

Rookgaskoeling en straalpijptechnieken

Een literatuurstudie



Nederlandse Academie voor
Crisisbeheersing en Brandweezorg
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
Kemperbergerweg 783, Arnhem
www.nipv.nl
info@nipv.nl
026 355 24 00

Colofon

© Nederlands Instituut Publieke Veiligheid (NIPV), 2022

Auteurs	R. Weewer
Contactpersoon	R. van den Dikkenberg
Opdrachtgever	(De voormalige) Brandweeracademie
Datum	25 september 2022

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.

Samenvatting

Wereldwijd is er veel discussie over straalpijptechnieken, debieten en met name wat de veiligste en eenvoudigste manier is om rookgassen te koelen. Een belangrijke vraag is of er niet een eenvoudig uitvoerbare techniek is die altijd werkt. Omdat de deskundigen nogal van mening verschillen, heeft de Brandweeracademie praktijkonderzoek gedaan naar het effect van verschillende rookgaskoelingstechnieken. In dat praktijkonderzoek werd geconcludeerd dat de 'boogmethode' het best aan de voorwaarden van uitvoerbaarheid en effectiviteit voldoet. Vervolgens ontstond er direct een discussie over de vraag of deze methode wel onder alle omstandigheden veilig is vanwege (vermeende) stoomvorming. Daarom is besloten om de voorliggende literatuurscan uit te voeren.

De hoofdvraag van deze literatuurscan is:

Wat kan er in de internationale literatuur gevonden worden over de toepassingsgebieden van verschillende straalpijptechnieken en de risico's die aan die verschillende technieken zijn verbonden, in het bijzonder met als doel om rookgassen te koelen in kleine ruimtes bij het uitvoeren van een offensieve binneninzet.

In de literatuur is vrij weinig experimenteel onderzoek te vinden naar de toepassing van verschillende technieken om rookgassen te koelen. In de discussies maar ook in de experimenten lopen verschillende technieken en omstandigheden door elkaar heen, zodat er geen harde conclusie kan worden getrokken. Stoomvorming lijkt het grootste risico te zijn, hoewel niet helder is hoe groot dat probleem nu daadwerkelijk is, omdat er geen praktijkonderzoek naar is gedaan.

Gesteld dat er bij het raken van hete oppervlakken met veel water veel stoom wordt gevormd, dan is het 't veiligst om ook voor een uitstroom te zorgen en om uit de uitstroom te blijven. Maar de hoeveelheid waarin stoom zorgt voor overdruk en uitstroom is niet helder. Ook de mate waarin krimp of juist uitzetting van de rookgaslaag plaatsvindt, is niet duidelijk. Daarnaast is er geen indicatie te vinden in de literatuur dat het toepassen van de boogmethode een risico oplevert. Er lijkt wel consensus te bestaan over het belang van het debiet voor rookgaskoeling. Het toepassen van optimale debieten lijkt belangrijker te zijn dan de straalpijptechniek.

Inhoud

	Samenvatting	3
	Inleiding	5
1	Definities	7
1.1	Stoom en waterdamp	7
1.2	Vormen waarin water uit een straalpijp komt	8
1.3	Methoden om de brand te blussen (attack)	8
1.4	Methoden om de brand te benaderen (interior advancement)	9
2	Rookgaskoelingstechnieken	12
2.1	Algemene bevindingen	12
2.2	Experimenteel onderzoek	12
2.3	Reviews	17
2.4	Beschouwende artikelen	18
2.5	Boeken over brandbestrijding	18
2.6	Over stoom	22
2.7	Over het debiet (flow rate)	22
2.8	De rol van uitstroomopeningen	23
3	Beschouwing	24
3.1	Antwoorden op hoofd- en deelvragen	24
3.2	Het geheel overziend	26
	Literatuur	28

Inleiding

Aanleiding

Rookgaskoeling is volgens de basisprincipes van brandbestrijding nodig wanneer een binnenruimte in een met rook gevuld klein gebouw of ruimte moet worden uitgevoerd, omdat de brand niet direct kan worden bereikt met de waterstraal. Tijdens het vorderen naar de brandhaard wordt de rook gekoeld als veiligheidsmaatregel. Door het koelen van de rook wordt de warme (van zowel convectie als straling) die brandweermensen ontvangen verminderd en de kans op een ontbranding van de rook verkleind.

Wereldwijd is er veel discussie over straalpijptechnieken, debieten en met name wat de veiligste en eenvoudigste manier is om rookgassen te koelen. De discussies worden gevoerd op congressen, op sociale media en in tijdschriften. De teksten zijn veelal gebaseerd op ervaringen en lijken vaak meer opvattingen te zijn dan wetenschappelijk onderbouwde kennis. Daarnaast is een veel gehoorde kreet “it depends”, waarmee wordt aangegeven dat er verschillende technieken zijn, die je op het juiste moment in de juiste situatie moet toepassen. Brandweermensen zouden dan over alle technieken (gereedschap), alle informatie die nodig is, de kennis en situational awareness moeten beschikken om onder tijdsdruk de juiste wijze van rookgaskoeling te kiezen. Dit lijkt een onmogelijke opgave, zelfs als er veel tijd zou zijn om dit te trainen en oefenen, omdat er altijd relevante informatie ontbreekt om op theoretische basis de juiste beslissing te kunnen nemen.

Een belangrijke vraag is daarom of er niet een eenvoudig uitvoerbare techniek is die altijd werkt. Omdat de deskundigen nogal van mening verschillen, heeft de Brandweeracademie praktijkonderzoek gedaan naar het effect van verschillende rookgaskoelingstechnieken (Brandweeracademie, 2021). In dat praktijkonderzoek werd geconcludeerd dat de ‘boogmethode’¹ het best aan de voorwaarden van uitvoerbaarheid en effectiviteit voldoet. Vervolgens ontstond er direct een discussie over de vraag of deze methode wel onder alle omstandigheden veilig is vanwege (vermeende) stoomvorming. Daarom is besloten om de voorliggende literatuurscan uit te voeren, en in de internationale literatuur op zoek te gaan naar wat er over het onderwerp rookgaskoeling is geschreven en onderzocht. In dit document zijn de bevindingen uit de literatuur op een rijtje gezet.

Doel

Het doel van deze literatuurscan is de vraag te beantwoorden in hoeverre er een risico ontstaat wanneer de Nederlandse brandweer de boogmethode met gebonden straal als standaard zou gaan toepassen bij het vorderen naar een brandhaard in een kleine gebouw of ruimte, indien de brandhaard niet direct kan worden geblust.

¹ De boogmethode is een straalpijpvoeringstechniek waarbij met een gebonden straal de wanden en plafond worden geraakt. Met de straal wordt als het ware een “n” beschreven.

Onderzoeksvraag

De hoofdvraag van deze literatuurscan is:

Wat kan er in de internationale literatuur gevonden worden over de toepassingsgebieden van verschillende straalpijptechnieken en de risico's die aan die verschillende technieken zijn verbonden, in het bijzonder met als doel om rookgassen te koelen in kleine ruimtes bij het uitvoeren van een offensieve binneninzet.

Deelvragen zijn:

1. Welke straalpijptechnieken bestaan er en welk doel hebben deze?
2. Welke experimentele studies zijn er verricht naar het effect van deze technieken?
3. Wat zijn de voor- en nadelen van de technieken wanneer zij worden toegepast om rookgassen te koelen en welke risico's worden in de literatuur genoemd?

