

Handboek gebouwbrandbestrijding



Nederlands Instituut Publieke Veiligheid
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

Ondanks de aan de samenstelling van de tekst bestede zorg kan de samensteller geen aansprakelijkheid aanvaarden voor schade ontstaan door eventuele fouten c.q. onvolkomenheden in dit handboek.

Om deze publicatie te kunnen blijven ontwikkelen en verbeteren, ontvangen wij graag commentaar en suggesties ter verbetering. Vragen of opmerkingen kunt u sturen naar info@nipv.nl, onder vermelding van de titel van dit document.

Een *handboek* is een publicatie die informierend van aard is en waarin de feiten en grondslagen met betrekking tot een bepaald onderwerp zijn beschreven. Het doel van een handboek is inzicht verschaffen en eenheid van opvatting bevorderen.

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2023

Auteurs: S. Baaij, L. de Witte, R. Hofman, E. Huizer, J. Molenaar en R. Weewer
Met medewerking van: V. Gaspar

Opdrachtgever: NIPV
Contactpersoon: R. Hofman

Versie: 1.0
Status: Definitief
Datum: 23 januari 2023

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

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

Inhoud

	Voorwoord	5
	Inleiding	6
1	Algemene begrippen	9
1.1	De hoofdwetten van de thermodynamica	9
1.2	Warmte, energie en temperatuur	10
1.3	Aggregatietoestanden en faseovergangen	11
1.4	Volume, massa en dichtheid	13
1.5	Energie-inhoud	15
1.6	Warmteoverdracht	20
1.7	Tabel met materiaaleigenschappen	27
2	Brandfysica en branddynamica	29
2.1	Verbrandingsproces	29
2.2	Ontsteking en ontbranding	38
2.3	Verbrandingsproducten	44
2.4	Rook nader bekeken	48
2.5	Tabellen met grenswaarden van concentraties gassen	53
3	Brand en brandverloop	55
3.1	Van vlam naar brandontwikkeling	55
3.2	Natuurlijk brandverloop	58
3.3	Brandstof- en zuurstofgecontroleerde branden	59
3.4	Ontwikkelfase	60
3.5	Overgang ontwikkelfase naar volledig ontwikkelde fase: flashover	67
3.6	Volledig ontwikkelde fase	68
3.7	Dooffase	73
3.8	Brandverloop in de praktijk	73
3.9	Brandfenomenen	78
4	Gebouwfysica	89
4.1	Opwarming bij brand	89
4.2	Materiaalgedrag bij brand	98
4.3	Constructiegedrag bij brand	109
5	Mensfactoren	117
5.1	Het incident en de mens	117
5.2	De risicopersonlijkheid van brandweermensen	120
5.3	Stress	122
5.4	Besluitvorming onder druk	127
5.5	FABCM	132
5.6	Omgaan met de human factor: het vangnet	141
6	Verkennen van gebouwbranden	145
6.1	Het kenmerkschema	145

6.2	Het kwadrantenmodel	152
6.3	Gebouwkenmerken: de koppeling tussen preventie en repressie	157
6.4	Basisprincipes	160
6.5	Werkmethode	171
7	Oefenen met gebouwbranden	175
7.1	Inleiding	175
7.2	Oefendoelen en oefenvormen	175
7.3	Scenario-ontwikkeling	179
7.4	Objectkeuze	179
7.5	Ensceneringsmiddelen	181
7.6	Oefeningen ter ondersteuning van de implementatie van de basisprincipes	183
	Literatuurlijst	192

Voorwoord

Als kind van de jaren zeventig van de vorige eeuw ben ik opgegroeid met boeken. Internet en digitale leermiddelen bestonden nog niet. De beeldcultuur beperkte zich via de televisie en bioscoop tot nieuws en amusement en reikte in het onderwijs niet verder dan illustraties in een tekstboek. Toen ik in de jaren negentig onderwijskunde ging studeren, begon de beeldcultuur met hulp van nieuwe technieken aan een onstuitbare opmars in het onderwijs. Er opende zich een wereld aan ongekende mogelijkheden om technische en ander ingewikkelde, abstracte kennis te visualiseren. Het onderwijs had tot eind vorige eeuw alleen mensen met een sterk ontwikkelde linkerhersen helft bediend. In dat talige deel van onze hersenen gebruiken we woordkennis, logica en analytisch vermogen om de wereld te beschouwen en begrijpen. Nu kwamen opeens ook doeners en denkers met een sterk ontwikkelde rechterhersen helft letterlijk in beeld. Dat deel van onze hersenen gebruikt verbeeldingskracht, ruimtelijke verhoudingen, geluid en emotie als gereedschap om kennis tot zich te nemen, te verwerken en toe te passen. In essentie houdt de moderne onderwijskundige zich bezig met de vraag hoe we leeromgevingen zo kunnen inrichten dat beide hersenhelften optimaal worden aangesproken en benut.

Van brandweermensen wordt vaak gezegd dat het doeners zijn die liever hun rechter- dan hun linkerhersen helft gebruiken. Dat zal vast de reden zijn dat zij vaak liever praktijk-oefeningen doen en instructievideo's kijken dan klassikaal onderwijs volgen of een lesboek lezen. Het brandweeronderwijs volgt het reguliere onderwijs door vooral te investeren in 'doe-onderwijs' en audiovisuele leermiddelen. Ook ik heb de beeldcultuur leren omarmen en tel de onderwijskundige zegeningen van audiovisueel brandweeronderwijs. Maar toch....ik kan geen afscheid nemen van de woordcultuur die mij met de paplepel is ingegoten. Gelukkig blijkt uit onderzoek dat woord en beeld elkaar nodig hebben om mensen écht iets goed te leren begrijpen. Daarom raad ik aan om dit handboek grondig te bestuderen, ook al staan er veel meer woorden in dan beelden. Ik hoop dat dit *Handboek Gebouwbrandbestrijding* in deze wereld vol audiovisueel geweld een tekstueel rustpunt zal zijn.

Ik ben de auteurs dankbaar voor hun geduld om samen met eindredacteur Veerle Gaspar en mij naar woorden te zoeken voor iets dat zij met hun uitmuntende rechterhersen helft al lang begrepen. Ze verdienen het om hier met name te worden genoemd: Siemco Baaij, Edward Huizer, Jaap Molenaar, Lieuwe de Witte en Ricardo Weewer. Zij leverden de input en concepten voor zes van de zeven hoofdstukken. Zelf mocht ik het hoofdstuk over mens-factoren schrijven. Het is een compliment aan het adres van Veerle dat dit boek ondanks zes verschillende schrijfstijlen toch leesbaar is. En dat u zo nu en dan een afbeelding tegenkomt, is mede te danken aan onze vormgevers Margriet Elbersen en Rob Kruitwagen. Tot slot hoop ik dat dit handboek helpt bij je vakontwikkeling als brandweerman- of vrouw. Want met dat doel voor ogen hebben we dit boek gemaakt. Oordeel zelf maar of we in deze opzet zijn geslaagd.

Drs. Rijk Hofman
Projectleider Vakbekwaamheid, Centrum Opleiding en Vorming Brandweer (COVB)
Nederlands Instituut Publieke Veiligheid

Inleiding

Achtergrond

In het najaar van 2020 is de publicatie *Basisprincipes van brandbestrijding* verschenen. Dit document biedt een (relatief) eenvoudig en eenduidig handelingsperspectief voor het optreden bij gebouwbranden. Resultaten uit onderzoek en incidentevaluaties worden er op een inzichtelijke manier bij elkaar gebracht met als doel om de gebouwbrandbestrijding veiliger, effectiever en efficiënter te maken. Daarnaast geeft het document uiting aan het streven om het vak van brandbestrijder te vereenvoudigen. Binnen de basisprincipes is de offensieve binneninzet niet langer de preferente inzetactie; er wordt juist meer 'van buiten naar binnen' gedacht, met een meer defensieve inzetactie als uitgangspunt. Een tweede belangrijke verandering betreft de aandacht voor FABCM en de 'human factor': de impact van de brand en de gevolgen daarvan op de brandweermensen en – in het bijzonder – de manier van leidinggeven. De wetenschap dat de 'stress van het incident' kan leiden tot onder andere inadequate besluitvorming is een belangrijke motivatie om het vakgebied zo eenvoudig mogelijk te houden.

Doel

Tot op dit moment ontbrak eenduidige les- en leerstof over de basisprincipes van brandbestrijding. De publicatie *Basisprincipes van brandbestrijding* zelf biedt een uitstekende onderlegger voor deze leerstof, maar is niet voldoende vakinhoudelijk uitgewerkt en 'gedidactiseerd' om als leerstof te kunnen fungeren. De vakkennis waarop de basisprincipes zijn gebaseerd, is in de genoemde publicatie op hoofdlijnen samengevat. In dit *Handboek gebouwbrandbestrijding*, dat bedoeld is als compleet lesboek en naslagwerk, wordt die vakkennis wél uitgebreid behandeld. Op deze manier kunnen brandweermensen de basisprincipes tussen hun oren, in het hart en in de vingers krijgen.

In wat breder verband willen we met dit *Handboek Gebouwbrandbestrijding* de resultaten van het onderzoek van het voormalige Instituut Fysieke Veiligheid (tegenwoordig NIPV), de Brandweeracademie en Brandweer Nederland van de afgelopen jaren vertalen naar concrete, toepasbare vakkennis. In die zin kan dit handboek dienen als op zichzelf staand naslagwerk en als onderlegger voor vakbekwaam worden en blijven. Hiermee legt het Centrum voor Opleiding en Vorming Brandweer (COVB), onderdeel van NIPV, samen met het veld een degelijk fundament onder alle leergangen en bijscholingen op het gebied van brandbestrijding. Als naslagwerk geeft het boek elke brandbestrijder (met welke rang of functie dan ook) een handelingsperspectief voor het optreden bij gebouwbranden.

Doelgroep

Het lesboek (en/of afzonderlijke onderdelen ervan) is bedoeld als les- en leerstof bij bijscholingen die raakvlakken hebben met de inhoud ervan. Dat is in de eerste plaats de bijscholing Instructeur Brandbestrijding, maar daarnaast ook andere bijscholingen op het gebied van brandbestrijding voor bijvoorbeeld oefenleiders en Officieren van Dienst. Daarnaast is dit handboek een naslagwerk voor alle incidentbestrijders bij de brandweer. Voor docenten en instructeurs op het gebied van gebouwbrandbestrijding biedt dit handboek een onderbouwing van hun vakgebied. Verder zijn onderdelen van dit handboek ook interessant voor medewerkers op het gebied van risicobeheersing of vakbekwaamheid.

Leeswijzer

De inhoud van dit handboek volgt de lijn van de bijscholing Instructeur Brandbestrijding. Die bijscholing bestaat globaal uit de volgende onderwerpen:

- > Branddynamica en brandbestrijding
- > Gebouw- en brandfysica
- > De 'human factor': menselijke beperkingen bij incidentbestrijding
- > Verkennen van gebouwbranden
- > Oefenen met de basisprincipes van brandbestrijding.

Behalve instructeurs behoren ook manschappen, bevelvoerders en Officieren van Dienst tot de doelgroep van dit handboek. Van manschappen mag natuurlijk niet dezelfde vakkennis worden verwacht als van instructeurs, bevelvoerders moeten bepaalde dingen weten die niet relevant zijn voor Officieren van Dienst en vice versa. In onderstaande tabel wordt daarom aan de hand van kruisjes aangegeven welke hoofdstukken of delen daarvan relevant zijn voor welke functiegroep. Staat er geen kruisje in een cel? Dan is dat hoofdstuk of die paragraaf niet of minder relevant voor de betreffende functie. Deze leeswijzer kan helpen om dit handboek zo functiegericht mogelijk door te nemen.

Hoofdstuk	Paragrafen	Instructeur	Manschap	Bevelvoerder	OvD
1	1 t/m 6 7	x x	x (blauwe kaders niet)	x (blauwe kaders niet)	x
2		x	alleen 2.1 en 2.4	x (2.5 niet)	x
3		x	x (3.4.1 t/m 3.4.4, 3.6.1 t/m 3.6.3 en formules niet)	x (formules niet)	x
4		x	x (4.1 niet)	x (formules niet)	x
5	1 t/m 3 4 t/m 6	x x	x	x x	x x
6		x	x	x	x
7		x			

Wij wensen je alvast veel leesplezier en een nuttig gebruik van de inhoud van dit handboek voor je inzetpraktijk.

1 Algemene begrippen

Brand is een natuurkundig en ook scheikundig fenomeen. Daarom zijn veel termen en begrippen in vakliteratuur over brandontwikkeling en brandbestrijding ontleend aan deze twee wetenschappelijke vakgebieden. Het vakgebied brandbestrijding is feitelijk een toepassingsgebied van de natuur- en scheikunde. Om bijvoorbeeld als instructeur voldoende boven de lesstof over brand en brandbestrijding te staan, is vooral inzicht in bepaalde begrippen en verklarende theorieën uit de natuurkunde heel belangrijk – uiteraard alleen voor zover het om begrippen en theorieën gaat die het ontstaan, de ontwikkeling en de effecten van brand verklaren. De theorieën geven de relaties tussen de begrippen aan, zodat we oorzaak en gevolg uit elkaar kunnen houden en leren voorspellen hoe een brand zich – gegeven de condities – verder zou kunnen ontwikkelen én hoe die het beste kan worden bestreden.

Om te voorkomen dat je als bevelvoerder of Officier van Dienst bij een brand ingewikkelde rekensommen moet gaan maken, zijn enkele basale natuurkundige gegevens over brandvermogen en koelend vermogen binnen de basisprincipes van brandbestrijding omgezet in eenvoudige vuistregels die iedereen kan leren toepassen. Hiermee zijn de basisprincipes van brandbestrijding een vereenvoudiging van het wetenschappelijke vakgebied brandontwikkeling en brandbestrijding. Maar om te weten waar die vuistregels vandaan komen en ze echt te begrijpen, maak je in dit hoofdstuk kennis met een inleiding in enkele algemene begrippen van de natuurkunde en de wetmatigheden die de samenhang tussen deze begrippen bepalen. Met deze begripskennis leer je je vakgebied als brandbestrijder of instructeur van brandbestrijders beter te begrijpen.

1.1 De hoofdwetten van de thermodynamica

Thermodynamica betekent letterlijk ‘beweging van warmte’ en wordt ook aangeduid als de ‘warmteleer’. Er zijn drie thermodynamisch hoofdwetten die hieronder kort worden toegelicht.

Eerste hoofdwet: behoud van energie

De eerste hoofdwet, ook wel de ‘Wet van behoud van energie’ genoemd, stelt dat er in de natuur geen energie uit het niets ontstaat en dat energie ook niet verloren gaat. Volgens deze wet kan er geen energie gemaakt of vernietigd worden. Energie kan slechts omgezet worden van de ene vorm naar een andere vorm.

Tweede hoofdwet: richting van energie

De tweede hoofdwet gaat over de richting van energie in processen. Deze hoofdwet stelt dat warmte altijd spontaan van een hoge naar een lage temperatuur stroomt. Bij een temperatuurverschil tussen een voorwerp en zijn directe omgeving wordt er altijd warmte overgedragen, net zolang tot het voorwerp even warm of koud is als zijn directe omgeving.

Derde hoofdwet: absolute nulpunt

De derde hoofdwet gaat over het absolute nulpunt van de temperatuur. Het absolute nulpunt is 0 Kelvin (K) of -273,15 graden Celsius (°C). Dit is het theoretische punt waarop moleculen bewegingsloos zijn. De uitdrukking van temperatuur in Kelvin wordt ook wel de absolute temperatuur genoemd. Eén Kelvin is even groot als één graad Celsius. 0 °C komt dus overeen met 273,15 K.

Materie of stof

Stof bestaat uit moleculen, die op hun beurt weer zijn opgebouwd uit atomen. Er bestaan meer dan 100 verschillende atomen. Een molecuul kan één of meer atomen bevatten. Een molecuul water bijvoorbeeld (H₂O) bestaat uit twee atomen waterstof (H) en één atoom zuurstof (O). Atomen zijn bijna altijd in beweging. Ze kunnen trillen, roteren of vrij bewegen. Bij een hogere temperatuur neemt de bewegingsenergie van de atomen toe. Bij het absolute nulpunt staan de atomen stil. Dit punt komt onder normale omstandigheden in de natuur niet voor, zelfs niet in het heelal.

1.2 Warmte, energie en temperatuur

Het dagelijks gebruik van de termen warmte en temperatuur sluit niet altijd aan bij de natuurkundige betekenis. Daarom zullen we de begrippen 'warmte', 'energie' en 'temperatuur' hier bespreken om de betekenis van 'opwarming' en 'verbranding' beter te kunnen begrijpen. Deze begrippen komen verder in dit handboek nog vaak terug.

Warmte is een vorm van energie. Er zijn vele vormen van energie. Zo hebben we in het dagelijks leven bijvoorbeeld te maken met mechanische en elektrische energie om machines aan te drijven. Wanneer er brandstof verbrandt of wrijving plaatsvindt, komt warmte vrij. Warmte kan worden weergegeven in bijvoorbeeld joule (J), Wattseconde (Ws) of kilowattuur (kWh). Bij brand wordt warmte of energie weergegeven in joule.

Temperatuur is een maat voor de bewegingsenergie van moleculen (atomen) in een stof. Wanneer er energie in de vorm van warmte aan een stof wordt toegevoegd, zal de bewegingsenergie van de atomen toenemen. Wanneer er energie wordt afgevoerd, zal de bewegingsenergie van de atomen afnemen. Hierdoor verandert de temperatuur van de stof – meestal tenminste, want een uitzondering hierop vormen de faseovergangen, zie paragraaf 1.3.

Een voorwerp is warm als het een hoge temperatuur heeft. Door temperatuurverhoging gaan moleculen sneller bewegen. De moleculen bezitten dan meer energie: de zogenoemde *bewegingsenergie*. Een stof die warmer is, heeft een hogere temperatuur en bevat meer bewegingsenergie dan een stof die kouder is. Sommige stoffen zijn moeilijker op te warmen dan andere; deze stoffen hebben meer energie nodig dan andere om tot dezelfde temperatuurverhoging te komen. Met andere woorden: de moleculen van de ene stof zijn gemakkelijker in beweging te brengen dan de moleculen van de andere stof. Deze stoffeigenschap wordt nader toegelicht in paragraaf 1.5.5.

Verschil tussen warmte en energie

Warmte kan gezien worden als een specifieke vorm van energie. Warmte beweegt altijd van een voorwerp of omgeving met een hoge temperatuur naar een voorwerp of omgeving met een lage temperatuur. Denk bijvoorbeeld aan de warmte van een brand die naar de omgeving uitstraalt.

Verskil tussen temperatuur en energie

Waar temperatuur een maat is voor de bewegingsenergie van moleculen, staat energie voor de hoeveelheid moleculen die bewegen (energie-inhoud). Neem een glas en een zwembad. Beide zijn gevuld met water en hebben dezelfde temperatuur van 25 °C. De energie-inhoud van het zwembad is echter veel groter dan die van het glas, omdat er veel meer moleculen in het zwembad aanwezig zijn. Stel dat we de temperatuur van het water in zowel het glas als het zwembad willen verlagen naar 20 °C, dan is voor het zwembad meer koeling nodig dan voor het glas.

1.3 Aggregatietoestanden en faseovergangen

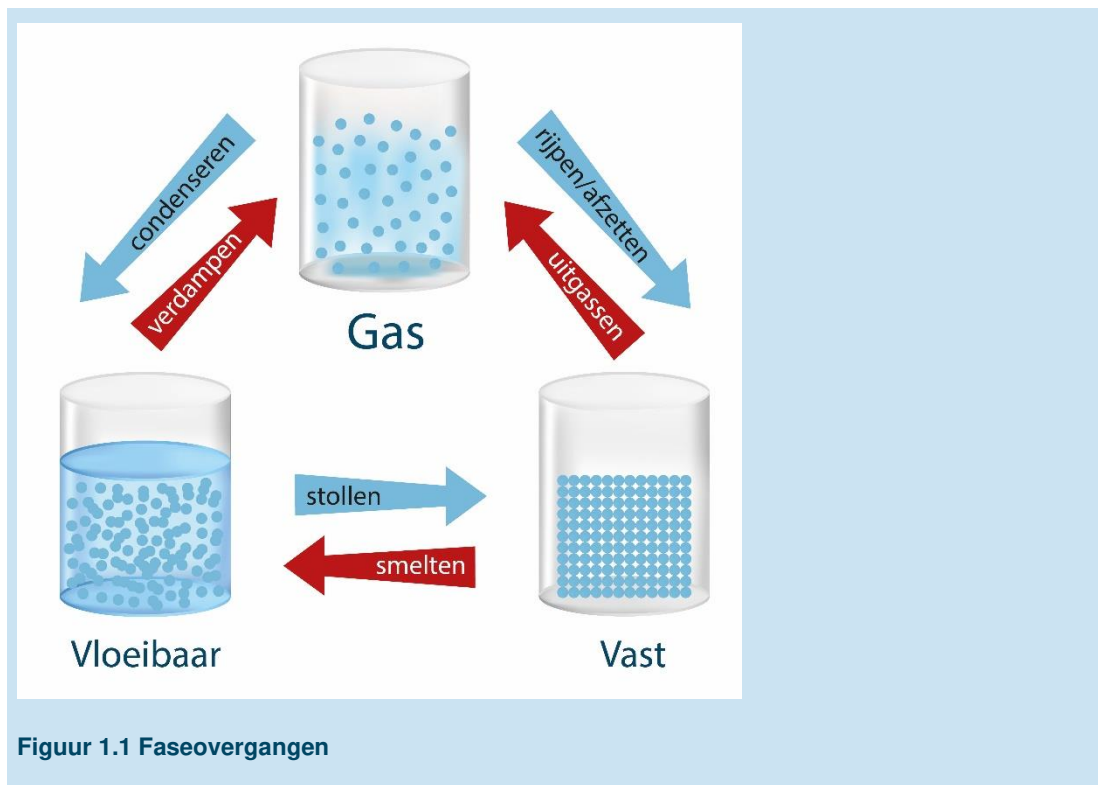
Aggregatietoestanden zijn de verschillende 'verschijningsvormen' van stoffen. Voor brand zijn drie aggregatietoestanden van belang: vast, vloeibaar en gasvormig. Bij vaste stoffen hebben de moleculen een vaste plek ten opzichte van elkaar en bewegen dus niet door elkaar. Hierdoor heeft de stof ook een eigen vorm. In een vloeistof hebben de moleculen geen vaste plek, maar kunnen *binnen de vloeistof* vrij bewegen. Hierdoor neemt een vloeistof veelal de vorm van de vaste omgeving aan waarin hij zich bevindt en blijft bij elkaar. Denk bijvoorbeeld aan de vorm van een opslagtank. Bij een gas kunnen de moleculen vrij bewegen *in de ruimte of omgeving* waarin het gas zich bevindt. Hierdoor neemt een gas veelal de vorm van de ruimte aan.

Hoe sneller de moleculen bewegen, hoe meer interne energie zij bevatten. Een hogere bewegingsenergie zorgt voor meer vibratie in de bindingen van moleculen (bij vaste stoffen en vloeistoffen) en bij gassen voor meer botsingen tussen de moleculen onderling. Die vibratie en botsingen hebben als gevolg dat de stof in volume toeneemt. Het begrip volume wordt nader toegelicht in paragraaf 1.4.1.

Als de bewegingsenergie van moleculen te hoog wordt, kunnen de onderlinge verbindingen tussen de moleculen worden verbroken. De fase (vast, vloeibaar of gasvormig) waarin de stof zich bevindt – de aggregatietoestand – gaat dan over naar een andere fase (faseovergang). Een voorbeeld is water dat verdampt of hout dat bij verwarming gaat uitgassen. De aggregatietoestand van een stof is afhankelijk van de stoffeigenschappen, de druk en de temperatuur.

Faseovergangen

Met een faseovergang wordt bedoeld dat een stof van fase verandert, bijvoorbeeld van vast naar vloeibaar of van vloeibaar naar gas. Faseovergangen kunnen we aanduiden met verschillende termen: smelten, verdampen, stollen, condenseren en sublimeren (zie figuur 1.1 op de volgende pagina). Met sublimeren wordt de directe overgang van een vaste stof naar een gas bedoeld (dus zonder dat de vaste stof eerst vloeibaar wordt). Een voorbeeld is hout dat gaat uitgassen (pyrolyseren; zie ook paragraaf 2.1). Een ander voorbeeld is koolstofdioxide dat sublimeert bij een atmosferische druk. Atmosferische druk, ofwel 1 atmosfeer staat gelijk aan 1,01325 bar. 1 bar staat gelijk aan 100.000 pascal (Pa). Rijpen is het omgekeerde van sublimeren (een gas gaat direct over in een vaste stof). Een voorbeeld van rijpen is het ontstaan van ijsbloemen op glas in de winter. Net zoals de andere faseovergangen kosten smelten en verdampen veel energie, waardoor de temperatuur van de betrokken stof niet verandert. Neem bijvoorbeeld stoom boven een pan met kokend water: de stoom is net als het kokende water 100 °C, maar de stoom bevat meer energie.



Figuur 1.1 Faseovergangen

Stoom en waterdamp

In de volksmond worden de benamingen stoom of waterdamp vaak gegeven aan kleine zichtbare druppeltjes water, bijvoorbeeld boven een fluitketel of de zichtbare druppeltjes water bij het blussen van een brand. Waterdamp ofwel stoom is in de natuurkunde echter water dat zich in de gasfase bevindt en net als veel andere stoffen in de gasvorm niet zichtbaar is met het menselijke oog.

De volgende soorten stoom kunnen worden gedefinieerd:

- > Natte stoom: stoom (gasfase) waarin kleine waterdruppeltjes zweven.
- > Droge stoom: (onzichtbare) waterdamp (stoom) in de gasfase.
- > Verzadigde stoom: (droge) stoom die condenseert bij een verlaging van de temperatuur.

Onder het kookpunt van water (100 °C) kan niet onbepaald waterdamp in de lucht aanwezig zijn. Bij een daling van de luchttemperatuur treedt condensatie op van waterdamp tot vloeibare, zichtbare druppeltjes, doordat koudere lucht minder watermoleculen kan vasthouden. Het punt waarbij dit gebeurt, wordt ook wel het dauwpunt genoemd. Het dauwpunt is afhankelijk van de relatieve vochtigheid en de omgevingstemperatuur van de lucht. De relatieve vochtigheid geeft aan hoeveel waterdamp zich in de lucht bevindt ten opzichte van de maximale hoeveelheid waterdamp die in de lucht aanwezig kan zijn. Bij een hoge luchtvochtigheid ligt het dauwpunt dicht bij de omgevingstemperatuur van de lucht. Koude lucht kan minder waterdamp bevatten en raakt dus bij afkoeling sneller verzadigd met waterdamp. De waterdamp gaat condensereren en vormt kleine druppeltjes, zichtbaar als een mist of nevel. Daarom wordt deze zichtbare mist of nevel na een koude nacht ook wel dauw genoemd.

Aerosol

Een aerosol is een mengsel van fijnverdeelde vloeistof- of vastestofdeeltjes in een gas, zoals wolken, mist (vloeistof) of rook (vaste stof). Rook bestaat uit onzichtbare in de lucht zwevende verbrandingsproducten: rookgassen en zichtbare verbrandingsproducten zoals roet en waterdruppeltjes. De grootte van deze roetdeeltjes ligt in de orde van 0,2 tot 200 micrometer.

1.4 Volume, massa en dichtheid

De snelheid of het gemak waarmee een stof bij opwarming of afkoeling van de ene naar de andere fase gaat, hangt af van een aantal verschijningsvormen van die stof. Drie belangrijke verschijningsvormen zijn volume, massa en dichtheid. Hieronder gaan we daarop in, evenals op de wetmatige verbanden tussen deze begrippen bij opwarming en afkoeling. Deze basis-kennis helpt om het gedrag van stoffen en materialen bij brand (dat verderop in dit handboek wordt behandeld) beter te begrijpen.

1.4.1 Volume

Volume is een maat voor de ruimte die een stof in beslag neemt. Het volume wordt weergegeven met de hoofdletter **V** en uitgedrukt in de eenheid kubieke meter (m^3). Een niet standaard eenheid voor volume is de liter (L). Daarbij geldt dat 1 L gelijk is aan 1 dm^3 , oftewel: 1000 liter (L) is gelijk aan 1 kubieke meter (m^3). Zoals in paragraaf 1.3 is aangegeven, wordt het volume van stoffen groter als de bewegingsenergie van de moleculen toeneemt. Bij opwarming zetten stoffen dus uit.

Ideale gaswet

Verdunde gassen, lucht en rookgassen kunnen worden gezien als ideale gassen. Een ideaal gas is een hypothetisch gas dat precies aan de volgende gaswet voldoet:

$$p \cdot V/T = \text{constant}$$

met p = druk in Pascal (Pa), V = volume in kubieke meter (m^3), T = temperatuur in Kelvin (K)

Deze gaswet is belangrijk, omdat ze de onderlinge samenhang tussen druk, volume en temperatuur inzichtelijk maakt. Bijvoorbeeld: bij een gelijkblijvende druk in een ruimte zal bij een verdubbeling van de temperatuur ook het volume verdubbelen. Of, als het volume van de ruimte gelijk blijft, dan zal bij een verdubbeling van de temperatuur ook een verdubbeling van de druk plaatsvinden.

1.4.2 Massa

Massa is een maat voor de hoeveel van een stof. De massa wordt weergegeven met een kleine letter **m** en uitgedrukt in de eenheid **gram** of **kilogram**. Een niet standaard eenheid voor de grootte massa is de **ton**. 1 ton gelijk is aan 1000 kg.

Verschil tussen massa en gewicht

Massa en gewicht worden vaak door elkaar gehaald, maar het zijn twee totaal verschillende grootheden. Het gewicht is namelijk geen maat voor de hoeveelheid stof, maar een maat voor de kracht die een hoeveelheid massa op een ondergrond uitoefent (als gevolg van de aantrekking door de zwaartekracht). Een ruimteschip in de ruimte is bijvoorbeeld gewichtloos. Dat betekent niet dat het geen massa heeft, want het bestaat wel degelijk uit materialen. Een ruimteschip oefent echter ondanks zijn massa geen kracht uit op een ondergrond. Om die reden is een ruimteschip gewichtloos.

1.4.3 Dichtheid

De dichtheid is een maat voor de onderlinge afstand tussen de moleculen van een stof. Bij een hoge dichtheid is die onderlinge afstand klein en bij een lage dichtheid is de onderlinge afstand groot. Staal heeft bijvoorbeeld een hoge dichtheid, en polystyreen in isolatiemateriaal (EPS) juist een lage dichtheid. De dichtheid van een stof is naast de afstand tussen de moleculen ook afhankelijk van de massa van de moleculen.

Dichtheid of soortelijke massa

De *dichtheid* kan worden omschreven als de massa per volume en wordt ook wel de soortelijke massa genoemd. Het symbool van dichtheid is de Griekse letter 'ρ' (uitspraak 'rho'). De dichtheid kan worden bepaald door de massa van een stof (m) te delen door het volume (V) en wordt in gram per kubieke meter of kilogram per kubieke meter uitgedrukt (g/m^3 of kg/m^3). In formulevorm:

$$\rho = m / V$$

$\rho = \text{dichtheid } \text{kg/m}^3, m = \text{massa (kg)}, V = \text{volume (m}^3\text{)}$

Verband tussen dichtheid en massa

Maar wat is dan het verband tussen de dichtheid en de massa van een stof? Dat is eenvoudig uit te leggen. Bij hetzelfde volume van twee verschillende stoffen heeft het volume van de stof met de grootste dichtheid de grootste massa; die stof is dus het zwaarst. Neem als voorbeeld twee even grote zakken in gedachten. De ene zak zit vol met stalen bolletjes en de andere zak met bolletjes van piepschuim. De zak met stalen bolletjes heeft een hogere massa en is daardoor natuurlijk veel zwaarder dan de zak met de piepschuimbolletjes.

Dat ligt niet aan het volume, want beide zakken zijn precies even groot. Er passen ook exact evenveel bolletjes in beide zakken, wanneer we in het voorbeeld ervan uitgaan dat de bolletjes van staal precies even groot zijn als de bolletjes van piepschuim. De zak met stalen bolletjes heeft een veel hogere massa dan die met de piepschuimbolletjes, omdat staal een veel hogere dichtheid heeft dan piepschuim (polystyreen). Anders verwoord: een stalen bolletje bevat meer moleculen dan een bolletje van piepschuim, omdat de moleculen in staal veel dichter op elkaar zitten dan die in piepschuim. De ruimte tussen de moleculen in een stof bestaat uit lucht en dat heeft een lagere massa dan de moleculen zelf. Piepschuim is dus lichter dan staal, omdat het 'luchtiger' (minder massief) is. In een bolletje staal zit meer massa dan in een bolletje piepschuim met hetzelfde volume.

Drijven of zinken?

De dichtheid van een voorwerp bepaalt of een materiaal of stof drijft of zinkt. Daarbij gaat het er niet alleen om of een voorwerp zwaar is, maar ook of de dichtheid groter is dan die van water. De dichtheid van een baksteen is groter dan de dichtheid van water, met als gevolg dat een baksteen zinkt. De dichtheid van een schip is juist kleiner dan de dichtheid van hetzelfde volume aan water dat het schip inneemt. Daardoor blijft een schip drijven. Dat wordt anders als het schip volloopt met water. Het volume van het schip verandert niet, de dichtheid wel. Waar eerst lucht zat, zit nu water (wat zorgt voor meer massa in hetzelfde volume).

Uit de formule voor het berekenen van dichtheid kan worden afgeleid dat de dichtheid van bijvoorbeeld opgewarmde lucht kleiner is (opgewarmde lucht zet immers uit) dan die van koudere lucht (afkoelende lucht krimpt). Het volume van opgewarmde lucht wordt dus groter, terwijl de massa gelijk blijft. Zo zal rook wanneer deze in temperatuur toeneemt, net als lucht meer ruimte innemen en gaan stijgen (zie ook paragraaf 1.6.2). In tabel 1.5 in paragraaf 1.7 is van een aantal stoffen de dichtheid weergegeven.

Relatie tussen temperatuur en dichtheid

Bij lagere temperaturen van een vloeistof of gas bewegen de moleculen langzamer. Hierdoor botsen ze minder vaak en nemen ze minder ruimte in beslag. Dit betekent dat er bij lage temperaturen meer moleculen in een volume-eenheid passen (waardoor de stof een hoger soortelijk gewicht heeft). Een bepaald volume koude vloeistoffen en gassen is daarom zwaarder dan hetzelfde volume warme vloeistoffen of gassen.

De dichtheid van lucht bedraagt ongeveer $1,2 \text{ kg/m}^3$ bij 20 graden Celsius ($^{\circ}\text{C}$) en omgevingsdruk (1 atmosfeer). Door de formule van de ideale gaswet en de formule voor de dichtheid te combineren

kan voor de relatie tussen de temperatuur en de dichtheid de volgende eenvoudige formule worden afgeleid:

$$\rho = \text{dichtheid (kg/m}^3\text{)}, T = \text{absolute temperatuur (K)}$$
$$\rho = 353/T$$

Bij een toenemende temperatuur neemt de dichtheid af. De lucht wordt lichter, heeft minder massa per volume en stijgt dus op.

1.5 Energie-inhoud

Hoe groter de energie-inhoud van een brandbaar materiaal, hoe meer energie er vrij kan komen bij de verbranding van dit materiaal. Het is voor de brandweer belangrijk om te weten hoeveel energie er in een brandend gebouw ligt opgeslagen. Hoe meer energie er in het gebouw aanwezig is, hoe groter het koelend vermogen dat nodig is om de brand te blussen. Wanneer nog maar een klein deel van het gebouw bij de brand is betrokken en/of de brandbaarheid van de materialen laag is, zal het langer duren voordat alle energie in het gebouw bij de brand vrijkomt. De brandweer heeft dan wat meer tijd om het benodigde koelend vermogen op de juiste plaats beschikbaar te krijgen.

1.5.1 Verbrandingswaarde

Verbrandingswaarde is een maat voor de totale energie- (warmte)inhoud van een brandstof en geeft de hoeveelheid warmte aan die bij volledige verbranding van 1 kg brandstof vrijkomt. De verbrandingswaarde wordt uitgedrukt in MJ/kg. Het symbool voor de verbrandingswaarde is H_u in MJ/kg.

Andere benaming voor verbrandingswaarde

Energetische en calorische waarde zijn andere benamingen voor verbrandingswaarde.

Tabel 1.1 Voorbeelden van verbrandingswaarden (Bron: NEN-EN 1991-1-2+C3/NB)

Materiaalsoort	H_u [MJ/kg]
Hout	18
Katoen	18
Bitumen	42
Methanol	20
Rubberbanden	32
Dieselolie	41
Polyurethaanschuim	26
Polystyreen	40
Schuimrubber	37

1.5.2 Vuurlast

Door de energie-inhoud van alle materialen (bij volledige verbranding) bij elkaar op te tellen, kunnen we de maximale energie die bij brand kan vrijkomen bepalen of inschatten. Dit is de verbrandingswaarde (MJ/kg) van materialen vermenigvuldigd met de massa (kg). De maximale energie van de brandstof in gebouwen wordt ook wel de vuurlast genoemd. Vuurlast wordt uitgedrukt in MegaJoule (MJ). De vuurlast bestaat uit alle brandbare materialen van een gebouw, inclusief de gehele inventaris. Deze vuurlast kan worden onderverdeeld in een permanente vuurlast en een variabele vuurlast.

De *permanente vuurlast* betreft alle brandbare materialen die bij de constructie en omhulling van het gebouw horen. De *variabele vuurlast* bestaat uit alle brandbare materialen die zich in het gebouw bevinden, zoals de inrichting, inventaris en opgeslagen goederen. De term variabel wijst erop dat die vuurlast geen constante is, maar in de loop van de tijd kan veranderen. Denk aan een opslaggebouw waar transportbedrijven dagelijks voorraden brengen en ophalen. Bij dat soort gebouwen moet de brandweer erop bedacht zijn dat de vuurlast dagelijks kan variëren. Een nadere verkenning of het raadplegen van een bedrijfsdeskundige kan dan nodig zijn om de vuurlast op het moment van de brand bij benadering in te schatten.

1.5.3 Vuurbelasting

Een andere maat voor het inschatten van de energie in een gebouw is de vuurbelasting. De vuurbelasting is de hoeveelheid energie die vrijkomt per vierkante meter oppervlakte bij verbranding van alle aanwezige brandstof. Net als bij vuurlast is hetzelfde onderscheid te maken tussen permanente en variabele vuurbelasting. In tabel 1.2 is een aantal voorbeelden van de gemiddelde variabele vuurbelasting weergegeven.

Tabel 1.2 Voorbeelden van gemiddelde variabele vuurbelasting (Bron: NEN-EN 1991-1-2+C3/NB)

Gebuiksfunctie of type	Gemiddelde variabele vuurbelasting [MJ/m ²]
Woning (woonfunctie)	780
Theater (bijeenkomstfunctie)	300
Cellengebouw (celfunctie)	310
Ziekenhuis (gezondheidszorgfunctie)	230
Werkplaats (industriefunctie)	300
Kantoor (kantoorfunctie)	420
Hotel (logiesfunctie)	420
School (onderwijsfunctie)	285
Bouwmarkt (winkelfunctie)	1200

Brandduur

De gemiddelde vuurbelasting wordt ook wel uitgedrukt in kilogrammen vurenhout per vierkante meter (kg vheq/m^2). De verbrandingswaarde van 1 kg vurenhout is ongeveer 19 MJ/kg. Dit betekent dat de vuurbelasting van een gebouw met 1000 MJ/m^2 ongeveer $52,6 \text{ kg vheq/m}^2$ bedraagt. Door de vuurbelasting weer te geven als equivalent van vurenhout per m^2 kan de te verwachten brandduur zeer grofmazig worden ingeschat. De vuistregel die hierbij wordt gehanteerd, is dat 1 kg vurenhout per m^2 in ongeveer 1 minuut verbrandt. Bij een vuurbelasting van 60 kg vheq/m^2 bedraagt de te verwachten brandduur dus ongeveer 60 minuten. Dit is zoals gezegd een hele grove inschatting, omdat de brandduur niet alleen afhankelijk is van de vuurlast of vuurbelasting, maar vooral van de snelheid van de verbranding (het zogenoemde brandvermogen). De snelheid van verbranding is op haar beurt weer afhankelijk van onder andere de wijze van opslag of vorm van de materialen. Massieve houten balken branden bijvoorbeeld anders dan houten snippers.

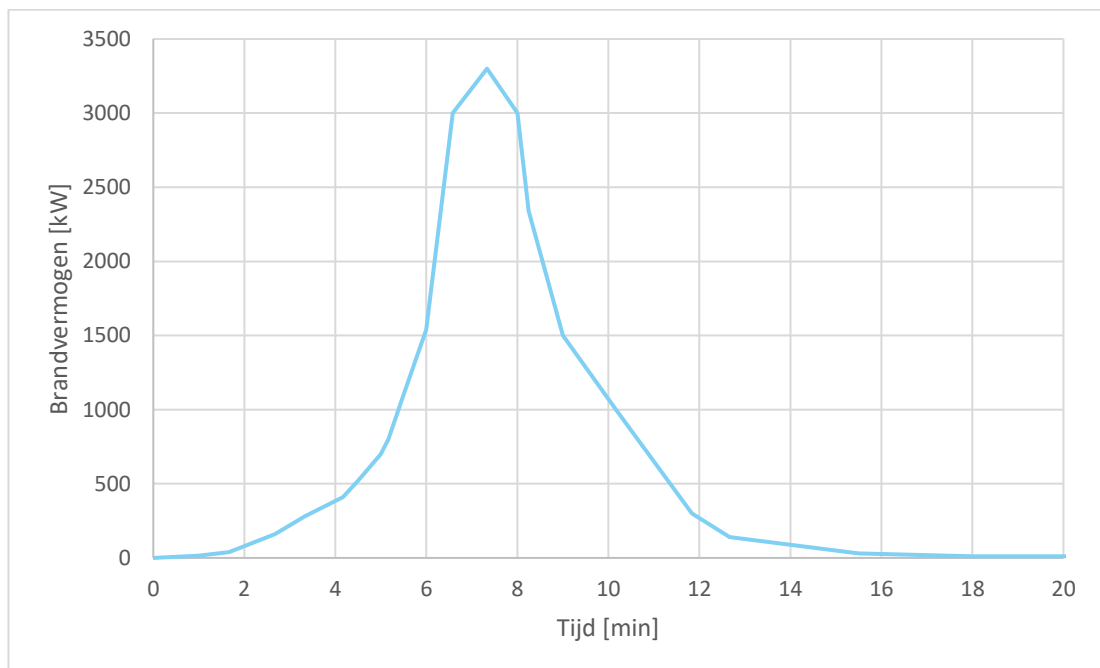
1.5.4 Brandvermogen

De vuurlast en de vuurbelasting zijn een eerste indicatie voor de brandduur. Beide begrippen zeggen echter niets over de snelheid waarmee de energie bij brand vrijkomt. De snelheid van de verbranding kan worden uitgedrukt als de massa brandstof die per seconde verbrandt (kg/s), ofwel de afbrandsnelheid (zie ook paragraaf 3.4.2). De snelheid van de verbranding kan ook worden uitgedrukt in de hoeveelheid energie die per seconde vrijkomt (MJ/s), oftewel het aantal Megawatt. Watt is de eenheid voor vermogen, en daarom wordt de snelheid waarmee energie vrijkomt ook wel brandvermogen genoemd.

Engelse term voor brandvermogen

Internationaal wordt het brandvermogen vaak uitgedrukt als Heat Release Rate (HRR).

Het brandvermogen is dynamisch en geeft gedurende het brandscenario de variërende snelheid van de brand (in energie) weer. Als een object verbrandt, zal de snelheid van de verbranding van dat object dus variëren in de tijd. In figuur 1.2 is het brandvermogen van een bank in de tijd weergegeven.



Figuur 1.2 Brandvermogen van een bank (Bron: Brandweeracademie, 2020)

De grootste snelheid van de verbranding uitgedrukt in energie per seconde wordt ook wel het maximale brandvermogen of piekbrandvermogen genoemd. In tabel 1.3 zijn een aantal voorbeelden van maximale brandvermogens weergegeven. Het gaat hier om indicatieve waarden.

Tabel 1.3 Voorbeelden van het maximale brandvermogen van een aantal objecten

Object	Maximale brandvermogen [MW]
Afvalbak	0,05
Bank	2 – 3
Bed	1 – 2
Kast	1 – 2
Woonkamer (40 m ²)	10

Relatie tussen vuurlast, vermogen en brandduur

In de grafiek van figuur 1.2 geeft de horizontale as de tijd weer in seconden en de verticale as de hoeveelheid energie per seconde. Als je deze twee met elkaar vermenigvuldigt, krijg je de oppervlakte onder de grafiek, die de hoeveelheid energie weergeeft die is verbrand. Immers, het brandvermogen in MW of MJ/s vermenigvuldigd met de tijd in seconden levert het aantal MJ op. De oppervlakte onder de grafiek kan nooit groter zijn dan de maximale energie die bij brand vrij kan komen.

Stel dat een woning een gemiddelde vuurbelasting heeft van 780 MJ/m² en een oppervlak van 100 m². Dan bedraagt de totale vuurlast 78.000 MJ. Als het gemiddelde brandvermogen ongeveer 25 MW (MJ/s) bedraagt, is de te verwachten brandduur ongeveer 3.120 seconden, oftewel circa 52 minuten.

1.5.5 Soortelijke warmte(capaciteit) en verdampingswarmte

Niet elke stof reageert even snel op de toevoer van energie. Aan sommige stoffen moet meer energie worden toegevoegd dan aan andere om de temperatuur te laten stijgen. Stoffen met een grote soortelijke warmte(capaciteit) hebben meer warmte nodig om in temperatuur te stijgen. De soortelijke warmte(capaciteit) is de hoeveelheid energie in Joule die nodig is om één kg van een stof één graad Celsius (of één Kelvin) in temperatuur te verhogen (J/kg.K).

Naast de energie voor het verhogen van de temperatuur van een stof is er ook energie nodig om de stof te laten overgaan naar een andere fase. Deze faseovergangen zijn beschreven in paragraaf 1.3. Een andere term voor deze energie is latente warmte. Deze latente warmte wordt voor de specifieke faseovergang van vloeibaar naar gas ook wel verdampingswarmte genoemd (J/kg of kJ/kg).

Specifieke warmte

De energie die nodig is om één kg van een stof één graad Celsius of één Kelvin in temperatuur te laten stijgen wordt naast de *soortelijke warmte* ook wel de *specifieke warmte* genoemd. Het symbool

voor soortelijke of specifieke warmte is de kleine letter 'c'. De specifieke warmte wordt uitgedrukt in Joule per kilogram per Kelvin (J/kg.K).

Warmtecapaciteit

Toegepast op voorwerpen wordt de soortelijke warmte aangeduid met het begrip *warmtecapaciteit*. De warmtecapaciteit is de hoeveelheid energie die nodig is om een voorwerp één graad Celsius of Kelvin in temperatuur te laten stijgen. Het symbool van warmtecapaciteit is de hoofdletter C (om het te onderscheiden van soortelijke warmte!). De warmtecapaciteit wordt uitgedrukt in Joule per graad Kelvin (J/K) of Joule per graad Celsius (J/°C).

Verdampingswarmte

De verdampingswarmte of latente warmte voor verdamping is de hoeveelheid energie die nodig is om één kg van een stof te laten verdampen, oftewel over te laten gaan van de fase vloeibaar naar de fase gas. Het symbool voor de verdampingswarmte is de hoofdletter L. De verdampingswarmte wordt uitgedrukt in Joule per kilogram (J/kg) of kilo Joule per kilogram (kJ/kg).

Zie tabel 1.5 in paragraaf 1.7 voor de soortelijke warmte van een aantal stoffen en tabel 1.4 hieronder voor de verdampingswarmte van drie vloeistoffen.

Tabel 1.4 Voorbeelden van de soortelijke warmte en verdampingswarmte van een aantal stoffen (Bron: engineeringtoolbox.com)

Materiaal	Verdampingswarmte L [kJ/kg]
Water	2.256
Alcohol	896
Aceton	518

Voorbeeld opwarming van water

Stel dat we één liter water één graad Celsius willen verwarmen, dan hebben we daarvoor 4,19 kJ nodig (4.19 Joule). Dit betekent dat het opwarmen van water met een temperatuur van 20 °C naar 100°C ($100 - 20 = 80$) 335 kJ aan energie vraagt ($80 \times 4,19 \text{ kJ} = 335 \text{ kJ}$).

Het verdampen van water (faseovergang) kost veel meer energie dan het opwarmen van water tot 100 °C. Voor de verdamping van één kilogram water van 100 °C is 2256 kJ verdampingswarmte nodig. Dat is bijna zeven keer zoveel als voor het opwarmen van een liter water tot 100°C. Tijdens het verdampen blijft de temperatuur 100 °C. Dit voorbeeld maakt duidelijk dat energie en temperatuur niet hetzelfde zijn.

Het opwarmen van waterdamp kost ook energie. Voor de opwarming van één kilogram waterdamp met één graad Celsius is 2,26 kJ nodig. Dit betekent dat bijvoorbeeld het opwarmen van waterdamp met een temperatuur van 100 °C naar 300 °C ($300 - 100 = 200$) 452 kJ aan energie vraagt ($200 \times 2,26 \text{ kJ} = 452 \text{ kJ}$).

De dichtheid van water bedraagt volgens tabel 1.5 verderop ongeveer 1.000 kg/m³; één kuub water komt overeen met 1.000 liter water. Dit betekent dat één kg water ongeveer overeenkomt met één liter water (1000 / 1000). Voor de opwarming van één liter water van 20 °C naar 300 °C waterdamp is dus ongeveer 3,0 MJ (3.043 kJ) energie nodig ($0,335 + 2,256 + 0,452 = 3,0 \text{ MJ}$).

1.6 Warmteoverdracht

Warmte is, zoals eerder uitgelegd, een vorm van energie. Warmteoverdracht of warmte-transport is het vervoer van warmte van het ene voorwerp naar het andere. Dit is een-richtingsverkeer: de warmte stroomt namelijk altijd van een hoge temperatuur naar een lagere temperatuur en verplaatst zich dus van warm naar koud. Het voorwerp met de hogere temperatuur koelt af door de warmteoverdracht aan het voorwerp met de lagere temperatuur, dat hierdoor opwarmt. Warmteoverdracht kan op drie manieren plaatsvinden, zie figuur 1.3 hieronder:

- > geleiding (conductie)
- > stroming (convectie)
- > straling (radiatie).



Figuur 1.3 Warmtetransportmechanismen

1.6.1 Geleiding (conductie)

Geleiding of conductie is de snelheid waarmee warmte zich door stilstaande materie verplaatst. Wanneer in een stof een temperatuursverhoging optreedt, wordt de warmte doorgegeven aan de aangrenzende moleculen. Moleculen met een hoge bewegingsenergie (een hoge temperatuur) kunnen deze bewegingsenergie doorgeven aan moleculen met een lage bewegingsenergie. Dit gebeurt via botsingen. Dit doorgeven van de energie (warmte) van molecuul naar molecuul noemen we geleiding. Warmtetransport door geleiding kan plaatsvinden in vaste stoffen, vloeistoffen en gassen.

Warmtestroom en warmtestroomdichtheid bij geleiding

De hoeveelheid warmte die bij geleiding wordt getransporteerd, kan worden berekend met de onderstaande formule. De hoeveelheid warmte wordt hierbij ook wel warmtestroom genoemd. Warmtestroom heeft als symbool de hoofdletter Q en wordt uitgedrukt in Joule per seconde (J/s) of Watt (W).

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$Q =$ warmtestroom in W of $\frac{J}{s}$, $\lambda =$ warmtegeleidingscoëfficiënt in $\frac{W}{(m \cdot K)}$,
 $A =$ oppervlakte in m^2 , $\Delta T =$ temperatuurverschil in K
 $\Delta x =$ de afstand in m waarover ΔT aanwezig is

De hoeveelheid warmte die bij geleiding wordt getransporteerd onafhankelijk van het oppervlak, wordt ook wel warmtestroomdichtheid genoemd. Warmtestroomdichtheid heeft als symbool de kleine letter q en wordt uitgedrukt in Watt per m^2 (W/m^2). De formule ziet er dan als volgt uit:

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

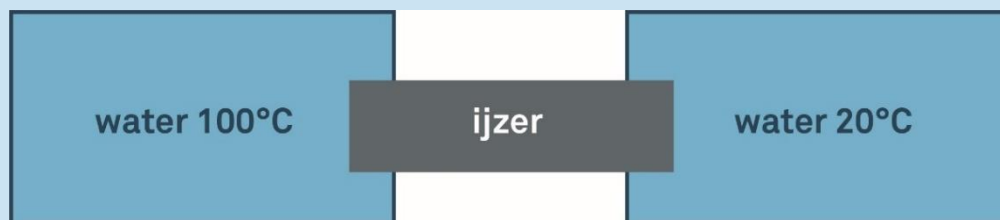
q = warmtestroomdichtheid in W/m^2 , λ = warmtegeleidingscoëfficiënt in $\frac{W}{(m \cdot K)}$,
 ΔT = temperatuurverschil in K , Δx = de afstand in m waarover ΔT aanwezig is

Hoe goed een materiaal de warmte geleidt, wordt aangegeven met de warmtegeleidingscoëfficiënt, ook wel Lambda-waarde (λ) genoemd. Metalen (zoals aluminium, koper en ijzer) zijn goede warmtegeleiders. Houd maar eens een koperdraadje in een kaarsvlam. Al snel zul je de warmte aan je vingers voelen. Vezelachtige stoffen (zoals hout, katoen en papier) zijn slechte warmtegeleiders. Een brandende lucifer kunt je daarom vrij lang vasthouden zonder je vingers te branden.

Vloeistoffen en gassen zijn slechte warmtegeleiders vanwege hun lage dichtheid. Door de lage dichtheid bevinden de moleculen in een vloeistof of gas zich relatief ver uit elkaar, zodat zij de warmte niet goed via trillingen aan elkaar kunnen overdragen. Toch kan door brand verwarmde, opstijgende lucht of rook bijdragen aan de verplaatsing van warmte door een gebouw. Vanwege het feit dat de warmte dan via stromende lucht wordt getransporteerd, noemen we dit geen geleiding, maar stroming (convectie), zie paragraaf 1.6.2.

De warmtegeleidingscoëfficiënt geeft aan hoeveel energie (warmte) per seconde en per m^2 materiaaloppervlakte wordt doorgegeven bij een temperatuurverschil van één graad Celsius of Kelvin over een lengte van één meter ($J/(s \cdot m^2 \cdot K/m)$ of $W/m \cdot K$). In tabel 1.5 in paragraaf 1.7 is voor een aantal stoffen de warmtegeleidingscoëfficiënt weergegeven.

Voorbeeld van geleiding



Figuur 1.4 Geleiding door ijzer

Als we de watertemperatuur blijven meten in twee vaten van 100 °C en 20 °C die verbonden zijn door een ijzeren staaf, zullen we zien dat het water van 20 °C warmer wordt en het water van 100 °C kouder (zie de bovenstaande figuur 1.4). Hoe komt dit?

De moleculen in de ijzeren staaf tussen beide vaten gaan sneller en harder trillen in het deel van de staaf dat in het water van 100 °C zit. Deze moleculen botsen tegen de (koudere) moleculen in het overige deel van de staaf, waarbij de moleculen door de hele staaf heen energie aan elkaar afstaan. De overdracht van de warmte(energie) tussen de moleculen in de staaf vindt plaats van links naar rechts, omdat het rechter vat kouder is dan het linker vat. Dit proces van warmtetransport gaat net zolang door, totdat het water in beide vaten even warm is en alle moleculen met dezelfde snelheid bewegen. Omdat de ijzermoleculen ook warmte afstaan aan de lucht rond de staaf (warmteverlies), zal de watertemperatuur in beide vaten uiteindelijk lager zijn dan 60 °C.

Voorbeeld berekening van geleiding

Stel dat een wand van 100 mm beton met een warmtegeleidingscoëfficiënt van 0,6 (W/m.K) gedurende een brand thermisch belast wordt met een temperatuur van 800 °C (T1) en de temperatuur aan de niet verhitte zijde 20 °C bedraagt. De warmtestroomdichtheid door de wand bedraagt dan:

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} = 0,6 \cdot \frac{(800 - 20)}{0,1} = 4.680 \frac{W}{m^2} = 4,68 W/m^2$$

1.6.2 Stroming (convectie)

Vaste stoffen bewegen niet. Gassen en vloeistoffen daarentegen kunnen zich makkelijk verplaatsen door te stromen. Als een gas of een vloeistof naar een andere plaats stroomt en warmte meeneemt, spreken we van (warmte)stroming. Dit wordt ook wel convectie genoemd. Deze stroming komt tot stand door drukverschillen in of tussen ruimtes. Drukverschillen kunnen ontstaan door temperatuurverschillen. Door die temperatuurverschillen ontstaat er een verschil in dichtheid (zie paragraaf 1.4.3) en hierdoor een stroming, ook wel vrije convectie genoemd. Een voorbeeld van vrije convectie is de opstijgende lucht boven een radiator. Er kan echter ook sprake zijn van *gedwongen* convectie. In dat geval is er sprake van een extern drukverschil, bijvoorbeeld door een pomp of een ventilator.

In geval van brand wordt de stroming (het drukverschil) vooral bepaald door een temperatuurverschil. De lucht in een ruimte wordt immers opgewarmd door de brandhaard, waardoor de lucht gaat uitzetten. De uitzetting is het gevolg van de grotere activiteit van de moleculen in de opgewarmde lucht. Deze gaan door de warmte (energie) actiever van elkaar af bewegen. Dit betekent dat de dichtheid van de opgewarmde lucht kleiner wordt dan die van de koudere omgeving, zodat de opgewarmde lucht gaat stijgen. In geval van brand is dit vooral zichtbaar als rook die naar boven stroomt.

De stroming (lucht of rook) koelt af door opmenging (met de omringende koudere lucht) en door energieoverdracht aan aangrenzende oppervlakken (vloer, wanden en plafond). Hierdoor gaan de moleculen weer wat langzamer bewegen. Door de temperatuurafname neemt de dichtheid af, totdat deze weer net zo groot is als de dichtheid van de omringende lucht. Het gevolg is dat de lucht niet langer stroomt onder invloed van temperatuurverschillen.

Warmtestroom bij stroming

De hoeveelheid warmte die bij stroming wordt verplaatst, is afhankelijk van verschillende variabelen. Bij stroming in één richting door bijvoorbeeld een gang met een constante doorsnede kan de warmtestroom met de onderstaande formule worden berekend. Warmtestroom heeft ook hier als symbool de hoofdletter Q en wordt uitgedrukt in Joule per seconde (J/s) of Watt (W).

$$Q = \rho \cdot v \cdot c \cdot A \cdot \Delta T$$

$Q = \text{warmtestroom in W of } \frac{J}{s}, \rho = \text{dichtheid in } \frac{kg}{m^3},$
 $v = \text{luchtsnelheid, } c = \text{de soortelijke warmte van de lucht}$
 $A = \text{oppervlakte van de doorsnede in } m^2, \Delta T = \text{temperatuurverschil in K}$

Warmteafgifte bij stroming

De hoeveelheid warmte die bij een stroming wordt afgegeven aan bijvoorbeeld een wand, kan met de onderstaande formule worden berekend. Warmtestroom heeft ook hier als symbool de hoofdletter Q en wordt uitgedrukt in Joule per seconde (J/s) of Watt (W).

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T$$

$$Q = \text{warmtestroom in } W \text{ of } \frac{J}{s},$$

$$h = \text{convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt in } \frac{W}{m^2 \cdot K},$$

$$A = \text{oppervlakte van de doorsnede in } m^2, \Delta T = \text{temperatuurverschil in } K$$

De convectieve warmteoverdrachtscoëfficiënt is bij beperkte luchtbewegingen laag. In woningen ligt deze coëfficiënt tussen 0 en 5 (W/m².K), bij harde wind tussen de 20 tot 200 (W/m².K), en bij brand tussen de 20 tot 50 (W/m².K).

Voorbeeldberekening

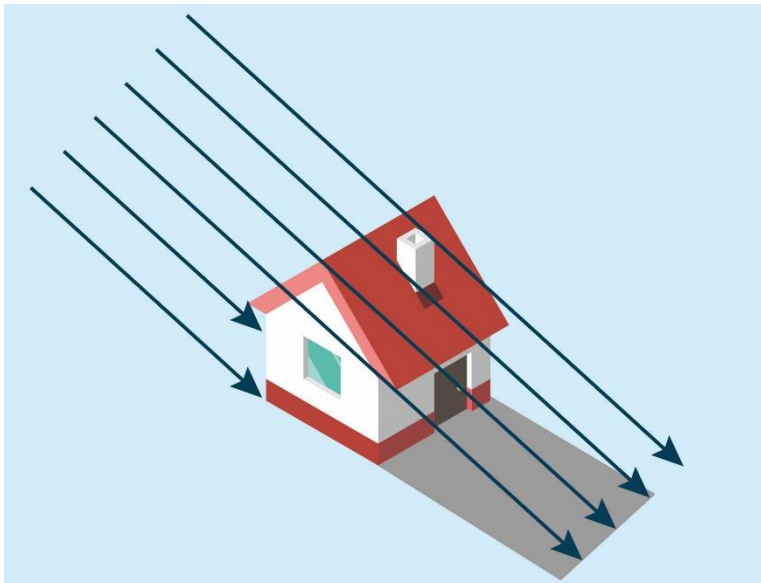
Een stalen wand wordt aan één zijde verhit met rook van 500 °C en heeft daardoor een gemiddelde temperatuur van 240 °C. Wat is de warmtestroomdichtheid door convectie? Neem voor de warmteoverdrachtscoëfficiënt 25 (W/m².K).

$$q = h \cdot \Delta T \quad \left(\text{voor de warmtestroomdichtheid in } \frac{W}{m^2} \right)$$

$$q = 25 \cdot (500 - 240) = 25 \cdot 260 = 6.500 \frac{W}{m^2} = 6,5 \frac{kW}{m^2}$$

1.6.3 Straling (radiatie)

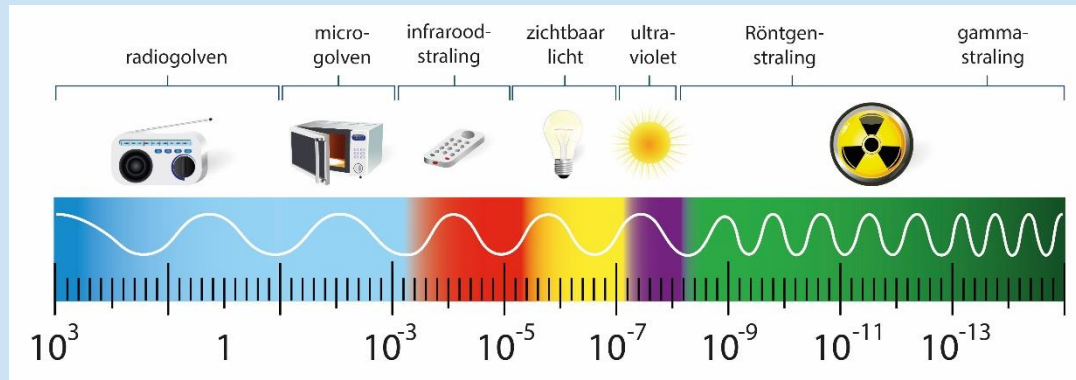
Warmtestraling is energieoverdracht die *niet* plaatsvindt door bewegende moleculen, maar door *elektromagnetische golven*. Stralingswarmte kan zich daarom ook voortbewegen door een ruimte waarin zich geen moleculen bevinden. Het beste voorbeeld van deze vorm van warmtetransport is zonlicht. De zon warmt de aarde op met straling, maar de straling zelf heeft geen temperatuur. Pas als de straling een stof treft, wordt deze vorm van energie omgezet in warmte. De moleculen van de stof die bestraald wordt, gaan bewegen. Daarom is het koeler in de schaduw. Daar komt namelijk geen of minder straling, omdat die straling wordt geblokkeerd door het object waartoe de schaduw behoort (zie figuur 1.5).



Figuur 1.5 Afscherming straling door object

Elektromagnetisch spectrum

De volledige verzameling van alle lichtgolven, gerangschikt naar golflengte, frequentie of energie wordt het elektromagnetisch spectrum genoemd. De onderstaande figuur 1.6 geeft dit spectrum weer. Elektromagnetische straling wordt ook wel radiatie genoemd.



Figuur 1.6 Elektromagnetisch spectrum

Zichtbaar licht

Zichtbaar licht (warmte) heeft een golflengte van 0.4 tot en met 0.7 μm (= micrometer). Door het menselijk oog worden deze golflengtes als kleuren waargenomen (0.4 μm = violet en 0.7 μm = rood).

Infraroodstraling

Infraroodstraling is de warmte(-straling) die wij voelen bij een brand, maar niet kunnen zien. Infraroodstraling is net zoals zichtbaar licht een vorm van elektromagnetische straling. De golflengte van infraroodstraling is alleen langer. Infraroodstraling heeft een golflengte van 0,7 (rood licht) tot ongeveer 1000 μm (diep infrarood) en is niet met het menselijk oog waarneembaar.

De brandweer maakt gebruik van warmtebeeldcamera's die alleen de lange golf infraroodstraling (8 t/m 14 μm) kunnen detecteren.

De warmtestraling bij brand beperkt zich tot een klein deel van het elektromagnetisch spectrum, van zichtbaar licht tot diep infrarood. Bij brand is warmtestraling vooral bepalend bij hogere temperaturen (boven de 400 $^{\circ}\text{C}$). Bij lagere temperaturen is stroming maatgevend. Warmtestraling is bij een brand met hoge temperaturen zichtbaar, omdat ze in het zichtbare gebied voldoende straling uitzendt (emissie). Warmtestraling is bijvoorbeeld bij een temperatuur van boven de 550 $^{\circ}\text{C}$ waarneembaar als een rode gloed.

Warmtestroom en warmtestroomdichtheid bij straling

De hoeveelheid warmte die bij straling wordt uitgezonden (bronstraling), kan met de onderstaande formule worden berekend. Warmtestroom heeft ook hier als symbool de hoofdletter Q en wordt uitgedrukt in Joule per seconde (J/s) of Watt (W).

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$
$$Q = \text{warmtestroom in } W \text{ of } \frac{J}{s}$$

ε = emissiescoëfficiënt in –, σ = constante van Stefan – Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$) in $W/(m^2 \cdot K^4)$

A = oppervlakte van het stralende vlak in m^2 , T = temperatuurverschil in K

De hoeveelheid warmte die bij straling wordt uitgezonden (bronstraling), wordt vaak onafhankelijk van het oppervlak beschouwd als een warmtestroomdichtheid. Warmtestroomdichtheid heeft als symbool de kleine letter q en wordt uitgedrukt in Watt per m^2 (W/m^2). De formule ziet er dan als volgt uit:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$$

q = warmtestroomdichtheid in W/m^2 ,

ε = emissiecoëfficiënt in –,

σ = constante van Stefan – Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$) in $W/(m^2 \cdot K^4)$

T = temperatuurverschil in K

Uit de formule blijkt dat de uitgezonden stralingswarmte niet recht evenredig toeneemt met de verhoging van de temperatuur, zoals bij geleiding en stroming, maar toeneemt met de vierde macht. Dit betekent dat wanneer de temperatuur in Kelvin twee keer zo hoog wordt, de stralingsintensiteit zal toenemen met een factor 16. Temperatuur heeft dus extreem veel invloed op de hoeveelheid warmtestraling (energie) die bij een brand vrijkomt. Dit is de reden waarom het bij het ontbranden van rookgassen vrijwel meteen extreem heet kan worden.

Emissiecoëfficiënt

Naast de temperatuur is de hoeveelheid uitgezonden stralingswarmte ook afhankelijk van de emissiecoëfficiënt. Alle materialen met een temperatuur boven het absolute nulpunt 0 K zenden straling uit (zie ook de derde hoofdwet van de thermodynamica in paragraaf 1.1). De emissiecoëfficiënt geeft de verhouding aan tussen een ideale straler en het daadwerkelijke materiaal. Een ideale straler heeft een emissiecoëfficiënt van 1; materialen hebben veelal een waarde tussen 0 en 1. Aluminiumfolie heeft bijvoorbeeld als richtwaarde voor de emissiecoëfficiënt 0,1 en beton en staal hebben een richtwaarde van 0,7. Over het algemeen geldt dat materialen die goed energie kunnen absorberen ook in hoge mate energie (straling) kunnen uitzenden en dus een hoge emissiecoëfficiënt hebben.

Voorbeeldberekening

Wat is de warmtestroomdichtheid door straling van een stalen wand bij een temperatuur van 50 °C en 400 °C?

$$50^{\circ}C \rightarrow q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = 0,7 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot (50 + 273)^4 = 0,4 \text{ kW/m}^2$$

$$400^{\circ}C \rightarrow q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 = 0,7 \cdot 5,67 \times 10^{-8} \cdot (400 + 273)^4 = 8,1 \text{ kW/m}^2$$

Bij elke brand speelt warmtestraling een rol. De uitgezonden warmtestraling van de bron (bijvoorbeeld vlammen of een rooklaag) wordt hoger bij een toenemende temperatuur van de bron. Voor de ontvanger van de warmtestraling zijn het temperatuurverschil tussen de bron en ontvanger, de resulterende emissiecoëfficiënt en de afstand tot de bron van belang. Bij een groot temperatuurverschil en een korte afstand tot de bron zal de warmtestraling ter plaatse van de ontvanger hoog zijn. Ook de ontvanger zal echter warmtestraling uitzenden, waardoor de resulterende emissiecoëfficiënt tussen bron en ontvanger zal afnemen. Hoe dichterbij een voorwerp zich bij de brand (het vlamfront) bevindt, hoe meer warmtestraling het ontvangt, en hoe meer warmtestraling het ontvangt, hoe sneller het materiaal zal opwarmen, zal gaan pyrolyseren (zie paragraaf 2.1) en mogelijk zelfs zal gaan ontbranden.

Omdat warmtestraling niet plaatsvindt door bewegende moleculen, heeft wind geen directe invloed op de uitgezonden warmtestraling van bijvoorbeeld een vlamfront. Indirect kan de wind echter wel het vlamfront beïnvloeden, waardoor dit bijvoorbeeld wordt afgebogen en dichterbij een ander gebouw komt te staan.

Waterscherm

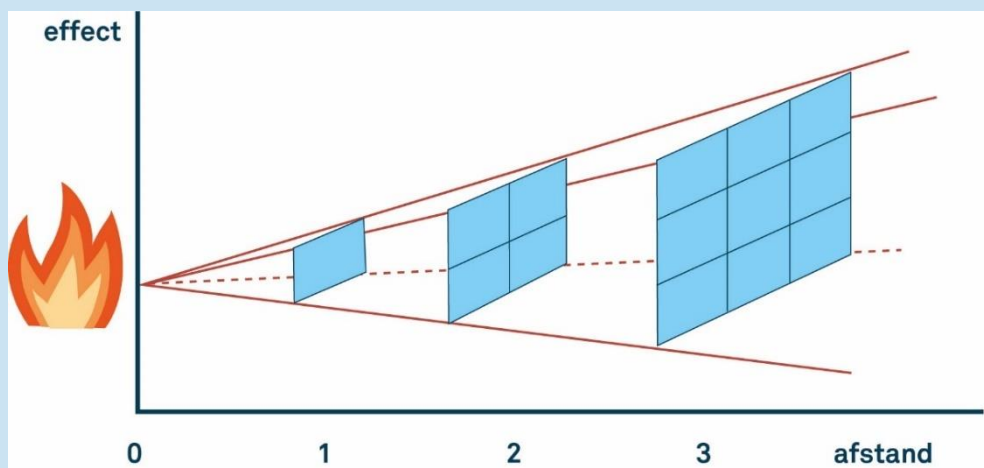
Warmtestraling wordt niet geblokkeerd door gassen. Vloeistoffen en vaste stoffen kunnen warmtestraling grotendeels tot volledig absorberen en daarmee dus afschermend werken. Door sommige stoffen vindt echter transmissie plaats zoals door glas, dat niet alle warmtestraling absorbeert. Een goed sluitend waterscherm kan ook een afscherpende werking hebben. Het waterscherm moet dan

wel één geheel zijn en voldoende dikte (enkele millimeters tot een centimeter) hebben. Met een dergelijk waterscherm kan bijvoorbeeld brandoverslag door straling worden voorkomen. Een zeer effectieve methode is het aanbrengen van een laagje water op het door de brand aangestraalde oppervlak (de ontvanger). Niet alleen wordt de straling geabsorbeerd door het laagje water, ook wordt het aangestraalde oppervlak door stroming gekoeld.

Zoals aangegeven, is de afstand van de ontvanger tot de bron ook bepalend voor de te ontvangen straling. Hierbij gaat het erom wat de zichtfactor (viewfactor) van de ontvanger ten opzichte van de bron is. Met deze zichtfactor kan vanuit de uitgezonden straling van eenstralend vlak (bron) de ontvangen straling op een ander vlak (ontvanger) worden bepaald.

Zichtfactor of viewfactor

De zichtfactor is een vermenigvuldigingsfactor waarmee de ontvangen straling op een vlak kan worden bepaald vanuit de door de bron uitgezonden straling. Deze factor heeft als symbool de Griekse letter ϕ ('phi') en is dimensieloos. De zichtfactor heeft een waarde tussen 0 en 1 en kan bepaald worden op basis van de afstand tussen de ontvanger en het stralende vlak en de afmeting van het stralende vlak. De stralingswarmte vermindert of vermeerderd kwadratisch over de afstand. Zo ontvangt een voorwerp dat tweemaal zover van een brand is verwijderd nog maar een kwart van de straling. Is de afstand driemaal zo groot, dan ontvangt het voorwerp slechts een negende deel van de straling. In de onderstaande figuur 1.7 is deze relatie tussen warmtestraling en afstand weergegeven.



Figuur 1.7 De kwadratische relatie tussen warmtestraling en afstand

1.7 Tabel met materiaaleigenschappen

Tabel 1.5 Dichtheid, soortelijke warmte en warmtegeleidingscoëfficiënt van een aantal stoffen (Bron: engineeringtoolbox.com)

Materiaal/stof	Dichtheid ρ [kg/m ³]	Soortelijke warmte c [J/kg.K]	Warmtegeleidings- coëfficiënt λ [W/m.K]
Vaste stoffen			
Aluminium	2.700	870	236
Baksteen	1.400 – 2.400	900	0,6 – 1,0
Beton (gewoon)	1.300 – 1.700	750	0,4 – 0,7
Eikenhout	600 – 900	2.000	0,17
EPS (geëxpandeerd polystyreen)	15-30	1.300	0,03
Glas	2.400 – 2.800	840	1,05
IJs	917	2.090	2,18
Koper	8.790	390	401
Lood	11.350	130	35,5
PUR schuim (polyurethaan)	30	1.300	0,03
PVC (polyvinylchloride)	1.390 – 1.420	1.670	0,19
Staal (roestvrij)	7.820	490	54
Steenwol	220 – 390	840	0,045
Vurenhout	480 – 780	2.500	0,12
Vloeistoffen			
Aceton	785	2.150	0,16
Alcohol	785	2.300	0,17
Benzine	711	2.220	0,15
Kwik	13.590	140	28,9
Melk	1.020 – 1.050	3.930	0,53
Olijfolie	911	1.970	0,17
Petroleum	640	2.130	0,159
Water	1.000	4.190	0,606

Materiaal/stof	Dichtheid ρ [kg/m ³]	Soortelijke warmte c [J/kg.K]	Warmtegeleidings- coëfficiënt λ [W/m.K]
Zeewater	1.022	3.930	-
Zwavelzuur	1.839	1.340	0,5
Gassen¹²			
Aardgas	0,7 – 0,9	2.340	-
Ammoniak	0,769	2.190	0,0249
Zwavedioxide	2,926	640	0,0086
Koolstofdioxide	1,977	844	0,0146
Koolstofmonoxide	1,25	1.020	0,0232
Lucht	1,293	1.010	0,0262
Stikstof	1,25	1.040	0,024
Waterdamp ³	0,804	2.260	0,027
Zuurstof	1,429	919	0,024

¹ De dichtheid van de gassen in de tabel is weergegeven bij een temperatuur van 0 °C.

