.

6.3.5 AANLEGKOSTEN

De aanlegkosten van de sprinklerinstallatie, per appartement, worden bepaald middels het programma 'Life Cycle Vision'. Om de aanlegkosten te bepalen, wordt het gebouw van de casestudy ingevoerd in het programma. Daarna wordt een variant met de sprinklerinstallatie ingevoerd en een variant zonder sprinklerinstallatie. Door het verschil in kosten te berekenen en deze te verdelen over het aantal gerekende appartementen, worden de aanlegkosten per appartement bepaald. In figuur 37 zijn de totale directe kosten van het gebouw weergegeven. Hierbij dient gelet te worden op het feit dat niet alle waarden naar waarheid zijn ingevuld, aangezien dit project in Life Cycle Vision enkel is opgezet om de kosten van de sprinklerinstallatie te bepalen.

Er is gerekend met een flexibele leidinglengte van >7,2 m, aangezien dit de minst gunstige optie bedraagt. Immers kan de leidinglengte per woongebouw verschillen. Voor de grootte van de appartementen is circa 80 m² aangehouden en er is gerekend met 100 appartementen. Voor elk appartement is gerekend met twee sprinklerkoppen. Dit uitgangspunt sluit aan bij de casestudy.

Directe kosten met sprinklerinstallatie

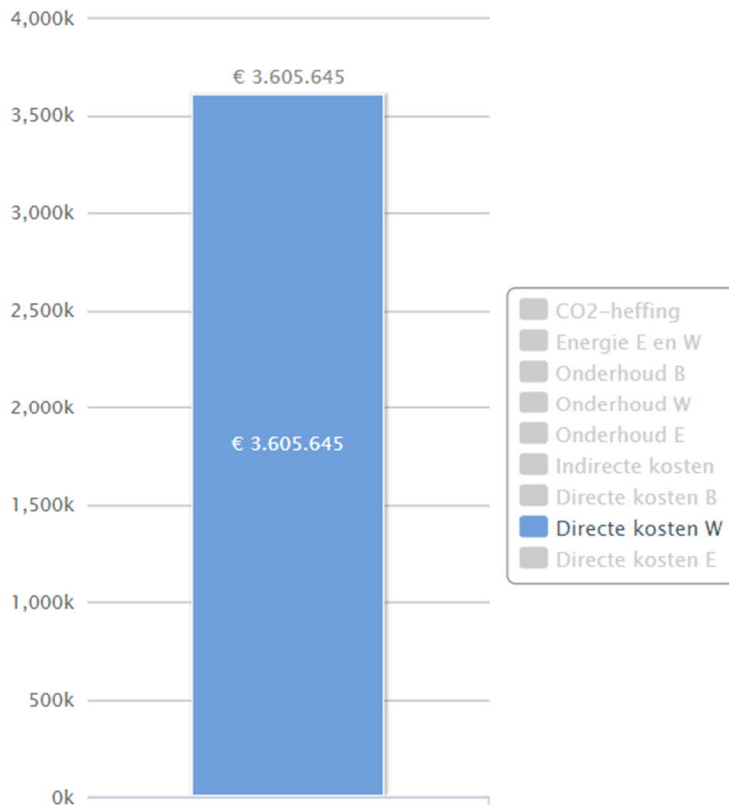


In Figuur 38 zijn de directe kosten van het gebouw zonder sprinklerinstallatie weergegeven. Het verschil in kosten bedraagt €112.375. Dit wordt verdeeld over de 100 aanwezige appartementen. De directe kosten per appartement bedragen dan €1.123,75.

In 2009 waren de kosten van een sprinklerinstallatie circa €1.500 per woning, waarbij de loodgieter grotendeels de installatie zou aanleggen (Hagen, 2009). Daarnaast geeft Hagen (2009) aan, dat in grootschalige woningprojecten de kosten tussen de €1.500 en €2.000 per woning liggen.

Het gemiddelde van deze kosten bedraagt €1.457,92 per woning. Dit wordt afgerond naar €1.500 per woning.

Directe kosten zonder sprinklerinstallatie



Naast deze aanlegkosten dienen de kosten van de installatie in de pompkamer verdeeld te worden over de appartementen. Op basis van een vertrouwelijke open begroting voor de plaatsing van een woningsprinklerinstallatie, welke beschikbaar is gesteld door dhr. Gosse Boon, zijn de kosten van de pompinstallatie, inclusief montage en materieel, circa €45.000. Deze kosten worden verdeeld over de 100 appartementen.

Daarnaast dienen de kosten van het bufferreservoir gerekend te worden. Conform de eerdergenoemde offerte, bedragen de kosten van een watervoorraad van 26 m³ circa €30.000. Deze prijs is inclusief fundatie van het bufferreservoir. Deze kosten worden eveneens verdeeld over het aantal appartementen. Zodoende zullen de totale aanlegkosten circa €2.250 per appartement bedragen.

6.3.6 JAARLIJKSE ONDERHOUDSKOSTEN

De jaarlijkse onderhoudskosten van een sprinkler omvatten controles van het systeem en onderhoud van de componenten. De jaarlijkse controlekosten kunnen bepaald worden middels O-prognose.

De controle en het onderhoud van de sprinklerinstallatie dient uitgevoerd te worden conform NEN 2077. De controle en het onderhoud dient uitgevoerd te worden conform de specificaties van de fabrikant (Normcommissie 351089 "Blusinstallaties", 2014). Normaliter wordt een sprinklerinstallatie jaarlijks gecontroleerd. Er wordt verwacht dat een NEN 2077 type 1 sprinklerinstallatie minder dan één keer per jaar gecontroleerd dient te worden, aangezien de installatie niet wordt geplaatst op basis van gelijkwaardigheid. De installatie wordt geplaatst als aanvullende maatregel. Een tweejaarlijkse controle wordt als uitgangspunt aangehouden. De controlekosten bij een jaarlijkse controle bedraagt €3.125,29, conform O-prognose. Door dit bedrag te delen door twee, zullen de jaarlijkse onderhoudskosten bepaald kunnen worden, bij tweejaarlijkse controle. Door het bedrag vervolgens door honderd te delen, worden de kosten per appartement bepaald.

Het vervangen van componenten kan bepaald worden middels O-prognose. In O-prognose staat aangegeven dat in een cyclus van 24 jaar, een sprinklerinstallatie vervangen dient te worden. Dit komt overeen met de normtekst, welke aangeeft dat na 25 jaar de leidingen en de sprinklers vervangen dienen te worden (Normcommissie 351089 "Blusinstallaties", 2014). De kosten van het vervangen van de installatie bedragen €3.598,60, conform O-prognose. Door dit getal te delen door 24, kunnen de jaarlijkse kosten voor het vervangen van de leidingen en de sprinklers worden bepaald.

