BRANDONDERZOEK

Methodisch onderzoeken van brandoorzaak en brandverloop

Ing. P.B. Reijman

VAKMEDIANET

WOORD VOORAF

Brandonderzoek is heel belangrijk in de Nederlandse samenleving, vooral uit juridisch, sociaal en economisch oogpunt. Zowel publiek- als privaatrechtelijk is hoogwaardig brandonderzoek zelfs essentieel te noemen. Gestructureerd uitgevoerd brandonderzoek is daarnaast wezenlijk voor het samenstellen van brandstatistieken. Betrouwbare statistieken vormen de basis voor regelgeving en opleidingen op brandgebied.
Dit handboek biedt hulp bij het verrichten van brandonderzoek. Deze uitgave behandelt het onderzoeken en rapporteren van brandaspecten als oorzaken, verloop, preventie, verantwoordelijkheid en aansprakelijkheid. Brandonderzoek is een zeer gespecialiseerde onderzoekstak waarbij een breed spectrum aan kennis nodig is. Onmisbaar is bijvoorbeeld kennis over de fysica van branden, het gedrag van materialen en constructies onder brandomstandigheden en (werktuig)bouwkundige zaken.
In dit boek staan richtlijnen en aanbevelingen om branden veilig en systematisch te onderzoeken en er uniform over te rapporteren. De beschreven onderzoeksmethode is afgeleid uit de Amerikaanse standaard NFPA 921 'Guide for Fire and Explosions Investigations'. Ook heb ik buitenlandse literatuur geraadpleegd om de laatste stand van wetenschap en techniek op dit vakgebied vast te leggen. Niet alle facetten van het brandonderzoek worden in de volle breedte behandeld. Ik hoop dat vanuit het huidige onderzoekspotentieel reacties zullen komen om een volgende editie van het boek in dit opzicht completer te maken.
Nu al ben ik dank verschuldigd aan de Politieacademie te Zutphen voor suggesties met betrekking tot de inhoud van dit boek. Verder wil ik diverse DGMR-collega's bedanken voor hun tekst- en beeldmateriaal in dit boek. Ing. Johan Koudijs (brandwerende glasconstructies), Michael Haas (branddetectie) en ing. Frank Jakobs (rook- en warmteafvoerinstallaties) hebben bijdragen geleverd aan hoofdstuk 3, 'Gebouwen en installaties'. Ir. Sander van Rosmalen (gaschromatografie) en ir. Peter van de Leur (modellering) hebben bijdragen geleverd aan hoofdstuk 4, 'Brandoorzaken'. Tot slot ben ik mr. Jasper Backx en mr. Mark Ripmeester van Backx en Ripmeester Verzekeringsadvocaten erkentelijk voor hun bijdrage aan hoofdstuk 8, 'Juridische aspecten'.

November 2008
Ing. P.B. Reijman

Brandonderzoek_2019_POD.indb V 21-08-19 11:00

INHOUD

INLEIDING XIII

Hoofdstuk 1 BRANDFYSICA 1

1.1 BRANDSTOF 2
1.1.1 Vaste brandstoffen 3
1.1.2 Vloeibare brandstoffen 4
1.1.3 Gasvormige brandstoffen 5

1.2 ZUURSTOF 5

1.3 ONTSTEKING 6

1.4 WARMTEOVERDRACHT 7
1.4.1 Conductie 7
1.4.2 Convectie 9
1.4.3 Warmtestraling 10

1.5 SAMENVATTING 12

Hoofdstuk 2 BRANDVERLOOP 13

2.1 BRANDFASEN 14
2.1.1 Initiëring 15
2.1.2 Ontwikkelingsstadium 15
2.1.3 Brandperiode 18
2.1.4 Doofperiode 18

2.2 BRANDONTWIKKELING 19
2.2.1 Vuurbelasting 19
2.2.2 Heat release rate 20
2.2.3 Locatie van brandhaard in brandcompartiment 20
2.2.4 Verbrandingsproducten 22

2.3 BRANDPATRONEN 22
2.3.1 Door pluim veroorzaakte brandpatronen 22
2.3.2 Door ventilatie veroorzaakte brandpatronen 24
2.3.3 Spatten van beton 24
2.3.4 Brandpatronen aan deuren 25
2.3.5 Brandpatronen in vloeren 25
2.3.6 Brandpatronen van brandversnellers in vloeroppervlakken 26
2.3.7 Misvattingen rond brandsporen 27

2.4 EXPLOSIES 27
2.4.1 Fysische explosies 28
2.4.2 Chemische explosies 29

2.5 LEERZAME BRANDEN MET SPECIFIEK BRANDVERLOOP 32
2.5.1 Volendambrand 32
2.5.2 Brand/explosie aan Flevoweg in Leiden 38
2.5.3 Leren van branden 42

2.6 SAMENVATTING 42

Brandonderzoek_2019_POD.indb VII 21-08-19 11:00

Hoofdstuk 3 GEBOUWEN EN INSTALLATIES 43

3.1 BRANDVEILIGHEIDSMAATREGELEN 44
3.1.1 Bouwregelgeving en regelgeving voor brandveilig gebruik 45
3.1.2 Passieve brandveiligheidsmaatregelen 46
3.1.2.1 Materiaaleigenschappen 46
3.1.2.2 Brandwerendheid 49
3.1.2.3 Brandcompartimenten 50
3.1.2.4 Glasconstructies 50
3.1.2.5 Brandkleppen 52
3.1.3 Actieve brandveiligheidsmaatregelen 54
3.1.3.1 Automatische sprinklerinstallaties 54
3.1.3.2 Automatische gasblusinstallaties 54
3.1.3.3 Brandmeld-, inbraak- en ontruimingsalarminstallaties 55
3.1.3.4 Rook- en warmteafvoerinstallaties 66
3.1.3.5 Overdruksystemen 70

3.2 GASSYSTEMEN 71
3.2.1 Aardgas 71
3.2.2 Leidingsystemen en appendages 72
3.2.3 Propaan/butaan 73

3.3 SAMENVATTING 73

Hoofdstuk 4 BRANDOORZAKEN 75

4.1 BRANDWEERSTATISTIEKEN 76

4.2 BRANDSTICHTING 78
4.2.1 Motieven voor brandstichting 78

4.3 TECHNISCHE BRANDOORZAKEN 81
4.3.1 Elektrische oorzaken van branden 81
4.3.2 Basisbegrippen van elektriciteit 82
4.3.3 Overbelasting/oververhitting 84
4.3.4 Elektrische ontladingen 85
4.3.5 Statische elektriciteit 90