² De warmtegeleidingscoëfficiënt van de gassen in de tabel is weergegeven bij 25 °C.

³ De dichtheid en warmtegeleidingscoëfficiënt van waterdamp in de tabel zijn weergegeven bij een temperatuur van 125 °C.

2 Brandfysica en branddynamica

Het proces van brandontwikkeling wordt beïnvloed door talloze brandfysische factoren. Hoe vindt bijvoorbeeld verbranding van een gas, een vloeistof en een vaste stof plaats? De brandweer moet deze vragen kunnen beantwoorden. Bij het verbrandingsproces komt veel energie vrij. Deze energie wordt overgedragen aan materialen en rookgassen in de omgeving. Het effect van deze opwarming is een versnelling van de brandontwikkeling. Kennis van brandfysica is niet alleen belangrijk om de groeisnelheid van een brand goed in te kunnen schatten, maar ook om te kunnen bepalen hoeveel koelend vermogen er nodig is voor een effectieve blussing. In dit hoofdstuk wordt stap voor stap uitgelegd welke fysische factoren een rol spelen bij de ontwikkeling van een brand.

We beginnen dit hoofdstuk met het verbrandingsproces. Daarna komen in achtereenvolgende paragrafen ontsteking en ontbranding, het brandvermogen en verbrandingsproducten aan de orde. In de voorlaatste paragraaf staat rook centraal. Het hoofdstuk sluit af met een tabel waarin de grenswaarden van de concentraties van verschillende gassen staan weergegeven. Dit hoofdstuk maakt duidelijk dat brandfysica én branddynamica een belangrijke rol spelen in zowel het ontstaan als de ontwikkeling van een brand.

Brandfysica en branddynamica

Brandfysica gaat over de eigenschappen van materie, straling en energie bij brand en het gedrag van brand in ruimte en tijd.

Branddynamica gaat over de werking en invloed van krachten en stoffeigenschappen bij brand, waardoor brand kan veranderen en zich kan ontwikkelen.

2.1 Verbrandingsproces

Verbranding is een (chemische) reactie tussen een brandstof en zuurstof waarbij energie in de vorm van warmte vrijkomt. Bij een hoge temperatuur is dit zichtbaar in de vorm van vlammen of het gloeien van een materiaal. We maken onderscheid in gasbranden, vloeistofbranden en vastestofbranden (zie paragraaf 2.1.3). Voor een vlammende verbranding moet een brandbare stof eerst gasvormig worden om goed te kunnen reageren met zuurstof. Een andere langzame vorm van verbranding is het smeulen van vaste stoffen.

Brandbare gassen (pyrolysegassen)

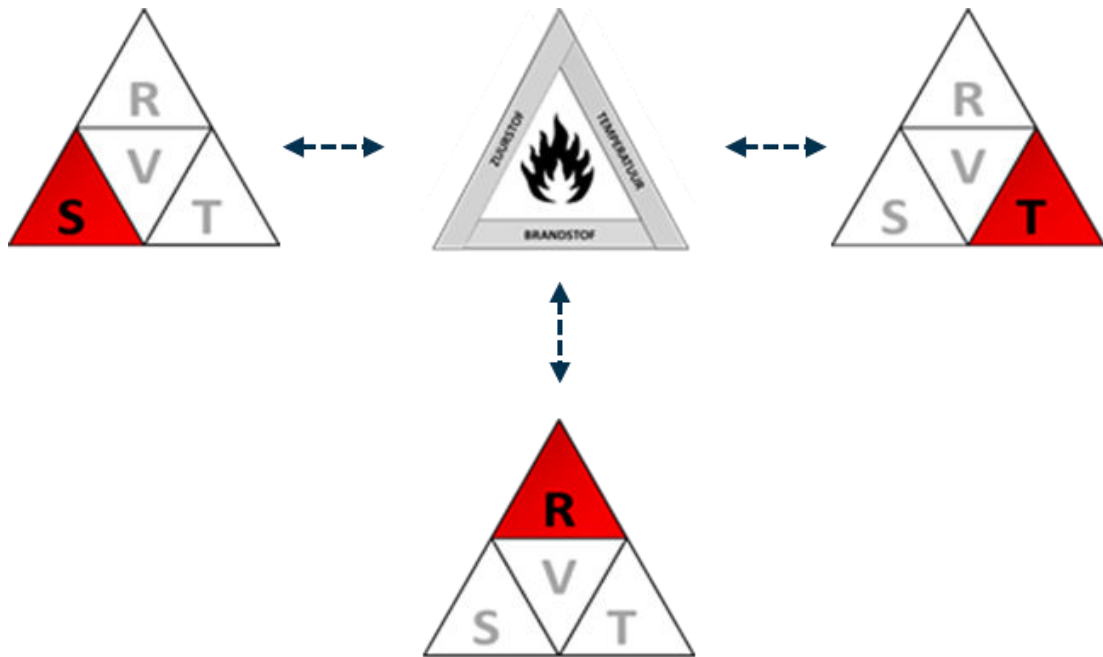
Veel stoffen ontleden onder invloed van warmte. Bij deze ontleding, de zogenaamde *pyrolyse*, vallen de moleculen uiteen onder invloed van warmte. Er ontstaan nieuwe moleculen die gasvormig of gedeeltelijk gasvormig zijn (bijvoorbeeld roet en waterdamp), zie ook *Aggregatietoestanden en faseovergangen* in paragraaf 1.3 en *Soorten branden* in dit hoofdstuk (2.1.3).

We spreken van brandbare stoffen als de ontledingsgassen of pyrolysegassen brandbaar zijn. Bij de aanwezigheid van brandstoffen in gasvorm kan de verbranding snel plaatsvinden (ontbranding of

explosie). Er is dan immers geen energie nodig voor de ontleding van de vaste of vloeibare brandstof. Bij een explosieve verbranding gaat de verbranding zó snel, dat door de uitzetting van gasen een drukverhoging of drukgolf kan ontstaan.

2.1.1 Brandstof, zuurstof en temperatuur

Verbranding als fenomeen is altijd afhankelijk van drie aspecten: brandstof, zuurstof en temperatuur (energie), zoals weergegeven in figuur 2.1. In deze zogenaamde RSTV-branddriehoek staat de R voor rook (= brandstof), de T voor temperatuur, de S voor stroming (= zuurstof) en de V voor vlam (brand als resultaat van een complete branddriehoek).



Figuur 2.1 RSTV-branddriehoek

Intermezzo: het RSTV-model

Branddeskundigen en instructeurs zijn in het verleden op zoek geweest naar een model waarbij alle indicatoren die in de praktijk kunnen worden waargenomen, gebruikt worden om te besluiten of een binneninzet veilig kan worden uitgevoerd. Zo is het zogenaamde RSTV-model ontwikkeld, dat ook in Nederland is geïntroduceerd. In dit model staat de R voor rook (en dat is brandstof), de S voor stroming (zuurstoftoevoer), de T voor temperatuur en de V voor vlammen. Hierin kunnen we duidelijk de zijden van de branddriehoek herkennen: als alle drie de zijden aanwezig zijn, zijn er immers vlammen.

Het RSTV-model gaat wel iets dieper in op de zijden van de branddriehoek en de indicatoren. Zo is de kleur van de vlam een indicatie voor temperatuur, de kleur van de rook voor het gevaar van die rook en voor de brandbaarheid van de rook als brandstof. De stroming gaat niet alleen over zuurstof (openingen), maar ook over de bijbehorende dynamiek: hoe sneller de rook naar buiten stroomt, hoe sneller zuurstof naar binnen gaat. Hoewel dit aspect nog steeds van belang is als indicator, komt het in de branddriehoek als vereenvoudiging van het RSTV-model minder sterk naar voren. Het is namelijk zo, dat er een verband is tussen de temperatuur en de druk in een ruimte en de stroming van rook of zuurstof. Als de temperatuur stijgt (de brand groeit), neemt de druk toe en zal ook de uitstroom van rook toenemen. Om de druk te verminderen, zal er een versnelde zuurstofinstroom plaatsvinden.

Zuurstofinstroom kan met de zaklamp ter hoogte van de vloer worden waargenomen. Je ziet dan in het licht van de zaklamp een duidelijke beweging van lichte rook in een bepaalde richting (in of uit). Deze stroming is een maat voor drukverschillen en dus ook een maat voor temperatuurverschillen. Maar dat kan ook omgekeerd: als er zuurstof instroomt door een ontstane opening (bijvoorbeeld een deur die opengaat of een raam dat breekt), kan de brand groeien (nadat de zuurstof de bron heeft bereikt). De temperatuur neemt toe, de druk neemt toe en de stroming (van rook naar buiten) neemt eveneens toe. Als er dus een verandering in de stroming wordt waargenomen, weten we dat er iets verandert aan de brand, en dus aan de zuurstoftoevoer.

Omdat gebleken is dat het gebruik van het RSTV-model niet die objectieve criteria oplevert waarop we hadden gehoopt en het door brandweermensen wordt ervaren als ingewikkeld, is het beter om dit RSTV-model door de wat eenvoudiger branddriehoek te vervangen als verkenningsmodel. De branddriehoek bevat alle elementen, en het is voldoende voor manschappen om te begrijpen dat we door het wegnemen van een zijde (of door te voorkomen dat een zijde erbij komt) de brand kunnen uitmaken. Het gaat dan om óf koelen (blussen), óf dicht maken of laten (zuurstof), óf wachten tot de brandstof op is. Dit zijn in feite de standaardtechnieken van brandbestrijding

Hieronder wordt ingegaan op de drie zijden van de branddriehoek, waarna verschillende verbrandingsreacties en soorten branden aan bod komen.

Brandstof

De brandstof van alle branden wordt gevormd door pyrolysegas. Een stof kan immers alleen in de gasvorm branden, zoals hiervoor al is uitgelegd. Een pyrolysegas is een stof in gasvormige toestand, in tegenstelling tot de meeste stoffen die we in onze omgeving in vaste of vloeibare toestand tegenkomen.

Vaak zijn materialen samengesteld uit verschillende stoffen. Deze stoffen hebben dus niet dezelfde molecuulsamenstelling. Hout is bijvoorbeeld regelmatig gelakt of geverfd (lak en verf zijn beide in basis een vloeistof), en gordijnen die gemaakt zijn van een vaste stof zijn van een patroon voorzien door kleurstoffen (die ook in basis vloeibaar zijn). Zo zijn veel van de materialen om ons heen gemaakt van verschillende stoffen met elk hun eigenschappen, aangepast aan het gebruik. Dit geeft de complexiteit van een brand in een gebouw aan. In de constructie, bekleding en inventaris van een gebouw komen veel soorten materialen bij elkaar samen. Elk materiaal heeft invloed op het verbrandingsproces en daarmee op de brandontwikkeling. Denk bij de constructie van het gebouw bijvoorbeeld aan staal, beton en hout. Bij bekleding van het gebouw kun je denken aan tegels, verf, stucwerk en behang en bij de inventaris aan meubels (kunststoffen) en andere inrichtingselementen. In hoofdstuk 3 en 4 worden het brandverloop en de interactie tussen brand en het gebouw uitgebreid behandeld.

Ontledingstemperatuur

De ontledingstemperatuur is de temperatuur waarbij een stof van de vaste of vloeistoffase overgaat naar de gasfase. Hoe lager de ontledingstemperatuur van een stof, hoe sneller zich brandbare gassen ontwikkelen. De bijdrage van stoffen met een lage ontledingstemperatuur aan de groeisnelheid van een brand is dus groter dan die van stoffen met een hogere ontledingstemperatuur.

Andere termen voor ontledingstemperatuur

Voor ontledingstemperatuur worden ook andere termen gebruikt die zich richten op een specifieke faseovergang (zie paragraaf 1.3). Zo wordt de temperatuur die nodig is om een vaste stof over te laten gaan naar de gasfase ook wel de vergassingstemperatuur genoemd, en wordt de temperatuur

die nodig is om een vloeistof over te laten gaan naar de gasfase ook wel verdampingstemperatuur genoemd.

Ontledingsenergie

De ontledingsenergie is de hoeveelheid (warmte-)energie die nodig is om een stof te laten pyrolyseren (uitgassen) en hangt direct samen met de ontledingstemperatuur van de stof. Hoe meer warmte er nodig is om een stof op te warmen tot zijn ontledingstemperatuur, des te lager de bijdrage is van deze stof aan de groeisnelheid van een brand. Er gaat immers energie 'verloren' aan de opwarming van de stof. De ontledingsenergie wordt uitgedrukt in kilojoule (kJ).

Een vaste en vloeibare stof kunnen nooit zomaar branden; ze zullen eerst gasvormig moeten worden. In het kader hiervoor is dat al aangestipt. Ook later in dit hoofdstuk (*Ontsteking en ontbranding*, paragraaf 2.2) komen we hier nog op terug wanneer de temperatuur van brand behandeld wordt. Doordat bij een brand de brandstof in gas verandert, hebben we standaard te maken met een gas dat brandt.

Zuurstof (en mengverhouding)

Zuurstof is in lucht aanwezig. Lucht bestaat namelijk voor 21 % (volumeprocent) uit zuurstofgas, voor 78 % uit stikstofgas en voor 1 % uit andere gassen. Zuurstof onderhoudt de brand, zolang het in voldoende mate aanwezig is. Als een brand groter wordt, is er meer zuurstof nodig om de brand in stand te houden. In een gesloten ruimte neemt de hoeveelheid zuurstof af bij een doorgaande verbranding. Ook in een ruimte met beperkte openingen kan de hoeveelheid zuurstof afnemen. Dit is het geval als de verbruikte hoeveelheid zuurstof door verbranding groter is dan de door openingen instromende hoeveelheid zuurstof. Een afnemende hoeveelheid zuurstof heeft effect op de brand: er kan minder brandstof verbranden, waardoor het vlamfront zal krimpen.

Dichthouden ruimte

Bij brandbestrijding wordt vaak gesproken over het 'dichthouden van de ruimte'. Het is namelijk belangrijk om de ventilatiestromen van en naar de brand en daarmee de zuurstoftoevoer naar de brand te controleren. Bij een ongecontroleerde aanvoer van zuurstof door allerlei openingen zoals openstaande deuren en ramen naar de brandruimte kan de brand in omvang blijven toenemen (groeïend vlamfront).

Voor een optimale verbranding is de mengverhouding tussen zuurstof en brandstof belangrijk. Wanneer de brandstof zich goed mengt met zuurstof, kan de brand zich beter onderhouden en gemakkelijker uitbreiden. Denk hierbij aan de brandbare rookgassen (brandgassen) waarmee de brandruimte zich vult. Wanneer die goed opmengen met zuurstof, is de kans op een snelle verbranding van die gassen het grootst.

Temperatuur (energie)

Het derde aspect dat nodig is om een brand te laten ontstaan, is energie (vaak uitgedrukt als temperatuur). Brandstof en zuurstof zijn altijd om ons heen zonder dat materialen spontaan in brand vliegen; hieraan zien we meteen dat energie (warmte) een doorslaggevende rol speelt in het veroorzaken van brand. We spreken dan niet over temperatuur, maar over *temperatuurverhoging als gevolg van toegevoerde energie*. Wanneer een stof door toegevoerde energie wordt verwarmd, vinden er allerlei veranderingen plaats die ertoe leiden dat de stof gaat ontleden. Dit ontleden heeft als gevolg dat vaste stoffen en vloeistoffen gasvormig worden. De minimale temperatuur waarbij een stof gaat ontleden, is afhankelijk van de stoffeigenschappen en verschilt daarom per stof. Zo kunnen kunststoffen al gaan ontleden bij

90 °C, terwijl andere vaste stoffen een (veel) hogere ontledingstemperatuur hebben. Vloeistoffen daarentegen kennen een veel lagere ontledingstemperatuur dan vaste stoffen.

Verlagen van de temperatuur

Brand gaat in de regel gepaard met een temperatuurverhoging, waardoor er steeds meer materialen gaan pyrolyseren en er meer gassen kunnen verbranden. Ook neemt de temperatuur van de rook toe. Hierdoor is er een toenemend risico op de ontbranding van gassen in de rook die nog niet verbrand zijn. Het koelen van de rook en de brandstof is daarom een van de doelstellingen van de brandweer bij brandbestrijding. Door het koelen van de rook wordt het risico op ontbranding van gassen in de rook beperkt. Daarnaast wordt door het koelen van de rook en de brandstof de pyrolyse en dus het ontstaan van nieuwe brandbare gassen beperkt.

Hoe langer een materiaal verwarmd wordt en hoe meer warmte erin opgeslagen is, hoe meer de atomen in beweging komen en het materiaal gaat ontleden. Dit ontleden wordt zichtbaar als er lichte rook (gas) van het materiaal vrijkomt. Deze rook – het eerder genoemde pyrolysegas – is brandbaar. De eigenschappen van het materiaal bepalen bij welke temperatuur het spontaan ontbrandt. Deze temperatuur noemen we de *zelfontbrandings-temperatuur*. Hier komen we later in dit hoofdstuk nog op terug.

Behalve door zelfontbranding, kunnen rookgassen ook ontstoken worden door een bron van buiten, bijvoorbeeld een aansteker. De aansteker is dan de ontstekingsbron (de temperatuurverhoging), omdat het vlammetje daarvan het gas verder opwarmt. De aansteker voert de energie toe naar de brandstof die voor de opwarming (temperatuurverhoging) van deze brandstof nodig is.

Bij de opwarming van een vaste stof zal eerst het vocht in het materiaal verdampen. Dit is te zien aan de nevel (waterdamp en waterdruppeltjes) die daarbij vrij komt. Verwar deze nevel niet met de lichtgrijze pyrolysegassen die vrijkomen bij de ontleding van de stof.

2.1.2 Verbrandingsreactie

Verbranding is een reactie tussen een brandstof en zuurstof waarbij energie in de vorm van warmte vrijkomt. Deze energie is afhankelijk van de verhouding waarin brandstof en zuurstof reageren. Dit wordt ook wel de mengverhouding tussen brandstof en zuurstof genoemd. Bij de ideale mengverhouding wordt alle zuurstof en brandstof verbruikt en gaat de reactie het snelst. Bij deze ideale mengverhouding kan de reactievergelijking tussen brandstof en zuurstof als volgt worden omschreven:



Als de mengverhouding niet ideaal is, blijven er moleculen over van de brandstof of zuurstof die teveel aanwezig is. Dit heeft invloed op de temperatuur van de vlammen: de moleculen worden immers wel opgewarmd, maar nemen niet deel aan de reactie. Hierdoor gaat er energie verloren en is de temperatuur van de vlammen lager. Als er te veel energie verloren gaat, kan de verbrandingsreactie stoppen (zie ook paragraaf 2.2 *Ontsteking en ontbranding*).

Endotherme en exotherme reactie

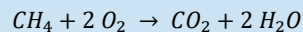
Voor een *endotherme reactie* is energie nodig om de reactie op gang te houden. Een voorbeeld van een endotherme reactie is bijvoorbeeld het verdampen van water. Vloeibaar water wordt omgezet in een gasvormige aggregatietoestand. De moleculen kunnen zich in de gasvormige toestand op grotere afstand van elkaar bevinden en bewegen. Als het kookpunt van water wordt bereikt, neemt de temperatuur niet verder toe, totdat al het water is verdampt. De toegevoerde energie wordt gebruikt voor het overgaan van de watermoleculen van vloeibare naar gasvormige toestand.

Bij een *exotherme reactie* komt energie vrij. Een voorbeeld van een exotherme reactie is bijvoorbeeld het condenseren van water. Gasvorming water wordt omgezet in vloeibaar water en daarbij komt energie vrij. Voor de vorming van vloeibaar water is minder energie nodig, doordat de moleculen zich dichter bij elkaar bevinden en bewegen. De opgeslagen energie in de chemische verbindingen tussen de moleculen wordt omgezet in warmte.

Verbranding is een exotherme reactie, omdat er bij de reactie energie vrijkomt. Als er voldoende energie geproduceerd wordt voor pyrolyse of verdampen van de brandstof, houdt de verbranding zichzelf in stand. Niet alle energie die bij de verbrandingsreactie vrijkomt, wordt weer door die reactie gebruikt. Zo is er sprake van warmteverlies door geleiding, stroming en straling, maar gaat er ook warmte verloren door opwarming van gassen in de lucht die niet deelnemen aan de verbrandingsreactie.

Voorbeeld van een verbrandingsreactie: een chemische reactievergelijking

Een voorbeeld van een verbrandingsreactie is de verbranding van methaan (aardgas):

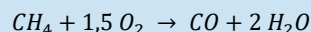


Dit is de ideale mengverhouding tussen brandstof en zuurstof bij de verbranding van methaan. Voor de verbranding van elk molecuul methaan zijn twee zuurstofmoleculen nodig. Een dergelijke ideale mengverhouding wordt ook wel de *stoichiometrische verhouding* genoemd.

Onvolledige verbranding (praktijk)

De verbrandingsreactie van gassen wordt in de reactievergelijking meestal in de ideale mengverhouding weergegeven. Dit wordt ook wel een volledige verbranding genoemd. Die ideale mengverhouding wordt in de praktijk echter meestal niet bereikt. Bij branden in gebouwen is er een grote kans op een tekort aan zuurstof. Als er onvoldoende zuurstof aanwezig is, kunnen er allerlei andere verbrandingsproducten gevormd worden, zoals bijvoorbeeld roet en koolstofmonoxide. Welke verbrandingsproducten gevormd worden, is niet alleen afhankelijk van de hoeveelheid aanwezige zuurstof, maar onder ander ook van de soort brandstof en de temperatuur. In paragraaf 2.3 wordt hier nader op ingegaan. Een verbranding bij een niet-ideale mengverhouding noemen we ook wel een onvolledige verbranding.

Een voorbeeld van een verbrandingsreactie bij onvolledige verbranding van methaan (aardgas) is:



In dit voorbeeld wordt er bij de verbranding geen koolstofdioxide (CO₂), maar koolstofmonoxide (CO) gevormd. Let op: dit is een voorbeeld. In de werkelijkheid zijn er bij een onvolledige verbranding diverse reacties met veel verschillende verbrandingsproducten mogelijk.

2.1.3 Soorten branden

Vastestofbranden

In vaste stoffen kunnen geen (nieuwe) zuurstofmoleculen tussen de moleculen van de stof komen. De moleculen van een vaste stof kunnen dus niet makkelijk reageren met zuurstof, ook al gaat het om een brandbare vaste stof. Dit heeft tot gevolg dat vaste stoffen in hun vaste vorm niet kunnen branden. Door opwarming van een brandbare vaste stof gaat het materiaal ontleden (pyrolyseren) en komen er brandbare gassen vrij. Pas wanneer deze gassen zich kunnen mengen met voldoende zuurstof, kunnen zij branden. Bij een brand met een vaste stof zijn het dus de gassen die branden en niet de vaste stof.

Vaste stoffen kunnen alleen aan de oppervlakte branden, zodra er aan die oppervlakte gassen uittreden als gevolg van de ontleding van de vaste stof door de opwarming van de moleculen. Er is maar een beperkt contact tussen de brandbare stof en zuurstof. Poreuze stoffen, waarbij de zuurstof in de stof kan doordringen, hebben een veel groter oppervlak waar verbranding kan plaatsvinden. Verschillende organische stoffen kunnen poreus worden door ze gedurende lange tijd bloot te stellen aan een temperatuur van 100-150°C. Een voorbeeld is cellulose, het hoofdbestanddeel van hout en katoen. Cellulose ondergaat inwendige veranderingen bij een blootstelling aan een wat hogere temperatuur. Vluchtige stoffen verdampen uit de cellulose en de stof wordt poreus.

Pyrolyse of thermische ontleding

Pyrolyse is het ontledingsproces van vaste stoffen als gevolg van brand. Een ander woord voor pyrolyse is thermische ontleding. Een ontleding is een chemische reactie waarbij één molecuul uit elkaar valt in twee of meer kleinere moleculen. Pyrolyse is dus een (zichtbare) ontleding onder invloed van de verhoogde temperatuur. Er treden onomkeerbare veranderingen op in de vaste stof, waarbij een aantal ontledingsproducten zoals gas de vaste stof verlaat.

Door de pyrolyse valt het oppervlak van het materiaal uit elkaar, waardoor dit poreuzer en groter wordt. De zuurstof kan gemakkelijk in het poreuze materiaal doordringen. Aan dat sterk vergrote oppervlak kan een exotherme reactie plaatsvinden waardoor warmte wordt geproduceerd. Als deze warmte niet voldoende kan worden afgevoerd, vindt er zelfopwarming plaats en kan zelfontbranding optreden. Dergelijke gevallen van zelfontbranding kunnen zich voordoen bij een houten vloer onder een kachel of open haard als er onvoldoende warmteafvoer is. Het pyrolyseproces en de zelfopwarming verlopen heel langzaam en het kan weken of maanden duren voordat zelfontbranding optreedt.

Pyrofore stoffen

Stoffen zoals cellulose die poreus kunnen worden, vervolgens sterk gaan oxideren en neigen tot zelfontbranding, noemen we pyrofore stoffen.

Vloeistofbranden

Ook in vloeistoffen kunnen de moleculen van de stof en de zuurstof niet goed met elkaar mengen. Vloeistof zelf brandt niet, evenmin als vaste stoffen. Als we een vloeistof zien branden, zijn het de losse moleculen in de dampfase boven de vloeistof die reageren met zuurstof. Het verschil met een vaste stof is dat een vloeistof sneller ontleedt (uitdamp) dan een vaste stof. Bij de reactie met zuurstof komt warmte vrij, waardoor er meer moleculen ontsnappen uit de vloeistof. De moleculen die zo in de dampfase komen, kunnen dan weer reageren met zuurstof en zo gaat de reactie door.

Gasbranden

In een gas kan zuurstof goed mengen met de moleculen van een andere stof. De moleculen van een brandbaar gas kunnen dus makkelijk met zuurstof reageren. Bij gasbranden is er dan ook minder energieverlies dan bij het opwarmen van een vaste stof of vloeistof, voordat daar de brandbare gassen uittreden. Dit verklaart waarom brandbare stoffen in de gas- of dampfase sneller verbranden dan in de vloeistof- of vastestoffase.

Brandbestrijding van verschillende soorten branden

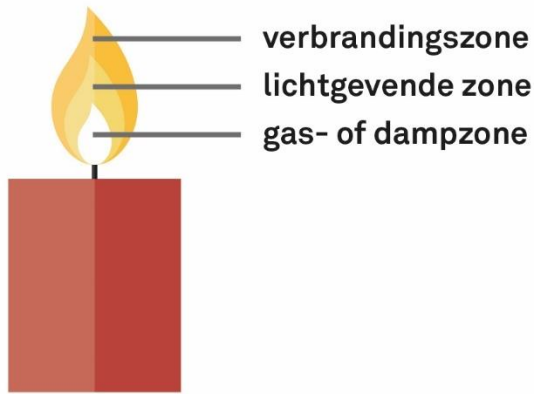
Voor alle soorten branden geldt dat het uiteindelijk de gassen zijn die branden. Dit is van belang voor de brandbestrijding. Het gaat dus eigenlijk om *gasbrandbestrijding*. De toestand van de brandstof is echter ook van belang, omdat die de mogelijkheden voor brandbestrijding mede bepaalt. Bij bijvoorbeeld een brand met een vaste stof kan het oppervlak van de vaste stof worden gekoeld met vloeibaar water om de pyrolyse te stoppen. Bij bijvoorbeeld een vloeistofbrand kan het oppervlak van de vloeistof worden afgedekt met schuim, zodat het ontledingsproces wordt onderbroken. Bij het bestrijden van een gasbrand gaat het niet om het onderbreken van het ontledingsproces, maar om het voorkomen van ontsteking of het voorkomen van een exotherme reactie. Daarom wordt bij het bestrijden van een gasbrand koeling gecombineerd met het veranderen van de mengverhouding tussen brandstof en zuurstof. Dit laatste aspect vraagt inzicht in de aanwezige mengverhouding. Zie ook paragraaf 2.2.3 over *Brandbaarheidsgrenzen*.

2.1.4 Vlammen

Vlammen zijn het resultaat van het samenkomen van de brandstof, de zuurstof en de temperatuurverhoging. De vlam van een kaars is hiervan een mooi voorbeeld: als we een kaars aansteken, zien we het kaarsvet (de brandstof) om de pit smelten. Dit vloeibare kaarsvet wordt in de pit opgezogen en zal daar door de temperatuurverhoging gasvormig worden. Als gas kan het kaarsvet veel beter met zuurstof mengen om er vervolgens mee te reageren (verbranden) dan als vloeistof of als vaste stof. Bij het gasvormige kaarsvet zien we een blauw gasbolletje ontstaan, waarvan alleen de onderkant zichtbaar is. Als het bolletje gas in aanraking komt met zuurstof en verbrandt, vormt zich een restproduct in de vorm van koolstof. Die koolstof zien we weer verbranden in het gele gedeelte van de vlam. De vlam bestaat inwendig volledig uit brandbare stoffen.

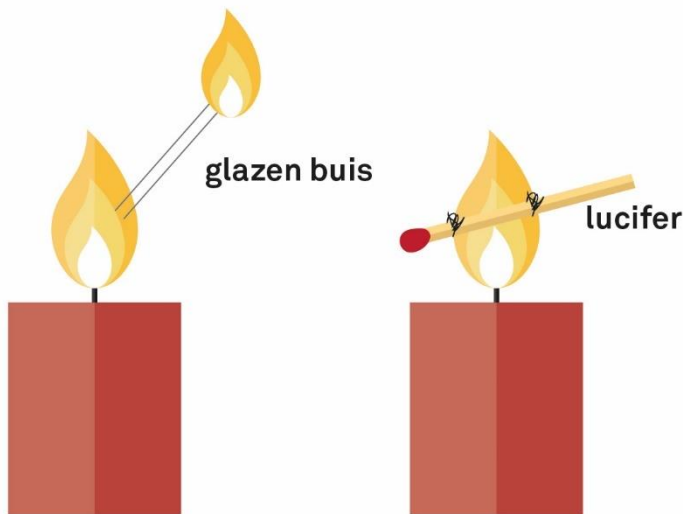
Gaszone, lichtgevende zone en verbrandingszone

De gaszone van een vlam is duidelijk te zien als een kleine donkere vlek om en boven de pit (zie figuur 2.2 op de volgende pagina). In deze zone is de temperatuur ongeveer 800 °C. Om de gaszone heen bevindt zich de lichtgevende zone: omdat de koolstof in de vlam door een gebrek aan zuurstof nauwelijks kan verbranden, gaat de onverbrande koolstof gloeien door de hitte en geeft dan licht. In deze lichtgevende zone bedraagt de temperatuur ongeveer 1200 °C. Wat verder van de pit – in de verbrandingszone – wordt de onverbrande koolstof met zuurstof uit de lucht vermengd. Daar kan verbranding plaatsvinden. Vandaar dat deze zone de verbrandingszone heet. Deze zone is niet zichtbaar, maar de temperatuur is er het hoogst (ongeveer 1400 °C).



Figuur 2.2 Zones van een vlam

De aanwezigheid van een gaszone en een verbrandingszone kan eenvoudig aangetoond worden door de proefjes die in figuur 2.3 zijn afgebeeld. Het proefje de linker afbeelding toont aan dat de kern van de vlam uit een brandbaar gas bestaat. Als we dit gas via een glazen buisje aftappen, kunnen we het aan het einde van het buisje ook weer aansteken. Het proefje in de rechter afbeelding demonstreert dat de verbrandingszone een hogere temperatuur heeft dan gaszone. Een lucifer die in de vlam gehouden wordt, zal het eerst gaan branden in de verbrandingszone. Deze experimentjes met een brandende kaars laten zien dat het bij de branddriehoek (en dus in de branddynamica) altijd gaat om de mengverhouding tussen brandstof en zuurstof bij een bepaalde temperatuur.



Figuur 2.3 Het aantonen van een gas- en verbrandingszone

Type vlammen

Er zijn in principe twee typen vlammen: de diffuse vlam en de voorgemengde vlam.

Diffuse vlam: de zuurstof mengt zich aan de buitenzijde met de brandbare gassen. Een voorbeeld van een diffuse vlam is een kaarsvlam.

Voorgemengde vlam: de zuurstof is vooraf gemengd met de brandbare gassen. Een voorbeeld zijn de vlammen van een gasfornuis of een gasbrander.

Stromingsrichting van vlammen

Er zijn ook twee stromingsrichtingen van vlammen: laminaire stroming en turbulente stroming.

Een *laminaire stroming* is een stroming waarbij het stromingspatroon in één richting plaatsvindt en niet of nauwelijks verandert.

Een *turbulente stroming* is een stroming waarbij het stromingspatroon continu verandert en stromingen in verschillende richtingen plaatsvinden.

Een voorbeeld van een laminaire diffuse vlam is bijvoorbeeld de vlam van een aansteker of een kaars. Bij een kaars kan de zuurstof zich alleen via de buitenzijde met de brandstof mengen. Daarom heet de buitenzijde van de kaars de verbrandingszone.

Een laminair voorgemengde vlam is bijvoorbeeld de vlam van een gasbrander. Omdat een voorgemengde vlam door een volledige verbanding nauwelijks koolstofresten achterlaat, is zo'n vlam veel schoner (en daarom blauw van kleur) dan een diffuse (niet voorgemengde) vlam.

Bij branden in de praktijk hebben we meestal te maken met turbulente diffuse vlammen. Uiteraard gaat het bij een brand niet om één vlam, maar om een grote hoeveelheid vlammen. Dit noemen we een *vlamfront*. Omdat er voor een brand veel zuurstof nodig is, ontstaat er een luchtstroming langs en door het vlamfront. Het vlamfront wordt hierdoor turbulent. Door deze turbulentie komt onder andere de koolstof vrij die in de vlammen zit opgeslagen.

2.2 Ontsteking en ontbranding

2.2.1 Ontstekingsenergie

Een stof gaat niet zomaar uit zichzelf branden. Er is een hoeveelheid energie (warmte) voor nodig om de reactie op gang te brengen. Deze energie noemen we de ontstekingsenergie. Een ontstekingsbron moet deze energie leveren en kan zelf ook een exotherme reactie zijn. Er zijn diverse ontstekingsbronnen te onderscheiden. In het onderstaande kader worden verschillende ontstekingsbronnen opgesomd.

Diverse ontstekingsbronnen

Open vuur (vlammen)

- > de vlam van een lucifer
- > branders
- > kooktoestellen.

Gloeiende of hete oppervlakken

- > aangestoken sigaret
- > elektrische kookplaten
- > strijkijzers
- > gloeilampen.

Chemische reacties

Bij een chemische reactie kan voldoende energie vrijkomen om een stof te ontsteken. Een voorbeeld hiervan zijn proppen en votten doordrongen met vet of een ander organisch materiaal dat bij contact met de lucht kan gaan oxideren. Als bij deze reactie voldoende warmte vrijkomt, kan er een ontsteking plaatsvinden.

Electrische energie

Elektrische energie kan ook vaak tot een ontsteking leiden. Deze energie hoeft niet altijd van het elektriciteitsnet te komen; ook statische elektriciteit (elektrostatische lading) kan voldoende energie leveren voor een ontsteking.

Elektrische energie kan op verschillende manieren een ontsteking veroorzaken:

- > vonken of vlambogen veroorzaakt door elektrische kortsluiting
- > te grote stroomsterkte waardoor leidingen en toestellen gevaarlijk heet worden
- > elektrische toestellen die warmte produceren, zoals straalkachels, soldeerbouten en strijkijzers

- > vonken van motoren of in schakelaars
- > vonken door statische ladingen.

Mechanische energie

Ook mechanische energie kan voor een ontsteking zorgen. Voorbeelden hiervan zijn:

- > wrijving bij een drooggelopen lager of remschoenen
- > bewerkingen waarbij vonken ontstaan, zoals slijpen en lassen
- > een slag of stoot, bij contact tussen stalen voorwerpen of steen op steen.

2.2.2 Ontbrandings- en zelfontbrandingstemperatuur

De ontbrandingstemperatuur is de laagste temperatuur waarbij een bepaalde stof kan ontbranden onder invloed van een ontstekingsbron. De ontbrandingstemperatuur hangt voor een groot deel af van de grootte van de moleculen en de dichtheid van de betreffende stof. Moleculen die zijn opgebouwd uit meer atomen hebben een hogere ontbrandingstemperatuur dan moleculen met minder atomen. Hierdoor moet er meer energie worden toegevoerd om de stof te laten reageren en ontbranden.

Een stof ontbrandt in droge lucht makkelijker dan in vochtige lucht. Dit komt, omdat droge lucht minder waterdamp bevat dan vochtige lucht. Water heeft een hoge warmtecapaciteit, wat betekent dat er veel energie nodig is om vochtige lucht op te warmen. Hoe vochtiger de lucht, hoe meer energie er nodig is om de lucht op te warmen en hoe langer het duurt voordat de ontbrandingstemperatuur wordt bereikt.

Vlampunt en brandpunt

Voor vloeistoffen wordt voor de ontbrandingstemperatuur meestal de term *vlampunt* gebruikt. De vloeistof brandt niet zelf, maar wel de damp die boven de vloeistof aanwezig is. Boven een vloeistof is vrijwel altijd damp aanwezig, maar de hoeveelheid daarvan verschilt. Hoe hoger de temperatuur van de vloeistof, hoe meer vloeistof er kan verdampen en hoe meer damp zich boven de vloeistof bevindt. Het vlampunt is de laagste temperatuur waarbij er voldoende damp boven de vloeistof aanwezig is om bij contact met een ontstekingsbron te ontbranden.

Op de temperatuur van het vlampunt is er echter nog te weinig damp boven de vloeistof aanwezig om de ontbranding ná ontsteking in stand te houden. De laagste temperatuur waarbij dit wél het geval is, wordt het *brandpunt* genoemd. Deze temperatuur ligt hoger dan het vlampunt. Op en boven de temperatuur van het brandpunt worden alle door de verbranding verbruikte moleculen door de verdamping direct aangevuld, zodat de vlam blijft branden. Er zit vaak maar een verschil van enkele graden tussen het vlampunt en het brandpunt.

Ontvlambaarheid

Op basis van het vlampunt wordt vaak het gevaar van een vloeistof aangeduid. Hiervoor zijn de volgende drie gevarenklassen gedefinieerd:

- > zeer licht ontvlambaar: vlampunt lager dan 0 C°
- > licht ontvlambaar: vlampunt tussen 0 C° en 21 C°
- > ontvlambaar: vlampunt tussen 21 C° en 55 C°.

Stoffen met een hoger vlampunt dan de definitie 'ontvlambaar' worden vaak aangeduid als *brandbaar* of *onbrandbaar onder normale omstandigheden*.

Naast de ontbranding door een ontstekingsbron kan ook zelfontbranding plaatsvinden. Zelfontbranding treedt op wanneer een stof is opgewarmd tot de zelfontbrandingstemperatuur. Bij deze temperatuur kan een stof spontaan gaan branden, dus zonder ontstekings-

bron. De ontstekingsenergie wordt dan geleverd door de hoge temperatuur van de stof zelf. De laagste temperatuur waarbij dit gebeurt, noemen we de *zelfontbrandingstemperatuur*. In figuur 2.4 wordt het verschil tussen vlampunt, brandpunt en zelfontbrandingstemperatuur schematische aangegeven.



Figuur 2.4 Verschil tussen vlampunt, brandpunt en zelfontbranding

Met name bij vaste stoffen, maar ook bij vloeistoffen, zijn de ontbrandings- en zelfontbrandingstemperatuur niet altijd goed vast te stellen. Daarom worden deze voor bepaalde stoffen in een bereik weergegeven. In tabel 2.1 zijn de ontbrandings- en de zelfontbrandingstemperatuur van diverse stoffen weergegeven. Voor het samenstellen van deze tabel is gebruik gemaakt van verschillende bronnen (Van Mierlo & Tromp (2014), Wikipedia, Hurley (2016) en de engineeringstoolbox).

Tabel 2.1 Ontbrandings- en zelfontbrandingstemperatuur van verschillende stoffen

Materiaal/stof	Ontbrandingstemperatuur met ontstekingsbron [°C]	Zelfontbrandingstemperatuur [°C]
Vaste stoffen		
Hout	330 – 364	300 – 482
Katoen	230 – 270	250 – 254
Papier	-	218 - 246
Polystyreen	-	490
Polyurethaan (hardschuim)	378	502 – 550
PVC	360 – 430	480 – 550
Vloeistoffen		
Aceton	0	465
Methanol	52	464
Kerosine	100 – 162	210
Diesel	100 – 130	210
Ethanol	63	363
Benzine	-45	246 – 280

Materiaal/stof	Ontbrandingstemperatuur met ontstekingsbron [°C]	Zelfontbrandingstemperatuur [°C]
<i>Gassen</i>		
Acetyleen	-	305
Butaan	-72	405
Methaan	-187	540
Koolstofmonoxide	- 91	609
Ethaan	-130	515
Waterstof	-	400
Propaan	-102	450
Styreen	31	490

Zelfopwarming

Zelfopwarming is een temperatuurverhoging van een stof, zonder dat er van buitenaf warmte aan de stof wordt toegevoegd; de warmte wordt in de stof zelf geproduceerd. Zelfopwarming kan leiden tot zelfontbranding, maar dit hoeft niet. In een aantal gevallen stopt het proces van zelfopwarming namelijk vóórdat er zelfontbranding optreedt. Dit kan bijvoorbeeld gebeuren doordat er bij een hogere temperatuur van de stof meer energie (warmte) aan de omgeving wordt afgestaan dan dat er wordt vastgehouden.

2.2.3 Brandbaarheidsgrenzen

Niet alle gasmengsels kunnen tot ontbranding komen. Van belang voor een ontbranding is de aanwezigheid van brandstof (brandgassen), zuurstof en temperatuur (energie), zoals omschreven in paragraaf 2.1.1. Daarnaast is de mengverhouding tussen brandstof en zuurstof van belang. Deze mengverhouding wordt weergegeven met grenzen. Binnen deze grenzen, die de brandbaarheidsgrenzen worden genoemd, is het mengsel brandbaar.

Andere benamingen voor brandbaarheidsgrenzen

Voor de brandbaarheidsgrenzen worden ook andere termen gebruikt, zoals explosiegrenzen, ontstekingsgrenzen of ontvlambaarheidsgrenzen (flammability limits). Er moet hierbij echter wel een goed onderscheid gemaakt worden tussen een ontbranding en een explosie. Een snelle verbranding van gassen is een ontbranding, maar een ontbranding is niet automatisch ook een explosie. Zoals eerder aangegeven in paragraaf 2.1, is een explosie een snelle verbranding waarbij door de uitzetting van gassen een drukverhoging of drukgolf ontstaat.

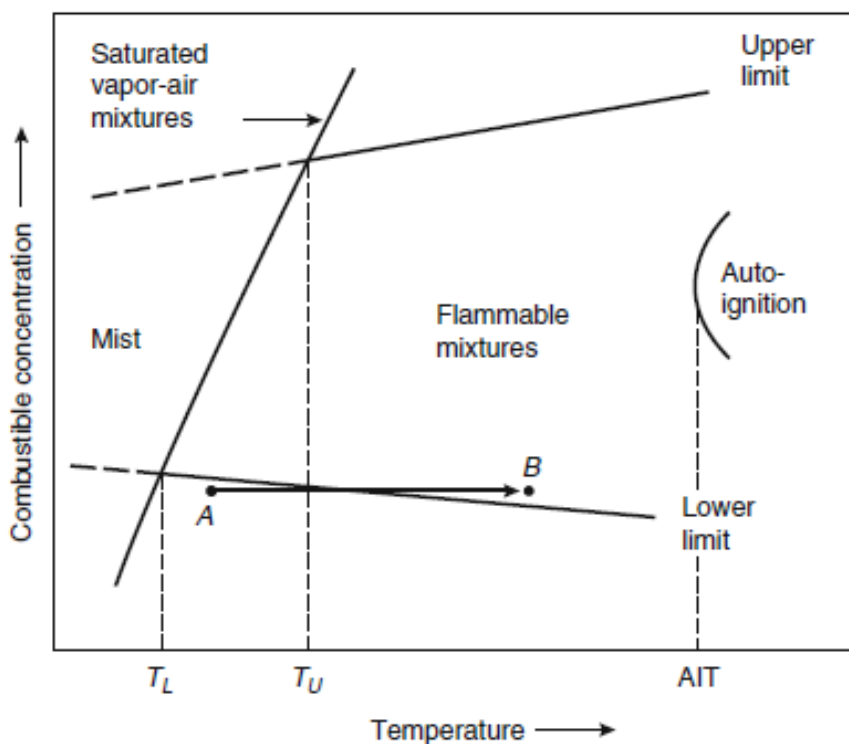
De grenzen zijn een onderste brandbaarheidsgrens (LFL, lower flammability limit) en een bovenste brandbaarheidsgrens (UFL, upper flammability limit) (zie figuur 2.5 op de volgende pagina). Tussen deze grenzen is sprake van brandbare mengsels, daarbuiten dus niet. Oftewel: binnen het gebied van de grenzen is de mengverhouding tussen brandstof en zuurstof zodanig, dat ontbranding kan plaatsvinden. Vandaar de term brandbaarheidsgrenzen.

Beide brandbaarheidsgrenzen zijn temperatuurafhankelijk. De grenzen van een brandbaar mengsel worden ruimer bij een toenemende temperatuur. Oftewel: de onderste brandbaarheidsgrens daalt en de bovenste brandbaarheidsgrens stijgt bij een toenemende temperatuur.

tuur. De bovenste grens is daarnaast gevoelig voor de verhouding tussen zuurstof- en inerte gasconcentraties zoals stikstof en water (in gasvorm). Bij toenemende zuurstofconcentraties en afnemende inerte gasconcentraties zal de bovenste brandbaarheidsgrens stijgen, terwijl de onderste brandbaarheidsgrens vrijwel onveranderd blijft.

Verklaring van de termen uit figuur 2.5

Combustible concentration	=	Brandbare concentratie
Saturated vapor-air mixtures	=	Verzadigde damp-lucht mengsels
Mist	=	Mist
Flammable mixtures	=	Brandbare mengsels
Upper limit	=	Bovengrens
Lower limit	=	Ondergrens
Auto-ignition	=	Zelfontbranding
AIT	=	ZOT (zelfontbrandingstemperatuur)
T_L	=	Onderste temperatuurlimiet of ontbrandingstemperatuur
T_u	=	Bovenste temperatuurlimiet
LFL	=	OBG (onderste brandbaarheidsgrens)
UFL	=	BBG (bovenste brandbaarheidsgrens)



Figuur 2.5 Brandbaarheidsgrenzen (Bron: Hurley (2016), p. 532, figuur 17.5)

In tabel 2.2 op de volgende pagina zijn voor een aantal gangbare gassen de brandbaarheidsgrenzen, de ontbrandingstemperatuur met ontstekingsbron (T_L , lower temperature limit) en de zelfontbrandingstemperatuur (AIT, auto ignition temperature) weergegeven. De ontbrandingstemperatuur met ontstekingsbron en de zelfontbrandingstemperatuur corresponderen met tabel 2.1. De genoemde waarden in tabel 2.2 gelden voor omgevingsdruk en omgevingstemperatuur. Bij brand is veelal sprake van waarden rondom de omgevingsdruk (1 atmosfeer); daarom wordt de drukafhankelijkheid van de brandbaarheidsgrenzen niet nader toegelicht.

Voorbeeld temperatuurafhankelijkheid

Zoals in figuur 2.4 is te zien, kan een mengsel bij punt A niet brandbaar zijn, maar door een toenemende temperatuur en gelijkblijvende concentratie binnen de brandbaarheidsgrenzen worden gebracht (naar punt B) en daardoor brandbaar worden.

Te rijk of te arm mengsel

Een mengsel dat zich boven de bovenste brandbaarheidsgrens bevindt, noemen we een 'te rijk' mengsel. Er is in verhouding te veel brandstof ten opzichte van zuurstof aanwezig om te ontbranden. Een 'te arm' mengsel bevindt zich onder de onderste brandbaarheidsgrens en bevat te weinig brandstof ten opzichte van zuurstof om tot ontbranding te komen. In beide gevallen is in theorie ontbranding niet mogelijk. Bij een te rijk mengsel kan de toevoer van lucht (met daarin zuurstof) de mengverhouding veranderen, waardoor een brandbaar mengsel ontstaat. Dit vormt altijd een risico tijdens brandbestrijding en dat is een reden waarom we de 'doos' (brandruimte) graag dichthouden. Hiermee voorkomen of beperken we een ongecontroleerde toevoer van zuurstof naar de brandstof.

Niet-homogene gasmengsels

De genoemde brandbaarheidsgrenzen (LFL en UFL) zijn alleen goed gedefinieerd voor homogene (goed gemengde) gasmengsels. Gasmengsels in een ruimte, bijvoorbeeld bij een brand, hebben echter niet overal dezelfde samenstelling (niet goed gemengde gasmengsels). Dit betekent dat er lokale verschillen in concentraties in bijvoorbeeld de rooklaag aanwezig zijn. In de praktijk is dit vaak het geval. Hierdoor kan het voorkomen dat bijvoorbeeld de gemiddelde gasconcentratie onder de onderste brandbaarheidsgrens ligt, maar er toch lokaal een brandbaar mengsel aanwezig kan zijn. Een snelle verbranding van een lokaal brandbaar mengsel kan alsnog zorgen voor een ontbranding in een groot deel van de ruimte (door temperatuurverhoging en daardoor een daling van de onderste brandbaarheidsgrens). Bij een gemiddelde gasconcentratie boven de bovenste brandbaarheidsgrens kan een lokale verbranding zorgen voor extra stroming (opmenging), waardoor een mengsel binnen de brandbaarheidsgrenzen komt te liggen (verdunding).

Ideaal mengsel

De snelheid van de verbranding (reactiesnelheid) is afhankelijk van de mengverhouding tussen brandstof, zuurstof en temperatuur (branddriehoek). De snelheid kan variëren van relatief langzaam tot zeer snel (ideale mengverhouding). Zoals eerder aangegeven (zie het kader 'Voorbeeld van een verbrandingsreactie: een chemische reactievergelijking' in paragraaf 2.1.2) heeft elk gas een ideale mengverhouding. Deze ideale mengverhouding is ligt tussen de onderste en bovenste brandbaarheidsgrens en bedraagt ongeveer 1,8 tot 2 keer de onderste brandbaarheidsgrens (stoichiometrische concentratie = 1,8 tot 2 x LFL). Voor bijvoorbeeld methaan is de ideale mengverhouding ongeveer 9,5 volumepercent (vol %) en voor propaan ongeveer 4,1 volumepercent (vol %).

Tabel 2.2 Brandbaarheidsgrenzen (LFL en UFL), ontbrandings- (T_L) en zelfontbrandingstemperatuur (AIT) van een aantal gassen (Bron: Hurley, 2016)

Brandbaar gas	LFL [vol %]	UFL [vol %]	T _L [°C]	AIT [°C]
Acetyleen	2,5	100	-	305
Butaan	1,8	8,4	-72	405
Koolmonoxide	12,5	74	-191	609
Methaan	5	15	-187	540
Propaan	2,1	9,5	-102	450
Styreen	1,1	6,1	31	490

2.3 Verbrandingsproducten

Bij verbranding kunnen talloze verbrandingsproducten vrij komen. Zoals in paragraaf 2.1.2 is weergegeven, komen er bij ideale mengverhouding bijvoorbeeld koolstofdioxide en water vrij. Deze twee stoffen zijn van zichzelf niet brandbaar. Er kunnen echter ook andere verbrandingsproducten worden gevormd bij minder ideale mengverhoudingen. Welke verbrandingsproducten dit zijn, is afhankelijk van de brandstof, de zuurstoftoevoer en de temperatuur. Omdat deze verbrandingsproducten giftig kunnen zijn, wordt in paragraaf 2.4 nader ingegaan op de gevolgen van het inademen van rook.

In de volgende subparagrafen worden enkele voorbeelden van verbrandingsproducten beschreven. In tabel 2.9 in paragraaf 2.5 zijn voor een aantal gassen grenswaarden voor werknemers opgenomen. In tabel 2.11 in dezelfde paragraaf zijn voor een aantal verstikkende gassen de levensbedreigende en fatale concentraties weergegeven.

Concentratie

De concentratie van gassen wordt vaak uitgedrukt in parts per million (ppm) of in microgram per kuub lucht (mg/m^3). De omrekening van mg/m^3 naar ppm is afhankelijk van een omrekenfactor en het molecuulgewicht van het gas. Het molecuulgewicht van bijvoorbeeld koolstofmonoxide bedraagt 28 gram per mol (g/mol). De omrekening van mg/m^3 naar ppm voor CO is: $\text{ppm} = 24,45 \times \text{mg}/\text{m}^3 / \text{molecuulgewicht}$. Zo komt een concentratie van $29 \text{ mg}/\text{m}^3$ overeen met ongeveer 25 ppm ($24,45 \times 29 / 28$).

Een andere weergave van de concentratie is in volumeprocenten (vol%). De omrekeningsfactor van volumeprocenten naar parts per million is gelijk aan 10.000 ($\text{ppm} = 10.000 \times \text{vol\%}$). Zo komt een concentratie van 12,5 vol% overeen met 125.000 ppm ($12,5 \times 10.000$).

2.3.1 Koolstofmonoxide (CO)

Koolstofmonoxide (CO) is na koolstofdioxide (CO_2) en water (H_2O) het meest voorkomende gas bij onvolledige verbranding. Het is in de juiste concentratie erg brandbaar en zeer licht ontvlambaar, zie tabel 2.2. Koolstofmonoxide is kleur- en reukloos, waardoor het moeilijk te herkennen is. Koolstofmonoxide kan levensbedreigend zijn, afhankelijk van de concentratie en de blootstellingsduur. Na inademing bindt koolstofmonoxide zich in het bloed aan hemoglobine en vormt carboxyhemoglobine (COHb). Hierdoor kan zuurstof zich niet meer binden en ontstaat er een verlaagde zuurstofconcentratie in het lichaam. In tabel 2.3 zijn de door het RIVM vastgestelde interventiewaarden weergegeven. Hierbij is onderscheid gemaakt in een alarmeringsgrenswaarde (AGW) en een levensbedreigende waarde (LBW).

Tabel 2.3 Interventiewaarden voor CO (Bron: RIVM.nl)

Blootstellingsduur	AGW (ppm)	LBW (ppm)
10 minuten	420	1716
30 minuten	154	601
1 uur	83	335

Naast de interventiewaarden ter ondersteuning van incidentbestrijding bij gevaarlijke stoffen bestaan er ook grenswaarden voor werknemers. In tabel 2.9 in paragraaf 2.5 zijn voor koolstofmonoxide de grenswaarden voor werknemers opgenomen.

Gewijzigde grenswaarde voor werknemers voor CO

De grenswaarden voor werknemers voor koolstofmonoxide is per 21 augustus 2018 aangepast. Er is een grenswaarde voor een blootstelling van 15 minuten ingevoerd van 100 ppm. De grenswaarde voor 8 uur is verlaagd van 25 ppm naar 20 ppm (bron: RIVM.nl).

Er zijn diverse bronnen om de gezondheidseffecten van blootstelling aan koolstofmonoxide weer te geven. Tabel 2.4 laat de effecten zien van het inademen van koolstofmonoxide op de gezondheid, afhankelijk van de concentratie en blootstellingsduur. In paragraaf 2.5 in tabel 2.11 zijn voor koolstofmonoxide de levensbedreigende en fatale concentraties weergegeven.

Tabel 2.4 Gezondheidseffecten van blootstelling aan CO (Bron: Kennisbank Bouwfysica)

Concentratie CO (ppm)	Effect
1500	Hoofdpijn na 15 minuten, bewusteloosheid na 30 minuten, dood na 60 minuten
2000	Hoofdpijn na 10 minuten, bewusteloosheid na 20 minuten, dood na 45 minuten
3000	Maximum veilige blootstellingsduur 5 minuten, bewusteloosheid na 10 minuten
6000	Hoofdpijn en duizeligheid in 1 tot 2 minuten, dood in 10 tot 15 minuten
12800	Onmiddellijk effect, binnen 2 tot 3 ademhalingen bewusteloosheid, dood in 1 tot 3 minuten

Nabluswerkzaamheden

Bij brand in gebouwen en gebouwbranden kan er gedurende meerdere fasen van het brandverloop sprake zijn van onvolledige verbranding, bijvoorbeeld tijdens de nablussing. Tijdens deze onvolledige verbranding kan er onder andere veel koolstofmonoxide vrijkomen. Mede daarom moeten brandweermensen ook tijdens nablussingswerkzaamheden adembescherming dragen.

2.3.2 Koolstofdioxide (CO₂)

Koolstofdioxide of koolzuurgas (CO₂) is naast koolmonoxide (CO) en water (H₂O) een van de meest voorkomende gassen bij verbranding. Koolstofdioxide is een kleur- en geurloos gas dat van nature in de lucht voorkomt. In hoge concentraties is koolstofdioxide giftig. Omdat koolstofdioxide zwaarder is dan lucht, kan het zich ophopen in lager gelegen ruimtes of onder in ruimtes. Tabel 2.5 laat de effecten zien van het inademen van koolstofdioxide op de gezondheid, afhankelijk van de concentratie en blootstellingsduur. In tabel 2.9 in paragraaf 2.5 zijn voor koolstofdioxide de grenswaarden voor werknemers opgenomen. In tabel 2.11 in dezelfde paragraaf zijn daarnaast voor koolstofmonoxide de levensbedreigende en fatale concentraties weergegeven.

Tabel 2.5 Gezondheidseffecten van blootstelling aan CO₂ (Bron: Wikipedia)

Concentratie CO ₂ (ppm)	Effect
5000	Langdurige maximaal aanvaardbare blootstelling zonder blijvende schade
20.000	Licht narcotisch effect, toename van bloeddruk en polssnelheid, afname van het gehoor
40.000 – 50.000	Duizeligheid, verwarring en gevoel van ademnood bij langere blootstelling
80.000	Hoofdpijn, zweten, verlies van gezichtsvermogen en krampen; bewusteloosheid na 5 tot 10 minuten, gevolgd door de dood na 30 minuten tot een uur
200.000 en hoger	Bewusteloosheid na enkele ademhalingen, snel gevolgd door ademstilstand; dood na enkele minuten

2.3.3 Waterstofcyanide of blauwzuurgas (HCN)

Waterstofcyanide of blauwzuurgas (HCN) wordt geproduceerd bij een onvolledige verbranding van stoffen zoals wol, zijde, nylon en polyurethaan (PUR). Daarnaast komt cyanide ook vrij bij verbranding van polyvinylchloride (PVC) en diverse andere soorten plastics. Het is een licht ontvlambaar, zeer giftig gas dat bij lage concentraties dood door verstikking kan veroorzaken. Net als koolmonoxide is het kleurloos. Waterstofcyanide is voor mensen zeer giftig, omdat het vrijwel direct de energie- en zuurstofhuishouding blokkeert. Eén gram is al dodelijk voor de gemiddelde mens. In tabel 2.9 in paragraaf 2.5 zijn voor waterstofcyanide de grenswaarden voor werknemers opgenomen. In tabel 2.11 in dezelfde paragraaf zijn voor waterstofcyanide de levensbedreigende en fatale concentraties weergegeven.

De ernst van een cyanidevergiftiging is afhankelijk van de concentratie en de duur van de blootstelling. Bij het inademen van lage concentraties kan jeuk en roodheid van de huid optreden, evenals irritatie en tranen van de ogen. Na het inademen van hoge concentraties kunnen binnen enkele seconden symptomen ontstaan die tot levensbedreigende situaties leiden. Denk hierbij aan krachtsverlies, hoofdpijn, verwarring, misselijkheid en braken, en een toename van de frequentie en diepte van de ademhaling. Aanvankelijk is de hartslag versneld; later vertraagt deze weer. Er kunnen dan ook symptomen zoals een ademhalingsdepressie, bewusteloosheid en ademstilstand optreden.

2.3.4 Stikstofdioxide (NO₂)

Stikstofdioxide (NO₂) komt vooral vrij bij de verbranding van oliehoudende materialen. Het is een reukloos gas met een typisch bruine kleur, dat vaak tegelijkertijd gevormd wordt met blauwzuurgas (HCN). Stikstofdioxide kan voor mensen schadelijk zijn, omdat het snel door kan dringen tot in de kleinste vertakkingen van de luchtwegen, met als gevolg dat de longen minder goed zullen werken. Bij hoge concentraties veroorzaakt stikstofdioxide ernstige longbeschadiging met mogelijk de dood tot gevolg. In tabel 2.9 in paragraaf 2.5 zijn voor stikstofdioxide de grenswaarden voor werknemers opgenomen. In tabel 2.10 in dezelfde paragraaf zijn voor stikstofdioxide de levensbedreigende en fatale concentraties weergegeven.

2.3.5 Ammoniak (NH₃)

Ammoniak (NH₃) is een kleurloos, giftig en brandbaar gas met een karakteristieke, sterk prikkelende geur. Het is een verbinding van stikstof (N₂) en waterstof (H₂) en wordt geproduceerd als stoffen zoals wol, zijde en nylon verbranden. Bij branden in gebouwen zijn de ammoniakconcentraties over het algemeen laag. Ammoniak veroorzaakt bij lage concentraties al irritatie aan de ogen. Bij hoge concentraties kan het de slijmvliezen en de ademhalingsorganen aantasten, maar het leidt niet tot de dood. Ammoniak komt bij brand slechts zelden in zulke grote hoeveelheden vrij dat het direct gevaar oplevert. In tabel 2.9 in paragraaf 2.5 zijn voor ammoniak de grenswaarden voor werknemers opgenomen.

2.3.6 Waterstofchloride of zoutzuur (HCl)

Waterstofchloride of zoutzuur (HCl) wordt gevormd bij de pyrolyse van bepaalde isolatiematerialen en pvc-kabels, maar het komt ook vrij bij de verbranding van materialen die zijn behandeld met brandvertragers en acrylvezels. Zoutzuur is een zeer corrosief (agressief) en kleurloos gas. Bij inademing van hoge concentraties kan het leiden tot de dood als de ruimte waar het gas zich heeft opgehoopt niet tijdig wordt verlaten. In tabel 2.9 in paragraaf 2.5 zijn voor zoutzuur de grenswaarden voor werknemers opgenomen.

2.3.7 Onverbrande koolwaterstoffen

Aardolie bestaat in hoofdzaak uit koolwaterstoffen. Koolwaterstoffen zijn organische verbindingen van uitsluitend waterstof (H) en koolstof (C). Deze gassen komen vrij bij de ontleding van oliehoudende producten (synthetische materialen) en zijn brandbaar. Hoe onvollediger de verbranding, hoe hoger de concentratie onverbrande koolwaterstofgassen in de rook. Bekende voorbeelden zijn methaan (CH₄, het belangrijkste bestanddeel van aardgas) en benzeen (C₆H₆). Koolwaterstoffen zijn kleurloos en komen vaak in hoge concentraties vrij.

Koolwaterstoffen

Koolwaterstoffen komen voort uit fossiele ruwe aardolie, dat een complexe mix is van verschillende koolwaterstoffen. Bij het destilleren (koken) van ruwe aardolie worden deze koolwaterstoffen van elkaar gescheiden, waardoor de zogenoemde aardoliefracties ontstaan. Aardoliefracties kunnen nog verder van elkaar worden gescheiden tot pure chemische stoffen.

Veel koolwaterstoffen die ontstaan uit aardolie zijn brandbaar. Bekende voorbeelden zijn benzine, diesel, kerosine, lampolie, paraffineolie, petroleum en stookolie.

Koolwaterstoffen kunnen gasvormig, vloeibaar of vast van vorm zijn. Het is een veelzijdige groep van stoffen die gebruikt kunnen worden in veel verschillende producten.

2.3.8 Roet / koolstof (C)

Als onverbrande koolwaterstoffen worden gevormd, zullen ook zuivere koolstofverbindingen ontstaan, beter bekend als roet. Roet bestaat onder andere uit koolstofdeeltjes (C) die alleen bij zeer hoge temperaturen kunnen verbranden. Roet wordt meestal gevormd in omstandigheden waar de verbranding onvolledig is door een tekort aan zuurstof. Roet geeft de bekende grijs-zwarte kleur aan rook. Koolstof kan bij hoge temperaturen reageren met zuurstof, zodat koolstofdioxide of koolmonoxide ontstaat. De meeste stoffen in vaste vorm zijn koolstofhoudend; de hoeveelheid koolstof verschilt per stof. Dit kunnen we zien aan de hoeveelheid roet die van de brand afkomt: een brandend blok hout dat weinig koolstof bevat, produceert veel minder roet dan een autoband die juist veel koolstof bevat.

2.4 Rook nader bekeken

De zichtbare en niet zichtbare in de lucht zwevende verbrandingsproducten (gassen, roet en vloeistofdeeltjes) noemen we rook. Rook bevat giftige gassen, belemmert het zicht en kan warm zijn. Hierdoor kunnen mensen wanneer zij moeten vluchten bij een brand of tijdens het verlenen van hulp de vluchtroute niet meer vinden en/of gezondheidsschade oplopen door rookinhalatie, of zelfs komen te overlijden. De meeste slachtoffers van gebouwbranden vallen daarom niet als gevolg van de brand zelf (verbranding door warmtestraling of hete lucht), maar door het inademen van de rook. Rookverspreiding vormt dus een belangrijk aandachtspunt bij het ontwerpen van een gebouw en bij gebouwbrandbestrijding. In deze paragraaf gaan we daarom dieper in op de risico's van rook en de gevolgen daarvan. Dit doen we op basis van de volgende drie elementen die de vlucht- en overlevingsmogelijkheden bij brand kunnen beïnvloeden: irriterende en verstikkende gassen, warmte en zicht.

Rookverspreiding

De laatste jaren wordt de brandweer steeds vaker geconfronteerd met branden in woongebouwen waarbij sprake is van een relatief beperkte brand, maar een grote rookverspreiding. Rookverspreiding is een breed gesignaleerd probleem dat fundamentele vragen oproept over de gevolgen voor de brandveiligheid, in het bijzonder voor kwetsbare personen. Het beperken van rookverspreiding en de effecten daarvan lijkt daarom noodzakelijk.

Rook verspreidt zich door druk- en temperatuurverschillen, waardoor rook opstijgt en van hoge druk naar lage druk stroomt (convectie). Rookverspreiding is echter een onvoorspelbaar fenomeen, in het bijzonder op grotere afstand van de brandruimte. In combinatie met het gegeven dat niet alle rook zichtbaar is, maakt dit rookverspreiding moeilijk in te schatten als het gaat om de omvang en ernst van de situatie. Iedere opening tussen ruimtes kan rookverspreiding tot gevolg hebben, waarbij een grote opening voor snellere en grotere hoeveelheden rookverspreiding kan zorgen. Rookverspreiding vindt hoofdzakelijk plaats via (open) deuren, ventilatiekanalen, andere doorvoeren (zoals wand-contactdozen) en kieren en naden. Naast een aantal andere factoren wordt de (mate van) rookverspreiding ook beïnvloed door de brandweerinzet, waarbij deuren worden geopend en ventilatoren worden gebruikt.

Behalve het bestrijden van de brand moet het doel van de brandweerinzet zijn om verdere rookverspreiding zoveel mogelijk te beperken. De stand van de deur van de brandruimte bij aankomst van de brandweer (open of gesloten) is bepalend voor de keuze van de inzetactie om deze doelstelling te behalen. Wanneer de deur naar de brandruimte openstaat bij aankomst van de brandweer, blijkt blussen vóór redden het beste te zijn voor de vlucht- en overlevingsmogelijkheden. Wanneer de deur naar de brandruimte echter dicht zit, blijkt redden voor blussen een goede optie te zijn. Iedere actie van de brandweer veroorzaakt echter verdere rookverspreiding, zowel horizontaal als verticaal. Het lopen door met rook gevulde gangen, openen en sluiten van deuren en blusacties veroorzaken in bepaalde mate allemaal rookverspreiding naar aangrenzende ruimtes. Mechanisch ventileren heeft een dominante invloed en is in bijna alle gevallen verantwoordelijk voor het verder verspreiden van rook, en dan met name van koolstofmonoxide (CO), naar meerdere ruimtes en verdiepingen. Risico-beheersende maatregelen in combinatie met het gesloten houden van de deur van de brandruimte zorgen naast een vermindering van rookverspreiding door het gebouw vóór de brandweerinzet ook voor een verminderde rookverspreiding tijdens de inzetfase (Brandweeracademie, 2020).

2.4.1 Irriterende en verstikkende gassen

In paragraaf 2.3 zijn verschillende giftige gassen behandeld. Deze giftige gassen zijn onder te verdelen in irriterend of prikkelende gassen en verstikkende of asfyxiërende gassen.

Irriterende gassen zorgen vooral voor irritatie van de ogen en luchtwegen. Omdat dit effect direct merkbaar is en niet verslechtert bij toenemende blootstelling, is het de *concentratie* van de gassen die van belang is. Voorbeelden van irriterende gassen zijn: zoutzuur of waterstofchloride (HCl), waterstoffluoride (HF), zwaveldioxide (SO₂) en stikstofoxiden (NO₂, NO, NO_x). In tabel 2.10 in paragraaf 2.5 zijn van een aantal irriterende gassen concentraties weergegeven die van invloed zijn op vlucht- en overlevingsmogelijkheden.

Verstikkende gassen zorgen bij inademing voor ademhalingsproblemen; er is echter geen sprake van een directe beschadiging van de luchtwegen. Ook kunnen deze gassen zorgen voor een verminderde zuurstofvoorziening in het lichaam, zoals omschreven voor koolstofmonoxide in paragraaf 2.3.1. Dit kan leiden tot bewusteloosheid en kan fataal zijn. In tegenstelling tot irriterende gassen, is bij verstikkende gassen de *dosis* van belang. Hiermee wordt de concentratie in combinatie met de blootstellingsduur bedoeld. De effecten van deze gassen worden met een toenemende blootstellingsduur zichtbaar. Bij hoge concentraties kunnen de effecten dus zeer snel toenemen. Bij effecten kan gedacht worden aan verwardheid, duizeligheid en bewustzijnsverlies. Voorbeelden van verstikkende gassen zijn waterstofcyanide (HCN), koolstofmonoxide (CO) en koolstofdioxide (CO₂). Koolstofmonoxide is een van de belangrijkste verstikkende gassen die van invloed zijn op vlucht- en overlevingsmogelijkheden. Ook zuurstofgebrek door lage concentraties zuurstof (lager dan 15 %) kan verstikkende effecten hebben, leiden tot bewustzijnsverlies en daardoor levensbedreigend zijn. Koolstofdioxide is giftig bij concentraties boven de 5 %. Inademing van hogere concentraties koolstofdioxide kan leiden tot hyperventilatie en daardoor een verhoogde opname van andere giftige gassen (Purser & McAllister, 2016). In tabel 2.11 in paragraaf 2.5 zijn van een aantal verstikkende gassen concentraties weergegeven die van invloed zijn op vlucht- en overlevingsmogelijkheden.

2.4.2 Warmte

Mensen kunnen tijdens een brand blootgesteld worden aan warmtestraling en convectieve warmte. Warmtestraling kan afkomstig zijn van de brand zelf (vlammen), maar ook van de warme rooklaag of warme constructieonderdelen en voorwerpen. Er zijn drie gevolgen van warmte te onderscheiden die van invloed zijn op de vlucht- en overlevingsmogelijkheden: een verhoogde lichaamstemperatuur, brandwonden op het lichaam en brandwonden in de luchtwegen. Gelijk aan de verstikkende gassen is de dosis van belang: de hoeveelheid warmte in combinatie met de blootstellingsduur.

Verhoogde lichaamstemperatuur

Een verhoogde lichaamstemperatuur ontstaat als gevolg van een langdurige blootstelling (15 minuten of meer) aan temperaturen die te laag zijn om brandwonden te veroorzaken. Bewustzijnsverlies kan optreden bij een lichaamstemperatuur hoger dan 40 graden Celsius; een lichaamstemperatuur van boven de 42,5 graden Celsius kan dodelijk zijn.

Brandwonden op het lichaam en in de luchtwegen

Brandwonden kunnen het gevolg zijn van blootstelling aan zowel warmtestraling als aan convectieve warmte. Wanneer de huid door warmtestraling teveel wordt opgewarmd, kan dit leiden tot zeer ernstige brandwonden met soms de dood tot gevolg. In tabel 2.6 zijn enkele

voorbeelden van effecten van warmtestraling en blootstellingsduur weergegeven. De intensiteit van deze straling (de stralingsflux) wordt uitgedrukt in kW/m², zie paragraaf 1.6.3.

Tabel 2.6 Effecten van stralingswarmte en blootstellingsduur (Bron: Kennisbank Bouwfysica)

Stralingsflux (kW/m ²)	Omschrijving
1,0	Grenswaarde voor (langdurige) blootstelling van de huid zonder schadelijke gevolgen
6,4	Pijn na 8 seconden blootstelling van de huid
10,4	Pijn na 3 seconden blootstelling van de huid
16	Verbranding van de huid na 5 seconden

Een algemene grenswaarde voor blootstelling van de huid aan warmtestraling is ongeveer 2,5 kW/m² (ISO 13571, 2012; Purser & McAllister, 2016). Zoals eerder aangegeven, is de opgelopen dosis bij brand door warmtestraling echter niet alleen afhankelijk van de intensiteit, maar ook van de blootstellingsduur en bescherming van de huid. De mate waarin kleding ons tegen warmtestraling beschermt, is afhankelijk van de isolatie (luchtlagen) en het gedrag van kleding bij brand (smelten, verkleven of ontsteken).

De relatie tussen stralingsintensiteit en blootstellingsduur

Bij een stralingsintensiteit van 20 kW/m² met een blootstellingsduur van 20 seconden is de kans groot dat 50 % van de vluchtende personen hieraan overlijdt. Is de stralingsintensiteit lager (5,8 kW/m²) maar de duur langer (100 seconden), dan zal de opgelopen stralingsdosis net zo hoog zijn en het effect hetzelfde. Eerstegraads brandwonden kunnen al ontstaan na 20 seconden blootstelling aan 7,3 kW/m² of na 100 seconden blootstelling aan 2 kW/m². Bij een blootstellingsduur tijdens het vluchten van 100 seconden en een stralingsniveau van 6 kW/m² zal circa de helft van de vluchtende personen omkomen (bron: Kennisbank Bouwfysica).

De grens voor blootstelling aan convectieve warmte ligt op ongeveer 120 graden Celsius voor een onbeschermdde huid. Boven deze grens ervaren personen vaak binnen enkele minuten aanzienlijke pijn en kunnen na enige tijd brandwonden ontstaan. De grenswaarden voor brandwonden op de huid liggen over het algemeen lager dan grenswaarden voor brandwonden in de longen. Brandwonden in de longen komen zelden voor in afwezigheid van brandwonden op de huid (Purser & McAllister, 2016). Het effect van convectieve warmte op mensen is erg afhankelijk van de relatieve vochtigheid van de lucht. Bij droge lucht zijn hogere temperaturen draaglijker dan bij vochtige lucht. Denk aan een sauna met een luchttemperatuur tot 90 °C waar je 15 minuten in kunt verblijven. Zodra er water op de kachel wordt gegooid en de luchtvochtigheid toeneemt, voelt de ruimte meteen veel warmer aan. Dit komt, omdat vochtige lucht meer warmte kan opnemen en vasthouden dan droge lucht.

Droge lucht

Tabel 2.7 geeft het effect weer van temperatuur op mensen en is gebaseerd op warmteoverdracht in droge lucht (convectie). Bij een verblijf boven een temperatuur van 150 °C ontstaan binnen 5 minuten huidbrandwonden. Bij een temperatuur van lager dan 70 °C kan men langere tijd veilig in een ruimte verblijven, maar dat wordt niet als comfortabel ervaren (zie tabel 2.8 verderop).