De jaarlijkse onderhoudskosten bedragen €165,57.

6.3.7 EFFECT OP BRANDOVERSLAG

Door het in werk treden van de sprinklerinstallatie blijft de temperatuur zodanig laag, dat brandoverslag niet zal optreden bij een brand. De beglazing kan immers niet knappen. Zodoende heeft de sprinklerinstallatie een positief effect op het brandoverslagrisico.

6.3.8 VISUEEL EFFECT

De inpassing van een sprinklerinstallatie heeft invloed op de esthetica van het gebouw. De sprinklerinstallatie is immers zichtbaar aan het plafond van de appartementen. Veelal wordt dit als niet esthetisch ervaren (Hagen, 2009).

Er zijn mogelijkheden om woningsprinklers als een 'concealed-sprinkler'. Deze sprinklers worden in het plafond gemonteerd, zodat deze in mindere mate opvallen. In Figuur 39 is een voorbeeld weergegeven van een 'concealed-sprinkler'.

Figuur 39

Concealed-sprinklerhead (Spectrum Fire Protection, 2017)



Hoewel deze sprinklerkoppen minder zichtbaar zijn dan standaard sprinklerkoppen, zijn er andere factoren waardoor het afgeraden wordt om dit type sprinklerkop toe te passen in een woongebouw, waarbij de sprinkler niet als gelijkwaardigheid wordt toegepast. Aangezien de sprinkler niet als gelijkwaardigheid wordt toegepast, zijn sprinklerinspecties in mindere mate van belang. Conform senior-adviseur brandveiligheidsinstallaties Gosse Boon (persoonlijke communicatie 5 maart 2022) kunnen concealed-sprinklers, in de praktijk, door bewoners worden overgeleverd en worden afgekit, waardoor de werking niet wordt geborgd. Zodoende wordt in de MCA uitgegaan van standaard sprinklerkoppen. Een voorbeeld van dit type sprinklerkop is weergegeven in Figuur 40.

Er wordt verwacht dat het leidingwerk niet zichtbaar zal zijn, aangezien dit verwerkt is in de vloer-/plafondconstructies.

Figuur 40

Voorbeeld van sprinklerkoppen in de woonomgeving (Waterleidingsprinkler, 2017)



6.3.9 KLIMATOLOGISCH EFFECT

De sprinklerinstallatie heeft geen effect op de luchtkwaliteit of de temperatuurhuishouding van het appartement.

6.3.10 CERTIFICERING

Hoewel de sprinkler niet fungeert als gelijkwaardigheid, dient deze wel gecertificeerd te zijn. De sprinklerinstallatie dient te voldoen aan de eisen zoals vermeld in de NEN 2077. Zo dient, bijvoorbeeld, de systeembeschikbaarheid van de installatie 99,7% te beslaan, dienen opleveringsdocumenten van de installatie verschaft te worden aan de eigenaar van het gebouw en dient de installatie gecontroleerd, getest en onderhouden te worden.

6.3.11 FAALKANS

De kans dat een normale sprinklerinstallatie faalt is 2% (Normcommissie 351007 "Brandveiligheid van Bouwwerken", 2016).

6.3.12 KANS OP SCHADE

Om de kans op schade tegen te gaan, worden veelal metalen beschermkappen geplaatst op de sprinklerkoppen.

Een sprinklerinstallatie kan echter wel waterschade veroorzaken als deze prematuur afgaat. Conform Michel Dittrich (persoonlijke communicatie, 18 mei 2022), kan dit mogelijk gebeuren op basis van temperatuur, aangezien de sprinkler een relatief lage activeringstemperatuur heeft.

6.4 GEGEVENS VARIANT 2

De volgende gegevens zijn bekend over de inpassing van een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem met bypass in een woongebouw. De informatie voor de gegevens wordt verzameld middels persoonlijke communicatie, het installatieramingsblad van abtWassenaar, deskresearch en het programma 'O-prognose'.

6.4.1 MOGELIJKHEID TOT VEILIG VLUCHTEN

De inpassing van een rookmelder gestuurde bypass waarborgt de vluchtveiligheid niet, geldend voor de casestudy.

6.4.2 AANTAL BOUWKUNDIGE INGREPEN

Voor de inpassing van variant 2 zijn geen bouwkundige maatregelen noodzakelijk. De aanleg van een standaard gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem is voldoende om de variant te doen functioneren.

Voor de inpassing van variant 2 zijn geen extra bouwkundige ingrepen noodzakelijk.

6.4.3 AANTAL INSTALLATIETECHNISCHE INGREPEN

Voor het aansturen van de bypass dienen extra rookmelders geplaatst te worden, welke gekoppeld dienen te zijn aan de sturing van het ventilatiesysteem. Voor relatief grote woningbouwprojecten wordt de bypass aangesloten op een collectief afvoerkanaal. Om rookverspreiding naar andere appartementen tegen te gaan, dienen rookmelder gestuurde kleppen aanwezig te zijn in ieder bypass kanaal. Derhalve dient ieder appartement voorzien te zijn van een extra rookmelder gestuurde klep. Daarnaast dienen de kanalen uitgevoerd te worden in hittevast materiaal. Er wordt van uitgegaan dat de kanalen in metaal worden uitgevoerd, in tegenstelling tot kunststof ventilatiekanalen.

Aangezien in de basissituatie reeds een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem aanwezig is, zullen er geen verdere installatietechnische ingrepen benodigd zijn. Drie kleine ingrepen zullen benodigd zijn.

6.4.4 ONTWERPKOSTEN

Het verschil in ontwerpkosten, in relatie tot de basissituatie, zal significant weinig verschillen. In een ontwerptraject voor het installatieconcept, ontwerpt abtWassenaar alle benodigde installaties (waaronder ventilatiesystemen). Voor het ontwerp van de basissituatie is het reeds benodigd om het ventilatiesysteem te ontwerpen. Zodoende wordt verwacht dat de ontwerpkosten niet significant hoger zijn, dan in de basissituatie.

6.4.5 AANLEGKOSTEN

Voor de aanlegkosten dienen de volgende uitgangspunten aangehouden te worden:

- De bypass is gestuurd op rookmelder;
- De kanalen zijn uitgevoerd in metaal;
- In de kanalen van de bypass zit een rookmelder gestuurde klep.