4.4 MECHANISCHE BRANDOORZAKEN 91
4.4.1 Wrijvingswarmte 92
4.4.2 Stralingswarmte 92
4.4.3 Mechanische bewerkingen 92

4.5 CHEMISCHE BRANDOORZAKEN 94
4.5.1 Reactieve chemische stoffen 94
4.5.2 Zelfopwarming 95

4.6 SAMENVATTING 96

Hoofdstuk 5 METHODISCH BRANDONDERZOEK 97

5.1 ONDERZOEKSMETHODE 98

5.2 ROL VAN ONDERZOEKER 99

5.3 BRANDONDERZOEK PLANNEN 101

Brandonderzoek_2019_POD.indb VIII 21-08-19 11:00

5.4 INFORMATIEBRONNEN 102

5.5 TACTISCH BRANDONDERZOEK 102

5.6 TECHNISCH BRANDONDERZOEK 104
5.6.1 Veiligheid tijdens brandonderzoek 104
5.6.2 Onderzoek naar ontstaanslocatie van brand 110
5.6.3 Brandoorzaak bepalen 112
5.6.3.1 Brandstichting 113
5.6.3.2 Technische brandoorzaken 117
5.6.3.3 Mechanische brandoorzaken 118
5.6.3.4 Chemische brandoorzaken 119

5.7 HULPMIDDELEN VOOR ANALYSE 120
5.7.1 Gaschromatografie 120
5.7.1.1 Principe van analysetechniek 120
5.7.1.2 Chromatogram 123
5.7.1.3 Kwalitatieve analyse 123
5.7.1.4 Kwantitatieve analyse 123
5.7.1.5 Mogelijkheden en beperkingen van gaschromatografie 124
5.7.2 Forensische toepassing van computermodellen 124
5.7.2.1 Voorbeelden van brandreconstructies 124
5.7.2.2 Civiele procedures 125
5.7.3 Brandproeven en reconstructies 125
5.7.3.1 Ad-hocproeven 125
5.7.3.2 Brandgedrag van apparaten 126
5.7.3.3 Full scale reconstructies 127
5.7.3.4 Tijdlijnen 127

5.8 SAMENVATTING 127

Hoofdstuk 6 RAPPORTEREN 129

6.1 INLEIDING/VERANTWOORDING 130

6.2 VERMELDING VAN VERKREGEN INFORMATIE 130

6.3 TOEDRACHT 131

6.4 BESCHRIJVING VAN PAND OF OBJECT 131
6.4.1 Bouwtekeningen 132
6.4.2 Fotografie 133

6.5 BESCHRIJVING VAN EXTERNE EN INTERNE FACTOREN 134
6.5.1 Toestand van pand of object 134
6.5.2 In werking zijnde apparatuur 134
6.5.3 Aanwezige personen en reden van aanwezigheid 134
6.5.4 Aard en verdeling van vuurbelasting 135
6.5.5 Aanwezigheid van brandversnellende middelen 136

6.6 BESCHRIJVING VAN BRANDBEELD 136

6.7 BESCHRIJVING VAN INFORMATIE VAN GETUIGEN EN BRANDWEER 137

6.8 OPSTELLEN VAN HYPOTHESES 137

6.9 TOETSING VAN HYPOTHESES 138

Brandonderzoek_2019_POD.indb IX 21-08-19 11:00

	6.10 CONCLUSIE	138
	6.11 SAMENVATTING	138
Hoofdstuk 7	SLACHTOFFERS BIJ BRAND	139
	7.1 MENSELIJK GEDRAG BIJ BRAND	140
	7.1.1 Individu	140
	7.1.2 Groep	141
	7.1.3 Fysieke omgeving	143
	7.1.4 Karakteristieken van brand	144
	7.2 DODEN BIJ BRAND	147
	7.2.1 Crematieproces	148
	7.2.2 Verdachte branden met dodelijke slachtoffers	148
	7.3 ONDERZOEK NAAR BRANDEN MET SLACHTOFFERS	151
	7.3.1 Brandweerinzet met betrekking tot slachtoffers	152
	7.3.2 Brandonderzoek via teamwork	152
	7.4 SAMENVATTING	154
Hoofdstuk 8	JURIDISCHE ASPECTEN	157
	8.1 JURIDISCH KADER VAN BRANDONDERZOEK	158
	8.1.1 Wet- en regelgeving	159
	8.1.2 Juridische en commerciële druk	161
	8.2 GETUIGENVERHOOR	162
	8.3 PUBLIEK-PRIVATE SAMENWERKING	164
	8.3.1 Nationaal Platform Criminaliteitsbeheersing	165
	8.3.2 Zorgvuldigheid met betrekking tot gegevensuitwisseling	166
	8.4 SAMENVATTING	167
Hoofdstuk 9	ERVARINGEN EN AANBEVELINGEN	169
	9.1 DRIE GERUCHTMAKENDE BRANDEN	170
	9.1.1 Brand aan Flevoweg in Leiden	170
	9.1.2 Brand in Volendams café 't Hemeltje	171
	9.1.3 Brand in botenloods De Punt	171
	9.2 OPLEIDINGEN EN ONDERZOEK	173
	9.3 LEREN VAN BRANDEN	174
	9.4 SAMENVATTING	174
	LITERATUUR	175

Brandonderzoek_2019_POD.indb X 21-08-19 11:00

Bijlage A	WET VAN 24 OKTOBER 1997 TOT VASTSTELLING VAN DE WET PARTICULIERE BEVEILIGINGSORGANISATIES EN RECHERCHEBUREAUS	177
Bijlage B	GEDRAGSCODE EXPERTISEORGANISATIES	187
Bijlage C	GEDRAGSCODE PERSOONLIJK ONDERZOEK	193
Bijlage D	CHECKLIST BRANDONDERZOEK	199
Bijlage E	SCHEMA BRANDONDERZOEK	203
Bijlage F	ORGANISATIES	205
	REGISTER	207

Brandonderzoek_2019_POD.indb XI 21-08-19 11:00

INLEIDING

Onderzoek doen naar het ontstaan en verloop van branden vergt veel algemene en specialistische kennis en ervaring. Een brandonderzoeker moet minimaal een hoop kennis bezitten over de fysica van branden, het gedrag van materialen en constructies onder brandomstandigheden en de (werktuig)bouwkunde. In dit boek wordt het doen van brandonderzoek en het schrijven van brandrapporten behandeld. Daarbij komt onder andere aan bod hoe brandsporen moeten worden beoordeeld en welke juridische zaken een rol spelen bij brandonderzoek.
Dit boek helpt brandonderzoekers een mening te vormen over brandoorzaken, brandverloop, brandpreventie en verantwoordelijkheid en aansprakelijkheid voor branden. Deze uitgave wil vooral veilig en systematisch brandonderzoek bevorderen. Het geeft daar richtlijnen voor en doet er aanbevelingen toe. In de volgende hoofdstukken en bijlagen komen de diverse elementen van brandonderzoek logisch aan de orde, van de brandfysica tot en met het leren van de branden zelf:

Hoofdstuk 1 – Brandfysica

Dit hoofdstuk gaat over de drie bouwstenen van elke brand: brandstof, zuurstof en ontsteking. Het gaat onder meer in op de verschijningsvormen en specifieke kenmerken van die brandstof. Ook wordt de invloed van zuurstof op het brandverloop bekeken. De ontstekingsbron en het te ontsteken materiaal komen in termen van energie aan de orde. Ten slotte worden de diverse vormen van warmteoverdracht behandeld en hoe ze een rol spelen in de ontwikkeling van branden.