Tabel 2.7 Effecten van hete droge lucht op de ademhaling (Bron: Kennisbank Bouwfysica)

Temperatuur °C	Effect op ademhaling
127	Moeilijk ademen
140	Tolerantielimiet 5 minuten
149	Moeilijk door de mond ademen, grens voor vluchten
160	Ondraaglijke pijn
182	Onomkeerbare schade in 30 seconden
200	Ademhalingssysteem bezwijkt binnen 4 minuten

Vochtige lucht

In een omgeving met een zeer hoge luchtvochtigheid waarbij watermist ontstaat (bijvoorbeeld door een actieve sprinkler of blussing), zal bij een luchttemperatuur van 50 °C de warmteoverdracht naar de huid sterk toenemen. Bij inademing kan de waterdamp condenseren in de longen. Dit komt, omdat het menselijk lichaam een lagere temperatuur heeft dan de omgevingslucht. Bij de condensatie van waterdamp in de longen wordt de ademhaling belemmerd met mogelijk overlijden door verstikking tot gevolg.

Tabel 2.8 Effecten van droge en vochtige lucht op de ademhaling (Bron: Kennisbank Bouwfysica)

Temperatuur °C	Omstandigheden	Effect	Opmerking
≤ 70	Droge lucht	Hinderlijk	Oncomfortabel; veilig verblijf gedurende langere tijd is mogelijk
70 - 150	Droge lucht	Gevaarlijk	Vluchten mogelijk; de vluchttijd is afhankelijk van de temperatuur
≥ 150	Droge lucht	Dodelijk	Binnen 5 min brandwonden op de huid
≥ 70	Verzadigde lucht met vocht (mist)	Dodelijk	

Maar ook hier geldt dat de luchtvochtigheid, de temperatuur en de blootstellingsduur van invloed zijn op het effect. Zoals eerder aangegeven, kunnen mensen in droge lucht van 70 °C langere tijd verblijven. Bij dezelfde temperatuur en een maximale luchtvochtigheid is dit echter dodelijk.

2.4.3 Zicht

Een van de grootste risico's bij brand is het snel afnemen van zicht door rook. Het gevolg hiervan is dat oriëntatie niet meer mogelijk is, waardoor mensen niet meer in staat zijn om het gebouw waar de brand woedt tijdig te verlaten. Rook bestaat uit zichtbare en onzichtbare stoffen. De zichtbare stoffen die bij brand vrijkomen, bestaan onder andere uit vaste deeltjes (roet) en vloeibare deeltjes (vocht). De productie van rook is afhankelijk van de verbrandingscondities (temperatuur en zuurstoftoevoer).

Rooklaag

Als de punt van een mes in een kaarsvlam wordt gestoken, zal er een zwarte walm vrijkomen en blijft er een zwarte substantie op het mes achter. Deze koolstofresten (roetdeeltjes) uit de vlam komen los, omdat ze niet meer netjes kunnen verbranden. Dergelijke roetdeeltjes kunnen samen met de rookgassen en vloeistofdeeltjes de eerste rooklaag vormen die zichtbaar wordt in een ruimte. Hoe meer koolstof(verbindingen) er in de basisbrandstof zit(ten), hoe zwarter de rooklaag.

Toch zien we soms allerlei kleuren rook uit een brandend gebouw komen. Dit heeft onder andere te maken met de steeds hoger wordende temperatuur in het pand, waardoor de vaste stoffen ontleden en er veel pyrolysegassen in de rooklaag komen. Hierdoor wordt de kleur niet alleen lichter, maar neemt ook de brandbaarheid van de rooklaag toe. Rookgaskoeling is een methode om de temperatuur van de rookgassen (brandgassen) onder de ontbrandingstemperatuur te krijgen.

Het afnemen van zicht door rook wordt veroorzaakt door lichtabsorptie en lichtverstrooiing door met name roetdeeltjes. De deeltjes en gassen in de rook irriteren daarnaast de ogen, waardoor het zicht verder wordt beperkt. De roetdeeltjes kunnen naast het belemmeren van het zicht ook de warmte vasthouden en bij verspreiding van de rook die warmte ook weer uitstralen (met een risico op branduitbreiding als gevolg).

Als maat voor de lichtabsorptie in rook wordt vaak de term optische (rook)dichtheid (OD) gebruikt. De optische dichtheid geeft de lichtverzwakking per meter afstand aan en heeft als eenheid $1/m$ of m^{-1} . Naast de optische dichtheid wordt veelal de zichtlengte (ZL) als term gebruikt om de afstand aan te geven waarover iemand nog voorwerpen kan waarnemen (eenheid in meters).

Relatie zichtlengte en optische dichtheid

De relatie tussen de zichtlengte en de optische dichtheid is in onderstaande formule weergegeven.

$$ZL = \frac{1}{OD}$$

ZL = zichtlengte in m en OD = optische dichtheid in m^{-1}

Voor de factor in de 'teller' van de formule kunnen ook andere waardes gehanteerd worden. Voor lichtgevende objecten wordt bijvoorbeeld vaak een factor van 2,5 gehanteerd in plaats van 1.

Grenswaarde voor de zichtlengte

Er zijn verschillende bronnen voor grenswaarden voor de zichtlengte voor veilig vluchten. In het algemeen geldt dat de zichtlengte in een ruimte nog voldoende moet zijn om je te kunnen oriënteren. Volgens Hurley (2016) kan voor kleine ruimtes uitgegaan worden van een grenswaarde voor de zichtlengte van 5 m en voor grote ruimtes van een grenswaarde van 20 m (Purser & McAllister, 2016).

Regelgeving

In Nederland kennen we in de bouwregelgeving geen grenswaarden voor zichtlengte. Wel wordt een maximum loopafstand aangegeven die in het gebied met rook mag worden afgelegd. Meestal is de maximale loopafstand in een compartiment bepaald op 30 meter. Buiten het compartiment moet de vluchtroute dan logischerwijs weer volledig rookvrij zijn. Uiteraard moeten de brand- en rookwerende scheidingsconstructies wel hun werk doen. De maximale loopafstand van 30 m is ontleend aan:

- > Een blootstellingsduur van 30 seconden en een loopsnelheid van 1 m/sec. Hierbij kan een afstand van 30 meter worden overbrugd met ingehouden adem.
- > De aanname dat rook zich door het gehele rookcompartiment kan hebben verspreid, voordat aanwezigen gaan vluchten.

2.5 Tabellen met grenswaarden van concentraties gassen

Tabel 2.9 Grenswaarden voor werknemers (Bron: RIVM en SER)

Verbrandingsproduct	Blootstellingsduur	Tijdgewogen gemiddelde concentratie	
		ppm	mg/m ³
Koolstofmonoxide (CO)	15 minuten	100	114,6
	8 uur	20	22,9
Koolstofdioxide (CO ₂)	15 minuten	-	-
	8 uur	5000	9000
Waterstofcyanide (HCN)	15 minuten	4,5	5
	8 uur	0,9	1
Stikstofoxide (NO ₂)	15 minuten	1	1,91
	8 uur	0,5	0,96
Ammoniak (NH ₃)	15 minuten	52	36
	8 uur	20	14
Zoutzuur (HCl)	15 minuten	10	15
	8 uur	5	8

Tabel 2.10 Grenswaarden concentraties irriterende gassen (Bron: Hurley, 2016)

Gassen	Vlucht- en overlevingsmogelijkheden		
	Belemmerend (ppm)	Levensbedreigend (ppm)	Fatale dosis (ppm·min)
HCl	200	900	114.000
HBr	200	900	114.000
HF	200	900	87.000
SO ₂	24	120	12.000
NO ₂	70	350	1.900
NO	-	>1000	~30.000
CH ₂ CHO (acroleïne)	4	20	4.500
HCHO (formaldehyde)	6	30	22.500

Tabel 2.11 Grenswaarden van concentraties verstikkende gassen (Bron: Hurley, 2016)

Gassen	Blootstellingsduur en overlevingsmogelijkheden			
	5 min		30 min	
	Levensbedreigend	Fataal	Levensbedreigend	Fataal
CO (ppm)	6000-8000	12,000-16,000	1400-1700	2500-4000
HCN (ppm)	150-200	250-400	90-120	170-230
Laag O ₂ (%)	10-13	< 5	< 12	6-7
CO ₂ (%)	7-8	> 10	6-7	> 9

3 Brand en brandverloop

In dit hoofdstuk komen verschillende benaderingen en modellen van brandontwikkeling aan bod. Die verschillen soms in terminologie van elkaar, en ook in de manier waarop bepaalde begrippen worden uitgelegd en met elkaar worden verbonden. Onthoud dat deze nuanceverschillen niet zo belangrijk zijn, omdat de essentie van al deze benaderingen uiteindelijk wordt samengevat door de branddriehoek. De dynamiek van een brand is altijd terug te voeren op de (meng)verhouding tussen brandstof, temperatuur en zuurstof, de drie zijden van de branddriehoek. In de context van een gebouwbrand bepalen vooral de aanwezigheid en toetreding van zuurstof hoe die verhouding zich tijdens het brandverloop ontwikkelt. Na enige tijd is er bij een brand in een nagenoeg afgesloten ruimte altijd voldoende temperatuur en meestal ook voldoende brandstof om de brand te onderhouden. Hoe snel die brand zich ontwikkelt en hoe groot die uiteindelijk wordt, hangt af van de hoeveelheid zuurstof die via openingen bij de brandgassen kan komen.

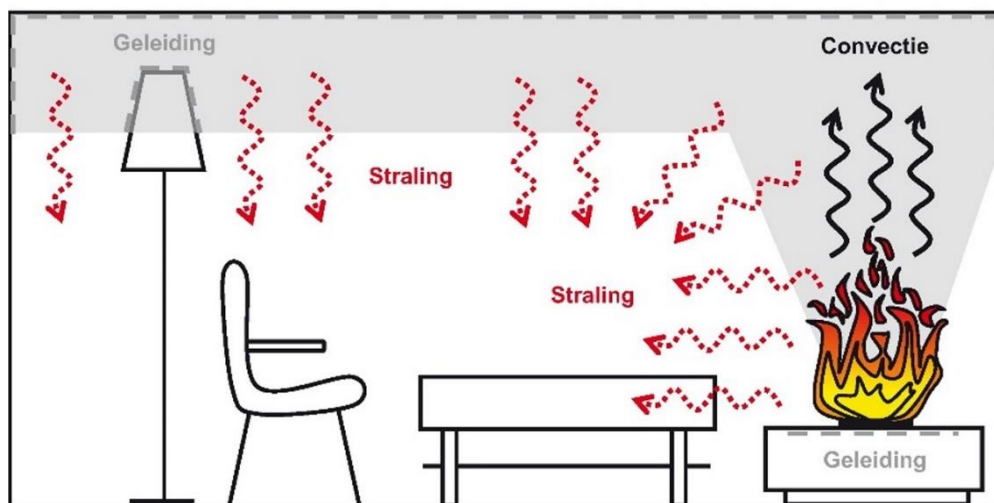
Belangrijk is wel dat dit contact met zuurstof in het ene stadium van de brand gevaarlijker is dan in het andere. Voor manschappen is het voldoende om de twee globale stadia van een brand (brandstofgecontroleerd versus zuurstofgecontroleerd) te herkennen. Meer subtiele verschillen tussen brandstadia zijn in de praktijk niet of nauwelijks te herkennen en ook niet te voorspellen. Daarom helpen modellen die meer dan deze twee stadia onderscheiden de brandweer niet bij het kiezen van de juiste tactiek en techniek van brandbestrijding. Met andere woorden: verfijnde expertmodellen van brandverloop bieden geen extra handelingsperspectief. Desondanks is het (voor docenten en instructeurs) goed om kennis te nemen van die modellen, omdat ze het inzicht in de brandweerkunde verdiepen en daarom helpen om goed boven de stof te staan.

Om het verloop van een brand goed te begrijpen, moeten we terug naar het eerste vlammetje waarmee een brand begint. In paragraaf 3.1 komt de brandontwikkeling in een ruimte aan bod. Vanaf paragraaf 3.2 wordt aandacht besteed aan het brandverloop van een beginnende brand die zich verder in een ruimte kan ontwikkelen. Hierbij schetsen we de verschillende fasen in het verloop van een brand in een (deels) afgesloten ruimte. Dat brengt ons vanzelf bij de verschillende variaties in het brandverloop en de brandfenomenen. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met een paragraaf over koelend vermogen, waarin de link tussen brandverloop en brandbestrijding wordt gelegd.

3.1 Van vlam naar brandontwikkeling

Blader even terug naar de uitleg over de kaarsvlam in paragraaf 2.1.4. Bij een gebouwbrand is er sprake van hetzelfde principe, met dat verschil dat er door de aanwezigheid van meerdere vlammen bij elkaar een onevenwichtige productie van brandbaar gas ontstaat. Ook veroorzaken de verschillende vlammen samen een turbulente luchtstroom. Deze turbulentie zorgt ervoor dat niet meer alle gassen en koolstofdeeltjes verbranden. Deze onverbrande gassen en koolstofdeeltjes komen vrij en vormen een rooklaag in de ruimte. De vrijkomende rookgassen zijn meestal donker van kleur en pas vanaf een bepaalde

temperatuur brandbaar. Met de groei van het vlamfront stijgt ook de rookproductie. Vanuit de vlammen neemt de straling (warmtestraling) naar omliggende voorwerpen toe, en vanuit de rooklaag zowel de opwarming door stroming (convectie) als de straling naar omliggende voorwerpen. In figuur 3.1 is dit weergegeven.



Figuur 3.1 Warmteoverdracht bij brand in een ruimte (Bron: Van Mierlo & Tromp, 2014)

Als het vlamfront toeneemt, gaan de materialen die in brand staan steeds meer gas afgeven. Dit gas is te veel om direct onder in de vlammen te verbranden en stijgt met de warmte mee omhoog. Hierdoor zien we langgerekte vlammen ontstaan. Deze vlammen buigen via het plafond de ruimte in. Met dit groeiende vlamfront zal de rooklaag dichter worden, waardoor de vlammen langs het plafond niet meer zichtbaar zijn. Zie je een golvende (turbulente) rooklaag in een brandruimte? Dan is dit een indicatie dat het vlamfront boven of in die rooklaag aanwezig is.

De invloed van het gebouw op de brand

Elke brand die door een temperatuurverhoging ontstaat, laat hetzelfde basispatroon zien. Een brand in een gebouw heeft echter vaak een andere brandverloop dan een brand in de open lucht. Het gebouw heeft immers invloed op de brand en het brandverloop. Deze invloed is afhankelijk van een aantal kenmerken van het gebouw. Omdat deze verschillend zijn per gebouw, kan er dus ook steeds een ander brandverloop optreden.

De belangrijkste kenmerken zijn:

- > *Gebruik*: mogelijke ontstekingsbronnen (omvang en locatie) en de aanwezige variabele vuurbelasting (hoeveelheid, positie, inrichting of opslag, et cetera). Met name de verdeling van deze materialen over de ruimte en de wijze van opslag kunnen bepalend zijn voor het brandverloop.
- > *Geometrie*: de omvang en hoogte van de brandruimte. In een groter volume kan een brand zich langer onbeperkt ontwikkelen. In hoge ruimtes kan de rook ver opstijgen en is de invloed van rook op de branduitbreiding beperkt.
- > *Materialen*: de toegepaste materialen in de omhulling van de brandruimte. Deze materialen kunnen een bijdrage leveren aan de brand en kunnen tevens warmte van de brand opnemen en juist isolerend werken.
- > *Openingen*: de openingen zijn bepalend voor de uitstroom van rook en de instroom van lucht en dus zuurstof. De openingen hebben daarmee een grote invloed op het brandverloop.

Door variaties in bovenstaande kenmerken (ook tijdens de brand) ontstaat er steeds een ander brandverloop als variant op het basispatroon.

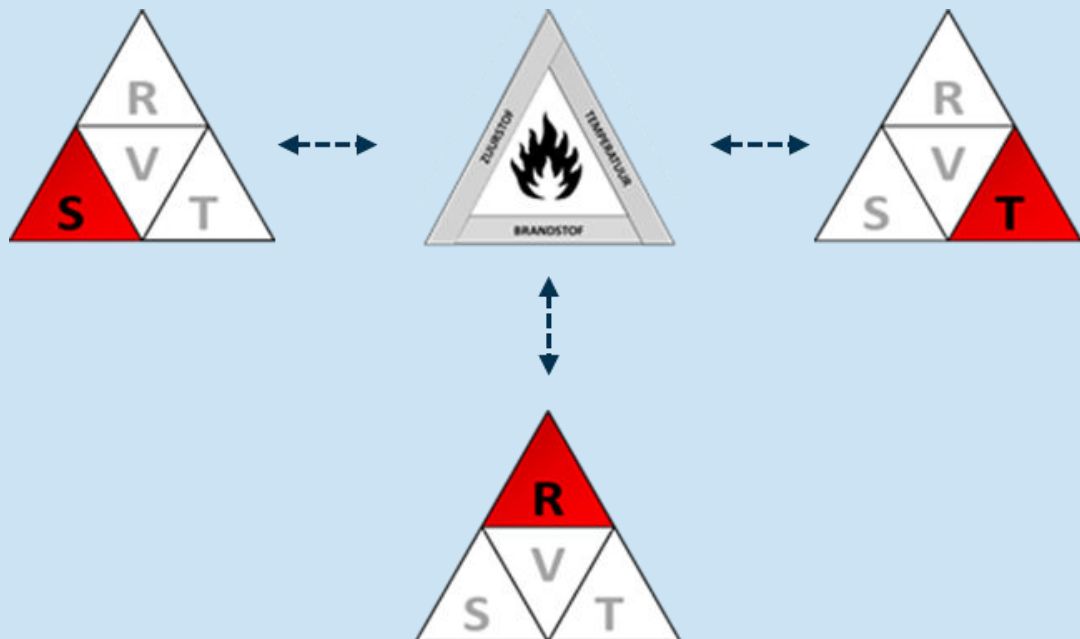
De branddriehoek als verkenningsmodel

Om tijdens de verkenning van een gebouwbrand de brandkenmerken goed te kunnen herkennen is het nodig om verschillen in het verloop van brand te kennen. Het verkennen gebeurt op basis van de branddriehoek. Is deze compleet, dan is er sprake van vuur. De drie zijden van de branddriehoek zijn allemaal van invloed op het brandverloop. Bij branden in gebouwen heeft één van die zijden (zuurstof) echter een veel grotere invloed op het verloop van de brand en de daarbij behorende risico's dan de andere twee zijden. De brandstof is al aanwezig en door de brand zal de temperatuur altijd oplopen. De brand kan zich echter alleen verder ontwikkelen wanneer er voldoende zuurstof is. Daarom is het van belang dat het gebouw en de brand goed worden verkend; een degelijke verkenning is nodig om het juiste handelingsperspectief te kiezen en de inzet veilig te laten verlopen. Door het gebouw goed te verkennen, kun je achterhalen waar de brand zijn zuurstof vandaan kan halen.

Bij gebouwbranden is sprake van een voortdurend wisselend samenspel van de drie zijden van de branddriehoek. Daarom kijken we naar drie zaken:

- > de brandstof in de vorm van rook
- > de zuurstof, waarbij gelet wordt op de aan- of afwezigheid van openingen en stroming van lucht
- > de temperatuur.

Zie je ergens brand? Dan is de branddriehoek op die plek compleet, met als resultaat zichtbare vlammen.

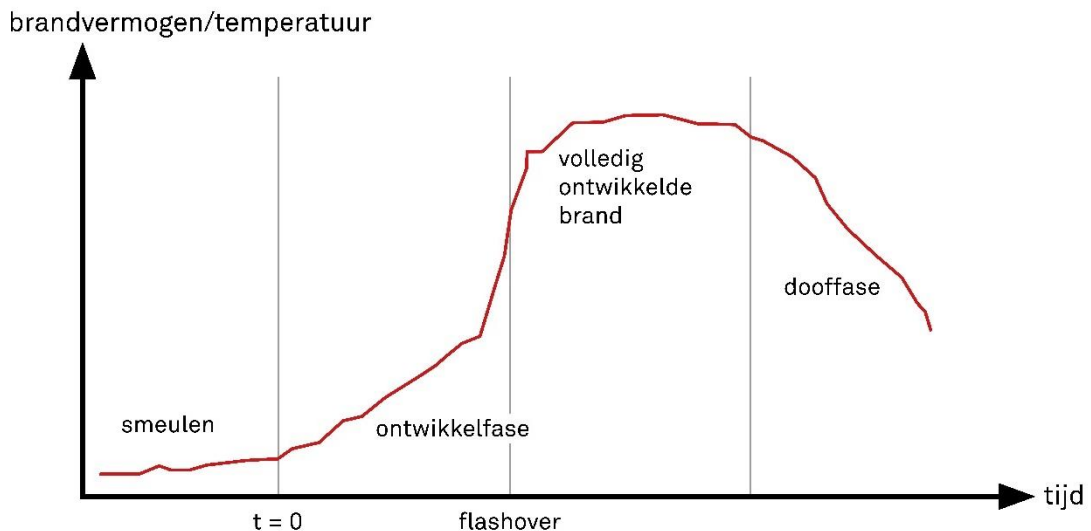


Figuur 3.2 De branddriehoek

In de rest van dit hoofdstuk wordt aandacht besteed aan de fasen van het natuurlijk brandverloop, aan brandstof- en zuurstofgecontroleerde branden en aan de fenomenen die kunnen ontstaan bij gebouwbranden.

3.2 Natuurlijk brandverloop

Zoals in de vorige paragraaf is weergegeven, kent het natuurlijk brandverloop een basispatroon met daarin een aantal fasen of stadia. Er worden vier fasen onderscheiden: smeulfase, ontwikkelfase, volledig ontwikkelde fase en dooffase. In figuur 3.3 zijn deze fasen schematisch weergegeven.



Figuur 3.3 Schematische weergave van het natuurlijk brandverloop

In paragrafen 3.4 tot en met 3.7 zullen de verschillende fasen vanaf de start van de vlammende verbranding ($t = 0$) en de bijbehorende overgangen nader worden behandeld.

Smeulfase

Het moment dat materialen (onbedoeld) worden verwarmd waardoor het pyrolyseproces op gang komt, is het begin van de verbranding. Het kan enige tijd in beslag nemen, afhankelijk van het type brandstof en de mate van opwarming, voordat er sprake is van vlammende verbranding. In de smeulfase vindt er wel verbranding plaats, maar is (nog) geen sprake van vlammende verbranding. Hoewel deze vorm van verbranding bij de bestrijding van specifieke branden zoals natuurbranden en afvalbranden een belangrijke rol kan spelen, richt dit boek zich op vlammende verbranding en gaat niet verder in op smeulende verbranding.

Tussen de verschillende fasen zijn tevens overgangen te onderscheiden. In de schematische weergave van figuur 3.3 zijn deze overgangen als harde scheidingen aangegeven. De verschillende fasen kennen echter geen vaste tijdslijn en de overgang kan geleidelijk plaatsvinden. De overgangen kunnen op de volgende wijze worden omschreven:

- > Eerste vlammende verbranding: de eerste vlammen vormen de overgang van de smeulfase naar de ontwikkelfase. Veelal wordt dit als de start van het brandverloop gezien ($t = 0$).
- > Flashover: de overgang van een lokale brand in de ontwikkelfase naar een volledig ontwikkelde brand in de gehele ruimte. Zie paragraaf 3.9.1 voor een nadere toelichting op het fenomeen flashover.
- > Brandstof raakt op: de overgang van de volledig ontwikkelde fase naar de dooffase treedt op wanneer een groot deel van de aanwezige vuurlast is opgebrand.

Fasen, stadia, perioden en overgangen

Voor de weergave en omschrijving van het schematische brandverloop zoals weergegeven in figuur 3.3 worden in de literatuur verschillende termen, woorden en beschrijvingen gebruikt. Zo wordt in plaats van fasen wel gesproken over stadia of perioden. Daarnaast worden sommige fasen opgedeeld in deelfasen. En in plaats van overgangen wordt ook wel gesproken over overgangsfasen. Dit maakt dat de overgangen op zichzelf ook wel als (kort durende) fasen worden gezien, bijvoorbeeld de flashover. Dit kan enige verwarring geven over het schematische brandverloop. Bedacht moet echter worden dat de schematische weergave is bedoeld om het dynamische verloop van brand beter te kunnen uitleggen.

3.3 Brandstof- en zuurstofgecontroleerde branden

In de beschrijving van het natuurlijk brandverloop wordt vaak gesproken over een brandstof- of zuurstofgecontroleerde brand. Omdat er verschillende beschrijvingen en termen voor deze branden worden gebruikt, wordt hieraan in deze paragraaf aandacht besteed.

Vershillende termen en benamingen

In de literatuur worden verschillende termen en benamingen gebruikt voor brandstofgecontroleerde en zuurstofgecontroleerde branden. In plaats van 'gecontroleerd' wordt 'beheerst' gebruikt, bijvoorbeeld 'brandstofbeheerste branden'. In plaats van 'zuurstof' wordt vaak 'ventilatie' gebruikt. Dit leidt tot bijvoorbeeld 'ventilatiegecontroleerde' of 'ventilatiebeheerste branden'. Met ventilatie wordt in dat geval natuurlijke ventilatie bedoeld, oftewel stroming van lucht door openingen in de omhulling van een ruimte. Omdat de term 'ventilatie' als verwarrend kan worden ervaren, wordt in dit boek de term 'zuurstofgecontroleerd' gebruikt.

Brandstofgecontroleerde brand

Een brandstofgecontroleerde brand is, zoals de naam al aangeeft, afhankelijk van de *brandstof*. De eigenschappen van de brandstof en de geometrie bepalen de verbranding en de branduitbreiding; zuurstof is in overmaat aanwezig. Oftewel: een brandstofgecontroleerde brand is een brand waarbij het brandvermogen en de snelheid van verbranding bepaald worden door de hoeveelheid brandstof en de kenmerken daarvan.

Zuurstofgecontroleerde brand

Een zuurstofgecontroleerde brand is afhankelijk van de aanwezige *zuurstof* voor verbranding. De hoeveelheid zuurstof die door openingen in de omhulling naar binnen komt, is bepalend voor de verbranding en de energieafgifte van de brand. Oftewel: een zuurstofgecontroleerde brand is een brand waarbij het brandvermogen en de snelheid van verbranding worden bepaald door de beschikbare zuurstof.

Een buitenbrand is veelal brandstofgecontroleerd, omdat er een overmaat aan zuurstof aanwezig is. Bij een brand in een gebouw is dat lang niet altijd het geval en het is van buitenaf bovendien moeilijk te bepalen of een dergelijke brand brandstofgecontroleerd is. Soms lijken branden in gebouwen door de rookproductie zuurstofgecontroleerd, maar zijn ze toch brandstofgecontroleerd gebleven.

Een brand volgens het natuurlijk brandverloop start altijd brandstofgecontroleerd. Veelal wordt ervan uitgegaan dat een brand in de ontwikkelfase brandstofgecontroleerd is, omdat er voldoende zuurstof aanwezig is. Een uitzondering hierop is een brand in een kleine

afgesloten ruimte die al in de pre-flashoverfase zuurstofgecontroleerd wordt, zie het blauwe kader hieronder.

Ondergeventileerde brand

Om onderscheid te kunnen maken tussen zuurstofgecontroleerde (ventilatiegecontroleerde) branden in de pre- en post-flashoverfase wordt voor de pre-flashoverfase een aparte definitie gehanteerd: 'ondergeventileerde brand'. Een ondergeventileerde brand is een brand die al vóór de flashoverfase zuurstofgecontroleerd raakt. Zie paragraaf 3.9.1 voor uitleg over de flashover.

Naarmate de brand groeit en de hoeveelheid beschikbare zuurstof voor verbranding afneemt, kan een brand zuurstofgecontroleerd worden. Er wordt vaak van uitgegaan dat branden in de volledig ontwikkelde fase zuurstofgecontroleerd zijn. Dergelijke branden kunnen worden herkend door uit gevelopeningen uitslaande vlammen. Ter plaatse van de openingen wordt de gepyrolyseerde brandstof gemengd met zuurstof en treedt verbranding op. Ook in de volledig ontwikkelde fase kan een brand echter brandstofgecontroleerd zijn als er grote openingen in de omhulling van de brandruimte aanwezig zijn, waardoor voldoende zuurstof naar binnen komt. Tijdens de dooffase zal een zuurstofgecontroleerde brand overgaan in een brandstofgecontroleerde brand. De brandstof raakt langzaam op, waardoor deze weer bepalend wordt voor de verbranding.

Let op: bij de bovenstaande beschrijving moet worden bedacht dat het brandverloop dynamisch is. Dit betekent dat de omstandigheden tijdens de beschreven fasen door bijvoorbeeld het openen van een deur of het bezwijken van een raam kunnen veranderen. Daarom kan er binnen de fasen sprake zijn van een periode waarin de brand brandstofgecontroleerd is en van een andere periode waarin hij zuurstofgecontroleerd is.

Relatie met de basisprincipes

Bij een zuurstofgecontroleerde brand kan het openen of sluiten van een deur van invloed zijn op de ontwikkeling van de brandhaard. De hoeveelheid zuurstof voor verbranding kan door het openen immers toenemen. Omdat het van buitenaf moeilijk te bepalen is of een brand brandstof- of zuurstofgecontroleerd is, wordt er binnen de basisprincipes van brandbestrijding van uitgegaan dat elke binnenbrand als zuurstofgecontroleerde brand moet worden bestreden. Dit impliceert meteen dat er voorzichtig omgegaan moet worden met het openen van ramen en/of deuren; bij een toestroom van zuurstof kan de brand zich immers snel uitbreiden.

3.4 Ontwikkelfase

De ontwikkelfase start op het moment dat er sprake is van vlammeende verbranding. Het uitgangspunt in deze fase is dat de brand zichzelf kan onderhouden. De beginnende brand warmt de directe omgeving op, zodat brandstoffen (materialen) in de directe nabijheid van de brand gaan ontleden (uitgassen) en de omvang van de brand, het vlamfront, toeneemt. Door het toenemende vlamfront wordt de omgeving vooral door warmtestraling opgewarmd.

In het voorgaande hoofdstuk is uitgelegd dat het vooral de stof- en materiaaleigenschappen zijn die bepalen hoeveel warmte (energie) er bij brand vrijkomt. Een stof moet namelijk eerst warm worden voordat hij kan ontleden en er brandbare gassen (pyrolysegassen, zie paragraaf 2.1) kunnen ontstaan. En juist deze brandbare gassen vormen de brandstof in het verbrandingsproces. De hoeveelheid van deze gassen neemt toe naarmate de temperatuur

oploopt. De snelheid waarmee de brandbare gassen worden gevormd en het volume daarvan, bepalen de (potentiële) omvang en duur van de verbranding. Hoeveel brandstof er daadwerkelijk gaat branden, hangt af van de mengverhouding met zuurstof en de ontstekingsenergie (zie paragraaf 2.2).

Tijdens de pyrolyse kan er snel meer brandbaar gas vrijkomen dan er wordt verbrand. De vlammen groeien en er komen steeds meer verbrandingsproducten (zie paragraaf 2.3) vrij, waaronder roet. Na enige tijd zal een rooklaag zichtbaar worden in de ruimte (zie figuur 3.1 in paragraaf 3.1). Deze verbrandingsproducten bevatten energie, waardoor al vrij snel een hete rooklaag onder het plafond ontstaat. Hete rook verplaatst zich door stroming (zie paragraaf 1.6.2) in een ruimte en straalt warmte uit naar andere voorwerpen (zie paragraaf 1.6.3). Deze kunnen hierdoor gaan ontleden, met als gevolg dat er steeds meer brandgassen worden gevormd. Uiteindelijk zal er een brandbaar gas-luchtmengsel in de brandruimte ontstaan.

Hoe snel de ontwikkeling van de brand gaat (oftewel de tijdsduur van deze fase), is met name afhankelijk van de aanwezige brandstof, de omgeving waarin de brand woedt en de geometrie (omvang) van de ruimte. Afhankelijk van de grootte van de ruimte zal de opwarming een bepaalde tijd duren. Een kleine ruimte heeft sneller een hogere temperatuur bereikt dan een grote ruimte. De brandontwikkeling zal verdergaan zolang er voldoende zuurstof aanwezig is.

3.4.1 Beschrijving van de brandontwikkeling

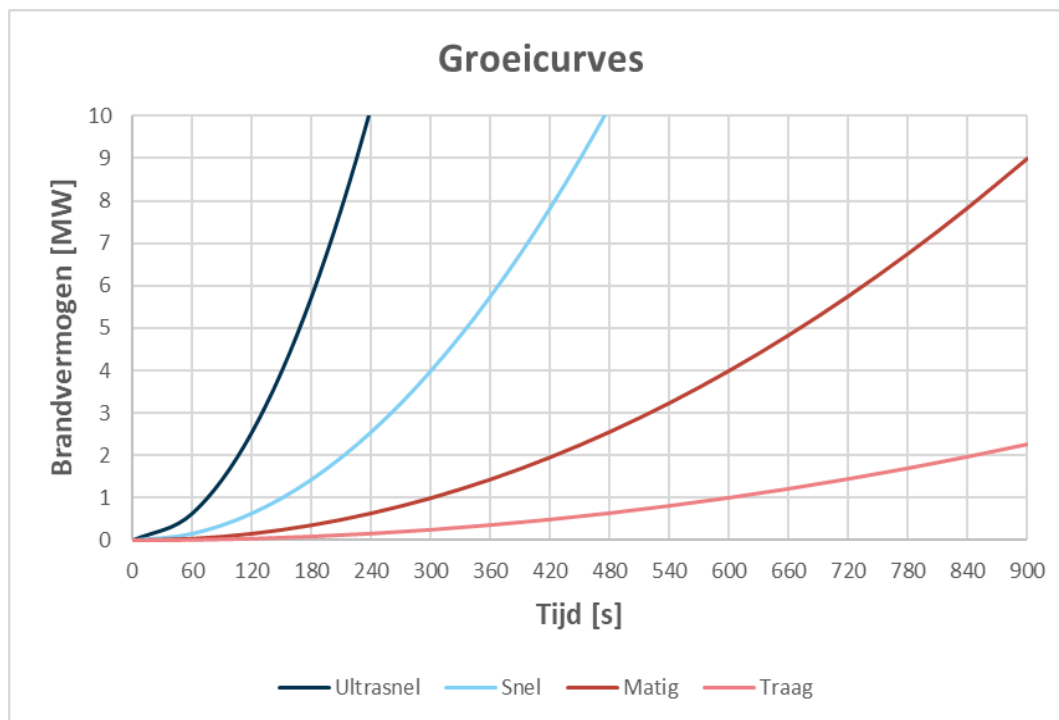
Zoals hierboven aangegeven, is de snelheid van de ontwikkeling van de brand van veel factoren afhankelijk. Een vereenvoudigde beschrijving van de brandontwikkeling, bij gebrek aan gedetailleerde kennis van de inventaris of opslag, wordt in Fire Safety Engineering gebruikt door toepassing van specifieke groeicurves. Er worden vier groeicurves gedefinieerd: ultrasnel, snel, matig en traag. Deze groeicurves beschrijven de ontwikkeling van de brand op basis van het brandvermogen. Elke groeicurve heeft een constante branduitbreidingssnelheid in twee richtingen (tweedimensionaal), uitgedrukt in seconden (s). Deze branduitbreidingssnelheid (of tijdconstante) komt overeen met de tijd die een brand nodig heeft om een brandvermogen van 1 MegaWatt (MW) te bereiken. In de nationale bijlage bij Eurocode 1 deel 2 (NEN-EN 1991-1-2) is de branduitbreidingssnelheid per gebruiksfunctie en gebouwtype weergegeven. In tabel 3.1 zijn een aantal voorbeelden van branduitbreidingssnelheid weergegeven.

Tabel 3.1 Voorbeelden van de brandvermogensdichtheid (Bron: NEN-EN 1991-1-2/NB)

Gebruiksfunctie	Gebouwtype	Branduitbreidingssnelheid of tijdconstante	t_{α} (s)
Woonfunctie		Matig	300
	Theater, bioscoop	Snel	150
Bijeenkomstfunctie	Museum	Traag	600
	Restaurant	Matig	300
Gezondheidszorg	Slaapkamer	Matig	300

Gebruiksfunctie	Gebouwtype	Branduitbreidingssnelheid of tijdconstante	t_{α} (s)
Industriefunctie	Opslag:		
	> slecht brandbaar veren matrassen	Traag	600
	> kunststofschuimen	Matig	300
	> hout	Snel	150
	Gestoffeerde meubels	Ultrasnel	75
	Productie: werkplaats	Traag	600
Kantoorfunctie		Matig	300
Logiesfunctie	Hotelkamer	Matig	300
	Hotel (standaard)	Matig	300
Onderwijsfunctie	Klaslokaal	Matig	300
Winkelfunctie	Bibliotheek	Snel	150
	Winkelcentrum	Snel	150
	Winkel (detailhandel, bouwmarkt, supermarkt)	Snel	150

In figuur 3.4 hieronder zijn de groeicurves grafisch weergegeven.



Figuur 3.4 Schematische weergave van de groeicurves van natuurlijk brandverloop

Deze groeicurves zijn zeer globaal en lang niet altijd representatief voor de brandontwikkeling, bijvoorbeeld omdat er door de inrichting van de ruimte niet kan worden uitgegaan van een constante branduitbreiding in twee richtingen. Deze groeicurves kunnen echter wel helpen om meer inzicht te krijgen in de snelheid waarmee een brand zich kan ontwikkelen.

Relatie tussen branduitbreidingssnelheid en brandvermogen

De relatie tussen de branduitbreidingssnelheid (t_α) en het brandvermogen (\dot{Q}) kan worden weergegeven met onderstaande formule:

$$\dot{Q} = \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2$$

\dot{Q} = brandvermogen in MW of $\frac{MJ}{s}$, t = tijd in s,
 t_α = branduitbreidingssnelheid of tijdconstante in s

Een brand met een trage branduitbreiding heeft een branduitbreidingssnelheid van 600 s. Dit betekent dat een dergelijke brand na 600 s op basis van bovenstaande formule 1 MW bedraagt.

$$\dot{Q} = \left(\frac{600}{600}\right)^2 = 1 \text{ MW}$$

3.4.2 Afbrandsnelheid

De snelheid van de verbranding en daarmee de branduitbreiding kan worden uitgedrukt als de massa brandstof die per seconde verbrandt (kg/s), de afbrandsnelheid. De afbrandsnelheid is niet alleen afhankelijk van de verbrandingswaarde (paragraaf 1.5.1), maar ook van de dichtheid (paragraaf 1.4.3) en de temperatuur (°C). In tabel 3.2 zijn een aantal voorbeelden van afbrandsnelheden opgenomen. De afbrandsnelheid kent gelijk aan het brandvermogen veelal een dynamisch verloop. De voorbeelden in de tabel zijn een inschatting van de maximale afbrandsnelheid.

Tabel 3.2 Voorbeelden van de afbrandsnelheid (Bron: Principles of Fire Behavior)

Materiaal	Afbrandsnelheid [kg/s]
Afvalbak (120 L)	0,01
Houten stoel (bekleed)	0,06
Bankstel	0,1
Bed	0,14
Kast	0,04
Kantoor	0,09
Slaapkamer	0,13
Keuken	0,19

Relatie tussen afbrandsnelheid en brandvermogen

De relatie tussen de afbrandsnelheid (\dot{m}_{fi}) en het brandvermogen (Q) kan worden weergegeven met de onderstaande formule:

$$\dot{m}_{fi} = \frac{\dot{Q}}{H_u \cdot \eta_c}$$

\dot{m}_{fi} = de massastroom verbrande brandstof in $\frac{kg}{s}$, \dot{Q} = brandvermogen in MW of $\frac{MJ}{s}$,
 H_u = verbrandingswarmte in $\frac{MJ}{kg}$, η_c = de verbrandingsefficiëntie

Verbrandingsefficiëntie

De verbrandingsefficiëntie is de mate waarin de gepyrolyseerde brandstof verbrandt, variërend van 1 voor volledige verbranding tot 0 wanneer in het geheel geen verbranding meer optreedt. De verbrandingsefficiëntie wordt ook wel eens omschreven als de verhouding tussen de effectieve verbrandingswarmte en de volledige verbrandingswarmte. De volledige verbrandingswaarde van materialen (zie paragraaf 1.5.1) is veelal vastgesteld onder ideale omstandigheden (hoge druk en pure zuurstof). Dit is niet representatief voor daadwerkelijke branden, en daarom wordt voor branden in de praktijk uitgegaan van een verbrandingsefficiëntie.

De waarde van de verbrandingsefficiëntie is afhankelijk van de soort brandstof en de aanwezige hoeveelheid zuurstof. Methanol en ethanol bijvoorbeeld, branden met een vlam die nauwelijks zichtbaar is; er is weinig tot geen roetvorming. Dergelijke vloeistoffen hebben een verbrandingsefficiëntie van bijna 1. Brandstoffen die roet produceren hebben een lagere verbrandingsefficiëntie. EN 1991-1-2 stelt een verbrandingsefficiëntie voor van 0,8 voor materialen die hoofdzakelijk uit houtachtige brandstof (cellulose) bestaan. Let op: deze verbrandingsefficiëntie geldt voor situaties waarbij voldoende zuurstof aanwezig is. In kleine afgesloten ruimtes neemt de verbrandingsefficiëntie aanzienlijk af wanneer de zuurstofconcentratie daalt.

Voorbeeld verbrandingsefficiëntie

Voor het bankstel uit tabel 3.2 hierboven bedraagt het brandvermogen bij een verbrandingsefficiëntie van 0,8 en een verbrandingswaarde van 26 MJ/kg (polyurethaan) ongeveer:

$$\dot{Q} = \dot{m}_{fi} \cdot H_u \cdot \eta_c = 0,1 \cdot 26 \cdot 0,8 = 2,1 \text{ MW}$$

3.4.3 Brandvermogensdichtheid

Een andere term om de energie die vrijkomt bij brand uit te drukken is de brandvermogensdichtheid. De brandvermogensdichtheid is het vermogen dat vrijkomt bij verbranding per vierkante meter vloeroppervlak. De brandvermogensdichtheid (\dot{q}_f) wordt uitgedrukt in kW/m² of MW/m². In de nationale bijlage bij Eurocode 1 deel 2 (NEN-EN 1991-1-2) is referentie-brandvermogensdichtheid per gebruiksfunctie en gebouwtype weergegeven. In tabel 3.3 op de volgende pagina zijn een aantal voorbeelden van de referentie-brandvermogensdichtheid uit deze norm opgenomen.

Engelse term voor brandvermogensdichtheid

Internationaal wordt de brandvermogensdichtheid vaak uitgedrukt als *Rate of Heat Release* (RHR).

Tabel 3.3 Voorbeelden van de brandvermogensdichtheid (Bron: NEN-EN 1991-1-2/NB)

Gebruiksfunctie	Gebouwtype	q_f of $R\ddot{H}R_f$ (kW/m ²)	q_f of $R\ddot{H}R_f$ (MW/m ²)
Woonfunctie		250	0,25
Bijeenkomstfunctie	Theater	500	0,50
	Bioscoop	500	0,50
	Museum	250	0,25
Gezondheidszorg	Slaapkamer	250	0,25
Industriefunctie	Opslag (per meter opslaghoogte)	500	0,50
	Productie (werkplaats)	250	0,25
Kantoorfunctie		250	0,25
Logiesfunctie	Hotelkamer	250	0,25
	Hotel (standaard)	250	0,25
Onderwijsfunctie	Klaslokaal	250	0,25
Winkelfunctie	Bibliotheek	500	0,50
	Winkelcentrum	250	0,25
	Winkel (detailhandel, bouwmarkt, supermarkt)	500	0,50

Relatie tussen brandvermogensdichtheid en brandvermogen

De relatie tussen de brandvermogensdichtheid (q_f) en het brandvermogen (\dot{Q}) kan worden weergegeven met de onderstaande formule:

$$\dot{Q} = q_f \cdot A_f$$

\dot{Q} = brandvermogen MW of $\frac{MJ}{s}$, q_f = de referentie brandvermogensdichtheid per m² in $\frac{MW}{m^2}$
 A_f = de oppervlakte van de brand, met als maximum de brandruimte in m²

Het brandvermogen van een brand kan dus met bovenstaande formule bepaald worden. Stel een brand in kantoorgebouw heeft een oppervlak van 100 m², het brandvermogen van de brand bedraagt dan:

$$\dot{Q} = q_f \cdot A_f = 0,25 \cdot 100 = 25 \text{ MW}$$

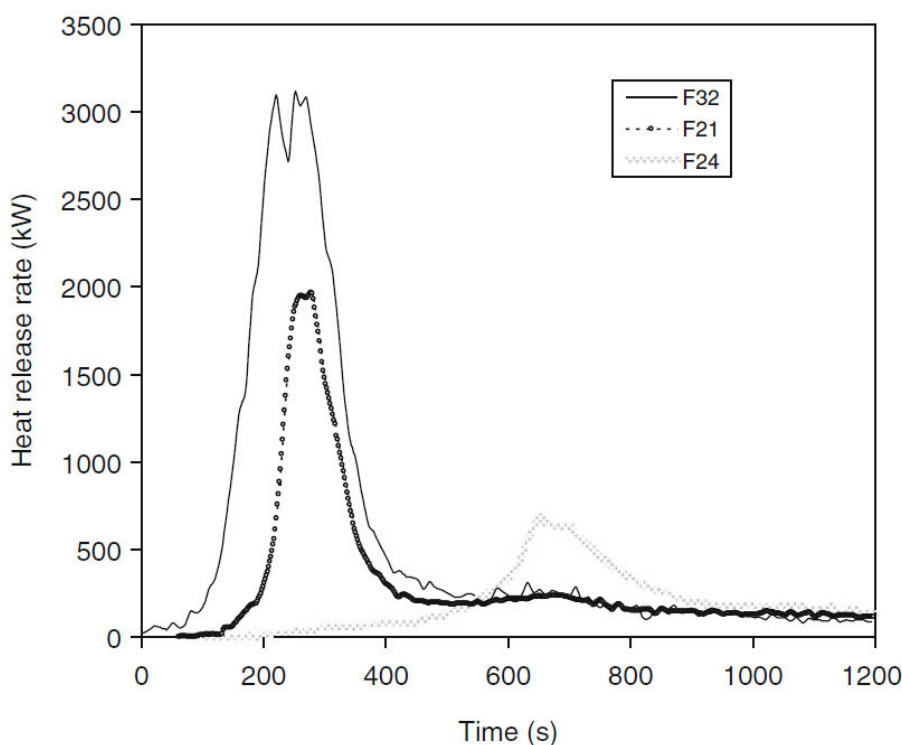
3.4.4 Het brandvermogen van voorwerpen

Naast termen en vereenvoudigingen om de snelheid van de brandontwikkeling te beschrijven, wordt ook gebruikgemaakt van brandscenario's van daadwerkelijke voorwerpen. In tegenstelling tot de brandvermogensdichtheid en de branduitbreidingsnelheid die uitgaan van een uniforme verdeling van vuurlast over de ruimte en een constante branduitbreiding in twee richtingen, wordt in deze brandscenario's uitgegaan van de branduitbreiding en het brandvermogen verkregen uit brandtesten. Dergelijk brandscenario's kunnen zeer nuttig zijn

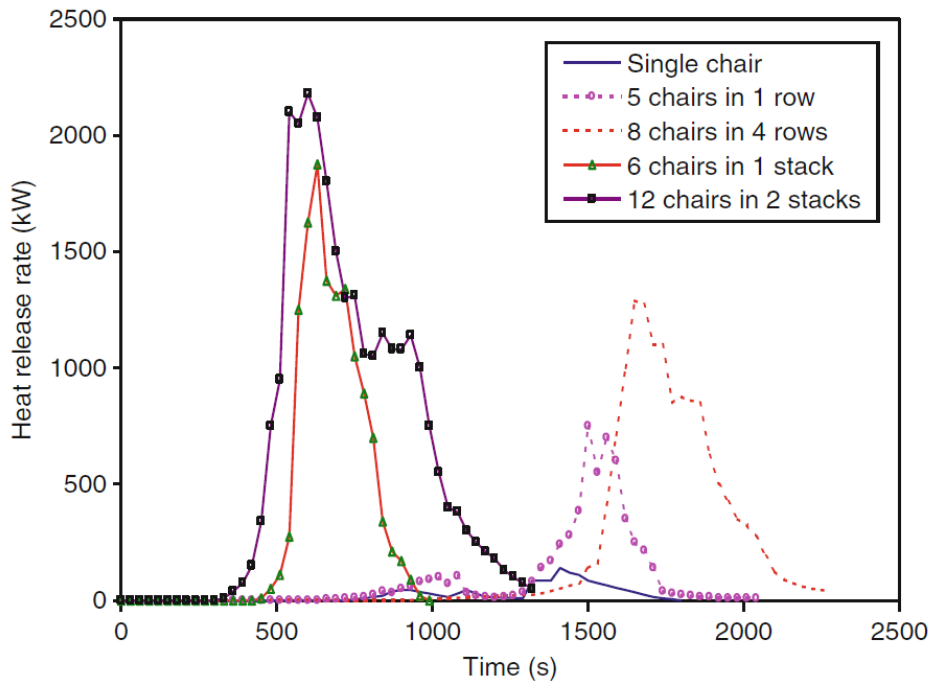
voor bijvoorbeeld simulaties van het brandverloop. Daarnaast geven ze inzicht in het brandverloop en met name in het te verwachten maximale brandvermogen van de voorwerpen. Een voorbeeld van een dergelijk scenario is weergegeven in figuur 1.2 in paragraaf 1.5.4. Er zijn echter talloze voorwerpen en talloze bronnen waarin dergelijke scenario's zijn opgenomen. Wel moet bedacht worden dat deze scenario's een specifieke (test)situatie omschrijven; een verandering van omstandigheden kan een ander brandverloop tot gevolg hebben (zie ook paragraaf 3.3). In tabel 3.4 en in figuur 3.5 en 3.6 zijn een aantal voorbeelden opgenomen van het maximale brandvermogen van voorwerpen in de open lucht bij voldoende brandstof.

Tabel 3.4 Het maximale brandvermogen van een aantal voorwerpen (Bron: NFPA 921)

Voorwerp	Toelichting	Maximaal brandvermogen (MW)
Papiermand		0,045
Grote plastic prullenbak gevuld met papier		0,3
Ziekenhuisbed		0,3
Kopieermachine		0,7
Nachtkastje		1,1
Massief bureau met bureaustoel en pc		1,8
Fauteuil	PUR, 28 kg	1,99
Bankstel	PUR, 50 kg	3,12
Kerstboom	droog, 20 kg	5,0



Figuur 3.5 Voorbeeld van brandvermogen van verschillende soorten bekleed meubilair (Bron: Hurley, 2016)



Figuur 3.6 Voorbeeld van brandvermogen van opstapelbare stoelen van polypropyleen en staal (Bron: Hurley, 2016)

3.5 Overgang ontwikkelfase naar volledig ontwikkelde fase: flashover

In de ontwikkelfase gaat het om een lokale brand die zich uitbreidt en steeds meer brandbare gassen produceert die zich in de hete rooklaag bevinden. Deze hete rooklaag straalt warmte uit naar andere voorwerpen (zie paragraaf 1.6.3). Deze kunnen hierdoor gaan ontleden, met als gevolg dat er steeds meer brandgassen worden gevormd. Uiteindelijk ontstaat er een brandbaar gas-luchtmengsel op verschillende plekken in de brandruimte. Of dit gas-luchtmengsel tot ontbranding komt, is afhankelijk van de concentratie brandbare gassen (brandstof), de temperatuur en van de hoeveelheid zuurstof in de brandruimte. Zodra de drie zijden van de branddriehoek met elkaar in de juiste mengverhouding komen, zal het gas-luchtmengsel ontbranden. De rooklaag neemt toe, de temperatuur in de rooklaag loopt verder op en wordt zo hoog dat de rooklaag de ontstekingsenergie (ontbrandings- of zelfontbrandingstemperatuur) bereikt voor het ontbranden van de brandbare voorwerpen in de ruimte. Het verschijnsel waarbij alle brandbare voorwerpen in de brandruimte in korte tijd tegelijk tot ontbranding komen, noemen we *flashover* (zie ook paragraaf 3.9.1).

Definities van flashover

In de literatuur worden verschillende definities gehanteerd voor het fenomeen flashover. Deze definities bevatten veelal beschrijvingen met de volgende elementen:

- > Overgang van ontwikkelfase (groeifase) naar volledig ontwikkelde fase van een brand in een omhulling.
- > Snelle overgang van een lokale brand naar een brand waarbij de totale oppervlakte van de brandruimte is betrokken.
- > Scheiding tussen twee fasen van een compartimentsbrand; pre-flashover en post-flashover.

Flashover is dus de overgang van een lokale brand in de ontwikkelfase naar een volledig ontwikkelde brand in de gehele ruimte. De benodigde ontbranding van de brandbare voorwerpen kan op twee manieren plaatsvinden:

- > *Via warmtestraling van de rooklaag*
Dit gebeurt bij een warmtestraling van 20 kW/m², wat gelijk staat aan een temperatuur van ongeveer 500 °C, zie ook paragraaf 1.6.3. Deze temperatuur komt overeen met de zelfontbrandingstemperatuur van gassen, zie tabel 2.1 in paragraaf 2.2.2.
- > *Via stroming van de rooklaag*
Bij een temperatuur van ongeveer 300 °C kan er ook sprake zijn van flashover als de rooklaag in contact komt met de vuurlast. Deze temperatuur komt overeen met de ontbrandingstemperatuur met ontstekingsbron van vaste stoffen, zie tabel 2.1 in paragraaf 2.2.2.

In paragraaf 3.9 *Brandfenomenen* worden nader ingegaan op flashover en de betekenis daarvan voor de praktijk.

3.6 Volledig ontwikkelde fase

In de ontwikkelfase neemt het brandvermogen toe, zie paragraaf 3.4. In de fase van de volledig ontwikkelde brand wordt het maximale brandvermogen bereikt. Na de flashover is de brand steeds meer in evenwicht en op zijn hoogtepunt; hij is volledig ontwikkeld geworden. De vrijkomende energie in de brandruimte is het grootst en wordt in deze fase beperkt door de maximale afbrandsnelheid (zie paragraaf 3.4.2 en 3.6.1) of de beschikbaarheid van zuurstof (zie paragraaf 3.6.2). In de eerste situatie, die van maximale afbrandsnelheid, is sprake van een brandstofgecontroleerde brand. In de tweede situatie is sprake van een zuurstofgecontroleerde brand (zie voor beide begrippen paragraaf 3.3). Bij een zuurstofgecontroleerde brand kunnen onverbrande gassen zich ophopen onder het plafond. Ter plaatse van gevelopeningen komen deze hete gassen in aanraking met zuurstof en verbranden ze, waardoor vlammen door de openingen naar buiten komen.

De gemiddelde temperatuur in de brandruimte kan gedurende deze fase hoog zijn en waarden van ongeveer 700°C-1200°C bereiken. Door de hoge temperaturen dragen alle niet afgeschermd brandbare materialen met brandbare gassen bij aan de brand. De afgeschermd brandbare materialen kunnen pas veel later bij de brand betrokken worden. Dit is bijvoorbeeld het geval bij massieve houten blokken, waarvan alleen het blootgestelde oppervlak bijdraagt aan de brand. Dit geldt ook voor eventuele afgeschermd brandbare materialen in de omhulling van de brandruimte (wanden en vloeren). De fase van de volledig ontwikkelde brand kan daardoor ook langere tijd in beslag nemen (uren tot dagen). De duur van deze fase wordt met name bepaald door het brandvermogen en de hoeveelheid brandbaar materiaal. Het brandvermogen is voornamelijk afhankelijk van de brandstof, de instroom van verse lucht (zuurstof), de wijze van opslag en de temperatuur in de brandruimte. De temperatuur bepaalt immers de snelheid van opwarming en ontleding. Deze temperatuur is echter weer afhankelijk van bijvoorbeeld de materialisering van de omhulling (warmtetransport in constructies), de afbrandsnelheid en de uitstroom van rook via openingen. Er is dus sprake van diverse verbanden tussen de verschillende grootheden, die van invloed op elkaar zijn (kruis- en cirkelverbanden).

In de volgende paragrafen worden nader ingegaan op de relatie tussen de vrijkomende energie (brandvermogen) en de brandvermogensdichtheid en natuurlijke ventilatie.

3.6.1 Brandvermogensdichtheid en brandvermogen

Het maximale brandvermogen dat bij een brandstofgecontroleerde brand in de volledig ontwikkelde fase kan worden bereikt, is enerzijds afhankelijk van de hoeveelheid vrijkomende energie per seconde per vierkante meter vloeroppervlak (de brandvermogensdichtheid, zie paragraaf 3.4.3) en anderzijds van de oppervlakte van de brandruimte.

Relatie tussen brandvermogensdichtheid en brandvermogen

Zoals in paragraaf 3.4.3 is omschreven, kan het brandvermogen worden bepaald met de formule:

$$\dot{Q} = q_f \cdot A_f, \text{ met } \dot{Q} = \text{brandvermogen MW of } \frac{MJ}{s}$$

Omdat het oppervlak in de formule begrenst wordt door het oppervlak van de brandruimte, kan het maximale brandvermogen van een brandruimte worden bepaald.

Voorbeeld 1: Stel een woonkamer (brandruimte) in een woning heeft een oppervlak van 40 m². Het maximale brandvermogen van deze ruimte bedraagt dan:

$$\dot{Q} = q_f \cdot A_f = 0,25 \cdot 40 = 10 \text{ MW}$$

Voorbeeld 2: Stel een brandcompartiment van een industriegebouw bedraagt 2.500 m² met een gemiddelde opslaghoogte van 1 m. Het maximale brandvermogen van deze ruimte bedraagt dan:

$$\dot{Q} = q_f \cdot A_f = 0,5 \cdot 2.500 = 1.250 \text{ MW}$$

Het mag duidelijk zijn dat het hier gaat om het maximale (theoretische) brandvermogen bij een brandstofgecontroleerde brand na flashover, waarbij uitgegaan wordt van een vooraf bepaalde brandvermogensdichtheid. De kengetallen voor de brandvermogensdichtheid uit tabel 3.3 zijn gemiddelde waarden en gaan uit van ideale omstandigheden. Bij grote brandcompartimenten leidt de bovenstaande benadering tot zeer hoge theoretische brandvermogens die in de praktijk niet realistisch zijn. Deze benadering laat echter duidelijk zien wat het verschil is tussen het brandvermogen op basis van de omvang van de brand en het potentiële maximale brandvermogen op basis van de omvang van de ruimte.

3.6.2 Natuurlijke ventilatie en brandvermogen

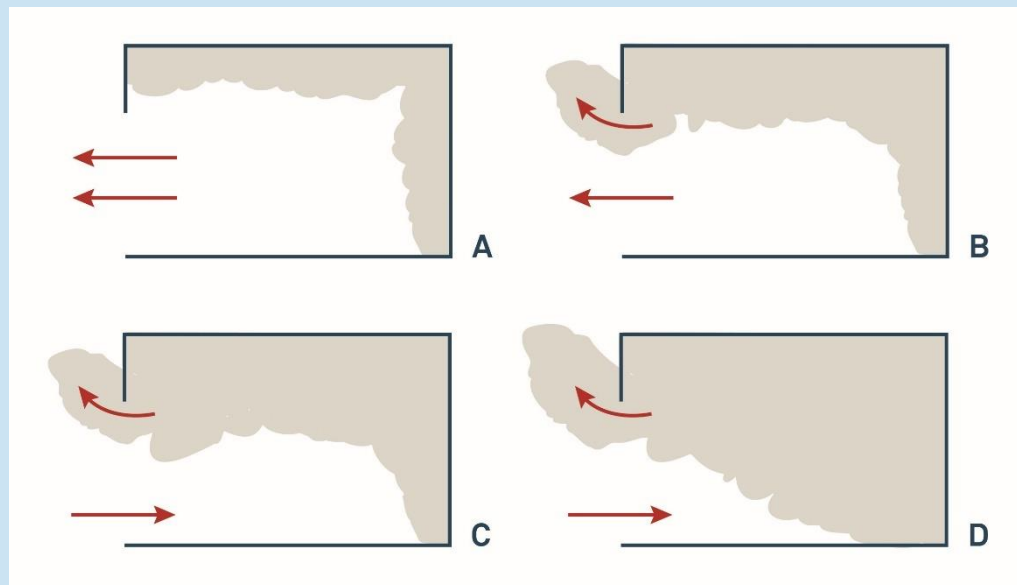
Zoals in hoofdstuk 2 is omschreven, branden gassen niet zonder zuurstof. Daarom is er bij een zuurstofgecontroleerde brand een rechtstreeks verband tussen het brandvermogen (de omvang van de brand) en de hoeveelheid beschikbare zuurstof. In de fase van de volledig ontwikkelde brand is sprake van hoge temperaturen in de brandruimte. Hierdoor wordt meer en meer brandstof (gassen) gevormd. Door te weinig beschikbare zuurstof kan maar een deel van de brandstof verbranden. De overtollige brandstof wordt verbrand in een aangrenzende ruimte of in de openingen die naar buiten leiden.

Natuurlijke ventilatie

Zoals in paragraaf 3.3 is omschreven, wordt een zuurstofgecontroleerde brand ook wel een ventilatiegecontroleerde brand genoemd. Deze ventilatie kan worden onderverdeeld in natuurlijke en gedwongen ventilatie. Met natuurlijke ventilatie wordt de toe- en afvoer van lucht via openingen in de omhulling van een brandruimte bedoeld. Met gedwongen ventilatie wordt de toe- en afvoer van lucht via mechanische ventilatie bedoeld.

Natuurlijke ventilatie ontstaat door drukverschillen. Onder invloed van drukverschillen tussen binnen en buiten (over openingen in de omhulling) van een brandruimte ontstaan massastromen door deze openingen. Door deze massastromen stroomt rook (lucht) de brandruimte uit en verse lucht de brandruimte in.

Drukverschillen ontstaan om verschillende redenen, bijvoorbeeld door het uitzetten van de brandbare gassen (rook) en temperatuurverschillen tussen (delen van) de brandruimte en de buitenlucht. Ook de hoogte van het gebouw, de aanwezige winddruk en ventilatiesystemen kunnen van invloed zijn op de optredende drukverschillen. Per fase van de brand kunnen verschillende drukprofielen worden onderscheiden. In figuur 3.7 hieronder zijn een aantal fasen schematisch weergegeven:



Figuur 3.7 Drukprofielen bij verschillende brandfasen

Fase A en B treden op in het beginstadium van de brand (de ontwikkelfase). Door de uitzetting van de gassen in de rook bij een beginnende brand ontstaat een positief drukverschil over de opening waardoor lucht (gassen) in de koude zone door de opening zullen uitstromen (fase A). Als de hete rook de bovenzijde van de opening bereikt, kunnen gelijktijdig rook uit de hete zone en lucht (gassen) uit de koude zone uitstromen, zolang er sprake is van een positief drukverschil (fase B). Veelal duurt deze fase maar een paar seconden.

Al snel na fase B wordt de massabalans herstelt, waarbij verse lucht (koude gassen) naar binnen stroomt door het onderste deel van de opening (fase C). De massa van de uitstromende gassen (rook) is gelijk aan de massa van de instromende gassen (verse lucht). Door het verschil in dichtheid (zie paragraaf 1.4.3) is de volumestroom van de uitstromende lucht groter dan de volumestroom van de instromende lucht. Deze fase kan geruime tijd duren en treedt op gedurende het grootste gedeelte van de pre-flashoverfase (de ontwikkelfase).

Fase D treedt op tijdens de post-flashoverfase. In deze fase is geen sprake meer van een koude en hete zone, maar van een opgemengde zone. De gehele brandruimte is gevuld met rook en de temperatuurverschillen over de hoogte van de brandruimte zijn beperkt. Ook in deze fase is sprake van een massabalans tussen uitstromende gassen en instromende gassen.

De verse lucht die door openingen wordt aangevoerd bepaalt dus de hoogte van het brandvermogen. Van deze verse lucht bestaat een beperkt deel uit zuurstof (21 % volumeprocent en 23 % massaprocent). Indien de hoeveelheid toevoerde zuurstof (massastroom) bekend is, kan een inschatting van het maximale brandvermogen worden gemaakt.

Brandvermogen op basis van ventilatie

Voor de fase van de volledig ontwikkelde brand kan het brandvermogen worden bepaald op basis van een vereenvoudigde formule voor de massastroom van lucht door een opening. De relatie tussen de massastroom (\dot{m}_a) en de opening kan worden weergegeven met de onderstaande formule:

$$\dot{m}_a = 0.5 \cdot A \cdot \sqrt{H_o}$$

$\dot{m}_a = \text{massastroom } \frac{\text{kg}}{\text{s}}, A = \text{de oppervlakte van de opening in } \text{m}^2$
 $H_o = \text{de inwendige hoogte van de opening in } \text{m}^{-1}$

Door de massastroom te vermenigvuldigen met de verbrandingswaarde per kg verbruikte zuurstof kan het brandvermogen worden ingeschat. De verbrandingswaarde per kg verbruikte brandstof ligt voor alle brandbare stoffen tussen de 12 tot 14 MJ op basis van de stoichiometrische verhouding en de verbrandingswaarde van de brandstof, zie ook paragraaf 1.5.1 en paragraaf 2.1.2. Als gemiddelde kan voor de verbrandingswaarde per kg verbruikte brandstof worden uitgegaan van 13 MJ. Bij een massapercentage zuurstof van 23 % in elke kg lucht bedraagt de verbrandingswaarde per kg lucht ongeveer 3 MJ ($0,23 \times 13$). Dit leidt tot de volgende formule:

$$\dot{Q} = 3 \cdot 0.5 \cdot A \cdot \sqrt{H_o}$$

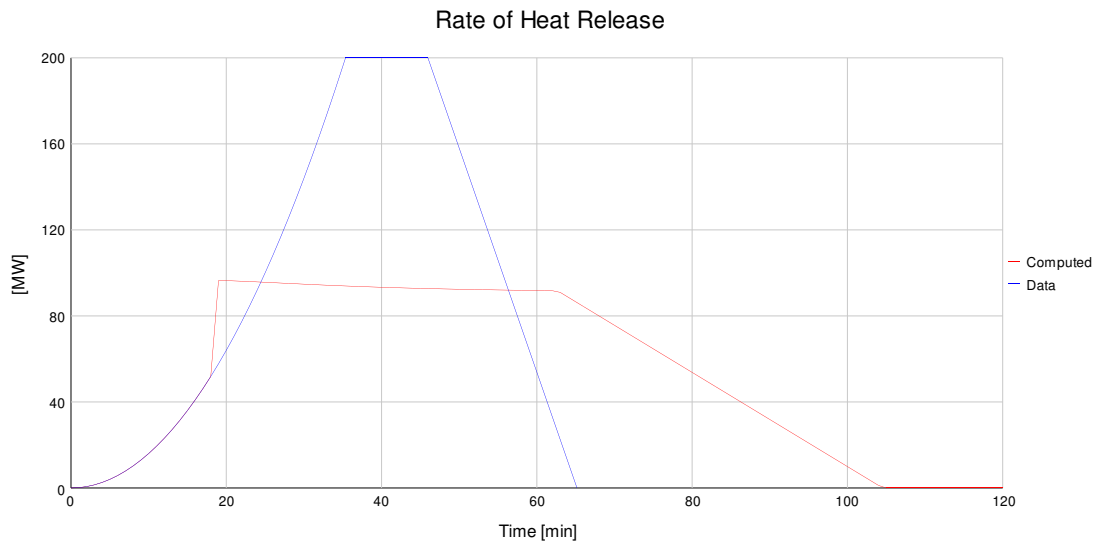
Stel: in een woonkamer van 40 m² woedt een volledig ontwikkelde brand. Deze woonkamer heeft een raam van 4 m² met een inwendige hoogte van 2 m. Het brandvermogen op basis van de massastroom verse lucht (natuurlijke ventilatie) door de opening kan dan inschat worden op:

$$\dot{Q} = 3 \cdot 0.5 \cdot 4 \cdot \sqrt{2} = 8.5 \text{ MW}$$

Let op: het gaat hier om een inschatting waarbij alle binnenkomende zuurstof bijdraagt aan de verbranding (uniforme temperatuurverdeling in de brandruimte en een temperatuur die twee keer zo hoog is als de omgevingstemperatuur). De genoemde condities treden meestal op bij post-flashoverbranden. Ook voor zuurstofgecontroleerde branden in de ontwikkelfase kan deze formule worden gebruikt als een ruwe inschatting, waarbij eerder sprake zal zijn van een overschatting van het brandvermogen.

3.6.3 Het maximale brandvermogen

Het maximale brandvermogen van een volledig ontwikkelde brand in een brandruimte, ook wel het stationaire brandvermogen genoemd, wordt dus enerzijds begrensd door de vrijkomende energie in combinatie met de omvang van de brandruimte en anderzijds door de hoeveelheid beschikbare zuurstof voor de verbranding. In figuur 3.8 op de volgende pagina is een voorbeeld weergegeven.



Data = brandstof beheerst (max 200 MW)
 Computed = ventilatiebeheerst (max 90 MW).

Figuur 3.8 Voorbeeld van het maximale brandvermogen

Vuistregels basisprincipes

Op basis van de relatie tussen het brandvermogen en ventilatie is in de basisprincipes voor brandbestrijding een vuistregel opgenomen om het brandvermogen per vierkante meter opening in te kunnen schatten. Als vuistregel geldt: het brandvermogen kan per vierkante meter opening met ongeveer $2,5 \text{ MW}^4$ toenemen (zie paragraaf 3.6.2 en paragraaf 6.4.5). Met deze vuistregel kan een eenvoudige inschatting worden gemaakt van het maximale brandvermogen bij de aanwezige ventilatiemogelijkheden.

Indien het voorbeeld van de woonkamer uit het vorige kader wordt aangehouden, wordt een maximaal brandvermogen van 10 MW ($4 \times 2,5$) gevonden.

Voor de woonkamer uit het voorbeeld kan het maximale brandvermogen ook bepaald worden op basis van de brandvermogensdichtheid (zie paragraaf 3.6.1): 10 MW ($40 \times 0,25$). In dit voorbeeld is de uitkomst voor beide situaties gelijk. Dit is echter in de praktijk meestal niet het geval.

Stel we kijken op dezelfde wijze naar voorbeeld 2 uit paragraaf 3.6.1 en gaan ervan uit dat in het industriegebouw drie overheaddeuren aanwezig zijn van ieder 16 m^2 ($4 \times 4 \text{ m}$). Het maximale brandvermogen van het gebouw bedraagt dan:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= 0,5 \cdot 2.500 = 1.250 \text{ MW, of} \\ \dot{Q} &= 2,5 \cdot 3 \cdot 16 = 120 \text{ MW} \end{aligned}$$

In dit voorbeeld bedraagt het maximale brandvermogen dus 120 MW op basis van aanwezige ventilatieopeningen. Let op: het gaat hier om een inschatting van het maximale brandvermogen. Of er van een dergelijk brandvermogen ook daadwerkelijk sprake zal zijn, is van veel factoren afhankelijk. De vuistregels zijn slechts bedoeld om een inschatting te kunnen maken van het brandvermogen, zie ook paragraaf 3.8.

⁴ De vuistregels gaan uit van een opening met een hoogte van ongeveer 1 tot 4 m.

3.7 Dooffase

De fase van de volledig ontwikkelde brand blijft bestaan tot de hoeveelheid brandstof minder wordt. Door ontleding zullen de materialen in massa afnemen. Wanneer het grootste deel van de beschikbare brandstof door de brand is verbruikt (70 – 80%), vertraagt het verbrandingsproces, neemt de brand in vermogen af en daalt de temperatuur in de ruimte. De brand kan uiteindelijk over gaan in een smeulfase. In dit stadium van de brand kan het resterende brandbare materiaal roodgloeiend zijn, maar zullen de vlammen door een gebrek aan brandstof langzaam gaan doven. Hierdoor daalt de temperatuur langzaam, maar blijft desondanks hoog genoeg om het uitgassen (pyrolyseren) van materialen te laten doorgaan.

Gevaren van de dooffase

Een smeulend vuur produceert vaak veel brandbare pyrolysegassen. Bij een brand in een afgesloten ruimte zal de ruimte zich geleidelijk vullen met brandbare gassen. Doordat bij dit proces weinig koolstof vrijkomt vanwege het ontbreken van vuurverschijnselen, is de rook vaak licht van kleur, waardoor het risico lijkt mee te vallen. Maar schijn bedriegt! Als dit proces lang genoeg duurt, kan zich namelijk een brandbare concentratie brandgassen vormen die bij voldoende zuurstof ontsteekt. Ook de dooffase van een brand kan hierdoor nog steeds de nodige risico's opleveren.

3.8 Brandverloop in de praktijk

Het gebruik, de geometrie, materialen en openingen van een gebouw zijn van grote invloed op de brand. Omdat deze factoren in alle fasen van het brandverloop invloed kunnen hebben, verloopt een brand niet volgens een vast patroon. De hevigheid (het brandvermogen) van de brand, en ook de duur ervan kunnen bij een gebouwbrand steeds weer anders uitpakken. In relatief kleine ruimtes zoals in woningen, kan een brand door een beperkte zuurstoftoevoer via openingen (stroming) al binnen enkele minuten na ontstaan zuurstofgecontroleerd raken, nog voor een flashover kan optreden. Als er echter openingen in de gevel aanwezig zijn die zorgen voor een grotere zuurstoftoevoer kan dit leiden tot een snelle flashover in kleine ruimtes.

Gesmoorde branden

Onder invloed van ontwikkelingen zoals klimaatverandering en de bijbehorende aandacht voor duurzaamheid en energiezuinigheid, zien we door de jaren heen dat het gebruik van materialen en energiebronnen in gebouwen verandert. Nieuwe bouwwijzen en bouwmaterialen worden gebruikt, waardoor het gebouw anders reageert op een brand en een andere invloed heeft op de brand. Voorbeelden hiervan zijn de toepassing van dubbele en drielaagse beglazing, betere en dikkere isolatiematerialen, luchtdichter bouwen en het gebruik van natuurlijk materialen zoals stro.

In bijvoorbeeld woongebouwen met luchtdichte en goed geïsoleerde constructies kan de warmte afkomstig van een brand niet wegstromen en kan er geen verse lucht de brandruimte instromen. Er ontstaat al snel een zuurstoftekort in de ruimte, waardoor de brand zich niet verder kan ontwikkelen. Het gevolg is dat in woongebouwen steeds vaker sprake is van *gesmoorde branden*: branden met een relatief kleine omvang die al vroeg in het brandverloop zuurstofgecontroleerd raken en daardoor gesmoord worden.

Deze gesmoorde branden produceren relatief veel rook met daarin onverbrande (giftige) gassen, waardoor rookverspreiding en de bijbehorende effecten op de vlucht- en overlevingsmogelijkheden een groeiend probleem vormen. In het onderzoek naar rookverspreiding in woongebouwen

(Brandweeracademie 2020) is hierover nadere informatie te vinden. Dit heeft als gevolg dat ook de brandbestrijding in dergelijke gebouwen verandert: de bestrijding richt zich naast het bestrijden van de brand steeds meer op het beperken van de rookverspreiding en het redden van personen. Dit betekent voor de verkenning dat het in beeld brengen van de rookverspreiding belangrijk is om de daaraan verbonden risico's beter in te kunnen schatten. Dit helpt bij het bepalen van de juiste inzetactie en aanpak van het incident.

Winddriven fires

Als branden door de wind beïnvloed worden, spreken we van een 'wind driven fire' (een door de wind aan gejaagde brand). Dit zijn ook branden om rekening mee te houden. Hoewel dit type branden als afwijkend van de standaard wordt beschouwd, komt het vaker voor dan we ons realiseren.

Onderzoek heeft uitgewezen dat branden in compartimenten zich radicaal anders gaan gedragen als de wind invloed heeft op de brand. Vaak zal dit het geval zijn bij branden in hoogbouw, maar ook op de begane grond kan wind een rol spelen, vooral als de wind op een geopend raam of geopende deur staat waar de brand naar buiten wil. In dat geval wordt de brand juist door de wind terug naar binnen gedrukt. Dit houdt in dat de ingezette eenheid, als zij een deur opent aan de andere zijde van de ruimte (de luwzijde), de volledige brand over zich heen krijgt. De inzetploeg bevindt zich dan in de stromingsrichting (het flowpath) van de hete rook. De toegang naar de brandruimte is dan opeens een uitstroomopening geworden!