Conform dhr. Charles Boks (persoonlijke communicatie 18 mei 2022), kostendeskundige bij ABT, kost het plaatsen van een rookmelder circa €30. De kostenverhoging voor het uitvoeren van de ventilatiekanalen in metaal, in plaats van kunststof, is circa 15% (Charles Boks, persoonlijke communicatie, 18 mei 2022). Conform het installatieramingsblad van abtWassenaar, is de meterprijs per ventilatiekanaal, tot en met een diameter van 315 mm, €35,00. Uitgaande van circa 7 meter aan ventilatiekanalen zal de kostenverhoging per appartement circa €36,75 bedragen. Conform dhr. Charles Boks (persoonlijke communicatie, 18 mei 2022) kost een rookmelder gestuurde klep circa €450.

De aanlegkosten per appartement bedragen €516,75.

6.4.6 JAARLIJKE ONDERHOUDSKOSTEN

Aangezien in de basissituatie reeds een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem aanwezig is, met bypass, zullen de jaarlijkse onderhoudskosten niet verhogen.

6.4.7 EFFECT OP BRANDOVERSLAG

Ten aanzien van brandoverslag verandert variant 2 niet, ten opzichte van de basissituatie. Zodoende heeft de inpassing van de variant geen effect op het brandoverslagrisico.

6.4.8 VISUEEL EFFECT

In de basissituatie is reeds een ventilatiesysteem aanwezig. Zodoende zal het toepassen van variant 2 geen visueel/esthetisch effect hebben.

6.4.9 KLIMATOLOGISCH EFFECT

In de basissituatie is reeds een gebalanceerd, mechanisch ventilatiesysteem aanwezig met WTW en bypass. Zodoende heeft de inpassing van deze variant geen effect op de warmtehuishouding of de luchtkwaliteit.

6.4.10 CERTIFICERING

Een rookmelder gestuurde bypass is nog geen bestaande ingreep. Zodoende zal de variant niet gecertificeerd zijn.

6.4.11 FAALKANS

Er zijn waarden bekend over het falen van rookmelders, in een automatisch brandmeldsysteem met doormelding naar de brandweer. Hoewel deze waarde niet geheel overeenkomt met de faalkans van een "normale" optische rookmelder, welke niet aan een doormeldsysteem is gekoppeld, kan deze waarde wel een indicatie geven van de faalkans van een optische rookmelder. De faalkans van de rookmelder bedraagt circa 25% (Normcommissie 351007 "Brandveiligheid van Bouwwerken", 2016).

Daarnaast is de faalkans van het totale systeem niet bekend, aangezien het systeem nog niet ontwikkeld is. Het systeem kan mogelijk falen door:

- Het falen van de rookkleppen in de kanalen;
- Het falen van de aansturing van de bypass.

Over het bovenstaande zijn geen faalkansen bekend, waardoor de faalkans niet berekend kan worden.

6.4.12 KANS OP SCHADE

De kans dat schade ontstaat door de inpassing van de variant, zal niet groter zijn dan in de basissituatie. Dit komt doordat in de basissituatie reeds eenzelfde type ventilatiesysteem aanwezig is.

6.5 GEGEVENS VARIANT 3

De volgende gegevens zijn bekend over de inpassing van passieve zomernachtventilatie in een woongebouw. De informatie voor de gegevens wordt verzameld middels persoonlijke communicatie, deskresearch en het programma 'O-prognose' (programma voor het bepalen van onderhoudskosten).

6.5.1 MOGELIJKHEID TOT VEILIG VLUCHTEN

Zoals gesteld in paragraaf 5.3.4, is het in de casestudy niet mogelijk om veilig te vluchten door de inpassing van passieve zomernachtventilatie.

6.5.2 AANTAL BOUWKUNDIGE INGREPEN

Voor het plaatsen van de passieve zomernachtventilatie dient een extra sparing aangelegd te worden in de gevel, inclusief het aanbrengen van een spouwlat, stelkozijn en geveldrager. Daarnaast dient de zomernachtventilatie geplaatst te worden in deze sparing.

Het aantal bouwkundige ingrepen, voor de inpassing van variant 3, bedraagt één kleine ingreep.

6.5.3 AANTAL INSTALLATIETECHNISCHE INGREPEN

Voor de werking van de passieve zomernachtventilatie dient een rookmelder geplaatst te worden, welke aangesloten dient te worden aan het besturingssysteem. Daarnaast zal het besturingssysteem zelf aangesloten dienen te worden.

Voor de inpassing van variant 3 zijn twee kleine installatietechnische ingrepen benodigd.

6.5.4 ONTWERPKOSTEN

Indien deze variant wordt toegepast in het ontwerp van het gebouw, zal deze variant in de VO-fase geadviseerd worden door de bouwfysische adviseur/brandveiligheidsadviseur. Hierdoor zal het ontwerp van deze variant binnen de standaardkosten van de advisering vallen.

Voor het ontwerp van variant 3 zullen geen aanvullende ontwerpkosten gerekend worden.

6.5.5 AANLEGKOSTEN

Conform dhr. Charles Boks (persoonlijke communicatie, 18 mei 2022) bedragen de kosten van het maken van de sparing €600, inclusief de plaatsing, exclusief de levering van de DucoGrille Nightvent. Om de kosten van een DucoGrille Nightvent te bepalen, wordt een vergelijking gemaakt met een Climarad ventilatiesysteem. Conform dhr. Michel Dittrich (persoonlijke communicatie, 18 mei 2022) is een dergelijk systeem vergelijkbaar met de DucoGrille Nightvent. Het Climarad systeem heeft ongeveer hetzelfde formaat en wordt ook aangestuurd. Er zijn echter minder luchtkanalen voor benodigd. Conform dhr. Michel Dittrich (persoonlijke communicatie, 18 mei 2022) kan voor de DucoGrille Nightvent een prijs, per stuk, worden aangehouden van €1.025.

De totale aanlegkosten bedragen €1.980.

6.5.6 JAARLIJKSE ONDERHOUDSKOSTEN

Voor de bepaling van de jaarlijkse onderhoudskosten wordt O-prognose geraadpleegd. De DucoGrille Nightvent wordt vergeleken met een HR++ glas kozijn, welke ieder 24 jaar vervangen dient te worden.

De DucoGrille Nightvent dient onderhouden te worden, door deze te reinigen. Om te bepalen wat de kosten zijn van het reinigen van de DucoGrille Nightvent, wordt een vergelijking gemaakt met een aluminium kozijn. Conform O-prognose dient een dergelijk kozijn iedere zes jaar gereinigd te worden. De kosten van het reinigen bedragen €4,83.

Zodoende bedragen de jaarlijkse onderhoudskosten per appartement €47,54.

6.5.7 EFFECT OP BRANDOVERSLAG

De plaatsing van een DucoGrille Nightvent heeft geen positief effect op het brandoverslagrisico.