Aanpak

Voor deze literatuurscan is de sneeuwbalmethode toegepast. Als startpunt is de literatuurreview in het onderzoeksrapport *Fire Attack* van UL-FSRI gebruikt (UL-FSRI, 2020). De bronnen zijn gevolgd tot aan en vanaf 1950, toen het oudst gevonden onderzoek werd gepubliceerd door Lloyd Layman (Layman, 1952). Er is vervolgens een schifting gemaakt naar artikelen gebaseerd op onderzoek en artikelen gebaseerd op verwijzingen naar onderzoek. Opiniërende en beschouwende artikelen zijn wel bekeken, maar worden hier niet besproken, tenzij er een voor de onderzoeksvraag interessant statement in wordt gemaakt. Daarna is er nog met behulp van experts die (telefonisch) geraadpleegd zijn, gezocht wat er onder de verschillende technieken wordt verstaan en wat er over de toepassing ervan wordt gezegd.

Afbakening en leeswijzer

Deze literatuurscan richt zich met name op experimenteel onderzoek naar verschillende straalpijptechnieken met als doel rook te koelen, en de positieve en negatieve effecten van deze technieken. Omdat gaandeweg bleek dat de gehanteerde definities van termen van groot belang in de vergelijking van technieken, is ook gezocht naar definities en zijn deze meegenomen in de literatuurscan. Er zijn ongetwijfeld nog vele andere boeken en documenten die ook ingaan op straalpijptechnieken. In dit onderzoek is vooral gekeken naar brondocumenten en niet naar opiniërende literatuur en reviews.

In hoofdstuk 1 wordt ingegaan op de definities zoals die zijn gevonden. Daarna worden in hoofdstuk 2 de bevindingen van de literatuurscan beschreven, die in hoofdstuk 3 beschouwd worden, waarmee een antwoord wordt gegeven op de hoofd- en deelvragen.

1 Definities

Omdat in de literatuur termen en begrippen door elkaar lijken te lopen, is het goed om te starten met een overzicht van die termen en hun definities.

1.1 Stoom en waterdamp

Brandweermensen spreken vaak over stoom. Het is dan niet duidelijk waar precies op wordt gedoeld: gasvormig water of waterdamp. Daarom is het nuttig een heldere definitie te hanteren.

Zevotek (2017)

“‘Steam’ cannot be seen. The cloud that most people refer to as steam is moisture or water vapor that has condensed into water droplets” (Zevotek, 2017, p. 104).

Dit betekent dus:

- > Stoom (steam) is water in gasvorm dat ondoorzichtig is, > 100 C°
- > Waterdamp = water in dampvorm dat niet doorzichtig is, < 100C°.

NFPA1700

In de NFPA 1700 wordt geen definitie van stoom aangetroffen; daar wordt de term gebruikt voor beide vormen waarin water kan voorkomen.

Wikipedia

Wikipedia, s.v. stoom, definieert drie soorten stoom: natte, verzadigde en oververhitte stoom.

- > Onder *natte stoom* wordt verstaan: stoom waarin kleine waterdeeltjes zweven. Indien natte stoom verhit wordt, dan zullen allereerst de waterdeeltjes verdampen. Bij voldoende verwarming wordt de stoom dan droog verzadigd.
- > Onder *verzadigde stoom* wordt verstaan: stoom die condenseert bij verlaging van temperatuur.
- > Om *oververhitte stoom* te maken moet er extra warmte aan de stoom worden toegevoegd.

Wikipedia, s.v. waterdamp, schrijft dat in de natuurkunde *waterdamp* beschouwd wordt als water dat zich in de gasfase bevindt. Scheikundig wordt waterdamp aangeduid met H₂O(g). Net als veel andere stoffen in de gasvorm, kan waterdamp in lucht niet waargenomen worden met het menselijk oog. Verder valt er te lezen: “De hoeveelheid waterdamp volume-eenheid lucht is luchtvochtigheid. Condensatie van waterdamp tot vloeibare, zichtbare druppeltjes, treedt op bij daling van de luchttemperatuur, doordat koudere lucht minder watermoleculen kan vasthouden; bij het dauwpunt raakt de lucht verzadigd met watermoleculen die vervolgens gaan samenklonteren: er ontstaat mist of bewolking.”

Blijkbaar is er een verschil tussen wat er in de fysica onder stoom wordt verstaan en wat er in de volksmond mee wordt bedoeld. Daarom is het goed om aan te geven welke definities in deze literatuurstudie worden gehanteerd.

Natte stoom: een mengsel van stoom en waterdruppeltjes dat ondoorzichtig is (er is dan water gecondenseerd).

Droge stoom: (onzichtbaar) water in de gasfase.

1.2 Vormen waarin water uit een straalpijp komt

Fog stream (nevelstraal)

Met een speciale straalpijp worden hele fijne druppeltjes geproduceerd. Dit is niet hetzelfde als een sproeistraal.

Spray stream

Hiermee wordt bedoeld op een sproeistraal; de druppels zijn groter dan van een fog stream.

Straight stream

Een gebonden straal met een combinatiestraalpijp of een zogenaamde 'smooth bore' straalpijp.

1.3 Methoden om de brand te blussen (attack)

In de literatuur wordt onderscheid gemaakt tussen het blussen van de brand en het naderen van de brandhaard (interior advancement). Om de brand te blussen zijn er twee verschillende methodes. Deze worden hieronder toegelicht.

Directe methode of 'direct attack'

- > Water direct op de brandende stof (fuel) brengen (Zevotek, 2017; NFPA1770, 2021).
- > De brand direct blussen door het oppervlak van de brandstof te koelen (met een volle straal met beperkt debiet, ook wel de 'penciling' of 'painting' methode genoemd) (Lambert & Baaij, 2011).

Indirecte methode of 'indirect attack'

- > Water tegen plafond spuiten waardoor er veel stoom wordt geproduceerd en zowel de oppervlakken als de rook worden gekoeld (Zevotek, 2017). Het is overigens niet duidelijk of het gaat om natte of droge stoom, maar gezien de strekking van het rapport wordt waarschijnlijk op natte stoom bedoeld.
- > Water spuiten tegen de wanden en het plafond van de ruimte van buiten de ruimte zelf, om zo veel mogelijk stoom te creëren (NFPA1700, 2021).
- > Een brand bestrijden door zo veel mogelijk stoom in de ruimte te creëren door met een sproeistraal met kegelhoek van 30-60 graden tegen hete oppervlakken (plafond) te spuiten. Dit moet van buiten de brandruimte worden uitgevoerd (Fire Dynamics Curriculum Portal, 2018).
- > Het bewerkstelligen van een knockdown (en daarna afblussen) door het nat maken van hete oppervlakken (met een sproeistraal) om stoom te vormen. De ruimte moet bij

voorkeur gesloten worden gehouden. Deze methode kan worden toegepast daar waar een binnenaanval moeilijk is. Bij toepassing in een gebouw moet deze methode niet worden ingezet in de brandruimte zelf, tenzij er een uitstroomopening is achter de brand (Lambert & Baaij, 2011).

- > Zo veel mogelijk stoom maken met een fog stream (Layman, 1952). Toen Layman dit schreef, werden er nog geen binnenaanvallen gedaan. Het gaat hier dus om een *buitenaanval* en met een zogenaamde *fog stream*, waarmee een straalpijp wordt bedoeld in de sproeistand met zo klein mogelijke druppels. Later werd deze methode ook binnen gebruikt, maar daar zitten dan nadelen aan (Fredericks, 2000).
- > Tegenwoordig wordt ook gesproken over een indirecte blussing waarbij een gebonden straal tegen plafond of muren wordt gericht met als doel de straal in druppels te laten breken die vervolgens via die weg op het brandende oppervlak terechtkomen. Dit is in de literatuur niet terug te vinden, maar lijkt op de eerste stap van de transitional attack zoals beschreven in het rapport van Underwriters Laboratories (Zevotek, 2017).