Ook zorgt de winddruk ervoor dat de hete rookgassen niet naar buiten kunnen worden afgevoerd. Hierdoor kunnen de rookgassen zich in de brandruimte ophopen. Door de wind en de hoge temperatuur ontstaat er in de brandruimte een overdruk. Bij een hoge winddruk zal de rook in het compartiment en aangrenzende ruimtes geperst worden. Andersom kan de brand soms een hogere druk dan de wind bereiken, waardoor de brand ondanks de winddruk toch een weg naar buiten probeert te vinden. Zolang er 'overdruk' van de brand in de ruimte is, komen flarden van vuur en rook dan tegen de wind in naar buiten. Wanneer de druk van de brand en de wind weer in evenwicht zijn, herhaalt zich de inwendige drukopbouw. Als in die situatie een deur of raam benedenwinds bezwijkt of geopend wordt, ontstaat daar een inferno waarbij de temperaturen enorm kunnen oplopen (tot wel 1500°C). De brandweer heeft in een dergelijke levensgevaarlijke situatie geen enkele kans om veilig en effectief op te treden.

In grotere ruimtes is veelal voldoende zuurstof aanwezig om de brand gedurende langere tijd te onderhouden en snel in omvang te laten toenemen. Branden in grote ruimtes zijn daarvoor langer brandstofgecontroleerd. Veelal zal pas na de flashover sprake zijn van een zuurstofgecontroleerde brand.

Travelling fires

In grote tot zeer grote ruimtes is lang niet altijd sprake van de uniforme temperatuuraanname uit het natuurlijk brandconcept. In kleine en middelgrote ruimtes wordt de rook onder invloed van de brand snel verspreid door de ruimte en zijn de temperatuurverschillen in de rooklaag beperkt. Met het toenemen van de omvang van de ruimte wordt dit bij een kleine brand in grote tot zeer grote ruimtes steeds minder realistisch. De temperatuur in de rooklaag neemt af bij een toenemende afstand van de brand. Voor dergelijke branden is het daarnaast niet logisch om te spreken over pre- en post-flashover branden. Een flashover zal niet optreden als er grote temperatuurverschillen in de rooklaag aanwezig zijn. Daarnaast is de kans op zuurstofgecontroleerde branden een stuk kleiner door de hoeveelheid zuurstof in de ruimte. De brand verspreidt zich in feite van 'brandstofpakket' naar 'brandstofpakket'. Zo'n bewegende brand wordt een 'travelling fire' genoemd. Er zijn nog maar beperkt onderzoeken naar dergelijke branden uitgevoerd. Het vermoeden bestaat dat ze vaker voorkomen dan gedacht, met name in bijvoorbeeld grote industriegebouwen en parkeergarages.

Voor de bestrijding van de brand is naast het bovengenoemde het tijdsbestek waarin de overgangen en fasen van de brand optreden van belang. Op het moment dat de brandweer een inzet gaat doen, is er immers al enige tijd verstreken sinds het ontstaan van de brand. Het brandverloop dat is opgetreden in dit tijdsbestek, is veelal niet zichtbaar en kan zoals hiervoor geschetst nogal uiteenlopen. Een zuurstofgecontroleerde brand kan risicovol zijn, zeker als de onverbrande gassen die geproduceerd worden zich ophopen en zich binnen de brandbaarheidsgrenzen bevinden en/of wanneer de gassen de (zelf)ontbrandingstemperatuur bereiken. Het is dan ook belangrijk dat een goede verkenning wordt uitgevoerd.

Omdat in de praktijk vrijwel niet te herkennen is of een brand zuurstof- of brandstofgecontroleerd is, wordt er veiligheidshalve van uitgegaan dat elke gebouwbrand bij aankomst een zuurstofgecontroleerde brand is. Wees je bewust van het risico dat een brand zich plotseling kan uitbreiden als gevolg van de toevoer van zuurstof via een (nieuwe) opening (zoals bijvoorbeeld een geopende deur, een kapot gesprongen raam of kieren en naden) in de omhulling van het gebouw. Dit risico is ook de reden dat de offensieve buiteninzet volgens de basisprincipes van brandbestrijding de preferente inzettactiek van de brandweer is. Meer hierover is te vinden in hoofdstuk 6.

3.8.1 Brandvermogen in de praktijk

In de praktijk wordt bij gebouwbranden de theoretische piek in het brandvermogen op basis van de brandvermogensdichtheid (zie paragraaf 3.6.1) niet gehaald, omdat een gebouwbrand veelal niet volledig brandstofgecontroleerd is. Zoals eerder in dit hoofdstuk uitgelegd, is een gebouwbrand afhankelijk van de balans tussen de hoeveelheid rookgassen (brandstof!) in de brandruimte en de toevoer van zuurstof (stroming!) naar die gassen toe. Bij zuurstofgecontroleerde branden zijn de openingen in de omhulling bepalend voor de hoeveelheid zuurstof die de brandruimte binnenkomt. Door het verkleinen van een opening zal de brand in brandvermogen afnemen (zie paragraaf 3.6.2). Zo kan het gedeeltelijk sluiten van de deur of het plaatsen van een rookgordijn het brandvermogen en daarmee de intensiteit van de brand beperken.

Het beperken van het brandvermogen kan echter wel tot gevolg hebben dat de brand langer duurt, omdat het meer tijd kost voor alle brandstof om op te branden. Door het vergroten van de openingen, bijvoorbeeld door het openen van ramen, kan de rook met daarin de rookgassen de brandruimte verlaten en kan tegelijkertijd zuurstof de brandruimte instromen (zie paragraaf 3.6.2). De brand kan dan in intensiteit en brandvermogen toenemen. Bij het creëren van een grote hoeveelheid openingen kan een brand (tijdelijk) brandstofgecontroleerd zijn. Naarmate de brand echter in omvang toeneemt, zal hij weer zuurstofgecontroleerd worden.

De brand op 'pauze'

In de basisprincipes van brandbestrijding (zie paragraaf 6.4) wordt aangegeven dat een zuurstofgecontroleerde brand op 'pauze' staat, zolang het gebouw gesloten blijft. Deze 'pauze' betekent echter niet dat er niets gebeurt; er is immers nog steeds sprake van een brand, maar de situatie verandert niet of nauwelijks zolang er geen openingen worden gemaakt. Er is sprake van een status quo; de groei van de brand wordt geremd door een gebrek aan zuurstof, waardoor er sprake is van een brand met een laag brandvermogen. Dit betekent dat er meer tijd kan worden genomen om onder andere een goede verkenning uit te voeren.

Om inzicht te krijgen in de inzetmogelijkheden is het van belang om tijdens de verkenning het actuele brandvermogen vast te stellen. Het actuele brandvermogen is het brandvermogen op basis van de omvang van de brand en de brandvermogensdichtheid (zie paragraaf 3.4.3) of de op dat moment aanwezige openingen in de omhulling (zie paragraaf 3.6.2).

Daarnaast is het belangrijk om een indruk te krijgen van het potentiële brandvermogen dat door een verandering van de omstandigheden kan ontstaan. Het potentiële brandvermogen kan worden bepaald op basis van de omvang van de ruimte die nog niet betrokken is bij de brand of op basis van mogelijke openingen in de omhulling die nog kunnen ontstaan.

Voorbeeld actueel en potentieel brandvermogen

Stel dat er sprake is van een brand in een kantoorgebouw. Het gebouw heeft een omvang van 200 m². Bij aankomst is een deel van de ramen in de gevel bezweken (ongeveer 6 m² van de 15 m²). De brandomvang wordt bij aankomst geschat op 40 m².

Het actuele brandvermogen bedraagt dan:

- > Vuistregel brandomvang: $40 \times 0,25 = 10 \text{ MW}$
- > Vuistregel openingen: $6 \times 2,5 = 15 \text{ MW}$
- > Actueel brandvermogen = **10 MW**.

>

Het potentiële brandvermogen bedraagt dan:

- > Vuistregels brandomvang: $200 \times 0,25 = 50 \text{ MW}$
- > Vuistregels openingen: $15 \times 2,5 = 37,5 \text{ MW}$
- > Potentieel brandvermogen = **37,5 MW**.

Let op: het betreft hier een voorbeeld op basis van de vuistregels dat enkel is bedoeld om te laten zien hoe de vuistregels kunnen worden toegepast. Er zijn diverse andere factoren die bepalend kunnen zijn voor de inzet tijdens een incident. Het gebruiken van de vuistregels voor het bepalen van het brandvermogen bij aankomst en het mogelijke brandvermogen bij de ontwikkeling van een incident is er daar slechts één van.

3.8.2 Koelend vermogen in de praktijk

Het blusprincipe van water is gebaseerd op het verdampen van zoveel mogelijk water in stoom (gas). Hiervoor moet het bluswater eerst worden opgewarmd en van aggregatietoestand veranderen (van de vloeistoffase naar de gasfase). Daarvoor is heel veel energie nodig (met name voor de verdampingswarmte), en dat is precies waarom het koeleffect van water zo groot is: door het water op de brand(haard) of in hete rookgassen te brengen, onttrekken we de benodigde energie voor het verdampen van het water aan de brand of rookgassen. Het gevolg is dat de temperatuur daalt.

In hoofdstuk 1 zijn de warmtecapaciteit en de verdampingswarmte van stoffen behandeld. In paragraaf 1.5.5 is in het kader uitgerekend dat voor de opwarming van één liter water van 20 °C naar 300 °C waterdamp ongeveer 3,0 MJ energie nodig is, zie tabel 3.5 op de volgende pagina. Dit noemen we de theoretische koelcapaciteit van één liter water.

Tabel 3.5 Theoretisch koelcapaciteit van water (Q_{th})

Warmtecapaciteit (c)	Latente warmte (L)	Stoom (c)
335 kJ	2.256 kJ	452 kJ
Warmte-inhoud 1 kg stoom van 300 °C bij 1 bar en 20 °C		
$Q_{th} = 0,355 + 2,256 + 0,452 = 3,0 \text{ MJ}$ (3,043 MJ)		

Praktisch koelend vermogen

In de praktijk zal de theoretische koelcapaciteit van één liter water niet benut worden. De efficiëntie van het gebruikte water bij brandbestrijding zal met betrekking tot koeling geen 100 % zijn. De uitkomsten van onderzoeken naar de efficiëntie van het gebruikte water met betrekking tot koeling lopen nogal uiteen. Voor offensief binnen worden een ondergrens van ongeveer 30 % en een bovengrens van ongeveer 75 % aangenomen. Voor offensief buiten zijn die grenzen respectievelijk circa 10 % en 30 %. De genoemde efficiëntie is van veel factoren afhankelijk, zoals de bereikbaarheid van de brand, de temperatuur, het debiet en de straalpijptechniek.

Vuistregels praktisch koelend vermogen

Omdat de factoren met betrekking tot de efficiëntie sterk variëren, is bij het bepalen van de vuistregels voor het praktisch koelend vermogen in de basisprincipes rekening gehouden met een efficiëntiefactor van 40 – 50 %. Dit is voor een offensieve binneninzet een veilige aanname, maar laat ook gelijk zien dat een vuistregel niet als doel op zich moet worden gezien. Het is een middel om te bepalen of een brand met het aanwezig waterdebiet kan worden geblust (ofwel: of de energie volledig weggenomen kan worden).

Door de theoretische koelcapaciteit te vermenigvuldigen met de efficiëntiefactor en het waterdebiet in liters per seconde kan het praktische koelende vermogen van het debiet worden bepaald. Bijvoorbeeld: het praktische koelende vermogen van een hogedrukstrang met een waterdebiet van 125 liter per minuut (2,08 liter per seconde) bij een efficiëntiefactor van 40 % is ongeveer: $3,0 \text{ MJ} \times 0,4 \times 2,08 = 2,5 \text{ MW}$.

Op basis van bovenstaande berekening kan het praktisch koelende vermogen van een straalpijp worden berekend. Niet elke straalpijp levert dezelfde hoeveelheid water en dus hetzelfde koelend vermogen. Dit is mede afhankelijk van het type straalpijp (de doorlaat van de slang en werkdruk), drukverliezen en de persdruk van de pomp. Daarom is voor de basisprincipes van brandbestrijding (paragraaf 6.4) als vuistregel bewust gekozen voor **2,5 MW** voor een hogedrukstraal en **10 MW** voor een lagedrukstraal. Deze waarden zullen bij brandbestrijding met de meeste straalpijpen gehaald worden. Wordt de blustechniek perfect uitgevoerd (zodat bijna al het water verdampt) en is het debiet van bijvoorbeeld een hogedrukstraalpijp hoger dan 125 l/min, dan kan het koelend vermogen hoger zijn dan dat deze vuistregel aangeeft. Zie voor het praktisch koelende vermogen van straalpijpen tabel 3.6 hieronder.

Tabel 3.6 Praktisch koelend vermogen van straalpijpen

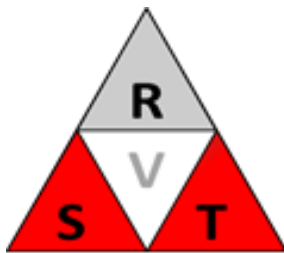
Hoge druk			Lage druk		
debiet	l/sec	MW	debiet	l/sec	MW
100	1,7	2,0	400	6,6	8,99
125	2,1	2,5	450	7,5	10,0
250	4,2	5,0	500	8,3	11,1

3.9 Brandfenomenen

In de vorige paragrafen is het brandverloop van een compartimentsbrand beschreven volgens verschillende vaste fasen die veelal geleidelijk verlopen. In deze paragraaf worden bijzondere gebeurtenissen beschreven die juist voor een versnelling van het brandverloop zorgen. In de onderstaande paragrafen wordt aandacht besteed aan de 'hoofdphenomenen' flashover, rookgasexplosie en backdraft, en aan aanverwante 'subphenomenen'. Hierbij richten we ons niet alleen op snelle branduitbreiding in de brandruimte, maar ook op snelle branduitbreiding in aangrenzende ruimtes. We behandelen de brandfenomenen, omdat ze gevaarlijk kunnen zijn voor de inzetploeg. Hierbij kan worden opgemerkt dat deze fenomenen zelden optreden (tijdens de inzetfase), dat ze moeilijk te voorspellen en (op basis van signalen) te herkennen zijn. Daarnaast lijken de brandfenomenen op elkaar. Om deze redenen worden ze behandeld vanuit de ontbrekende zijde van de branddriehoek voorafgaand aan het optreden van het fenomeen.

3.9.1 Flashover

Zoals beschreven in paragraaf 3.5 vormt de flashover de overgang van de ontwikkelfase naar de volledig ontwikkelde fase. Een lokale brand in een object groeit binnen korte tijd uit tot een volledig ontwikkelde brand in de gehele ruimte. Deze overgang komt in de praktijk regelmatig voor en er zitten elementen in die de brandweerfunctionaris moet (her)kennen om tijdens een binneninzet uit de problemen te blijven.



Figuur 3.9 Branddriehoek met brandstof als ontbrekende zijde

Als de brand zich opbouwt in een ruimte is er sprake van een zich ontwikkelend vlamfront. Dit gaat gepaard met de opbouw van een steeds turbulenter wordende (grijsfluwelen) rooklaag, veroorzaakt doordat de initiële brandhaard groeit en de vlammen langs het plafond de ruimte in gaan. Bij het groeien van het vlamfront nemen ook de onverbrande gassen (pyrolysegassen) in de rook toe, zowel door pyrolyse van de brandhaard als door pyrolyse van materialen in de omgeving. Dit is niet waarneembaar anders dan door een toenemende, turbulente rooklaag. Door de groei van het vlamfront heeft de brand meer zuurstof nodig om zich te onderhouden; hij zuigt hierdoor zuurstof aan en neemt deze ook mee met de vlammen boven in de rooklaag. Dit kan leiden tot een rollover in de rooklaag, zie het kader hieronder.

Rollover

Voorafgaand aan een flashover wordt vaak een rollover waargenomen. Om tot een rollover te komen, moet de brandhaard rookgassen afgeven en moet er boven deze rookgassen vuur aanwezig zijn dat direct van de vuurhaard komt. De vuurhaard warmt de rookgassen op, waardoor die dichtbij de vuurhaard tot ontbranding komen. Hierdoor ontstaan er vlammentongen (dansende vlammen) in de rooklaag. Hoe meer brandbare gassen er in de rooklaag aanwezig zijn, hoe sneller deze vlammen zich door de rooklaag verspreiden. We zien dan de vlammen als het ware door de rooklaag rollen; vandaar de term 'rollover'. Voorwaarde voor het ontstaan van een rollover is dat er voldoende 'trek'

van zuurstof naar de brandhaard is. Door de opletende temperatuur en het toenemende vlamfront zal de rooklaag door de rollover uitzetten en naar beneden komen. Het grotere vlamfront vraagt steeds meer zuurstof en de omgeving zal dusdanig opwarmen dat een verblijf daarin onmogelijk is. Een goede verkenning moet voorkomen dat de brandweer in een dergelijke situatie terechtkomt. Een rollover of andere ontbranding van de rooklaag zijn voortekenen van een flashover.

Onder invloed van opwarming door de rooklaag en het vlamfront zullen andere brandbare voorwerpen in de brandruimte gaan pyrolyseren. Er ontstaat een brandbaar gas-luchtmengsel in de brandruimte. Als de temperatuur in de rooklaag hoog genoeg is, zullen alle brandbare voorwerpen in de ruimte ontsteken, zie ook paragraaf 3.5. Vlak voor de flashover is nog onvoldoende brandstof aanwezig (door een tekort aan temperatuur om pyrolysegassen te produceren en te ontsteken). *Let op:* het mengsel dicht bij het oppervlak van de voorwerpen ligt binnen de brandbaarheidsgrenzen (paragraaf 2.2.3), dat in de rest van de ruimte echter niet.

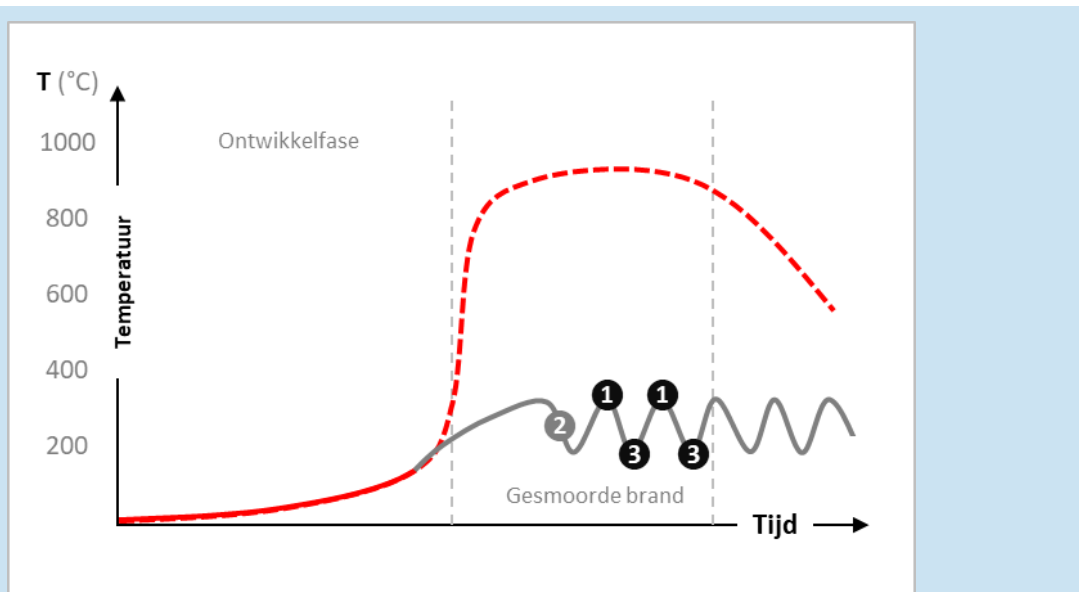
Voorwaarde voor het bereiken van een flashover is de aanwezigheid van voldoende zuurstof in de ontwikkelfase. Als er niet voldoende zuurstof is, wordt een brand al in een vroeg stadium gesmoord. Indien echter in dit stadium door bijvoorbeeld het openen van een deur alsnog zuurstof toe kan treden tot de brandhaard, kan er alsnog een flashover plaatsvinden. Dit fenomeen wordt ook wel een *vertraagde* of *ventilatiegeïnduceerde flashover* genoemd, zie het kader hieronder.

Herkennen van een vertraagde of ventilatiegeïnduceerde flashover

Bij een gesmoorde brand in de ontwikkelfase is er een zuurstoftekort, bijvoorbeeld wanneer er een kleine opening in de gevel aanwezig is; de opening is te klein om de brand door te laten groeien naar een flashover. Deze situatie is te herkennen aan een ademende (pulserende) brand met veel donkere rook. Dit is in figuur 3.10 tot en met 3.11 weergegeven en wordt hieronder met de nummers 1 tot en met 3 nader toegelicht.



Figuur 3.10 Pulserende rook (Bron: Enclosure Fires en FPS)

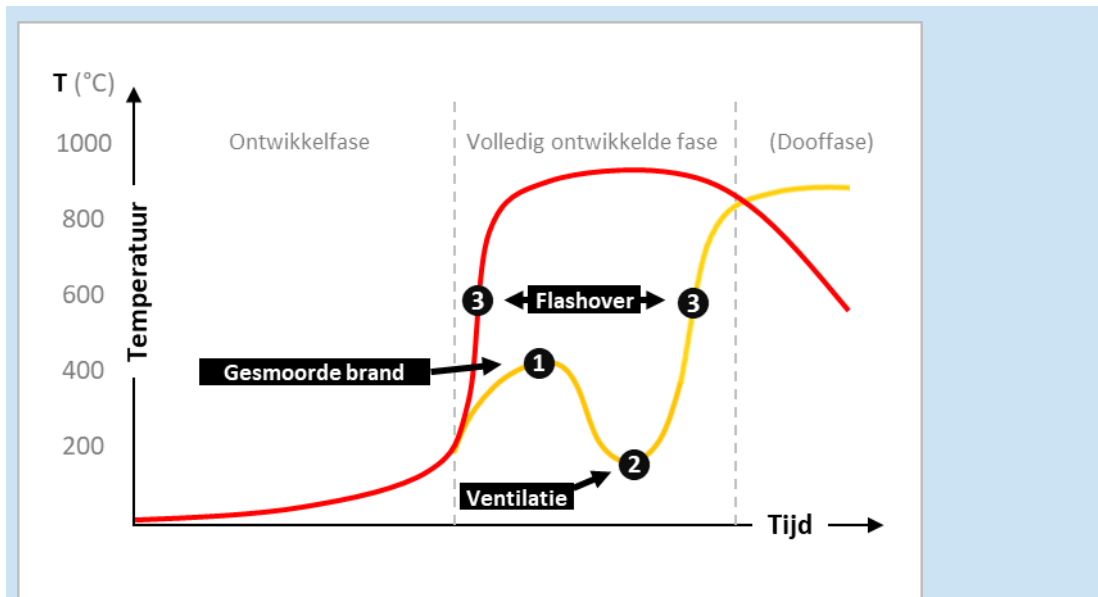


Figuur 3.11 Het verloop van een pulserende brand vergeleken met een standaard brandverloop (Bron: FPS)

In figuur 3.11 is met de grijze lijn (nummer 2) een pulserende (gesmoorde) brand weergegeven. Door zuurstoftekort wordt de ontwikkeling van de brand beperkt. In eerste instantie zal er door de ontwikkeling van de brand een overdruk in de brandruimte ontstaan. Door deze overdruk wordt rook door de kleine opening gedrukt en zal de temperatuur in de brandruimte toenemen. Dit is in figuur 3.10 en 3.11 weergegeven met nummer 1. Door het uitstromen van de rook door de opening kan er geen verse lucht de brandruimte instromen. Hierdoor wordt er ook geen zuurstof toegevoerd. De brand wordt gesmoord en de temperatuur in brandruimte neemt af. Door deze afname van de temperatuur ontstaat er een onderdruk in de brandruimte. Door de onderdruk wordt verse lucht de brandruimte in gezogen. Dit is in figuur 3.10 en 3.11 weergegeven met nummer 3. In de verse lucht zit zuurstof, waardoor de brand weer in omvang kan toenemen; dit leidt weer tot een overdruk in de brandruimte. Het beschreven proces van de pulserende brand herhaalt zich.

In figuur 3.12 op de volgende pagina is met de gele lijn het brandverloop van een gesmoorde brand weergegeven die door de toevoer van zuurstof alsnog overgaat tot een flashover. Er is sprake van een vertraagde flashover. Gelijk aan de situatie uit figuur 3.10 en 3.11 is er sprake van een gesmoorde brand die door zuurstoftekort beperkt wordt in de ontwikkeling. De brand is weliswaar gesmoord, maar er is nog steeds een vlamfront aanwezig. Dit betekent dat de temperatuur in eerste instantie stijgt, maar na verloop van tijd niet meer zal toenemen en zal dalen. Dit is weergegeven met nummer 1 en 2 in figuur 3.12. Echter, bij een grote toestroom van zuurstof (ventilatie), bijvoorbeeld doordat er een nieuwe opening in de gevel ontstaat, zal de brand in omvang toenemen. Dit leidt tot een toename van de temperatuur en kan vervolgens leiden tot een vertraagde flashover, weergegeven met nummer 3 in figuur 3.12. Voorwaarde is wel dat de zuurstof bij de initiële brand moet kunnen komen, zodat deze zich krachtig kan ontwikkelen.

De initiële brand kan er op zijn beurt voor zorgen dat – bij voldoende temperatuur – de rookgassen in de brandruimte tot ontbranding kunnen komen. Deze ontbranding gaat gepaard met een golfbeweging van brandende rookgassen door de ruimte naar de richting van waaruit de zuurstof komt. Mede om te voorkomen dat de brandweer in een dergelijke situatie terechtkomt, zal goed gekeken moeten worden of de brand een krachtige en lange 'inademing' laat zien.

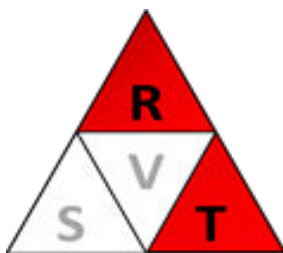


Figuur 3.12 Het moment van flashover bij een standaard brandverloop en een gesmoorde brand met vertraagde flashover (Bron: FPS)

Een flashover is een dodelijk fenomeen. Bij signalen van een flashover (rollover en ademende brand) dient de brandweer de ruimte niet te betreden of direct te verlaten.

3.9.2 Backdraft

Bij een backdraft zijn er voldoende brandbare gassen in de brandruimte aanwezig en is de temperatuur hoog genoeg; er is echter onvoldoende zuurstof aanwezig voor de verbranding. De concentratie brandbare gassen ligt boven de bovenste ontbrandingsgrens (UFL, zie paragraaf 2.2.3.) Een voorwaarde is ook dat de ruimte afgesloten moet zijn en de brand bij hoge temperatuur zuurstofgecontroleerd is geraakt. Deze combinatie van omstandigheden is gelukkig zeldzaam. Een brand heeft immers zuurstof nodig om in vermogen en dus temperatuur te kunnen toenemen.



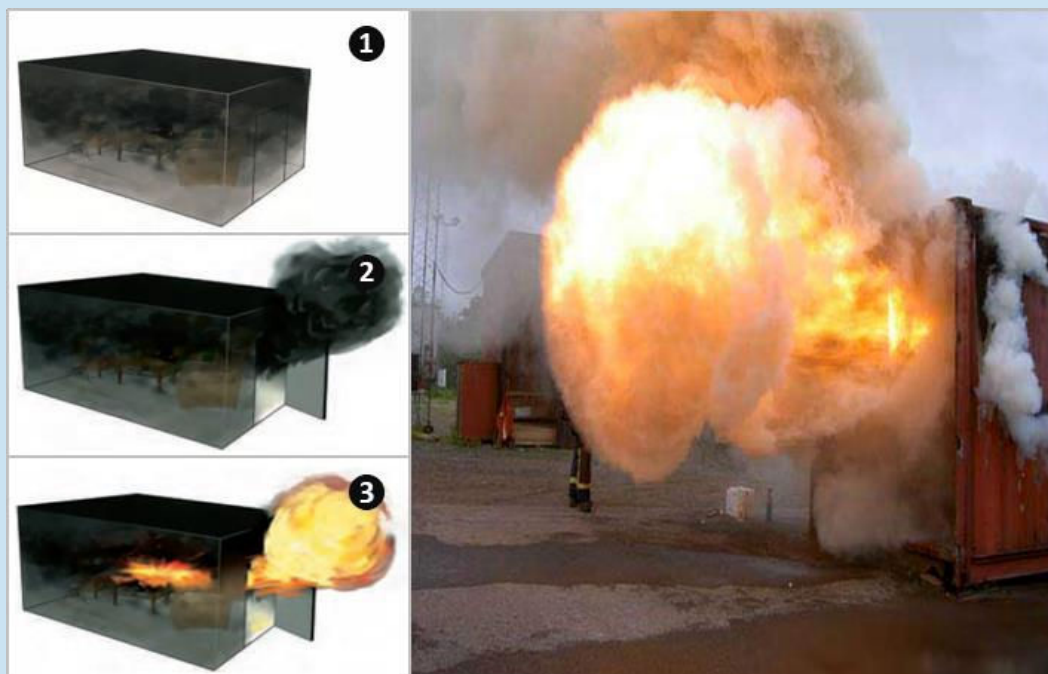
Figuur 3.13 Branddriehoek met zuurstof als ontbrekende zijde

Een dergelijke situatie kan echter ontstaan als openingen zoals een deur of een raam aan het eind van de ontwikkelfase een bepaalde tijd worden gesloten, en vervolgens weer worden geopend. Er zal dan met de verse lucht zuurstof worden toegevoerd, die zich onder in de ruimte ophoopt. De koude verse lucht is namelijk zwaarder dan de hete gassen in de ruimte. Tussen het zuurstofarme gebied (brandbare gassen) en het zuurstofrijke gebied (verse lucht) ontstaat door opmenging een brandbaar mengsel: de mengverhouding van het mengsel ligt binnen de brandbaarheidsgrenzen. Zodra het mengsel de nog aanwezige brandhaard bereikt, zal het ontsteken.

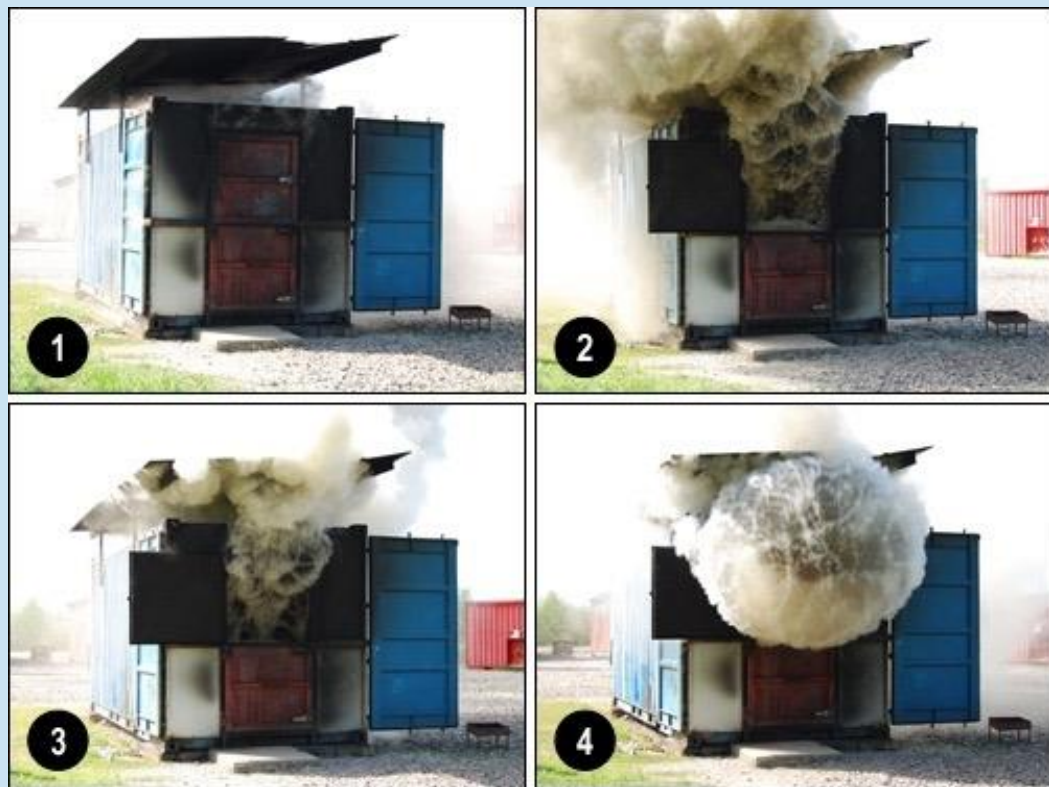
De backdraft in beeld

Een backdraft wordt wel eens vergeleken met een vertraagde of ventilatiegeïnduceerde flashover, maar is veel krachtiger in rookuitstroom en sneller in verbranding. Waar er bij een ventilatiegeïnduceerde flashover met name sprake is van een krachtige inademing van de brand, worden we bij een backdraft geconfronteerd met rook die met grote kracht naar *buiten* wordt geperst door de hoge druk in de ruimte. Deze hoge druk wordt veroorzaakt door de hoge temperatuur in de brandruimte. De rook heeft de vorm van een soort 'bloemkoolwolk'. Die vorm komt door de hoge concentratie van rookgassen, boven de bovenste explosiegrens. Door de opmenging met zuurstof die de backdraft inleidt, komt deze concentratie rookgassen echter binnen de brandbaarheids-grenzen.

In figuur 3.14 hieronder en 3.15 en 3.16 op de volgende pagina zijn verschillende afbeeldingen en foto's van een backdraft weergegeven, evenals een grafiek van het brandverloop met daarin het moment waarop een backdraft optreedt.



Figuur 3.14 Een schematische weergave van een backdraft (links) en een foto van het ontbranden van de rookgassen (rechts) (Bron: Enclosure Fires en MSB.SE)

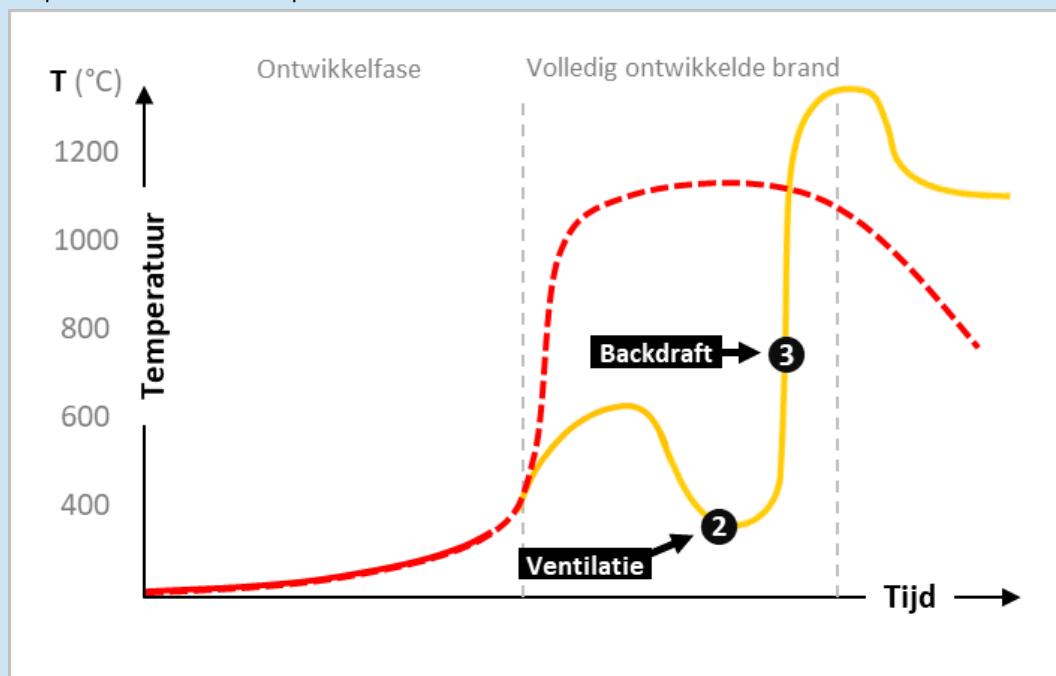


Figuur 3.15 De verschillende stappen die een zuurstofgecontroleerde brand doorloopt tot aan een backdraft (Bron: Ed Hartin)

Stap 1: Het compartiment is gesloten.

Stap 2 en 3: De deur wordt geopend en er volgt een dubbelzijdige stroming.

Stap 4: De backdraft vindt plaats.



Figuur 3.16 Het brandverloop met daarin het moment waarop een backdraft optreedt (Bron: FPS)

Hoe langer het duurt voordat het brandbare mengsel de brandruimte bereikt, hoe groter het volume aan voorgemengd brandbaar mengsel en hoe groter de kracht van de ontbranding. Er kan sprake zijn van een explosieve verbranding met een hoge druk en snelheid. Door de explosieve verbranding worden ook de nog niet opgemengde brandbare gassen en de verse lucht verder opgemengd. Hierdoor zullen ook deze verbranden. Omdat er geen sprake is van een voorgemengd mengsel, verloopt de verbranding relatief minder snel. De backdraft wordt vaak omschreven als een korte explosieve verbranding (van enkele seconden). De explosieve kracht kan groot zijn, waardoor de gassen snel uitzetten. Hierdoor kan een vuurbal ontstaan die met hoge snelheid uit de opening komt. Een backdraft kan hierdoor ook buiten het gebouw slachtoffers en veel schade veroorzaken, zoals ramen en deuren die elders uit hun sponningen barsten.

Ontbranding, explosie, deflagratie en detonatie

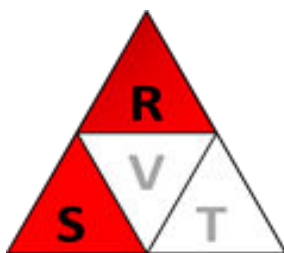
De termen explosie en ontbranding worden nogal eens door elkaar gebruikt. Dit hebben we ook gezien in paragraaf 2.2.3 over brandbaarheidsgrenzen. We spreken van een explosieve verbranding (*explosie*) als er door de uitzetting van gassen een drukverhoging of drukgolf ontstaat. Een explosieve verbranding is alleen mogelijk bij een voorgemengd mengsel dat zich binnen de brandbaarheidsgrenzen bevindt. De druktoename is afhankelijk van de verhouding van het mengsel, het volume van het mengsel ten opzichte van het volume van de ruimte en de aanwezigheid van openingen in de ruimte. Ook de vorm van de ruimte kan invloed hebben op de lokaal optredende drukverschillen. Een explosie wordt een *deflagratie* genoemd zolang de voortplantingssnelheid van de verbranding lager is dan de geluidssnelheid. Bij een voortplantingssnelheid boven de geluidssnelheid wordt een explosie een *detonatie* genoemd. De voortplanting kan zich dan versnellen door de energie die ontstaat in de drukgolf.

In grotere brandruimtes zal een deel van de brandgassen al verbranden, nog voordat het gas-luchtmengsel als geheel de mengverhouding heeft bereikt die nodig is voor een backdraft. Ook om die reden is de kans op een backdraft gelukkig niet heel groot.

Het belangrijkste verschil tussen een backdraft en een flashover is dat er vlak voor een backdraft onvoldoende zuurstof aanwezig is, terwijl vlak voor een flashover nog onvoldoende brandstof aanwezig is (door een tekort aan temperatuur om pyrolysegassen te produceren). Tijdens een backdraft ontbrandt een voorgemengd mengsel, waarna de rest van de brandbare gassen wordt opgemengd en verbrandt (vuurbal), terwijl het bij een flashover gaat om een grotendeels niet voorgemengd mengsel dat verbrandt. Daardoor is de kracht van de verbranding bij een backdraft groter.

3.9.3 Rookgasontbranding of rookgasexplosie

Een rookgasontbranding of rookgasexplosie treedt op als er in een ruimte een voldoende brandbaar mengsel aanwezig is, maar de temperatuur te laag is om het mengsel te ontsteken. Dit kan komen door het ontbreken van een ontstekingsbron of bij een temperatuur die te laag is voor zelfontbranding (zie paragraaf 2.2.2).



Figuur 3.17 Branddriehoek met temperatuur als ontbrekende zijde

Het kan dus ook om een koud voorgemengd mengsel van gassen gaan die zich binnen de brandbaarheidsgrenzen bevinden. Indien een ontstekingsbron wordt toegevoegd, kan een explosieve verbranding ontstaan in de ruimte waarin het voorgemengde mengsel aanwezig is. De ontbrekende zijde van de branddriehoek is bij een rookgasontbranding of rookgas-explosie de temperatuur (ontstekingsenergie). In de brandruimte is een rookgasontbranding soms moeilijk te onderscheiden van andere fenomenen. Bij de verbranding van een brandbaar mengsel zijn immers alle drie de zijden van de branddriehoek van toepassing. Of er dan voorafgaand aan de verbranding sprake is van een gebrek aan zuurstof, ontstekingsenergie of brandstof is soms moeilijk vast te stellen. Zo kan een snelle branduitbreiding in de brandruimte op het grensvlak tussen een backdraft en rookgasexplosie liggen als er tijdens het brandverloop plotseling zuurstof toestroomt in de brandruimte, de temperatuur zich net onder de zelfontbrandingstemperatuur bevindt en het oplaaieren van de brandhaard tot een ontbranding leidt. Een rollover is bijvoorbeeld een rookgasontbranding in de brandruimte.

De termen rookgasontbranding en rookgasexplosie worden daarom vooral gebruikt voor een verbranding in ruimtes grenzend aan of in verbinding met de brandruimte.

Fire gas ignition, smoke explosion en flash fire

Internationaal worden veel verschillende termen gebruikt voor rookgasontbrandingen en rookgas-explosies. Ze hebben met elkaar gemeen dat ze allemaal verwijzen naar het ontbranden van een aanwezige rooklaag, veelal in een ruimte grenzend aan de brandhaard, waar zich in bepaalde situaties een overdruk kan ontwikkelen.

Door de uitstroom van onverbrande gassen uit de brandruimte kunnen deze gassen zich verspreiden naar naastgelegen ruimtes. Ook op de route naar de naastgelegen ruimte kunnen pyrolysegassen ontstaan, doordat de hete rook materialen laat pyrolyseren. Dit kan bijvoorbeeld in lichte dakconstructies met brandbare isolatie en brandbare dakbedekking optreden. De pyrolysegassen stromen naar een naastgelegen ruimte en kunnen zich daar ophopen en opmengen met de aanwezige zuurstof. Hierdoor kan een brandbaar mengsel met een relatief groot volume ontstaan in een ruimte grenzend aan de brandruimte. Door toevoeging van ontstekingsenergie kan een rookgasontbranding of rookgasexplosie plaatsvinden. De ontstekingsenergie kan bijvoorbeeld afkomstig zijn van een vonk of door vlammen van de brandhaard die doorslaan door de scheiding tussen de brandruimte en de aangrenzende ruimte.

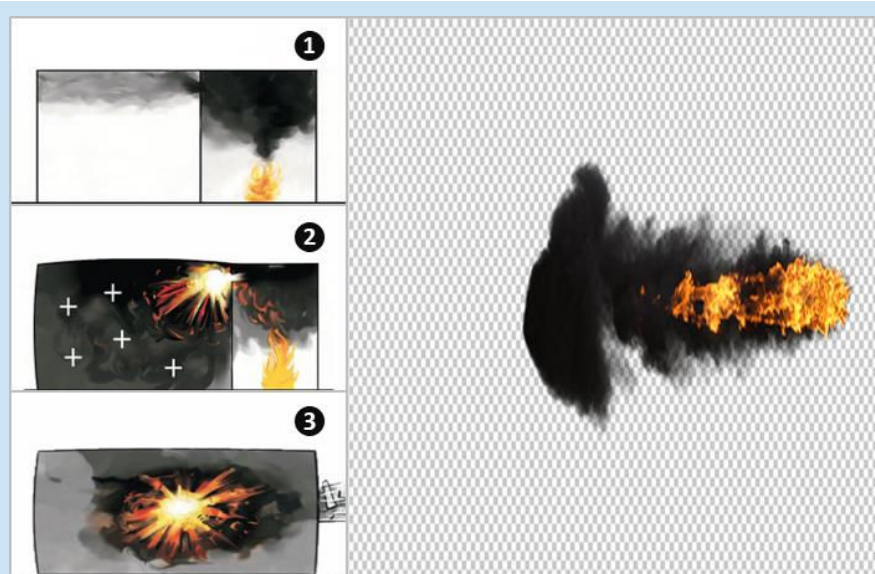
Weergave van een rookgasontbranding

In figuren 3.18. en 3.19 is een rookgasontbranding schematisch weergegeven.

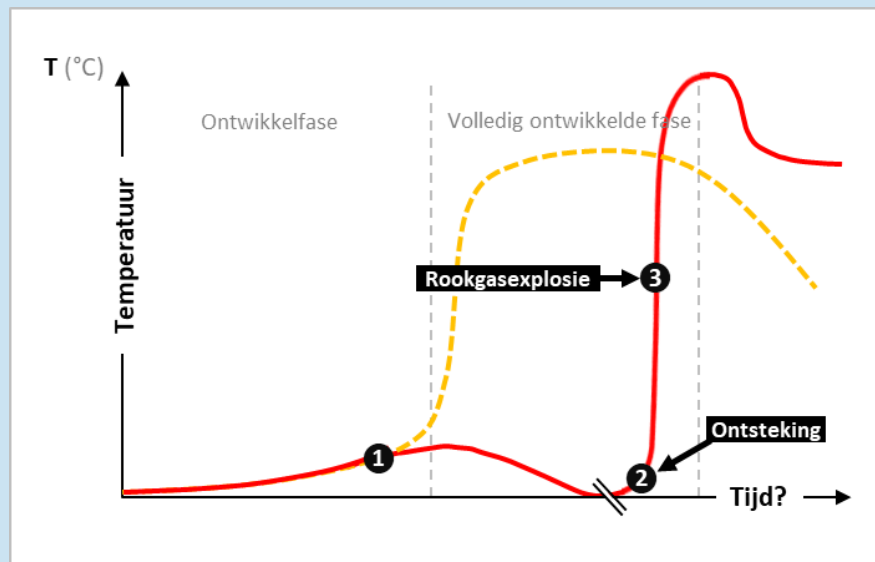
Stap 1: Onverbrande (pyrolyse)gassen hopen zich op in een naastgelegen ruimte. Door opmenging met de aanwezige zuurstof ontstaat een brandbaar mengsel.

Stap 2: De brand breidt zich uit door de aansluiting van de wand en de dakconstructie. Er is nu een ontstekingsbron aanwezig in de naastgelegen ruimte.

Stap 3: Er ontstaat een rookgasontbranding of rookgasexplosie.



Figuur 3.18 Schematische weergave van een rookgasontbranding (Bron: Enclosure fires en FPS)



Figuur 3.19 Grafiek van het verloop van een rookgasontbranding (Bron: FPS)

In de brandruimte is een rookgasontbranding minder waarschijnlijk, omdat het brandbare mengsel bijna direct na ontstaan verbrandt. Een ruimte die niet direct bij de brand betrokken is, kan door de ophoping van het brandbare mengsel gevaarlijk zijn. Rookgasontbrandingen zijn relatief zeldzaam, maar als ze optreden, komen ze meestal voor bij branden in industriegebouwen.

De brand in De Punt

In De Punt (Drenthe) trad op 9 mei 2008 een rookgasontbranding op in een loods waar aan boten gewerkt werd. Achter in de loods was een aantal kleinere ruimtes; in een daarvan was brand uitgebroken. De brand ontwikkelde zich daar naar een flashover, en via een openstaande deur lekte heel veel rook de loods in. Mede omdat de loods met isolatiematerialen was bekleed, verzamelde zich onder het licht hellende zadeldak een enorme hoeveelheid rookgassen. De rook mengde op met de aanwezige lucht, waardoor een brandbaar mengsel gevormd werd.

De ontwikkeling van de brand zorgde ervoor dat vlammen uit de brandruimte de rookgassen in de loods bereikten. De gevolgen van de rookgastontbranding waren enorm: in een heel korte tijd brandde de hele rooklaag en werd de brand in de loods vrijwel onmiddellijk volledig ontwikkeld. Drie van de vier brandweermensen die binnen waren, kwamen om het leven.

3.9.4 Fenomenen en brandbestrijding

Hoofdstuk 6 gaat uitgebreid in op de relatie tussen de verkenning bij brand en de inzetactiek die nodig en mogelijk is om veilig repressief op te treden bij gebouwbranden. De in deze paragraaf 3.9 behandelde brandfenomenen hebben naast risico's zoals instorting en desoriëntatie de nodige slachtoffers onder brandweerpersoneel veroorzaakt. Het zijn die incidenten en het onderzoek daarnaar die uiteindelijk hebben geleid tot de basisprincipes van brandbestrijding, met als belangrijk resultaat dat de offensieve binneninzet niet langer de preferente inzetactiek is. Volgens de basisprincipes is het veiliger om de offensieve buiteninzet als preferente inzetactiek te hanteren. Die voorkeur maakt de kans om slachtoffer te worden van een risicovol brandfenomeen een stuk kleiner.

4 Gebouwfysica

In dit hoofdstuk worden de definities en het brandverloop in de context van een ruimte of gebouw gebracht. Het brandverloop wordt immers beïnvloed door de omvang en omhulling (materialisering en openingen) van de ruimte. Andersom wordt de ruimte of het gebouw ook beïnvloed door de brand. Dit vertaalt zich in onder andere in warmtetransport naar, langs en in de scheidingsconstructies van de ruimte of het gebouw.

Bij gebouwfysica gaat over de opwarming en het gedrag van (bouw)materialen en gebouwconstructies bij brand. De materiaaleigenschappen bij brand zijn hierbij van doorslaggevend belang en bepalen mede het risico op branduitbreiding, rookverspreiding en instorting.

Om de gebouwfysica bij brand goed te begrijpen, wordt eerst het principe van opwarming bij brand uitgelegd in paragraaf 4.1. In paragraaf 4.2 wordt aandacht besteed aan materiaalgedrag en in paragraaf 4.3 aan constructiegedrag.

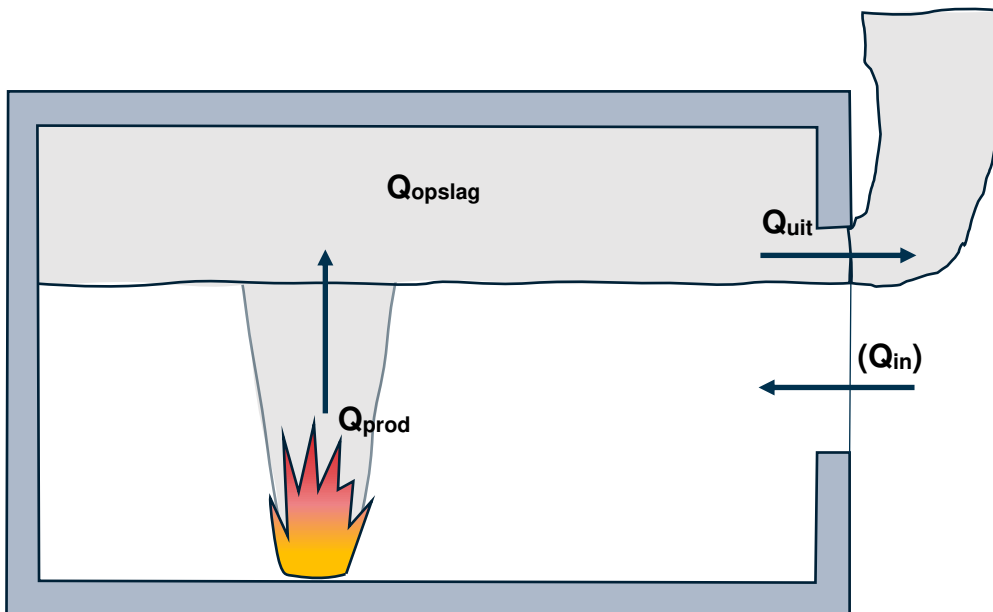
4.1 Opwarming bij brand

4.1.1 Energiebalans

Bij een brand in een ruimte treden er allerlei energiestromen (= warmtestromen) op. Allereerst wordt door de verbranding energie (warmte) geproduceerd, want verbranding is een exotherme reactie (zie paragraaf 2.1.2). De energie die wordt geproduceerd, wordt gedeeltelijk opgeslagen in het brandende voorwerp. Het brandende voorwerp warmt verder op. Een ander deel van de geproduceerde energie wordt afgestaan aan de omgeving. Dit zorgt voor een opwarming van de lucht en van andere voorwerpen in de ruimte en voor opwarming van constructies die de ruimte begrenzen. Hierdoor ontstaat een energiebalans bij brand. Deze energiebalans kan vereenvoudigd worden beschreven als:

$$\text{Geproduceerde energie door de brand} \quad (+ \text{Inkomende energie}) \quad = \quad \text{Uitgaande energie} + \text{Opgeslagen energie}$$

De inkomende energie wordt bij een brand in een ruimte veelal genegeerd, omdat de brand in de ruimte de bepalende energiebron is. De verschillende energiestromen zijn weergegeven in figuur 4.1 op de volgende pagina.



Figuur 4.1 Ontwikkeling van een brand in een ruimte (energiebalans)

Energiebalans

In figuur 4.1 is een vereenvoudigde energiebalans weergegeven van de situatie bij een lokale brand in een brandruimte. Deze energiebalans kan in formulevorm als volgt worden weergegeven:

$$\dot{Q}_{prod} + \dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{uit} + \dot{Q}_{opslag}$$

\dot{Q}_{prod} = geproduceerde energiestroom door brand in MJ/s,
 \dot{Q}_{in} = inkomende energiestroom (van buitenaf) in MJ/s,
 \dot{Q}_{uit} = uitgaande energiestroom via afgevoerde rook naar buiten in MJ/s,
 \dot{Q}_{opslag} = de opgeslagen (gebufferde) energiestroom in de rooklaag in MJ/s.

De aanduiding met een punt boven de letter Q geeft aan dat het om een warmtestroom (energiestroom) gaat. Zoals vermeld, is dit een *vereenvoudigde* energiebalans. Naast de weergegeven warmtestromen treedt er bijvoorbeeld ook warmtetransport op door straling vanaf de brandhaard en de hete rooklaag richting de omgeving en de begrenzingen (scheidingsconstructies). Dit warmtetransport heeft tot gevolg dat constructies opwarmen, zie paragraaf 4.1.2 en 4.1.3.

Massabalans

Op dezelfde wijze als de energiebalans uit figuur 4.1 kan ook een massabalans opgesteld worden. Deze massabalans wordt in formulevorm als volgt weergegeven:

$$\dot{m}_{prod} + \dot{m}_{in} = \dot{m}_{uit} + \dot{m}_{opslag}$$

\dot{m}_{prod} = geproduceerde massastroom door brand in kg/s,
 \dot{m}_{in} = inkomende massastroom (verse lucht van buitenaf) in kg/s,
 \dot{m}_{uit} = uitgaande massastroom via afgevoerde rook naar buiten, in kg/s
 \dot{m}_{opslag} = de opgeslagen (gebufferde)massastroom in de rooklaag in kg/s.

Gelijk aan de energiebalans gaat het hier om stromen, in dit geval massastroming in kilogram per seconde (kg/s). Deze massastromen moeten niet verward worden met volumestromen (m³/s). Zoals in paragraaf 1.4.3 is weergegeven, neemt de dichtheid van lucht af naarmate de temperatuur stijgt. Dit betekent dat bij een gelijk massastroom de volumestroom toeneemt.

Voorbeeld

Stel: bij een lokale brand is de geproduceerde massastroom van de brand gelijk aan de gebufferde massastroom in de hete rooklaag ($\dot{m}_{prod} = \dot{m}_{opslag}$). Dit betekent in de massabalans dat de uitgaande massastroom ook gelijk moet zijn aan de inkomende massastroom ($\dot{m}_{uit} = \dot{m}_{in}$). Stel dat de inkomende en uitgaande massastroom ongeveer 2,4 kg/s bedragen. Bij een temperatuur van 20 graden Celsius bedraagt de inkomende volumestroom verse lucht dan ongeveer:

$$\dot{V}_{in} = \frac{\dot{m}_{in}}{\rho} \text{ en } \rho = \frac{353}{T} = \frac{353}{293} = 1,2 \frac{kg}{m^3}, \quad \dot{V}_{in} = \frac{2,4}{1,2} = 2,0 \text{ m}^3/s$$

Bij een temperatuur van 320 graden Celsius (593 Kelvin) bedraagt de uitgaande volumestroom dan ongeveer:

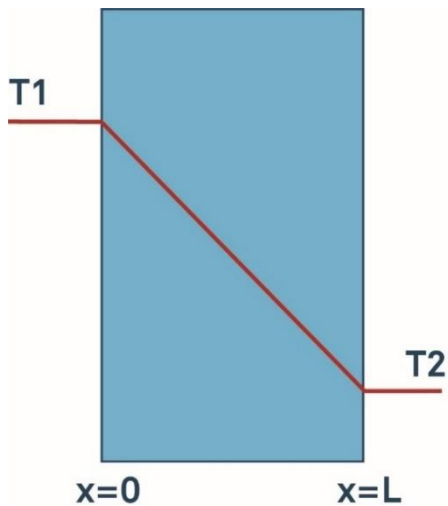
$$\dot{V}_{uit} = \frac{\dot{m}_{uit}}{\rho} \text{ en } \rho = \frac{353}{T} = \frac{353}{593} = 0,60 \frac{kg}{m^3},$$
$$\dot{V}_{uit} = \frac{2,4}{0,60} = 4,0 \text{ m}^3/s$$

Dit voorbeeld laat zien dat de volumestroom ongeveer twee keer zo groot is bij een temperatuurverschil van 300 graden Celsius tussen de inkomende en uitgaande lucht of rook. Bij een gelijkblijvende luchtsnelheid door openingen betekent dit ook dat een uitstroomopening ongeveer twee keer zo groot moet zijn als de instroomopening om dezelfde hoeveelheid lucht of rook af te kunnen voeren.

4.1.2 Warmtetransport door constructies

Warmte wordt afgegeven aan de constructies via straling en stroming. Straling is afkomstig van de brandhaard, de rookpluim en rooklaag. Via stroming door de rookpluim en rooklaag wordt warmte afgegeven aan de constructies die de ruimte begrenzen. Door deze warmteafgifte (straling en stroming) kunnen de constructies opwarmen. Als een constructie aan één zijde wordt verwarmd, zal ze door geleiding in temperatuur oplopen. Zie paragraaf 1.6 voor een toelichting op de warmtestroommechanismen (geleiding, stroming en straling).

In vereenvoudigde weergaven zoals figuur 4.2 wordt veelal uitgegaan van een vaste waarde voor de temperatuur van de rooklaag aan de warme zijde (T_1) en een vaste waarde voor de temperatuur aan de koude zijde (T_2). Hierbij wordt uitgegaan van een stationair warmtetransport door een constructie (het warmtetransport verandert niet). De opwarming vindt echter veelal niet overal in gelijke mate plaats, waardoor de temperatuur van de constructie niet overal gelijk is. Daarnaast is de opwarming afhankelijk van de warmteoverdracht. Bij stroming van hete rook langs een constructie bijvoorbeeld, is de opwarming van de zijde van de constructie grenzend aan de hete rook afhankelijk van de warmteoverdrachtscoëfficiënt, zie paragraaf 1.6.2. De snelheid waarmee de warmte zich door de constructie verplaatst, is daarnaast afhankelijk van een aantal materiaaleigenschappen: de soortelijke warmte (zie paragraaf 1.5.5), de dichtheid (paragraaf 1.4.3) en de warmtegeleidingscoëfficiënt (paragraaf 1.6.1). Er is sprake van niet-stationair warmtetransport.



Figuur 4.2 Vereenvoudigde weergave warmtetransport (stroming) door constructie

De opwarming in het materiaal verloopt dus geleidelijk. Een hoge soortelijke warmte, een hoge dichtheid en een hoge geleidbaarheid zorgen voor een langzame opwarming en dus een langzame toename van de temperatuur in het materiaal. Dit wordt ook wel de thermische traagheid genoemd.

Thermische traagheid

De thermische traagheid geeft de snelheid aan waarmee een materiaal opwarmt of afkoelt. Hoe hoger de thermische traagheid, hoe langzamer een materiaal opwarmt. Dit betekent veelal ook dat in een dergelijk materiaal relatief veel warmte kan worden opgeslagen (warmtebuffering). Thermische traagheid wordt weergegeven met de kleine letter 'b' en is gelijk aan de vierkantswortel van het product van de warmtegeleidingscoëfficiënt, dichtheid en soortelijke warmte.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}$$

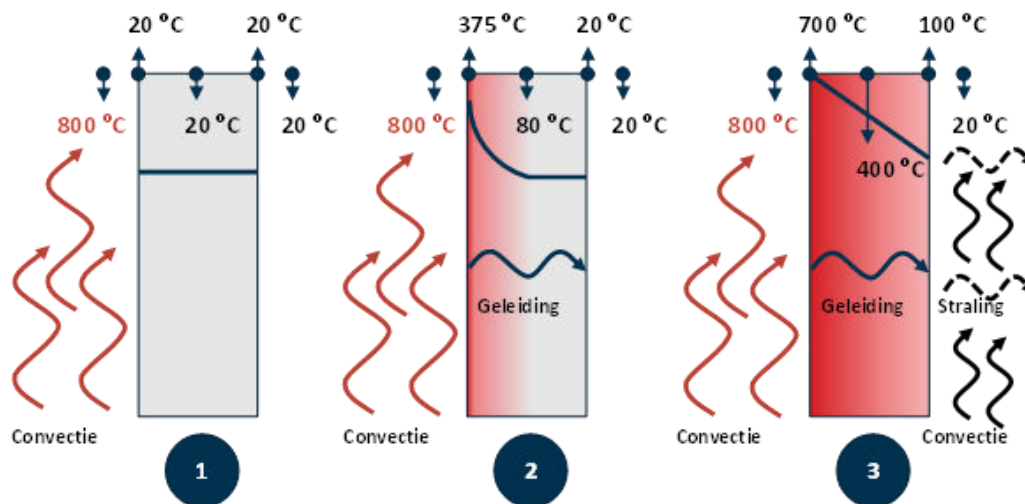
$\lambda = \text{warmtegeleidingscoëfficiënt in } \frac{W}{(m \cdot K)}$,

$\rho = \text{dichtheid } \frac{kg}{m^3} \text{ en } c = \text{soortelijke warmte in } \frac{J}{kg \cdot K}$

Het product van de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ), dichtheid (ρ) en soortelijke warmte (c) wordt ook wel de kpc-waarde genoemd. Met de 'k' wordt de warmtegeleidingscoëfficiënt (λ) bedoeld. De kpc-waarde wordt uitgedrukt in Watt kwadraat seconde per m tot de 4^e macht graad kelvin kwadraat (W^2s/m^4K^2).

In tabel 4.2 in paragraaf 4.1.4 is voor een aantal materialen de kpc-waarde weergegeven. De materiaaleigenschappen voor de warmtegeleidingscoëfficiënt, dichtheid en soortelijke warmte komen overeen met die uit tabel 1.5 in paragraaf 1.7.

In het tweede blauwe kader in paragraaf 1.6.1 is een voorbeeldberekening gegeven van de warmtestroomdichtheid door een wand. In dit voorbeeld is er sprake van een lineaire afname van de temperatuur in de wand vanaf de zijde van opwarming tot de koude zijde, zie ook figuur 4.2. Deze lineaire afname treedt echter niet direct op bij opwarming bij brand. Afhankelijk van de thermische traagheid zal er enige tijd sprake zijn van 'het opvangen van energie' (buffering van energie) in het materiaal van de wand. Hierdoor zal het materiaal van de wand geleidelijk opwarmen. In figuur 4.3 is dit schematisch weergegeven.



Figuur 4.3 Warmtestroommechanismen en temperatuurverloop op drie tijdstippen bij verwarming van een wand (gebaseerd op Van Mierlo & Tromp (2014), p.39)

Stel: op een bepaald moment wordt een wand aan één zijde opgewarmd door de convectieve warmte van een brand (tijdstip 1). De hete rook van de brand is ongeveer 800 graden. Op dit tijdstip is de wand nog niet opgewarmd en heeft nog dezelfde temperatuur als de lucht aan de koude zijde van ongeveer 20 graden. Na verloop van tijd zal de hete rook de warmte overdragen aan de wand. De snelheid waarmee dit gaat, is afhankelijk van de warmteoverdrachtscoëfficiënt van de stromende lucht, zie paragraaf 1.6.2. Hierdoor zal de zijde van de wand grenzend aan de hete rook opwarmen. De warmte die aan de wand wordt overgedragen zal via geleiding verder de wand ingaan. De snelheid waarmee dit gebeurt, hangt af van de eigenschappen van de wand (thermische traagheid).

Op enig moment (tijdstip 2) zal de warmte zich verder in de wand verspreiden en in de wand ophopen. De temperatuur van de wand grenzend aan de hete rook zal toenemen (bijvoorbeeld tot 375 graden). De warmte heeft echter nog niet koude zijde van de wand bereikt. De warmte wordt op dit tijdstip nog opgevangen (gebufferd) in de wand. Daardoor is er sprake van een exponentiele afname van de temperatuur in de wand. In het midden van de wand bedraagt de temperatuur in dit voorbeeld ongeveer 80 graden.

Op het moment dat de warmte door de wand is geleid en de wand aan de koude zijde de doorgevoerde warmte weer kan afgeven (afkoeling via straling en convectie), kan er een evenwicht ontstaan waardoor er sprake is van een lineaire afname van de temperatuur over de doorsnede van de wand (tijdstip 3). Hierdoor heeft de wand in dit voorbeeld een temperatuur bereikt aan de verhitte zijde van 700 graden, in het midden van 400 graden en aan de niet verhitte zijde van 100 graden.

4.1.3 Thermisch dik of dun

In de vorige paragraaf is het warmtetransport door constructies voor een vereenvoudigde situatie beoordeeld. Uit het voorbeeld blijkt dat een constructie enige tijd de warmte (energie) die door de brand aan de constructie (wand) wordt overgedragen kan bufferen (opvangen), voordat de warmte de andere zijde van de wand bereikt. De mate van warmtebuffering is afhankelijk van de thermische traagheid (materiaaleigenschappen) van de constructie. Zolang de warmte nog niet tot de andere zijde van de wand (koude zijde) is doorgedrongen,

wordt een constructie als thermisch dik beschouwd. Bij een ideale thermische dikke wand wordt dus alle warmte die wordt toegevoerd aan de wand gebufferd, oftewel: de volledige thermische traagheid wordt benut. Bij een ideale thermisch dunne wand wordt er geen warmte gebufferd in de wand en wordt alle warmte via geleiding (transmissie) direct afgegeven aan de omgeving (koude zijde).

Zoals in het voorbeeld in figuur 4.2 in paragraaf 4.1.2 is aangegeven kan een constructie gedurende een bepaalde tijd thermisch dik zijn voordat deze thermisch dun wordt. De constructie in situatie 2 is een thermisch dikke constructies. De constructie in situatie 3 is een thermisch dunne constructie. De overgang van thermisch dik naar thermisch dun is afhankelijk van de thermische indringingsdiepte. In het kader hieronder wordt dit nader toegelicht.

Thermische indringingsdiepte

De thermische indringingsdiepte geeft de dikte van de constructie (of het materiaal) in meters aan, waarbij de constructie thermisch dik of thermisch dun is. Deze thermische indringingsdiepte is afhankelijk van de tijd waarover de thermische traagheid wordt beschouwd en de temperatuurvereffeningscoëfficiënt. De temperatuurvereffeningscoëfficiënt is afhankelijk van dezelfde materiaaleigenschappen als de thermische traagheid, zie tabel 4.2 in paragraaf 4.1.4. De thermische indringingsdiepte (d_p) in meters (m) en temperatuurvereffeningscoëfficiënt (α) in vierkante meter per seconde (m^2/s) kunnen met onderstaande formules worden berekend.

$$d_p \geq 2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t} \quad \text{thermisch dik}$$

$$d_p < 2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t} \quad \text{thermisch dun}$$

$$d_p = \text{thermische indringingsdiepte in m,}$$

$$\alpha = \text{temperatuurvereffeningscoëfficiënt in } \frac{m^2}{s} \text{ en } t \text{ is de tijd in seconden (s)}$$

Voorbeeld 1

Stel een betonnen wand heeft een dikte van 0,1 m (100 mm) en wordt gedurende 60 minuten aan één zijde opgewarmd. Vraag: is de wand na 60 minuten als thermisch dik of thermisch dun te beschouwen? Uitwerking:

$$\alpha = 5,5 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}, t = 3600 \text{ s en } d_p = 0,1 \text{ m}$$

$$2 \cdot \sqrt{5,5 \cdot 10^{-7} \cdot 3600} = 0,04 \text{ m}$$

$$d_p \geq 0,04 \text{ m} \rightarrow 0,1 \text{ m} \geq 0,04 \text{ m} \rightarrow \text{thermisch dik}$$

De wand is gedurende de opwarming van 60 minuten thermisch dik. Op basis van het voorgaande voorbeeld kan ook de tijd bepaald worden waar de overgang plaatsvindt van thermisch dik naar thermisch dun. Deze tijd wordt ook wel de thermische penetratietijd genoemd (t_p).

$$d_p = 2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t_p} \rightarrow t_p = \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{\alpha}$$

$$t_p = \left(\frac{0,1}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{5,5 \cdot 10^{-7}} = 4545,5 \text{ s} \approx 76 \text{ minuten}$$

Na ongeveer 76 minuten zal de wand overgaan van thermisch dik naar thermisch dun.

Voorbeeld 2

Stel een niet-geïsoleerde stalen plaat heeft een dikte van 0,005 m (5 mm) en wordt gedurende 20 minuten aan één zijde opgewarmd. Vraag: is de wand na 5 minuten als thermisch dik of thermisch dun te beschouwen? Uitwerking:

$$\alpha = 1,4 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}, t = 300 \text{ s en } d_p = 0,005 \text{ m}$$
$$2 \cdot \sqrt{1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 300} = 0,13 \text{ m}$$
$$d_p < 0,13 \text{ m} \rightarrow 0,005 \text{ m} < 0,13 \text{ m} \rightarrow \textit{thermisch dun}$$

De wand is na een opwarming van 5 minuten als thermische dun te beschouwen. De thermische penetratietijd (t_p) bedraagt in deze situatie:

$$d_p = 2 \cdot \sqrt{\alpha \cdot t_p} \rightarrow t_p = \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{\alpha}$$
$$t_p = \left(\frac{0,005}{2}\right)^2 \cdot \frac{1}{1,4 \cdot 10^{-5}} = 0,44 \text{ s}$$

Of een constructie als thermisch dik of thermisch dun moet worden beschouwd, is bepalend voor het optredende warmtetransport. Hierbij gaat het om warmtebuffering (warmte wordt opgevangen) of warmtetransmissie (warmte wordt afgegeven aan omgeving). Constructies kunnen uit meerdere materialen bestaan en geïsoleerd uitgevoerd worden. Voor een thermisch dikke constructie maakt het niet uit of deze ongeïsoleerd of geïsoleerd is. Er is immers sprake van warmtebuffering, en warmtetransmissie speelt geen rol, dus de isolatie in deze situatie ook niet.

Bij een thermisch dunne constructie maakt het wel uit of deze ongeïsoleerd of geïsoleerd is. Bij een ongeïsoleerde thermisch dunne constructie zal er sprake zijn van warmtetransmissie; de warmte wordt afgegeven aan de omgeving door het ontbreken van de thermische isolatie. Bij een geïsoleerde thermisch dunne constructie wordt de warmtetransmissie naar de omgeving sterk beperkt. De warmte (energie) die door de brand wordt afgegeven aan de constructie kan de constructie niet of nauwelijks verlaten. Hierdoor kan het materiaal aan de verwarmde zijde een uniforme temperatuur bereiken, die dicht in de buurt komt van de temperatuur waarmee het materiaal wordt opgewarmd. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij een door brand verwarmde geïsoleerde stalen dakconstructie. Zolang het isolatiemateriaal intact blijft, zal de staalplaat in de dakconstructie snel opwarmen en ongeveer de temperatuur van de brandruimte aannemen. Een dergelijke constructie wordt ook wel een ‘adiabatisch’ genoemd, zie het kader hieronder.

Adiabatisch

Adiabatisch betekent letterlijk: zonder warmte-uitwisseling met de omgeving. Bij een adiabatisch proces, bijvoorbeeld een brand in een dichte goed geïsoleerde ruimte, blijft alle warmte (energie) die door de brand wordt ontwikkeld in de ruimte en de constructies. Er zal geen warmte naar de omgeving verplaatsen.

In tabel 4.1 op de volgende pagina is het verschil in warmtetransport tussen thermisch dikke en thermisch dunne geïsoleerde en ongeïsoleerde constructies samengevat.

Tabel 4.1 Samenvatting warmtetransport in thermisch dikke en thermisch dunne constructies

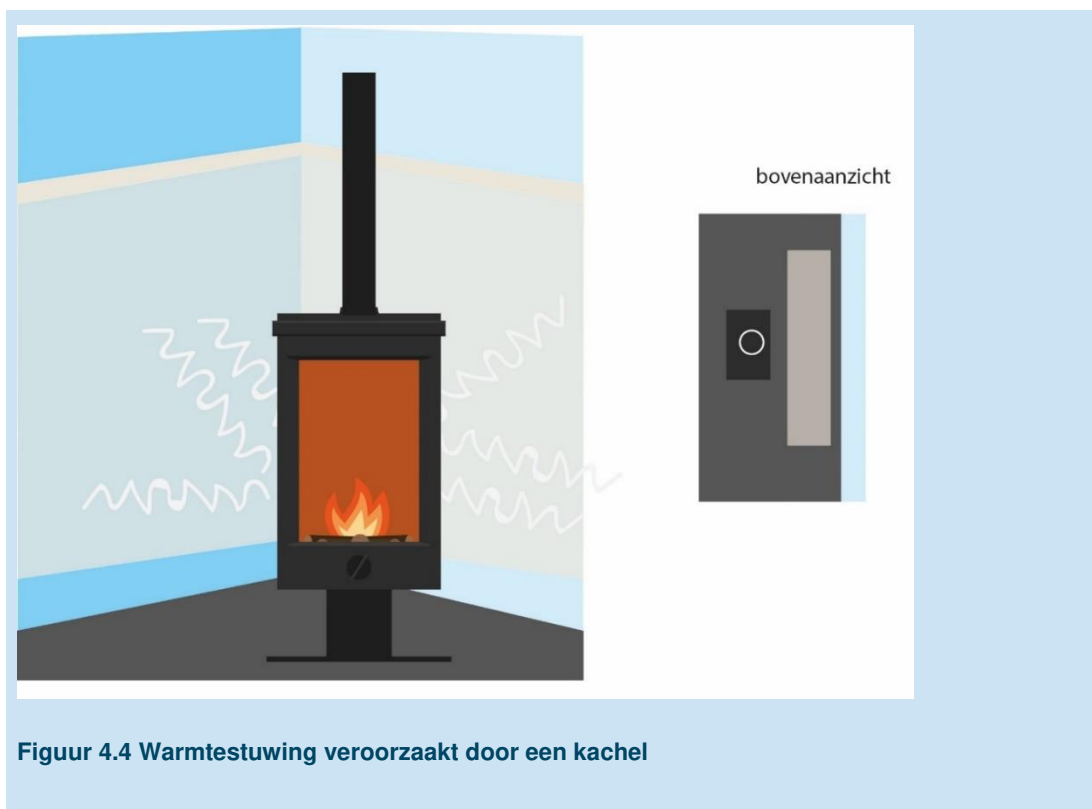
Constructie	Isolatie niveau	Warmtetransport
Thermisch dik	Ongeïsoleerd	Er is sprake van warmtebuffering Warmtetransmissie treedt niet op, dus het isolatieniveau is niet relevant
	Geïsoleerd	
Thermisch dun	Ongeïsoleerd	Warmtebuffering is niet van belang Warmtetransmissie treedt op naar de omgeving door het ontbreken van isolatie
Thermisch dun	Geïsoleerd	Zowel warmtebuffering als warmtetransmissie is niet van belang Door isolatie blijft de warmte in de ruimte (adiabatische constructie)

Hittestuwing of warmtestuwing

Hittestuwing of warmtestuwing betekent dat de temperatuur van een voorwerp of de lichaamstemperatuur van een persoon toeneemt, terwijl de warmte niet kan worden afgevoerd. Oftewel: er wordt meer energie toegevoerd (Q_{in}) dan dat er kan worden afgevoerd (Q_{uit}), waardoor de opgeslagen energie toeneemt (Q_{opslag}). Hierdoor neemt de temperatuur van het voorwerp of de persoon toe. Warmtestuwing kan optreden als er sprake is van een adiabatische omhulling. De omhulling voorkomt dat er warmte-uitwisseling plaatsvindt met de omgeving.