6.5.8 VISUEEL EFFECT

De DucoGrille Nightvent heeft een visueel effect aan zowel de buitenzijde als de binnenzijde. In Figuur 41 is de buitenzijde van een DucoGrille Nightvent weergegeven. Aan de buitenzijde is een lamellenrooster te zien en aan de binnenzijde is een plaat zichtbaar.

Buitenzijde DucoGrille Nightvent (Duco, z.d.)



6.5.9 KLIMATOLOGISCH EFFECT

De plaatsing van passieve zomernachtventilatie heeft een positief effect op de luchtverversing en de temperatuurhuishouding in het appartement. 's Nachts koelt de passieve zomernachtventilatie het appartement door verse, koude buitenlucht toe te voeren en vervuilde, warme buitenlucht af te voeren.

6.5.10 CERTIFICERING

Een rookmelder gestuurde passieve zomernachtventilatie is nog geen bestaande ingreep. Zodoende zal de variant niet gecertificeerd zijn.

6.5.11 FAALKANS

De faalkans van de rookmelder bedraagt circa 25% (Normcommissie 351007 "Brandveiligheid van Bouwwerken", 2016), zie hiervoor ook paragraaf 6.4.11.

Voor de faalkans van de passieve zomernachtventilatie kan een vergelijking worden gemaakt met een natuurlijke rook- en warmteafvoer (RWA) installatie. Het systeem fungeert immers hetzelfde: rookmelders activering de opening van kleppen. De kans dat een natuurlijke RWA faalt, is 30% (Normcommissie 351007 "Brandveiligheid van Bouwwerken", 2016). Zodoende wordt de faalkans van het systeem bepaald middels een kansberekening. Er zijn drie mogelijke scenario's:

- De rookmelder faalt en dus faalt de zomernachtventilatie.
- De rookmelder werkt, maar de zomernachtventilatie faalt.
- De rookmelder werkt en de zomernachtventilatie werkt.

De kans dat de rookmelder faalt is 25%. De kans dat de rookmelder werkt, maar de zomernachtventilatie faalt bedraagt 22,5% ($0,25 \cdot 0,30$). De faalkans van het systeem zal zodoende 47,5% zijn.

6.5.12 KANS OP SCHADE

De inpassing van de passieve zomernachtventilatie is vergelijkbaar met het plaatsen van een raam. Er wordt niet verwacht dat de kans op schade groter zal zijn dan in de basissituatie.

Het is aannemelijk dat mogelijke schade kan ontstaan door stoten of krassen aan de binnenzijde. Er wordt niet verwacht dat dit de functionaliteit beïnvloedt. De werking van het apparaat zorgt niet voor vervolgschade.

In bijlage M is de MCA in totaliteit weergegeven.

6.6 DEELCONCLUSIE

Om een variantkeuze te maken zijn de criteria, met bijbehorende wegingsfactoren, zoals weergegeven in Tabel 11, opgenomen in een multicriteria-analyse. De criteria en de wegingsfactoren zijn geverifieerd door dhr. Michel Dittrich.

Tabel 11

Criteria MCA met bijbehorende wegingsfactoren

Criteria	Wegingsfactor
Mogelijkheid tot veilig vluchten	Randvoorwaarde, geen wegingsfactor
Aantal bouwkundige ingrepen	2
Aantal installatietechnische ingrepen	2
Ontwerpkosten	1
Aanlegkosten	3
Jaarlijkse onderhoudskosten	2
Effect op brandoverslag	1
Visueel effect	1
Klimatologisch effect	2
Certificering	1
Faalkans	1
Kans op schade	1

Uit de multicriteria-analyse (bijlage M), blijkt dat een sprinklerinstallatie toegepast dient te worden in de casestudy, om de vluchtveiligheid te waarborgen.

7. CONCLUSIE

In dit onderzoek is gezocht naar een antwoord op de vraag: “Welke brandtechnische ingreep is in de praktijk, conform een multicriteria-analyse, geschikt om de vluchtveiligheid van bewoners in luchtdichte appartementen te waarborgen, op basis van de voorgestelde varianten?” Hiervoor is een mixed methods onderzoek uitgevoerd, waarbij de vluchtveiligheid is getoetst middels de ASET-RSET methode. Om te bepalen of er veilig gevlucht kan worden in een appartement, zijn de vluchtparameters, zoals beschreven in de Zweedse regelgeving, gehanteerd (met een aantal afwijkingen, zie hiervoor paragraaf 3.2). Er is getoetst middels een casestudy.

Het moment dat het nog relevant is om de vluchtveiligheid te verhogen, is afhankelijk van de ASET en de RSET. De vluchtveiligheid dient zodanig verhoogd te worden, zodat RSET nooit ASET zal overschrijden.

Vanuit een luchtdicht appartement, kan niet veilig gevlucht worden. Dit komt door een combinatie van de druk op de deur, een relatief laag zuurstofpercentage en de optredende temperaturen in het appartement.

Door de inpassing van een woningsprinklerinstallatie wordt de HRR verlaagd, waardoor de drukpiek en de temperatuur worden verlaagd en het zuurstofpercentage hoger is, dan in de basissituatie. Hierdoor wordt het mogelijk om veilig te vluchten.

Door de inpassing van een rookmelder gestuurde bypass wordt de drukpiek verlaagd, echter is deze verlaging niet voldoende om de deur in het appartement te openen. De overige vluchtparameters worden niet significant verbeterd, in relatie tot de vluchtveiligheid. De temperatuur, warmtestraling en het zuurstofpercentage verbeteren niet in relatie tot de basissituatie. Zodoende kan niet veilig gevlucht worden door de inpassing van een rookmelder gestuurde bypass.

Door de inpassing van een rookmelder gestuurde passieve zomernachtventilatie, wordt de drukpiek in het appartement verlaagd. De overige vluchtparameters worden echter niet significant verbeterd, in vergelijking met de basissituatie. Vanwege de hoge optredende temperaturen, is het niet mogelijk om veilig te ontvluchten.

Middels een multicriteria-analyse is bepaald welke brandtechnische ingreep in de casestudy dient toegepast te worden. Hieruit volgt dat een woningsprinklerinstallatie het meest geschikt is om de vluchtveiligheid te waarborgen.

Zodoende is uit dit onderzoek gebleken dat een sprinklerinstallatie, van de getoetste varianten, in de praktijk het meeste geschikt is om de vluchtveiligheid van bewoners in een luchtdicht appartement te waarborgen.

8. DISCUSSIE

In dit hoofdstuk wordt de validiteit, de beperkingen van het onderzoek en de opties tot vervolgonderzoek weergegeven.