Combination attack

- > Combinatie van direct en indirect attack (Zevotek, 2017).
- > Een combination attack (in veel landen zou men dit een indirecte aanval noemen) is een combinatie van een indirecte en een directe aanval, ook wel een 'massieve aanval' genoemd. Deze wordt toegepast bij een volontwikkelde (uitslaande) brand waarbij eerst de knockdown wordt gerealiseerd door veel stoom te vormen en daarna de brand af te blussen (Lambert & Baaij, 2011)

1.4 Methoden om de brand te benaderen (interior advancement)

Om de brandhaard veilig te naderen is er een aantal mogelijkheden (NFPA1700, 2021). Deze worden hieronder beschreven.

Met een gebonden straal

Er zijn twee methodes waarbij een gebonden straal wordt gebruikt:

- > Water wordt tegen de oppervlakken van de ruimte gespoten waardoor deze worden gekoeld en opnieuw energie uit de rooklaag kunnen opnemen.
- > Water wordt tegen het plafond gespoten waardoor de straal in druppels breekt; de druppels bewegen door de hete rookgassen en koelen de rookgassen door verdamping van (een deel van) de waterdruppels.

De stoom die wordt gevormd door het koelen van het plafond en de hete gassen absorbeert nog meer energie, doordat de stoom verder wordt opgewarmd.

Rookgaskoeling

In het algemeen wordt met rookgaskoeling bedoeld het inbrengen van waterdruppeltjes in de rooklaag. De waterdruppeltjes verdampen en onttrekken (verdampings)energie aan de rook, waardoor deze afkoelt.

- > De gevormde stoom koelt de rook en deze krimpt en wordt verdund, resulterend in een verminderde brandbaarheid en straling (NFPA1700, 2020).
- > Rookgaskoeling moet continu worden uitgevoerd; het koelt alleen de ruimte rond de ploeg en heeft in grote ruimte dus weinig tot geen effect (Zevotek, 2017).

Rookgaskoeling met pulsen en een sproeistraal (3D-koeling)

Het koelen van de rookgassen om veilig te vorderen naar de brandhaard. Deze technieken zijn belangrijk als de brandhaard niet direct kan worden bereikt. In alle geraadpleegde literatuur worden hiervoor pulsen met een sproeistraal genoemd (Fire Dynamics Curriculum Portal, 2018; Lambert & Baaij, 2011). Dat kan gaan om zowel korte als lange pulsen. Het koelend vermogen van korte pulsen en dus de reikwijdte is klein. Tegenwoordig worden vaker lange pulsen ingezet (meer koelend vermogen, grotere reikwijdte): lange pulsen met een kegelhoek van 30 graden; de straalpijp wordt onder een hoek van 45 graden gericht naar het plafond. De technieken voor rookgaskoeling in relatie tot het volume van de ruimte zijn niet goed bekend. Genoemd wordt een vloeroppervlak van maximaal 70m² bij een normale plafondhoogte (maximaal 4 meter) (Lambert & Baaij, 2011).

1.4.1 Voorkeursmethode volgens NFPA1700

De NFPA noemt de gebonden-straal-methode als voorkeurstechiek en draagt de fog-stream-3D-methode als alternatief aan.

Bij de aanbevolen techniek met de gebonden straal geeft de NFPA aan:

- > dat gebruik moet worden gemaakt van de reikwijdte van de straal om de plafonds ver voor de straalpijvoerder te koelen
- > dat de straal over het oppervlak moet worden geveegd
- > dat de frequentie en hoeveelheid water afhangen van de intensiteit van de brand, de rookgastemperatuur, de grootte van de ruimte, de locatie en de afstand tot de brandhaard.

In NFPA 1700 wordt als tactische overweging genoemd, dat uiteraard altijd zo snel mogelijk water op het vuur moet worden gebracht. Als voorwaarde geldt, dat beperken van de toevoer van zuurstof door middel van deurcontrole de effectiviteit van de rookgaskoeling verhoogt, maar dat er gecoördineerde ventilatie moet worden toegepast zodra er water op de brandhaard wordt gebracht. Hiermee wordt waarschijnlijk bedoeld, dat door het openen van de deur een afvoermogelijkheid voor de energie (in de vorm van stoom) wordt gecreëerd.

1.4.2 Overige termen en methodes

In de literatuur worden verder nog een paar andere relevante termen gevonden, namelijk oppervlaktekoeling en boogmethode

Oppervlaktekoeling (surface cooling)

Dit is een van de termen die tot verwarring kunnen leiden. De eerste uitleg van deze term is een methode om de *brand te blussen*, de twee is een methode om *rookgassen te koelen* als de brandhaard niet direct kan worden bereikt. Het is goed om deze twee uit elkaar te houden, omdat de doelen van beide technieken verschillen.

De volgende betekenissen van het begrip oppervlaktekoeling worden gevonden:

- > Het koelen van het oppervlak van de brandhaard (Särqvist, 2002). Dit zou ook als 'directe methode' kunnen worden aangeduid.
- > Een vorm van rookgaskoeling met een sproeistraal met kleine kegelhoek of een gebonden straal in een snel O-, T-, Z- of n- patroon (Fire Dynamics Curriculum Portal, 2018) met als doel om de brandbaarheid van de rookgassen, de straling en het brandvermogen te beheersen totdat effectief water op de brandhaard kan worden gebracht. Dit is geen blusmethode, maar een manier om veilig naar de brandhaard te kunnen bewegen. De rookgassen worden, zoals het letterlijk vermeld staat in Fire

Dynamics Curriculum Portal, 2018 als het ware 'voor je uit geduwd'. Het is op zich wel vreemd dat door het koelen van de rookgassen het brandvermogen zou kunnen worden beheerst. Vermoedelijk wordt hier bedoeld op het voorkomen van *ontbranding* van de rookgassen, waardoor de energie uit de rookgassen niet kan vrijkomen.

Boogmethode

Bij een ventilatiegecontroleerde brand kan men een boogmethode toepassen. Dat is een pulsmethode van 2-3 s met een kegelhoek van 40-60 waarbij ook de plafonds en de wanden worden geraakt (Lambert & Baaij, 2011).

Dit is dus een andere definitie van de boogmethode dan degene die gehanteerd wordt in het onderzoek van de Brandweeracademie (Brandweeracademie 2021).

2 Rookgaskoelingstechnieken

2.1 Algemene bevindingen

Er is relatief weinig wetenschappelijke literatuur te vinden over het onderwerp rookgaskoeling in relatie tot straalpijptechnieken. De artikelen die zijn gevonden, zijn reviewartikelen (Liu et al., 2002) of artikelen waarin de auteur zijn mening of ervaring beschrijft. De meeste van dergelijke opinieartikelen zijn in dit verslag buiten beschouwing gelaten, maar een aantal zijn wel meegenomen, omdat ze aanvullende informatie gaven, bijvoorbeeld over het boek van Layman, zie verder (Whitley, 2011; Taylor, 2011, Zevotek et al., 2017; Cool, 2005). Er zijn, behalve het boek van Layman (Layman, 1952), slechts twee experimentele onderzoeken gevonden naar het effect van straalpijptechnieken op rookgaskoeling (Naval Research Laboratory, 1997; Knapp, Pillsworth & White, 2003). Wel zijn er enkele data-analyses en computersimulaties uitgevoerd (Särqvist & Holmstedt, 2001; Maait Tsuomisaari, 1995).

Sommige artikelen beschrijven het verwachte effect van bepaalde techniek op basis van een theoretische beschouwing. Vrijwel alle verhandelingen starten met het boek van Lloyd Layman waarin hij experimenten zou hebben beschreven. Het boek is in Nederland echter niet beschikbaar,² en daarom niet geraadpleegd (Layman 1952). Wat hij in dat boek heeft beschreven, kan dus alleen indirect met behulp van andere bronnen worden gededuceerd (Fredericks, 2000; Whitley, 2011).