Een voorbeeld van hittestuwing of warmtestuwing is de oververhitting van het lichaam van een brandweerman tijdens een inzet. De brandweerkleding (brandweerpak en andere beschermende kleding) biedt een thermische bescherming tegen de hitte van een brand. Hierdoor kan een brandweerman gedurende langere tijd intensieve werkzaamheden uitvoeren. Dergelijke kleding kan er echter ook voor zorgen dat het lichaam minder snel warmte kan afvoeren aan de omgeving, waardoor de lichaamstemperatuur toeneemt en er hittestuwing optreedt.

Een ander voorbeeld is warmtestuwing achter een kachel, zoals weergegeven in figuur 4.4 op de volgende pagina. De houten wand achter de kachel is beschermd tegen de warmte van die kachel door een beschermende beplating die tegen de wand is aangebracht. Deze beplating wordt door de warmte van de kachel opgewarmd. Op den duur wordt de plaat door en door heet, en warmt dan ook de houten wand erachter op. De houten wand is op zijn beurt weer goed geïsoleerd afgescheiden van de achterliggende constructie, waardoor de warmte niet goed weg kan. Ook als de kachel dooft, kan de houten wand door de goede isolatie zijn warmte niet goed kwijt. Er treedt warmtestuwing op in de wand, waardoor er zelfontbranding kan optreden. De opbouw van de constructie heeft dan dus een averechts effect: in plaats van ontbranding te voorkomen, bevordert hij juist de ontbranding van de houten wand. Dit gevaar kan worden voorkomen door de beplating enige centimeters van de wand te bevestigen en de plaat ook aan de onderzijde vrij te houden van de vloer. Er kan dan lucht bij de plaat komen die de plaat afkoelt, waardoor er minder warmte doorgegeven wordt aan de houten wand.



Figuur 4.4 Warmtestuwng veroorzaakt door een kachel

4.1.4 Tabel met materiaaleigenschappen

Tabel 4.2 Dichtheid, soortelijke warmte, warmtegeleidingscoëfficiënt, kpc-waarde en temperatuurvereffeningscoëfficiënt van een aantal vaste stoffen (zie ook tabel 1.5)

Materiaal/stof	ρ [kg/m ³]	c [J/kg.K]	λ (k) [W/m.K]	kpc [W ² s/m ⁴ K ²]	α [m ² /s]
Aluminium	2.700	870	236	5,5 x 10 ⁸	1,0 x 10 ⁻⁴
Baksteen	2.400	900	1,0	2,2 x 10 ⁶	4,6 x 10 ⁻⁷
Beton	1.700	750	0,7	8,9 x 10 ⁵	5,5 x 10 ⁻⁷
Eikenhout	900	2.000	0,17	3,1 x 10 ⁵	9,4 x 10 ⁻⁸
EPS	30	1.300	0,03	1,2 x 10 ³	7,7 x 10 ⁻⁷
Koper	8.790	390	401	1,4 x 10 ⁹	1,2 x 10 ⁻⁴
Lood	11.350	130	35,5	5,2 x 10 ⁷	2,4 x 10 ⁻⁵
PUR schuim	30	1.300	0,03	1,2 x 10 ³	7,7 x 10 ⁻⁷
Staal	7.820	490	54	2,1 x 10 ⁸	1,4 x 10 ⁻⁵
Steenwol	390	840	0,045	1,5 x 10 ⁴	1,4 x 10 ⁻⁷
Vurenhout	780	2.500	0,12	2,3 x 10 ⁵	6,2 x 10 ⁻⁸

4.2 Materiaalgedrag bij brand

Uit de voorgaande hoofdstukken en paragrafen is gebleken dat materiaaleigenschappen bepalend zijn voor het ontstaan van brand, het brandverloop en de opwarming bij brand. Niet alleen de thermische respons (reactie) is hierbij van belang, maar ook de mechanische respons (bijvoorbeeld de vervorming). Ofwel: het gedrag van materialen bij brand. Daarover gaat deze paragraaf.

Vershil stof-, materiaal- en producteigenschappen

Een stof is opgebouwd uit moleculen, die weer zijn opgebouwd uit atomen (zie paragraaf 1.1). Een *stofeigenschap* is een eigenschap die specifiek van toepassing is op een bepaalde stof. Stofeigenschappen veranderen niet als de hoeveelheid van het materiaal verandert. Een aantal bekende stofeigenschappen zijn: geur, kleur, smaak, glans, geleiding (van elektriciteit, geluid, warmte), magnetisme, dichtheid, smeltpunt, kookpunt, oplosbaarheid, de fase bij kamertemperatuur en uitzetting bij verwarmen.

Materialen zijn natuurlijke of kunstmatig geproduceerde stoffen, bedoeld om verwerkt te worden tot bruikbare producten. Een materiaal wordt samengesteld uit stoffen die zijn geselecteerd op basis van hun eigenschappen met het oog op een bepaalde toepassing. Elk materiaal heeft unieke eigenschappen. Deze *materiaaleigenschappen* bepalen bijvoorbeeld de sterkte en hardheid van het materiaal, maar ook hoe goed het warmte kan geleiden en het (soortelijk) gewicht.

Kenmerken of eigenschappen die specifiek gelden voor een bepaald product, worden *producteigenschappen* genoemd. Producteigenschappen zijn bijvoorbeeld het materiaal waar het product van gemaakt is, wat het kan en welke voor- en nadelen het heeft. De eigenschappen van producten zijn onder vastgestelde omstandigheden altijd hetzelfde.

Voor het gedrag van materialen bij brand kunnen diverse eigenschappen van belang zijn. In het volgende kader is voor de materiaaleigenschappen een uitsplitsing in drie categorieën gemaakt. Een deel van de genoemde eigenschappen in het kader zijn in de voorgaande hoofdstukken en paragrafen besproken. In de volgende paragrafen richten we ons op het materiaalgedrag van de meest voorkomende bouwmaterialen die worden gebruikt: hout, staal, beton, steen, glas, isolatiematerialen en bitumen. Hierbij beperken we ons tot eigenschappen die van invloed zijn op het gedrag bij brand.

Materiaaleigenschappen

De eigenschappen van materialen kunnen grofweg opgedeeld worden in drie categorieën:

- > chemische eigenschappen
- > fysische eigenschappen
- > mechanische eigenschappen.

1. Chemische eigenschappen

De chemische eigenschappen van een materiaal of stof worden vooral bepaald door de scheikundige samenstelling van de elementen (lees: moleculen en atomen) waaruit ze zijn opgebouwd en hoe deze zijn geordend en met elkaar verbonden zijn. Voorbeelden van chemische eigenschappen zijn:

- > brandbaarheid
- > corrosiebestendigheid
- > vochtbestendigheid
- > kleur

- > zuurbestendigheid
- > giftigheid
- > elektrische geleiding.

2. Fysische eigenschappen

De fysische eigenschappen van materialen worden vooral bepaald door de stofeigenschappen en de omgevingsinvloeden. Bij de fysische eigenschappen gaat het met name om het effect van energie op een materiaal of stof. Zo kunnen druk en temperatuur de vorm van een materiaal veranderen (de toestand verandert). Staal zal bijvoorbeeld uitzetten wanneer de temperatuur stijgt en gaan krimpen wanneer deze weer daalt. Voorbeelden van fysische eigenschappen zijn:

- > soortelijke massa
- > soortelijke warmte
- > warmtegeleidingsvermogen
- > thermische uitzetting
- > verwekingstemperatuur
- > vlampunt
- > zelfontbrandingstemperatuur
- > elektrische weerstand
- > absorptievermogen.

3. Mechanische eigenschappen

Mechanische eigenschappen geven de verhouding aan tussen de kracht die op een materiaal wordt uitgeoefend en de mate van vervorming die daardoor veroorzaakt wordt (het effect). Voorbeelden van mechanische materiaaleigenschappen zijn:

- > elasticiteit
- > treksterkte
- > brosheid en taaiheid
- > druksterkte
- > buigsterkte
- > kruip
- > hardheid.

4.2.1 Hout

Hout is een veel gebruikt bouw materiaal. Het heeft een goede druk- en treksterkte en een goede elasticiteit. De warmtegeleiding van hout is gering, waardoor het beperkt warmte opneemt. Bij een temperatuursverhoging treedt dan ook nauwelijks vormverandering op door de opgenomen warmte. Doordat de warmtegeleiding gering is, warmt het directe oppervlak dat blootgesteld wordt aan de brand snel op, terwijl dieper in het hout de temperatuur relatief laag blijft (thermische traagheid, zie paragraaf 4.1.2). Droog hout bestaat voor ongeveer 50 % uit koolstof. Het materiaal is dan ook goed brandbaar en ontvlamt gemakkelijk. Hout reageert en ontleedt pas bij hogere temperaturen (100 °C - 450 °C). Hierbij komen brandbare gassen en dampen vrij en kan zich bij verbranding een houtskoollaag vormen (zie figuur 4.5). De gassen en dampen verbranden, terwijl de houtskoollaag gloeit. Deze houtskoollaag werkt isolerend en voorkomt een snelle opwarming van het hout eronder.

De verschijnselen die optreden bij het opwarmen en verbranden van hout zijn:

- > De temperatuur in het hout stijgt tot 100 à 105 °C, en wordt daarna tijdelijk niet hoger door het verdampen van het vocht in het hout.
- > Bij opwarming tot 200 °C verkleurt het hout (wordt donker) door chemische reacties.
- > Tussen 250 - 300 °C ontleedt de buitenste laag en worden houtskool en brandbare gassen gevormd.
- > Tussen 350 - 450 °C gaan de brandbare gassen tot zelfontbranding over.

Houtskoollaag

De warmtegeleidingscoëfficiënt van de koollaag is vergelijkbaar met die van een isolatiemateriaal (circa 0,035 m²K/W, zie ook paragraaf 1.7) en is daarmee ongeveer viermaal kleiner is dan die van hout. Het diep doordringen van de warmte in het hout wordt hierdoor tegengegaan, zodat het ontleden van het hout vertraagt. De vorming van een koollaag betekent ook dat de houtdoorsnede afneemt door inbranding. Is de temperatuur hoog genoeg, dan zal de inbranding dieper worden. Bij een brand kan de inbrandsnelheid van hout oplopen tot ongeveer 4 cm per uur. Deze waarde geldt voor naaldhout; bij harde houtsoorten is de inbrandsnelheid lager.

Inbrandsnelheid

De snelheid waarmee de inbranding dieper wordt, wordt de inbrandsnelheid genoemd; deze verschilt per houtsoort. Inbrandsnelheid wordt uitgedrukt in **mm/min** en is afhankelijk van het volume, de massa, afmetingen en de doorsnede van het hout. Voorbeelden van rekenwaarden voor de inbrandsnelheid van hout, gelamineerd hout en plaatmaterialen volgen uit de Eurocode 1995-1-2 en zijn weergegeven in tabel 4.3.

Tabel 4.3 Rekenwaarden voor de inbrandsnelheid van hout, gelamineerd hout en plaatmaterialen (Bron: Eurocode 1995-1-2)

Materiaal­soort	Inbrandsnelheid		
	massa	mm/min	
	kg/m ³	eenzijdig	Meerzijdig
Naaldhout en beuken			
Gelamineerd	≥ 290	0,65	0,70
Massief	≥ 290	0,65	0,80
Loofhout			
Massief of gelamineerd	≥ 290	0,65	0,70
Massief of gelamineerd	≥ 450	0,50	0,55
Gelamineerd hout (vineer)			
	≥ 480	0,65	0,70
Plaatmateriaal			
Triplex platen ≥ 20 mm dik	≥ 450	1,00	-
Overige plaatmaterialen ≥ 20 mm dik	≥ 450	0,90	-

Als vuistregel voor de inbrandsnelheid wordt vaak een veilige waarde van **1 mm/min** (6 cm/min) aangehouden. Door de doorsnede van de constructie te vergroten en dus rekening te houden met de potentiële inbranding (dit wordt overdimensioneren genoemd) kan een veilige houtconstructie worden gemaakt die bij brand voldoende weerstand biedt tegen bezwijken.



Figuur 4.5 Vorming van een koollaag (Bron: E.J. Huizer)

Hout en vocht

Hout is een natuurproduct dat onder invloed van temperatuur gevoelig blijft voor vocht, waardoor het kan uitzetten en krimpen. Hout vervormt alleen wanneer het vochtgehalte wordt beïnvloed. Bij brand verdampt (plaatselijk) het water in hout. Hierdoor neemt de dichtheid af en krimpt het materiaal. Gebeurt dit ongelijkmatig, dan kan hout vervormen. Bij verhitting aan één zijde krimpt de zijde die naar de brand is gericht en zal een houtconstructie hol trekken, met de holle zijde gericht naar de brand.

Vochtgehalte

Hout heeft de eigenschap om vocht op te nemen en af te staan aan de lucht. Komt vochtig hout in een droge omgeving, dan geeft het vocht af. Omgekeerd neemt droog hout in een natte omgeving vocht op. Dit proces gaat gepaard met krimpen en zwellen, waardoor vormveranderingen kunnen optreden. De snelheid waarmee hout droogt, is afhankelijk van de maatvoering van het hout en de omgevingsfactoren. Temperatuur, luchtcirculatie en luchtvochtigheid spelen daarbij een grote rol.

Het vochtgehalte in houtproducten kan afhankelijk van de toepassing en condities wel 8 tot 21 % bedragen (Bron: www.houtinfo.nl). Het vochtgehalte in de buitenlucht wisselt sterk en wordt beïnvloed door het seizoen, regen en mist. Zo zal de luchtvochtigheid in de winter het laagst zijn bij vorst en het hoogst in de zomer bij klam warm weer.

Het vochtgehalte is ook bepalend voor de hoeveelheid energie die bij de verbranding van hout vrijkomt, zie paragraaf 1.5.1. Naarmate het vochtgehalte van hout hoger is, is er meer energie nodig om het water in het hout te laten verdampen. Daardoor blijft er minder energie over voor de opwarming van het hout.

4.2.2 Staal

Eén van de meest gebruikte materialen in de bouw is staal. Staal wordt voornamelijk gevormd uit ijzer en koolstof. Door andere elementen toe te voegen, kan het staal andere eigenschappen krijgen. Zo zorgt de toevoeging van chroom en nikkel voor roestvrij staal. Het verhogen van het koolstofgehalte kan weer zorgen voor een hogere treksterkte (zie onderstaand kader).

Definitie van treksterkte

De treksterkte is de maximale mechanische spanning die een materiaal bereikt als het plastisch vervormd wordt. *Plastische vervorming* van materiaal wordt veroorzaakt doordat er een kracht op wordt uitgeoefend (bijvoorbeeld druk- of trekkracht). Deze plastische vervorming is permanent en kan niet ongedaan gemaakt worden wanneer de kracht wordt weggenomen. Plastische vervorming gaat vaak samen met *elastische vervorming*. Bij een elastische vervorming leidt het wegnemen van de kracht wel tot het ongedaan maken van de vervorming.

Staal wordt veel gebruikt in de bouw vanwege de sterkte-eigenschappen. Zeker voor hoge gebouwen is deze eigenschap belangrijk. Staal is makkelijk vervormbaar en betrouwbaar; de eigenschappen veranderen amper naar verloop van tijd. Bovendien kan staal snel gemonteerd worden, wat resulteert in een korte bouwtijd. Daarnaast is staal makkelijk te repareren in geval van schade.

Staal is onbrandbaar en produceert bij brand net als steenachtige materialen geen rook of giftige gassen. Het is een goede thermische geleider, zodat het snel warmte opneemt en doorgeeft. Door het opnemen van warmte zal het staal gaan vervormen (uitzetten). Hoeveel de uitzetting zal zijn, is afhankelijk van de lengte en temperatuur van het staal. Doordat staal bij uitzetting langer wordt, kunnen er drukkrachten ontstaan waardoor vervormingen optreden en constructies kunnen bezwijken. Een stalen draagconstructie wordt daarom vaak beschermd om te voorkomen dat de temperatuur te hoog wordt en de vervormingen de constructies en het gebouw verzwakken.

Uitzetten en vervormen van staal

Staal wordt per meter lengte en per graad temperatuurverhoging 0,012 mm langer. Zo zal een stalen ligger van 4 meter bij een temperatuurtoename van 800 °C ongeveer 3,8 cm langer. Als deze uitzetting wordt tegengegaan, kan dit tot spanning in de constructie leiden. Dergelijke spanningen kunnen tot beschadigingen en uiteindelijk het bezwijken van de constructie leiden. Staalconstructies zijn meestal samengesteld uit profielen die door lassen, bouten of klinken met elkaar zijn verbonden. Ook deze verbindingen kunnen door uitzetting worden beschadigd.

Door gedeeltelijke afscheiding van stalen constructieonderdelen door bijvoorbeeld isolatiematerialen kan ook een ongelijkmatige temperatuurverdeling in het staal ontstaan. Hierdoor kan een staalconstructie kromtrekken. Bij eenzijdige verhitting zal de staalconstructie uitzetten aan de verhitte zijde en hierdoor kromtrekken met de bolle kant naar de brand gericht. Ook door een dergelijke vervorming kan een staalconstructie bezwijken.

Een temperatuurverhoging heeft ook effect op de sterkte-eigenschappen van staal. Vanaf ongeveer 200 °C zal de weerstand tegen vervorming (stijfheid) afnemen. Vanaf 400 °C zullen ook de sterkte-eigenschappen afnemen. Bij een hogere temperatuur zal een staalconstructie eerder geneigd zijn om blijvend (plastisch) te vervormen. Dit wordt ook wel de vloeigrens genoemd. Bij een verhoging van de temperatuur boven de 400 °C neemt de treksterkte snel af: bij 500 °C bedraagt deze nog maar de helft en bij 625 °C nog maar een vijfde van de treksterkte bij normale temperaturen. Bij 800 °C heeft staal nog maar 10 % van zijn sterkte. De temperatuur van staal waarbij de vloeigrens wordt bereikt, wordt de kritische staaltemperatuur genoemd, zie het onderstaande kader.

Kritische staaltemperatuur

De kritische temperatuur is per constructie verschillend en bijvoorbeeld afhankelijk van de belasting, dimensionering en de staalkwaliteit. Bij het overschrijden van de kritieke staaltemperatuur (vloiegrens) treden er blijvende veranderingen op. De stalen constructie zal dan doorbuigen en bezwijken. Afhankelijk van de belasting houdt men voor staal de volgende kritische temperaturen aan:

- > 450 °C voor zwaar belaste constructies
- > maximaal 600 °C voor licht belaste constructies.

Het tijdstip waarop de kritische temperatuur van staal wordt overschreden, hangt af van de opwarming van het staalprofiel. Bij een zwaar profiel duurt het langer voordat het materiaal geheel is opgewarmd en de kritische staaltemperatuur wordt bereikt dan bij een slank profiel. Een slank profiel zal daarom bij brand snel bezwijken; een zwaar profiel zal het wat langer uithouden.

4.2.3 Beton

Beton wordt gemaakt door cement te mengen met water, grind en een aantal andere elementen. Hierbij heeft de verhouding tussen die ingrediënten invloed op de sterkte. Beton is niet brandbaar en produceert bij brand geen rook of giftige gassen. De betonmassa zorgt voor een grote warmteopslagcapaciteit, terwijl de poreuze structuur van het materiaal leidt tot een relatief lage opwarmingssnelheid, zie paragraaf 4.1.2 en 4.1.3. Het sterkteverlies van beton bij een temperatuur van 600 °C bedraagt ongeveer 50 %. De warmtegeleiding in beton is echter laag, waardoor het wel 1,5 tot 3 uur kan duren voordat deze temperatuur op 3 cm onder het oppervlak is bereikt. Hierdoor kan met een betonconstructie een hoge brandwerendheid worden bereikt. Dit wil echter niet zeggen dat betonconstructies altijd veilig zijn. Zo heeft beton wel een hoge druksterkte, maar een lage treksterkte (een tiende tot een vijftiende deel van de druksterkte).

Definitie van druksterkte

De druksterkte is de mate waarin een materiaal weerstand kan bieden aan drukkrachten (Bron: [Wikipedia](#)).

Om de treksterkte van een betonconstructie te verhogen, wordt een stalen wapening aan het beton toegevoegd. Overigens hebben beton en staal vrijwel dezelfde uitzettingscoëfficiënt en hechten deze materialen onderling goed. Uiteraard moet de stalen wapening wel genoeg betondekking hebben om haar sterkte niet te verliezen.

Het brandgedrag van betonconstructies kan in de praktijk best complex zijn. Factoren die bij brand een rol spelen zijn:

- > De temperatuur van de staal-wapening in het beton (deze moet onder de kritieke staaltemperatuur blijven)
- > spanning op en vervorming van de wapening (door temperatuurverschillen)
- > afspatten van beton door scheurvorming of het verdampen van water in beton (afspatten legt de wapening bloot, met een risico op het bezwijken van de constructie als gevolg)
- > een combinatie van alle bovengenoemde factoren.

Afspatten

Beton bevat water dat na het storten en verharden in de poriën van het beton achterblijft. Bij brand zal dit water vanaf een temperatuur van 100°C stoom gaan vormen. Bij standaard betonconstructies kan deze stoom snel genoeg door de poriënstructuur worden afgevoerd. Maar bij hoogwaardig beton

met een hoge dichtheid lukt dit niet. Hierdoor kan in het beton een zeer hoge stoomdruk ontstaan, waardoor het beton (explosief) weg spat. Dit 'afspatten' van beton kan door plaatselijke sterke verhitting al in de beginfase van de brand plaatsvinden. Daarnaast kan er ook beton afspatten bij sterke afkoeling. Hoewel beton warmte slecht geleidt, kan de buitenzijde van het beton erg heet en poreus worden. Door een sterke afkoeling van het beton door bijvoorbeeld een blusstraal kunnen er dan ook plotseling stukken afspatten. Als door afspatten de betondekking verdwijnt, ligt de wapening bloot. De constructie zal dan vrij snel zijn sterkte verliezen, omdat de kritische staaltemperatuur wordt overschreden. In dat geval kan de constructie doorbuigen en bezwijken. De dikte van de betondekking op de wapening varieert en is afhankelijk van de constructie-eisen.



Figuur 4.6 Afspatten betondekking bij brand in een parkeergarage (Bron: IFV)

Voorgespannen beton

Voorgespannen beton is gewapend beton waarbij de wapening onder spanning staat. Hierdoor kan het beton een hogere belasting aan en kunnen slankere constructies worden gemaakt. Doordat deze constructies een lager eigen gewicht hebben, kunnen grote afstanden worden overspannen. Net als bij staalconstructies is de brandwerendheid van voorgespannen betonconstructies afhankelijk van de doorsnede van het beton en de dekking van de (stalen) wapening. Voorgespannen beton heeft door het lage gewicht veel minder betondekking dan normale betonconstructies. Bij brand zal de wapening daardoor sneller opwarmen en eerder haar sterkte verliezen. Voorgespannen beton is daarom bij brand risicovoller dan gewone betonconstructies. Voor dragende betonelementen (vloeren, wanden, kolommen en liggers) moet hier tijdens brandbestrijding altijd rekening mee worden gehouden.

4.2.4 Steen

Steen is een onbrandbaar materiaal. Pas bij zeer hoge temperaturen loopt de sterkte van steen terug en kan de samenhang ervan verloren gaan. Of dit gebeurt, is afhankelijk van de eigenschappen van het materiaal (de geleidingscoëfficiënt, de soortelijke warmte en de soortelijke massa). Metselwerk kan bestaan uit gebakken stenen of ongebakken steensoorten zoals kalkzandsteen, gasbeton en betonsteen. Metselwerk is in de regel bestand tegen zeer hoge drukkrachten en temperaturen, maar niet tegen hoge trekkrachten.

Gebakken metselsteen

Gebakken metselsteen wordt gebakken en gevormd bij een hoge temperatuur. Over het algemeen is de samenstelling van gebakken metselsteen vrij homogeen. Bij hoge temperaturen treedt daarom weinig spanning op in de steen. De steen zet gelijkmatig uit. Daarom is gebakken steen zeer goed bestand tegen hoge temperaturen bij brand. Pas boven 1200 °C worden de stenen plastisch en loopt

de druksterkte snel terug. Bij eenzijdige verhitting of bij plotselinge afkoeling kunnen door krimp spanningen ontstaan en stukken van de steen afspringen.

Niet gebakken metselsteen

Kalkzandsteen, gipssteen (gipsplaat), lichte bouwsteen (gasbeton, bimsbeton) en betonsteen (MBI-steen) zijn allemaal steensoorten die niet gebakken zijn, maar met een bindmiddel (meestal onder druk) zijn gevormd. Zo wordt kalkzandsteen gevormd onder stoomdruk. Kalkzandsteen gedraagt zich zeer goed bij brand, vergelijkbaar met gebakken steen. Gips (calciumsulfaat) is de grondstof van gipssteen en gipsplaat. Dit materiaal warmt slechts langzaam op. Hierdoor hebben zowel gipssteen als gipsplaten een goede weerstand tegen hoge temperaturen. Lichte bouwstenen van gasbeton en bimsbeton zijn samengesteld uit een poreuze steensoort met een bindmiddel. Door het lage soortelijk gewicht (dichtheid) hebben ze een goed isolerend vermogen. Opwarming vindt hierdoor slechts langzaam plaats. Afhankelijk van de samenstelling is de weerstand van lichte bouwsteen tegen hoge temperaturen goed tot zeer goed. Betonsteen is samengesteld uit betonspecie. Het is een zware steen die enigszins poreus is. Bij zeer hoge temperaturen kunnen er stukken van het oppervlak springen. Het gedrag van deze steen bij brand is zeer goed.

Ontstaan van scheurvorming

Scheurvorming komt in bouwwerken veel voor. Metselwerk is bestand tegen zeer hoge drukkrachten, maar niet tegen hoge trekkrachten. Scheuren ontstaan:

- > wanneer spanningen de treksterkte van het materiaal overschrijden door ongelijke zettingen in de fundering
- > door een onjuiste sterkteberekening
- > als gevolg van krimp
- > door een volumeverandering van materialen (door vocht en temperatuurschommelingen).

Metselwerkconstructies worden ook wel intelligente constructies genoemd, omdat bij ongelijke krachten het metselwerk de spanning verdeelt. Dit zien we aan scheurvorming tussen de voegen. Bij brand ontstaan scheuren meestal door druk- of trekspanningen veroorzaakt door uitzetting of bezwijken van constructiedelen zoals steunbalken en liggers. Scheuren zijn daarom ook verklikkers. Waar de scheurbreedte het grootst is, zijn de inwerkende krachten ook het grootst. Een horizontale scheur in metselwerk is een aanwijzing dat de metselspecie niet meer vastzit, en dat het boven de scheur gelegen deel van de muur los staat.

4.2.5 Glas

Glas is onbrandbaar, maar geleidt de warmte goed en laat straling voor een groot deel ongehinderd door. Bij verhitting treden snel spanningen in het glas op, waardoor het breekt. Dit breken kan bijvoorbeeld het gevolg zijn van interne temperatuurverschillen door ongelijke opwarming of een verkeerde montage in het kozijn. Niet brandwerend glas kan in gunstige situaties een temperatuur van ongeveer 300 tot 400 °C weerstaan bij gelijkmatige opwarming. Veelal zal glas breken door een groot temperatuurverschil in het glas ter plaatse van de montage in het kozijn; het deel van het glas in het kozijn wordt immers niet opgewarmd. Bij temperaturen boven de 800 °C verweekt het glas en kan het uit het kozijn zakken. Ongewapend venster- en spiegelglas heeft bijna geen weerstand tegen hoge temperaturen. Al na enkele minuten zal het glas bij vlamcontact breken en bezwijken.

Isolatieglas

Met isolatieglas wordt al het glas bedoeld dat een betere isolatie geeft dan enkel glas. Waar enkel glas uit één glaslaag bestaat, bestaat bijvoorbeeld dubbelglas minimaal uit twee glaslagen met daartussen een luchtdichte gaslaag (spouw) die isolerend werkt. Deze spouw kan in breedte verschillen (6 – 15 mm) en gevuld zijn met lucht of een ander gas met isolerende werking (bijvoorbeeld argongas). Naast dubbel glas wordt vanwege de goede isolerende eigenschappen ook steeds vaker driedubbel glas (tripel glas) toegepast. Driedubbel glas is glas dat bestaat uit drie glaslagen met tussen iedere glaslaag een spouw. Het gedrag van isolatieglas bij brand komt overeen met dat van enkel glas; elke glaslaag zal echter afzonderlijk van de andere glaslagen breken. Daarnaast kunnen de voorliggende glaslagen na het breken deels blijven hangen in het kozijn en zo een afschermdende en vertragende werking hebben op het breken van de volgende glaslaag. De bevestiging van isolatieglas is meestal degelijker dan die van enkel glas. Ook dubbel glas zal na enkele minuten bij vlamcontact breken en bezwijken; bij driedubbel glas zal dit langer duren. Zonder vlamcontact kan er nog steeds breuk in de glaslagen optreden; dit heeft echter niet altijd het uitvallen en bezwijken van het glas tot gevolg.

Brandwerende beglazing

Er bestaan verschillende soorten brandwerende beglazing. Hieronder worden de belangrijkste hoofdsorten toegelicht.

Gehard en spiegeldraadglas

Gehard glas en spiegeldraadglas (gewapend glas) zijn in beperkte afmetingen brandwerend. Deze glassoorten blijven enige tijd intact, maar laten de warmte (straling en geleiding) wel door. Gehard glas gedraagt zich anders dan ongehard glas. Als gehard glas bezwijkt, ontstaan er geen grote scherven, maar breekt het in kleine korrelachtige stukjes. Hierdoor wordt de kans op snijwonden aanzienlijk vermindert; vandaar dat deze glassoort ook veel wordt toegepast in situaties waar er kans is op doorvallen. Gewapend glas is voorzien van een fijnmazige ingegoten (ingewalste) kruiswapening. Dit glas kan ook bezwijken, maar door de wapening blijft de ruit intact.

Gecoat gehard glas

Een speciale vorm van gehard glas is thermisch gehard glas voorzien van een reflecterende coating. Deze coating is hittebestendig en reflecteert de straling die bij brand op het glas valt, waardoor het de straling tegenhoudt. De coating moet echter wel naar de vuurzijde gericht zijn. Door de reflectie van de straling warmt het glas minder snel op, waardoor het betere brandwerende eigenschappen heeft dan gehard glas zonder coating.

Gelaagd glas met verkolende gellaag

Dit type brandwerend glas bestaat uit minimaal twee lagen ongehard glas met daartussen een dunne gellaag van epoxyhars. Na het breken van één van de glaslagen reageert de epoxyhars met de warmte en zorgt ervoor dat bij het breken van de glaslagen het glas bijeen gehouden wordt. Hoewel de gellaag de achterliggende glaslaag beschermt, kan ook deze breuken vertonen. De epoxyhars verkoolt tijdens verhitting, waardoor het glas ondoorzichtig wordt. De verkolende gel houdt met name de straling tegen.

Gelaagd glas met opschuimende gellaag

Ook dit type brandwerend glas bestaat uit minimaal twee lagen ongehard glas; de dunne gellaag bestaat echter veelal uit sodiumsilicaat. Na het breken van een van de glaslagen reageert het sodiumsilicaat door op te schuimen. De opschuimende gel houdt het glas bij elkaar en verkleurt in eerste instantie wit en later geel tot bruin. De opschuimende gel werkt isolerend, waardoor naast de straling ook de warmtegeleiding door de glasconstructie beperkt wordt.

4.2.6 Isolatiematerialen

Isolatiematerialen bestaan in diverse soorten, van zeer brandbaar tot niet of nauwelijks brandbaar. Het gedrag van deze materialen bij brand is sterk afhankelijk van de materiaal-eigenschappen en de toepassing in combinatie met andere materialen. Hieronder wordt per hoofdsort een nadere toelichting gegeven.

Natuurlijke isolatiematerialen (plantaardige producten)

Voorbeelden van natuurlijke isolatiematerialen zijn stro, vlas, kurk, schapenwol en riet. Deze materialen werden in het verleden al gebruikt als isolatiemateriaal en worden vanwege duurzaamheidsdoelstellingen en circulariteit ook steeds meer toegepast in nieuwe gebouwen. Het nadeel van deze materialen is dat ze veelal (zeer) brandbaar zijn. Hierdoor kunnen ze bijdragen aan de branduitbreiding in constructies.

Kunststof isolatiematerialen

Deze soort isolatiematerialen is een grote groep met diverse eigenschappen en toepassingen. Deze isolatiematerialen worden gevormd uit een residu van aardolie. Dit betekent dat ze in basis brandbaar zijn. Door toevoegingen kan de brandbaarheid echter worden beperkt. Deze materialen worden in gebouwen veelvuldig toegepast, onder andere omdat ze eenvoudig bewerkt kunnen worden.

Een bekend voorbeeld van deze isolatiematerialen is polystyreenschuim (EPS en XPS). EPS staat voor geëxpandeerd schuim, ook wel bekend als 'piepschuim'; platen van EPS bestaan uit kleine schuimbolletjes. XPS staat voor geëxtrudeerd schuim en wordt met een uitzetmiddel direct tot platen geperst. Bij brand (opwarming) kan polystyreen weer vloeibaar (thermoplastisch) worden en daardoor een bijdrage leveren aan de branduitbreiding. Polystyreen wordt gezien als (zeer) brandbaar.

Andere bekende voorbeelden zijn polyurethaanschuim (PUR) en polyisocyanuraatschuim (PIR). In tegenstelling tot polystyreenschuim zijn deze schuimen beide thermoharders, wat betekent dat ze bij verwarming niet vloeibaar worden. PIR heeft betere brandvertragende eigenschappen dan PUR, maar beide schuimen hebben betere brandvertragende eigenschappen dan polystyreen en kunnen worden gezien als moeilijk brandbaar.

Minerale isolatiematerialen

Deze soort is een verzamelnaam voor isolatiematerialen die zijn gemaakt van glas of steen. Deze isolatiematerialen worden onder hoge temperatuur vervaardigd. De bekendste voorbeelden zijn glas- en steenwol. Doordat deze materialen gemaakt zijn van glas of steen, zijn ze nagenoeg onbrandbaar. Glaswol wordt bij een temperatuur van ongeveer 700 °C brandbaar en steenwol bij een temperatuur van ongeveer 1100 °C. Veelal zal het bindmiddel in deze materialen dan gaan branden.

4.2.7 Bitumen

Asfalt, teer, mastiek, rubberoïd en andere bitumineuze producten worden veel gebruikt om daken en kelderwanden waterdicht te maken, of om stalen pijpen of tanks te beschermen. Daarnaast wordt dit materiaal gebruikt als grondstof voor golfplaten, die vooral in de landbouw veel worden toegepast. Bitumen smelt tussen 150°C en 180 °C, waarbij de dampen makkelijk ontvlammen. Gesmolten bitumen druipt vaak brandend neer, waardoor verwondingen of branduitbreiding kunnen ontstaan. Bitumen levert weinig brandgevaar op wanneer het direct op beton wordt geplakt en wordt afgedekt met 3 cm grind. Het wordt

echter ook toegepast op houten dakbeschot, op stalen daken samen met kunststofschuim en als imitatie-leien (de zogenaamde shingles). Door het afdekken met ballastgrind of afstrooien met leislag (fijngemalen leisteen) kan de brandbaarheid van bitumen zo worden geremd dat ontsteking van dit materiaal door vlieg vuur onwaarschijnlijk is. Op daken aangebrachte bitumineuze producten die aan het oppervlak niet of onvoldoende beschermd zijn, zorgen bij een brand in de directe omgeving voor een groot risico op brandoverslag door vlieg vuur (vooral horizontale vlakken) en straling (vooral bij schuine of vrijwel verticale vlakken). Houd daarom in die gevallen steeds rekening met brandoverslag.

4.2.8 Europese klassering van materiaalgedrag

In NEN-EN 13501-1 is een classificatiesysteem voor het brandgedrag van bouwproducten opgenomen. Dit classificatiesysteem onderscheidt zeven brandklassen: A1, A2, B, C, D, E en F. Er wordt een verdeling gemaakt in materialen die het minst brandbaar zijn (A1) tot materialen die onbeperkt brandbaar zijn (F). Producten of materialen die vallen in categorie F zijn niet getest, maar zijn uiterst brandbaar. In tabel 4.4 zijn de verschillende brandklassen weergegeven met omschrijving en een aantal voorbeelden van materialen per klasse.

Tabel 4.4 Euro brandklassen (Bron: EN 13501-1) en voorbeelden van materialen per klasse

Klasse	Omschrijving	Voorbeeld (bouw)materialen
A1	Materialen die niet bijdragen aan de brand, ook niet bij een volledig ontwikkelde brand.	Baksteen, beton en minerale wol.
A2	Materialen die bij een volledig ontwikkelde brand niet bijdragen aan de vuurlast en de branduitbreiding. Praktisch onbrandbaar.	Gipskartonbeplating.
B	Moeilijk brandbare materialen, die een beperkte bijdrage leveren aan brandgevaar.	PVC-vloerbedekking, cementgebonden spaanplaat, PIR en PUR.
C	Materialen met een beperkt risico op branduitbreiding wanneer ze blootstaan aan de hitte van vlammen. Brandbare materialen die een bijdrage leveren aan brandgevaar.	Zwaardere houtsoorten
D	Goed brandbare materialen, die een grote bijdrage leveren aan brandgevaar.	De meeste houtsoorten, onbehandeld multiplex, MDF, OSB, spaanplaat, hardboard (s2).
E	Materialen in deze klasse leveren een zeer hoge bijdrage aan de brand.	Kunststoffen, EPS en XPS.
F	Materialen waarvoor geen reactie op brandvoorplantingseisen wordt bepaald. Uiterst brandbare materialen.	Niet geteste materialen

4.3 Constructiegedrag bij brand

Bouwconstructies kunnen het begeven door verhitting of afkoeling. Materialen waaruit bouwconstructies zijn opgebouwd, moeten daarom voldoen aan verschillende eisen. Zo mag de hoofdraagconstructie gedurende een bepaalde tijd niet haar sterkte verliezen door hitte of de inwerking van andere krachten zoals wind, sneeuw of vloerbelasting. Een gebouw moet mensen beschermen tegen de risico's van rook en hitte en een brandweerinzet mogelijk maken. Een goed ontwerp en de juiste materiaalkeuze zijn daarom cruciaal om de brandveiligheid te waarborgen en het risico op instorting te beperken. Kennis over materiaalgedrag en bouwconstructies is essentieel voor een veilige en effectieve brandbestrijding.

Definitie van bouwconstructies

In de bouwregelgeving (Bouwbesluit 2012) wordt een bouwconstructie omschreven als elk deel van een bouwwerk dat is bestemd om belasting te dragen. Dit kan bijvoorbeeld een dragende wand, een vloer, een trap of hellingbaan, een ruit of een dakconstructie zijn.

Bij constructiegedrag speelt de brandwerendheid een belangrijke rol. In de meeste gebouwen zullen de belangrijkste constructies gedurende een bepaalde tijd brandwerend zijn. Deze brandwerende constructies hebben verschillend bezwijkgedrag bij brand. Dit wordt in de volgende paragrafen nader toegelicht. Er wordt niet gepoogd om een uitputtend overzicht te geven van geldende regelgeving en bijbehorende bepalingmethoden; enkel een aantal hoofdbegrippen wordt behandeld.

Praktijk

Uit de praktijk blijkt echter dat brandscheidingen vaak niet of niet goed zijn aangebracht of dat ze in de loop der tijd doorbroken of verwijderd zijn. De operationeel leidinggevenden van de brandweer zullen zich door een goed uitgevoerde verkenning steeds een beeld moeten vormen van de invloed van de brand op de constructies. Het gaat hierbij om de volgende constructies:

- > wanden tussen verschillende woningen of gebouwen
- > vloeren tussen verschillende verdiepingen
- > wanden van ruimtes met een hoge of bijzondere vuurbelasting
- > wanden ter bescherming van vluchtroutes
- > buitenwanden van gebouwen
- > daken van gebouwen (die tussen hogere bouwwerken liggen)
- > draagconstructies van gebouwen met verdiepingen.

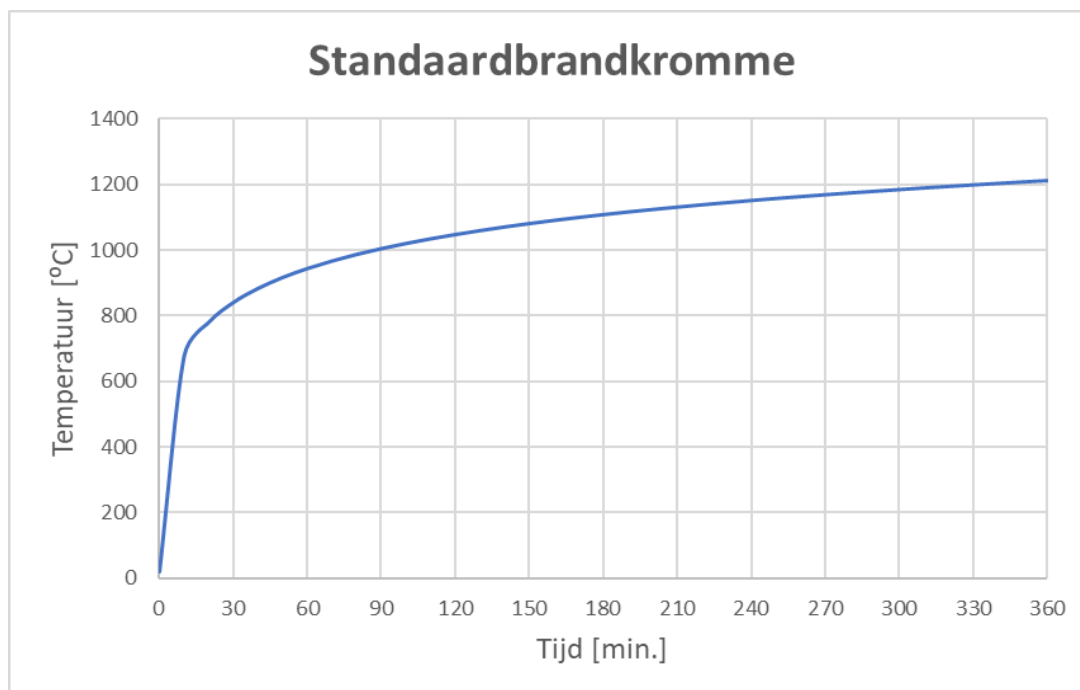
4.3.1 Brandwerendheid en bepalingmethoden

Met betrekking tot de brandwerendheid van constructies kan onderscheid gemaakt worden tussen brandwerendheid op bezwijken van dragende constructies en brandwerendheid op de scheidende functie van constructies. Voor het vaststellen van het verwacht gedrag van constructies bij brand worden twee bepalingmethoden gehanteerd: een experimentele (brandproef of test) en een rekenkundige (berekening).

Experimentele bepalingmethode

De brandwerendheid van constructies kan experimenteel door middel van een brandtest worden bepaald. Hierbij wordt een oven met een gecontroleerd temperatuursverloop gebruikt om de constructie te testen. In de veel gevallen in gebouwen wordt daarbij gebruik gemaakt van de standaardbrandkromme volgens NEN-EN 1363-1, zie figuur 4.7. Deze standaardbrandkromme representeert een thermische belasting van een volledig

ontwikkelde brand na flashover. Op basis van metingen en waarnemingen wordt vervolgens de brandwerendheid vastgesteld.



Figuur 4.7 Standaardbrandkromme volgens NEN-EN 1363-1

Brandwerendheidscriteria

In NEN-EN 13501-2 is een classificatiesysteem opgenomen voor de brandwerendheid van bouwproducten en bouwdelen. De belangrijkste criteria en gebruikte letters voor de classificatie zijn:

- > **Dragende functie (R):** De (scheidings)constructie bezwijkt niet.
- > **Vlamdichtheid betrokken op afdichting (E):** De scheidingsconstructie voorkomt dat vlammen en hete gassen doordringen tot de niet-verhitte zijde. Dit betekent dat tijdens brand geen (te) grote openingen of spleten in de constructie mogen ontstaan.
- > **Thermische isolatie gericht op de oppervlaktetemperatuur (I):** De scheidingsconstructie beperkt de temperatuurstijging van het oppervlak aan de niet-verhitte zijde tot maximaal 180 °C lokaal of 140 °C gemiddeld.
- > **Thermische isolatie gericht op de warmtestraling (W):** De scheidingsconstructie zorgt ervoor dat de warmtestraling niet groter wordt dan 15 kW/m² op een afstand van 1 m aan de niet-verhitte zijde van de scheiding.

De criteria E, I en W gelden voor de niet-verhitte zijde van een geteste scheidingsconstructie. Hierbij geldt als doel dat branduitbreiding wordt voorkomen. Welke combinatie van criteria van toepassing is, hangt af van eis voor, de plaats en de functie van de (scheidings)constructie.

Rekenkundige bepalingmethode

Naast de experimentele methode bestaat ook een rekenkundige bepalingmethode. Deze kan worden toegepast als sprake is van standaard materialen zoals hout, staal en beton. Er zijn Europese rekenmethoden (Eurocodes) opgesteld voor deze standaard materialen, gebaseerd op basis van kennis uit brandproeven.

Eurocodes

Eurocodes zijn Europese normen voor het beoordelen van de constructieve veiligheid van bouwconstructies. Deze codes worden aangestuurd via de Nederlandse regelgeving. Elk land heeft de mogelijkheid om via een Nationale Bijlage bepaalde aspecten van het veiligheidsniveau te regelen. Door het toepassen van de Eurocodes wordt het makkelijker om op de Europese markt te opereren; de Eurocodes streven immers naar uniforme berekeningsmethoden voor constructieve veiligheid.

Voorbeelden van Eurocodes voor het ontwerpen van constructies bij brand zijn:

- > Eurocode 1: Algemene belastingen
- > Eurocode 2: Betonconstructies
- > Eurocode 3: Staalconstructies
- > Eurocode 5: Houtconstructies.

4.3.2 Brandwerendheid op bezwijken

Om te voorkomen dat een gebouw bezwijkt onder invloed van brand worden er eisen gesteld aan de brandwerendheid van dragende constructies. Een gebouwconstructie moet enige tijd blijven staan om personen de kans te geven het gebouw te verlaten en de brandweer tijd te geven het gebouw te doorzoeken. De brandwerendheid van een draagconstructie geeft dus de tijd aan voordat deze bezwijkt onder invloed van een brand. Hierbij gaat het erom dat het bezwijken van een constructie-element niet leidt tot een voortschrijdende instorting. De brandwerendheid op de dragende functie moet dus een voortschrijdende instorting voorkomen. De eisen voor de brandwerendheid zijn afhankelijk van de functie en hoogte van het gebouw en worden uitgedrukt in minuten. In de brandwerendheidseisen wordt onderscheid gemaakt tussen 30, 60, 90 en 120 minuten.

4.3.3 Brandwerendheid van scheidende constructies

Naast de brandwerendheid op de dragende functie gelden er ook eisen voor de brandwerendheid op de scheidende functie. Deze eisen hebben als doel om personen te beschermen tegen snelle branduitbreiding. Daarom worden er eisen gesteld aan de weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag (WBDBO) tussen ruimtes. Brandoverslag staat voor branduitbreiding via de buitenlucht en branddoorslag voor alle andere branduitbreidingstrajecten (binnendoor, dus niet via de buitenlucht). De WBDBO resulteert uiteindelijk in een brandwerendheid voor scheidende constructies zoals wanden en vloeren. Deze constructies moeten bij brand dus voldoende brandwerend zijn om branduitbreiding te voorkomen. De brandwerendheid geeft de tijd aan die een constructie bestand is bij blootstelling aan een (standaard) brand. Dit wordt door middel van brandproeven vastgesteld, zie paragraaf 4.3.1. De brandwerendheid heeft een bepaalde richting waarin die geldt, omdat de eis geldt tussen ruimtes. In de WBDBO-eisen wordt daarbij onderscheid gemaakt in 20 minuten (voor bestaande bouw), 30 en 60 minuten.

Brandwerendheid in de praktijk

De daadwerkelijke brandwerendheid van constructies bij brand is voor zowel dragende als scheidende functies afhankelijk van diverse factoren, bijvoorbeeld de daadwerkelijke thermische belasting. Zoals in hoofdstuk 3 is weergegeven, kan een brand zich op verschillende manieren ontwikkelen in een gebouw. Elk brandscenario heeft een bijbehorende thermische belasting tot gevolg. Deze thermische belasting is anders dan de thermische belasting waarmee de constructie belast is tijdens een brandproef. Hierbij speelt niet alleen de hoogte van de thermische belasting (temperatuur) een rol, maar ook snelheid van de toe- of afname van die belasting. Een brandwerende constructie wordt bij een daadwerkelijk brand dus heel anders belast dan waarop die is getest.

De thermische belasting heeft ook een opwarming van de constructie tot gevolg die anders is dan in de geteste situatie. Constructie materialen kunnen hierdoor een andere respons (vervorming) vertonen dan in de geteste situatie. Daarnaast kan ook het samenstel van constructie-elementen in de praktijk voor een andere respons bij brand zorgen, omdat veelal een beperkte omvang van de constructie wordt getest door de beperkte omvang van de oven. Hier staat tegenover dat in brandproeven uitgegaan wordt van een temperatuurkromme bij een volledig ontwikkelde brand na flashover.

4.3.4 Gedrag van draagconstructies

Bij draagconstructies treden onder invloed van brand veelal vervormingen op. Constructies kunnen dusdanig sterk vervormen dat ze de belasting niet meer kunnen dragen en ze bezwijken. Hierbij is niet alleen de vervorming van het afzonderlijke constructie-element van belang, maar ook die van de gehele constructie. Met name bij de toepassing van verschillende constructiematerialen kunnen verschillen in vervorming optreden die leiden tot bezwijken van de constructie.

Kolommen en draagbalken

Kolommen zijn veelal de zwaarst belaste bouwonderdelen. Ze zijn vaak slank uitgevoerd en worden bij brand aan alle zijden verhit als ze vrij in een ruimte staan. Draagbalken worden ook zwaar belast, maar kunnen minder snel opwarmen, omdat ze meestal niet aan alle zijden verhit worden. De zijde van draagbalken waarop de vloer rust, wordt bij brand niet blootgesteld aan de hoge temperatuur. Het bezwijken van kolommen of draagbalken heeft meestal een ernstige instorting of beschadiging van het gebouw tot gevolg. Door uitzetting van (vooral stalen) kolommen en draagbalken kunnen steun- en oplegpunten ernstig worden beschadigd. Kolommen en draagbalken kunnen gemaakt zijn van hout, staal, metselwerk, (voorgespannen) beton en gietijzer. Metselwerk en gietijzer zijn alleen geschikt voor kolommen en niet voor draagbalken, omdat ze wel drukkrachten, maar geen trekkrachten kunnen verwerken.



Figuur 4.8 Draagconstructies bij brand (Bron: E.J. Huizer)

Houtconstructies

Hoewel hout een brandbaar materiaal is, hoeft een houtconstructie het bij brand niet altijd snel te begeven. Zoals al uitgelegd in paragraaf 4.2.1 is de inbrandsnelheid van hout laag (ongeveer 4 cm per uur), omdat de koollaag bij brand het hout eronder beschermt. Hoe zwaarder de houten balk, hoe langer het duurt voordat de sterkte terugloopt. Zware houten balken hebben hierdoor een goede weerstand tegen hoge temperaturen. Als er echter hout met een kleine doorsnede gebruikt wordt (zoals in vakwerkconstructies of planken vloerdelen), zal de constructie snel wegbranden. Bij brand moet speciaal op de houtverbindingen

worden gelet. De inkepingen in deze houtverbindingen maken de doorsnede van de balk namelijk kleiner. Als de houten constructie met metalen delen samengevoegd is (ankers, spijkerplaten en dergelijke), dan is de sterkte van de constructie ook afhankelijk van de sterkte van het metaal. Wanneer hout is bepleisterd of betimmerd met brandwerend plaatmateriaal, dan vertraagt dat de inbranding van het hout. Dit verhoogt de brandwerendheid van de constructie als geheel.

Staalconstructies

Staal heeft, wanneer het zonder bescherming aan hoge temperaturen wordt blootgesteld, een geringe brandwerendheid (minder dan 30 minuten) met betrekking bezwijken. Als de kritische temperatuur van staal wordt bereikt, dan bezwijkt de constructie, zie ook paragraaf 4.2.2. De opwarming van staal is afhankelijk van de verhouding tussen het verhitte oppervlak en de staal massa. Dit wordt ook wel de profielfactor genoemd, zie het kader hieronder.

Profielfactor

Bij slanke stalen profielen is het verhitte oppervlak relatief groot ten opzichte van de staal massa. Een licht stalen profiel zal daardoor snel opwarmen, waardoor snel de kritieke staaltemperatuur wordt bereikt en het profiel zal bezwijken. Hoe snel dit gebeurt, is afhankelijk van de profielfactor. De profielfactor is de verhouding tussen de omtrek van de verhitte doorsnede ten opzichte van het oppervlak van de gehele doorsnede. Bij een hoge profielfactor is er relatief veel oppervlak dat ten opzichte van de massa wordt verhit.

Een licht stalen profiel zal daardoor snel bezwijken, een zwaar stalen profiel zal het langer uithouden. Een staalconstructie kan tegen hoge temperaturen worden beschermd door ze in te metselen, te bepleisteren, betimmeren (met plaatmateriaal) of te behandelen met een speciale brandwerende verf.

Betonconstructies

Een constructie van gewapend beton heeft veelal een goede brandwerendheid (60 tot wel 120 minuten). Ook hier hangt de weerstand tegen hoge temperaturen af van de verhouding tussen het verhitte oppervlak en de massa van de constructie. Bij beton is vooral de betondekking op de wapening van belang. Voorgespannen beton is (onbeschermd) minder betrouwbaar bij brand. De brandwerendheid ligt in ieder geval lager (30 tot 60 minuten) dan bij een normale gewapende betonconstructie. Bij betonconstructies is het daarom belangrijk om te weten of het gaat om een constructie van voorgespannen beton of om een normale gewapende betonconstructie. Je kunt een voorgespannen betonligger vaak herkennen doordat deze is geprofileerd (zoals een stalen ligger). Een normale gewapende betonligger heeft een rechthoekige doorsnede.

Gemetselde constructies

Gemetselde kolommen van baksteen gedragen zich bij brand goed. Dergelijke kolommen komen in Nederland bijna alleen nog voor in oude monumentale gebouwen. Deze kolommen zijn in die gebouwen zo zwaar uitgevoerd, dat de kern niet of nauwelijks warm kan worden. Hooguit kunnen er bij verhitting stukken van het steenoppervlak afspringen.

Gietijzeren constructies

Gietijzer heeft een goede druksterkte. Daarom is het materiaal in het verleden veel toegepast voor kolommen. In oudere gebouwen kunnen nog gietijzeren kolommen worden aangetroffen. De liggers zijn dan van hout of staal. Gietijzeren kolommen hebben een wat

hogere brandwerendheid dan onbeschermd staal. Bij een plotselinge afkoeling van de verhitte kolom (bijvoorbeeld tijdens een blussing) kan het materiaal kapot springen.

4.3.5 Gedrag van wandconstructies

Een wand is een scheiding tussen verschillende ruimtes in een gebouw. Als de wand van steen (metselwerk) of beton is, wordt hij een (binnen- of buiten)muur genoemd. Wand en kunnen behalve een scheidende ook een dragende functie hebben. Bij traditionele constructies zijn zowel de buitenmuren als een deel van de binnenmuren dragende wanden. Bij skeletbouw echter, waarbij een stalen, houten of betonnen draagconstructie de krachten opneemt, hebben de wanden uitsluitend een scheidende functie. Bij brandbestrijding is het belangrijk om te weten of een wand alleen een scheidende of ook een dragende functie heeft.

Buitenmuren

Buitenmuren storten meestal naar buiten toe in. Hierbij breekt de wand in stukken. Muren die losstaan door bijvoorbeeld gescheurde voegen of omdat de verankering het heeft begeven, vormen tijdens (en ook na) de brand een voortdurend gevaar. Omhalen van deze muren kan noodzakelijk zijn. De veiligheidsafstand die dan moet worden aangehouden is 1,5 keer de hoogte van de muur. Bij wanden die uit verschillende onderdelen zijn samengesteld (zoals regelwerk met beplating), is een juiste en zorgvuldige afwerking van naden en aansluitingen belangrijk voor de mate van weerstand tegen branddoorslag en brandoverslag.

Bouwmuren

Scheidende wanden tussen woningen of gebouwen noemen we ook wel bouwmuren. Voor brandwerende bouwmuren gelden WBDBO-eisen. Deze binnenwanden moeten bij brand doorslag voorkomen. Bij buitenwanden kan daarnaast ook een bescherming tegen brandoverslag van toepassing zijn. Bouwmuren en buitenwanden worden veelal uitgevoerd als spouwmuren met spouwbladen van minimaal 10 cm dik uitgevoerd in combinaties van metselwerk, kalkzandsteen of beton. Zowel de houten balken als de vloer- en dakconstructie (dakbeschot) dienen ter plaatse van de bouwmuur onderbroken te zijn. Hierdoor kan de brand zich niet via deze elementen van de ene woning naar de andere uitbreiden. Ook dienen er geen openingen in de bouwmuren aanwezig te zijn. In de praktijk blijken tijdens de brandbestrijding op dit vlak nogal eens tekortkomingen aanwezig te zijn.

Boven het dak uitstekende brandmuren

Afhankelijk van het risico op branduitbreiding naar een aangrenzend pand (bijvoorbeeld door de soort en de hoeveelheid opgeslagen goederen), kan de eis worden gesteld om een bouwmuur door te trekken tot boven het dak. Zo'n boven het dak uitstekende brandmuur heeft een hoge brandwerendheid. Het zijn vaak stenen of betonnen muren die de gebouwen volkomen scheiden. Ook branduitbreiding via de dakbedekking of brandoverslag via een opening in het dak wordt door een boven het dak uitstekende brandmuur voorkomen.

4.3.6 Gedrag van plafond- en vloerconstructies

Een goede vloerconstructie kan branduitbreiding naar hogere en lagere verdiepingen verhinderen. Vloeren scheiden de verdiepingen, dragen de belasting, maken het totale gebouw stabiel (stijfheid) en vormen een horizontale brandscheiding. Bij brand kunnen vloerconstructies het begeven door inwerking van hoge temperaturen (inbranding), ongelijkmatige uitzetting en instorting door overbelasting.

Afwerking van vloeren

Vloeren van hout of van steenachtig materiaal zijn aan de bovenzijde vaak afgewerkt met vloerafwerking zoals keramische of kunststoftegels, linoleum, kunststof vloerbedekking of tapijt. Met uitzondering van keramische tegels zijn al deze vloerbedekkingen in meerdere of mindere mate brandbaar en dragen daardoor bij aan de branduitbreiding. Verdiepingsvloeren zijn aan de onderkant vaak afgewerkt met een plafond.

Verlaagde plafonds

Verlaagde plafonds kunnen tijdens het brandweeroptreden voor extra gevaar zorgen. Boven dergelijke plafonds kunnen zich branden ontwikkelen die niet altijd zichtbaar zijn. Bovendien kunnen deze branden zich ongecontroleerd uitbreiden als de brandscheidingen boven het verlaagde plafond onvoldoende brandwerend zijn. Bij snelle branduitbreiding boven verlaagde plafonds lopen deze plafonds een grote kans te bezwijken. Als dit gebeurt, bestaat het risico dat vervolgens vrijwel de hele ruimte in brand komt te staan. De kans op dit type branden hangt sterk af van de mate waarin er zich boven het verlaagde plafond brandbare materialen bevinden.

Massieve vloeren

De brandwerendheid van massieve vloerconstructies kan sterk verschillen. Ze is onder andere afhankelijk van de dikte van de vloer en van de plafondconstructie die onder de vloer is aangebracht. Massieve vloerconstructies geven het gebouw een goede stijfheid. In oudere gebouwen kunnen we nog betonvloeren aantreffen die tussen stalen liggers zijn aangebracht (zie afbeelding c en f in figuur 4.9 op de volgende pagina) De flenzen van de liggers zitten aan de onderkant en soms ook aan de bovenkant in het zicht. Veelvoorkomende massieve vloerconstructies zijn⁵:

- > vloeren van betonnen liggers met daartussen een lichte betonsteen (systeemvloeren) (a)
- > volle gewapende betonvloeren (b)
- > betonvloeren met ingestorte stalen liggers (c / f)
- > vloeren van gewapende steenelementen (holle baksteen) (d)
- > vloeren van gewapend beton op betonnen ribben (e).

Gemetselde gewelven

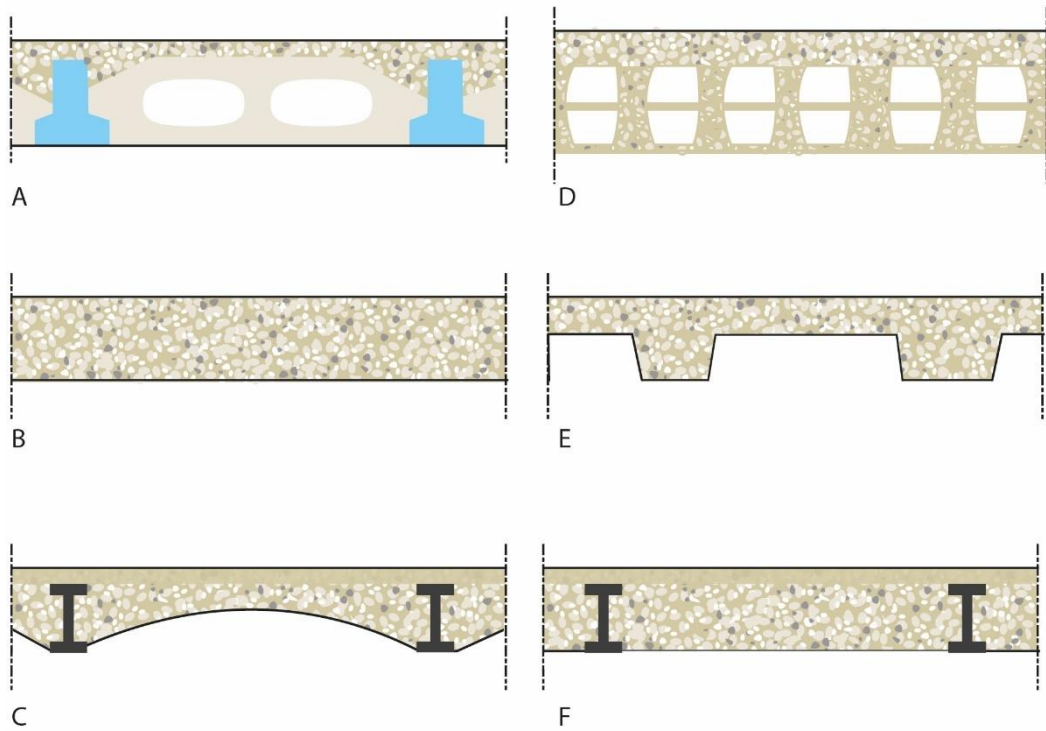
Gemetselde gewelven komen voor in oude gebouwen. Het zijn zware steenconstructies met een goede brandwerendheid (60 tot 120 minuten). Een troggewelf (zie figuur c in figuur 4.9) bestaat uit stalen draagribben waartussen boogvormig metselwerk of beton is aangebracht. De onderzijde van de draagribben ligt meestal in het zicht. Doordat het grootste deel van de stalen draagribben bij brand niet direct aan hoge temperaturen wordt blootgesteld, heeft zo'n constructie toch een redelijke brandwerendheid op bezwijken (tot 60 minuten). Er zijn gewelven waarbij de naar buiten gerichte krachten op de dragende muren opgevangen worden door trekstangen. Als de trekstang het begeeft, zullen de muren naar buiten worden gedrukt en stort het gewelf in. De brandwerendheid op bezwijken van dit gewelf hangt af van de isolatie van de trekstangen.

Vloeren van hout

Bij een houten vloer is de balklaag ingekast in de dragende muur en daaraan verbonden met ankers. De balken verankeren in feite de muren. Meestal is op een houten balklaag een houten vloer gelegd. Onder de balklaag is dan vaak een plafond van bijvoorbeeld stucwerk, boardplaten of gipsplaten aangebracht. Een houten balklaag met een vloer waaronder geen

⁵ De letters in figuur 4.9 corresponderen met de hieronder genoemde constructies.

plafond zit, zal bij brand vrij snel zijn weggebrand. De brandwerendheid van een houten vloer hangt dus voor een belangrijk deel af van de plafondconstructie die onder de vloer is aangebracht.



Figuur 4.9 Doorsnede van stenen vloeren

5 Mensfactoren

Een professional neemt niet alleen vakmanschap mee naar het incident, maar ook menselijke eigenschappen. De meeste van onze eigenschappen zijn niet ontwikkeld voor het functioneren onder extreme omstandigheden, maar meer voor dagelijkse bezigheden. Het is daarom niet meer dan logisch dat er bij onverwachte gebeurtenissen zoals incidenten wel eens wat misgaat. Denk aan inschattingfouten, miscommunicatie en verlies van overzicht, wat zelfs hulpverleners die zijn getraind in het bestrijden van incidenten zomaar kan overkomen. Dit geldt niet alleen voor uitvoerende brandweermensen zoals manschappen en chauffeurs, maar ook voor incidentmanagers zoals bevelvoerders en (Hoofd)Officieren van Dienst.

De invloed van menselijke kenmerken of personeuseigenschappen op ons functioneren in alledaagse én uitzonderlijke omstandigheden staat ook wel bekend als de 'human factor'. Dit hoofdstuk beschrijft de invloed van een aantal goed onderzochte mensfactoren op het brandweeroptreden bij gebouwbranden. In paragraaf 5.1 worden de mensfactoren behandeld die door het incidenttype brand worden getriggerd, waarna in paragraaf 5.2 de risicopersoonlijkheid van brandweermensen wordt toegelicht. Hierna zoomen we in paragraaf 5.3 in op stress en in paragraaf 5.4 op besluitvorming onder tijdsdruk. FABCM, het besluitvormingsmodel dat centraal staat in situationele commandovoering, is het onderwerp van paragraaf 5.5. Dit model biedt handvatten voor het structureren van de besluitvorming tijdens incidenten zoals gebouwbranden, rekening houdend met de invloed van mensfactoren. We ronden het hoofdstuk in paragraaf 5.6 af met een handelingsperspectief voor het omgaan met mensfactoren tijdens de incidentbestrijding.

5.1 Het incident en de mens

Tijdsdruk, onzekerheid en dreiging – allemaal zaken waarmee de brandweer te maken kan krijgen bij een gebouwbrand – spelen een rol bij incidentbestrijding. Deze factoren beïnvloeden je functioneren, onder andere door de volgende valkuilen van menselijk gedrag op te roepen:

- > 'fiddling around'
- > 'groupthink'
- > tunnelvisie
- > 'confirmation bias'
- > tijdscompressie
- > informatiezucht.

Deze valkuilen beïnvloeden ons vermogen om een duidelijk beeld te vormen van het incident. Hieronder wordt elke valkuil afzonderlijk toegelicht.

5.1.1 Fiddling around

Fiddling around is de neiging van mensen om in een probleemsituatie deelprobleempjes bijna onbewust en op basis van vaardigheden aan te pakken, met als gevolg dat zij de grote lijn uit het oog verliezen. Manschappen kunnen dit ervaren wanneer zij op de automatische piloot een binneninzet uitvoeren. De deurprocedure verloopt volgens plan, maar is de aanvalsploeg ondertussen bezig met een veilige en effectieve binneninzet? Weten de ploeg en de bevelvoerder wat er binnen te halen valt? Is iedereen zich bewust van het doel van de binneninzet en van de risico's waartegen dit doel is afgewogen?

Als bevelvoerder of Officier van Dienst herken je fiddling around wellicht als je te veel op details en procedures 'in het incident duikt', in plaats van eerst overzicht te creëren. Je geeft jezelf dan niet de mogelijkheid om een totaalbeeld van het incident en de bestrijding daarvan te krijgen. Dit risico is er ook als je te veel laat meevoeren door de lopende inzet op het moment dat je ter plaatse komt. Even de tijd nemen om die inzet samen met de eerste bevelvoerder tegen het licht te houden en af te wegen tegen de actuele omstandigheden loont altijd de moeite. Die tijd wordt later weer teruggewonnen met een effectievere inzet. Tijd kopen is een uitstekend medicijn tegen fiddling around.

5.1.2 Groupthink

Brandweermensen treden in principe altijd in teamverband op: in ploegverband met de bevelvoerder en in pelotonsverband met de Officier van Dienst als leidinggevende. Het gezamenlijk handelen van zo'n groep is genormeerd door gewoontes, procedures en ongeschreven regels. Deze helpen ons om de samenwerking en handelingen in teamverband vrijwel geautomatiseerd te laten verlopen, wat cruciaal is bij optreden onder tijdsdruk zoals bij gebouwbranden. Maar durf je af te wijken van de procedure wanneer het incident daarom vraagt? Of houdt het 'gewoonterecht' of de 'groepscultuur' je dan tegen, omdat je geen dissonant of dissident wilt zijn? Wanneer je hier in alle eerlijkheid 'ja' op moet zeggen, heb je ervaring met groupthink (groepsdenken).

Groupthink is de neiging van groepen om ter vermijding van conflicten te snel een gangbare keuze te maken. Het team neemt dan onvoldoende tijd voor het afwegen van relevante alternatieven en loopt hierdoor het risico om een niet-optimale keuze te maken. Tegen beter weten in blijf je samen met je teamcollega's een bepaalde aanpak volgen, omdat je niet durft af te wijken van de groepsnorm. Tegenspraak past misschien ook niet zo goed bij de brandweercultuur. In die cultuur kan tegenspraak worden opgevat als tijdsverspilling en/of een soort conflict. Hoe begrijpelijk het ook is dat je je wilt aanpassen aan die cultuur, wees je ervan bewust dat groupthink ook risico's kan veroorzaken. Wanneer je intuïtief aanvoelt dat de gekozen aanpak bij een inzet tot grote risico's leidt en je je hierdoor onveilig voelt, geef dit dan direct aan bij de bevelvoerder of Officier van Dienst. Die kan er dan voor kiezen om de inzet tijdig bij te sturen of af te breken. Twijfel je er als manschap, tweede bevelvoerder of Officier van Dienst aan of de eerste bevelvoerder iets wel of niet heeft gezien? Check dit dan door hier bij de eerste bevelvoerder navraag naar te doen!

5.1.3 Tunnelvisie

'Tunnelvisie' betekent letterlijk een smal blikveld. In de praktijk van de incidentbestrijding vertaalt dit verschijnsel zich als kijken, denken en doen in één richting. De kans hierop is vooral aanwezig als een incident sterk lijkt op een eerder vergelijkbaar incident dat je met succes hebt bestreden. Door de herkenning van de situatie stop je met kijken en kies je direct een oplossing die in de eerdere, vergelijkbare situatie bevredigend was. De ervaring

werkt als een tunnel: een smal blikveld dat een andere, bredere kijk op de situatie belemmert. Hoe meer succeservaringen je met een bepaalde oplossingsrichting hebt, hoe sterker de neiging tot tunnelvisie in vergelijkbare situaties.

De kans op een tunnelvisie is groter bij mensen die moeite hebben om los te komen van hun beeld van het incident. Het beperkte zicht dat ze op dat moment hebben is hun enige houvast en leidt tot een eenzijdige focus op een plan van aanpak dat het beste bij dat beeld past. Als de situatie wijzigt, vinden deze mensen het moeilijk om dat te (h)erkennen en naar een ander plan om te schakelen. Deze vorm van tunnelvisie wordt ook wel planfixatie genoemd.

5.1.4 Confirmation bias

Wanneer we overtuigd zijn van de juistheid van een aanname, idee of theorie zijn we (onbewust) geneigd om selectief met informatie om te gaan. Op die manier houden we ons eigen wereldbeeld in stand. Deze neiging noemen we 'confirmation bias'. Hoewel confirmation bias ook kan optreden zonder dat er sprake is van tijdsdruk of een andere vorm van stress, is er alle reden om aan te nemen dat stress een belangrijke trigger is. Het herzien of nuanceren van een vooroordeel kost tijd en energie, die we bij een brand liever aan de incidentbestrijding besteden.



Figuur 5.1 Om een grote brand beheersbaar te maken, kan omschakelen naar een ander plan nodig zijn (Bron: Gelderland-Zuid)

5.1.5 Tijdscompressie

Wanneer we geconcentreerd met iets bezig zijn, vliegt de tijd. De tijd verloopt dan psychologisch sneller dan in werkelijkheid. Dit verschijnsel noemen we tijdscompressie. Tijdsdruk is een trigger voor tijdscompressie. We doen dan alles zo snel mogelijk en denken dat we hierdoor op tijd zijn, terwijl een blik op de klok leert dat er toch meer tijd is verstreken dan we dachten. Hierdoor gaan we onszelf nog meer onder (tijds)druk zetten, waardoor tijdscompressie tot een vicieuze cirkel leidt. Tijdscompressie betekent dat we er niet goed in zijn om de tijd in de gaten te houden wanneer iets snel af moet zijn. Beter kunnen we dan aan iemand anders vragen om op de tijd te letten, bijvoorbeeld een collega-bevelvoerder.

5.1.6 Informatiezucht

Het opzoeken en analyseren van informatie om mogelijke beslissingen tegen elkaar af te wegen is een goede manier om je besluitvorming te structureren en te onderbouwen. Wanneer je echter informatie blijft opzoeken en wegen en de rij alternatieven steeds langer wordt, is er misschien iets anders aan de hand. Mogelijk ben je dan meer op zoek naar een reductie van je onzekerheid dan naar een tijdig, haalbaar en uitvoerbaar besluit. Of misschien wil je je alvast indekken tegen de mogelijke negatieve gevolgen van het besluit.

Zelfs als er sprake is van tijdsdruk, kan informatiezucht ook toeslaan wanneer je leidinggeeft aan de bestrijding van een gebouwbrand. Behalve tijdsdruk kan zo'n brand immers ook onzekerheid over de mogelijke dreiging oproepen. De behoefte om je besluit nog even uit te stellen en (nog) meer informatie te verzamelen, kan hierdoor toenemen. Wees je ervan bewust dat er bij een incident meestal te weinig tijd is om veel informatie te verzamelen en analyseren. Bovendien kan te veel informatie leiden tot 'information overload' of 'information stress': een vorm van spanning die wordt veroorzaakt door een te grote stroom van informatie. Omdat onze hersenen maar een beperkte hoeveelheid informatie kunnen verwerken, raken we verward wanneer we te veel informatie binnen krijgen. Hierdoor wordt het moeilijk om ons op die informatie te concentreren.

5.2 De risicopersonlijkheid van brandweermensen

Brandweermensen nemen soms onnodige risico's. Het rapport *Veiligheidsbewustzijn bij brandweerpersoneel* van de Inspectie Openbare Orde en Veiligheid (IOOV) uit 2004 toont aan dat brandweermensen risico's soms onvoldoende herkennen of het gevaar wel zien, maar daar tegen beter weten in niet naar handelen. Een voorbeeld van dit laatste is de brand in een cadeauwinkel in Zwolle in 1992, waar tijdens het nablussen een muur instortte. Bij dit incident kwamen twee brandweermensen om. Eerder waren er al brokstukken naar beneden gekomen, zodat de brandweer had kunnen weten dat het pand instabiel was en er dus meer instortingen konden volgen. Toch ging de brandweer opnieuw naar binnen, onder meer om een kassa te redden. Hoewel de twee slachtoffers daar niets meer aan hebben, vormt deze casus een leerzaam voorbeeld van een onnodig risico: het nemen van zo'n risico weegt niet op tegen het 'redden' van een kassa.