8.1 VALIDITEIT

De reactietijd van bewoners is bepaald middels het SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. De gehanteerde waarde is gebaseerd op brandoefeningen en interviews van overlevenden tijdens een daadwerkelijke brand. De mogelijk reactietijd in een appartement waar de brand plaatsvindt, kan verschillen van deze waarde, echter is daar geen informatie over gevonden. De aangehouden waarde wordt wel als valide beschouwd, aangezien de waarde van een genormeerd bedrijf afkomstig is en is gebaseerd op wetenschappelijk onderzoek.

In dit onderzoek is gemeten wat het effect is van de verschillende varianten op de vluchtveiligheid in appartementen. De gehanteerde methodiek is gebaseerd op bestaande regelgeving en op eerder uitgevoerd wetenschappelijk onderzoek (methodieken Van Den Brink en Tenbült). De meetresultaten staan echter ter discussie, zie hiervoor paragraaf 8.3.

Over het algemeen zijn wetenschappelijke bronnen gebruikt, welke over het algemeen als valide beschouwt kunnen worden. Daarnaast zijn een aantal experts benaderd voor verificaties en informatie. Gezien de werkervaring van de benaderde personen, kan gesteld worden dat de verkregen informatie valide zal zijn. De gehanteerde normen worden in de praktijk zowel nationaal als internationaal gebruikt en zijn gebaseerd op werkervaring van experts en/of wetenschappelijk onderzoek. Zodoende kan gesteld worden dat dit valide bronnen zijn.

8.2 INTERPRETATIE VAN RESULTATEN

Het effect van de sprinklerinstallatie was naar verwachting. Er werd verwacht dat de sprinklerinstallatie de brand zou beheersen en beperken, waardoor het brandvermogen zou afnemen. Hierdoor zou de druk in het appartement worden verlaagd, alsmede de optredende temperaturen. Doordat de sprinklerinstallatie de brand beheerst houdt, is het logisch dat daarom de vluchtveiligheid in het compartiment gewaarborgd is: de brand ontwikkelt namelijk in veel mindere mate.

Het effect van de passieve zomernachtventilatie was ook naar verwachting. Er werd verwacht dat de druk kleiner zou zijn dan in de basissituatie, vanwege de relatief grote openingen. De verwachting was ook, dat de zomernachtventilatie verder geen, of een negatief, effect zou hebben op de overige parameters. Het bleek uiteindelijk dat door de toepassing van de zomernachtventilatie drukontspanning optreedt. De temperatuur in de ruimte wordt niet verder beïnvloed, waardoor het niet mogelijk is om veilig te vluchten in de casestudy.

Dat de bypass weinig effect had op de drukontspanning was niet verwacht. Er werd verwacht dat de bypass voor drukontspanning zou zorgen. Dit kan onderbouwd worden door de uitgevoerde metingen, waar drukontspanning praktisch direct plaatsvond bij opening van de kanalen. Mogelijk vindt de drukontspanning niet plaats tijdens een brandscenario, aangezien de druk continu blijft opbouwen. Hierdoor is de capaciteit van één kanaal niet genoeg om voor drukontspanning te zorgen.

Hoewel de passieve zomernachtventilatie de vluchtveiligheid niet heeft gewaarborgd in de casestudy, kan deze inpassing mogelijk in andere projecten een positief resultaat geven. Als de RSET verlaagd kan worden (door bijvoorbeeld een kortere loopafstand), is het wellicht mogelijk dat de vluchtveiligheid kan worden gewaarborgd.

8.3 BEPERKINGEN

De meetresultaten van de rookmelder gestuurde bypass zijn niet bepaald zoals aan het begin van het onderzoek was verwacht. Allereerst zouden metingen uitgevoerd worden in nieuwbouwappartementen, waar een gebalanceerd mechanisch ventilatiesysteem met bypass aanwezig zou zijn. In deze situatie was het mogelijk om de meest accurate waarden te verkrijgen voor de capaciteit van het bypass kanaal. Echter kon hier niet gemeten worden, aangezien de bouw van deze appartementen gestagneerd was.

Zodoende zijn de blowerdoormetingen uitgevoerd middels een meetelement. Het meetelement komt niet overeen met de werkelijkheid, aangezien een bypass in een woongebouw, veelal eindigt in een collectief afvoerkanaal van meerdere woningen. In een dergelijk kanaal zitten verschillende weerstandverhogende elementen, die een effect kunnen hebben op de capaciteit van het kanaal. In principe zou het element, zoals tijdens de meting gemeten, een zeer positieve variant zijn van de rookmelder gestuurd bypass, vanwege de afwezigheid van weerstandverhogende elementen. Hierdoor zijn de simulaties valide uitgevoerd, maar kunnen de resultaten niet geheel valide zijn.

Daarnaast is de blowerdoor richting de hal geplaatst tijdens de metingen. Normaliter wordt de blowerdoor in een deur geplaatst richting de buitenlucht. In het gemeten appartement was dit niet mogelijk. Doordat de blowerdoor het drukverschil tussen het appartement en de gemeenschappelijk verkeersruimte heeft gemeten, fluctueerde het drukverschil relatief veel. Hierdoor is het mogelijk dat de meetresultaten niet geheel accuraat zijn.

Een aantal kosten zijn bepaald door schattingen of vuistregels. Hoewel deze zijn geverifieerd door experts, kunnen de kosten in de praktijk anders zijn door kortingen, inflatie of iets anders. Aangezien de waarden door experts zijn geverifieerd, worden deze wel als reëel en valide geacht.

Trace species zijn niet verdisconteerd in het onderzoek. Mogelijk kunnen deze een effect hebben op de giftigheid van de rook. Daarnaast is de equivalentie ratio, voor het bepalen wanneer een brand zuurstofbeheerst wordt, niet opgenomen in de rekenmethodiek. Wanneer de brand zuurstofbeheerst raakt, zal de CO yield en de soot yield toenemen. Dit kan eventueel nog een effect hebben op de giftigheid van de rook. De aangehouden methodiek is een benadering, echter wordt niet verwacht dat de concentratie CO, zelfs met een verhoogde soot yield, zodanig snel zal toenemen dat de concentratie 2000 ppm zal overschrijden. Aangezien de soot yield effect heeft op de zichtlengte, wordt er niet verwacht dat een verhoogde soot yield effect zal hebben op de loopsnelheid, aangezien de zichtlengte ten tijde van het starten van het vluchten al minder dan 5 meter bedraagt.