Naast bovenstaande bestaat er leerstof voor de brandweer, ontwikkeld op basis van de ervaring en kennis van een grote groep internationale experts, waarin verschillende technieken met hun doelstellingen zijn beschreven (Fire Dynamics Portal, 2014). Hieruit blijkt, dat namen van technieken soms iets anders suggereren dan wordt bedoeld. Het is om verwarring te voorkomen daarom belangrijk dat de juiste begrippen en definities worden gehanteerd.

2.2 Experimenteel onderzoek

Er is relatief weinig experimenteel onderzoek gedaan naar het gebruik van verschillende straalpijptechnieken. De eerste serie experimentele onderzoeken met betrekking tot rookgaskoeling is van Lloyd Layman. Zoals vermeld, kon zijn boek uit 1952 niet worden ingezien. Van de experimenten is alleen bekend dat ze zijn uitgevoerd in een schip. Verder is er alleen literatuur die naar zijn 'indirect method' verwijst. Door Knapp et al (2003) zijn experimenten uitgevoerd met verschillende straalpijptechnieken in een stalen container. Een goede samenvatting van de tot en met 2002 beschikbare literatuur over experimenten met straalpijptechnieken is te vinden een rapport van de National Research Council of Canada (Liu et al, 2002) en een beknopte review staat in het recente rapport van Underwriters Laboratories / Fire Safety Research Institute (Zevotek et al 2017). Andere experimenten zijn

² Het origineel is niet opgevraagd, omdat er voldoende auteurs zijn die erover schrijven en de betekenis van de experimenten voor het doel van dit onderzoek te klein werd geacht om de inspanning te rechtvaardigen.

uitgevoerd door de Naval Research Centre of Canada (Scheffey, 1997) ook in een schip. Hiervan is de rapportage onduidelijk en onvolledig terug te vinden; daarom wordt deze niet verder behandeld. Alvorens dieper in te gaan op de beschikbare onderzoeken, wordt hieronder eerst het boek van Layman besproken.

2.2.1 Layman (1952)

Verschillende auteurs (Zevotek, 2017); Fredericks, 2000, Axelsson, 2016, Taylor & Whitley, 2011) verwijzen naar Lloyd Layman als een van de eersten die zich heeft beziggehouden met sproeistralen (fog streams). Hij noemde zijn methode de 'indirecte methode' (zie ook paragraaf 1.3). Layman ontwikkelde zijn methode door experimenten uit te voeren in een schip. In die tijd voerde men geen binnenaanvallen uit, want er was nog geen adembescherming. Het hele idee was, om zo veel mogelijk stoom te creëren in de brandruimte door buiten de brandruimte (en het liefst buiten het gebouw door een gebroken raam of bij een uitslaande brand) met een nevelstraal (fog stream) naar binnen te spuiten. Zijn hypothese was, dat door het grote koelend vermogen van de kleine druppeltjes de brand dan uit zou gaan (Layman, 1952; Fredericks, 2000). Naar verluidt, heeft hij deze methode later impliciet verruimd tot gebruik bij een binnenaanval, maar dan wel van buiten de brandruimte.

Fredericks (2000) beschrijft meer in detail de omstandigheden waaronder deze 'indirect attack' door Layman wordt gepropageerd. Het gaat om een buitenaanval in een gesloten gebouw met een nevelstraal. Onduidelijk is, of er gebruik is gemaakt van een bijzondere straalpijp met extra fijne druppeltjes. We moeten dit zien tegen de achtergrond van de geringe persoonlijke bescherming in die tijd, waardoor een binnenaanval vrijwel onmogelijk was. Zoals Fredericks het beschrijft, lijkt deze tactiek heel sterk op wat we tegenwoordig een offensieve buiteninzet met fognails (sproeistraal) of coldcutters zouden noemen. In die zin was Layman zijn tijd dus ver vooruit. Volgens Frederick is het helder dat Layman nooit heeft bedoeld deze tactiek bij een binnenaanval toe te passen en zegt Layman in zijn boek: "An indirect attack should always be made from positions that will enable personnel to avoid injuries from superheated smoke and live steam. If possible and practical, an indirect attack should be made from positions outside the involved building" (Fredericks, 2000, p. 64). Dat is een belangrijke voorwaarde voor toepassing van de methode van Layman: die moet dus altijd worden uitgevoerd vanaf een positie waar de straalpijpvorder zich niet in de uitstroomrichting van hete gassen en stoom bevindt, en het liefst dus een buitenaanval zijn.

Beschouwing van de methode van Layman

Er wordt door diverse auteurs verwezen naar het oorspronkelijke experimentele onderzoek van Layman en zijn vertaling daarvan naar de praktijk van brandbestrijding. Daarom is het interessant om nog eens nader te beschouwen wat hij heeft bedoeld.

Mats Rosander kan worden beschouwd als een van de grondleggers van de Zweedse pulstechnieken. In een interview met Lars Axelsson (Axelsson, 2016) betoogt hij, dat de pulstechnieken met de sproeistralen veiliger zijn dan de destijds in Zweden gangbare – maar niet altijd veilige – methode van Layman, en dat met pulstechnieken een groter koelend effect wordt bereikt. In het interview zegt Rosander tevens, dat de Layman-methode een techniek is waarmee tegen het plafond en de muren werd gespoten bij een binnenaanval waarbij de brandhaard niet met een directe methode kan worden geblust. Hij vertelt dat de Layman-methode zoals in Zweden toegepast, bestaat uit een gebonden straal met een debiet van 75 liter per minuut die wordt ingezet terwijl de ploeg (met toen nog open helmen)

kruipend voortgaat, en de deur achter de bezetting wordt dichtgehouden. Hij zegt dat deze methode best goed werkte, maar dat er toch nadelen aan kleefden die aanleiding zijn geweest om naar andere methoden te zoeken.

Er waren drie nadelen. In de eerste plaats moet gezocht worden naar hete oppervlakken. In een situatie met slecht zicht is dat niet eenvoudig, waardoor er veel water verspild wordt, waar dan doorheen gekropen moet worden. Brandweermensen konden toch nog in een flashover terecht komen en werden soms door stoom verbrand. Rosander geeft ook aan dat brandweermensen brandwonden op de oren en nek kregen. Hij zegt dat de methode goed is als buiten de brandruimte gebleven kan worden. De genoemde nadelen kunnen echter ook goed te maken hebben met andere elementen van de techniek, zoals het dichthouden van de deur tijdens het blussen en het beperkte debiet.

De suggestie van Rosander dat de methode van Layman een techniek is waarmee tegen het plafond wordt gespoten met een gebonden straal, komt niet overeen met wat er kan worden teruggevonden over de Layman-methode. De verwarring zit wellicht hierin, dat Layman zijn techniek een 'indirecte methode' noemde, terwijl die term tegenwoordig wordt gebruikt voor het blussen van een afgeschermd brandhaard door met een gebonden straal tegen het plafond te spuiten, zodat de straal breekt en de druppels op de vuurhaard vallen.

2.2.2 Knapp, Pillsworth and Flatley (2003)

Deze auteurs hebben drie artikelen gepubliceerd van experimenten die ze hebben uitgevoerd in een stalen zeecontainer, zonder brand. Ze hebben met name gekeken naar de luchtstroming en hoeveelheid luchtverplaatsing bij het gebruik van verschillende straalpijp-technieken. Het doel van hun onderzoek was met name om het verschil te bepalen tussen de invloed van de smoothbore straalpijp, van de straight stream (gebonden straal) en van de fog stream (nevelstraal) op de luchtstroming die wordt veroorzaakt. In deel I van het onderzoek hebben ze luchtstromen gemeten in een brandruimte (zonder brand) met een uitstroomopening aan het einde en de deur achter zich open. Alle drie de technieken werden toegepast als continue techniek, dus zonder pulsen. De straalpijp werd op verschillende afstanden van de uitstroomopening geopend en de positie werd vastgehouden.