De neiging van brandweermensen om onnodige risico's te nemen kan verklaard worden door hun zogenoemde risicopersonlijkheid, die het resultaat is van een samenspel tussen de persoonlijkheidskenmerken van brandweermensen én de cultuur waarbinnen zij opereren. De risicopersonlijkheid is een belangrijke human factor in het brandweeroptreden en staat daarom in deze paragraaf centraal.⁶ Eerst wordt ingezoomd op de persoonlijkheidskenmerken van brandweermensen. Vervolgens wordt aandacht besteed aan enkele psychologische en sociologische mechanismen waardoor mensen onnodige risico's kunnen nemen, los van hun persoonlijkheid. De sociologische mechanismen hangen direct samen met de brandweercultuur.

⁶ De inhoud van deze paragraaf is gebaseerd op het onderzoek naar het risicobewustzijn van brandweermensen van Carlo Mittendorff. Dit onderzoek vormde een integraal onderdeel van het rapport *Veiligheidsbewustzijn bij brandweerpersoneel* van de IOOV uit 2004. Hier past de nuancering dat de genoemde kenmerken niet in dezelfde mate bij alle brandweermensen en -korpsen te vinden zijn.

5.2.1 De persoonlijkheid van brandweermensen

Uit onderzoek blijkt dat brandweermensen bepaalde persoonseigenschappen delen met andere hulpverleners. Het gaat om de volgende persoonlijkheidstrekken:

- > Brandweermensen zijn actiegericht.
- > Brandweermensen kunnen snel beslissen en handelen en zien graag direct resultaat van hun werk.
- > Brandweermensen raken gemakkelijk teleurgesteld en geïrriteerd door zaken en omstandigheden die zij niet kunnen beïnvloeden.
- > Brandweermensen hebben een sterke neiging om hun gevoelens onder controle te houden. Ze verliezen niet graag hun zelfbeheersing, omdat zij dit als teken van zwakte en instabiliteit beschouwen. Ook onderdrukken zij angsten.
- > Brandweermensen hebben een risicozoekende persoonlijkheid. Hierdoor begeven zij zich makkelijker en vaker in gevaarlijke situaties dan anderen.
- > Met dank aan hun actiegerichtheid en voorliefde voor het nemen van risico's staan brandweermensen graag in de publieke belangstelling. Hun werk heeft een hoge attentiewaarde voor publiek en media.
- > Brandweermensen zijn heel loyaal en toegewijd aan hun maatschappelijke taak en combineren die grondhouding met een sterk perfectionisme.
- > Als ze een opdracht krijgen, gaan brandweermensen door tot deze klaar is of tot ze er, bij wijze van spreken, bij neervallen.
- > Brandweermensen hebben een sterke behoefte om nodig te zijn.
- > Brandweermensen willen graag anderen helpen. Deze behoefte zorgt er ook voor dat zij soms verder gaan dan veilig en goed voor ze is.

5.2.2 Psychologie van risico's nemen

Dat brandweermensen meer dan anderen van risico's houden, betekent niet dat zij bij elke inzet onnodige risico's nemen. Daarvoor is meer nodig, onder andere de volgende mechanismen of overtuigingen die worden uitgelokt door omgevingstriggers:

- > risicocompensatie
- > de illusie van onkwetsbaarheid.

Deze twee factoren vormen in aanvulling op de reeds genoemde persoonskenmerken de 'psychologie van het nemen van risico's'. Zij worden hieronder afzonderlijk toegelicht.

Risicocompensatie

Ieder mens heeft de neiging om risico's te nemen, maar de mate waarin varieert van individu tot individu. De theorie van risicocompensatie stelt dat de neiging om risico's te nemen samenhangt met de mogelijke opbrengsten ervan. Tot die opbrengsten behoort niet alleen het te behalen doel, maar ook het gevoel van opwindning dat de beleving van risico's met zich meebrengt. Omdat mensen geneigd zijn om hun risicobeleving in stand te houden, zullen ze hun gedrag aanpassen aan de omstandigheden. Hiervoor biedt de theorie van risicocompensatie een plausibele verklaring. Zo zullen mensen in een grote en luxe auto harder en roekelozer rijden, omdat de snelheid vaak lager lijkt te liggen dan die in werkelijkheid is.

Illusie van onkwetsbaarheid

We horen regelmatig berichten van mensen die iets ergs overkomt, zoals een dodelijk ongeluk. Onze primaire reactie is dan dat we dan denken: 'mij gebeurt dat niet'. Deze gedachte is een overlevingsmechanisme dat ons in staat stelt om zo angstvrij mogelijk te leven. Op een vergelijkbare manier beseffen brandweermensen wel dat aan hun werk allerlei

risico's verbonden zijn, maar hoort het bij hun normale psychologische functioneren om te denken: 'dat gebeurt anderen, maar mij niet'. Deze aanname noemen we de illusie van onkwetsbaarheid. De illusie van onkwetsbaarheid maakt het brandweermensen mogelijk om in het algemeen min of meer angstvrij hun werk te doen, zodat de effectiviteit van hun beroepsmatig functioneren vergroot wordt. Pas wanneer brandweermensen zelf of in hun directe omgeving ongelukken meemaken, veranderen zij hun gedrag en worden ze voorzichtiger. 'Dat gebeurt mij niet' verandert dan in 'dat kan mij ook gebeuren'.

5.2.3 Sociologie van risico's nemen

Behalve de psychologische mechanismen die in de vorige paragraaf zijn besproken, bestaan er ook sociologische mechanismen (omgevingsfactoren die van invloed zijn op menselijk gedrag) die verklaren waarom mensen soms onnodige risico's nemen. Bij brandweermensen zijn de volgende twee omgevingsfactoren van invloed op hun neiging om risico's te nemen:

- > druk van de groep
- > druk van het publiek.

Brandweermensen doen veel om respect en prestige onder hun eigen collega's te verwerven en te behouden. Hoe meer branden en andere incidenten een brandweermedewerker heeft meegemaakt, hoe hoger hij of zij in aanzien staat bij de groep. Groepsdruk kan leiden tot het nemen van (onnodige) risico's. Daarnaast ervaren brandweermensen soms ook druk van het publiek (toeschouwers) om risico's te nemen.

5.3 Stress

Deze paragraaf biedt een verklaring voor de mensfactoren die door de omstandigheden van een incident worden getriggerd. Deze mensfactoren zijn in de vorige paragraaf toegelicht: fiddling around, groupthink, tunnelvisie, confirmation bias, tijdscompressie en informatie-zucht. De 'triggers' van een gebouwbrand (zoals tijdsdruk, onzekerheid en dreiging) kunnen worden samengevat als stress. In deze paragraaf wordt ingegaan op dit verschijnsel.

5.3.1 De betekenis van stress en primaire vluchtreacties

Een incident brengt stress met zich mee. Hoeveel ervaring je als brandweermens ook hebt: wanneer de pieper gaat, ontstaat er een opgewonden gevoel. Stress heeft zowel positieve als negatieve gevolgen voor ons functioneren. Een bepaalde mate van stress zorgt voor een goed functioneren en kan in risicovolle omstandigheden levensreddend zijn. Een teveel aan stress zorgt echter voor problemen, zoals de kans op het ontwikkelen van lichamelijke en/of psychische klachten.

Bij een externe dreiging, zoals een levensbedreigende gebeurtenis die ons angstig maakt, vindt er in ons lichaam een biologische alarmreactie plaats. In zo'n situatie moeten we snel kunnen handelen. Om ons lichaam hierop voor te bereiden, komt er adrenaline vrij. Het lichaam heeft deze reactie nodig om een van de primaire stressreacties te kunnen uitvoeren: vechten of vluchten, of, wanneer deze niet mogelijk zijn en ons stresssysteem overprikkeld is: bevriezen.

5.3.2 Stress en het functioneren van ons brein

Gelukkig zijn we bij stress niet alleen afhankelijk van onze primaire lichamelijke reacties en emoties. Om dit te begrijpen is het belangrijk om stil te staan bij de manier waarop een gebeurtenis tot menselijk gedrag leidt.

Van gebeurtenis naar gedrag: het 4G-model

Gebeurtenissen leiden meestal via gedachten en gevoelens tot gedrag. Een simpel voorbeeld: iemand loopt op je af en dat maakt je bang, omdat je denkt dat die ander boos op je is. Daarom doe je onwillekeurig een stap naar achteren. De gebeurtenis (iemand loopt op je af) leidt dus via een gedachte (je denkt dat hij boos op je is) en een gevoel (die negatieve gedachte maakt je bang) tot een gedraging (je doet een stap naar achteren). Dit is het zogenaamde 4G-model:

4G-model: gebeurtenis → gedachte → gevoel → gedrag

Ons gedrag wordt gestuurd door onze interpretatie van gebeurtenissen. Die interpretatie baseren we op gedachten en gevoelens, die deels bewust en deels onbewust ontstaan. Gedachten en gevoelens roepen elkaar op en versterken elkaar; deze interactie verloopt meestal heel snel en deels onbewust. Wanneer negatieve gebeurtenissen zich later opnieuw voordoen, roept de herkenning daarvan direct negatieve gevoelens op. Het lijkt dan alsof de stap van denken naar voelen wordt overgeslagen en de gebeurtenis direct een negatief gevoel oproept. Maar onbewuste denkprocessen zijn niet waarneembaar en zitten toch tussen de gebeurtenis en het gedrag in.

Door een stressvolle situatie en je eigen reactie daarop te analyseren, leer je welke gedachten en gevoelens een dergelijke situatie bij je oproepen en hoe die je eigen gedrag sturen. Vond je je reactie effectief of niet, en wat zou dat te maken kunnen hebben met de manier waarop je de situatie interpreteerde? Neem bijvoorbeeld stress als gevolg van tijdsdruk: had je bij die woningbrand echt te weinig tijd voor een goede buitenverkenning? Of hadden meer tijd en aandacht voor de buitenverkenning juist tot een betere inzet kunnen leiden?

Ons brein en ons gedrag

Zodra de stress in alle hevigheid toeslaat, nemen bepaalde delen van ons brein de regie over. Het positieve gevolg hiervan is dat we zonder eerst na te hoeven denken direct kunnen handelen. Maar daar staat tegenover dat we niet tot een oplossing kunnen komen die denkwerk vereist. En bij stress in complexe situaties is dat denkwerk toch echt nodig! Bovendien blokkeert ons brein onder druk de toegang tot de specifieke vaardigheden die we juist hebben aangeleerd om goed met stressvolle situaties om te gaan.

Gelukkig kunnen we hier iets tegen doen: door bewust rustig en diep adem te halen breng je je hartslag en bloedsomloop weer onder controle, waardoor je weer in plaats van vechten, vluchten of bevriezen ook andere oplossingen kunt kiezen om aan stressvolle situaties het hoofd te bieden.

5.3.3 Positieve effecten van stress

Door een gebeurtenis als stressvol te interpreteren, maakt ons lichaam zich klaar voor een passende primaire stressreactie. Onze 'stressbiologie' leidt echter ook tot positieve fysiologische en mentale effecten. Om goed te kunnen presteren hebben de meeste mensen

zelfs een beetje stress nodig. We vatten dit samen als 'positieve stress'. Deze positieve stress leidt in vergelijking met normale situaties (zonder stress) tot:

- > Een grotere alertheid: al onze zintuigen staan op scherp, waardoor we – in ieder geval het deel van de werkelijkheid waar de dreiging vandaan komt – beter kunnen waarnemen.
- > Een scherpere focus: we richten al onze aandacht op datgene wat belangrijk is om de stressvolle situatie het hoofd te bieden en laten ons niet afleiden door irrelevante details.
- > Een groter reactievermogen: we kunnen hierdoor vooral fysiek sneller en krachtiger reageren dan anders. Al onze spieren en vezels staan op spanning en kunnen direct tot actie overgaan.
- > Een groter aanpassingsvermogen: we doen waar de situatie om vraagt, ook al is die situatie nieuw en onbekend. Onze normale terughoudendheid voor het nieuwe of onbekende wordt uitgeschakeld.
- > Een grotere overlevingsdrang: we worden ons sterk bewust van onze wil om te (over)leven en doen alles wat nodig is om ons leven te redden, hoeveel pijn en moeite dat ook kost.

5.3.4 Negatieve effecten van stress

Positieve stress is gezond en helpt om tijdens een inzet optimaal te functioneren. Het maakt de brandweermens alert, doelgericht en actiegericht. Maar wanneer de stress te hoog oploopt, slaan de voordelen om in nadelen.

Stress en waarneming

Tijdens een brandweerinzet worden alle zintuigen aangesproken, maar onder invloed van stress kan die waarneming zich vernauwen tot datgene waarop je gefocust bent. Je ziet, hoort of voelt dan alleen waarop je je aandacht richt. Die vernauwing van onze waarneming als negatief effect van stress noemen we blikvernauwing of hyperfocus.

Stress en stemming

Een lichte mate van stress kan weliswaar prettig aanvoelen, maar wanneer de stress hoger wordt of te lang aanhoudt, kan dit prettige gevoel omslaan in een negatieve stemming. Deze negatieve stemming als gevolg van stress uit zich bijvoorbeeld in:

- > een opgejaagd gevoel
- > stemmingswisselingen
- > een kort lontje (kortaf reageren op anderen)
- > angst
- > somberheid
- > geïrriteerdheid
- > boosheid.

Stress en omgevingsbewustzijn

Stress beperkt de toegang tot de rationele denkprocessen in ons brein. Hierdoor wordt het lastig om bijvoorbeeld feiten van aannames te scheiden, met als gevolg dat onze beeldvorming te snel doorschiet in oordeels- en besluitvorming. Dit kan ernstige gevolgen voor de inzet hebben, bijvoorbeeld omdat we signalen van een plotselinge branduitbreiding, explosie of instorting niet adequaat waarnemen of interpreteren. Een verlaagd omgevingsbewustzijn leidt daarnaast meestal ook tot een verminderd risicobewustzijn!

Stress en tijdsbesef

Tijdens een stressvolle gebeurtenis wordt de tijdsbeleving als het ware in elkaar gedrukt; dit is het in paragraaf 5.1.5 besproken fenomeen van tijdscompressie. Tijdscompressie is een risico tijdens de incidentbestrijding, wanneer de tijd-tempofactor van het incident hierdoor verkeerd wordt ingeschat.

Stress en gevoel

Stresshormonen zorgen voor een euforisch gevoel, een hoog energieniveau en een hoge pijngrens. Voor hulpverleners zoals een brandweermensen brengt dit het risico met zich mee dat zij veel te lang achter elkaar doorwerken zonder rust te nemen, en ook bij een verwonding doorgaan alsof er niets aan de hand is.

Stress en communicatie

Goede communicatie vraagt om tijd en aandacht. Voor een adequaat wederzijds begrip zijn non-verbale communicatie zoals houding, gezichtsuitdrukking en gebaren van zowel spreker als luisteraar van onmisbaar belang. De persoonlijke uitrusting van brandweermensen (met onder andere helm, gelaatsmasker en adembescherming) belemmert echter zowel de verbale als non-verbale communicatie. Voeg daar nog eens het gebruik van de portofoon en de hectiek van het incident aan toe en het wordt al snel duidelijk waarom miscommunicatie bij een incident altijd op de loer ligt. Stress doet dan al snel de rest.

Stress en samenwerking

Omdat samenwerking voor een groot deel uit communicatie bestaat, heeft de negatieve invloed van stress op communicatie ook een negatief effect op de samenwerking. Collega's beïnvloeden ook elkaars beleving van stress. Wanneer je ziet dat je directe collega's in stressvolle omstandigheden rustig en professioneel blijven en je ook dan op hun vakbekwaamheid kunt vertrouwen, ben je zelf ook beter bestand tegen de stress.

Stress en denkvermogen

Stress tast ons denkvermogen aan. Dat er tijdens de incidentbestrijding veel dingen goed gaan, komt omdat brandweermensen procedures aanleren die vrijwel zonder na te denken kunnen worden toegepast. Maar ook hier geldt dat wat in de ene situatie een voordeel is, in een andere situatie verkeerd kan uitpakken. Elk incident is immers anders. Wat doen we wanneer onze goed getrainde offensieve binneninzet niet van toepassing is, omdat we bijvoorbeeld:

- > niet weten waar de brandhaard zit?
- > niet weten hoe we bij de brandhaard kunnen komen?
- > onvoldoende koelend vermogen bij ons hebben?

Volgens de basisprincipes van brandbestrijding is een offensieve (binnen)inzet in principe geen optie, wanneer één van deze drie vragen negatief beantwoord wordt en niet veranderd kan worden in een 'ja'. Het beantwoorden van de vragen tijdens de verkenning vergt echter de nodige verzameling, analyse en interpretatie van de feiten – en dus denkvermogen! Ofwel: kijken, denken en doen en niet: kijken en direct doen. Het is dus riskant wanneer we tijdens de incidentbestrijding alleen vertrouwen op onze ingeslepen vaardigheden en procedures. Onder het motto 'Stop en denk na' moeten we ons ook onder stress en tijdsdruk voldoende tijd gunnen om die afweging te maken. Daarom is dit motto het eerste basisprincipe van brandbestrijding (zie paragraaf 6.4.2).

Stress en ademhaling

Bij hevige stress versnelt de ademhaling automatisch. Met adembescherming op, betekent dit dat onze ademluchtfles sneller leeg is. De ademhaling jaagt ook de hartslag en bloeddruk omhoog. Omdat we onze hartslag en bloeddruk niet direct kunnen beïnvloeden, maar onze ademhaling wel, ligt het voor de hand om stress via ademhaling te voorkomen of beperken. Hier komen we in paragraaf 5.3.6 kort op terug.

5.3.5 Omgaan met stress tijdens een incident

Te veel stress is gevaarlijk, voor jezelf en voor je collega's. Helaas heb je de meeste factoren die leiden tot stress niet zelf in de hand. Toch zijn er enkele dingen die je tijdens een incident kunt doen om te voorkomen dat de stress zo hoog oploopt, dat die ten koste gaat van een veilig en effectief optreden. We behandelen de volgende tips:

- > goed voornemen
- > regel van 3
- > neem wat meer tijd
- > let op jezelf en op elkaar.

Goed voornemen

Weet je van jezelf hoe je reageert op stress? Door vooraf te reflecteren op je persoonlijkheid, kun je met jezelf afspreken hoe je je valkuilen bij stress kunt vermijden. Een goed voornemen betekent dat je al tijdens de uitruk minimaal één afspraak met jezelf maakt. Die afspraak gaat over de manier waarop je, rekening houdend met je persoonlijke valkuilen, ter plaatse met de stress wil omgaan.

Regel van 3

De regel van 3 betekent dat drie keer twijfelen over de veiligheid van de inzet betekent dat je die inzet moet afbreken. Ed Oomes vertaalt in zijn hoofdstuk over de vergevingsgezinde infrastructuur in het rapport over situationele commandovoering (Brandweeracademie 2015, p. 73) de regel van 3 als volgt naar het brandweeroptreden: "Als er meerdere tekenen zijn van zaken die niet helemaal goed zijn, of niet helemaal duidelijk zijn, STOP dan de inzet". Die onduidelijkheid kan volgens Oomes onder andere te maken hebben met het incident, het materiaal, het materieel en de mensen. Druk bij onduidelijkheden je twijfel dus niet weg, maar pas juist dan het eerste basisprincipe van brandbestrijding toe: 'Stop en denk na'.

Neem wat meer tijd

Hierboven is het basisprincipe 'Stop en denk na' genoemd. 'Neem wat meer tijd' is de algemene variant hiervan. Antiventilatie ('houd de doos dicht') is een goede tactiek om tijdens de verkenning van een gebouwbrand tijd te winnen. Om ook in je hoofd meer tijd te winnen, is het belangrijk om jezelf te ontspannen via je ademhaling. Zie paragraaf 5.3.6 voor de bijbehorende 4x4-ademhalingstechniek. Gun je jezelf niet de tijd voor het toepassen van deze techniek? Dan kan het al voldoende zijn om een stapje achteruit te doen, een paar keer diep adem te halen en de situatie opnieuw in ogenschouw te nemen. Je neemt dan mogelijk dingen waar die je niet eerder had opgemerkt.

Let op jezelf en op elkaar

Een ander heeft vaak beter in de gaten dan jezelf dat stress de overhand bij je krijgt. En je merkt dat andersom vaak ook eerder bij een collega dan die bij zichzelf. Wat helpt is om met elkaar van tevoren af te spreken hoe je handelt in een situatie waarbij stress de overhand krijgt. Houd contact met je leidinggevende om een inschatting te maken of het veilig is om

door te gaan. Je eigen veiligheid en die van je collega('s) is immers in het geding. Neem je bij een collega overmatige stress waar? Benoem dat dan!

5.3.6 Stresspreventie

Voorkomen is beter dan genezen. Dat geldt ook voor stress. Als brandweerman- of vrouw kun je het volgende doen om je stressbestendigheid structureel te vergroten:

- > Onderhoud je mentale en fysieke conditie.
- > Leer jezelf te ontspannen via je ademhaling.
Ga goed rechtop zitten en adem alle lucht uit je longen. Houd vervolgens je adem 4 seconden vast, adem 4 seconden in door je neus, houd je adem 4 seconden vast en adem tot slot 4 seconden uit door je neus. Deze zogenoemde 4x4-ademhalingstechniek vertraagt je hartslag, verdiept je concentratie en vermindert je stress.
- > Leer van andere incidenten, zeker over de manier waarop beslissingen tot stand zijn gekomen.
- > Houd je vakbekwaamheid en zelfvertrouwen op peil.
- > Pas vakinhoudelijk goed onderbouwde modellen zoals de basisprincipes van brandbestrijding als gereedschap toe. Die bieden jou en je collega's handelingsperspectief en daarmee lucht en tijd. Wijk alleen van gevalideerde modellen en procedures af wanneer je een beter plan hebt.

Wat vakbekwaamheid betreft: weten dat je je vak verstaat en ervaring in dat vak hebt, geeft zelfvertrouwen. Zelfvertrouwen bouw je op door vakkennis bij te houden, inzetten van het korps of van collega's elders in het land te bespreken en er leerpunten uit te halen, door bepaalde situaties regelmatig te oefenen en ervaring op te doen tijdens diverse inzetten. Door nieuwsgierig te blijven naar nieuwe ontwikkelingen en je vakkennis en vaardigheden te onderhouden, werk je bewust aan je vakbekwaamheid, en daarmee aan je zelfvertrouwen en stressbestendigheid.

5.4 Besluitvorming onder druk

Behalve stress, zijn er ook andere factoren die een grote impact op de besluitvorming van incidentmanagers hebben:

- > verantwoordelijkheid voor de bestrijding van het incident
- > de kans op slachtoffers en/of schade
- > een bedreiging van de eigen veiligheid en die van collega's, omstanders en slachtoffers
- > onzekerheid over het verloop van het incident
- > een gebrek aan ervaring
- > de verwachtingen van omstanders.

Tijdsdruk is de centrale trigger waaraan deze stressoren hun negatieve invloed (deels) te danken hebben; we vatten deze factoren dan ook samen met de term 'besluitvorming onder (tijds)druk'.

In deze paragraaf komen de volgende (sub)thema's aan bod:

- > theorieën over natuurlijke besluitvorming (Naturalistic decision making)
- > twee natuurlijke besluitvormingsmechanismen: systeem 1 en systeem 2.

5.4.1 'Naturalistic Decision Making': natuurlijke besluitvormingstheorieën

Naturalistic Decision Making (NDM) is de internationale vakterm voor de manier waarop professionals in de dagelijkse praktijk beslissingen nemen. NDM-onderzoekers proberen te begrijpen hoe bijvoorbeeld brandweermensen, piloten en artsen in hun natuurlijke werkomgeving beslissingen nemen en welke cognitieve en situationele factoren hierop van invloed zijn. Binnen het NDM-onderzoek blijken drie accenten gelegd te worden die inzicht bieden in de manier waarop bevelvoerders en (Hoofd)Officieren van Dienst bij de brandweer beslissingen nemen:

- > herkennen doet beslissen (Gary Klein)
- > beslissen op basis van vaardigheid, regels of kennis (Jens Rasmussen)
- > vier besluitvormingstrategieën (Rhona Flin en Kevin Arbuthnot).

Herkennen doet beslissen

De Amerikaanse psycholoog Gary Klein deed onderzoek naar de wijze waarop ervaren professionals onder grote tijdsdruk en stress beslissingen nemen. Hij observeerde onder anderen bevelvoerders bij de brandweer van New York. De besluitvormingstheorie van Klein heet 'Recognition Primed Decision Making' (RPD) en kan worden samengevat als: 'herkennen doet beslissen'. RPD stelt dat ervaren professionals hun oplossing kiezen op basis van eerdere ervaringen met die oplossing in een vergelijkbare situatie. Dat hoeft niet altijd de beste oplossing te zijn, maar is wel een oplossing die bij de situatie past en die de beslisser eerder al eens met succes heeft toegepast.

Deze manier van beslissen bestaat volgens Klein uit de volgende drie stappen die zich in het hoofd van de beslisser afspelen.

1. *Situatiebeoordeling*

De beslisser beoordeelt de situatie als bekend of als nieuw. Bij een bekende situatie herkent de beslisser direct de reeks acties die hij in een eerdere, vergelijkbare situatie met succes heeft toegepast. Een nieuwe situatie vraagt om een nog onbekende reeks acties, hoewel de afzonderlijke acties wél bekend kunnen zijn.

2. *Mentale simulatie*

De beslisser voert in gedachten de reeks acties uit die hij eerder in vergelijkbare situaties met succes heeft toegepast en probeert het effect van deze acties op de ontwikkeling van de actuele situatie te doorgronden en voor zich te zien. Wanneer hij in deze simulatie een probleem tegenkomt, past hij zijn plan van aanpak (actiereeks) daarop aan. Alleen wanneer het probleem zo groot is dat hij de actiereeks in zijn geheel moet verwerpen, denkt hij na over een alternatieve oplossing.

3. *Besluit om een actiereeks uit te voeren*

Uiteindelijk zal de beslisser die actiereeks uitvoeren, die volgens zijn mentale simulatie tot de meest bevredigende oplossing leidt.

Hier volgt een brandweervoorbeeld om uit te leggen hoe deze drie stappen in de praktijk kunnen werken. Bij aankomst van de tankautospuit bij een brandend object herkent de ervaren bevelvoerder meestal meteen de situatie. Stel, er is brand op de eerste van drie verdiepingen van een etagewoning. Er komt met kracht rook uit de kieren van de ramen van een kamer op deze verdieping. De andere ramen lijken helder. De bevelvoerder herkent de situatie als een afgesloten kamer met daarin een serieuze vuurhaard. De te verwachten ontwikkeling van de situatie ligt voor de hand: brandoverslag- of branddoorslag naar aangrenzende ruimtes. Uit de situatieherkenning volgt voor de bevelvoerder direct het na te streven primaire doel: redding van de bewoners. Hij zal de meest gebruikelijke actie in deze

situatie zien (binneninzet in de woning) en deze actie als volgt mentaal simuleren: binnentreden via inpandig trappenhuis – binnentreden hal woning, waarschijnlijk zonder problemen – als het vuur beperkt is tot de kamer: binnentreden kamer – daarbij gevaar voor ‘backdraft’, maar gelet op de beperkte oppervlakte van de kamer is dit een acceptabel risico. Als er nu extra informatie binnenkomt, kan de bevelvoerder daarmee zijn mentale film van de situatieontwikkeling aanpassen en eventueel een andere actiereeks kiezen.

Om RPD met succes toe te passen moet je dus goed mentaal kunnen simuleren. Deze vaardigheid train je bij praktijkoefeningen. Daarom zijn realistische oefenscenario’s zo belangrijk. Stel dat een incident lijkt op een onrealistisch oefenscenario dat je eerder met ‘succes’ hebt bestreden. Het gevolg is dan een onrealistische simulatie van het incident, met alle mogelijke risico’s van dien.

Beslissen op basis van vaardigheid, regels of kennis

De Deen Jens Rasmussen maakt in zijn onderzoek onderscheid tussen besluitvorming op basis van vaardigheid (‘skill-based’), regels (‘rule-based’) en kennis (‘knowledge-based’).

1. Besluitvorming op basis van vaardigheid

De beslisser reageert direct en bijna onbewust op de situatie. Voorbeelden zijn het omhangen van ademlucht en de wijze waarop een brandend pand wordt binnengetreden.

2. Besluitvorming op basis van regels

De beslisser reageert door bewust een regel toe te passen. Een voorbeeld is het terugtrekken als de explosiegevaarmeter in alarm gaat. Overigens is bij het toepassen van een regel vaak ook een vaardigheid nodig; besluitvorming op basis van vaardigheid en op basis van regels vinden daarom in de praktijk vaak gecombineerd plaats.

3. Besluitvorming op basis van kennis

Wanneer de situatie nieuw is, zal moeten worden nagedacht over de situatie zelf, de doelen en de mogelijke oplossingen. Dit gebeurt volgens Rasmussen door gebruik te maken van symbolen die de informatie weergeven. Deze symbolen geven vervolgens een model van de situatie: voor een procesoperator vertegenwoordigen de lampjes en wijzertjes op het controlebord de werkelijkheid. Rasmussen geeft daarom aan dat een zorgvuldige keuze van aangedragen symbolen de beslisser kan ondersteunen. Deze symbolen representeren immers de feiten die de beslisser nog moet verzamelen en analyseren om de juiste oplossing te kiezen. Bij besluitvorming op basis van vaardigheid of regels is het niet nodig om meer informatie te verzamelen.

Vier besluitvormingsstrategieën

In hun werk *Incident Command: Tales from the Hot Seat* uit 2002 onderscheiden Rhona Flin en Kevin Arbuthnot de volgende vier soorten besluitvormingsstrategieën.

1. Op herkenning gebaseerde besluitvorming

Deze strategie komt overeen met de RPD-theorie van Klein: herkennen doet beslissen.

2. Op procedure gebaseerde besluitvorming

Bevelvoerenden gebruiken standaardprocedures en regels om tot een besluit over de te volgen inzetstrategie te komen. Dit vereist identificatie van het probleem en het oproepen vanuit het geheugen van de manier waarop met dit probleem kan worden omgegaan. Deze strategie correspondeert met de rule-based besluitvorming van Rasmussen.

3. Analytische vergelijking van inzetstrategieën

Bij deze besluitvormingsstrategie evalueert de incidentmanager op basis van volledige informatie alle beschikbare alternatieve inzetstrategieën en kiest hij de meest veelbelo-

vende strategie als oplossing. Deze strategie is alleen mogelijk bij incidenten met volledige informatie, zonder tijdsdruk, met beperkte risico's en zonder onzekerheden.

4. *Creatieve besluitvorming*

In het geval van creatieve besluitvorming analyseert de incidentmanager niet alleen een onbekende situatie, maar moet hij ook een nieuwe inzetstrategie bedenken, omdat bestaande inzetstrategieën geen oplossing bieden.

Kenmerkend voor de rol van incidentmanagers bij de brandweer zoals bevelvoerders en Officieren van Dienst, zijn de grote tijdsdruk, de dynamiek van het incident, de onvolledigheid van informatie, de veiligheidsrisico's voor het eigen personeel en personeel van andere hulpdiensten en het onzekere verloop van het incident. Deze omgevingsfactoren beïnvloeden de mate waarin de incidentmanager stress ervaart en de manier waarop hij beslissingen neemt. De bovengenoemde Gary Klein heeft erop gewezen dat op herkenning gebaseerde besluitvorming de dominante besluitvormingsstrategie onder bevelvoerders van de brandweer is, gelet op de hoge tijdsdruk en risico's die de meeste incidenten kenmerken. Hieruit mogen we echter niet de conclusie trekken dat deze strategie dus automatisch de juiste is bij incidenten met een hoge tijdsdruk en grote risico's. Het dilemma is namelijk dat voor een veilige en effectieve toepassing van 'herkennen doet beslissen' veel ervaring nodig is en dat dit daarom alleen werkt bij routineklussen. Dat beweert Klein overigens zelf ook in een gezamenlijk artikel met Kahneman (Kahneman & Klein, 2009). En laten we die routineklussen bij de brandweer nu (bijna) niet hebben....

De andere drie besluitvormingsstrategieën van Flin en Arbutnot leren ons echter met een andere bril naar de incidenten te kijken die bevelvoerders van de brandweer op hun bordje krijgen. Niet elk incident is immers even dynamisch en ook binnen een incident kan de dynamiek na verloop van tijd veranderen. Een gebouwbrand is echter meestal een zeer dynamisch incident door de mogelijkheden voor verdere uitbreiding, de onoverzichtelijkheid en het grote aantal beslissingen dat moet worden genomen. Zo kan een brand in een compartiment zich in het begin langzaam ontwikkelen, om zich dan opeens snel uit te breiden zodra de brand door een brandscheiding slaat. Er kunnen zich dus wel degelijk incidenten voordoen of fasen binnen incidenten (zelfs bij een gebouwbrand) waarbij de incidentmanager de tijd heeft om meer op kennis gebaseerde besluiten te nemen. Wanneer hij de tijd neemt om inzetstrategieën met elkaar te vergelijken of een nieuwe, passende inzetstrategie te bedenken gaat de kwaliteit van de besluitvorming omhoog en wordt per saldo mogelijk zelfs tijd gewonnen.

Hoe groter de tijdsdruk en hoe meer ervaring een bevelvoerder of (Hoofd)Officier van Dienst heeft, hoe sneller hij op basis van situatieherkenning een oplossing zal kiezen die bij de situatie past. Hij heeft dan onvoldoende tijd om meerdere alternatieve oplossingen met elkaar te vergelijken. Bij brand zal dit relatief vaak voorkomen. Bij een gebouwbrand met redding ligt vanwege de hoge tijdsdruk besluitvorming op basis van situatieherkenning (waarbij wel ervaring nodig is), vaardigheden (skill-based) en regels (rule-based) voor de hand. In de stabilisatiefase en nazorgfase van een gebouwbrand staan er alleen materiële belangen op het spel. Dit geeft de Officier van Dienst meer tijd om alternatieve inzetstrategieën tegen elkaar af te wegen en daarbij niet alleen gebruik te maken van zijn ervaring en vaardigheden en de bestaande regels, maar ook van zijn vakkennis.

En nu de praktijk!

Wat kun je als bevelvoerder of (Hoofd)Officier van Dienst leren van de bovenstaande besluitvormingstheorieën en -strategieën? Als incidentmanager maak je bij het nemen van beslissingen gebruik van vaardigheden, regels en kennis. Vaardigheden gebruik je automatisch en bijna onbewust, regels bewust (maar wel automatisch) en kennis bewust en creatief. Hoe onbekender een situatie is, hoe groter de kans dat je vaardigheden en de regels (dus je bestaande oplossingen) niet voldoen en je bewust moet gaan nadenken over een nieuwe oplossing. In dit geval is de natuurlijke standaardreactie 'herkennen doet beslissen' niet aan te raden, temeer daar routineklussen bij de brandweer niet of nauwelijks bestaan: elk incident is anders en brandweermensen maken te weinig incidenten mee om veel ervaring en routine op te bouwen. In verband met de veiligheid van de mensen die onder jouw leiding worden ingezet, is het daarom van groot belang om niet te snel toe te geven aan de neiging 'herkennen doet beslissen'. In plaats van alleen (bestaande) situaties en risico's te herkennen, zul je ook moeten leren om (nieuwe) situaties en risico's te analyseren. Er kunnen zich natuurlijk situaties voordoen waarin je geen tijd hebt om zo'n analyse uit te voeren, zoals bij redding of een grote kans op escalatie. In dat geval zul je wél moeten vertrouwen op je eerdere ervaringen en oplossingen en op herkenning daarvan in de betreffende situatie.

5.4.2 Systeem 1 versus systeem 2

Globaal zijn er twee neurobiologische systemen die ons gedrag sturen:

> *Systeem 1: de aap*

Primaire lichamelijke functies die vanuit de hersenstam worden aangestuurd, aangevuld door routinematig en geautomatiseerd gedrag waarover we niet of nauwelijks hoeven na te denken en dat deels onbewust wordt uitgevoerd. Dit systeem werkt intuïtief, reflexmatig en snel, met weinig of geen inspanning en geen gevoel van controle.

> *Systeem 2: de professor*

Cognitieve functies en capaciteiten die we bewust inzetten om complexe taken uit te voeren. Deze functies worden via ons cognitieve brein in de hersenschors aangestuurd. De uitvoering van deze taken vergt focus en concentratie, waardoor we ons heel bewust zijn van ons denkproces en gedrag. Dit systeem werkt analytisch, met bewuste aandacht voor en sturing van het denken en kost dus inspanning.

De neiging om vanuit systeem 1 te opereren en systeem 2 'uit te laten staan' neemt toe wanneer we te maken krijgen met stressoren. Bij een gebouwbrand is uiteraard per definitie sprake van stressoren, zodat er direct een bijna lichamelijk beroep op systeem 1 wordt gedaan. Incidentmanagers zoals bevelvoerders en (Hoofd)Officieren van Dienst krijgen hier onmiddellijk mee te maken zodra hun pieper gaat. Die pieper triggert letterlijk hun systeem 1. De bloeddruk en het adrenalinepeil schieten omhoog, de ademhaling en hartslag versnellen en het bewustzijn vernauwt zich. En toch is hiermee niet alles gezegd. (Hoofd)Officieren van Dienst komen later ter plaatse dan bevelvoerders en hebben dus niet te maken met de eerste onzekerheden en uitdagingen van het incident. Die zijn als het goed is al opgepakt en mogelijk zelfs getackeld door de eerste bevelvoerder(s).

De Officier van Dienst heeft in principe de tijd voor een 'second opinion' van het incident; zijn verkenning is erop gericht om de lopende inzet te evalueren en waar nodig in overleg met de bevelvoerders bij te sturen. Hij kan letterlijk wat afstand nemen van het incident en is op die manier beter in staat om een totaalbeeld van de actuele ontwikkeling van het incident en de incidentbestrijding te creëren. Door zich bewust te zijn van zijn rol en toegevoegde waarde

kan hij met een 'gerust' hart zoveel mogelijk vanuit systeem 2 opereren. Zit de Officier van Dienst vanwege de adrenaline tijdens de uitruk bij aankomst nog in systeem 1? Dan kan hij of zij met behulp van ademhalingstechnieken en door bewust afstand te nemen alsnog in systeem 2 komen (zie ook paragraaf 5.3.6).

Bevelvoerders opereren per definitie vanuit systeem 1. Zij zitten zo dicht op het incident en de lopende inzet van hun ploeg dat zij op adrenaline blijven acteren en stress tot op zekere hoogte nodig hebben om scherp te blijven. Het verschil tussen het succes en falen van de eerste klap die zij met hun ploeg uitdelen, zit in details. Om die details op tijd te herkennen, kan de smalle maar scherpe focus van systeem 1 het verschil maken. Om te voorkomen dat ze te veel het incident worden ingezogen, is het echter wel belangrijk dat bevelvoerders af en toe wat afstand nemen van alle directe acties. Op die manier kunnen zij het effect van de inzet blijven monitoren en terugkoppelen aan de Officier van Dienst. Ook gunnen zij zich hiermee wat tijd voor zelfreflectie. Heeft de bevelvoerder alles onder controle of kan hij wat steun van collega-bevelvoerders of de Officier van Dienst gebruiken? Of zijn er manschappen die hem juist zelf even als vangnet nodig hebben? Kortom, het is nuttig als de bevelvoerder zich bewust is van zijn systeem-1-gedrag en hierdoor tijdig even uit dat systeem kan stappen om wat meer afstand te nemen. Maar daarmee functioneert de bevelvoerder nog niet automatisch in systeem 2. Hij zal echter optimaler functioneren en beter met stress kunnen omgaan wanneer hij zich bewust is van de valkuilen van systeem 1 en zich daaromheen kan bewegen.

Wanneer bevelvoerders de basisprincipes van brandbestrijding vanuit systeem 1 toepassen, creëren ze voor zichzelf de rust en de tijd om deels naar systeem 2 te schakelen. Stop en denk na is immers het eerste basisprincipe. De basisprincipes helpen de bevelvoerder ook om niet automatisch voor de (offensieve) binneninzet te kiezen. Die keus behoort wel tot de systeem-1-routes van de gemiddelde bevelvoerder. Binnen de basisprincipes is de offensieve buiteninzet de preferente inzettactiek.

5.5 FABCM

Een besluitvormingsmodel is effectief wanneer het aansluit bij de natuurlijke manier waarop mensen besluiten nemen en het handvatten biedt om:

- > het besluitvormingsproces inzichtelijk te maken
- > de besluitvorming te structureren
- > de beslisser bewust te maken van valkuilen
- > de negatieve invloed van stressoren zoals tijdsdruk hanteerbaar te maken.

In deze paragraaf wordt het besluitvormingsmodel FABCM besproken. Tevens komen 'situational awareness' en 'option awareness' aan bod.

5.5.1 Het besluitvormingsmodel FABCM

FABCM is een besluitvormingsmodel dat rekening houdt met de valkuilen van de manier waarop we van nature besluiten nemen, ofwel Naturalistic Decision Making (NDM). FABCM staat voor feiten verzamelen (F), feiten analyseren (A), besluiten nemen (B), communiceren

(C) en monitoren (M). Het is een besluitvormingsmodel dat het gehele proces van commandovoering door incidentmanagers bij de brandweer beschrijft.⁷

Incidentmanagers zoals bevelvoerders en Officieren van Dienst moeten tijdens een incident (en dan vooral bij aankomst) razendsnel informatie over de situatie verzamelen, de situatie analyseren en begrijpen, beslissingen nemen en over deze beslissingen communiceren. Daarna monitoren zij de uitvoering van de beslissingen door de ingezette eenheden. Om dit laatste te kunnen doen, blijft de incidentmanager feiten verzamelen en analyseren. Indien nodig, beslist de incidentmanager om de inzet bij te sturen, waarna ook dat besluit wordt gecommuniceerd en gemonitord. FABCM is dus een cyclisch besluitvormingsproces dat de incidentmanager tijdens de incidentbestrijding verschillende keren toepast. Hoe vaak deze cyclus wordt toegepast, hangt onder andere af van de complexiteit en omvang van het incident, het resultaat van de eerste beslissingen en de duur van de incidentbestrijding.

FABCM biedt de incidentmanager handvatten om de valkuilen en nadelen van op situatieherkenning gebaseerde, skill-based en rule-based besluitvorming te ondervangen en compenseren. Typisch voor FABCM is de nadruk op het analyseren van feiten alvorens een besluit te nemen. Deze analytische benadering helpt de bevelvoerder om af en toe uit systeem 1 te stappen en de Officier van Dienst om zoveel mogelijk in systeem 2 te blijven. In het algemeen ondersteunt FABCM de brandweer bij het voorkomen van het nemen van besluiten op basis van een verkeerde herkenning en interpretatie van de situatie. Het FABCM-model helpt de incidentbestrijder om contra-intuïtieve beslissingen te nemen op het moment dat die nodig zijn.

Hieronder worden de vijf fasen van het FABCM-model afzonderlijk toegelicht.

Fase 1: Feiten verzamelen

Vanaf het moment dat zijn pieper gaat, begint voor de incidentmanager fase 1 van FABCM: feiten verzamelen. Hij probeert zich zo mogelijk al tijdens het aanrijden een beeld te vormen van de situatie ter plaatse, maar dan wel met het besef dat hij dat beeld ter plaatse moet verifiëren, actualiseren en aanvullen met de feiten zoals die zich op dat moment aan hem voordoen.

Besluitvormingsonderzoek biedt ons drie kerninzichten over de mogelijkheden en beperkingen van het verzamelen van feiten:

- > de perceptie van de werkelijkheid is niet gelijk aan de realiteit
- > het waarnemingsvermogen is beperkt
- > de fysieke afstand werkt belemmerend.

De incidentmanager construeert in zijn hoofd een beeld van de feiten op basis van de subjectieve manier waarop hij die waarneemt en interpreteert. Een objectieve perceptie van feiten en daarmee van de realiteit bestaat niet. Elk mens wordt in zijn waarneming van en betekenisverlening aan feiten beïnvloed door subjectieve factoren zoals kennis, ervaring en persoonlijke drijfveren. Die invloed vertaalt zich meestal in onbewuste aannames over wat we precies zien, horen en voelen en hoe belangrijk die waargenomen 'feiten' voor onze besluitvorming zijn. Kortom, het verzamelen van feiten is een subjectief proces dat tot een

⁷ Ira Helsloot en Jelle Groenendaal van Crisislab staan aan de basis van het FABCM-model zoals dat in het onderzoek naar situationele commandovoering door de Brandweeracademie is geadopteerd. De toelichting op het FABCM-model is gebaseerd op hun artikel 'Betere commandovoering door het FABCM model' in de *Brandweerman* van januari-februari 2018 (nr. 542). Zie www.crisislab.nl voor meer informatie.

selectieve waarneming en interpretatie van de werkelijkheid leidt. Hierdoor kunnen zelfs incidentmanagers met de juiste kennis en vaardigheden verkeerde beslissingen nemen. Denk hierbij ook aan het fenomeen confirmation bias, dat in paragraaf 5.1.4 is behandeld.



Figuur 5.2 Bij deze brand is afstand nemen de enige optie om het geheel te overzien en de aandacht te verleggen naar de omgeving (Bron: Onbekend)

In de tweede plaats heeft de beperking van ons waarnemingsvermogen invloed op het verzamelen van feiten: we zien vooral datgene wat we zoeken en we missen de informatie waarop we niet bedacht zijn. Beslissers die niet in staat zijn om hun zoekgedrag naar de beschikbare informatie te reguleren, hebben een minder goed ontwikkeld situatiewaarnemingsvermogen. Het resultaat: minder bevredigende besluiten en meer fouten.

Het zijn niet alleen een verkeerde perceptie van de werkelijkheid en ons beperkte waarnemingsvermogen die ons waarnemings- en beoordelingsvermogen negatief beïnvloeden. Ook de fysieke afstand tot het onderwerp van besluitvorming speelt een rol: de afstand die

incidentmanagers bij de brandweer houden tot de bron van het incident bepaalt hoe zij dit incident waarnemen. Voor hen is het belangrijk om zowel het totaalbeeld scherp te krijgen als de afzonderlijke details te (blijven) zien. Het kan daarom bij het verzamelen van feiten helpen om geregeld 'naar' maar ook van het incident 'weg' te lopen.

Fase 2: Feiten analyseren

Nadat de feiten in fase 1 zijn verzameld, moeten ze in fase 2 worden geanalyseerd om ze bruikbaar te maken voor de besluitvorming. Bij het analyseren van de feiten beoordeelt de incidentmanager de situatie. Wat betekent de situatie voor het hier en nu en voor de nabije toekomst? Om deze vraag te kunnen beantwoorden zijn twee zaken nodig:

- > een analytische benadering
- > een rationele en bewuste houding.

Brandweerofficieren kunnen het verschil maken wanneer zij niet beslissen op basis van een snelle situatieherkenning (systeem 1), maar een meer analytische benadering hanteren om de situatie te beoordelen (systeem 2). Dit lukt alleen wanneer zij zichzelf voldoende tijd gunnen om de situatie te doorgronden door het verzamelen van feiten, deze in een logische samenhang en juiste context te plaatsen en door in gedachten verschillende oplossings-alternatieven met elkaar te vergelijken.

Om de feiten van het incident goed te kunnen analyseren, is een rationele en bewuste houding nodig. Hiermee voorkomt de incidentmanager dat hij zich door collega's of omstanders in het incident laat zuigen en te weinig tijd koopt om de situatie goed te doordenken. Hij mag niet dezelfde tijdsdruk ervaren als de bevelvoerder, want dan kan hij zomaar vervallen in systeem-1-gedrag. In de tweede plaats mag de incidentmanager zich tijdens het analyseren van feiten niet laten afleiden door andere taken met een hoge cognitieve belasting. Wanneer je meer taken tegelijkertijd moet uitvoeren of een grote hoeveelheid informatie in één keer moet verwerken, heb je minder cognitieve capaciteit beschikbaar om de situatie bewust te analyseren. Focus daarom in deze fase op de analyse van een overzichtelijk aantal feiten en communiceer met je bevelvoerders en andere betrokkenen dat je even niet beschikbaar bent voor andere (complexe) taken.

Fase 3: Besluiten nemen

Het nemen van besluiten is voor een incidentmanager geen doel op zich. Belangrijke beslissingen vergen veel mentale aandacht. Daarom is het aantal beslissingen dat tijdens een brandweerinzet effectief kan worden genomen op voorhand beperkt. Hoe minder (belangrijke) besluiten een Officier van Dienst neemt, hoe meer tijd hij heeft voor de situatieanalyse en hoe minder cognitieve belasting er ontstaat voor manschappen en bevelvoerders. Het kan goed zijn dat de feitenanalyse de Officier van Dienst tot de conclusie brengt dat het inzetplan van de eerste bevelvoerder voldoet en de lopende inzet dus geen bijstelling behoeft. Het aantal besluiten dat een incidentmanager neemt, zegt dus niets over zijn of haar toegevoegde waarde voor de incidentbestrijding.

Fase 4: Communiceren

Er wordt tijdens de incidentbestrijding in alle lagen van de bestrijdingsorganisatie volop gecommuniceerd: tussen manschappen en bevelvoerders, tussen manschappen onderling en tussen incidentmanagers onderling. Wanneer we het in het kader van FABCM over communiceren hebben, beperken we ons bewust tot het overdragen van genomen besluiten in de vorm van inzetopdrachten of commando's. Door een gebrek aan fysiek contact tussen

de incidentmanager en zijn bevelvoerders (frontlijneenheden) is deze communicatie van commando's op voorhand aan beperkingen onderhevig. Zo kan de Officier van Dienst niet met behulp van non-verbale communicatie verifiëren of zijn inzetopdracht met bijbehorend commando door alle bevelvoerders en hun ploegen is geaccepteerd en begrepen.

Bij het verzamelen van feiten hebben we stilgestaan bij de onbewuste invloed op onze waarneming van factoren zoals kennis, ervaring en drijfveren: we zien en horen wat we willen zien en horen. Het geheel aan culturele en persoonlijke invloeden op onze waarneming en op ons gedrag noemen we ons referentiekader. Uit onderzoek blijkt dit referentiekader niet alleen onze waarneming te beïnvloeden, maar ook onze communicatie. Wanneer we een boodschap de wereld insturen, zullen de ontvangers die door hun eigen referentiekader allemaal verschillend interpreteren. Houd er daarom als incidentmanager rekening mee dat je inzetopdracht of commando door je bevelvoerders verschillend opgevat kan worden. Check daarom of zij je opdracht goed begrijpen en ontmoet hen regelmatig fysiek, zodat je ook gebruik kunt maken van non-verbale communicatie om je verbale boodschap te ondersteunen.

Een verkeerde interpretatie van een inzetopdracht kan niet altijd worden voorkomen, maar uit onderzoek blijkt dat de kans op miscommunicatie over een opdracht aanzienlijk kleiner wordt wanneer die opdracht aan een aantal kenmerken voldoet. Volgens dit onderzoek is een goede opdracht:

- > geadresseerd
- > gericht
- > gemotiveerd.

Een *geadresseerde* opdracht is een opdracht waarvan de opdrachtnemer helder is. Maak als incidentmanager duidelijk wie in jouw opdracht wat moet doen, dus tot wie je je richt. Een algemene opdracht waarin verschillende opdrachtnemers zijn verpakt en je luisteraars zelf maar moeten uitzoeken welke (deel)opdracht voor hen is bedoeld, werkt dus niet. Heb je als (Hoofd)Officier van Dienst in het Commando plaats incident (CoPI) een specifieke vraag aan de Officier van Dienst-Geneeskundig (OvD-G)? Richt je je dan speciaal tot hem of haar, ongeacht wie er verder allemaal in de CoPI-bak zitten.

Je opdracht is *gericht* wanneer de voorwaarden waaronder die moet worden uitgevoerd helder zijn. De formulering van je commando moet antwoord geven op basale W-vragen, zoals: wat, wanneer, waar en met welke middelen. Het 'hoe' van de opdracht kun je wellicht grotendeels overlaten aan het vakmanschap van je bevelvoerders of manschappen (in het geval je als bevelvoerder een inzetbevel geeft). Hoe scherper je de voorwaarden van de opdracht formuleert, hoe effectiever en efficiënter je mensen hun vakmanschap kunnen inzetten om de klus samen te klaren.

Communiceer ook altijd het *doel* van je opdracht. Wanneer je mensen weten welke bijdrage de opdracht aan het doel van de inzet als geheel levert, kan hen dat (extra) motiveren om die opdracht zo goed mogelijk uit te voeren. Dit noemen we doelcommandovoering. Maar motivatie is niet het enige nut van het benoemen van het doel van je opdracht. Stel dat het incident zich dusdanig ontwikkelt dat de voorwaarden waaronder de opdracht uitgevoerd moet worden niet langer van toepassing of haalbaar zijn. Door dan het doel van de opdracht voor ogen te houden, kunnen je mensen de opdracht zelf op een alternatieve manier uitvoeren en op die manier toch de gevraagde bijdrage aan het inzetdoel leveren.

Inzicht in waarom je iets van je mensen vraagt, geeft je collega's de ruimte om te improviseren. Het is immers lang niet altijd wenselijk en gelukkig ook niet nodig dat een inzetploeg zijn opdracht bij de eerste de beste tegenslag staakt. Van bevelvoerders en manschappen wordt in toenemende mate eigen initiatief verwacht. Communicatie van doelcommando's met ruimte voor eigen invulling van details en voor improvisatie past goed bij een toepassing van FABCM die rekening houdt met de human factor. In zijn lectorale rede heeft Ricardo Weewer betekenisverlening ('sensemaking') een voorwaarde genoemd voor improvisatievermogen. Communicatie van doelcommando's kan een instrument zijn om de betekenis van een inzet te verduidelijken, waardoor het improvisatievermogen van de brandweer gestimuleerd kan worden.

Fase 5: Monitoren

In deze laatste fase van het FABCM-model ziet de incidentmanager toe op de juiste uitvoering van de opdracht: het zogenoemde monitoren. Wordt je opdracht uitgevoerd zoals afgesproken en wat spreek je met je bevelvoerders of manschappen af over hun terugkoppeling van de uitvoering? Zo mogelijk nog belangrijker is de vraag of de uitvoering van je opdracht het gewenste effect op de ontwikkeling van het incident heeft. Klopt je plan van aanpak nog of moet dat worden bijgesteld? En wanneer een opdracht anders wordt uitgevoerd dan afgesproken, ligt dit dan aan een verkeerde interpretatie van je opdracht of aan een onverwachte gebeurtenis? Allemaal vragen waarop je een antwoord moet zien te krijgen om de incidentbestrijding goed te kunnen monitoren.

5.5.2 FABCM en Naturalistic Decision Making

De onderstaande tabel 5.1 geeft per fase van FABCM elementen weer van Naturalistic Decision Making (NDM), evenals een bijbehorende aanbeveling voor incidentmanagers.

Tabel 5.1 FABCM, Naturalistic Decision Making en aanbevelingen voor incidentmanagers

Fase FABCM	Naturalistic decision making	Aanbevelingen voor incidentmanagers
Feiten verzamelen	Beslissers beslissen op basis van hun perceptie van de werkelijkheid	Toets actief het gevormde beeld aan de realiteit
	Waarnemingsvermogen en geheugen voor informatievoorziening zijn beperkt	Beperk het aantal taken dat tegelijkertijd uitgevoerd moet worden
	Afstand tot object bepaalt waarneming	Observeer de situatie zowel van dichtbij als van veraf
Feiten analyseren	Onder tijdsdruk hebben mensen de neiging om onmiddellijk op basis van situatierkenning te beslissen	Wees kritisch op de eerste impulsieve beslissing die naar boven komt en denk na over de gevolgen
	Tijdsdruk en taakoverbelasting beperken het rationele denkvermogen	Neem de tijd bij het nemen van een beslissing en beperk taakbelasting
Besluiten nemen	Te veel beslissingen nemen verkleint de kans dat deze ook daadwerkelijk uitgevoerd worden	Beperk het aantal kritieke opdrachten voor ondergeschikten

Fase FABCM	Naturalistic decision making	Aanbevelingen voor incidentmanagers
Communiceren	Opdrachten worden geïnterpreteerd binnen het eigen referentiekader	Verifieer of opdrachten door ondergeschikten begrepen worden
	In turbulente omgevingen is communicatie doorgaans inefficiënt en beperkt	Communiceer het doel van de opdracht en de randvoorwaarden gericht, geadresseerd en gemotiveerd
Monitoren	Het geven van een opdracht betekent niet dat deze altijd wordt uitgevoerd zoals beoogd	Zie actief toe op de uitvoering van opdrachten

5.5.3 Situation awareness en option awareness

De eerste twee fasen van het FABCM-model zijn cruciaal om als incidentmanager tot een goed besluit te komen. Of we nu feiten verzamelen of analyseren: in beide fasen is omgevingsbewustzijn noodzakelijk om in de overvloed van informatie de focus scherp te houden. Weten we in welke situatie we zitten, wat hierin de hoofdzaken (prioriteiten) zijn en bijzaken (alles wat later misschien belangrijk is, maar nu alleen maar afleidt), en hoe we beide uit elkaar kunnen houden? Wanneer wordt het tijd om in te zoomen op details omdat een bijzaak opeens hoofdzaak wordt, en wanneer moeten we juist uitzoomen om het grotere plaatje te blijven zien?

De internationale vakterm voor omgevingsbewustzijn is 'situation(al) awareness'. Hieronder behandelen we eerst dit fenomeen en vervolgens het begrip option awareness (kort gezegd: inzicht in de mogelijke opties). We besluiten deze paragraaf met een inbedding van situation awareness en option awareness in FABCM.

Situation awareness

In de literatuur over besluitvorming onder druk bestaat een brede consensus dat een goede situation awareness in belangrijke mate de kwaliteit van de besluitvorming bepaalt. Mica Endsley (Endsley, 1995), een pionier op het gebied van onderzoek naar situation awareness, stelt dat zelfs de best getrainde beslissers de verkeerde beslissingen nemen wanneer hun situation awareness inaccuraat of onvolledig is.

Maar wat is nu precies situation awareness? In het onderzoek naar situationele commandovoering bij de brandweer wordt situation awareness gedefinieerd als "de manier waarop je informatie tot je neemt en toepast voor een veilig en effectief repressief optreden" (Brandweeracademie, 2015, p. 10). Endsley (2000, p.3) zelf kiest voor de volgende formulering: "The perception of the elements in the environment within a volume of space and time, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future" Met andere woorden: waarnemen en begrijpen wat er om je heen gebeurt en anticiperen op toekomstige ontwikkelingen.

In de definitie van Endsley zitten drie niveaus van cognitieve informatieverwerking die zich in onze hersenen afspelen:

1. **Perceptie:** de waarneming van de situatie, zoals die zich middels onze zintuigen via gebeurtenissen en objecten in ruimte en tijd aan ons voordoet. Binnen het FABCM-model valt perceptie samen met de verzameling van feiten: het waargenomen beeld van het incident als resultaat van de verkenning.
2. **Inzicht:** door de waargenomen gegevens te combineren en interpreteren krijgen ze een samenhangende betekenis; data worden op deze manier geïntegreerd tot betekenisvolle informatie. Dit combineren en interpreteren van gegevens is de kern van fase 2 in FABCM: het analyseren van de feiten, waardoor de incidentmanager of commandovoerder een correct mentaal model van het incident kan ontwikkelen. Hij combineert bijvoorbeeld de kleur van de rook met de dichtheid en het stromingspatroon ervan, waardoor hij het stadium van de brandontwikkeling kan inschatten.
3. **Projectie:** het voorspellen van de toekomstige situatie, zodat er handelingsperspectieven in beeld komen en er besluiten genomen kunnen worden over nodige of wenselijke acties. Op dit hoogste niveau van situation awareness zitten we in de besluitvormende fase van FABCM. Omdat een gebouwbrand dynamisch is, moeten we het inzicht van het tweede niveau van situation awareness als incidentmanager altijd gebruiken om te anticiperen op de komende 5, 10 of 15 minuten. Het is daarom belangrijk dat de incidentmanager in scenario's kan denken.

Op alle drie de niveaus kan er als gevolg van de human factor van alles misgaan. 'Fouten' op het eerste niveau slijpen door naar het tweede niveau en de fouten die daar worden gemaakt ondergraven op hun beurt de kwaliteit van een besluit op het derde niveau. Zo kan een verkeerde perceptie van de situatie het gevolg zijn van het ontbreken van gegevens, het negeren ervan, het vergeten van informatie of het niet goed meekrijgen daarvan door een communicatiestoornis. Een beperkt of onjuist inzicht in de situatie kan ontstaan omdat we niet goed in staat zijn alle gegevens met elkaar te combineren, of omdat we een onvolledig of onjuist mentaal model van de situatie hebben. Dit kan gebeuren wanneer we de relaties tussen de gegevens (zoals gebeurtenissen en symptomen) onvoldoende begrijpen of over die relaties (zoals oorzaak en gevolg) verkeerde aannames doen. Zo'n onvolledig of incorrect mentaal model kan tot een verkeerde voorspelling over de ontwikkeling van de situatie leiden, waardoor we 'in het verkeerde scenario zitten'. Het incident ontwikkelt zich dan anders dan we hadden verwacht, waardoor het gekozen handelingsperspectief ook niet klopt. Hierop komen we straks bij de behandeling van option awareness nog terug.

Om te begrijpen hoe fouten op de drie niveaus kunnen ontstaan en daarmee onze situation awareness in de weg zitten, moeten we eerst terug naar de vaststelling aan het begin van dit hoofdstuk: menselijk gedrag is onderhevig aan valkuilen waar we door triggers zoals dreiging, onzekerheid en tijdsdruk gemakkelijk in kunnen vallen – triggers waar de incidentmanager per definitie mee te maken heeft. Eén valkuil kan al voldoende zijn om fouten op alle drie niveaus te veroorzaken. Waarneming, geheugen en aandacht zijn de drie kritische processen van situation awareness die vatbaar zijn voor invloeden zoals stress, vermoeidheid en een gebrek aan concentratie of motivatie, waardoor een volmaakte situation awareness per definitie niet bestaat. Het is daarom realistisch om in ons optreden als incidentmanager een onzekerheidsmarge in te bouwen. Deze marge biedt ons bij een onverwachte ontwikkeling van het incident nog voldoende tijd om onze mensen en de omgeving veilig te stellen.

Ed Oomes ([Rizoomes](#)) wijst erop dat situation awareness een taakspecifieke competentie is. Hoe meer kennis over, opleiding op het gebied van, en ervaring met de taak, hoe beter de situation awareness zich als competentie van de incidentmanager ontwikkelt. Hoe meer ervaring we met gebouwbranden hebben, hoe beter we in staat zijn om scenario's te herkennen (niveau 2 van situation awareness) en voorspellen (niveau 3 van situation awareness). Oomes noemt twee voorbeelden van een hoge mate van situation awareness: iemand die begrijpt wat de gevolgen zijn van de inzet van een hogedrukstraal op de vuurhaard voor de andere collega's in het pand en iemand die correct inschat dat wanneer de brand tussen muren en plafonds zit, deze zal doorlopen en zich op die manier tot aan de brandmuur of een andere stoplijn kan uitbreiden.

Er kunnen echter enkele kanttekeningen geplaatst worden bij de hiervoor besproken theorie van Endsley. Zo is niet iedereen het ermee eens dat de drie fasen van informatieverwerking na elkaar optreden. De praktijk leert dat de processen op de drie niveaus parallel verlopen en elkaar beïnvloeden. Zo kunnen er al voorspellingen worden gedaan voordat er een compleet inzicht is verkregen. Deze nuancering laat echter onverlet dat de drie niveaus van Endsley een bruikbaar inzicht bieden in de cognitieve processen en capaciteiten waaruit situation awareness is opgebouwd, inclusief de kracht en valkuilen op elk afzonderlijk niveau.

Option awareness

Een goede situation awareness leidt helaas niet altijd tot een goed besluit; daarvoor heb je ook option awareness nodig. Oomes ([Rizoomes](#)) definieert option awareness als: "Inzicht in de mogelijke opties en de robuustheid van die opties onder verschillende omstandigheden". Evenals situation awareness bestaat option awareness volgens Oomes uit drie vergelijkbare niveaus.

1. Op niveau 1 nemen we de mogelijke *opties* waar door die mentaal voor ons te zien in termen van kosten (risico's) en opbrengsten (resultaten). We vergelijken hierbij de mogelijke opties alvast met elkaar, waardoor er een zekere rangorde van geschiktheid ontstaat. Zo weten we dat een binneninzet riskanter is dan een buiteninzet. We vergelijken de oplossingen hierbij op basis van oppervlakkige informatie en losse details.
2. Om meer inzicht in de geschiktheid van een optie te krijgen, moeten we die echter goed *begrijpen*; dit is niveau 2 van option awareness, dat wat betreft cognitief proces vergelijkbaar is met het niveau inzicht van situation awareness. Om de geschiktheid van een optie te begrijpen, moeten we die mentaal visualiseren: we stellen ons voor hoe de optie inwerkt op de ontwikkeling van het incident. Iemand op dit niveau heeft zicht op de onderliggende patronen en interacties die de verschillende opties vormen en begrijpt dat een defensieve binneninzet en een offensieve buiteninzet vergelijkbare opties zijn, maar nuttig op een andere plek of ander moment.
3. Het derde en hoogste niveau van option awareness is vergelijkbaar met niveau 3 van situation awareness: *projectie*, het voorspellen van de toekomstige situatie. Dit niveau geeft de beslisser de capaciteit om nieuwe opties te bedenken in situaties die (relatief) onbekend voor hem zijn. Hij is in staat om de toekomstige ontwikkeling van het incident te voorspellen als resultaat van de uitvoering van een optie of combinatie van opties. Een Officier van Dienst die dit niveau van option awareness beheerst, kan bijvoorbeeld weloverwogen besluiten om een defensieve binneninzet tegelijk met een offensieve buiteninzet uit te laten voeren. Kunnen schakelen tussen de kwadranten van het kwadrantenmodel (zie paragraaf 6.2) is ook een voorbeeld van option awareness op niveau 3.

Hoe goed we FABCM ook mogen beheersen en hoe groot onze situation awareness ook zijn: niemand ontkomt aan de kwetsbaarheden van natuurlijke besluitvorming, ofwel de human factor. In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de verschillende kwetsbaarheden en op manieren waarop met die kwetsbaarheden kan worden omgegaan.

5.6 Omgaan met de human factor: het vangnet

Als resultaat van het onderzoek naar situationele commandovoering zijn er vijf kwetsbaarheden gedefinieerd waarbij een handelingsperspectief met een eigen symbool is bedacht. Het symbool maakt ons bewust van de kwetsbaarheid en geeft tevens aan hoe we zo met deze mensfactor om kunnen gaan, dat we de negatieve gevolgen ervan zoveel mogelijk beperken. De symbolen en hun betekenis vormen hiermee samen het zogenoemde vangnet voor de human factor.

Hieronder worden de vijf kwetsbaarheden genoemd, met tussen haakjes het symbool van het bijbehorende vangnet:

- > irrationeel en automatisch gedrag (stopbord)
- > onvoldoende kennis over de situatie en mogelijke oplossingen (richtingaanwijzer)
- > leiding die geen duidelijke doelen stelt (stoeptegel)
- > fouten en overtredingen in de uitvoering van activiteiten (controlelampje)
- > asynchrone tijdbeleving en achter de feiten aan lopen (eierwekker).

Deze kwetsbaarheden en symbolen zullen in de onderstaande paragrafen worden toelicht.

5.6.1 Het stopbord

Door tijdsdruk en andere stressoren vervallen we in irrationeel en automatisch gedrag. We kunnen dan alleen nog maar vechten, vluchten of bevriezen (zie paragraaf 5.3.1). Het nemen van besluiten op basis van herkenning en het op de automatische piloot uitvoeren van die besluiten kan als een vorm van vechten worden gezien. Kenmerkend hiervoor is dat we ons geen tijd en ruimte gunnen om de feiten in onze omgeving goed te verzamelen en analyseren, de eerste twee stappen van FABCM. Dit gaat ten koste van onze situation awareness. Het stopbord maant ons om niet in die modus voort te hollen, maar die juist even stop te zetten. Door het stopbord tijdig te herkennen en serieus te nemen, doorbreken we onze automatische manier van handelen en gunnen we ons de tijd om een betere situation awareness te creëren. Het stopbord helpt ons op die manier ook om de valkuilen te vermijden die in paragraaf 5.1 zijn behandeld, zoals fiddling around, tunnelvisie en confirmation bias. En als we merken tijdens de inzet dat we al in één of meer van die valkuilen zijn getrapt, zegt het stopbord dat we direct een pas op de plaats moeten maken. Beter ten halve gekeerd dan ten hele gedwaald!

5.6.2 De richtingaanwijzer

Soms hebben we ons op voorhand wel voldoende tijd gegund om de feiten van het incident te verzamelen en analyseren, maar blijkt de oplossing niet voor het oprapen te liggen. Het ontbreekt niet aan situation awareness, maar wel aan option awareness, bijvoorbeeld omdat de kennis of ervaring om de probleemanalyse om te zetten in een analyse van mogelijke

oplossingen ontbreekt. Dit fenomeen komt vooral voor bij onverwachte of nieuwe incidenten waarover de eenheden ter plaatse nog te weinig kennis en ervaring hebben opgedaan.

De richtingaanwijzer geeft dan aan dat je externe expertise moet aanboren. Die kennis kan digitaal of op papier zijn vastgelegd (bijvoorbeeld door collega's van risicomangement of preparatie), maar ook in de hoofden van specialisten zitten. Je hebt in elk geval specialistische hulp nodig hebt, in welke vorm dan ook! Concrete voorbeelden van richtingaanwijzers zijn bereikbaarheidskaarten, aanvalsplannen, aandachtskarten en specialisten (experts).

5.6.3 De stoepteg

Wanneer de bevelvoerder of (Hoofd)Officier van Dienst zich laat verleiden om op elk detail en elke ontwikkeling van het incident te reageren, roept dat het beeld op van een leidinggevende die geen overzicht heeft, geen prioriteiten stelt en niet toekomt aan een duidelijke communicatie over de inzetdoelen. Dit wordt meestal ook in zijn of haar gedrag zichtbaar; denk bijvoorbeeld aan een bevelvoerder die met zijn ploeg mee naar binnen gaat of een Officier van Dienst die tussen zijn bevelvoerders heen en weer rent.

Zonder overzicht geen prioriteiten, zonder prioriteiten geen besluiten en zonder besluiten geen communicatie. We zitten hier in de 'B' en 'C' van FABCM. Een goede verzameling en analyse van feiten helpen natuurlijk om overzicht te creëren, maar wanneer we na de analysefase niet de tijd nemen om prioriteiten te stellen en een duidelijk besluit te nemen waarin die prioritering is verpakt, bestaat alsnog de kans dat we ons als bevelvoerder of (Hoofd)Officier van Dienst laten meezuigen door de stroom van acties en informatie. We verliezen dan de grip op de incidentbestrijding en nemen alleen nog reactieve besluiten waarmee we achter de feiten aanlopen en die de ingezette eenheden niet duidelijk maken waarom ze doen wat ze moeten doen. Het steeds opnieuw communiceren van een besluit of herziening daarvan geeft die communicatie al snel een tegenstrijdige en daardoor chaotische indruk, hoewel de oorzaak daarvan niet in de communicatie zelf ligt.

Het risico op het verlies van overzicht en grip ontstaat vooral als de leidinggevende onvoldoende afstand neemt om via een eigen FABCM-cyclus een totaaloverzicht van het incident en de lopende bestrijding daarvan te creëren. Denk aan een Officier van Dienst die zijn bevelvoerders niet voor de voeten durft te lopen en daarom maar achter hen aanrent. De stoepteg verwijst naar de noodzaak om letterlijk afstand van het incident te nemen. Die afstand is nodig om de grote lijnen te kunnen zien, de lopende inzet op hoofdzaken te kunnen bijsturen en zich niet te verliezen in de hectiek van het moment. Een leider die op afstand van het 'strijdgewoel' staat, is voor zijn manschappen een baken in zee. Een Officier van Dienst die op zo'n stoepteg staat is voor zijn bevelvoerder makkelijker te vinden en kan zijn rol als 'linking pin' tussen de incidentbestrijding en alle andere noodzakelijke activiteiten beter uitoefenen.

5.6.4 Het controlelampje

Een doelmatige uitvoering van de primaire processen is afhankelijk van de kwaliteit van de secundaire processen. Neem als voorbeeld een langdurige inzet bij brand. Om die succesvol af te ronden moeten er niet alleen genoeg bluskrachten en voldoende bluswater zijn (primaire processen), maar moeten ook secundaire processen zoals de logistiek, aflossing en milieuzorg goed geregeld zijn. In de hectiek van de incidentbestrijding worden dergelijke randvoorwaarden nogal eens uit het oog verloren. Het controlelampje staat symbool voor het

bewaken van de kwaliteit van de secundaire processen en het tijdig signaleren van fouten of gebreken in deze processen. Op die manier helpt het controlelampje om de inzet goed te monitoren (de M van FABCM).

5.6.5 De eierwekker

Het fenomeen tijdscompressie (zie paragraaf 5.1.5) wijst ons erop dat de tijdbeleving van een incident niet gelijkloopt met het daadwerkelijke tijdsverloop. We noemen dit een asynchrone tijdbeleving. In de hectiek van de incidentbestrijding vliegt de tijd, met als gevolg dat we denken dat er minder tijd voorbij is dan in werkelijkheid het geval is. Dit kan in de praktijk van de incidentbestrijding grote risico's met zich meebrengen. De zogenoemde tijd-tempo-factor is immers randvoorwaardelijk voor het succes van de inzet. Simpel gezegd: wanneer het veel later is dan we denken of verwachten, lopen we al snel achter de feiten aan. De brand kan zich in die kloktijd veel verder hebben uitgebreid dan we op grond van onze belevingstijd hadden verwacht. Om de brandbestrijding goed af te stemmen op de brand, moeten we zowel de brandontwikkeling als het effect van de inzet op die ontwikkeling op basis van de kloktijd inschatten en monitoren, en niet op basis van onze belevingstijd. Een realistische tijdsbeleving is dus randvoorwaardelijk om de 'M' van FABCM goed uit te kunnen voeren.

De eierwekker symboliseert het belang van een synchrone tijdbeleving. De wekker bewaakt de kloktijd en gaat af wanneer een kritische deadline wordt genaderd of gepasseerd. De functie van de eierwekker kan in de praktijk op allerlei manieren worden ingevuld. Een concreet voorbeeld is de reservedrukbeveiliging van een ademluchtfles. Die geeft een fluittoon wanneer de ademlucht drager moet terugkeren om te voorkomen dat hij zonder lucht komt te zitten. Je kunt ook denken aan een collega die de inzettijd van de ploegen bijhoudt met het oog op hun tijdige aflossing. Het controlelampje van de secundaire processen zoals hierboven behandeld kan niet zonder de eierwekker. Ook kan de Officier van Dienst met zijn bevelvoerders afspreken om op vooraf afgesproken tijdstippen contact met elkaar op te nemen om 'de klokken weer even gelijk te zetten'.

6 Verkennen van gebouwbranden

In dit hoofdstuk staat het verkennen van gebouwbranden centraal.⁸ We gaan in op het kenmerkschema in paragraaf 6.1 en het kwadrantenmodel in paragraaf 6.2. In paragraaf 6.3 komt de koppeling tussen repressie en preventie aan de orde, wanneer dieper wordt ingegaan op gebouwkenmerken. De basisprincipes van brandbestrijding komen aan bod in paragraaf 6.4, waarna we aandacht besteden aan de werkmethode in paragraaf 6.5.