De simulaties en berekeningen zijn uitgevoerd middels CFast en de bijbehorende output. De lekverliezen zijn bepaald op basis van de $q_{v,10}$ -waarde en zonder verdiscontering van de dichtheid van de lucht. Door een iteratief proces uit te voeren, middels de bepaling van de equivalente oppervlakte op basis van het optredende drukverschil en de dichtheid van de lucht (op basis van de temperatuur), is het mogelijk om een accuratere benadering van de vluchtveiligheid te berekenen. In de praktijk wordt echter de rekenmethodiek aangehouden zoals in dit onderzoek is gebruikt. Immers is de methodiek, zoals aangeleverd door Ruud van Herpen (Luchtdichtheid, S_a en S_{200} en ventilatie) aangehouden.

Voor de methodiek van deelvraag 4 zijn veelal kengetallen aangehouden en vergelijkingen gemaakt met andere producten om een indicatie te geven van de prijzen. Ondanks dat de methoden geverifieerd zijn door Michel Dittrich, kan het nog steeds zo zijn dat er verschillen zijn tussen de werkelijkheid en de gehanteerde waarden. Echter, de gehanteerde kosten dienen als richtwaarde. Ieder project is namelijk maatwerk en zodoende zullen de kosten van een project veelal verschillen met de gehanteerde waarden. Mogelijk kunnen projectmatig de kosten (wellicht aangevraagd middels offertes) gehanteerd worden in het model. De richtwaarden worden valide geacht, aangezien deze zijn gebaseerd op experts, offertes en ramingsprogramma's. De gegeven waarden zullen zodoende in de praktijk voorkomen en worden dus reëel geacht.

8.4 IMPLICATIES

In dit onderzoek is aangetoond wat de bijdrage is van een aantal brandtechnische ingrepen op de vluchtveiligheid binnen luchtdichte appartementen. Aansluitend op het onderzoek van Vincent van den Brink, lijkt er een duidelijk verband te zijn tussen de luchtdichtheid en de vluchtveiligheid. Zoals aangetoond in dit onderzoek, zijn er echter mogelijkheden om de vluchtveiligheid binnen appartementen te verhogen. Mogelijke gevolgen van dit onderzoek, omvatten aanpassingen in de regelgeving omtrent de brandveiligheid van luchtdichte appartementen, waarbij wellicht nieuwe normen kunnen worden ontwikkeld om de vluchtveiligheid te waarborgen.

8.5 SUGGESTIES VOOR VERVOLGONDERZOEK EN AANBEVELINGEN

Zoals eerder aangegeven, is geen iteratief proces toegepast, in relatie tot de equivalentie ratio en de bepaling van de equivalente oppervlakte. Dit zou een mogelijke verbetering kunnen zijn in het spreadsheet. Een

vervolgonderzoek naar het effect van de varianten, waarbij een iteratief proces wordt uitgevoerd, kan voor toegevoegde waarde zorgen.

Mogelijk kan een onderzoek worden gedaan naar andere brandtechnische ingrepen om de vluchtveiligheid te verhogen. Hierbij kan gedacht worden aan de toepassing van brandwerend gemodificeerd meubilair, druk gestuurde kleppen, de implicaties van schuifdeuren als voordeur of andere ingrepen.

Mogelijk kan een aanpassing in de wet- en regelgeving omtrent luchtdichte woongebouwen worden doorgevoerd of kunnen normcommissies worden opgesteld om handvatten te bieden aan de ingenieurswereld, voor de bepaling van de vluchtveiligheid in luchtdichte appartementen.

Daarnaast wordt de suggestie gedaan om rookmelder gestuurde passieve zomernachtventilatie en een rookmelder gestuurde bypass, werktuigbouwkundig uit te werken, zodat deze variant in de praktijk gecertificeerd toegepast kan worden.

9. LITERATUURLIJST

- abtWassenaar. (2021, 29 april). *Oosterhoff Group*. abtWassenaar.nl. <https://www.abtwassenaar.nl/over-ons/oosterhoff-group>
- Babrauskas, Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). Typical Upholstered furniture energy releases [Grafiek]. In *Enclosure Fire Dynamics*.
- Buro Maak. (z.d.). *De 5 manieren waarop ontwerpkosten worden bepaald*. Geraadpleegd op 6 mei 2022, van <https://www.burommaak.nl/de-5-manieren-waarop-ontwerpkosten-worden-bepaald#:~:text=Dit%20percentage%20ligt%20tussen%20de,er%20achteraf%20een%20overrekening%20plaatsvinden>.
- DiNenno, P. J., National Fire Protection Association, & Society of Fire Protection Engineers. (2008). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (4de editie). National Fire Protection Association.
- Duco. (z.d.). *DucoGrille Nightvent* [Afbeelding]. Duco.nl. <https://www.duco.eu/nl/producten/intensieve-ventilatie/muur-en-raamroosters/ducogrille-nightvent/ducogrille-nightvent>
- Duco. (2016a). *Muur- en raamroosters*. <https://www.nbd-online.nl/sites/default/files/downloads/2016/10/07/brochure-muur-en-raamroosters-%28nl%29-LowRes.pdf>
- Duco. (2016b). [Schematisering luchtdoorlaat]. Duco.eu. <https://www.nbd-online.nl/sites/default/files/downloads/2016/10/07/brochure-muur-en-raamroosters-%28nl%29-LowRes.pdf>
- Duco. (2021, augustus). *Technische Fiche - DucoGrille Nightvent*. https://www.duco.eu/Wes/CDN/1/Attachments/TF%20DucoGrille%20NightVent_nl_637648729404039353.pdf
- Ebus, J., Geertsema, T., Jansen, V., Leene, M., Van Liempd, R., Polman, M., De Witte, L., & Wolfs, L. (2020, september). *Rookverspreiding in woongebouwen - Hoofdrapport van de praktijkexperimenten in een woongebouw met in pandige gangen*. Instituut Fysieke Veiligheid. <https://archief.nipv.nl/wp-content/uploads/sites/2/2022/03/20200916-BA-Rookverspreiding-in-woongebouwen-hoofdrapport.pdf>
- Glaswebwinkel. (2021, 29 juni). *Met de windlast berekening het juiste glas* / *Glaswebwinkel.nl*. Geraadpleegd op 12 april 2022, van <https://www.glaswebwinkel.nl/windlast-berekening-glas-dikte-enkelglas-en-dubbelglas/>

Hagen, R. (2009). *Woningsprinklers in Nederland - Wat bestuurders en beleidsmakers moeten weten over*

woningsprinklers. https://hetccv.nl/fileadmin/Bestanden/Certificatie-en-Inspectie/Schema_s/Woningsprinklerinstallateurs/Wat_bestuurders_en_beleidsmaker_moeten_weten-3.pdf

Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall, J. R., Jr, Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M., Torero, J. L., Watts, J. M., Jr, & Wieczorek, C. J. (2015). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (Vol. 5). Springer Publishing.