Hoofdstuk 2 – Brandverloop

Inzicht in het verloop van branden is een wezenlijk onderdeel van brandonderzoek. In dit hoofdstuk wordt een brand in een aantal fasen opgedeeld en worden de thermische en fysische omstandigheden van de diverse fasen besproken. Het is voor een onderzoeker van groot belang dat hij in de praktijk een brand kan 'lezen' in de fasen die deze brand heeft doorlopen. Ook worden de tijdens de diverse fasen ontstane brandpatronen behandeld.

Hoofdstuk 3 – Gebouwen en installaties

In dit hoofdstuk worden de diverse technische systemen van een gebouw beschreven. Het betreft hier reguliere technische installaties en technische maatregelen die zijn voorgeschreven om de brandveiligheid te vergroten. Deze maatregelen zijn mede van invloed op het verloop van branden en de ontstane brandsporen. Daarom wordt ingegaan op de verschillende systemen met hun doel en werkend principe. Ook worden brandtechnische begrippen nader verklaard.

Hoofdstuk 4 – Brandoorzaken

Er zijn verschillende soorten oorzaken van branden, die worden aangegeven in de Nederlandse statistieken. Er wordt in dit hoofdstuk aandacht besteed aan technische brandoorzaken maar ook aan (on)opzettelijke brandstichting. Aangezien van de technische brandoorzaken veruit de meeste een elektrotechnische achtergrond hebben, wordt het onderwerp elektriciteit en brand nader uitgewerkt. Vervolgens komen brandgevaarlijke werkzaamheden en chemische branden aan bod.

Hoofdstuk 5 – Methodisch brandonderzoek

De wetenschappelijke onderzoeksmethode wordt in het begin van dit hoofdstuk beschreven. Deze algemene methode uit de fysische wetenschap is zeer bruikbaar binnen het brandonderzoek. De methode dwingt de onderzoeker tijdens de analyse van de oorzaak of het verloop van de brand systematisch te werk te gaan.
Vervolgens wordt in dit hoofdstuk het daadwerkelijke onderzoek beschreven, onderverdeeld in een tactisch en een technisch onderzoek. De diverse rollen van de betrokken brandonderzoekers komen daarbij aan bod, evenals de verschillende en soms tegengestelde belangen van die onderzoekers. Ook wordt in dit hoofdstuk aandacht geschonken aan de persoonlijke veiligheid van de brandonderzoekers bij het doen van onderzoek op brandlocaties. Verder wordt ingegaan op het onderzoek op locatie naar de plek waar een brand is ontstaan en naar de brandoorzaak. Hierbij wordt een aantal analysetechnieken besproken.

Brandonderzoek_2019_POD.indb XIII 21-08-19 11:00

Hoofdstuk 6 – Rapporteren

De kwaliteit van het brandrapport is een bepalende factor voor de (juridische) beoordeling van het brandonderzoek. Dit hoofdstuk geeft aan welke onderwerpen in een brandrapport staan en hoe de brandonderzoeker branden analyseert en conclusies formuleert.

Hoofdstuk 7 – Slachtoffers bij brand

Ieder jaar vallen er vele slachtoffers bij branden, waaronder brandweerlieden. Dit betekent dat brandslachtoffers dikwijls ook een rol spelen in brandonderzoeken. Om de verwondingen van brandslachtoffers te kunnen beoordelen is kennis van het menselijke gedrag tijdens branden noodzakelijk. De diverse factoren die dit gedrag beïnvloeden, worden in dit hoofdstuk beschreven. Bovendien worden de effecten van brandproducten als warmte en rook op mensen beschreven. Het kan voorkomen dat een brandonderzoeker aan de hand van dodelijke verwondingen van een slachtoffer wordt gevraagd een uitspraak te doen over bijvoorbeeld de duur van de brand. Om enig idee te geven over het gedrag van het menselijke lichaam op brandomstandigheden, wordt in dit hoofdstuk het crematieproces beschreven. Dit proces geeft houvast om dergelijke forensische vraagstukken te kunnen behandelen.

Hoofdstuk 8 – Juridische aspecten

Veel brandonderzoeken zullen op enig moment deel uitmaken van een civiel- of strafrechtelijke procedure. Daarom wordt in dit hoofdstuk het juridische kader van een brandonderzoek in kaart gebracht, met name vanuit het perspectief van aansprakelijkheids- en verzekeringsrechtszaken. Daarbij wordt het spanningsveld behandeld waarin dergelijke onderzoeken worden uitgevoerd. Verder zullen brandonderzoekers kunnen worden opgeroepen als getuige of getuige-deskundige. Ook dit onderdeel van het vak van brandonderzoeker wordt in dit hoofdstuk besproken. Tot slot gaat dit hoofdstuk in op publiek-private samenwerking binnen het brandonderzoek, een actuele ontwikkeling. Vanwege de verschillen in belangen en doelstellingen van de samenwerkende partijen, is het van groot belang dat hun samenwerking in een juridisch kader wordt geplaatst. Een hiervoor opgesteld convenant voor een pilotproject wordt in dit hoofdstuk beschreven.

Hoofdstuk 9 – Ervaringen en aanbevelingen

Er wordt te weinig gebruikgemaakt van kennis over branden die dagelijks plaatsvinden. Daarom worden in dit hoofdstuk aanbevelingen gedaan om deze kennis meer gestructureerd te verzamelen en vast te leggen. Om branden structureel te onderzoeken is een breed onderzoekspotentieel nodig en is het van groot belang dat opleidingen over dit onderwerp hierop aansluiten. Verder gaat dit hoofdstuk in op branden die veel media-aandacht krijgen. Hierbij is er vaak sprake van publieke, onvoldoende onderbouwde meningsvorming over de oorzaak van en de verantwoordelijken voor die branden. De brandonderzoeker moet intussen objectief onderzoek verrichten en een objectief brandrapport schrijven. In dit hoofdstuk worden drie bekende voorbeelden van dit type branden besproken.

Bijlage A – Wet van 24 oktober 1997 tot vaststelling van de wet particuliere beveiligingsorganisaties en recherchebureaus

Deze bijlage biedt de particuliere beveiligingsorganisaties en recherchebureaus in Nederland een wettelijk kader.

Bijlage B – Gedragscode Expertiseorganisaties

De gedragscode in deze bijlage is opgesteld door het Verbond van Verzekeraars. Het doel van deze code is schade- en toedrachtexperts te laten handelen conform de Gedragscode Verzekeraars. Zo dient een onderzoeker gedegen en objectief schadeonderzoek te verrichten en vervolgens tot een gedegen en objectief schaderapport te komen, op een zorgvuldige, discrete en objectieve manier.