6.1 Het kenmerkschema

Het kenmerkschema is een model waarmee op een gestructureerde wijze (het doel van) de inzet kan worden bepaald. De brandweer heeft diverse doelen bij het optreden bij gebouwenbranden:

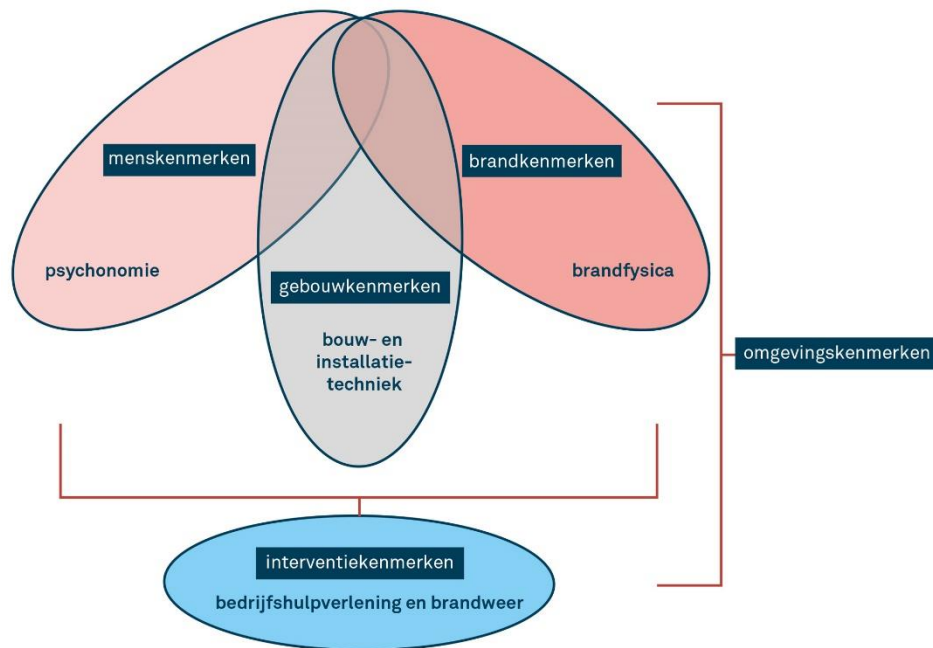
- > redden van mensen
- > (ondersteunen of mogelijk maken van de) ontruiming of evacuatie van het gebouw
- > creëren van overlevingscondities
- > mogelijk maken van een veilige betreding
- > voorkomen van branduitbreiding naar belendende gebouwen
- > voorkomen van branduitbreiding binnen het gebouw
- > blussen van de brand
- > beperken van nadelige effecten op milieu en maatschappij.

Bij de keuze voor een doel en manier van optreden moet de repressief leidinggevende rekening houden met de volgende kenmerken van het incident (die verderop in deze paragraaf worden toegelicht):

- > brandkenmerken
- > gebouwkenmerken (gebouwwontwerp en brandpreventieve voorzieningen)
- > menskenmerken (gedrag van de mensen in het gebouw)
- > interventiekenmerken
- > omgevingskenmerken.

Het incident wordt altijd bepaald door een combinatie van deze kenmerken, die bij de verkenning in beeld gebracht moeten worden. De leidinggevende moet de samenhang van de kenmerken beoordelen om tot een juiste keuze voor een inzetkwadrant te komen (zie paragraaf 6.2). Het is dus essentieel dat de verkenning efficiënt en volledig gebeurt. De complexiteit van een gebouw kan bijvoorbeeld een reden zijn voor opschaling, net als de aanwezigheid van veel niet-zelfredzame mensen in het pand. De vijf kenmerken brand, gebouw, mens, interventie en omgeving – ook wel het kenmerkschema genoemd (zie figuur 6.1) – zijn dus van groot belang voor de beeldvorming, oordeelsvorming en besluitvorming en daarmee voor de keuze voor het juiste inzetkwadrant.

⁸ Een groot deel van dit hoofdstuk is vrijwel integraal overgenomen uit de *Doctrine brandbestrijding* (nog niet gepubliceerd).



Figuur 6.1 Het kenmerkenschema

De brandkenmerken, gebouwkenmerken, menskenmerken en de interventie- en omgevingskenmerken bepalen in samenhang het incident – en dus in grote mate de keuze voor een kwadrant en de bijbehorende tactiek.

Hier volgen twee voorbeelden die de invloed van een van de vijf kenmerken – in dit geval menskenmerken – beschrijven. Het eerste is een brand in een kantoorgebouw; dit is een ander incident dan exact dezelfde brand (wat betreft plaats, omvang en brandkenmerken) in een ziekenhuis. Een brand in een discotheek zaterdagavond om 03.00 uur is een ander incident dan exact dezelfde brand in hetzelfde pand op maandagmiddag om 15.00 als het gebruikt wordt door de plaatselijke modelbouwvereniging. De verschillen in kenmerken van de aanwezigen (respectievelijk gezonde mensen versus zieken en vermoedelijk onder de invloed van alcohol verkerende jongeren versus nuchtere, zelfredzame mensen) zijn van invloed op het incident.

6.1.1 Brandkenmerken

Voor een beter begrip van de context beginnen we deze paragraaf met een herhaling van de begrippen brandstofgecontroleerd en zuurstofgecontroleerd, die al in paragraaf 3.3 uitgebreid aan de orde zijn geweest.

Brandstofgecontroleerd

Een brand is brandstofgecontroleerd als (bij voldoende zuurstof) de verbrandingssnelheid en omvang van de brand door de hoeveelheid brandstof worden bepaald. Veel verbrandingsvormen die we kennen en gebruiken zijn brandstofgecontroleerd. Denk maar aan de kaarsvlam, het gasfornuis en de open haard. Vrijwel alle gebouwbranden beginnen ook brandstofgecontroleerd: er is een kleine hoeveelheid brandbare stof bij betrokken en er is voldoende zuurstof.

Zuurstofgecontroleerd

Een brand is zuurstofgecontroleerd als (bij voldoende brandstof) de verbrandingssnelheid door de hoeveelheid zuurstof wordt bepaald. Bij de eerdergenoemde gebouwbrand wordt dit stadium bereikt nadat de brand enige tijd heeft gewoed, er steeds meer brandbaar materiaal bij de brand betrokken raakt en het gebouw zelf goed gesloten blijft (er bezwijken geen ramen en het dak of de wand brandt niet door). De verbranding verbruikt veel zuurstof, waardoor de verhouding zuurstof-brandstof verder afneemt. Op het moment dat er onvoldoende zuurstof aanwezig is om een goede verbranding van de brandstof te onderhouden, gaan we over van een brandstofgecontroleerde brand naar een zuurstofgecontroleerd brand. Door de hoge temperatuur die in de ruimte of het gebouw heerst, zal de pyrolyse wel blijven doorgaan. Er wordt dus nog steeds brandstof geproduceerd.

Veel branden waar de brandweer naar uitrukt, zullen bij aankomst zuurstofgecontroleerd zijn, zelfs als de brand uitslaand is. Omdat het onderscheid vrij lastig te maken is en zuurstofgecontroleerde branden het gevaarlijkst zijn voor brandweermensen, gaan we ervan uit dat de brand zuurstofgecontroleerd is, tenzij duidelijk is dat hij nog brandstofgecontroleerd is (in het beginstadium, of als de brandstof zo goed als opgebrand is). De situatie is uiteraard wel afhankelijk van de brandomvang en de grootte van de brandruimte. Zo kan een binnenbrand zich in bepaalde gevallen gedragen als een buitenbrand, en is in dat geval dus brandstofgecontroleerd.

Ondergeventileerde brand

De laatste jaren heeft ook de term 'ondergeventileerde brand' zijn intrede gedaan. Met 'ondergeventileerd' wordt een brand aangeduid, die voordat de flashover heeft plaatsgevonden van de brandstofgecontroleerde fase naar de zuurstofgecontroleerde fase overgaat. Hiermee wordt een brand bedoeld die (bijna) is gedoofd door gebrek aan zuurstof. In feite is de term ondergeventileerde brand niet noodzakelijk voor een beter begrip van het brandverloop, omdat het eigenlijk een zuurstofgecontroleerde brand betreft.

Uitslaande brand

Als de brandbare gassen in de rook de juiste samenstelling met zuurstof hebben en heet genoeg zijn om te ontsteken, zullen we vlamverschijnselen waarnemen. Als de vlammen naar buiten komen via een opening in het gebouw spreken we van een uitslaande brand. Die vlammen kunnen uitslaan uit een opening in de ruimte waar de brand zich bevindt. Een offensieve buiteninzet (voorafgaand aan de binneninzet) is dan een goede inzetactie. Het kan ook zijn, dat de rook pas buiten het gebouw door opmenging met zuurstof gaat branden. In dat laatste geval zullen we zien dat een offensieve buiteninzet hier vaak geen effect heeft.

RSTV-branddriehoek

De branddriehoek (zie paragraaf 3.1) is een belangrijk hulpmiddel om te bepalen hoe de brand het beste aangepakt kan worden. De branddriehoek heeft drie zijden: zuurstof, temperatuur en brandstof. De brandbare gassen in rook vormen de brandstof. Omdat alle brandbare gassen transparant zijn, zegt de kleur van de rook niets over de brandbaarheid ervan. We kunnen de samenstelling ook niet lezen, en bovendien is die heel lastig te meten. De samenstelling (een juiste verhouding met zuurstof) is belangrijker dan de temperatuur van de rook: ook koude rook kan immers ontbranden.

Het potentiële vermogen van de brand wordt bepaald door de zuurstoftoevoer. De temperatuur kan worden beïnvloed door water op te brengen. Zo zijn water en zuurstoftoevoer dus communicerende vaten. De zuurstoftoevoer wordt bepaald door de openingen in het gebouw en de wind. Hoe meer openingen en hoe meer wind er op die openingen staat, des te groter de zuurstoftoevoer. Schematisch weergegeven:

Veel openingen → veel zuurstoftoevoer → groot vermogen → veel water nodig.

In de RSTV-branddriehoek staat de R voor brandstof, de S voor stroming en zuurstoftoevoer (opening), T voor temperatuur en de V voor vlammen. De vlammen komen vanzelf als alle drie de zijden aanwezig en in de juiste mengverhouding zijn. Daarom worden de brandkenmerken bepaald door de RSTV-branddriehoek en moet de brand daarop ook worden verkend.

Potentieel brandvermogen

Het (potentiele) brandvermogen wordt dus voornamelijk bepaald door de openingen in een gebouw. In de basisprincipes (paragraaf 6.4) worden hier vuistregels voor gegeven. Het brandvermogen is bepalend voor de hoeveelheid koelend vermogen die nodig is, naast de bereikbaarheid van de brandhaard. Bijvoorbeeld: als een brand 3 MW is, maar ergens achter zit waardoor er met de straal niet goed bij kan worden gekomen, is wellicht meer water nodig. We spreken van potentieel brandvermogen, omdat we er rekening mee moeten houden dat er tijdens het naderen van een brandhaard extra openingen gevormd kunnen worden (bijvoorbeeld door het knappen van een raam), waardoor het vermogen plotseling kan toenemen.

Wijze en mate van branduitbreiding

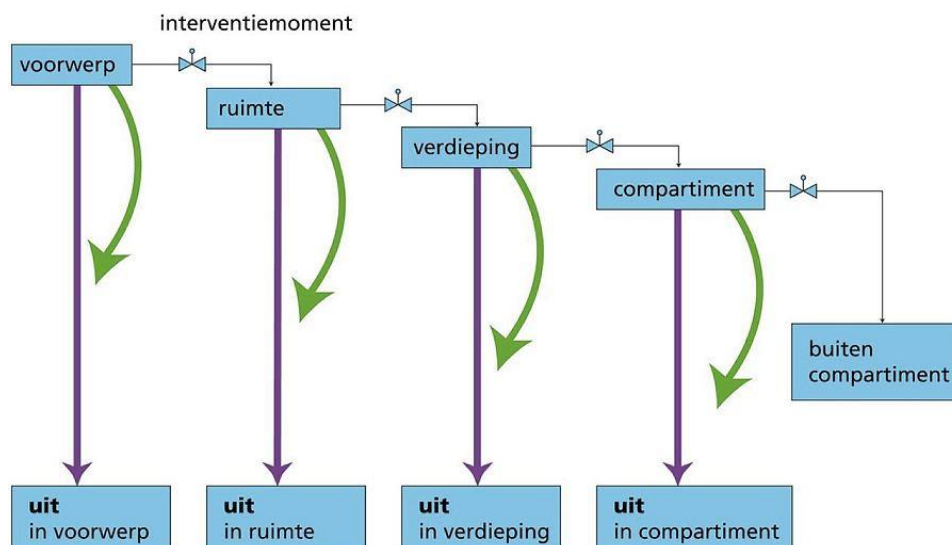
De wijze en mate van branduitbreiding in het gebouw spelen bij het bepalen van de brandkenmerken natuurlijk een belangrijke rol. Het waarnemen hiervan geeft belangrijke input voor de verdere besluitvorming rond de toe te passen tactiek (het te kiezen kwadrant, zie 6.2).

- > Spreken we over een brand in een gebouw? Met andere woorden: brandt voornamelijk de inventaris?
- > Of is er sprake van een gebouw in brand? Met andere woorden: brandt de constructie van het gebouw ook?

Naast de RSTV-branddriehoek geeft het cascademodel (zie figuur 6.2 op de volgende pagina) een invulling aan dit aspect van de brandkenmerken. De basisgedachte van het cascademodel is dat vuur en rook (in een gebouw) verschillende fysieke, tijdsvolgorde-lijke fasen doorlopen en dat de brand te beïnvloeden is door interventies. Het cascademodel richt zich niet alleen op de omvang van de brand, maar ook op de verspreiding van de rook.

Een brand ontstaat (door verschillende factoren) in een voorwerp (eerste cascade). Dit voorwerp kan van alles zijn: een prullenbak, een pan, een gordijn, enzovoort. Dit is de eerste fase van de brand. In veel gevallen is de brand dan nog met beperkte middelen te blussen of op een andere manier te beperken. Een succesvolle interventie leidt ertoe dat de brand uit gaat. In de tweede stap van het cascademodel breidt de brand zich uit naar andere voorwerpen in dezelfde ruimte als waar het brandende voorwerp staat. Dit kan door direct vlamcontact, door hittestraling vanuit het voorwerp of via de hete rookgassen. Of dit wel of niet gebeurt, is ook weer afhankelijk van verschillende factoren. De volgende stappen zijn

wanneer een brand zich uitbreidt naar andere ruimtes op dezelfde verdieping (stap 3), in het brandcompartiment (stap 4) of zelfs daarbuiten (stap 5). Ook dit is weer afhankelijk van verschillende factoren (bijvoorbeeld op welk moment er geblust wordt, de aanwezigheid van brandbare materialen, enzovoort).



Figuur 6.2 Het cascademodel

Het is natuurlijk helemaal afhankelijk van de omvang en indeling in verdiepingen en/of brandcompartimenten of alle cascades ook werkelijk herkenbaar zijn. Het kan voorkomen dat verdieping en brandcompartiment samenvallen, of dat er binnen een brandcompartiment meerdere verdiepingen zijn. In bijvoorbeeld ziekenhuizen kunnen meerdere brandcompartimenten binnen een verdieping vallen.

Rookontwikkeling

Rook is brandstof. Verspreidt de rook zich tot buiten het brandende brandcompartiment, dan kan via deze rook ook branduitbreiding plaatsvinden. Brandgassen kunnen immers ook buiten de brandende ruimte ontbranden. De mate van rookverspreiding geeft dus indicaties over de te verwachten mate van branduitbreiding. De rookontwikkeling loopt meestal een of meer cascades vooruit op de brandontwikkeling.

6.1.2 Gebouwkenmerken

Bij de gebouwkenmerken gaat het op de eerste plaats om het ontwerp van het gebouw. Kenmerken als hoogte⁹, complexiteit, grote bouwvolumes en ondergrond spelen een rol. Deze kenmerken zijn van invloed op de ontwikkeling en de effecten van brand en op de mogelijkheden en tactiek van de brandbestrijding. De brandbestrijding in een gebouw met meerdere verdiepingen verschilt aanzienlijk van die in een eengezinswoning.

⁹ Door de bouwwijze bestaat in hoogbouw het risico van wind driven fires (zie paragraaf 3.8). Dit vraagt om een andere benadering van de inzet tactiek. In met name bouwwerken die inpandige gangen hebben, zal dit risico bij een offensieve binneninzet enorm toenemen. Een wind driven fire kan beginnen als een gewone kamerbrand. Als er vervolgens ramen in de gevel kapotgaan, krijgt de brand opeens veel zuurstof. De wind zorgt ervoor dat de escalatie van de brand razendsnel plaatsvindt tot een volledige brand in de brandruimte. Daarnaast zorgt de wind er in deze situatie voor dat de brand het gebouw 'ingedrukt' wordt. Wind driven fires kunnen in allerlei soorten gebouwen optreden, maar hoge gebouwen zijn hier, vanwege hun vrije windvang, het meest vatbaar voor.

Daarnaast gaat het bij gebouwkenmerken over de technische voorzieningen die genomen zijn ten behoeve van de brandveiligheid. We kennen twee soorten technische voorzieningen.

- > Fysieke (passieve) voorzieningen, bijvoorbeeld onbrandbaarheid van materialen en brand- en rookcompartimentering.
- > Installatietechnische (actieve) voorzieningen, bijvoorbeeld automatische blusinstallaties zoals een sprinkler.

De technische voorzieningen beïnvloeden zowel de brand(uitbreiding) (een sprinklerinstallatie kan bijvoorbeeld de brand in een vroegtijdig stadium blussen), als het gedrag van de mensen die nog in het pand zijn bij een brand (bijvoorbeeld door de plaats en uitvoering van nooduitgangen). In paragraaf 6.2 worden de gebouwkenmerken verder uitgewerkt en gekoppeld aan de inzetdoelen van het kwadrantenmodel.



Figuur 6.3 Brand in hoogbouw (TU Delft) (Bron: Onbekend)

6.1.3 Menskenmerken

Onder menskenmerken verstaan we de gedragingen van de mensen die bij een brand nog in het gebouw aanwezig zijn én de kans dat zij ten tijde van de inzet nog in leven kunnen zijn.

Menskenmerken worden bepaald door:

- > **Fysieke factoren**
Zijn mensen niet-zelfredzaam doordat ze bedlegerig zijn, een handicap hebben, drank of drugs gebruikt hebben, lijden aan bepaalde psychische problemen of door hun leeftijd (denk aan kinderen en ouderen)?
- > **De mate van opmerkzaamheid**
Slapen mensen bijvoorbeeld ten tijde van de brand? Of wordt de brand juist overdag ontdekt terwijl iedereen wakker is?
- > **Organisatorische factoren**
Welke aanwijzingen geven Bhv'ers met betrekking tot de ontruiming?

De mensenmerken worden ook weer beïnvloed door zowel de brandkenmerken (een grote rookontwikkeling leidt bijvoorbeeld tot desoriëntatie en verlies van bewustzijn) als de gebouwkenmerken (mogelijkheid tot ontvluchting).

6.1.4 Interventiekenmerken

Het is duidelijk dat de keuze voor een kwadrant (het inzetdoel) dus mede wordt bepaald door de beoordeling van de brand-, gebouw- en mensenmerken van het incident. De mate waarin de brand kan worden bestreden, en dus de (voorspelbare) afloop, worden bepaald door de interventiekenmerken. Wordt een kleine brand bijvoorbeeld al direct geblust door een bewoner of een Bhv'er? Hoe effectief kan de brandweer optreden?

Bij het bepalen van een effectieve inzetactie door de brandweer is het van belang om te weten waar de brandhaard zich bevindt, hoe groot deze ongeveer is (in ruimte en vermogen) en welke preventieve voorzieningen er in de directe nabijheid al dan niet aanwezig zijn. Op basis daarvan kan worden bepaald of er direct voldoende blusmiddel kan worden opgebracht om de branduitbreiding te beperken. Als dit niet mogelijk is, dan zal de brand zich verder uitbreiden en is het nodig om te voorspellen hoe hij zich zal gaan ontwikkelen. In die situatie kan het verstandig zijn om eerst een defensieve inzetactie te kiezen, totdat er voldoende slagkracht (blusmiddel, mensen, materieel) aanwezig is.

Als er in het gebouw ook nog een slachtoffer aanwezig is, zal een keuze moeten worden gemaakt of eerst wordt ingezet op redding of dat eerst blussen het meest effectief is. Deze keuze hangt onder meer af van de plaats van het slachtoffer ten opzichte van de vuurhaard en de omvang van de brand in relatie tot het koelend vermogen.

Uiteraard moeten we bij de interventiekenmerken ook rekening houden met de belasting en belastbaarheid van brandweermensen. Dat geldt zowel voor de mentale als de fysieke belasting en belastbaarheid. In de winter bij strenge vorst kan een keuze anders uitvallen dan midden in de zomer bij 35°C. Bij hogere temperaturen zal er sneller hittestress optreden dan als het kouder is. De fysieke inspanningen moeten dan worden beperkt en er is sneller aflossing nodig.

Ook moeten we rekening houden met de mentale gesteldheid. Zo is het bekend dat in de nacht slaapinertie kan optreden en mensen niet optimaal kunnen functioneren en communiceren. Maar ook onder wakende omstandigheden hebben mensen onder druk (denk aan tijdsdruk, groepsdruk, druk van omstanders) te maken met beperkingen, zoals beperkingen in hun omgevingsbewustzijn (dingen missen), confirmation bias, tunnel vision, tijdscompressie en information overload (zie paragraaf 5.1). Hiervoor zijn binnen de situationele commandovering een aantal hulpmiddelen ontwikkeld (het vangnet, zie paragraaf 5.6), maar we kunnen deze beperkingen nooit helemaal wegnemen.

6.1.5 Omgevingskenmerken

Op de brand-, gebouw-, mens- en interventiekenmerken zijn ook omgevingskenmerken van invloed. Het gaat hierbij om factoren als de ligging van het gebouw in relatie tot de brandveiligheid. Wat is de bereikbaarheid van het object? Hoe snel kan de brandweer ter plaatse zijn? Wat is de afstand van het object tot de belendende bebouwing, enzovoort.

De interventiemogelijkheden kunnen ook beperkt worden door weersomstandigheden. Wind bijvoorbeeld kan een brand aanjagen en bij hoge gebouwen leiden tot de zogenaamde wind driven fires (zie paragraaf 3.8 en voetnoot 9). Verder leidt extreme kou tot bevrozing van bluswater en slangen, terwijl extreme hitte de inzetduur en het herstel van het ingezette personeel beperkt.

6.2 Het kwadrantenmodel

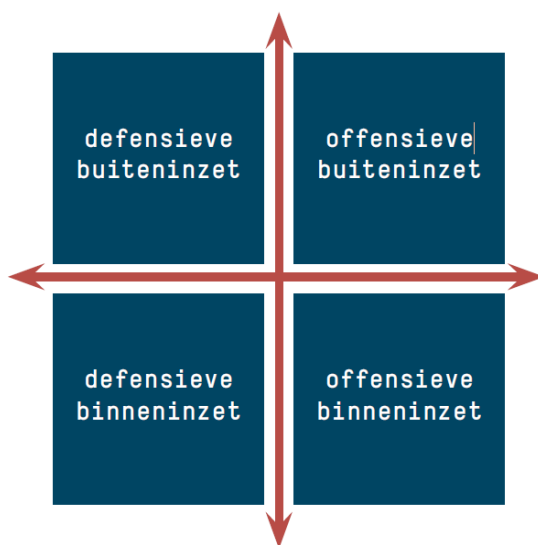
Het kwadrantenmodel biedt ons een goede basis en handvatten voor het bepalen van de beste manier van brandbeheersing en brandbestrijding. Het kan operationeel leidinggevenden helpen om voor elk doel de juiste inzetactie te bepalen. Het kwadrantenmodel is een onderdeel van de tactische brandweerdoctrine en het model voor de inzetbepaling.

6.2.1 Inzettactiek bepalen met het kwadrantenmodel

Het kwadrantenmodel is opgezet vanuit twee assen:

- > buiten tegenover binnen
- > defensief tegenover offensief.

Hierbij wordt met offensief bedoeld: de brand blussen of bestrijden, en met defensief: uitbreiding van het incident voorkomen of beperken. Het kan daarbij gaan om het voorkomen van branduitbreiding, maar ook om het beperken van bepaalde effecten van brand.



Figuur 6.4 Het kwadrantenmodel

Het kwadrantenmodel is vooral een denkmodel, waarbij de lijnen tussen de kwadranten bij de brandbestrijding de noodzaak tot heroverweging van de inzetactie symboliseren (het 'schakelmoment'). Daarnaast kan het kwadrantenmodel helpen om risicobeheersing en incidentbestrijding op elkaar af te stemmen.

Het kwadrantenmodel is geen procedure, maar een hulpmiddel bij het kiezen van tactiek en middelen. Elk kwadrant kent zijn eigen doelstellingen.

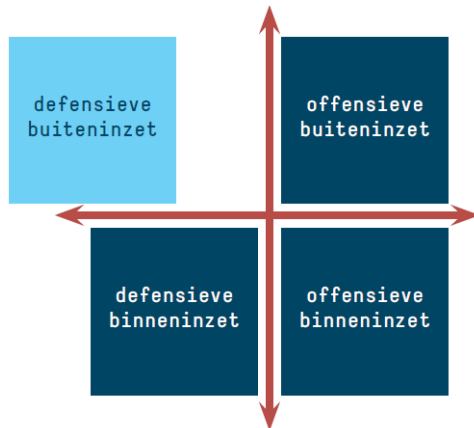
Niet iedere brand kan en hoeft in het keurslijf van het kwadrantenmodel gestopt te worden, als dat in een bepaalde situatie niet helpt.

6.2.2 Defensief buiten

Doel van de defensieve buiteninzet is schadebeperking door:

- > het voorkomen van uitbreiding naar belendingen
- > het voorkomen van milieuschade
- > het beperken van de effecten van rook.

Een defensieve buiteninzet wordt gebruikt bij een gebouw in brand: de vuurhaard is niet of nauwelijks te lokaliseren of niet beheersbaar met de aanwezige middelen en mogelijkheden, er komt veel rook vrij en de constructie is zodanig dat het gebouw snel kan instorten. Het brandweerpersoneel wordt ingezet buiten het gebouw, buiten de valschaduw.¹⁰



Figuur 6.5 Kwadrant defensief buiten

6.2.3 Offensief buiten

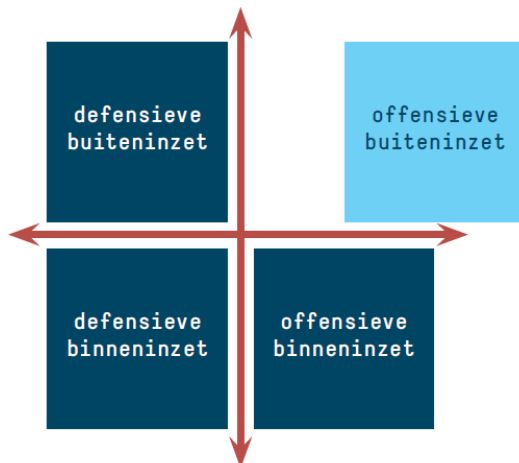
Ook bij de offensieve buiteninzet wordt het brandweerpersoneel ingezet buiten het gebouw, maar dan binnen de valschaduw daarvan. De offensieve buiteninzet wordt toegepast als een binneninzet voor het brandweerpersoneel (nog) niet veilig is en kan een eerste stap zijn naar een defensieve of een offensieve binneninzet. De constructie wordt voldoende veilig geacht om het personeel binnen de valschaduw van het gebouw in te zetten.

Het optreden is gericht op het:

- > verbeteren van de overlevingscondities van eventuele slachtoffers (er zijn mogelijk slachtoffers binnen die niet direct via een binneninzet kunnen worden gered, en/of een binneninzet is te gevaarlijk)
- > mogelijk maken van een veilige betreding door een veilige werksituatie te creëren
- > voorkomen van uitbreiding
- > blussen van de brand.

Kennis van preventieve voorzieningen speelt bij de keuzes in dit kwadrant een belangrijke rol. Door een doelbewuste keuze van inzet- en blustechnieken kunnen met deze tactiek goede resultaten worden bereikt. De overlevingskansen van eventuele slachtoffers kan, ook zonder binneninzet, worden vergroot. Uiteindelijk kan het daardoor zelfs mogelijk zijn om een redding sneller uit te voeren.

¹⁰ De valschaduw wordt in het algemeen uitgelegd als 1,5 maal de hoogte van het gebouw.



Figuur 6.6 Kwadrant offensief buiten

6.2.4 Defensief binnen

Bij een defensieve binneninzet wordt het brandweerpersoneel ingezet binnen in het gebouw, in een naastgelegen (sub)brandcompartiment.¹¹ Doelen van de defensieve binneninzet zijn:

- > gelegenheid bieden voor het uitvoeren van een evacuatie (evacuatiescheiding in stand houden)
- > het voorkomen van uitbreiding (brand binnen het (sub)brandcompartiment houden)
- > het voorkomen van rookverspreiding
- > schadebeperking.

Bij de defensieve binneninzet wordt het gebouw wel betreden, maar wordt alleen opgetreden in dat deel van het gebouw waar geen brand is (maar mogelijk wel rook) én als zeker is dat de constructie nog intact is. Er is sprake van een brand in een gebouw (inventaris), dus géén gebouw in brand.

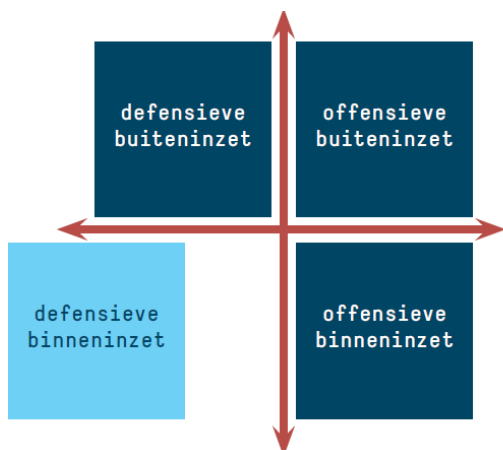
Bij de tactiek van de defensieve binneninzet hangen het doel en de werkwijze af van het gebouwtype waarin wordt opgetreden:

- > Het ondersteunen van het uitvoeren van een evacuatie is met name een realistisch doel als er sprake is van een goede (sub)brandcompartimentering. Dat is veelal het geval in gezondheidszorggebouwen.
- > Met name in moderne industriegebouwen en bedrijfsverzamelgebouwen komt het zo nu en dan voor dat rookgassen zich via de constructie kunnen verspreiden naar een naastgelegen ruimte of compartiment. Het onderscheid tussen ruimte en compartiment is niet altijd helder. Een defensieve inzet in een dergelijke ruimte is niet zonder risico's.
- > Het beschermen van de brandwerende constructie tegen branduitbreiding blijkt in de praktijk vaak uitgevoerd te moeten worden in de ruimte waar de brand is, omdat het koelen van een muur aan de koude kant weinig effect heeft. Andere technieken (zoals onder overdruk zetten) zijn nog onvoldoende vaak toegepast om het mogelijke succes ervan te bewijzen.

¹¹ De terminologie van brandpreventieve begrippen wijzigt nogal eens. In dit document worden niet de laatste termen uit het Bouwbesluit 2012 gebruikt, maar begripsomschrijvingen die de voorziening het best duiden en die, voor zover incidentbestrijders zich al bezighouden met brandpreventieve aspecten, bij hen het meest ingeburgerd zijn.

- > In woongebouwen kan het beperken van de rookverspreiding een doelstelling zijn van de defensieve binneninzet. Het onderzoek naar rookverspreiding in woongebouwen (Brandweeracademie 2020) heeft duidelijk aangetoond dat het beperken van de rookverspreiding een van de belangrijkste doelen van de brandweer moet zijn, maar dat dit tegelijkertijd een van de lastigste opgaven is. Blijft staan dat een defensieve binneninzet bij rijtjeshuizen en portiekflats nog steeds mogelijk is.

Het toepassen van de defensieve binneninzet staat momenteel ter discussie. Misschien is de tactiek straks nog wel nodig in het kader van het beperken van rookverspreiding, meer dan voor het voorkomen van branduitbreiding. Daarom behouden we haar vooralsnog nog.

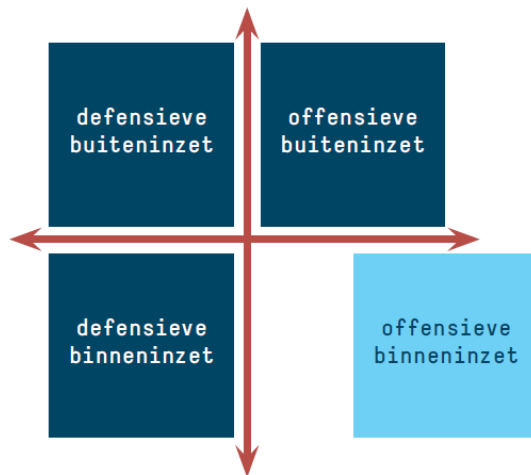


Figuur 6.7 Kwadrant defensief binnen

6.2.5 Offensief binnen

Doel van offensief binnen is redding en bestrijding van brand. Het brandweerpersoneel wordt ingezet in het gebouw, binnen het brandcompartiment. Om veilig in het brandcompartiment te kunnen optreden, zullen de condities zodanig moeten zijn dat rookgassen niet tot ontbranding kunnen komen. Dat betekent in termen van de branddriehoek dat de samenstelling van de rook buiten de explosiegrenzen moet worden gebracht en de temperatuur onder de zelfontbrandingstemperatuur. De samenstelling van de rook kunnen we echter niet aflezen.

In elk geval moeten de rookgassen onder de ontbrandingstemperatuur worden gebracht en gehouden. We moeten daarbij wel blijven bedenken dat koude rookgassen in principe óók kunnen ontsteken (zie: Brandweeracademie, 2019). De bouwkundige staat moet uiteraard ook nog goed genoeg zijn om het gebouw veilig te kunnen betreden. De afweging om wel of niet naar binnen te gaan, hangt af van de mogelijkheid om de doelstelling van het optreden (redding, blussing, waarbij het bestrijden van de brand direct de conditie voor mogelijke slachtoffers zal verbeteren) veilig te kunnen bereiken. Dit kwadrant kenden we tot nu toe als de standaard binneninzet.



Figuur 6.8 Kwadrant offensief binnen

6.2.6 Wijziging van kwadrant tijdens de inzet

Het is zeker niet de bedoeling dat de inzet, als er eenmaal voor een kwadrant gekozen is, binnen het geselecteerde kwadrant moet blijven. Tijdens de bestrijding van het incident kan de bevelvoerder of Officier van Dienst zijn besluit heroverwegen en overgaan tot verandering van de tactiek. Hiervoor kunnen verschillende oorzaken zijn. De omstandigheden van de brand (onder andere te herkennen aan een veranderend rookbeeld), maar ook die van het gebouw of de mensenmerken kunnen veranderen. Zo wordt door het tijdsverloop van de brand de kans op branddoorslag of instorting vergroot en worden de overlevingskansen van de mensen in het pand kleiner. Het kan gebeuren dat de aanwezige slagkracht onvoldoende is en er moet worden overgeschakeld op een defensieve tactiek. Het omgekeerde kan ook het geval zijn, als de slagkracht zodanig is toegenomen dat voor een offensieve inzet kan worden gekozen.

Het is belangrijk dat een verandering van kwadrant weloverwogen gebeurt en vooral goed gecommuniceerd wordt met de overige eenheden en/of leden van de ploeg, zodat iedereen weet wat de nieuwe doelstelling van de inzet is.

Het kan ook voorkomen dat bij dezelfde brand aan verschillende zijden van het gebouw verschillende strategieën en tactieken worden toegepast, bijvoorbeeld bij een grote brand in een groot bedrijfspand. In de richting van de belendingen kan defensief buiten worden toegepast om overslag door straling naar aangrenzende gebouwen te voorkomen. Binnen in het gebouw kan defensief binnen worden toegepast om de brandcompartimentering overeind te houden en zodoende te voorkomen dat het hele gebouw afbrandt.

6.2.7 Doelcommandovoering

Het kwadrantenmodel voegt in feite aan de al bestaande inzettactieken twee nieuwe inzettactieken toe. Daarmee heeft de leidinggevende meer keuzemogelijkheden gekregen. Dit betekent, dat op basis van de beschikbare informatie die uit de verkenning komt, bewuster voor een inzettactiek moet worden gekozen. Dat is anders dan voorheen, toen er minder keuze was: we deden een binneninzet, tenzij heel duidelijk was dat dit niet meer kon. Met de invoering van het kwadrantenmodel is daarom ook de manier waarop we verkennen veranderd. Tegelijkertijd wordt meer nadruk gelegd op het *doel* van de inzet; we introduceren doelcommandovoering.

6.3 Gebouwenmerken: de koppeling tussen preventie en repressie

Tegenwoordig ligt de nadruk niet langer voornamelijk op het bestrijden van branden, maar ook op het voorkomen én beheersbaar maken van branden en andere incidenten. De sleutel hiervoor ligt in de koppeling tussen preventie en repressie. Over de noodzaak van deze koppeling was iedereen het al lange tijd eens, maar de concrete invulling liet steeds op zich wachten. Vaak werd deze koppeling niet verder geconcretiseerd dan het rondleiden van de uitrukdienst in nieuwe complexe gebouwen, of het aan de uitrukdienst aangeven bij welke gebouwen de bouwvergunningen uitgingen van een binneninzet of een afbrandscenario.

Dit laatste is echter een voorbeeld van iets wat juist niet met de koppeling tussen preventie en repressie bedoeld wordt. De ontwikkeling van het kwadrantenmodel legt die koppeling wél bloot. Bij het repressieve optreden volgens offensief binnen wordt er bijvoorbeeld opgetreden in het brandcompartiment waar zich de brand bevindt. De brandpreventieve regels houden daar rekening mee, en dus is de noodzakelijke koppeling vanzelfsprekend. Het is echter voor de repressieve dienst van belang te weten dat met het binnentreden in het gebouw en het verplaatsen naar het brandcompartiment ook brand- en rookwerende scheidingen kunnen worden doorbroken, die er juist voor bedoeld waren rook en brand te isoleren. Maar het kwadrantenmodel geeft ook twee mogelijkheden voor een defensieve inzet, wat dus wil zeggen: achter een 'verdedigingslinie'. Brandpreventief zijn deze 'verdedigingslinies' ook in gebouwen aangebracht, wat betekent dat zij herkenbaar moeten zijn én herkend en gebruikt worden tijdens een repressieve inzet.

6.3.1 Defensief buiten

Als de brand te ver ontwikkeld is om nog een veilige en effectieve binneninzet te kunnen doen, zelfs niet met een voorafgaande offensieve buiteninzet, zal door de repressief leidinggevende gekozen worden voor een defensieve buiteninzet. Er wordt dan niet meer ingezet op het brandende gebouw zelf, maar op de belendingen. Ook in dat geval spelen gebouwenmerken een belangrijke rol. Er wordt immers opgetreden naast het gebouw waarin zich een volledig ontwikkelde brand bevindt.

Doordat de brand in een gebouw bij een defensieve buiteninzet ook niet meer (effectief) bestreden wordt, is de kans aanwezig dat het gebouw zal bezwijken. Of dat gebeurt, hangt af van (met name) de inventaris en de relatie tussen de brandwerendheid van de dragende constructie van het gebouw en de vuurbelasting. Als een gebouw bezwijkt, bezwijken in de meeste gevallen ook de buitenwanden. Dit is afhankelijk van de eisen die zijn gesteld aan de brandwerendheid van de buitenwanden, en die eisen zijn weer afhankelijk van de bouwafstanden naar de belendende gebouwen die er al staan of nog gebouwd kunnen worden. Het bezwijken van het gebouw kan leiden tot grote risico's voor het ingezette brandweerpersoneel (bijvoorbeeld door instortingen) en tot branduitbreiding naar andere gebouwen. In het verleden zijn door onvoldoende kennis helaas te vaak slachtoffers gevallen onder brandweerpersoneel.

Om een weloverwogen besluit te kunnen nemen over het verantwoord uitvoeren van een defensieve buiteninzet, heeft de repressief leidinggevende in ieder geval kennis nodig over:

- > het risico op bezwijken en de onderlinge afhankelijkheden tussen vuurbelasting en brandduur
- > de brandwerendheden van de buitenwanden en bouwafstanden naar belendingen.

6.3.2 Offensief buiten

De doelen van de offensieve buiteninzet zijn in het algemeen:

- > het snel verbeteren van de overlevingscondities van de mensen die zich nog in het brandcompartiment bevinden
- > de condities in het brandcompartiment zodanig verbeteren dat een veilige betreding door de brandweer daarna mogelijk is (creëren van een veilige werksituatie).

In die gevallen is de offensieve buiteninzet voorbereidend op een offensieve binneninzet en gelden bij dit vervolg de brandkenmerken, gebouwkenmerken en mensenmerken zoals die verderop in paragraaf 6.3.4 bij de offensieve binneninzet beschreven worden. Daarnaast kan een offensieve buiteninzet voorbereidend zijn op een defensieve binneninzet.

In een (beperkt) aantal gevallen is het echter ook mogelijk dat de offensieve buiteninzet als doel heeft uitbreiding van de brand te voorkomen of de brand te blussen. In die gevallen moet rekening gehouden worden met de gebouwkenmerken zoals hiervoor beschreven zijn bij de defensieve buiteninzet.

6.3.3 Defensief binnen

Een defensieve binneninzet is mogelijk bij een gebouw dat uit meer dan één (sub)brandcompartiment bestaat. Om branduitbreiding te voorkomen, kan worden ingezet in het naastgelegen brandcompartiment. Om een weloverwogen inzetbesluit te kunnen nemen, is naast kennis van de brandkenmerken ook kennis van een aantal gebouwkenmerken van groot belang. De voorwaarde voor een defensieve binneninzet is namelijk dat het (sub)brandcompartiment nog voldoende intact is om veilig in het naastgelegen brandcompartiment op te treden. Als dat niet (meer) het geval is, hebben we te maken met de omstandigheden van een offensieve binneninzet, en dus met alle risico's van dien.

Ligging en uitvoering van (sub)brandcompartimenten

Subbrandcompartimentering is bedoeld om een brand enige tijd in de ontstaansruimte te houden, zodat de ruimtes eromheen ontruimd kunnen worden. Zulke subbrandcompartimenten komen we tegen in gebouwen waar de ontvluchting meer tijd kost dan normaal: in hotels, gevangenissen, ziekenhuizen en verpleegtehuizen. Het preventieve doel van brandcompartimentering is dat de brand pas wordt aangepakt als de omliggende ruimtes zijn ontruimd. De conclusies van het onderzoek in naar rookverspreiding (Brandweeracademie 2020) geven echter aan dat dit alleen geldt als de deur naar de brandruimte gesloten is. De bevelvoerder ter plaatse moet altijd een afweging maken om ofwel eerst te blussen, ofwel eerst te ontruimen. In het algemeen geldt: eerst blussen, dan redden.

Als er tijdens de repressieve inzet geen bouwtekeningen voorhanden zijn (wat meestal het geval is), zal op basis van indicatoren ter plaatse bepaald moeten worden waar de brandscheidingen zitten. Hier is een goede verkenning voor nodig.

Bezwijken van het aangrenzende brandcompartiment

Bij een defensieve inzet wordt het brandende (sub)brandcompartiment niet betreden, maar treedt de brandweer op in het aangrenzende brandcompartiment of (bij een subbrandcompartiment) in het brandcompartiment waarin het subbrandcompartiment is gelegen. Een voorbeeld van het eerste geval is een brand in een deel van een ziekenhuisverdieping; in dat geval treedt de brandweer op achter de brandscheiding van het brandcompartiment. Een voorbeeld van het tweede geval is een brand in een patiëntenkamer, die in een brandcompartiment (afdeling) op een verdieping ligt.

Het is belangrijk om te weten wat de gevolgen zijn voor de constructie van het deel waarin de brandweer zich bevindt als het brandende (sub)brandcompartiment bezwijkt. Is er sprake van voortschrijdende instorting of bezwijkt alleen het brandende deel? Is er sprake van branddoorslag? Kennis van deze risico's is belangrijk voor de keuze van een veilige plaats voor de in te zetten eenheden.

Kwaliteit van de aanvalswegen

Bij een defensieve binneninzet gaat het vaak om grotere panden waarin opgetreden wordt. Het is dan van belang dat de aanvalsweg ook voor langere tijd een veilige terugweg blijft. Er is bij een defensieve binneninzet immers vaak al sprake van een redelijk ontwikkelde brand, omdat anders in veel gevallen direct voor een offensieve binneninzet gekozen zou zijn. De vluchtwegen zijn in grotere gebouwen meestal van een redelijke brandwerendheid voorzien. Het is dan ook raadzaam om deze vluchtwegen als aanvalswegen te gebruiken. Maar deze vluchtwegen moeten dan wél herkend worden en tijdens de repressieve inzet op hun brandwerendheid kunnen worden ingeschat.

Om een weloverwogen besluit te kunnen nemen over het verantwoord uitvoeren van een defensieve binneninzet, heeft de repressief leidinggevende dus in ieder geval kennis nodig van:

- > indicatoren voor brandscheidingen en vluchtwegen
- > risico's op instorting van (sub)brandcompartimenten
- > de brandwerendheid van vluchtwegen
- > rookverspreiding en de kenmerken daarvan.

6.3.4 Offensief binnen

Bij een offensieve binneninzet worden brandweereenheden ingezet in het brandende brandcompartiment. Voorwaarde daarbij is wel dat de brand-, hitte- en rookontwikkeling zodanig zijn dat het betreden van het brandende brandcompartiment nog een aanvaardbaar risico is. Uiteraard spelen de brandkenmerken hierbij een prominente rol, maar ook menskenmerken en gebouwkenmerken zijn essentieel in de risicoafweging.

Kans op redding

De repressief leidinggevende zal een inschatting moeten maken van de kans dat er nog mensen in het brandende brandcompartiment aanwezig zijn. Hiervoor wordt vaak uitgegaan van een vermoeden van de aanwezigheid van mensen, bijvoorbeeld op basis van de melding. Om de kans op redding te bepalen, en daarmee de keuze om wel of niet het brandende brandcompartiment te betreden voor een zoekactie, kan ook naar de aanwezigheid van brandpreventieve voorzieningen worden gekeken. De aanwezigheid van een brandmeldinstallatie of een ontruimingsinstallatie kan een indicatie geven of er nog mensen in het brandcompartiment aanwezig zullen zijn. De aanwezigheid van een sprinklerinstallatie geeft een indicatie over de omvang van de brand en de temperatuur in het brandcompartiment.

Normatief versus natuurlijk brandverloop

Naast de kans op redding is het ook van belang dat de repressief leidinggevende een indicatie heeft van de tijd die hij heeft om een reddingsactie uit te voeren. Het normatief brandverloop geeft aan met welke tijdslijnen brandpreventief gerekend wordt voor bijvoorbeeld de tijd die de brandweer heeft voor een eventuele redding. Deze tijden zijn slechts

normtijden en kunnen dus afwijken van de werkelijke tijden in de praktijk (het natuurlijk brandverloop), maar geven wel een indicatie van de beschikbare tijd voor zoeken en redden.

Bezwijken van een brandcompartiment

Bij een offensieve binneninzet wordt het brandcompartiment betreden. Het is dan van belang om te weten of de constructie brandwerend is uitgevoerd en zo ja, hoe groot deze brandwerendheid is, uitgedrukt in tijd. Afhankelijk van het type gebouw, de hoogte van het gebouw en de uitvoering van de constructie is de brandwerendheid op bezwijken 0, 30, 60, 90 of 120 minuten. Deze tijden zijn uitgangspunten. In de praktijk worden namelijk niet hele gebouwen aan brandproeven onderworpen, maar alleen de constructieonderdelen. Daardoor kan de tijd tot bezwijken in de praktijk (fors) langer zijn, maar bij een volontwikkelde brand juist weer korter.

Om goed in te kunnen schatten of een offensieve binneninzet mogelijk is en om te bepalen hoe lang veilig in het brandcompartiment opgetreden kan worden, is kennis van brandwerendheid essentieel. Is deze kennis niet aanwezig, dan is defensief optreden het enige alternatief. Een offensieve binneninzet is alleen mogelijk als de overtuiging bestaat dat men de situatie meester kan worden of al meester is. Het natuurlijk brandverloop kan zo snel gaan, dat omschakelen naar een andere tactiek wel eens te laat kan zijn.

Om een weloverwogen besluit te kunnen nemen over het verantwoord uitvoeren van een offensieve binneninzet, heeft de repressief leidinggevende dus in ieder geval kennis nodig over:

- > brandpreventieve voorzieningen met betrekking tot ontvluchten en verbeteren van overlevingscondities (brandmeldinstallatie, ontruimingsinstallatie, sprinklerinstallatie en dergelijke)
- > normatief brandverloop
- > eisen aan de brandwerendheid van bouwconstructie en -materialen.

6.4 Basisprincipes

Op operationeel niveau zijn er een aantal basisprincipes voor brandbestrijding die de verbinding vormen tussen de verschillende modellen die hierboven besproken zijn. Deze basisprincipes komen hier aan bod. Naast de modellen en principes zijn er uiteraard nog technieken: de wijze waarop bepaalde taken moeten worden uitgevoerd. Deze technieken worden hier niet beschreven, maar maken onderdeel uit van de technische vaardigheden waarover elke brandweerfunctionaris zou moeten beschikken.

6.4.1 Aanleiding

In deze paragraaf wordt een aantal basisprincipes van brandbestrijding beschreven die generiek toepasbaar zijn. Deze basisprincipes worden gevalideerd door bevindingen uit recent onderzoek van de Brandweeracademie, waarnemingen uit praktijkbranden, de resultaten van onderzoek uit het buitenland en principes uit 'fire safety engineering'. Het gaat om de volgende bevindingen:

- > Onder tijdsdruk is de situational awareness van mensen beperkt (zie ook hoofdstuk 5). Dit is neurobiologisch bepaald. Mensen zien dan niet alles, maar hebben een soort bewustzijnsvernaauwing. Daardoor worden niet altijd de juiste besluiten genomen. Meer

tijd nemen geeft ruimte om meer te zien en datgene wat we zien juist te interpreteren (Brandweeracademie, 2015b), om vervolgens een weloverwogen keuze te kunnen maken voor een kwadrant uit het kwadrantenmodel.

- > Ook als er mensen gered moeten worden, is er feitelijk meer tijd dan we denken. De situatie kan zodanig zijn, dat er altijd een kans is om te overleven. We kunnen dus niet zeggen dat een redding die één minuut later gestart wordt altijd té laat is, zeker als door het nemen van tijd de redding effectiever kan worden uitgevoerd (Brandweeracademie, 2015a). Voldoende tijd nemen voor de verkenning levert informatie op die ons veel tijd en werk kan besparen.
- > Hoewel de offensieve binneninzet nog vaak als standaard inzettechniek wordt beschouwd, is deze niet altijd de veiligste en effectiefste inzet, zeker niet als de weg naar de brand lang en de locatie van de brandhaard onbekend is (Brandweeracademie, 2016). Zie ook 6.2.5 en 6.3.4.
- > Het opbrengen van water¹² op de brand is de effectiefste manier om hem onder controle te brengen. Als de brand van buiten zichtbaar is, kan dat, indien mogelijk, ook (het beste) van buiten gebeuren (Brandweeracademie, 2017).
- > Ventilatie (stroming) wordt in het algemeen te weinig als verkenningindicator beschouwd (Brandweeracademie, 2016).
- > Het grootste gevaar in veel gevallen, namelijk de toevoer van zuurstof naar de brand (ventilatie, 'air track'), wordt te weinig in de inzettechniek meegenomen. Deurcontrole wordt (nog) niet algemeen toegepast. Door deurcontrole toe te passen, kunnen de zuurstoftoevoer en rookverspreiding worden beperkt (Brandweeracademie, 2016).
- > We zien, hoewel dit bij woongebouwen in de praktijk meestal goed gaat, dat onvoldoende rekening wordt gehouden met het potentiële vermogen van een brand en dat deze daardoor vaak met te weinig koelend vermogen wordt bestreden. (Brandweeracademie, 2016).
- > Rookgaskoeling heeft beperkingen en is vooral van nut in kleine ruimtes¹³ van maximaal 70 m² en met een maximale hoogte van 4 meter (Lambert & Baaij, 2011). Het is zaak de inzetdiepte zo kort mogelijk te houden en zo snel mogelijk water op het vuur te brengen. De brand blussen is de beste rookgaskoeling.
- > De gedachte dat met ventileren (openen van deuren en ramen of gaten maken in het dak) de hitte en rook kunnen worden afgevoerd, zodat daarna een binneninzet mogelijk is, blijkt veelal niet (meer) juist. Meestal werkt ventilatie zelfs averechts. Antiventilatie (het gebouw zoveel mogelijk gesloten houden) geeft daarentegen tijdwinst, óók bij een offensieve binneninzet (Brandweeracademie, 2016; Underwriters Laboratories, 2012).
- > Het idee dat door van buiten naar binnen te blussen de brand naar binnen wordt gejaagd blijkt onjuist te zijn. Onderzoek van Underwriters Laboratories uit 2012 heeft aangetoond dat de condities binnen juist verbeteren als er eerst met een gebonden straal van buiten tegen het plafond wordt gespoten. Daarna kan er een veiliger binneninzet worden gedaan. Dit wordt door Underwriters Laboratories een 'transitional attack' genoemd (transitie van een offensieve buiteninzet naar offensieve binneninzet), maar we kunnen het ook gewoon een offensieve buiteninzet noemen. Zie ook 7.6.1.
- > Bij sommige korpsen is het toepassen van repressieve ventilatie erg populair. Uit onderzoek van Underwriters Laboratories (2016) naar de toepassing van repressieve ventilatie blijkt dat hiervoor fundamentele kennis van brandverloop een must is en dat deze techniek niet zonder gevaar is. Repressieve ventilatie kan het beste worden

¹² Het gaat hier om koelend vermogen; met water wordt dus bedoeld op alle blusmiddelen die water bevatten.

¹³ Gebaseerd op korte pulsen. Met de toepassing van lange pulsen is de afmeting wellicht groter, maar daar zijn geen objectieve gegevens over. Dus houden we dit aan als richtlijn.

toegepast nadat de brand onder controle is gebracht.¹⁴ Bovendien moet er een uitstroomopening in de brandruimte zijn. De locatie van de brand moet dus bekend zijn.

De basisprincipes die op bovenstaande bevindingen zijn gebaseerd, helpen brandweermensen in de praktijk bij het doen van een veilige en effectieve brandbestrijdingsinzet. Naast de toepassing in de brandbestrijdingspraktijk zijn de basisprincipes ook handig voor brandpreventie-adviseurs. Uitgaande van deze principes ontstaat namelijk inzicht in de (on)mogelijkheden van de brandbestrijding die bij preventie-adviezen kunnen worden meegenomen.

6.4.2 Basisprincipes

Omkering in het denken

In deze paragraaf worden de basisprincipes beschreven. Uiteraard zijn er meer procedures, werkwijzen, tactieken of technieken die we 'basisprincipe' zouden kunnen noemen, maar het gaat hier alleen om die basisprincipes die we kunnen afleiden uit of die zijn ontwikkeld naar aanleiding van de bevindingen die hierboven zijn benoemd. Met de toepassing van deze basisprincipes tijdens de verkenning kunnen we meteen de keuze voor een inzetkwadrant van het kwadrantenmodel maken. Hoewel de basisprincipes niet compleet nieuw zijn, zorgen zij wel voor een belangrijke omkering van het denken in de verkenning. Daar waar we voorheen standaard kozen voor een offensieve binneninzet (de brand binnendoor via de voordeur proberen te vinden en te blussen), zullen we nu aan de hand van de buitenverkenning als eerste proberen de brand van buiten te vinden en te blussen. Pas als dat niet kan, overwegen we een binneninzet.

We denken van buitenaf in plaats van binnenuit.

Daarmee zeggen we niet dat in veel gevallen, zeker bij woningen, een offensieve binneninzet niet nog steeds de beste inzet kan zijn, maar door van buitenaf te denken, wordt een binneninzet niet gedachteloos gekozen en worden niet meer op voorhand veiliger en effectievere tactieken uitgesloten.

De branddriehoek als belangrijkste basisprincipe

Het belangrijkste basisprincipe om een brand goed te kunnen verkennen, bestrijden of te beperken, is de *branddriehoek* (zie ook paragraaf 3.1). De zichtbare indicatoren van de branddriehoek vormen het RSTV-model dat in feite een uitwerking is van de branddriehoek. Met de basisprincipes van brandbestrijding herstellen we de branddriehoek als de eenvoudigste vorm van RSTV-signalen in ere. De belangrijkste consequentie daarvan is het meer dan voorheen benutten van de zuurstofzijde van de driehoek. Door het gebouw zo veel mogelijk dicht te houden tijdens de verkenning (antiventilatie), kan de brand niet uitbreiden in vermogen en winnen we tijd voor de verkenning. Door tijdens de binneninzet deurcontrole toe te passen (de deur zo veel mogelijk dicht houden), beperken we het brandvermogen, waarmee we tijd winnen om de brandhaard te vinden, te naderen en te blussen. De zijden temperatuur en zuurstof zijn in feite communicerende vaten: hoe groter de opening, hoe groter het brandvermogen kan worden en hoe meer koelend vermogen (water) er nodig is om te blussen en te koelen.

¹⁴ Onder 'onder controle' verstaan we: als de brand uit is (veiligste situatie) of als de inschatting is dat de rookgassen niet meer kunnen ontbranden.

De vijf andere basisprincipes

Er is daarnaast een vijftal andere basisprincipes aan te duiden.¹⁵ Met uitzondering van de eerste twee, hoeven deze principes niet te worden doorlopen in de volgorde waarin ze hieronder staan weergegeven.

1. Neem meer tijd (stop en denk na).
2. Doe een volledige buitenverkenning met als doel de brandruimte van buiten te vinden en de brand van buiten te blussen. Pas antiventilatie toe.
3. Daarbij moeten de volgende drie vragen worden gesteld:
 1. Waar zit de brand?
 2. Is de brand (van buitenaf) bereikbaar?
 3. Is er voldoende koelend vermogen?Als de brand van buiten kan worden gevonden, van buiten bereikbaar is en er voldoende koelend vermogen is, kan hij van buiten worden aangepakt. Als dat niet kan, is het gebouw in principe verloren en moeten we defensief inzetten. Dit geldt in elk geval voor grote gebouwen.
4. Als het gaat om een klein gebouw zoals een woning of een gebouw met kleine ruimtes, en er voldoende koelend vermogen is, dan is onder voorwaarden een offensieve binneninzet in het algemeen veilig mogelijk. In dat geval: denk in termen van de RSTV-branddriehoek.
 - > Pas deurcontrole toe (procedure veilig binnentreden).
 - > Pas indien mogelijk of nodig antiventilatie toe (houd het gebouw dicht).
 - > Pas bij een uitlaande brand indien mogelijk eerst een offensieve buiteninzet toe.
 - > Breng zo snel mogelijk water op het vuur.
 - > Denk aan de beperkingen van rookgaskoeling, die alleen effectief is in ruimtes die niet groter zijn dan 70 m² en niet hoger dan 4 meter. Neem de kortste route naar de brand en houd de inzetdiepte kort (korter dan een slanglengte). Wanneer veilig gevorderd kan worden in een gebouw, is een langere inzetdiepte mogelijk.
5. Schat het potentiële brandvermogen in en neem voldoende koelend vermogen mee. Gebruik de vuistregels voor (potentieel) brandvermogen en benodigd koelend vermogen.

Aan de hand van deze basisprincipes kan tijdens de verkenning een voorlopige keuze voor een inzetkwadrant worden gemaakt. Als de plaats van de brand niet bekend is of niet van buiten kan worden bereikt, is een offensieve buiteninzet zinloos. Wanneer bij een groot gebouw het zoeken van de brandhaard binnendoor te risicovol is, ligt het voor de hand eerst defensief in te zetten. Uitbreiding voorkomen heeft dan de hoogste prioriteit. Is er onvoldoende koelend vermogen, dan is een offensieve binneninzet te gevaarlijk en is (opnieuw) defensief inzetten de meest geëigende optie.

Wat precies wordt bedoeld met de begrippen 'plaats bekend', 'brand bereikbaar' en 'voldoende koelend vermogen' staat in het kader op de volgende pagina beschreven.

¹⁵ Hierbij wordt opgemerkt dat iedere brand, ieder pand en de details van iedere situatie dusdanig verschillen, dat één theorie nooit alle mogelijke en juiste beslissingen kan weergeven. Daar komt bij dat tijdens een brand veel zaken onzeker zijn, waardoor beslissingen per definitie voor een deel op aannames worden gebaseerd.

Plaats bekend

Tijdens de buitenverkenning wordt zowel zonder als met de warmtebeeldcamera gekeken naar vlamverschijnselen en plaatsen waar rook ontsnapt. Ook kunnen deuren (met de deurprocedure) even kort geopend worden om te zien of er in de ruimte achter de deur een brandhaard zit. De locatie van de brandhaard is bekend als er vlammen worden waargenomen die afkomstig zijn van brandende materialen (en niet alleen van rookgassen).

Brandhaard bereikbaar

De brandhaard is bereikbaar als de ruimte waarin de brand zich bevindt van buiten kan worden bereikt via een deur, raam of een andere opening. Het water moet direct op de brandhaard kunnen worden gebracht. De opening moet zo klein mogelijk worden gehouden. De inzetdiepte om bij de brandhaard te komen moet zo kort mogelijk zijn, omdat met rookgaskoeling slechts een kleine ruimte kan worden gekoeld.

Voldoende koelend vermogen

Het koelend vermogen dat nodig is om de brand beheersbaar te maken kan aan de hand van vuistregels worden bepaald. De vuistregels zijn weergegeven in tabel 6.1 (paragraaf 6.4.6).

De basisprincipes zijn geen kant en klaar recept voor alle branden. Dat kan ook niet, omdat er veel verschillende brandscenario's zijn. Maar ze vormen wél de ingrediënten om te komen tot een veilige en effectieve inzet.

In de volgende paragrafen worden de afzonderlijke basisprincipes nader toegelicht. Paragraaf 6.4.3 gaat in op basisprincipe 1; paragraaf 6.4.4 behandelt zowel het tweede als het derde principe; in paragraaf 6.4.5 komt basisprincipe 4 aan de orde en in paragraaf 6.4.6 ten slotte wordt het vijfde basisprincipe besproken.

6.4.3 Neem meer tijd (stop en denk na)

De besluitvorming start met een volledige buitenverkenning (indien mogelijk). Neem daarvoor de tijd en doe dit voordat het besluit wordt genomen om naar binnen te gaan. Uit onderzoek blijkt dat mensen onder tijdsdruk, mede door de werking van adrenaline, een bewustzijnsvernauwing krijgen waardoor ze veel belangrijke elementen missen (zie paragraaf 5.3.4). In de praktijk zal dan routinematig worden gehandeld, ook als er overduidelijke signalen zijn die aangeven dat het niet verstandig is om dat te doen. Maar die worden vaak gemist of genegeerd.

Door jezelf de tijd te gunnen voor een goede buitenverkenning, verminder je de kans dat je signalen niet waarneemt of signalen negeert die niet in je plaatje passen. Je vergroot als het ware je situation awareness (zie paragraaf 5.5.3). Dus bijvoorbeeld niet meer: 1 en 2 naar binnen met hoge druk (en warmtebeeldcamera) en zelf de buitenverkenning doen, maar 1 en 2 doen de buitenverkenning met warmtebeeldcamera. Voer een volledige buitenverkenning uit, met als doel te ontdekken waar de brandhaard zich bevindt, zodat deze indien mogelijk *van buiten* kan worden geblust.

6.4.4 Doe een volledige buitenverkenning

Voordat tot de uitvoering van de tactiek kan worden overgegaan, zal eerst een goede verkenning moeten plaatsvinden. Deze is gericht op het herkennen van de brand-, gebouw- en mensenmerken. De verkenning moet uitwijzen of de gekozen tactiek ook daadwerkelijk kan worden toegepast (hierbij zijn ook interventie- en omgevingskenmerken van belang).

Verkennen is een cyclisch proces van verzamelen, beoordelen en controleren van informatie. Door beeld- en oordeelsvorming is het mogelijk om een bewuste keuze te maken voor het doel (de gewenste uitkomst) en de tactiek (het kwadrant) van de inzet.

Een brand kan het beste in eerste instantie van buitenaf worden benaderd. Als de brandhaard namelijk van buitenaf – door een rondom-buitenverkenning te doen – kan worden ontdekt, is het niet meer nodig binnendoor op zoek te gaan naar de brand (zoals op dit moment de standaard is). Bij de rondom-verkenning kan meer gebruikgemaakt worden van technische middelen zoals de warmtebeeldcamera, maar wellicht zijn voor dit doel nog andere technieken te ontwikkelen. Het idee dat we haast hebben, wordt door de realiteit ontkend. Branden in gebouwen die gesloten zijn, breiden zich niet snel uit. Ook als we menen geen tijd te hebben, is het nog steeds goed om tijd te nemen, omdat we door een betere verkenning een effectievere én veiliger inzet kunnen doen. Oók als er gered moet worden! Zelfs als het gebouw reeds open is, of als er openingen in kunnen ontstaan door de brand, kan een inzet op de juiste plaats – ook als het vinden van die plaats iets meer tijd kost – effectiever zijn dan een snelle inzet op een onjuiste plaats.

Indien mogelijk, houden we het gebouw zo veel mogelijk gesloten tijdens de buitenverkenning. Dat noemen we antiventilatie.¹⁶ We beperken daarmee het brandvermogen en de branduitbreiding, en dat geeft tijd om de inzet goed voor te bereiden. Als het gebouw, de woning of de ruimte heel erg luchtdicht is, kan de brand zelfs smoren of uitgaan. Dat is echter meestal niet het geval. In de regel gaat een brand niet vanzelf uit, en moet er na het toepassen van antiventilatie nog wel actie ondernomen worden.

Tijdens de verkenning moet minimaal antwoord gegeven kunnen worden op drie hoofdvragen:

1. Waar bevindt zich de brandhaard?
2. Is de brand bereikbaar?
3. Is er genoeg koelend vermogen beschikbaar?

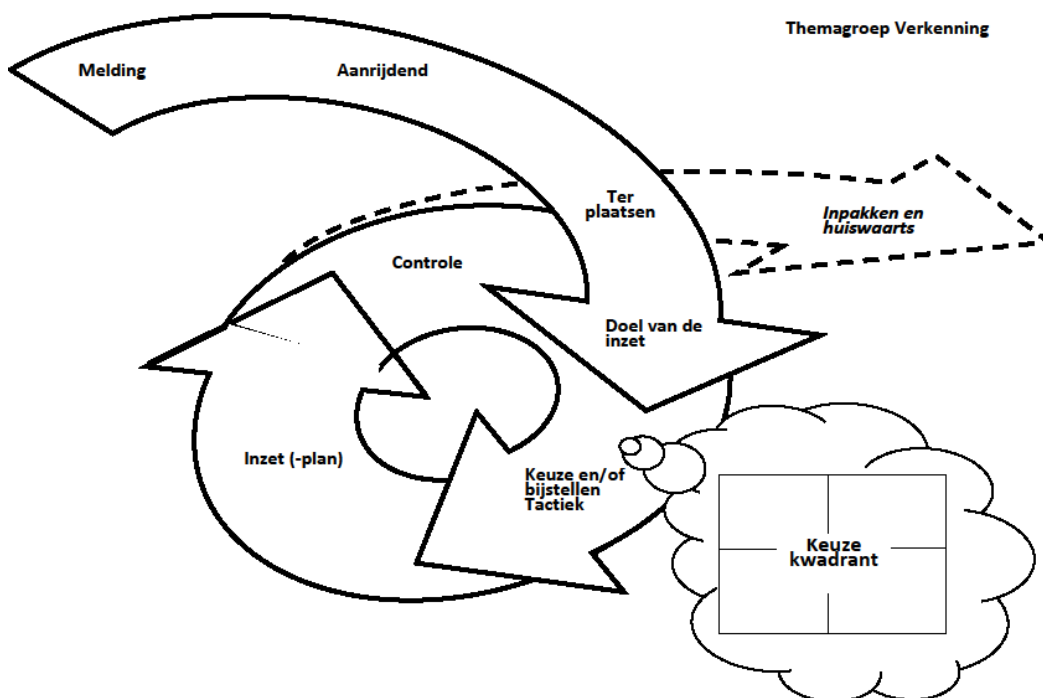
Als deze drie vragen met 'ja' beantwoord kunnen worden, kan de brand van buiten beheersbaar worden gemaakt (om helemaal af te blussen moet later, mogelijk, nog naar binnen worden gegaan).

Als het antwoord op één van de drie vragen 'nee' is, dan is de voorspelbare afloop dat de brand niet van buiten kan worden geblust en het gebouw moet worden opgegeven. Het zal afbranden. Uiteraard is dit een te eenvoudige voorstelling van zaken, vooral als er gered moet worden, maar het gaat erom dat we *van buiten naar binnen denken*. Dat is een omkering van het denken ten opzichte van wat er de laatste decennia ingegroeid is.

Uitgaande van de constatering 'voorspelbare afloop' wordt als eerste bezien of en zo ja welke acties kunnen worden ondernomen om de 'nee-antwoorden' op 'ja' kunnen krijgen, zoals het doen van een tweede verkenning (bijvoorbeeld door achter deuren of ramen te kijken) of te wachten op voldoende koelend vermogen. Bij branden in gemiddelde woningen of kleine gebouwen zal de offensieve binneninzet vaker een alternatief bieden dan bij grote gebouwen. Wat groot en klein is, hangt af van de inzetdiepte. Die mag niet te groot zijn

¹⁶ De term 'antiventilatie' wordt in het jargon veel gebruikt. We bedoelen daarmee dat we de zuurstoftoevoer zo veel mogelijk beperken door ramen en deuren gesloten te houden.

(redelijkerwijze maximaal een slanglengte, 20 m) in een met rook gevulde ruimte, omdat rookgaskoeling een beperkte reikwijdte heeft.



Figuur 6.9 Schematische weergave toepassing kwadrantenmodel bij een inzet (Bron: Team Verkenning Brandweerdocrine)

Uitgangspunt is dus, dat de offensieve buiteninzet de standaard inzettactiek uit het kwadrantenmodel is. Van daaruit kan eventueel later in de besluitvormingsfase geschakeld worden naar andere kwadranten.

Daarnaast moet de verkenning ook informatie geven over de volgende aspecten:

- > *Het scenario.*
Betreft het een brand waarbij mogelijk ook gevaarlijke stoffen betrokken zijn? Welke keuzes zijn er en welke gevaren? Wat is de te verwachten ontwikkeling van de brand (regimeverandering) in tijd en tempo, en wat zal het effect van een interventie zijn? Als er sprake is van een complexer scenario, vindt opschaling plaats en moet een uitgebreider denkproces worden doorlopen.
- > *De plaats van de brand.*
Waar bevindt de brandhaard zich en hoe kan deze via de kortste aanvalsweg worden bereikt? Wat is de omvang van de brand? Met de antwoorden op deze vragen kan worden bepaald of de brandhaard direct bereikbaar is van buitenaf, en hoeveel koelend vermogen nodig is om de brand te bedwingen – met deze informatie kan dus antwoord worden gegeven op de drie hoofdvragen.
Bij de uitvoering van een buitenverkenning kan het gebruik van een warmtebeeld-camera een nuttige toevoeging zijn. Hiermee kan de brandhaard binnen het gebouw worden gelokaliseerd. Inzicht in de combinatie van de locatie van de brandhaard en de toetredingsmogelijkheden maakt het mogelijk de kortste geschikte aanvalsweg te bepalen.

- > *Menskenmerken.*
Zijn er wel of geen slachtoffers? Zijn deze wel of niet zelfredzaam? Maar bovenal: wat is de kans op redding?
- > *Brandkenmerken.*
Wat is er te zeggen over de kracht waarmee rook uitstroomt? Is de brand uitslaand of niet? Zijn er openingen waardoor zuurstof kan worden toegevoerd?
- > *Gebouwkenmerken.*
Dit gaat om het type gebouw en de aanwezige (passieve en actieve) preventieve voorzieningen. Waar zijn de ingangen? Hoe kan via de kortste weg van buitenaf de brandhaard of het slachtoffer bereikt worden? Kunnen daarvoor vluchtwegen als aanvalswegen worden gebruikt?
- > *Windrichting en windkracht.*
Waar komt de wind vandaan? Dit is van belang om te bepalen of er sprake kan zijn van een wind driven fire. Dat is een brand waarbij de wind op een opening in het gebouw staat en zo ofwel de brand aanwakkert, ofwel de uitstroom van hete rookgassen belemmert (zie ook paragraaf 3.8). Een dergelijke brand levert bij het openen van deuren of bij een binneninzet extra gevaar op.

Het resultaat van de verkenning is een bevestiging of bijstelling van de tactiek die tijdens het aanrijden is ingeschat. Daarmee kan het uiteindelijke doel van de inzet worden bepaald. De verkenning zal daarmee een doorlopend proces blijven tot de brand meester is.

Het idee dat we altijd haast hebben, wordt door de realiteit ontkend: branden in gebouwen die gesloten zijn, breiden zich niet snel uit. Voor de verkenning en het inschatten van de brand kan daarom best wat meer tijd genomen worden dan tot nu toe gebruikelijk is. We winnen de tijd voor redding en blussing later terug, doordat een effectievere inzet kan worden gedaan die bovendien veiliger is.

6.4.5 Denk in termen van de RSTV-branddriehoek

Het RSTV-model (zie paragraaf 2.1.1) geeft de indicatoren weer aan de hand waarvan het brandregime en het brandverloop kunnen worden ingeschat. Niet alle indicatoren zijn echter even goed te herkennen, wat de toepassing in de praktijk zelfs voor experts niet eenvoudig maakt. In 2009 is daarom tijdens het symposium *Risicobewustzijn bij gebouwbranden* van het NIFV de RSTV-branddriehoek gepresenteerd, zoals die nu in de basisprincipes te vinden is. Deze branddriehoek is een vereenvoudiging van het RSTV-model en gaat uit van indicatoren die wél kunnen worden waargenomen, namelijk:

- > Is er rook in de ruimte en/of van buitenaf waarneembaar (rook is brandstof)?
- > Is er sprake van een verhoogde temperatuur?
- > Is er sprake van stroming ('air track', ventilatie, luchtbeweging)?

Deze drie elementen zijn in feite de drie zijden van de branddriehoek. Als alle drie de zijden aanwezig zijn, kan er een (plotselinge) branduitbreiding plaatsvinden. In de praktijk zullen bij brand de zijden 'brandstof' en 'temperatuur of ontstekingsbron' altijd aanwezig zijn. De zuurstoftoevoer (stroming) is vaak de factor die bepaalt hoe de brand zich gaat ontwikkelen. Het brandvermogen neemt toe als er meer zuurstof wordt toegevoerd bij een zuurstofgecontroleerde brand. Daarom is het vooral van belang om de zuurstoftoevoer zoveel mogelijk te beperken, zowel bij een binnen- als een buiteninzet. Deurcontrole is dus van groot belang! Dat wisten we al vanuit de branddriehoek, maar toch doen we dit in de praktijk vaak niet.

Door de deur zoveel mogelijk dicht te houden, is er meer tijd om naar de brand te komen en deze veiliger te benaderen. We hebben dat dichthouden echter niet altijd onder controle. Als er bijvoorbeeld een raam breekt of een deur doorbrandt, wordt ook extra zuurstof toegevoerd en kan het brandvermogen groter worden dan we hadden ingeschat. Daarom is het van belang om daar rekening mee te houden door voldoende koelend vermogen mee te nemen en zo snel mogelijk naar de brandhaard toe te gaan (de inzetdiepte dus kort te houden).

We moeten er eveneens rekening mee houden dat koude rook in de juiste samenstelling ook kan ontsteken. Daarom moeten we de zijde 'temperatuur' zien als 'temperatuur of ontstekingsbron'. Bij een defensieve binneninzet of een offensieve binneninzet in een aanliggende ruimte of compartiment waar lichte rook hangt, kan dit het geval zijn. Er kan dus nog steeds gevaar voor ontsteking zijn!