Instituut Fysieke Veiligheid, & De Witte, L. (2016, juli). *Sprinklers in de woonomgeving* (R. Hagen, Red.). Instituut Fysieke Veiligheid. <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20160701-BA-Sprinklers-in-de-woonomgeving.pdf>

Jongeleen, L. (2015, januari). *Luchtdichtheid beïnvloedt ook de brandveiligheid*. Nieman.nl. Geraadpleegd op 12 april 2022, van https://www.nieman.nl/wp-content/uploads/2015/02/RaamDeur_2015-01_Luchtdichtheid-beïnvloedt-ook-de-brandveiligheid.pdf

Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press LLC.

Kiwa. (z.d.). *Waarom moet ik certificeren?* Kiwa.com. Geraadpleegd op 17 mei 2022, van <https://www.kiwa.com/nl/nl/diensten/certificering/waarom-moet-ik-certificeren/#:%7E:text=Een%20certificaat%20geeft%20vertrouwen.,en%20dat%20u%20duurzaamheid%20nastreeft>.

Kuindersma, P., & Nieman, H. M. (2013). *SBR: Publicatie Luchtdicht Bouwen*. SBR. <https://isso.nl/publicatie/luchtdicht-bouwen/2013?query=luchtdicht+bouwen>

Liu, W., Lian, Z., & Deng, Q. (2014, januari). *Use of mean skin temperature in evaluation of individual thermal comfort for a person in a sleeping posture under steady thermal environment*. Indoor and Built Environment. <https://doi.org/10.1177/1420326X14527975>

Loss Prevention Certification Board, Centrum voor criminaliteitspreventie en veiligheid, Nederlandse Vereniging voor Brandweerzorg en Rampenbestrijding, Landelijk Netwerk Brandpreventie, Nederlandse Organisatie Voor Brandveiligheid, UNETO/VNI, Vereniging van Inspectie instellingen voor Veiligheid en Brandveiligheid, & Verbond van Verzekeraars. (2010). *Memorandum 59A - Sprinklers voor de woonomgeving*. Centrum van Criminaliteitspreventie en Veiligheid. https://hetccv.nl/fileadmin/Bestanden/Certificatie-en-Inspectie/Schema_s/Technische_Bulletins/memorandum59a.pdf

Nieman Raadgevende Ingenieurs. (2021, 2 juli). *Luchtdicht bouwen*. Nieman. Geraadpleegd op 14 februari 2022, van <https://www.nieman.nl/specialismen/bouwtechniek-en-praktijk/luchtdicht-bouwen/>

Normcommissie 351 001 “Technische grondslagen voor Bouwconstructies”. (2019, november). *NEN-EN 1991–1–*

2+C3 - Eurocode 1: Belastingen op constructies - Deel 1–2: Algemene belastingen - Belasting bij brand.

Nederlands normalisatie instituut. [https://connect-nen-](https://connect-nen-nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=3622773&RNR=3622773&token=ffa9cca7-26f3-4fd5-9960-e5cf7723ee86&type=pdf#pagemode=bookmarks)

[nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=3622773&RNR=3622773&token=ffa9cca7-26f3-4fd5-9960-e5cf7723ee86&type=pdf#pagemode=bookmarks](https://connect-nen-nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=3622773&RNR=3622773&token=ffa9cca7-26f3-4fd5-9960-e5cf7723ee86&type=pdf#pagemode=bookmarks)

Normcommissie 353 088 “Rookbeheersingssystemen”. (2005, juni). *NEN-EN 12101–6 - Installaties voor rook- en*

warmtebeheersing - Deel 6: Specificatie voor systeemsamenstelling van overdrukinstallaties. Nederlands

Normalisatie Instituut.

[https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=470360&RNR=97848&token=d83e335a-1034-](https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=470360&RNR=97848&token=d83e335a-1034-49c2-bf72-70b48fe139dd&type=pdf#pagemode=bookmarks)

[49c2-bf72-70b48fe139dd&type=pdf#pagemode=bookmarks](https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=470360&RNR=97848&token=d83e335a-1034-49c2-bf72-70b48fe139dd&type=pdf#pagemode=bookmarks)

Normcommissie 351007 “Brandveiligheid van Bouwwerken”. (2015, juni). *NEN 6060 - Brandveiligheid van grote*

brandcompartimenten. Nederlands Normalisatie Instituut.

[https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=204974&RNR=204974&token=605bec16-b8f2-](https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=204974&RNR=204974&token=605bec16-b8f2-4e08-a4b3-ffaa94f43d33&type=pdf#pagemode=bookmarks)

[4e08-a4b3-ffaa94f43d33&type=pdf#pagemode=bookmarks](https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=204974&RNR=204974&token=605bec16-b8f2-4e08-a4b3-ffaa94f43d33&type=pdf#pagemode=bookmarks)

Normcommissie 351007 “Brandveiligheid van Bouwwerken”. (2016, juni). *NEN 6079 - Brandveiligheid van grote*

brandcompartimenten - Risicobenadering. Nederlands Normalisatie Instituut.

[https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=579402&RNR=220344&token=229ffa40-5100-](https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=579402&RNR=220344&token=229ffa40-5100-4b7c-a8ae-a117599186a5&type=pdf#pagemode=bookmarks)

[4b7c-a8ae-a117599186a5&type=pdf#pagemode=bookmarks](https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=579402&RNR=220344&token=229ffa40-5100-4b7c-a8ae-a117599186a5&type=pdf#pagemode=bookmarks)

Normcommissie 351074 “Klimaatbeheersing in gebouwen”. (2008, december). *NEN 2686:1988/A2:2008 -*

Luchtdoorlatendheid van gebouwen Meetmethode. NEN. [https://connect-nen-](https://connect-nen-nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=337316&RNR=7179&token=6efae632-ff64-4197-99eb-4e80eb85f610&type=pdf#pagemode=bookmarks)

[nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=337316&RNR=7179&token=6efae632-ff64-4197-](https://connect-nen-nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=337316&RNR=7179&token=6efae632-ff64-4197-99eb-4e80eb85f610&type=pdf#pagemode=bookmarks)

[99eb-4e80eb85f610&type=pdf#pagemode=bookmarks](https://connect-nen-nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=337316&RNR=7179&token=6efae632-ff64-4197-99eb-4e80eb85f610&type=pdf#pagemode=bookmarks)

Normcommissie 351089 “Blusinstallaties”. (2014, april). *NEN 2077: Vaste brandblusinstallaties -*

Sprinklerinstallaties voor de woonomgeving - Ontwerp, installatie en onderhoud. NEN. [https://connect-nen-](https://connect-nen-nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=558888&RNR=191429&token=044e7e51-b174-468b-a98e-950ec223efbc&type=pdf#pagemode=bookmarks)

[nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=558888&RNR=191429&token=044e7e51-b174-](https://connect-nen-nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=558888&RNR=191429&token=044e7e51-b174-468b-a98e-950ec223efbc&type=pdf#pagemode=bookmarks)

[468b-a98e-950ec223efbc&type=pdf#pagemode=bookmarks](https://connect-nen-nl.nl/hhg.idm.oclc.org/standard/openpdf/?artfile=558888&RNR=191429&token=044e7e51-b174-468b-a98e-950ec223efbc&type=pdf#pagemode=bookmarks)

Peacock, R. D., Reneke, P. A., & Forney, G. P. (2021, november). *CFAST - Consolidated Model of Fire And Smoke*

Transport (Version 7) Volume 2: User’s Guide. National Institute of Standards and Technology.