Bijlage C – Gedragscode Persoonlijk Onderzoek

In deze gedragscode, die ook is opgesteld door het Verbond van Verzekeraars, staan uitgangspunten voor het instellen en uitvoeren van een persoonlijk onderzoek. Het is bestemd voor verzekeraars, onderzoeksbureaus en verzekerden bij schadeonderzoeken die de persoonlijke

Brandonderzoek_2019_POD.indb XIV 21-08-19 11:00

levenssfeer raken. Centraal staat het spanningsveld tussen de onderzoeksbelangen en in hoeverre de persoonlijke levenssfeer van betrokken personen wordt geraakt.

Bijlage D – Checklist brandonderzoek

De checklist van deze bijlage verleent de brandonderzoeker een handvat om de grote lijn in de gaten te blijven houden tijdens zijn werkzaamheden. Het geeft een algemeen onderzoeks-kader aan en is zeker niet een uitputtende lijst van wat de brandonderzoeker te doen staat. Elk brand- en onderzoeksgeval is namelijk uniek en kan de brandonderzoeker confronteren met onverwachte vragen, problemen en aandachtspunten. De brandonderzoeker moet zich daarom nooit beperken tot de in deze checklist aangegeven zaken.

Bijlage E – Schema brandonderzoek

Deze bijlage omvat een schematisch overzicht van de brandonderzoeksfasen. Het schema is net als de checklist van bijlage D bedoeld als een handvat en niet als een complete weergave van het werk van brandonderzoekers. Daarvoor is de alledaagse praktijk van het brandon-derzoek te complex en grillig. Ook hier geldt dus dat de brandonderzoeker oog moet blijven houden voor zaken die niet in dit schema aan de orde komen.

Bijlage F – Organisaties

In deze bijlage treft u de bereikbaarheidsgegevens aan van diverse belangrijke organisaties op het gebied van brandonderzoek.

Tussen de hoofdtukken en bijlagen in staat de literatuurlijst. Deze bevat nuttige verwijzingen naar boeken, tijdschriften, losbladigen en websites.

Brandonderzoek_2019_POD.indb XV 21-08-19 11:00

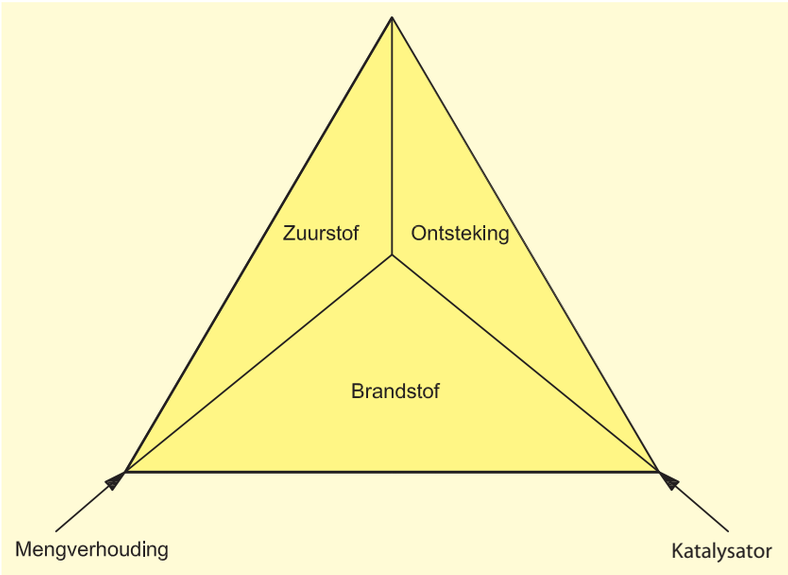
HOOFDSTUK 1

BRANDFYSICA

Om een onderzoek naar de oorzaak en het verloop van branden te kunnen uitvoeren, is wetenschappelijke kennis vereist over de fysica van branden. Aangezien deze brandfysische kennis zeer uitgebreid is, zal in dit boek alleen de basis ervan worden behandeld. De brandonderzoeker zal in ieder geval altijd moeten controleren welke rol lokale omstandigheden hebben gespeeld bij het brandverloop. Specifieke omstandigheden kunnen de reden zijn voor een brandverloop wat afwijkt van een relatief 'normaal' brandverloop. Voorbeelden zijn zeer brandbare materialen of locaties met een bovengemiddeld zuurstofgehalte zoals medische of petrochemische omgevingen. In dit boek wordt bij de beschrijving van het brandproces uitgegaan van min of meer standaard brandstoffen en normale zuurstofgehalten.
In de paragrafen 1.1 tot en met 1.3 zal het brandproces als chemisch proces worden beschreven. Brand als chemisch proces bestaat uit de volgende drie componenten:

- brandstof
- zuurstof
- ontsteking.

Samen vormen deze de zogeheten branddriehoek (zie afbeelding 1.1). Door het beperken of verwijderen van een of meer van de componenten, kan het brandverloop worden beïnvloed. De betreffende brand kan worden gedoofd of zelfs worden voorkomen.



Afbeelding 1.1: De branddriehoek.

Brand is een ongewenste vorm van verbranding, terwijl vuur in veel andere gevallen een gewenste vorm van energie is. De branddriehoek zou eigenlijk een brandvijfhoek moeten zijn, waarin de mengverhouding tussen brandstof en zuurstof en de aanwezige katalysator de ontbrekende zijden uitmaken. De branddriehoek is echter voor het doel van dit hoofdstuk voldoende nauwkeurig. Dat doel is inzicht geven in de diverse chemische en fysische elementen die bij een brand een rol spelen. Een begrip van deze elementen en de invloed ervan op het brandverloop, zorgen ervoor dat een brand in zijn verloop kan worden geanalyseerd en dat inzicht kan worden verkregen in het ontstaan van de brand.
Binnen het brandproces is er verder een belangrijke rol weggelegd voor warmteoverdracht, waarvan de diverse vormen in paragraaf 1.4 worden besproken. In paragraaf 1.5 wordt het hoofdstuk beknopt samengevat.

1.1 BRANDSTOF

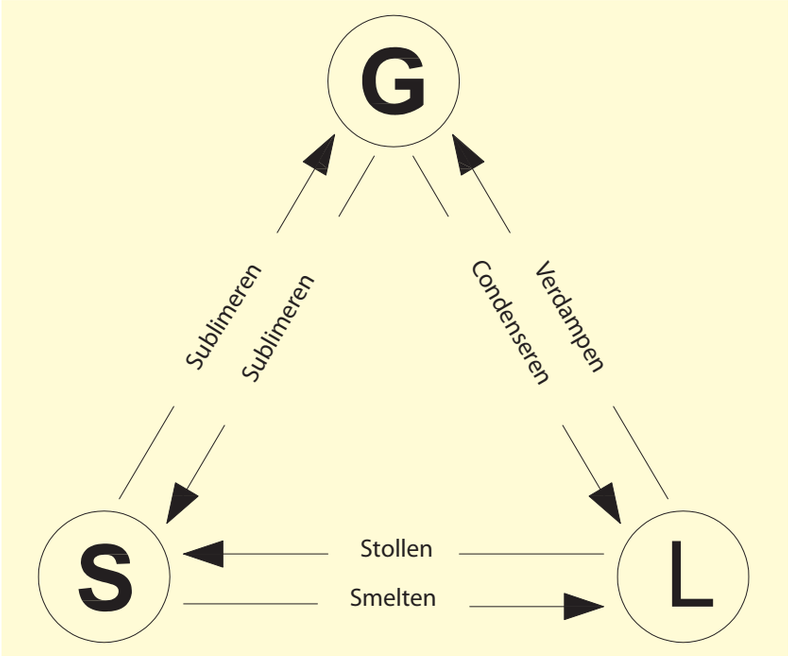
De eerste component van brand is brandstof. Een brandstof kan worden gedefinieerd als een stof die verbranding kan ondergaan en dus een bron van energie is. De meest voorkomende brandstoffen zijn organisch van aard en bevatten koolstof en combinaties van waterstof en