De conclusie was dat er weinig verschil is in luchtverplaatsing tussen de gebonden straal en de smoothbore straalpijp. In beide gevallen werd nauwelijks lucht verplaatst. De stroming was het verst van de uitstroomopening het grootst. De nevelstraal verplaatste ongeveer vier keer zo veel lucht als de gebonden straal, en de luchtverplaatsing overtrof de meetcapaciteit van de meetapparatuur. Bovendien was de hoeveelheid lucht te groot om door de uitstroomopening te worden afgevoerd. Geconcludeerd werd dat er met een fog stream een behoorlijke overdruk in de ruimte zou ontstaan, zelfs met een uitstroomopening ter grootte van een raam. Een beperking van dit onderzoek is echter, dat niet helder is in hoeverre stroming van de brandhaard en de effecten van stoomvorming invloed hebben op de drukverschillen.

In een tweede serie experimenten is gekeken naar het effect van het ventilatieprofiel op de luchtstroming, ook weer zonder brand. In alle gevallen was er sprake van een onbeperkte luchttoevoer (open deur en twee open ramen) achter de straalpijpvoerder. Drie uitstroomsituaties werden beproefd: een situatie zonder uitstroom, een halve open deur en een hele open deur. Er werd ingezet met een solid-bore straalpijp, een gebonden straal en een 30°-sproeistraal vanuit de deuropening. Bij het gebruik van de gebonden stralen werden

– zelfs zonder uitstroomopening – geen luchtverplaatsing, geen overdruk en geen stroming richting de straalpijvoerder waargenomen. Met de 30°-sproeistraal was de luchtstroming bij alle ventilatiesituaties extreem groot, zelfs zodanig, dat water en lucht richting de straalpijvoerder stroomden. Dit was zelfs het geval, toen de gehele deur die de uitstroomopening vormde, openstond. Geconcludeerd werd, dat met de sproeistraal zo veel lucht naar binnen werd gebracht, dat geen uitstroomopening groot genoeg was om de lucht af te voeren.

Als verklaring dat het toch vaak goed gaat, geven Knapp et al. aan dat men veel ervaring heeft met branden in slechts één ruimte, en dat er in die gevallen bovendien snel water op het vuur kan worden gebracht. Dat er niet snel water op het vuur kan worden gebracht, zou volgens hen anders zijn als er meer ruimten in brand zouden staan en de eerste ruimte binnen wordt getreden. Een detail dat hier wellicht nog noemenswaardig is, is dat de auteurs stellen dat er bij een echte brand zoveel rook is, dat het voor straalpijvoerders praktisch onmogelijk is om goed waar te nemen waar het water naartoe gaat en hoe ze hun straalpijp juist moeten richten, en om waar te nemen hoe de luchtstroming is en dus ook waar de stoom heen gaat.

De conclusie op basis van deze experimenten is dat de risico's op verbranding van brandweerpersoneel door stoom van een gebonden straal kleiner zijn dan bij een (continue) sproeistraal en dat de aanwezigheid van een uitstroomopening daarop nauwelijks invloed heeft.

2.2.3 Scheffey et al. (1997)

In dit artikel wordt gesteld dat de directe aanval met een gebonden straal vooral bij branden in het beginstadium wordt toegepast, waarbij de brandhaard direct bereikt kan worden. Als de hitte, de gassen en de rook van een verder ontwikkelde brand te groot zijn, is binnentreden in de ruimte niet meer mogelijk en wordt de indirecte methode toegepast. Gesteld wordt, dat er veel tussenliggende situaties zijn waarbij wel kan worden binnentreden in de ruimte voor een binnenaanval wordt gedaan, maar waarbij de brandhaard door obstakels niet direct kan worden bereikt met de (gebonden) straal. De extra tijd die het kost om de brand te vinden om een directe aanval te doen, is een bedreiging voor de veiligheid, vooral als de brand ventilatiegecontroleerd is. In dat geval is de enige optie een indirecte aanval. Maar volgens de auteurs zou daardoor veel stoom worden gevormd, het zicht worden beperkt en de thermische laag worden verstoord. Een straalpijptechniek, de 'offensive fog attack' die bestaat uit pulsen van 2-3 seconden met een 60°-sproeistraal onder 45° naar het plafond zou deze nadelen niet hebben.

Brandweermensen zouden vast moeten stellen welke techniek (een indirecte of directe aanval) in welke omstandigheid het beste zou zijn. De vraagstelling bij dit onderzoek van Scheffey et al. was of er misschien een eenvoudige techniek is die in alle situaties werkt zodat brandweermensen die keuze niet hoeven te maken. Het doel van het onderzoek van Scheffey was te bepalen welke voor- en nadelen een offensieve aanval met een nevelstraal (offensive fog attack) heeft ten opzichte van de traditionele gebonden straal. Daartoe werden experimenten uitgevoerd in een (stalen) marineschip. De tekeningen zijn niet erg duidelijk, maar ergens op de tweede verdieping onderdeks is een speciale ruimte ingericht die is uitgerust met obstakels. De brandstof bestond uit houten cribs met board en heptaan. De brand mocht groeien tot er (bijna) flashovercondities bereikt waren (400-600°C aan plafond). Door de obstakels was een directe aanval onmogelijk en moest de aanvalsploeg de ruimte betreden. De aanvalsploeg gebruikte de ene keer een indirecte aanval en de andere keer de

'offensive fog attack' bij het vorderen naar de brandhaard. Het is niet duidelijk wat het debiet bij deze experimenten was, maar het lijkt erop dat dit tussen 76 en 360 liter per minuut lag.

De conclusie van het onderzoek was, dat de 'offensive fog attack' (pulsen met een kegelhoek van 60° onder een hoek van 45° naar het plafond) kan worden toegepast wanneer de brandhaard niet direct bereikt kan worden, en de brandweerploeg wel naar binnen kan om de hete gassen boven hun hoofd te beheersen. Het richten van een gebonden straal of een sproeistraal met kleine kegelhoek op het plafond leidde tot een grote hoeveelheid stoom. De stoomvorming was bij de fog attack veel minder groot. Wanneer de brandhaard wel direct bereikt kon worden, was er geen verschil met de traditionele gebonden straal. Er werden geen nadelen gevonden van de 'fog attack'.

2.2.4 Underwriters Laboratories (Zevotek et al., 2017)

Underwriters Laboratories heeft experimenten gedaan naar de binnenbrandbestrijding. Daarvoor is een typisch Amerikaans huis nagebouwd van hout, gips en isolatie (timber frame). De brandruimte was steeds aan het einde van een lange gang. De brand werd benaderd door de voordeur, die werd opengelaten tijdens het vorderen door de lange gang. De brand mocht zich eerst ontwikkelen totdat hij ventilatiegecontroleerd was.

De experimenten zijn uitgevoerd als brand in een slaapkamer met verschillende variaties: zonder uitstroomopening, met één uitstroomopening en met twee uitstroomopeningen. Zonder uitstroomopening is de starttemperatuur lager en treedt er geen flashover op voordat de inzet wordt gestart. Er zijn drie technieken toegepast:

- > De zogenaamde 'flow and move'-methode, uitgevoerd met een gebonden straal. Daarbij werd de straalsoort geopend en werd op de wanden en plafond gericht en gevorderd naar de brandruimte door de lange gang.
- > De 'shutdown and move'-methode, waarbij tijdens het vorderen de straalsoort gesloten werd en er elke 5-10 s gespoten werd.
- > De 'narrow fog'-methode (sproeistraal met kleine kegelhoek) in combinatie met de transitional attack (buitenzet gevolgd door binnenzet). Zodra de brandruimte werd bereikt, werd een directe aanval ingezet.