<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/TechnicalNotes/NIST.TN.1889v2.pdf>

Programmaraad "Stelsel energieprestatie gebouwen". (2022, januari). NTA 8800 - Energieprestatie van

gebouwen - Bepalingsmethode. Nederlands Normalisatie Instituut.

<https://connect.nen.nl/standard/openpdf/?artfile=3659991&RNR=3659991&token=efee205c-9384-45ef-85d9-c2a5cf549ad2&type=pdf#pagemode=bookmarks>

Purser, D. A. (2016, september). *Toxic Combustion Product Yields as a Function of Equivalence Ratio and Flame Retardants in Under-Ventilated Fires: Bench-Large-Scale Comparisons*. Hartford Environmental Research.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6431963/>

Salasinska, K., Borucka, M., Leszczyńska, M., Zatorski, W., Celiński, M., Gajek, A., & Ryszkowska, J. (2017).

Analysis of flammability and smoke emission of rigid polyurethane foams modified with nanoparticles and halogen-free fire retardants. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 130(1), 131–141.

<https://doi.org/10.1007/s10973-017-6294-4>

Särdqvist, Karlsson, B., & Quintiere, J. G. (2000). Typical mattress energy release rate [Grafiek]. In *Enclosure Fire Dynamics*.

SBR, Tromp, A. J., & Van Mierlo, R. J. M. (1984). Relatie tussen rookdichtheid en loopsnelheid volgens Jin [Grafiek]. In *Menselijk gedrag bij Brand*.

Spectrum Fire Protection. (2017). [Concealed-sprinklerhead]. spectrumforfireprotection.com.

<https://spectrumforfireprotection.com/blog/concealed-fire-sprinkler-heads-how-do-they-work/>

Staffansson, L. (2010). *Selecting Design Fires*. Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University. <https://lucris.lub.lu.se/ws/files/5957828/1736728.pdf>

Stichting Kennisbank Bouwfysica. (2009a). *Tabellarium Warmte*. <https://klimapedia.nl/wp-content/uploads/2013/10/W-tabellarium.pdf>

Stichting Kennisbank Bouwfysica. (2009b, juli). *Tabellarium Fire Safety Engineering*. <https://klimapedia.nl/hulpmiddel/fire-safety-engineering-tabellarium/>

Tenbült, N. (2017, januari). *Impact of the balanced mechanical ventilation system on overpressure in airtight houses in case of fire*. Technische Universiteit Eindhoven.

Tevreden.nl. (z.d.). *Waarom de vijfpuntsschaal? Voor- en nadelen op een rijtje*. Geraadpleegd op 6 mei 2022, van <https://www.tevreden.nl/kennisbank/onderzoek/waarom-de-vijfpuntsschaal/>

The Swedish National Board of Housing, Building and Planning. (2013). *The Swedish National Board of Housing, Building and Planning's general recommendations on the analytical design of a building's fire protection, BBRAD*. <https://www.boverket.se/en/start/publications/publications/2013/the-swedish-national-board-of-housing-building-and-plannings-general-recommendations-on-the-analytical-design-of-a-buildings-fire-protection-bbrad/>

Tromp, A. J., & Van Mierlo, R. J. M. (2013). *Fire Safety Engineering* (1ste editie). Eburon.

Unica. (2019, 24 oktober). *Typen sprinklers*. Geraadpleegd op 23 februari 2022, van <https://www.unica.nl/fire-safety/actueel/Typen-sprinklers>

Van den Brink, V. (2015, april). *Fire safety and suppression in modern residential buildings*. Technische Universiteit Eindhoven.

Van Herpen, R. A. P. (2005a). Intreeverliezen [Illustratie]. In *LU 20 - Meerzone Luchtstroommodellen*.

Van Herpen, R. A. P. (2005b, augustus). *LU-20; Meerzone luchtstroommodellen*. Kennisbank Bouwfysica.
<https://klimapedia.nl/module/meerzone-luchtstroommodellen/>

Van Herpen, R. A. P. (2007, februari). *B-17; Fire Safety Engineering; Rookdichtheid en zichtlengte*. Kennisbank Bouwfysica. <https://klimapedia.nl/module/rookdichtheid-en-zichtlengte/>

Van Herpen, R. A. P. (2017, maart). *Hoe veilig is vluchtveilig? Noodzakelijke marges als gevolg van onzekere randcondities*. Securitymanagement.nl. [http://www.fellowfse.nl/publicaties/hoe-veilig-is-vluchtveilig#:~:text=De%20benodigde%20vluchttijd%20\(RSET\)%20kan,aan%20de%20hand%20hiervan%20bepaald.](http://www.fellowfse.nl/publicaties/hoe-veilig-is-vluchtveilig#:~:text=De%20benodigde%20vluchttijd%20(RSET)%20kan,aan%20de%20hand%20hiervan%20bepaald.)

Van Herpen, R. A. P. (2022a). *Equivalente Lekoppervlakte*. Technische Universiteit Eindhoven.
[Ongepubliceerd document]

Van Herpen, R. A. P. (2022b, januari). *Luchtdichtheid, Sa en S200 en ventilatie*. Ruud van Herpen.
[Ongepubliceerd document]

Van Herpen, R. A. P., & Van de Nes, R. (2011, april). *CFD voor brandsimulaties in parkeergarages - een betrouwbaar hulpmiddel?* Nieman Raadgevende Ingenieurs. https://www.nieman.nl/wp-content/uploads/2012/01/Bouwfysica-2011-4_CFD-voor-brandsimulati

Waterleidingsprinkler. (2017, 19 april). [Sprinkler in de woonomgeving]. [waterleidingsprinkler.nl](https://www.waterleidingsprinkler.nl/actueel/2017/4/mooie-doorbraken-in-waterleidingsprinklers-voor-woningen).
<https://www.waterleidingsprinkler.nl/actueel/2017/4/mooie-doorbraken-in-waterleidingsprinklers-voor-woningen>