Brandonderzoek_2019_POD.indb Sec1:2 21-08-19 11:00

zuurstof in een variëteit aan mengverhoudingen. De karakteristieken van branden hangen sterk samen met de aggregatietoestand (verschijningsvorm) van de betreffende brandstoffen:

- vaste vorm (hout, kunststof);
- vloeibare vorm (benzine, alcohol);
- gasvorm (aardgas, propaan).

Een schematische weergave van de drie aggregatietoestanden van stoffen biedt afbeelding 1.2. De aggregatietoestand van een materiaal is afhankelijk van temperatuur en druk en kan variëren bij verandering van deze condities.



Afbeelding 1.2: De aggregatietoestanden van stoffen: vast (solid), vloeibaar (liquid) en gasvormig (gaseous).

De normale fase van een materiaal is die bij een temperatuur van 21 °C en een druk van 101,6 kPa (1 atmosfeer op zeeniveau). De vaste fase kenmerkt zich door een duidelijke aantrekkingskracht die de moleculen op elkaar uitoefenen. Deze aantrekkingskracht, ook wel cohesie genoemd, zorgt ervoor dat de moleculen in een raster gerangschikt blijven waarin zij nauwelijks bewegen. Na verwarming worden de moleculen actiever. De cohesie neemt af, waardoor meer ruimte tussen de moleculen ontstaat. De stof bevindt zich nu in de vloeibare fase. Door de verwarming voort te zetten kan de gasvormige fase worden bereikt. In deze fase bewegen de moleculen vrij door de ruimte doordat de onderlinge aantrekkingskracht tussen de moleculen minimaal is. In de volgende subparagrafen worden de verschillende aggregatietoestanden nader omschreven.

1.1.1 VASTE BRANDSTOFFEN

Om een vaste stof te ontsteken zullen daaruit brandbare dampen moeten vrijkomen. Dat kan op twee manieren gebeuren: door smelten en verdampen (thermoplastische kunststoffen) of door pyrolyse, dat wil zeggen ontleding van de vaste stof door verhitting (hout en thermohardende kunststoffen). In beide gevallen moet warmte aan de brandstof worden toegevoegd om de brandbare dampen te vormen. De gevormde damp is in bepaalde mengverhoudingen met zuurstof brandbaar. Ontsteking van het mengsel kan plaatsvinden als er een ontstekingsbron bij komt met voldoende energie of indien de zelfontbrandingstemperatuur van het mengsel wordt bereikt.
De optimaliteit van de verbranding hangt af van de voor de verbranding beschikbare zuurstof. De optimale gas/lucht-verhouding wordt de stoichiometrische gas/lucht-verhouding genoemd. Dit geldt overigens ook voor van nature gasvormige brandstoffen. Bij de stoichiometrische verhouding is de temperatuur van de vlam het hoogst en lopen de verbrandingsreacties ver door. Bij onvoldoende zuurstof is de vlamtemperatuur lager en kunnen (deel)

Brandonderzoek_2019_POD.indb Sec1:3 21-08-19 11:00

reacties niet goed doorlopen. Dat betekent dat er relatief veel restproducten zijn in de vorm van gassen en vaste deeltjes. Die laatste vormen de rook die bij vrijwel alle branden ontstaat. De verbranding van vaste brandstoffen kan optreden volgens twee mechanismen, vlammend of smeulend. Bij een vlammende brand verloopt het verbrandingsproces in veel gevallen min of meer optimaal. Een vaste brandstof in de vorm van een bed is weergegeven in afbeelding 1.3. Bij een smeulende brand is er minder warmteproductie en zijn er geen zichtbare vlammen, maar is er relatief veel rook. Smeulbranden gaan in de regel over in een vlammende brand als voldoende energie is geproduceerd én als voldoende luchttoevoer aanwezig is om het verbrandingsproces te versnellen.
Materialen met een hoge soortelijke massa van een bepaald materiaal geleiden warmte sneller weg van de plaats van ontsteking dan materialen met een lage soortelijke massa. Vurenhout zal daarom bij dezelfde ontstekingsbron eenvoudiger te ontsteken zijn dan eikenhout. Kunststof schuim met een lage soortelijke massa is eenvoudiger te ontsteken dan dezelfde kunststof in massieve vorm met een hoge soortelijke massa.

Afbeelding 1.3: Een brand vanuit een vaste brandstof in de vorm van een bed.

De grootte van een oppervlak voor een gegeven massa (oppervlak/massa) heeft eveneens effect op de hoeveelheid benodigde ontstekingsenergie. Een hoeveelheid schaafkrullen van een houten balk is eenvoudig te ontsteken met een lucifer terwijl de balk zelf zelfs met een gasbrander niet te ontsteken is. Door de gunstige oppervlakte/massa-verhouding zijn hoeken van brandbare materialen eenvoudiger tot ontbranding te brengen dan een vlak oppervlak. Bij verwarming van hout boven de 100 °C zullen zich brandbare gassen vormen. Afhankelijk van de vorm van verwarming zal al dan niet ontbranding van deze gassen plaatsvinden. Bij verwarming zonder open vuur, zoals bij opwarming door warmtestraling, zal de damp of het gas tevens moeten worden verhit tot boven de zelfontbrandingstemperatuur van de dampen of het gas. De zelfontbrandingstemperatuur zal afhankelijk van de houtsoort liggen vanaf circa 300 °C. Bij het raadplegen van literatuur rond ontbrandingstemperaturen van stoffen dient daarom rekening te worden gehouden met de vraag: gelden deze waarden met of zonder aanwezigheid van een vlam of andere bron van ontstekingsenergie?
Voor spontane ontbranding door verwarming met straling van een gas of damp die is gemengd met koude omgevingslucht, dient het brandbare gas te worden verwarmd tot boven zijn zelfontbrandingstemperatuur. Bij verwarming door convectie zal de omgevingslucht al verwarmd zijn, waardoor de temperatuur van de brandbare gassen minder hoog voor zelfontbranding hoeft te zijn.