In deze studie is om veiligheidsredenen bewust niet de 'narrow fog'-methode in een 'flow and move' techniek gebruikt; omdat er geen ventilatie tegenover de ploeg was, zou dit volgens de auteurs een hoge druk veroorzaken in de brandruimte zonder uitstroommogelijkheden. Dit zou volgens de auteurs nog nader onderzocht moeten worden, maar eerdere experimenten (Zevotek et al. noemen hier geen referenties) zouden hebben aangetoond dat dit gevaarlijk kan zijn. De narrow fog is daarom alleen toegepast *met* uitstroomopening.

De experimenten in het kader van Fire Attack geven aan dat de snelheid waarmee de knockdown wordt bereikt voor alle drie methoden (flow and move, shutdown and move en narrow fog) ongeveer even snel is. Het maakt niet uit of er wel of niet een uitstroomopening is; dit geldt niet voor de narrow fog, waarvoor wel een uitstroomopening noodzakelijk is. Er is waargenomen dat de rookgassen voor de straalsoortvoerder uit worden geduwd als er een uitstroomopening is. Hoe sneller bewogen wordt met de straal, hoe beter dat gaat. Met de narrow fog lukt dat ook, maar dan moet er zoals gezegd wel een uitstroomopening zijn. Als de straalsoort wordt gesloten tijdens het verplaatsen, neemt de temperatuur weer toe binnen 10-15 s. In het gebouw was ook een

grote ruimte, waar is gekeken naar het effect van pulstechnieken. Deze hadden slechts 10-15s effect; daarna was de temperatuur weer terug op haar oude niveau.

2.2.5 Obach, Weckman and Strong (2011)

Dit experimentele onderzoek is uitgevoerd door de Universiteit van Waterloo (Canada) in 2011 en is gepubliceerd in de 'proceedings' van een internationaal symposium. Het doel van dit onderzoek was om het effect van verschillende straalpijptechnieken te bepalen op de condities in de brandruimte en daarmee op de veiligheid van brandweermensen. In het onderzoek werden 'full scale' experimenten uitgevoerd in een proefopstelling bestaande uit één brandruimte waarin een brandhaard van houten pallets werd geplaatst. De ruimte was opgebouwd uit geïsoleerde staalplaat. Het maximale brandvermogen (de heat release rate) was ongeveer 1,6 MW. Er werden vijf verschillende straalpijptechnieken toegepast vanuit de deuropening: pencilling, een gebonden straal, een continue nevelstraal met een grote kegelhoek (wide fog) en met een smalle kegelhoek (narrow fog) en een pulstechniek met een wijde kegelhoek (wide angle fog burst). Het debiet was voor alle technieken ongeveer 160 liter per minuut. De brand werd daarbij niet direct geblust. Temperaturen, warmte-straling, gasconcentraties en stromingssnelheden werden gemeten op verschillende hoogtes en voor de deur ter hoogte van de deuropening.

Ook in dit artikel is er enige verwarring over het doel van het onderzoek en van de toepassing van de technieken, omdat het gaat om één brandruimte, waarbij de brandhaard direct kan worden bereikt, en deze technieken kunnen worden gezien als een directe aanval en niet zo zeer als een indirecte aanval of een rookgaskoelingstechniek. In die zin ligt het onderzoek buiten de scope van deze literatuurscan, maar omdat het een van de weinige experimentele studies is die op dit gebied is gedaan, wordt het hier toch genoemd. De resultaten van het onderzoek geven aan dat met de pencilling techniek de ruimte niet zo effectief kon worden gekoeld als met de continue gebonden straal, en dat geen van beide technieken leidde tot een significante impact op het niveau van de straalpijpvoerder. De sproeistraal met kleine hoek leidde evenwel tot een daling van de hete rooklaag en een toename van de temperatuur in de koude (onder)laag.

Deze, volgens de auteurs voorlopige, studie suggereert dat de continue gebonden hogedrukstraal en de lage-druk-sproeistraal met wijde kegelhoek de meest effectieve manieren zijn om de ruimte te koelen. Als de impact op de straalpijpvoerder wordt meegewogen, is de continue gebonden straal de beste keuze voor een aanval op een grote brand in een kleine ruimte, bij een met een optimale straalpijpdruk van 700 kPa en gericht op de bovenkant van de achterkant van de ruimte. De auteurs geven dat dit slechts een eerste onderzoek is en dat een grondiger onderzoek nodig is. Er wordt evenwel geen vervolg op dit onderzoek in de literatuur aangetroffen.

2.3 Reviews

2.3.1 Review in Zevotek et al. (2017)

Het meest recente onderzoek is gedaan door Underwriters Laboratories in 2016 (Zevotek et al. 2017). In de inleiding van het onderzoek wordt heel beknopt een overzicht van de beschikbare literatuur gegeven. Dit review was het startpunt van onderhavige literatuurscan. De in deze review behandelde studies zijn in paragraaf 2.2 uitgebreid beschreven.

2.3.2 Review of 3D water fog techniques for firefighting (Liu et al., 2002)

Deze review geeft een uitgebreide beschrijving van de beschikbare literatuur over 3D-technieken. Veel aandacht gaat uit naar het onderzoek van de Naval Research Institute of Canada (Scheffey et al., 1997). De conclusie is, dat de 3D-fog-technieken (pulstechnieken met de sproeistraal gericht op de rooklaag) niet bedoeld zijn om een directe aanval uit te voeren, maar vooral om een veilige benadering van de brandhaard mogelijk te maken (door rookgassen te koelen). Ze zijn aanvullend aan de direct attack als de vuurhaard niet direct bereikt kan worden. In deze review worden ook de zorgen van de tegenstanders van de 3D-fog vermeld, die te maken hebben met a) de effectiviteit ten opzichte van de gebonden straal (straight stream), b) mogelijke verstoring van de thermische balans in de rooklaag, c) productie van grote hoeveelheden stoom die de brandweermensen verbranden, en d) de gecompliceerdheid van de techniek, die veel training vereist. Volgens de tegenstanders van de 3D-fog blijft het probleem, dat er weinig wetenschappelijk bewijs is.

2.4 Beschouwende artikelen

Er zijn veel beschouwende en opiniërende artikelen gevonden, die deels verwijzen naar eerder onderzoek of reviews, en gebaseerd zijn op eigen ervaringen of meningen. Ook is er een artikel dat de geschiedenis van de verschillende straalpijptechnieken beschrijft (Kaloz, 2013). Er wordt vaak ingegaan op de opvattingen die er bestaan over en de voor- en nadelen van de verschillende technieken. Een voorbeeld is de vraag waarom het gebruik van fog nozzles uit de gratie is geraakt, terwijl voor velen toch duidelijk is dat kleine druppeltjes efficiënter zijn in brandbestrijding (Whitley, 2011; Hartin 2013). Voorstanders van smoothbore daarentegen, claimen onder andere dat deze gebonden stralen een grotere reikwijdte hebben en dat de straal tegen het plafond in druppeltjes breekt.