Basisprincipes bij een offensieve binneninzet

Zoals uit het onderzoek in Zutphen naar brandverloop en overleefbaarheid is gebleken, is er geen standaard brandverloop (Brandweeracademie, 2015a). Wat we wel zien in statistieken is dat de meeste branden bij aankomst van de brandweer in het voorwerp of de ruimte van ontstaan zijn gebleven. De meeste branden zijn zuurstofgecontroleerd, en daarom kunnen we er voor het gemak bij de brandbestrijding het beste van uitgaan dat dit ook geldt voor de betreffende brand. We kunnen namelijk als we voor de deur van het gebouw staan het verschil tussen een zuurstofgecontroleerde en een brandstofgecontroleerde brand meestal niet zien. Het brandvermogen is bij zuurstofgecontroleerde branden vaak kleiner dan het potentiële vermogen dat kan worden bereikt als er meer zuurstof zou worden toegevoerd. We kunnen dus geen standaard recept geven voor het optreden bij een offensieve binneninzet. Wat we wél kunnen doen, is een aantal grondregels geven waar je aan kunt denken.

Er zijn in feite drie scenario's die je kunt aantreffen:

1. We zien niets aan de buitenkant van het gebouw.
2. Er komen vlammen uit het gebouw (uitslaande brand).
4. Er komt rook uit het gebouw (eruit geperst, of eruit kringelend).

Elk scenario kan worden verklaard vanuit de fase waarin de brand zich in de brandkromme bevindt op het moment dat we aankomen. Het blijkt echter dat als we vervolgens proberen te bepalen welke acties er in die situaties nodig zijn, in alle drie de gevallen in het algemeen dezelfde grondregels gelden. De beginselen die we toepassen bij een offensieve binneninzet noemen we hieronder.

- > Pas altijd deurcontrole toe: weet dat extra aanvoer van zuurstof (stroming) tot snelle branduitbreiding kan leiden.
- > Het gebouw gesloten houden¹⁷ (antiventilatie) is ook een techniek.
- > Water op het vuur is de beste vorm van rookgaskoeling.
- > Neem voldoende koelend vermogen mee.
- > Houd de inzetdiepte kort. Realiseer je dat rookgaskoeling beperkingen heeft. Ze kan toegepast worden in niet al te grote ruimtes, niet veel groter dan de container waarin je de technieken hebt geoefend (maximaal 70 m², maximale hoogte 4 meter, afhankelijk van de toegepaste methode en de ervaring van de straalpijpvoerder). Pas vooral lange,

¹⁷ Door het gebouw gesloten te houden, kunnen we in elk geval tijd winnen om een inzet voor te bereiden. Dat kan een defensieve inzet zijn, of een offensieve buiteninzet met speciaal materiaal. Ook is er een kans dat de brand vanzelf uitgaat of smooit.

diepe pulsen toe als de locatie van de brand niet bekend is. Doe dit vanuit één positie naar alle richtingen. Rookgaskoeling is een manier om veilig naar een brandhaard te gaan als deze niet direct bereikbaar is vanuit de veilige positie. Bedenk dat dit alleen bij korte afstanden veilig kan. Als we moeten vorderen door een ruimte waar geen brand is maar wel rook, is het altijd goed om deze ruimte veilig te stellen door de deur naar de brandruimte te sluiten en indien mogelijk te ventileren.

- > Blussen gaat voor redden. Bij moderne branden wordt zoveel rook geproduceerd, dat het zoeken van een slachtoffer vaak te lang duurt. De brand ontwikkelt zich immers verder zo lang er geen water op het vuur komt. Als we niet weten waar de brand precies is, en de rook zich snel door het gebouw verspreidt, is er een duivels dilemma. Dan kan het toch nodig zijn eerst te ontruimen.
- > Pas indien mogelijk en nodig een ruimte-voor-ruimte-inzet toe. Een ruimte-voor-ruimte-inzet betekent dat vanaf de ingang elke ruimte wordt geïsoleerd door de deuren te sluiten, en de geïsoleerde ruimte te koelen of ventileren. Zie ook paragraaf 7.6.1.
- > Bij een uitlaande brand is starten met een offensieve buiteninzet (transitional attack, zie eveneens paragraaf 7.6.1) een goede optie. Die moet dan wel correct worden uitgevoerd, in elk geval met voldoende koelend vermogen op de brandhaard, omdat hij anders geen effect heeft. Bij een offensieve buiteninzet wordt, totdat de knock down wordt waargenomen, met lage druk met maximaal debiet en gebonden straal naar binnen tegen het plafond gespoten, direct gevolgd door een offensieve binneninzet. De knock down moet wel binnen 20 seconden zijn bereikt, anders heeft een verdere inzet geen zin: de brandhaard bevindt zich dan waarschijnlijk in een andere ruimte, en we spuiten slechts op de uitlaande vlammen. De temperaturen binnen worden dragelijker en er wordt tijd gewonnen voor een binneninzet. Zeker als de wind op het raam staat is dit nodig, omdat dan de temperaturen binnen hoger kunnen zijn dan brandweermensen in uitrukkleding kunnen verdragen.
- > Rookgaskoeling kan op verschillende manieren worden uitgevoerd: door (lange) pulsen met een bepaalde kegelhoek en spuihoek (spoeistraal) in de rooklaag te geven (3D-koeling), of door de hete oppervlakken (wand en plafond) te koelen, de zogenaamde oppervlaktekoeling. Wereldwijd is er discussie over de vraag welke manier de beste effecten geeft. De Brandweeracademie heeft recent onderzoek gedaan naar verschillende werkwijzen voor rookgaskoeling. De resultaten zijn terug te vinden in het rapport *Wanneer water in rook opgaat. Een experimenteel onderzoek naar het effect van de 3D pulsmethode en de boogmethode op het koelen van rookgassen* (Brandweeracademie, 2021).

Deurcontrole

In het voorgaande is al een aantal keren gesproken over deurcontrole. Hier zoomen we in op de betekenis en uitvoering van deurcontrole. Deurcontrole betekent uiteraard dat we de toegangsdeur zo veel mogelijk gesloten houden. Meestal lukt dat niet helemaal, omdat er ook een slang door de opening moet. We weten echter, dat de hoeveelheid zuurstof die naar de brand kan worden toegevoerd evenredig is met het oppervlak van de opening(en). In het algemeen geldt: hoe kleiner het gat, hoe minder zuurstoftoevoer en hoe minder de brand kan groeien terwijl wij naar de brandhaard vorderen. Tegenwoordig wordt deurcontrole vaak gerealiseerd door het toepassen van een rookstopper.

Maar deurcontrole is meer dan alleen de deur dichthouden. In feite gaat het hier om de procedure binnentreden. In aanvulling op hoe we die in het verleden aanleerden, zal er nu echter iemand bij de deur blijven zitten. Deurcontrole behelst de volgende activiteiten.

1. De deurprocedure uitvoeren bij het openen van de deur (zie ook paragraaf 7.6.1).
2. De condities waarnemen (een mogelijke instroom van zuurstof, veranderingen in de uitstroomsnelheid, de kleur of hoogte van de rooklaag).
3. De deur dichthouden of een rookstopper plaatsen.
4. De slang doorvoeren.
5. De deur openen als het nodig is (bijvoorbeeld als er wordt geblust en dit veilig kan).

6.4.6 Vuistregels voor (potentieel) brandvermogen en benodigd koelend vermogen

Het inschatten van het potentiële brandvermogen en het daarbij behorende koelend vermogen is misschien wel de belangrijkste activiteit bij brandbestrijding. Hoewel er veel over is geschreven en er verschillende vuistregels zijn ontwikkeld, staat er in de leerboeken tot nog toe weinig over. Dat komt, omdat er aannames gedaan moesten worden om tot deze vuistregels te komen. Toch geven we hier, met een slag om de arm, wat vuistregels die je goed kunt gebruiken.

Het brandvermogen wordt uiteraard mede bepaald door de hoeveelheid zuurstof die beschikbaar is voor de brandontwikkeling. De vuistregels geven het *potentiële brandvermogen* aan. Dat is het vermogen dat mogelijk kan worden bereikt als er voldoende zuurstof beschikbaar is. Bij zuurstofgecontroleerde branden (en dat zijn de meeste branden) is het brandvermogen kleiner. Maar als er ramen breken of deuren worden geopend, kan het brandvermogen toenemen tot het potentiële vermogen (met 2,5 MW per m² opening). Daar moeten we dus rekening mee houden. In tabel 6.1 zijn vuistregels voor het bepalen van het potentiële vermogen weergegeven.

Per vierkante meter oppervlakte van de opening kan ongeveer 2,5 MW (1,5-3 MW) aan brandvermogen ontwikkeld worden, zie paragraaf 3.6.2 en 3.6.3.¹⁸

Tabel 6.1 Potentieel brandvermogen

Gebouw	Referentie Vermogensdichtheid [MW/m ²]	Brandvermogen [MJ/s of MW]
Gemiddelde woning (lage vuurbelasting)	0,25	40 m ² = 10
Gemiddeld bedrijfsgebouw (hoge vuurbelasting)	0,5 per m stapelhoogte) ⁵	1000 m ² = 500 (1 m stapelhoogte)

Het koelend vermogen hangt af van het debiet en de effectiviteit van de blussing (verdamping). De effectiviteit kan weer afhangen van de straalpijp en de ervaring van de straalpijpvoerder. In tabel 6.2 op de volgende pagina zijn vuistregels voor koelend vermogen opgenomen. In deze tabel gaan we uit van een gemiddelde effectiviteit bij het gegeven debiet. We kunnen momenteel alleen rekenen met hoge druk en lage druk. Drukluchtschuim

¹⁸ De vuistregels gaan uit van een opening met een hoogte van 1 tot 4 m.

heeft een groter debiet dan hoge druk (133 liter water per minuut) en de coldcutter heeft een lager debiet (60 liter water per minuut), maar we weten niet precies wat de effectiviteit ervan is. Daarom kunnen we het koelend vermogen niet goed berekenen. Daarnaast kan het zijn dat naast koeling ook andere fysische effecten zoals verstikking en inertisering een rol spelen. Dat is een van de onderwerpen waar de Brandweeracademie recentelijk onderzoek naar heeft gedaan (Brandweeracademie, 2019).

Tabel 6.2 Benodigd koelend vermogen en bluskracht van LD en HD

Inzettechniek binneninzet	Praktisch koelend vermogen ³ [MJ/s of MW]	Vergelijkbaar brandvermogen ⁴ [MJ/s of MW]
Hoge druk ¹	2,5	Gemiddelde bank
Lage druk ²	10	Standaard woonkamer

¹ Dit is een waarde uit de Eurocode, de enige gedocumenteerde waarde die er is. Deskundigen gaan ook wel uit van hogere waarden, namelijk 1 MW per meter stapelhoogte.

² Uitgangspunt is een debiet van ongeveer 125 l/min.

³ Uitgangspunt is een debiet van ongeveer 450 l/min.

⁴ Uitgangspunt is een effectiviteit en rendement tussen de 40 en 50 %.

⁵ Uitgangspunt is een piekvermogen van een gemiddelde bank en een woonkamer van circa 40 m².

De vuistregels in de tabel zijn globale richtwaarden en kunnen afhankelijk van het debiet, de effectiviteit en het rendement per situatie verschillen. De richtwaarden zijn gebaseerd op brandstofgecontroleerde branden. Bij zuurstofgecontroleerde branden is het vermogen lager, maar kan in potentie groeien bij een toevoer van zuurstof.

6.5 Werkmethode

In deze paragraaf staan verkenningstaal en communicatie centraal.

6.5.1 Verkenningstaal en nader bericht: afspraken over het benoemen van de brandcondities

In de ontwikkeling van terminologie voor brandcondities is een eerste stap gezet. Dit is noodzakelijk, omdat, afhankelijk van de kennis van de zender en de ontvanger, verschillend gecommuniceerd zal worden over de bevindingen die gedaan zijn tijdens het verkennen van de brandkenmerken (RSTV). Een ervaren collega kan bijvoorbeeld doorgeven dat de brand brandstof- of zuurstofgecontroleerd is. Ook kan hij of zij aangeven dat er wel rook hangt, maar dat deze niet verdicht is. Voor de minder ervaren collega en omdat een bevelvoerder ook verdiepingsvragen kan stellen over de brandcondities, zal iedereen op een éénduidige manier moeten communiceren. Om dit te bereiken, moeten we de zijden van de branddriehoek concreet benoemen. We doen dit vanuit een denkbeeldige RSTV-branddriehoek; zie tabel 6.3 op de volgende pagina.

Tabel 6.3 RSTV-branddriehoek

Term	Omschrijving	Invulling branddriehoek
Schoon	Een ruimte zonder RSTV-Indicatoren noemen we SCHOON.	
Brandstof	Rook waar je niet meer doorheen kunt kijken (je kunt de wanden en het plafond niet meer zien en rookcondities verslechteren) noemen we BRANDSTOF.	
Zuurstof of stroming	Als lucht naar de brandhaard kan stromen en/of zich kan mengen met de rook of brandstof in een ruimte doordat er openingen zijn, dan noemen we dit STROMING of ZUURSTOF AAN.	
Temperatuur	Als rook / brandstof een hoge temperatuur heeft en/of een ontstekingsbron aanwezig is, staat TEMPERATUUR AAN.	
Brandrisico	Als alle drie de zijden aan staan, is de kans op ontbranding groot. We noemen dit BRANDRISICO.	
Brand	Als de vlammen zichtbaar zijn (de RSTV-branddriehoek is (plaatselijk) compleet), dan noemen we dit BRAND.	

6.5.2 Communiceren met het CAN-rapport

Wat gezien (verkend) is, moet ook gecommuniceerd kunnen worden, evenals hetgeen je doet, verwacht of nodig hebt. Als de bevelvoerder vraagt om een terugkoppeling of iets van zijn manschappen verwacht, is het zeer wenselijk dat te communiceren volgens een vastgesteld model. Dit geeft handvatten voor de zender en de ontvanger en maakt het communiceren duidelijker. Hiervoor is in internationaal verband het zogenaamde CAN-rapport ontwikkeld. Dit zegt iets over:

1. de **condities** die waar te nemen zijn
2. de **acties** die je doet of niet doet
3. of je nog wat **nodig** hebt.

Hiermee ontstaat een lijn in de communicatie, waarbij het in drie stappen voor iedereen helder wordt wat er wordt bedoeld.

1. Condities

Het eerste deel van het rapport bevat de condities die je waarneemt. Je geeft door waar je op dat moment bent in het gebouw, wat er brandt, hoe groot de brand is en hoe de ruimte eruitziet (potentieel brandvermogen). Om de brandcondities met elkaar te kunnen communiceren, gebruiken we de RSTV-verkenningstaal. Is er rook ja of nee (als voorbeeld)? De bevelvoerder kan dan verdiepingsvragen stellen om tot een beter beeld te komen. Is er sprake van stroming?

2. Acties

Op basis van de beeldvorming bij het verkennen van de condities, kunnen verschillende acties noodzakelijk zijn. Dit communiceren we in het tweede deel van het CAN-rapport. Welke acties zijn er ondernomen om in een ruimte te komen? Is er sprake geweest van rookgaskoeling? Moesten er deuren geforceerd worden om toegang te krijgen? Een geforceerde deur kan er bijvoorbeeld helemaal uit liggen en een dergelijke ventilatieopening kan zorgen voor een (enorme) branduitbreiding.

3. Wat er nodig is (needs)

In het derde deel van het CAN-rapport wordt op basis van de condities en de noodzakelijke acties doorgegeven wat (aan ondersteuning en middelen), waar en wanneer nodig is. Is een hogedrukstraal voldoende of blijkt een ruimte dermate groot te zijn dat een lagedrukstraal noodzakelijk is? De bevelvoerder kan bijvoorbeeld vragen naar de condities, of er in een bepaalde ruimte brand is en in welk regime de brand verkeert. De bevelvoerder kan eveneens uit de acties halen dat er een deur geforceerd is, waardoor er door stroming branduitbreiding kan plaatsvinden. Als er dan al sprake is van slechte condities, kan de manschap aangeven aan hoge druk onvoldoende te hebben. De bevelvoerder kan echter ook de opdracht geven om terug te trekken om lage druk af te leggen.

Tabel 6.4 bevat een samenvatting van wat er in een CAN-rapport staat weergegeven. Tabel 6.5 is een voorbeeld van een CAN-rapport.

Tabel 6.4 Schematische weergave van een CAN-rapport

Conditie	Actie	Nodig
Waar ben je?	We maken de taak af.	Dringend hulp
Wat zijn de RSTV-kenmerken (schoon, temperatuur, brandrisico, brand)?	We blussen de brand.	Aflossing
Wat brandt er?	We zoeken het slachtoffer.	Materiaal
Hoe groot is de brand?	Stop de buiteninzet.	Hogere waterdruk
Hoe ziet de ruimte er uit?		
Bijzonderheden?		

Tabel 6.5 Een voorbeeld van een CAN-rapport

Nummers ploegleden	Conditie	Actie	Nodig
1 en 2	We zijn op de tweede verdieping aan de voorkant. Brandstof en temperatuur. We hebben nog 180 bar in de fles.	We zoeken de vermiste persoon.	Aflossing
3 en 4	We zijn op de eerste verdieping. Brandstof en stroming.	We brengen de straal naar boven.	Meer lengte

7 Oefenen met gebouwbranden

7.1 Inleiding

Het brandweeroptreden conform de basisprincipes kan effectief worden ingeslepen en uitgevoerd door intensief met deze werkwijze te oefenen. Heeft je veiligheidsregio het besluit genomen om de basisprincipes te implementeren in het brandweeroptreden? Dan volgen daarna twee noodzakelijke stappen.

- > Stap 1: het bijscholen van manschappen, bevelvoerders, Officieren van Dienst (door bij voorkeur eigen docenten en instructeurs) en oefenstafleden.
- > Stap 2: het toetsen van alle oefeningen op het gebied van gebouwbrandbestrijding aan de basisprincipes van brandbestrijding en ze indien nodig aanpassen of (door)ontwikkelen en daarna uitvoeren.

Deze twee stappen zijn nodig om van de basisprincipes van brandbestrijding een integraal onderdeel van de vakbekwaamheid van repressieve functies te maken, zowel in individueel opzicht als in ploegverband. Bij het oefenen is het verstandig om zo dicht mogelijk bij de praktijk te blijven. Dit geldt voor alle elementen die een rol spelen. Een goed ontwerpprincipe van een oefening is 'what you see is what it is'. Ensceneer dus geen groot aantal slachtoffers in een oefenpand wanneer niemand dat bij zo'n gebouw op basis van het gebruik ervan in de praktijk verwacht. De uit te voeren oefening moet de inzet van een complete TS-bezetting of een veelvoud daarvan legitimeren. Dit vraagt de nodige creativiteit van degene die de oefening voorbereidt. In de volgende paragrafen van dit hoofdstuk worden de verschillende aspecten van het voorbereiden en uitvoeren van oefeningen behandeld. Zo komen de verschillende elementen aan bod die nodig zijn om leerzame en uitdagende oefeningen te ontwikkelen en wordt hun onderlinge samenhang aangegeven.

7.2 Oefendoelen en oefenvormen

Voordat met de daadwerkelijke voorbereiding van een oefening kan worden gestart, moet er worden nagedacht over de oefendoelen die de organisatie met deze specifieke oefening wil behalen en welke oefenvorm daar het beste bij past. Vervolgens wordt dan de relatie gelegd tussen het scenario en de doelen. Als laatste wordt beoordeeld hoe bij de deelnemers het juiste beeld van de oefening kan worden gecreëerd en op welke manier de enscenering van de oefening de te nemen besluiten kan uitlokken.

7.2.1 Oefendoelen

Voor elke oefening moeten de oefendoelen worden bepaald. Stel dat je de oefenleider bent. Wat wil je met de bewuste oefening bereiken? Een veel voorkomende valkuil is dat er uit enthousiasme te veel leerdoelen voor een en dezelfde oefening worden geselecteerd. Hierdoor komen de afzonderlijke oefendoelen niet of onvoldoende aan de orde. Een beperking van het aantal oefendoelen is dus nodig. Wanneer je met een oefening te veel wilt, bereik je juist niets. De kracht van effectief oefenen ligt dus in de beperking en afbakening van oefendoelen.

Een tweede aandachtspunt bij het beschrijven van oefendoelen is het SMART formuleren van die doelen. SMART staat voor: specifiek, meetbaar, acceptabel, realistisch en tijdgebonden. Een oefendoel moet aan al deze kenmerken voldoen. Dit is in veel gevallen even een puzzel, maar wel een puzzel die nodig is om scherpe en voor de deelnemers relevante oefendoelen te formuleren.

Het derde aandachtspunt bij het formuleren van de oefendoelen is dat je ervoor zorgt dat de oefendoelen voor de verschillende oefeningen logisch zijn opgebouwd. Met andere woorden: de oefendoelen worden uitdagender naarmate ploegen langer bezig zijn met de basisprincipes van brandbestrijding. Aan het begin van het traject zijn de doelen bijvoorbeeld het beheersen van technieken en werkwijzen; later zullen de doelen op het niveau van de complete inzet van een ploeg kunnen worden gesteld. Het accent verschuift dan van motorische vaardigheden en parate kennis naar samenwerkingsvaardigheden zoals coördinatie, communicatie en het anticiperen en reageren op veranderende omstandigheden. Denk bij dit laatste ook aan het wisselen van kwadrant binnen het kwadrantenmodel.

7.2.2 Oefenvormen

Er zijn verschillende oefenvormen die je kunt gebruiken om het werken aan de hand van de basisprincipes te oefenen. Welke oefenvorm je kiest, hangt af van de oefendoelen en de doelgroep. Naast de bekende praktijkoefening kun je ook kiezen voor een beeldcasus of een oefening in 'virtual reality' (VR). Hieronder staan een aantal voorbeelden van oefenvormen die je kunt gebruiken bij de implementatie van de basisprincipes. Bij elk voorbeeld staat welke oefendoelen ermee behaald kunnen worden. Deze opsomming is niet volledig; ze is bedoeld om ideeën op te doen en te inspireren.

Praktijkoefening

- > Aanleren van nieuwe technieken en werkwijzen.
- > Toepassen van technieken en werkwijzen.
- > Vertalen van de tactiek in technieken en werkwijzen.
- > Ervaringen opdoen met tijd-tempofactoren (hoe lang duurt het om een bepaalde opdracht uit te voeren?).
- > Ervaringen opdoen in werken in rook en met warmte.

Beeldcasus

- > Herkennen van signalen.
- > Herkennen van situaties.
- > Herkennen van risico's.
- > Bevorderen van 'sensemaking' (duiding van het brandweeroptreden).
- > Toepassen van besluitvormingsmethode FABCM (voor bevelvoerders en Officieren van Dienst).

- > Focus op elementen van de besluitvormingsmethode FABCM.
 - Feiten verzamelen: welke feiten haal je uit de informatie en uit de beelden?
 - Analyseren: wat vertellen de feiten je? Combineer dat met de kennis die jij of je ploeg heeft van het gebouw of het gebied. Gebruik hierbij ook het kenmerkschema. Kom op basis hiervan tot een scenario.
 - Besluiten: welke besluiten kun je nemen en op welk moment in het optreden?
 - Communiceren: duidelijk communiceren, werken met doelcommando's
 - Monitoren: de voortgang in de gaten houden aan de hand van FAB (feiten analyseren, besluiten nemen, communiceren).

Een beeldcasus is zeer geschikt om beeldvorming te trainen; denk hierbij aan oefendoelen met betrekking tot het verzamelen en analyseren van feiten tijdens de uitruk en verkenning. Ook het nemen en communiceren van besluiten als afronding van de verkenningsfase kan met een beeldcasus worden geoefend. Tot slot kun je een beeldcasus ook gebruiken om samen met de deelnemers de herkenning van signalen, situaties en risico's te vertalen naar een passend handelingsperspectief. Je kunt op deze manier de betekenis van een bepaalde manier van optreden verduidelijken. We noemen dit ook wel 'sensemaking' ofwel zingeving.

Een beeldcasus is niet dynamisch. Dit betekent dat de casus zelf niet 'reageert' op de gekozen inzet(tactiek). Daarom zijn oefendoelen met betrekking tot het monitoren en eventueel bijstellen van de inzet(tactiek) met een beeldcasus meestal niet haalbaar. Het monitoren van de inzet is met een beeldcasus alleen te oefenen wanneer er gebruik wordt gemaakt van een video of fotoserie die de ontwikkeling van de gebouwbrand *in reactie* op de gekozen inzet in beeld brengt. Dit kan met simulatieprogramma's zoals SimsUshare. Er worden dan bijvoorbeeld elementen zoals een vlam- of rookbeeld aan het beeld toegevoegd.

VR-scenario op een groot scherm

Hier gelden dezelfde oefendoelen als bij de beeldcasus, maar omdat de beelden bewegend zijn en er een tijdsverloop in het scenario is gebouwd, ontstaat er meer dynamiek; de tijd-tempofactor kan waarheidsgetrouw worden gesimuleerd en ook de reactie op de inzet van het brandverloop of van andere aspecten van het incident kan realistisch in beeld worden gebracht.

- > Uitvoeren van een buitenverkenning met en zonder warmtebeeldcamera.
- > Uitvoeren van een binnenverkenning met en zonder warmtebeeldcamera.
- > Herkennen van gevaren.
- > Herkennen van uitbreidingsmogelijkheden.
- > Toepassen van de basisprincipes van brandbestrijding op objecten waarmee in praktijkoefeningen niet geoefend kan worden.
- > Omgaan met verschillende stressoren die per deelnemer in meer of mindere mate kunnen worden ingezet, waardoor individuele leerdoelen beter geoefend kunnen worden.

VR-scenario met een VR-bril

De oefendoelen zijn gelijk aan die van VR-scenario's op een groot scherm; veel deelnemers ervaren wel dat ze met een VR-bril meer 'in het scenario' zitten.

Scenario met toepassing van AR

AR staat voor Augmented Reality. Dat is een techniek waarmee je virtuele elementen toevoegt aan de fysieke werkelijkheid. Met AR kun je bijvoorbeeld een virtuele brand

driedimensionaal projecteren in een fysiek oefenobject. De deelnemers dragen hierbij een AR-bril. Met AR kan een scenario nog tijdens dezelfde oefening en in hetzelfde oefenobject dynamisch worden aangepast aan de doelen en het gedrag van de deelnemers. De oefendoelen van een AR-scenario zijn in principe gelijk aan die van een praktijkoefening. Door de vele vormen van informatie, beeldvorming en scenarioveranderingen die je met AR aan het praktijkscenario kunt toevoegen, zijn die oefendoelen in principe effectiever en flexibeler te oefenen. Denk bijvoorbeeld aan het verzamelen en analyseren van feiten tijdens de verkenning van een gebouwbrand. Met traditionele oefenmiddelen vergt het veel creativiteit om een brand in een bekend oefenobject tijdens de verkenning een verrassend karakter te geven. Met AR is dit verrassingseffect makkelijker te realiseren. Ook biedt AR meer mogelijkheden om bepaalde elementen van een brand of van het gebouw realistischer weer te geven. Denk bijvoorbeeld aan het ontstaan van scheuren in de muren of andere signalen van instortingsrisico's. De toepassing van AR staat bij de Nederlandse brandweer nog wel in de kinderschoenen.

7.2.3 Relatie tussen scenario en doelen (rekening houdend met de vier kwadranten)

In de uitwerking van de oefening moet je een directe relatie leggen tussen de doelen die je wil behalen en het scenario. Het scenario moet op een realistische manier de oefendoelen ondersteunen. Als je bijvoorbeeld als oefendoel hebt geselecteerd dat een ploeg moet reageren op een zich plotseling uitbreidende brand, dan zul je die uitbreiding op een logische en realistische manier moeten ensceneren en laten plaatsvinden.

Als je wil dat er van kwadrant wordt gewisseld, zul je hiermee in de beschrijving van het scenario rekening moeten houden. Een voorbeeld: je wil dat er tijdens een ploegoefening van offensief buiten naar offensief binnen wordt geschakeld. Ensceneer de brand dan zo, dat die uitslaand lijkt. De ploeg zet vervolgens de offensieve buiteninzet in (transitional attack) en deze is succesvol (de enscenering verandert hierop door de brand een minder heftig aanzien te geven of van buitenaf de indruk te geven dat die vrijwel geheel is geblust). De ploeg zal hierop reageren door een offensieve binneninzet uit te voeren om de klus af te maken.

Andersom kan natuurlijk ook: een aanvankelijk kleine brand waarbij voor een offensieve binneninzet wordt gekozen, breidt zich via bijvoorbeeld holle ruimtes boven het plafond of via ventilatiekanalen uit naar (een) veel grotere ruimte(s). Het beschikbare koelend vermogen is niet voldoende om die uitbreiding via de binneninzet veilig en effectief aan te pakken. De bevelvoerder zal moeten besluiten tot een offensieve buiteninzet of misschien wel tot een defensieve buiteninzet als de bij de brand betrokken geraakte ruimte erg groot is en de brand zich snel ontwikkelt.

7.2.4 Creëren van een juist beeld en uitlokken van besluitvorming

Hierboven is aandacht besteed aan de koppeling tussen oefendoelen en het scenario. Het vervolg hierop is het uitlokken van besluiten en de bijbehorende acties door logische en realistische gebeurtenissen en kenmerken in het scenario of de enscenering op te nemen. Denk aan de volgende mogelijkheden:

- > het niet aantreffen van een persoon
- > het juist wél aantreffen van een persoon
- > onverwachte branduitbreiding
- > betrokkenheid van gevaarlijke stoffen bij de brand
- > tekenen van instortingsgevaar die worden opgemerkt tijdens de inzet.

Zowel de ploegleden als de bevelvoerder zullen op bovenstaande signalen moeten anticiperen. In veel gevallen leidt dat tot een andere aanpak van het incident dan waar de ploeg op het moment van het waarnemen van deze signalen mee bezig was. Goed onderling communiceren en snel schakelen zijn voorbeelden van oefendoelen die op deze manier aan de orde kunnen komen.

7.3 Scenario-ontwikkeling

Er is nog wel eens verwarring over het begrip scenario; wat is een scenario eigenlijk? Je kunt een scenario het beste vergelijken met een script voor een film. In het script staat precies wat de beginsituatie van de film is en hoe het verhaal zich gedurende de film ontplooft: welke gebeurtenissen vinden er plaats en welk effect hebben die op de hoofdrolspelers van de film? Als we de vergelijking met de oefeningen maken, dan geeft het scenario aan wat het vertrekpunt is voor de oefenende eenheid. Welke informatie krijgt men mee (melding en kladblokregels)? Welke informatie wordt onderweg verzameld (via de MDT of via de meldkamer)? Wat zien de deelnemers bij aankomst? Is er ter plaatse meer informatie beschikbaar? Welk brandregime wordt aangetroffen, kan dit nog escaleren en zo ja, gebeurt dit dan ook? Hierbij is het van belang om eventuele branduitbreidingen logisch en verklaarbaar te laten plaatsvinden. Niet in de laatste plaats is het belangrijk om op voorhand te bepalen hoe de gesimuleerde brand moet reageren op de inzet van de ploeg (als voorbeeld: voldoende water op de brand → brand krimpt, te weinig water op de brand → brand groeit). De enscenering zal deze effecten ook duidelijk moeten laten zien. Ook is het belangrijk om de afbouw van de brand goed te beschrijven.

Met scenario bedoelen we dus het realistisch verloop van het incident, inclusief het effect van de brandweerinzet daarop. Het ontwikkelen van zo'n scenario begint al met het bedenken in welke situatie de eerder vastgestelde oefendoelen het beste behaald kunnen worden. Ook hier is het van belang om het juiste (realistische) brandvermogen bij het object en de verschillende ruimtes te kiezen. Op basis van de oefendoelen en het beschikbare object maak je een inschatting van het realistische brandvermogen in de verschillende ruimtes, te beginnen bij de ruimte waar je de brand laat ontstaan. De enscenering moet de keuze voor een HD- of LD-inzet uitlokken. We adviseren om het ontwikkelen van scenario's voldoende aandacht te geven bij het voorbereiden van oefeningen. Deze inspanning wordt dubbel en dwars terugverdiend in de effectiviteit van de oefening en het leereffect dat met de oefening wordt behaald.

7.4 Objectkeuze

Een juiste objectkeuze is van belang om de gestelde oefendoelen te kunnen realiseren. Bij een oefening in een bedrijfspand ligt het uitvoeren van een redding minder voor de hand dan bij een inzet in een woongebouw. Als het gaat om het oefenen met LD-inzettechnieken, aangevuld met de inzet van een waterkanon, is een bedrijfspand juist wel weer voor de hand liggend. Helaas is de praktijk vaak anders: er is op een bepaald moment simpelweg een bepaald object beschikbaar om in te oefenen. Dat object past niet altijd bij de oefendoelen die voor dat moment waren gesteld. Als dat inderdaad het geval is, zul je de oefendoelen moeten aanpassen, zodat ze wel met het beschikbare object te behalen zijn. Aanpassen is

in dergelijke gevallen namelijk beter dan de bestaande oefendoelen projecteren op een niet-geschikt pand. Het resultaat van dat laatste zal naar alle waarschijnlijkheid namelijk zijn, dat er een gekunstelde situatie ontstaat waarin er te veel toneel moet worden gespeeld en die nauwelijks resultaat oplevert, omdat de omstandigheden en de manier van optreden niet goed bij elkaar passen.

7.4.1 Schakelen tussen de kwadranten in relatie tot objecteisen

Vanuit de basisprincipes is de voorkeursaanpak om de brand, als deze van buiten te bereiken is, ook van buiten te bestrijden. Bij een uitlaande woningbrand zal die tactiek vaak in de vorm van een offensieve buiteninzet (transitional attack, zie 7.6.1) plaatsvinden, direct gevolgd door een offensieve binneninzet. In deze situatie is de brand snel onder controle en kan er snel afgeblust worden. In principe is dit een manier van optreden waarbij het schakelen tussen twee kwadranten (van offensief buiten naar offensief binnen) in de techniek zelf is opgenomen. De tactiek (eerst offensief buiten en vervolgens offensief binnen) past immers naadloos bij het inzetdoel (de strategie) om de brandhaard en daarmee de motor van de brand aan te pakken, conform de basisprincipes.

Bij grotere woongebouwen zal er vaker moeten worden geschakeld. Een aanpak kan dan zijn dat eerst defensief binnen wordt opgetreden tot de omwonenden in veiligheid zijn en daarna pas offensief. In de strategie gaat redding dan als doel vóór blussing. In weer andere situaties moet er soms eerst worden geblust alvorens er überhaupt een redding kan plaatsvinden. Kortom: het schakelen tussen de kwadranten (tactieken) vergt in de eerste plaats een duidelijk beeld van de inzetstrategie (het primaire doel van de inzet) en in de tweede plaats een goede uitvoering van en afstemming tussen de verschillende technieken met de ploegen die deze technieken uitvoeren. Met scenario's die het schakelen tussen de kwadranten uitlokken, kunnen dus zowel strategische, tactische als technische oefendoelen worden behaald: strategische leerdoelen voor Officieren van Dienst, tactische leerdoelen voor bevelvoerders en technische leerdoelen voor manschappen.

De basisprincipes leiden tot een standaardaanpak waarbij er van buiten naar binnen wordt gewerkt. Die aanpak wordt bij een brand in een bedrijfsgebouw nog nadrukkelijker aanbevolen. Ook is de risico-acceptatie bij een brand in een bedrijfsgebouw veel lager dan bij een woningbrand. Bij volledig ontwikkelde branden in bedrijfsgebouwen wordt het kwadrant defensief buiten gehanteerd. De bij dit kwadrant behorende technieken worden echter nauwelijks geoefend. Dit is op zich al voldoende reden om die technieken juist wél in het oefenprogramma op te nemen! Een andere aanpak die kan worden gehanteerd, is defensief binnen of buiten in afwachting van voldoende slagkracht. Zodra die slagkracht aanwezig is, kan de brandweer indien mogelijk alsnog naar een offensieve kwadrant schakelen.

Als je tijdens de oefening een bepaalde schakeling van kwadranten wil uitlokken, zal dat voor de oefenende eenheden in de enscenering heel duidelijk herkenbaar moeten zijn. Met het schakelen tussen de kwadranten kun je zowel strategische, tactische als technische oefendoelen behalen.

7.4.2 Simulatie van specifieke gebouw- en mensenmerken

Zolang het object waar geoefend wordt hetzelfde gebruik kent als het object dat in de oefenopzet is beschreven, hoeven de specifieke gebouwkenmerken niet te worden gesimuleerd. Dat is natuurlijk de beste situatie; je kunt dan eenvoudig aangeven: 'What you see is what it is'. Maar het kan natuurlijk ook voorkomen dat het gebouw waar je een oefening wil uitvoeren niet als oefenobject beschikbaar is. Als er dan wel een oefenobject

beschikbaar is dat erg lijkt op het gebouw dat je oorspronkelijk in gedachten had, kun je ervoor kiezen om specifieke gebouwkenmerken te simuleren. Je kunt hierbij bijvoorbeeld denken aan de indeling in compartimenten en subcompartimenten.

Voor wat betreft de menskenmerken zul je vrijwel altijd terug moeten grijpen op simulatie. Zo vaak is er immers niet de kans om te oefenen met bijvoorbeeld verminderd zelfredzame personen. Als je menskenmerken gaat simuleren, moet je je vooraf goed verdiepen in het specifieke gedrag van of de belemmeringen die spelen bij de betreffende groep mensen. Dit gedrag of deze belemmeringen zul je heel duidelijk moeten overbrengen op de personen die de rollen spelen. Neem het lage tempo van voortbewegen dat bij veel zelfstandig wonende ouderen aan de orde is: dit moet in de simulatie zo natuurgetrouw mogelijk worden weergegeven. Datzelfde geldt voor verwarde personen: degenen die deze rol spelen, moeten ook echt als verward overkomen om de ernst in de oefening te houden.

7.4.3 Aanvullen en sturen van beeldvorming met andere middelen

Het is in veel gevallen lastig om bij een beschikbaar object de oefenende ploeg het juiste beeld van de situatie te geven. Je kunt ervoor kiezen om het gewenste beeld bij aankomst aan te vullen door de inzet van bewerkte foto's van de verschillende gevels. Door bijvoorbeeld gebruik te maken van een programma als SimsUshare is het mogelijk de rookuit-treding, het vlammenbeeld en andere waar te nemen kenmerken in een statische foto duidelijk te maken. Deze werkwijze kun je natuurlijk ook voor belangrijke punten *in* het object gebruiken, bijvoorbeeld doorgangen van brandwerende scheidingen.

Het is wel van belang de bewerkte foto's op een groot formaat in kleur af te drukken en in te sealen. Je kunt de foto's dan aan de ploeg overhandigen: geef bij aankomst aan de bevelvoerder de foto van de gevel waar hij direct zicht op heeft en geef tijdens de buitenverkenning de foto's van de betreffende gevel(s) aan de leden van de ploeg die de buitenverkenning uitvoeren. Overhandig tijdens de binneninzet de foto van de deur die men moet openen om in het volgende compartiment te komen. Het is ook een goede optie om de bevelvoerder tijdens de inzet een foto te geven waarop de uiterlijke signalen van het effect van de inzet te zien zijn. Dat kunnen positieve signalen zijn, maar ook signalen die een verslechterende situatie tonen. Hiermee geef je de bevelvoerder een zo natuurgetrouw beeld van het verloop van de inzet.

7.5 Enseneringsmiddelen

Er bestaat natuurlijk geen betere enscenering dan een echte brand. Ook datgene wat nu vaak als realistisch oefenen wordt beschouwd, is in feite slechts een enscenering. De branden worden dan immers beheersbaar gestookt in korven of met gas. Echte uitbreidingsmogelijkheden zijn er niet; de meest realistische componenten zijn de temperatuur en de rook. Een nadeel is bovendien dat er maar weinig korpsen zijn die beschikken over een eigen oefencentrum. Vaak zul je de enscenering dus met andere middelen moeten realiseren, waarbij je toch een zo realistisch mogelijk beeld nastreeft.

In dit handboek gaan we uit van de ensceneringsmiddelen die op elke post aanwezig zijn, zoals een rookmachine, knetterkasten, lichtslangen en dergelijke. Door veel korpsen of posten – en zeker door de posten die regelmatig aan de vaardigheidstoetsen van het Algemeen Brandweer Wedstrijd Comité (AWBC) deelnemen – zijn zelf al creatieve

ensceneringmiddelen ontwikkeld. Zo geeft een stuk betonstaalnet met daarover een wit laken en erachter een lichtslang tegen het plafond een mooi effect van vlammen die langs het plafond gaan. Monteer dit geheel bij een deur die geopend moet worden en zet de lichtslang aan, kort nadat de deur is geopend. Je creëert dan een mooie waarneming voor de ploeg die hierop zal moeten inspelen. Naast deze middelen zijn op afstand bedienbare schakelaars erg handig. Als je het goed gebruik van een warmtebeeldcamera wil bevorderen, zul je in de inscenering ook warmtebronnen moeten gebruiken. Denk hierbij aan een warmhoudplaatje, dompelaar of weerstanddraad.

7.5.1 Realistisch triggeren van waarneming en besluitvorming

Het realistisch triggeren van waarneming en besluitvorming is één van de lastigste onderdelen van het insceneren. Zeker als het principe 'what you see is what it is' leidend moet zijn. In dat geval is het noodzakelijk dat het gebouw de gewenste gebouwkenmerken toont, zowel van buiten als van binnen. Of, anders gesteld: je kunt in een beschikbaar object alleen oefeningen uitzetten die passen bij het bouwtype van dat gebouw.

7.5.2 Enscenering van het kenmerkschema in relatie tot oefenscenario's

Bij het insceneren houd je natuurlijk ook rekening met het kenmerkschema. Hieronder wordt aangegeven op welke manier je elk kenmerk op een realistische manier in de inscenering van je oefening mee kunt nemen.

Gebouwkenmerken

Al eerder in dit hoofdstuk is aangegeven dat de oefening en de oefendoelen moeten zijn afgestemd op het voor de oefening beschikbare object. Deelnemers verwachten bij een bepaald type gebouw ook de bijbehorende brandveiligheidsmaatregelen en zullen daar bij de inzet van uitgaan.

Menskenmerken

Ook de menskenmerken die je in de oefening verwerkt, moeten passen bij het beschikbare object. Slachtoffers bij een brand in een kantoorgebouw zijn zeldzamer dan bij een brand in een logiesgebouw. In een kantoorgebouw is iedereen aan het werk en zal een brand dus eerder opgemerkt worden dan in een gebouw waar mensen ook slapend aanwezig kunnen zijn. Daarnaast kennen mensen in een woon- of kantoorgebouw doorgaans de weg in het pand en dus ook de vluchtwegen.

Brandkenmerken

Brandkenmerken zijn de onderdelen waar je met de inscenering de meeste aandacht aan zult besteden. Je kunt de brandkenmerken echter niet los zien van de gebouwkenmerken, zeker in relatie tot uitbreidingsmogelijkheden.

Omgevingskenmerken

De omgevingskenmerken zijn onlosmakelijk verbonden met het object. De ligging van het object, de bereikbaarheid en de beschikbare bluswatervoorziening zijn vaste gegevens waar je normaal gesproken niet veel aan kunt veranderen. Je kunt ervoor kiezen een brandkraan onbruikbaar te maken of aan te geven dat deze niet bruikbaar is. Een onbruikbare bluswatervoorziening leidt tot een belangrijk keuzemoment voor de bevelvoerder.

Interventiekenmerken

De interventiekenmerken zijn deels afhankelijk van het gebouwtype; is er bijvoorbeeld wel of geen Bhv-organisatie aanwezig? Bij oefeningen voor meerdere eenheden zul je vooraf ook moeten nadenken over de interventiekenmerken die je belangrijk maakt voor de nakomende eenheden. Deze interventiekenmerken zul je vóór de eerste nakomende eenheid arriveert, moeten uitlokken. Een voorbeeld hiervan is dat de eerste eenheid bezig is met het evacueren van personen en nog geen inzet op de brand heeft gedaan, of precies andersom: dat de eerste eenheid heeft ingezet op de brand en nog niet is begonnen met de evacuatie.

7.5.3 Creëren van eenduidigheid

Het creëren van eenduidigheid in opvattingen over de uitvoering van tactieken, technieken en werkmethoden voor zowel de manschappen en bevelvoerders als voor de leden van de oefenstaf is van groot belang. Dit voorkomt overloze discussies bij de evaluatie van de oefeningen. Er komen dan geen reacties als: “Maar bij instructeur hebben we het anders geleerd”, of “Bij de vorige oefening kregen we te horen dat we deze techniek moesten uitvoeren zoals we zojuist hebben gedaan”. Dit soort reacties en discussies belemmeren het leren.

Om eenduidigheid te creëren kun je een oefening na afloop aan de hand van een After Action Review (AAR) evalueren en daarbij de basisprincipes van brandbestrijding als referentiekader toepassen. Eenduidigheid kan ook worden bevorderd door het verloop van een echte brand die het eigen korps heeft meegemaakt na te spelen in een oefening. Op deze manier worden de leerpunten van de bij de brand ingezette ploeg met de hele post of het hele korps gedeeld.

Aan de andere kant is incidentbestrijding geen ‘exact vak’: er zijn altijd meerdere goede oplossingen voor een bepaalde situatie. Probeer daarom altijd te achterhalen waarom een ploeg tijdens een oefening bepaalde tactische keuzes maakt of de inzet op een bepaalde manier uitvoert. De ‘waarom-vraag’ dient in de evaluatie van oefeningen altijd aan de orde te komen; die vraag helpt de oefendeelnemers te reflecteren op hun overwegingen, prioriteiten en acties. Waarom-vragen bij de evaluatie van oefeningen helpen ook om de brandweerkundige onderbouwing van tactieken, technieken en werkmethoden een stap verder te brengen.

7.6 Oefeningen ter ondersteuning van de implementatie van de basisprincipes

Als je gaat beginnen met het uitrollen van de basisprincipes in je regio en deze in oefeningen wil gaan verwerken, is het verstandig om te kiezen voor een goede opbouw van het oefenprogramma ‘Brand’. Met de introductie van de basisprincipes zijn ook een aantal nieuwe technieken en werkwijzen geïntroduceerd. Het is aan te bevelen om te beginnen met het aanleren van en oefenen met deze nieuwe technieken en werkwijzen alvorens ze op te nemen in inzet oefeningen voor de hele ploeg. Bij de opzet van een oefenprogramma brandbestrijding is het van belang te onderkennen dat het overschakelen naar de werkwijze volgens de basisprincipes niet gerealiseerd kan worden door enkele korte bijscholingsmomenten, gevolgd door een paar oefeningen.

Ter ondersteuning van de implementatie van de basisprincipes zijn er door de (voormalige) Brandweeracademie vakbekwaamheidsadviezen voor manschappen en bevelvoerders gemaakt. Deze adviezen leggen de relatie tussen de basisprincipes en de actuele les- en leerstof voor de leergangen Manschap en Bevelvoerder. Ook bieden de adviezen een handvat voor bijscholing op het gebied van en oefenen met de basisprincipes in het eigen korps. Als start van het implementatieprogramma worden de in het vakbekwaamheidsadvies genoemde e-modules behandeld. Met behulp van deze e-modules kunnen korpsleden zelf de theorie doornemen. Tijdens het uitvoeren van de oefeningen maken de deelnemers telkens een kort bruggetje met de vooraf doorgenomen theorie. Het is aan de oefenleider of (praktijk)instructeur om die bruggetjes op een didactisch effectieve manier te (laten) maken.

In de rest van deze paragraaf wordt eerst ingegaan op het aanleren van en oefenen met deze nieuwe technieken en werkwijzen. Daarna komen (ploeg)oefeningen voor de bemensing van de TS aan bod. Als laatste wordt een voorstel gedaan voor de opbouw van het oefenprogramma waarmee de basisprincipes kunnen worden aangeleerd en in oefeningen worden vertaald.

7.6.1 Basisoefeningen voor tactieken, technieken en werkmethoden

Onder de basisoefeningen voor tactieken, technieken en werkwijzen worden de volgende zaken verstaan.

Laag voortbewegen

Het laag voortbewegen wordt toegepast als bij een binneninzet het brandweerpersoneel de neuzen van de laarzen niet meer kan zien. Deze manier van voortbewegen is vrij nieuw voor de Nederlandse brandweer en vraagt de nodige oefening om er net zo vaardig in te worden als men nu is in de huidige manier van voortbewegen. Om overmatige slijtage aan pak (op de plaats van de knieën) en laarzen te voorkomen, is het van belang de techniek goed onder de knie te krijgen.

De uitgangspositie is bijvoorbeeld: je zit op je rechterknie met je linkerbeen bijna geheel gestrekt naar voren; je rechterhand houd je tegen de vloer een stukje voor je en met je linkerhand hou je de straal vast. Afhankelijk van de diameter van de slang heb je deze onder de arm en in je hand of onder het – in dit geval – rechterbeen. De beweging gaat als volgt:

- > Je steunt op je rechterhand en trekt je linkerbeen in ongeveer tot een haakse hoek.
- > Met je linkerbeen en steunend op je rechterhand druk je je lichaam wat omhoog.
- > Je trekt je rechterbeen een stuk naar voren, waarbij je je bovenlichaam naar achter beweegt, zodat je je rechterbeen zo ver mogelijk naar voren kunt brengen. Zorg ervoor dat je knie niet over de grond sleept.
- > Vervolgens breng je je linkerbeen weer naar voren in gehoekte positie; ook je rechterhand verplaats je naar voren.
- > Vanaf hier herhaalt de handeling zich.

Defensieve buiteninzet

De defensieve buiteninzet is niet zo moeilijk toe te passen. Het gaat bij deze tactiek om het koelen van aangestraalde oppervlakken. Er is sprake van de meest effectieve koeling als het water als een dunne film over een aangestraald oppervlak stroomt. Hierbij is het van belang dat het gehele aangestraalde oppervlak met de straal wordt bereikt.

De hiervoor toe te passen technieken zijn de inzet van:

- > Oscillerende waterkanonnen, eventueel aangevuld met handstralen.
- > Fire defenders. Let er hierbij wel op dat het water ook daadwerkelijk terechtkomt op het te koelen oppervlak, bijvoorbeeld een gevel.
- > Waterschermen. Stel het waterscherm zodanig op dat het water daadwerkelijk op het te koelen oppervlak terechtkomt.

Uitvoeren van een buitenverkenning inclusief warmtebeeldcamera

De buitenverkenning moet de volgende verkenningsvragen beantwoorden:

- > Waar zit de brand?
- > Is deze bereikbaar?
- > Is er voldoende koelend vermogen om de brand te blussen?

Herhaal voorafgaand aan deze oefening even de belangrijkste valkuilen bij het gebruik van een warmtebeeldcamera. Laat de deelnemers een buitenverkenning uitvoeren, bij voorkeur van meerdere panden met verschillende gebruiksdoeleinden. Ensceneer in deze panden een brand met verschillende signalen (brand met een doorslag, verschillende rookdichtheden, hotspots, et cetera). Zorg ervoor dat vastgesteld kan worden waarvoor de ruimte gebruikt wordt (slaapkamer, woonkamer, kantoorruimte, werkplaats en dergelijke), zodat op basis van de omvang en het gebruik van de ruimte een inschatting gemaakt kan worden van het potentiële brandvermogen.

Offensieve buiteninzet en transitional attack

De offensieve buiteninzet begint bij woningen en woongebouwen vaak met een transitional attack. De uitvoering van een transitional attack is relatief eenvoudig: een gebonden straal wordt tegen het plafond van de ruimte gespoten. De straal breekt tegen het plafond, waardoor er een soort sprinklerwerking ontstaat en de brand effectief wordt neergeslagen. Bij een effectieve transitional attack moet je zo'n 20 seconden tegen het plafond spuiten. Hierdoor wordt al snel een knockdown bereikt. De brand is daarmee echter niet uit; het afblussen moet dan nog plaatsvinden. Als het niet lukt om met een transitional attack binnen 20 seconden een knockdown te realiseren, dan zit de brand waarschijnlijk in een andere ruimte die niet van buitenaf, of vanaf de plaats waar de inzet wordt uitgevoerd, kan worden bereikt.

Bij een transitional attack is de samenwerking tussen de ploeg die de transitional attack van buitenaf inzet en de ploeg die van binnenuit het afblussen uitvoert van groot belang. De ploeg die de binneninzet gaat uitvoeren, moet klaar zijn om direct in te zetten als de transitional attack van buitenaf succesvol is en de knockdown is bereikt. Als er te veel tijd zit tussen de knockdown en de inzet van de ploeg die moet afblussen, heeft de brand de kans om weer op te laaien en is de eerste inzet – de transitional attack – voor niets geweest. De ploeg die de transitional attack uitvoert, geeft aan wanneer de ploeg voor de afblussing de ruimte kan betreden.

Aangepaste deurprocedure

Bij het betreden van een gebouw en tijdens de binnenverkenning kom je altijd deuren tegen. Die open je niet zomaar: achter een deur kan immers sprake zijn van een gevaarlijke situatie waarbij je direct moet optreden. Dit geldt vooral als je je in de rooklaag voortbeweegt. Als je vermoedt dat er achter een deur die je gaat openen rook of brand is, zorg er dan altijd voor dat de straal klaar is om direct ingezet te kunnen worden.

De deurprocedure is met het invoeren van de basisprincipes sterk vereenvoudigd. Hieronder staat de nieuwe methode voor het openen van deuren beschreven. Er is een verschil tussen de procedure bij toedraaiende en afdraaiende deuren:

Bij een toedraaiende deur

1. Nummer 1 zit laag bij de grond voor de deur, zodat hij naar binnen kan kijken als de deur geopend wordt.
2. Nummer 2 gaat achter de deur zitten.
3. Nummer 2 doet de deur voorzichtig open en kijkt naar de bovenzijde van de deur naar uitstromende rook.
4. Nummer 1 kijkt of er brand of rook is.
5. Bij brand of rook geeft nummer 1 een lange puls de ruimte in.
6. Nummer 2 sluit de deur en beiden wachten even af, om vervolgens de deur weer te openen om het effect van de lange puls waar te nemen. Indien nodig wordt opnieuw een lange puls gegeven, net zolang tot de ruimte veilig betreden kan worden.

Bij een afdraaiende deur

1. Nummer 1 zit laag bij de grond voor de deur, zodat hij naar binnen kan kijken als de deur geopend wordt.
2. Nummer 2 gaat naast de deur aan de klinkzijde tegen de muur zitten .
3. Nummer 2 doet de deur voorzichtig open en kijkt naar de bovenzijde van de deur naar uitstromende rook.
4. Nummer 1 kijkt of er brand of rook is.
5. Bij brand of rook geeft nummer 1 een lange puls de ruimte in.
6. Nummer 2 sluit de deur en beiden wachten even af, om vervolgens de deur weer te openen om het effect van de lange puls waar te nemen. Indien nodig wordt opnieuw een lange puls gegeven, net zolang tot de ruimte veilig betreden kan worden.

Zorg ervoor dat je deuren controleert op warme uitstromende rook met bijvoorbeeld een handlamp of warmtebeeldcamera. Warmte kun je ook voelen met de rug van je hand. Door de rug van je hand te gebruiken, zul je bij een grijpreflex van de deur af bewegen. Zorg dat een van de twee klaar zit met de straal als je vermoedt dat achter een deur rook en/of warmte aanwezig is. De een kan de deur openen, zodat de ander direct de straal kan inzetten. Ga laag en niet recht voor de opening zitten. Het is namelijk mogelijk dat er veel stoom naar buitenkomt als je de straal inzet. Communiceer het openen van de deur goed en houd de deurklink vast. Zo kan indien nodig de deur ook weer snel gesloten worden. Probeer rookverspreiding zoveel mogelijk te voorkomen. Deze werkwijze vraagt een goede samenwerking en coördinatie tussen 1 en 2. Als de straal door 3 en 4 moet worden aangevoerd, is de samenwerking tussen alle vier de manschappen van belang. Neem dit aspect ook mee in de oefeningen.

Door ventilatie wordt zuurstof aangevoerd en ontwikkelt de brand zich. Tijdens de binnenverkenning moeten daarom alle deuren zoveel mogelijk dichtgehouden worden. De toevoer van zuurstof wordt hiermee beperkt, wat antiventilatie genoemd wordt. Dit doe je door het toepassen van deurcontrole. Alleen een kleine opening voor de straal is noodzakelijk; de maximale opening van een deur is dus gelijk aan de slangdikte. Bij de buitendeur zit altijd iemand die deurcontrole toepast, bijvoorbeeld nummer 3 of 4. Deze zorgt ervoor dat de deur

niet verder opengaat door het trekken aan de straal. Ook kan hij helpen met het doorvoeren van de straal.

Lange puls en boogmethode

De lange puls en de boogmethode zijn twee eenvoudig te gebruiken methoden waarbij je rookgaskoeling toepast. Rookgaskoeling is een vorm van indirecte blussing. Deze methoden pas je toe als je geen directe blussing kunt inzetten; directe blussing heeft altijd de voorkeur. Alleen wanneer directe blussing niet mogelijk is, pas je tijdens het vorderen deze vormen van rookgaskoeling toe.

> Lange puls

Bij de lange puls worden met een straal met een kegelhoek van 30° rustige pulsen gegeven, zo ver mogelijk de rook in. Probeer hierbij zoveel mogelijk te voorkomen dat je met je straal het plafond en de wanden raakt. Een voordeel van de lange puls is dat de verst weggelegen hoeken van de ruimte bereikt kunnen worden. Een ander voordeel is dat de brand meteen een stuk minder fel wordt wanneer deze direct geraakt wordt.

> De boogmethode

De boogmethode wordt vaak na de lange puls toegepast wanneer er wordt voortbewogen in met rook gevulde ruimtes. De straalpijpvoerder richt de straal een paar meter voor zich op bijvoorbeeld de rechterwand en beweegt de straal van de vloer naar het plafond en vervolgens langs het plafond naar de linkerwand en dan richting de vloer. Als de vloer is bereikt, wordt de beweging in omgekeerde volgorde uitgevoerd. Omdat er bewust op de wanden en het plafond gericht wordt, worden deze oppervlakken nat en breekt de straal. De natte oppervlakken en de druppels koelen de rooklaag.

Bij beide methoden moet voorkomen worden dat de ramen worden geraakt. Door de kracht van de straal en de thermische schok kunnen de ramen breken, waardoor de brand opeens veel zuurstof aangevoerd krijgt, met alle risico's van dien.

Het oefenen van deze technieken moet met water op de straal gebeuren. Daarnaast speelt de integratie van het voortbewogen en toepassen van deze rookgaskoelingsmethoden een rol. Je hebt dus een object nodig waar met water mag worden geoefend.

Defensieve binneninzet

Voor het oefenen van de defensieve binneninzet is een object nodig waarin meerdere brandcompartimenten aanwezig zijn. Een belangrijk onderdeel van de oefening is namelijk het herkennen van scheidingen tussen de brandcompartimenten. De defensieve binneninzet is één van de lastigste kwadranten om uit te voeren. Een defensieve binneninzet kan de volgende doelen hebben:

> Gelegenheid bieden voor evacuatie

In bijvoorbeeld een flatgebouw moeten bewoners van naastgelegen appartementen en verdiepingen geëvacueerd worden als de rook zich verspreidt of de brand zich uitbreidt.

> Voorkomen van uitbreiding

Je houdt de brand in het (sub)compartiment. Hiermee bied je ook mogelijkheid voor evacuatie.

> Schadebeperking

Je beperkt de schade tot het (sub)compartiment en voorkomt dat de overige compartimenten brand-, rook- en waterschade oplopen.

Je kunt verschillende technieken gebruiken om de bovengenoemde doelen te bereiken. Het is afhankelijk van het specifieke doel welke technieken je precies toepast. Als het doel evacueren is, moet je weten hoe je dat gaat doen. Ventilatietechnieken kunnen helpen bij het rookvrij houden of maken van vluchtroutes, waardoor de evacuatie makkelijker is. Als het doel is om te voorkomen dat de brand zich uitbreidt, kun je piercingtechnieken en koelen toepassen. Ventilatie van ruimtes gevuld met rook die niet bij de brand betrokken zijn, kan ook helpen bij het voorkomen van branduitbreiding. Met ventileren creëer je meer zicht en zorg je dat de brandbare rook niet kan ontvlammen. Om deze technieken toe te passen, moet je soms een deur forceren.

Overschakelen naar een ander kwadrant gebeurt altijd *na* een defensieve binneninzet. Zo kan de bevelvoerder overschakelen naar een offensieve binneninzet om de brand te blussen, of naar een defensieve buiteninzet als het behouden van de brandscheiding niet haalbaar is. Als blijkt dat de brand nu wel van buitenaf te blussen is, kan de bevelvoerder ook overschakelen naar een offensieve buiteninzet.

Branddoorslag voorkomen

Als je de brandscheiding in stand wilt houden, kijk je eerst naar het materiaal waar de scheiding van gemaakt is. De brandscheiding houd je in stand door te koelen. Alle soorten materialen, behalve stalen wanden, kun je alleen koelen aan de kant waar de brand is. Het heeft geen effect als je koelt aan de kant waar het niet brandt. Met piercingtechnieken koel je de muur aan de kant van de brand zonder zelf de brandende ruimte in te gaan. Een stalen brandscheiding kun je wél koelen aan de kant waar het niet brandt.

Soms is het niet mogelijk om te koelen aan de kant van de brand. Dan kun je alleen nog doorslag voorkomen. Doorslag vindt sneller plaats op zwakke plekken, zoals boven verlaagde plafonds of op plekken waar de leidingdoorvoeringen of dakaansluitingen zitten. Naast het controleren van de zwakke plekken gebruik je de 'kubusgedachte' om te bepalen in welke richtingen de brand zich kan uitbreiden. De kubusgedachte betekent dat je alle zes zijden die de brand omsluiten controleert op de mogelijkheid tot branduitbreiding: voor, achter, links, rechts, onder en boven.

Ventileren

Ventileren wordt gedaan om de ruimtes rookvrij te maken of om de verspreiding van rook tegen te gaan. Rookverspreiding kan ook worden tegengegaan door deuren gesloten te houden of (deur)openingen af te dekken met een smokestopper. Ventileren zorgt echter ook voor een toevoer van zuurstof, en brengt daardoor een groot risico op het aanwakkeren van de brand met zich mee. Ventileren mag daarom alleen als de brand onder controle is!

Je kunt horizontaal en verticaal ventileren. Horizontaal ventileren betekent dat de in- en uitstroomopening zich op dezelfde hoogte bevinden. Verticaal ventileren betekent dat de instroomopening zich op een lager punt bevindt dan de uitstroomopening. Denk hierbij aan de verticale ventilatie van een trappenhuis. De deur beneden in het trappenhuis kan als instroomopening worden gebruikt, terwijl een rookluik bovenin het trappenhuis als uitstroomopening fungeert.

Tijdens een defensieve binneninzet wil je voorkomen dat de rook zich verspreidt naar naastgelegen compartimenten, bijvoorbeeld omdat een trappenhuis rookvrij moet blijven voor een evacuatie. In de ruimte van de brand is sprake van overdruk, en in de naastgelegen compartimenten van onderdruk. De rook wil zich daarom verplaatsen naar de naastgelegen compartimenten. Rook stroomt immers evenals lucht van hoge druk naar lage druk. Met behulp van overdrukventilatoren kun je in de compartimenten met onderdruk dezelfde of een hogere druk creëren als in de met rook gevulde brandruimte. De rook verplaatst zich vervolgens niet meer vanuit de brandruimte naar de naastgelegen compartimenten.

Bij het toepassen van deze techniek van preventieve overdrukventilatie moet je zeker weten dat de brand niet kan doorslaan vanuit de brandruimte naar de naastgelegen ruimtes. Anders wordt de brand namelijk als gevolg van de ventilatie aangewakkerd, zodra de rook van de brandruimte doorslaat naar de naastgelegen ruimte(s). Dit gebeurt dan op het moment dat de rook heet genoeg is om te kunnen ontbranden en de mengverhouding tussen de rook en de zuurstof in die ruimte optimaal is. De ventilatie kan deze conditie creëren. Preventieve overdrukventilatie werkt ook alleen wanneer er geen uitstroomopening in de te ventileren ruimte is. Als die er wel is, creëer je namelijk onvoldoende overdruk en zal de rook zich alsnog verspreiden.

Wees voorzichtig met het toepassen van ventilatie om een defensieve binneninzet in bedrijfspanden mogelijk te maken. De verspreiding van rookgassen is in grotere panden namelijk moeilijk te overzien. Door te ventileren kunnen zomaar ergens in het pand rookgassen in een explosieve mengverhouding met zuurstof terechtkomen, met een rookgasexplosie tot gevolg. Dit kan zelfs gebeuren met koude rook. Onderzoek zal moeten uitwijzen welke mogelijkheden verschillende ventilatietechnieken bieden om een defensieve binneninzet uit te voeren en welke risico's aan die mogelijkheden verbonden zijn.

Offensieve binneninzet

De offensieve binneninzet lijkt nog het meest op de werkwijze die de Nederlandse brandweer al lange tijd hanteert. Maar ook hierin zijn een aantal veranderingen doorgevoerd. Allereerst is er de vraag of er überhaupt binnen moet worden opgetreden. Is het antwoord ja, en kan de inzet veilig voor het eigen personeel plaatsvinden, dan zal een binneninzet kunnen worden uitgevoerd.

De doelen van een offensieve binneninzet zijn:

- > redden van een slachtoffer
- > blussen van de brand.

Een offensieve binneninzet voer je uit in het brandende compartiment. Door de onderstaande zaken in acht te nemen, kun je een offensieve binneninzet in principe veilig uitvoeren.

De inzetdiepte is beperkt en overzichtelijk. Je neemt daarbij de kortste weg naar de brand. Om de brandruimte binnen te gaan, doe je de deur open. Hierdoor wordt zuurstof aangevoerd, waardoor de brand zich kan uitbreiden. Ook kan een raam springen of een deur openwaaien of doorbranden, waardoor de brand zich eveneens kan uitbreiden. Door de branduitbreiding kun je ingesloten raken. Zorg daarom dat er altijd voldoende koelend vermogen aanwezig is. Betreed alleen het gebouw en het brandcompartiment als er geen instortingsgevaar is. Dit kan veranderen tijdens de inzet. Wees hier alert op.

Elke inzettechniek bij de offensieve binneninzet is gericht op het voorkomen dat de brand-driehoek compleet wordt. Je voorkomt dat de brand zich uitbreidt en probeert de brand uit te maken. Tijdens een offensieve binneninzet pas je vaak meerdere technieken toe, zoals deurcontrole, rookgaskoeling en daarna een directe blussing. Doordat er altijd een straal wordt meegenomen, is de terugweg voor de ploeg(en) die binnen is (zijn) ingezet duidelijk. Dat betekent dat er sneller opgerukt kan worden.

Een offensieve binneninzet voer je uit als je weet waar de brand zit, als je voldoende koelend vermogen bij je hebt en als je van binnenuit bij de brandhaard kunt komen. Dit is echter een 'ideaal' plaatje. Je komt in de praktijk soms in een situatie waarin je niet weet waar de brand is, maar je toch naar binnen moet. Een voorbeeld hiervan is als het bijna zeker is dat er brand in een woning is, maar je de brandhaard niet kunt vinden. Als er nog mensen binnen zijn en de situatie veilig is, kan de bevelvoerder ervoor kiezen om toch een binneninzet uit te voeren. Er wordt dan een ruimte-voor-ruimte-inzet uitgevoerd: elke afzonderlijke ruimte wordt gecontroleerd om te bepalen of de brand daar zit. Is dat niet het geval, maar hangen er wel rookgassen, dan wordt de ruimte geventileerd.

Een ruimte-voor-ruimte-inzet

Ga als volgt te werk bij een ruimte-voor-ruimte-inzet: voer de ventilatie gecontroleerd uit. Ventileer alleen de ruimte waar de rookgassen hangen. Als de ruimte schoon is, worden de deuren en ramen weer gesloten. Het is belangrijk om stroming door het gebouw zoveel mogelijk te voorkomen. Dit doe je door alleen in de ruimte met rookgassen een raam of deur naar buiten open te zetten. Breng vervolgens met bijvoorbeeld je straal de ventilatie op gang. Dit doe je door met de straal met een kegelhoek van minimaal 30 graden door de deur- of raamopening naar buiten te spuiten. Deze techniek noemen we hydraulische ventilatie. De deur naar de hal of de gang is hierbij zoveel mogelijk gesloten. De tweede ploeg kan assisteren bij de deurcontrole. Het ventileren wordt alleen gedaan na opdracht van de bevelvoerder, zodat deze de effecten kan controleren en indien nodig bij kan sturen. Door te ventileren stel je een veilige terugweg zeker. Zorg verder dat je tijdens een ruimte-voor-ruimte inzet de rookgassen koelt en probeer de kortste route naar de brand te vinden. Gebruik hierbij bijvoorbeeld een warmtebeeldcamera.

7.6.2 Basisoefeningen voor de TS

Nadat de verschillende technieken en werkwijzen zijn aangeleerd en afzonderlijk geoefend, kan gestart worden met de oefeningen voor de hele bemensing van de TS. Het gaat hier om het doorlopen van het hele proces van incidentbestrijding. Voor de bevelvoerder zijn de toepassing van FABCM, het Kenmerkenschema, 'Stop en denk na' en het Kwadrantenmodel speciale aandachtspunten. Voor de manschappen zijn het leren uitvoeren van een goede buitenverkenning en het toepassen van de nieuwe technieken en werkwijzen de centrale leerdoelen.

7.6.3 Opbouw van het oefenprogramma

De opbouw van het oefenprogramma waarmee de basisprincipes worden geïmplementeerd vraagt de nodige aandacht. Zoals eerder vermeld, bieden de door het NIPV opgeleverde vakbekwaamheidsadviezen de nodige handvatten en ondersteunende producten. In hoofdlijnen komt de aanpak op het volgende neer:

- > *Theoretische bijeenkomst*
In deze theoretische bijeenkomst worden de basisprincipes van brandbestrijding uitgelegd en komen ook de vier tactieken met de bijbehorende technieken en werkmethoden aan bod.
- > *Oefenen met de vier tactieken en de nieuwe technieken*
Kies voor elke praktijkoefenavond één tactiek en de bijbehorende technieken en werkmethoden uit en stel die centraal in het programma van die avond. Zorg er wel voor dat het laag voortbewegen op elke oefenavond aan de orde komt. Deze techniek vraagt immers veel oefening.
- > *Oefenen van inzetten met een complete ploeg.*
Nadat de tactieken, technieken en de werkmethoden afzonderlijk zijn geoefend, worden ze in inzet oefeningen geïntegreerd. Start hierbij met inzetten die veel voorkomen binnen het verzorgingsgebied. Daarmee boek je al snel succes. Wees er alert op dat je bezig bent met gedragsverandering en dat dit veel tijd een aandacht vraagt.

Verder is het van belang om alle oefeningen van het incidenttype brand in het licht van de basisprincipes van brandbestrijding te ontwikkelen en uit te voeren. Hierdoor worden de tactieken, technieken en werkwijzen het best ingeslepen en wordt verwarring voorkomen.

7.6.4 Tijdsbestek

Zoals eerder in dit hoofdstuk aangegeven, begint het eigenlijke (praktijk)oefenprogramma met het aanleren van de nieuwe technieken en werkwijzen. De ene techniek is eenvoudig aan te leren, terwijl de andere (zoals het laag voortbewegen) meer oefentijd vergt. Er kan van worden uitgegaan dat de theoretische achtergronden van de basisprincipes van brandbestrijding, de nieuwe tactieken, technieken en werkmethoden in een tijdsbestek van vijf à zes oefenavonden kunnen worden geïnstrueerd. Het is handig om voor elk oefenmoment een bepaalde tactiek en de daarbij behorende technieken centraal te stellen.

Binnen de basisprincipes heeft de verkenning een belangrijke plaats gekregen; veel elementen daarvan worden ook in de huidige manier van brandbestrijding al gehanteerd. Het is wel van belang om aandacht aan de finesses te besteden, zoals het antwoord geven op de drie verkenningsvragen. Het is daarom aan te bevelen om bij elke oefening waarin basistactieken en -technieken centraal staan ook te oefenen met het uitvoeren van een goede buiten- en binnenverkenning.

Daarna volgt de periode van inslijpen of 'intrainen' van de tactieken en technieken. Daar zal meer tijd voor nodig zijn, zeker voor het brandweerpersoneel dat al langer in dienst is. Het afleren van bekende werkwijzen is namelijk geen eenvoudige klus. Reden te meer om vanaf het moment van de keuze voor het implementeren van de basisprincipes van brandbestrijding bij elke oefening met het incidenttype brand het werken volgens de basisprincipes leidend te laten zijn.

Literatuurlijst

- Brandweeracademie (2015a). *'Het kan verkeren'. Beschrijvend onderzoek naar brandontwikkeling en overleefbaarheid bij woningbranden*. Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2015b). *Situationele commandovoering bij de brandweer*. Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2016). *Casuïstiek ondergeventileerde branden*. Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2017). *De offensieve buiteninzet: buiten gewoon? Een handelingsperspectief op basis van vier onderzoeken*. Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2019). *Voorkomen van rookgasontbrandingen*. Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2020). *Rookverspreiding in woongebouwen*. Instituut Fysieke Veiligheid.
- Brandweeracademie (2021). *Wanneer water in rook opgaat. Een experimenteel onderzoek naar het effect van de 3D pulsmethode en de boogmethode op het koelen van rookgassen*. Instituut Fysieke Veiligheid.
- Dekker, S. (2017). *The Field Guide to Understanding 'Human Error'*. (3^e druk). CRC Press.
- Endsley, M.R. (1995). *Towards a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems*. The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 37(1), 32-64.
- Endsley, M.R. (2000). Theoretical underpinnings of situation awareness: a critical review. In M.R. Endsley & D.J. Garland (Eds.). *Situation Awareness Analysis and Measurement*. Lawrence Erlbaum Associates (pp.1-26).
- Flin, R. & Arbuthnot, K. (2002). *Incident Command: Tales from the Hot Seat*. Routledge.
- Groenendaal, J., (2015). [*Frontline Command. Reflections on practice and research*](#). Proefschrift Radboud Universiteit Nijmegen.
- Groenendaal, J., Helsloot, I. & Bruggemans, B., (2014). Betere commandovoering door het FABCM model, *De Brandweerman* 542, 15-18.
- Hudson, P., (z.d.). [*Safety management and safety culture. The long, hard and winding road*](#).
- Hurley, M. J. (Ed.). (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. (5^e editie). Springer.

- Inspectie Openbare Orde en Veiligheid (2004). *Veiligheidsbewustzijn bij brandweerpersoneel. "Leert de brandweer van lessen uit eerdere ongevallen met brandweerlieden?"* Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties.
- Instituut Fysieke Veiligheid (2018). *E-module Aandacht voor je veerkracht.*
- Kahneman, D. & Klein, G. (2009). Conditions for Intuitive Expertise. A Failure to Disagree. *American Psychologist* 64(4), 515-526.
- Klein, G.A. (1998). *Sources of Power: How People Make Decisions.* MIT Press.
- Klein, G.A. (2011). *Streetlights and Shadows: Searching for the Keys to Adaptive Decision Making.* MIT Press.
- Lambert, K. & Baaij, S. (2011). *Brandverloop: technisch bekeken, tactisch toegepast.* Sdu Uitgevers.
- Van Mierlo, R.J.M & Tromp, A.J. (Eds.). (2014). *Fire Safety Engineering. Handboek voor de bouw.* Eburon.
- Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties (1999). *De risico's van het vak?*
- Nederlands Instituut Fysiek Veiligheid (2008). *Lesboek Veilig repressief optreden.* Bijscholing Officieren van Dienst.
- Purser, D. A., & McAllister, J. L. (2016). Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In M. J. Hurley (Ed.), *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.* (5^e editie), (pp. 2308-2428). Springer.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 13(3), 257-266.
- Smit, A., Slagmolen, N. & Brepoels, M., (2015). [Weerbaarheid onderzocht \(2010-2015\). Over menselijke processen in het politiewerk.](#) Onderzoekreeks Politieacademie. Boom Criminologie.
- Timmermans, B. (2012). *Human Factors in de hulpverlening, ramp- en crisisbestrijding. Lessons learned uit de luchtvaart.* Sdu Uitgevers.
- Underwriters Laboratories (2016). *Study of the Effectiveness of Fire Service Positive Pressure Ventilation During Fire Attack in Single Family Homes Incorporating Modern Construction Practices.*
- Underwriters Laboratories (2012). *Onderzoek naar de effectiviteit van verticale ventilatie en repressieve tactieken bij eengezinswoningen door de brandweer. Een samenvattend brandweerrapport.*