1.1.2 VLOEIBARE BRANDSTOFFEN

Alcohol en oliën uit gewassen zijn van oudsher bekende vloeibare brandstoffen. Sinds de ontdekking van aardolie en de destillatie hiervan is een enorme variëteit aan brandstoffen beschikbaar. Brandbare vloeistoffen branden evenals vaste stoffen zelf niet, maar de damp ervan is in combinatie met zuurstof brandbaar. Bij verwarming van vloeistoffen zal damp

Brandonderzoek_2019_POD.indb Sec1:4 21-08-19 11:00

worden gevormd. Die komt aan het oppervlak van de vloeistof vrij, waarbij zich een mengsel met omgevingslucht vormt. Dit mengsel is brandbaar en kan door een ontstekingsbron met voldoende energie worden ontstoken of bij het bereiken van de zelfontbrandingstemperatuur van het mengsel spontaan tot ontbranding komen.
Iedere brandbare vloeistof heeft een specifieke temperatuur waarbij voldoende damp vrijkomt om een mengsel te vormen dat bij ontsteking leidt tot een brand die zichzelf in stand houdt. Dit wordt ook wel het vlampunt genoemd. Vloeibare brandstoffen zoals autobenzine hebben een vlampunt van –40 °C, terwijl dieselolie een vlampunt heeft van circa 50 °C. Het is duidelijk dat benzinedamp vrijwel altijd kan worden ontstoken en tot een brand leidt, terwijl dieselolie eerst zal moeten worden verwarmd om een brandbare damp te verkrijgen die vervolgens ontsteekbaar is. Een vloeistofbrand is weergegeven in afbeelding 1.4.

Afbeelding 1.4: Vloeistofbrand.

De mengverhouding van dampen van vloeistoffen met lucht is bepalend voor de ontsteekbaarheid van het mengsel. Deze mengverhouding bevindt zich voor een mengsel binnen specifieke grenzen en wordt het explosiegebied genoemd. Dit gebied wordt begrensd door de onderste en bovenste explosiegrens. Onder de onderste explosiegrens LEL (*Lower Explosion Limit*) is er te veel zuurstof in het mengsel en is er sprake van een te arm mengsel. Boven de bovenste explosiegrens UEL (*Upper Explosion Limit*) is er te weinig zuurstof en dus een te rijk mengsel. De meeste mengsels van brandbare vloeistoffen hebben een explosiegebied van 0,5-10 vol.%. De UEL is met name relevant bij goed gemengde mengsels in een omsloten ruimte. Daar kan het mengsel te rijk zijn om het te kunnen ontsteken. Bij een vloeistofplas in de open lucht daalt de mengverhouding aan de rand van de dampwolk tot nul.

1.1.3 GASVORMIGE BRANDSTOFFEN

Voor gasvormige brandstoffen geldt hetzelfde als voor vloeistoffen, met het verschil dat het medium bij kamertemperatuur al de gasvorm bezit. Het type gas bepaalt tussen welke grenzen van de mengverhouding met lucht het gas ontsteekbaar en brandbaar is. De soortelijke massa van een gas ten opzichte van die van lucht is bepalend voor de vraag of het gas de neiging heeft op te stijgen of naar een laagste punt te stromen. Bij kamertemperatuur en atmosferische druk heeft aardgas een dichtheid van 0,78 kg/m^3 tegen lucht met een dichtheid van 1,2 kg/m^3 onder gelijke omstandigheden. Uitstromend aardgas zal daardoor opstijgen naar hoger gelegen delen van de ruimte en kan daardoor een ontstekingsbron vormen. Propaan heeft een dichtheid van 1,87 kg/m^3. Vrijkomend propaan heeft hierdoor de neiging naar lager gelegen delen van een ruimte te stromen. Van de meeste brandbare vloeistoffen is de damp zwaarder dan lucht, zodat de risico's zich op laag niveau bevinden.

1.2 ZUURSTOF

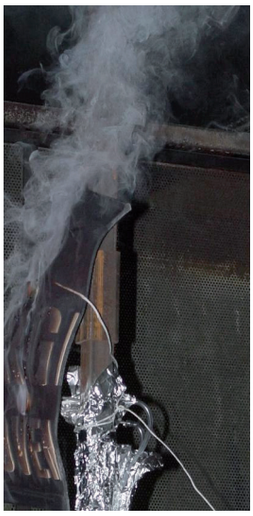
De tweede component van brand is zuurstof. Bij veruit de meeste branden is de zuurstof in de lucht het oxiderende medium in het brandproces. Er zijn echter brandstoffen die geen extern oxiderend medium nodig hebben voor verbranding aangezien zij een chemische oxiderend medium in zich dragen. Voorbeelden hiervan zijn ammoniumnitraat (kunstmest, NH_4NO_3), kaliumnitraat (KNO_3) en waterstofperoxide (H_2O_2).

Brandonderzoek_2019_POD.indb Sec1:5 21-08-19 11:00

De brandontwikkeling hangt sterk af van de beschikbare zuurstof: hoe hoger de zuurstofconcentratie, des te gemakkelijker een materiaal brandt. Lucht bevat circa 21% zuurstof. Waar het zuurstofgehalte hoger is, bijvoorbeeld in een medische omgeving als een operatiekamer of in duikkamers met een hoge druk (decompressie), kunnen branden in hun ontwikkeling aanzienlijk worden versneld en/of tot hogere temperaturen leiden.
Branden die ontstaan in een zuurstofarme omgeving zullen juist worden vertraagd. Het zuurstofgehalte in lucht is afhankelijk van de hoogte vanaf het zeeniveau. In een land als Peru op een hoogte van 4200 m kan het zuurstofgehalte met 36% afnemen. Zuurstofarme omgevingen kunnen in het kader van brandbeveiliging bewust worden gecreëerd. Onbemande koelhuizen worden met behulp van stikstof continu op een zuurstofniveau van circa 17% of nog lager gebracht. Onder deze omstandigheden zullen beginnende branden worden beperkt in hun ontwikkeling of zelfs worden gedoofd. Volledig ontwikkelde branden of smeulbranden kunnen echter op lage tot zeer lage zuurstofgehalten voortduren. In het algemeen geldt: hoe hoger de omgevingstemperatuur, des te minder zuurstof is nodig om het verbrandingsproces te onderhouden.