2.5 Boeken over brandbestrijding

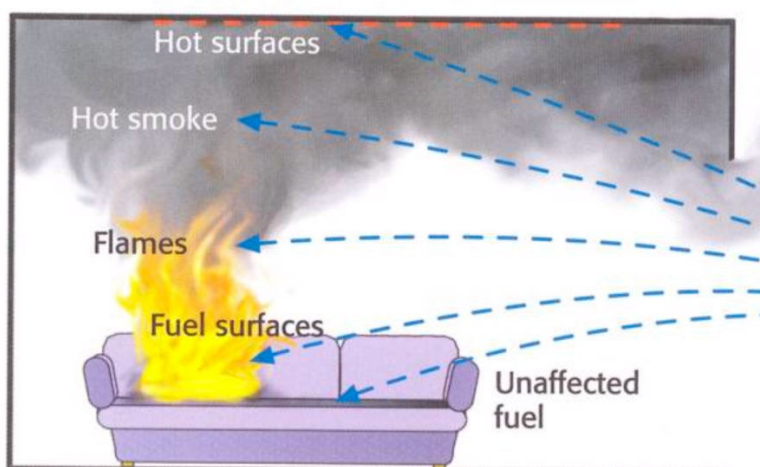
Behalve de veelal beschouwelijke en opiniërende artikelen in verschillende (semi)wetenschappelijke tijdschriften zijn er ook boeken van diverse auteurs verschenen waarin wordt gesproken over de verschillende straalpijptechnieken (en er verschijnen nog steeds boeken waarin hetzelfde nog eens anders wordt opgeschreven). Ook in deze boeken wordt het gestelde veelal op opinie en ervaring gebaseerd en wordt verwezen naar de oorspronkelijke artikelen of naar andere opiniërende artikelen. In principe wordt in deze boeken geen nieuwe kennis beschreven die we al niet eerder hebben gezien. Maar soms wordt een en ander wel heel handig op een rijtje gezet.

2.5.1 Water and other extinguishing agents (Särqvist)

Stefan Särqvist is een Zweedse instructeur en onderzoeker die een aantal artikelen heeft gepubliceerd over het gebruik van water, het benodigde debiet en andere blusmiddelen. Hij heeft ook een boek geschreven over het gebruik van water als blusmiddel (Särqvist, 2002; Särqvist, 2001). In dit boek beschrijft hij vijf verschillende manieren waarop water kan worden gebruikt om een brand aan te vallen:

1. Koelen van het brandende oppervlak, waardoor de pyrolyse stopt.
2. Koelen van nog niet brandend materiaal.
3. Koelen van de vlammen, waardoor ze doven.

4. Koelen van de rookgassen in de ruimte.
5. Het produceren van stoom en daarmee inertiseren³ of verstikken van de ruimte door water te laten verdampen op de hete oppervlakken van de ruimte.



Figuur 2.1 Vijf methoden om een brand aan te vallen met water (bron: Särqvist, 2001)

Deze methoden hebben verschillende doelen. Het gaat hier om het blussen van de brand en niet om technieken om rookgassen te koelen onderweg naar de brand.

2.5.2 Eurofirefighter 2 (Grimwood)

Paul Grimwood is een internationaal gezaghebbende brandweerman met een grote praktijkervaring en tevens een wetenschappelijke achtergrond. Hij verbindt twee werelden met elkaar, omdat hij zowel brandweerman is in Londen en andere korpsen in het Verenigd Koninkrijk, maar ook in New York en andere korpsen in de Verenigde Staten. Hij heeft zelf ervaring opgedaan met verschillende brandblusmethoden en rookgaskoelingstechnieken. Ook heeft hij een promotieonderzoek uitgevoerd, waarbij hij heeft gekeken naar vele honderden branden en naar het benodigde koelend vermogen (debiet).

Grimwood heeft, naast diverse artikelen en notities (bijvoorbeeld Grimwood, 2002; Grimwood, 1992), ook twee boeken geschreven, *Eurofirefighter* en *Eurofirefighter 2*. Hij wijdt in dit laatste boek een hoofdstuk aan het onderwerp straalpijptechnieken en met name aan de Amerikaanse 'straight stream' methode en de noordwest Europese pulstechnieken om rookgassen te koelen. Hij beschrijft daar zijn discussie met Andy Fredericks, de auteur van *Little drops of water* (Fredericks, 2000) over het gebruik van de gebonden straal (straight stream) en de 3D-rookgaskoelingstechniek. Het hoofdstuk over Compartment Fire Behaviour begint met een uitspraak van Grimwood zelf (p. 191):

The Swedish fire service taught us a great deal about fire behavior. However, when it comes to fast developing building fires – and I've used both options – if I had to choose between low-flow spray patterns with finely divided water droplets or high-flow solid streams, I'd go with the solid stream every time.

Dit citaat suggereert dat Grimwood een gebonden straal prefereert boven de 3D-technieken. Het laat echter in het midden op welke omstandigheden hij de voorkeur geeft aan de gebonden straal. Gaat dit over rookgaskoeling of over blussing? Deze vraag heeft Paul

³ Uit onderzoek van de Brandweeracademie (Brandweeracademie, 2020) blijkt dat inertiseren niet erg waarschijnlijk is.

Grimwood beantwoordt in zijn review van dit voorliggende rapport. Zijn antwoord luidt: “It is about both extinguishing and smoke cooling. An adequate flow rate at the nozzle is more important than application technique, where fires suddenly increase their intensity due to wind or pressure impacts or unknown conditions as hidden fire” (Grimwood, 2022).

In de na zijn citaat in het boek volgende discussie corrigeert hij Fredericks, die de 3D-fog-technieken, en daarmee een artikel van Grimwood, ter discussie stelt. Het is echter niet goed duidelijk wat nu precies het bezwaar van Fredericks is, behalve dat hij vindt dat technieken voor brandweermensen zo eenvoudig mogelijk moeten zijn en dat de 3D-technieken dat zeker niet zijn. Dat laatste is Grimwood overigens met hem eens; in verschillende documenten bevestigt hij ook, dat het op de juiste wijze toepassen van de 3D-technieken veel training en oefening vraagt. Uiteindelijk wordt er in het boek geen eenduidig antwoord worden gegeven op de vraag of het een dan wel het ander nu beter is. Grimwood geeft aan dat mede vanwege het benodigde koelend vermogen voor blussing een groot volume gebonden straal beter is (directe blussing), maar dat de 3D-technieken goed werken op weg naar een brandhaard om de rookgassen te koelen en te voorkomen dat ze ontbranden. Fredericks en Grimwood zijn het erover eens dat een veilige, snelle en effectieve brandbestrijding het belangrijkste doel moet zijn en dat daarvoor twee dingen belangrijk zijn: een voldoende debiet (adequate flow rate) en eenvoud bij het oefenen en trainen van brandweermensen (Grimwood, 2022).

In de periode 1984-1994 heeft Grimwood met de Londense brandweer de 3D-koelingstechniek toegepast bij 549 echte branden. Hoewel dit een praktijkgericht veldonderzoek betreft, is het wel relevant. Grimwood (2017) concludeerde dat:

- > de rookgaskoelingstechniek vooral goed lijkt te werken in kleine tot middelgrote ruimten en in trappenhuisen
- > deze methode alleen gebruikt moet worden met (minimaal) 120 liter per minuut hoge druk en 19 mm leidingen
- > de ventilatie moet worden beperkt tijdens de inzet
- > de ruimte direct nadat de brand onder controle is gebracht moet worden geventileerd
- > de rookgaskoelingstechniek het beste werkt in een stilstaande rooklaag
- > deze methode niet moet worden toegepast in een vlamfront tegen het plafond of in een snel bewegende rooklaag
- > een directe aanval met gebonden straal te prefereren is bij het blussen van de brandhaard.

Grimwood concludeert dat beide methoden complementair zijn. Hij schrijft in *Eurofirefighter 2* niets specifiek over het koelen van rookgassen met een gebonden straal of de mogelijke risico's daarvan. In een persoonlijke correspondentie legt hij echter uit:

I have always approved the use of straight streams to cool gases, but I have mentioned the effectiveness is reduced when compared to fine droplet streams. In relation to steam / water vapour water vapour is impacted by walls and ceilings in training and real fire environments and how the differences may not be understood by firefighters and their instructors.