1.3 ONTSTEKING

De derde component van brand is ontsteking. Om de meeste brandbare materialen te kunnen ontsteken, zullen deze materialen eerst in een gas- of dampfase moeten verkeren. Sommige materialen kunnen direct in hun verschijningsvorm branden of gloeien, zoals sommige vormen van koolstof of magnesium. De gevormde gassen zullen in voldoende mate in de lucht aanwezig moeten zijn om een brandbaar mengsel te vormen. De tijd en energie die nodig is om het mengsel te laten ontbranden, is een functie van de energie van de ontstekingsbron, de thermische traagheid (λ, ρ, C) van de brandstof, de minimale ontstekingsenergie nodig voor deze brandstof en de geometrie van deze brandstof.
Van veel stoffen zijn in de literatuur waarden te vinden voor de minimale ontstekingsenergie in mJ, minimale ontstekingstemperaturen in °C of kritische warmtestraling in kW/m^2. Onderzoekers zullen deze waarden enigszins voorzichtig moeten gebruiken. De methoden om deze waarden te bepalen kunnen namelijk sterk verschillen, waardoor er een grote spreiding in waarden bestaat. Een voorbeeld hiervan is de vraag of de proef inhoudt dat een druppel brandbare vloeistof terechtkomt op een heet oppervlak of dat een grotere hoeveelheid van de vloeistof wordt verhit. In beide gevallen met dezelfde vloeistof zal een andere temperatuur worden gevonden waarbij de (damp van de) vloeistof ontbrandt. Ook bij hout wordt een grote spreiding in waarden gevonden. Vorm, oriëntatie en vochtgehalte kunnen een grote rol spelen in het bepalen van de ontbrandingstemperatuur.
Stel dat de temperatuur van de brandstof moet worden verhoogd, bijvoorbeeld een vloeistof tot boven het vlampunt. Dan moet de warmteoverdracht naar de brandstof groter zijn dan de som van de verliezen in geleiding, convectie en straling, energie nodig voor faseovergangen (bijvoorbeeld smelten van een thermoplast) en chemische veranderingen zoals pyrolyse (gasvorming), te zien in afbeelding 1.5.



Afbeelding 1.5: Pyrolyse van een verwarmd object.

In sommige gevallen kunnen chemische veranderingen in de brandstof tijdens de verhitting energie produceren voorafgaand aan ontbranding. In dat geval is er sprake van een exotherme reactie. Een chemische reactie heet exotherm als er energie bij vrijkomt. Deze energie komt dikwijls vrij in de vorm van warmte, maar dat kan ook in de vorm van licht gebeuren.
Exotherme reacties verlopen vaak spontaan of gemakkelijk, soms zelfs explosief. Het exotherm zijn van een reactie wordt veroorzaakt doordat de bindingen die bij de reactie worden verbroken meer energie bevatten dan de bindingen die bij de reactie worden gevormd. Tijdens de reactie wordt dus energie die is opgeslagen in bindingen (chemische energie) omgezet in andersoortige energie. Nagenoeg alle verbrandingsreacties zijn exotherme reacties. Om de brandstof tot zijn ontstekingstemperatuur te brengen, zal de ontstekingsbron een temperatuur moeten hebben die hoger is dan de ontstekingstemperatuur van de brandstof. In het brandproces van ontsteking tot chemische kettingreactie zijn de vier begrippen uit tabel 1.1 van belang.
Een aantal materialen zoals sigaretten, textiel, zaagmeel en celluloseachtige isolatie, is luchtdoorlatend en kan dus lucht aangevoerd krijgen. De materialen kunnen daardoor in hun vaste vorm smeulend branden. Smeulbranden zijn gevaarlijk, aangezien er meer toxische verbrandingsproducten per massa-eenheid verbrand product vrijkomen dan bij vlammende branden. Verder kunnen smeulbranden overgaan in vlammende branden.

Brandonderzoek_2019_POD.indb Sec1:6 21-08-19 11:00

Ontstekingsbegrip	Betekenis
Ontstekingstemperatuur	Dit is de temperatuur die het oppervlak van een brandstof moet bereiken om voldoende materiaal te verdampen en deze damp tot ontbranding te brengen.
Ontstekingswarmteflux	Dit is de warmteflux in kW/m^2 die op een brandstof moet invallen om deze tot de ontstekingstemperatuur te verwarmen en te ontsteken.
Vrijkomende warmte	De energie die door de verbranding vrijkomt, wordt ook wel aangeduid als brandintensiteit of verbrandingssnelheid. Deze kan worden uitgedrukt in kilowatt (kW) of via de totale hoeveelheid vrijgekomen energie over een tijdspanne in kilojoule (kJ). Een gedeelte van de vrijgekomen warmte verhit nog niet verbrande delen van de brandbare stoffen in de ruimte en brengt deze ook tot ontbranding. Zo ondersteunt de verbranding een branduitbreiding door een continue cirkel van productie van brandstof en ontsteking.
Chemische kettingreactie	Verbranding is een complexe serie van chemische reacties die resulteert in een snelle oxidatie van een brandstof waarbij warmte en licht vrijkomen en een variëteit aan chemische bijproducten wordt gevormd. Andere oxidatieprocessen, zoals het vormen van roest en het vergelen van papier, verlopen zo langzaam dat ze geen verbranding worden genoemd. Een zelfonderhoudende brand ontstaat wanneer voldoende vrijkomende warmte van de exotherme reactie terugstraalt op de brandstof, waardoor gasvorming optreedt en ontsteking plaatsvindt in afwezigheid van de oorspronkelijke ontstekingsbron.

Tabel 1.1: Vier ontstekingsbegrippen.

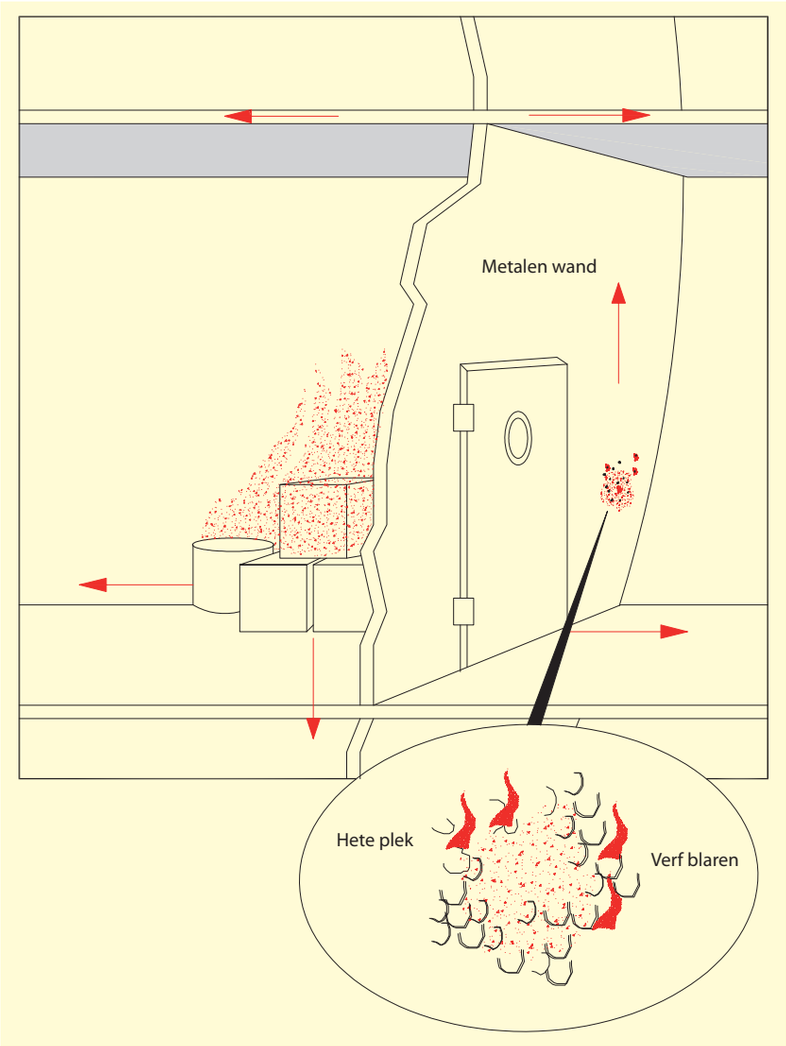
1.4 WARMTE-OVERDRACHT

De overdracht van warmte is een belangrijke factor bij branden en heeft effect op ontsteking, ontwikkeling, uitbreiding, afname en uitdoving. Warmteoverdracht is eveneens verantwoordelijk voor fysieke aanwijzingen voor onderzoekers die de brandhaard en brandoorzaak trachten te bepalen. Het verschil tussen warmte en temperatuur is hierbij belangrijk. Temperatuur is namelijk een grootheid die de hoeveelheid moleculaire activiteit van een materiaal aangeeft in relatie tot een referentiepunt zoals het vriespunt van water. Warmte is energie die nodig is om die temperatuur te behouden of te veranderen. Als warmte naar een object wordt overgedragen, dan stijgt de temperatuur van dat object. Geeft het object warmte af, dan daalt de temperatuur.
Warmte wordt altijd overgedragen van een massa met hoge temperatuur naar een massa met lage temperatuur. Warmteoverdracht wordt gemeten in termen van energiestroom per tijdeenheid en uitgedrukt in kilowatt (kW). Hoe groter het temperatuurverschil tussen de objecten, des te groter de energiestroom per tijdseenheid en de snelheid van temperatuurstijging zal zijn.
Temperatuur kan worden vergeleken met de druk in een brandslang, terwijl warmte- of energietransport dan overeenkomen met waterstroom in liters per minuut. Warmteoverdracht vindt plaats via drie mechanismen: conductie of geleiding, convectie en wamtestraling. Deze mechanismen spelen een rol in het onderzoek naar branden en een goed begrip ervan is dus essentieel. Ze worden daarom hieronder nader toegelicht.

1.4.1 CONDUCTIE

Conductie ofwel geleiding is een vorm van warmteoverdracht die plaatsvindt in een vast lichaam als een deel van het lichaam verwarmd wordt. In afbeelding 1.6 is conductie grafisch weergegeven. Energie wordt verplaatst van het warme naar het koudere deel van het lichaam.

Brandonderzoek_2019_POD.indb Sec1:7 21-08-19 11:00



Afbeelding 1.6: Grafische weergave van conductie.

De snelheid van warmteoverdracht wordt hierbij bepaald door het temperatuurverschil, de te overbruggen afstand en de fysische eigenschappen van het materiaal. De materiaaleigenschappen zijn: warmtegeleidingscoëfficiënt (λ in Europese literatuur, k in veel Amerikaanse literatuur), de dichtheid (ρ) en de soortelijke warmte (C). De soortelijke warmte van een materiaal is een maat voor de hoeveelheid benodigde energie om een kilogram van dit materiaal één graad te laten stijgen onder specifieke omstandigheden en wordt uitgedrukt in J/kg·K.
In materialen met een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt zal de snelheid van warmteoverdracht groot zijn. Metalen hebben een hoge warmtegeleidingscoëfficiënt, terwijl kunststoffen of glas een lage waarde bezitten. Materialen met een hoge dichtheid dragen sneller warmte over dan materialen met een lage dichtheid. Daarom zijn materialen met een lage dichtheid goede isolatoren.
Materialen met een hoge soortelijke warmte hebben per kilogram meer energie nodig om de temperatuur te laten stijgen. Warmtetransport zal blijven plaatsvinden gedurende de periode dat er een temperatuurverschil aanwezig is in het lichaam. Tijdens de ontwikkeling van de brand zullen:

- temperaturen toenemen en resulteren in veranderende snelheden van warmteoverdracht;
- alle drie de eigenschappen warmtegeleiding (λ), dichtheid (ρ) en soortelijke warmte (C) een rol spelen.

Brandonderzoek_2019_POD.indb Sec1:8 21-08-19 11:00

De wortel van het product van die drie $\sqrt{\lambda, \rho, C_p}$ wordt de thermische traagheid (I) van een materiaal genoemd in termen van λ, ρ, C_p. Tabel 1.2 geeft van een aantal materialen de thermische eigenschappen aan. De thermische eigenschappen hangen in sommige gevallen sterk af van de temperatuur, zodat de getallen in de tabel niet geschikt zijn om de opwarming te berekenen tot de zeer hoge temperaturen die bij brand optreden.

Materiaal	Warmte-geleidings-coëfficiënt (λ) (W/m·K)	Dichtheid (ρ) (kg/m^3)	Soortelijke warmte (C_p) (J/kg·K)
Aluminium	237	2700	880
Staal	16	7900	500
Koper	387	8940	380
Beton	1,28	2200	881
Glas	0,93	2600	840
Pvc	0,16	1300	1500
Ptfe	0,25	2200	1000
Eps	0,11	1100	1200
Hout (eik)[1]	0,17	800	2380
Hout (grenen)[1]	0,14	640	2850
Gips	0,48	1440	840
Water	0,6	1000	4180
Lucht	0,025	1,29	775

1 De waarden voor hout zijn sterk afhankelijk van het vochtgehalte van het hout en daarmee de temperatuur waaraan het hout wordt blootgesteld.

Tabel 1.2: Thermische eigenschappen van materialen bij 20 °C.

1.4.2 CONVECTIE

Convectie is de warmteoverdracht door beweging van warme vloeistoffen of gassen van de hittebron naar een koeler gedeelte van de omgeving. Warmte wordt door convectie naar een lichaam getransporteerd wanneer hete gassen passeren over koelere oppervlakken. De snelheid van warmteoverdracht naar het lichaam is een functie van het temperatuurverschil, de grootte van het oppervlak en de snelheid van de hete gassen langs het oppervlak. Hoe hoger de snelheid, des te groter is de mate van warmteoverdracht door convectie.
Bij vlamcontact vindt de warmteoverdracht voor een belangrijk deel plaats door convectie. In de beginfase van een brand is convectie de belangrijkste vorm van warmteoverdracht, aangezien in deze fase hete gassen van de brandhaard zich naar hoger gelegen van de ruimte en het gebouw zullen verspreiden (zie afbeelding 1.7). Terwijl de ruimtetemperatuur stijgt met een nadering naar vlamoverslag, zal de convectie nog maar langzaam toenemen terwijl de bijdrage van warmtestraling sterk toeneemt en uiteindelijk dominant wordt.
Ook na vlamoverslag kan convectie een belangrijk mechanisme zijn in de verspreiding van rook, hete gassen en onverbrande gassen door het gebouw. Dit kan leiden tot verspreiding van brand, toxische gassen en onverbrande verbrandingsproducten naar op afstand gelegen plaatsen.

Brandonderzoek_2019_POD.indb Sec1:9 21-08-19 11:00