2.5.3 Fire Dynamics Curriculum Portal (2018)

In module 205 van FIRE (Fire Dynamics Curriculum Portal, 2018) worden methodes beschreven om brand te blussen, rookgassen te koelen en te vorderen naar een brandhaard

indien deze niet direct met water kan worden bereikt. De module bestaat uit een document en een presentatie die beide van de website van FIRE te downloaden zijn. Er is een fundamenteel verschil met betrekking tot blustechnieken tussen de tekst en de presentatie. In de presentatie wordt een methode voor 'interior advancement' beschreven (de 'surface cooling' methode), die in het document niet terug te vinden is. Dat is belangrijk, omdat de term 'surface cooling' hier anders wordt gebruikt dan normaal. In het algemeen wordt de term namelijk gebruikt zoals door Särqvist (2002), die ermee doelt op een blusmethode, terwijl hij in de presentatie van FIRE wordt gebruikt als een methode om naar de brandhaard te vorderen wanneer deze niet direct kan worden geraakt. De gebonden straal wordt daarbij gericht op het plafond. De waterdruppels komen vervolgens vanaf het plafond wel op het brandend oppervlak terecht.

Navraag bij de auteur van de boeken (McBride, 2021) leert dat de tekst nog wordt herzien aan de hand van de NFPA1700. Ook geeft hij aan dat de toe te passen techniek afhangt van het 'ventilation profile'. Het is volgens hem van groot belang of er een uitstroomopening is. Hij is van mening dat alle brandweermensen alle technieken moeten kennen, zodat ze deze in de juiste situatie kunnen toepassen. Er is niet één techniek die altijd werkt. De definities die in dit document worden gebruikt, zijn later grotendeels overgenomen in NFPA1700 (NFPA1700, 2021) en zijn in de paragraaf over definities besproken. In NFPA1700 is echter de surface cooling methode niet meer terug te vinden. Het bovenstaande illustreert hoe gemakkelijk verschillende termen tot discussie en spraakverwarring kunnen leiden.

2.5.4 Brandverloop (Lambert & Baaij)

In dit boek worden diverse straalpijptechnieken behandeld. Interessant is de koppeling van de verschillende technieken aan de fase waarin de brand verkeert. De 3D-rookgaskoeling wordt vooral toegepast bij een brand in de ontwikkelfase (er zijn dan vaak geen uitstroomopeningen en de brand kan wel zover ontwikkeld zijn dat hij het punt is aangekomen waarbij hij overgaat van brandstofgecontroleerd naar ventilatiegecontroleerd (het FC/VC-punt⁴)). Op dat moment kan de brand al aardig heet zijn. Bij een volontwikkelde brand is elke methode toepasbaar, dus ook de gebonden straal en boog.

De directe methode met een gebonden straal kan men toepassen voor a) een buiteninzet, b) nablussen of c) een binneninzet bij een volontwikkelde (uitslaande) brand. Deze straal zal volgens de auteurs altijd zorgen voor beperking van het zicht en kan brandweermensen in het nauw brengen doordat veel stoom wordt gevormd, die een overdruk creëert en wil ontsnappen via de plaats waar de brandweermensen zich bevinden, tenzij er een andere uitstroomopening is. Het is niet duidelijk waar deze kennis op is gebaseerd.

Over punt c) kan nog het volgende worden opgemerkt: als de brand uitslaand is en er geen transitional attack (offensieve buiteninzet gevolgd door een offensieve binneninzet) mogelijk is, omdat de gevel niet bereikbaar is, dan is een binnenaanval de enige mogelijkheid. Maar het kan te heet zijn om de voordeur (van een appartement) te bereiken en misschien komen er zelfs vlammen uit. Dan is het niet mogelijk om verder op te rukken en een massieve aanval uit te voeren om de brand neer te slaan. Wat mogelijk wel kan, is tot op 3 meter van de deuropening naderen, en dan met een volle straal tegen het plafond van de brandende kamer spuiten. Het water zal afketsen op het plafond en op de grond terechtkomen. Een

⁴ Het punt waar de brandontwikkeling overgaat van brandstofgecontroleerd (fuel controlled, FC) naar ventilatiegecontroleerd (VC).

deel van het water valt op de brandende brandstof, die zal afkoelen waardoor de intensiteit van de brand zal dalen. Daarna kan weer worden opgerukt.

2.6 Over stoom

Verschillende auteurs schrijven over de vorming van stoom tijdens het blussen of tijdens het koelen van de rookgassen (Fredericks, 2000; Grimwood, 2017, Zevotek et al, 2017). In het algemeen lijkt men het erover eens dat er veel stoom wordt gevormd bij het toepassen van de originele indirecte aanval waarbij met nevelstralen tegen hete oppervlakken wordt gespoten om de brand als het ware te verstikken met stoom. Deze methode was oorspronkelijk echter niet bedoeld om toe te passen *in* de brandruimte, maar zou van buiten de brandruimte of zelfs van buiten het gebouw toegepast moeten worden.

Een belangrijk element bij stoomvorming is de vraag of de rooklaag uitzet of juist krimpt. Hier zijn verschillende meningen over. In sommige artikelen wordt gesproken over het verstoren van de thermische balans, waarmee wordt bedoeld op het dalen van de rooklaag door uitzetting als er met een gebonden straal wordt gespoten. Dat gebeurt dan vooral door voorstanders van de 3D-methode. Grimwood (Grimwood, 2017) geeft aan dat bij het toepassen van de 3D-techniek een uitzetting van het water tijdens stoomvorming optreedt, maar dat die wordt gecompenseerd door contractie van de rooklaag. Hiervoor is echter geen experimenteel bewijs te vinden. In tegendeel. Het onderzoek van Underwriters Laboratories (Fire Safety Research Institute) (Zevotek et al, 2017) wijst uit dat er zelfs met gebruik van gebonden stralen tegen wanden en plafonds contractie plaatsvindt. Er is geen excessieve stoom waargenomen.

2.7 Over het debiet (flow rate)

In de literatuur zien we dat, naast de straalpijptechnieken, ook het debiet van groot belang is om effectief rook te koelen. Een belangrijk deel van het onderzoek van Paul Grimwood was zijn studie naar het tactische en optimale debiet voor brandbestrijding. Gebaseerd op honderden echte branden berekende hij optimale en tactische debieten (Grimwood, 2020).

There is a very well-established evidence base that supports these optimum or tactical flow rates, below which unwarranted firefighter exposure to thermal conditions is increased. In terms of solid bore or 'arc' methods the application (low) rate is highly important. In scientific or practical terms the data demonstrates fire growth and flow-rate needs a certain cooling capacity (about 24 litre per minute per MW)⁵ (Grimwood, 2022).

⁵ In Nederland hanteren we in de basisprincipes van brandbestrijding een wat conservatiever debiet van 45 liter per minuut per MW. Er is een relatie met de effectiviteit van de straalpijvoering en met het stadium van brandontwikkeling.

2.8 De rol van uitstroomopeningen

2.8.1 Uitstroomopeningen en flow path

In verschillende documenten wordt iets gezegd over de vraag of een uitstroomopening wel of niet nodig is. Onder een 'flow path' wordt de route verstaan die rook, lucht, hitte of vlammen volgen naar of vanaf een opening, bijvoorbeeld een raam, deur of lekkagepunten, ten gevolge van verschillen in druk (NFPA1700, 2020).

Bij het toepassen van de nevelstraal (fog stream) zoals Layman dat gedaan heeft in zijn experimenten, was er een uitstroomopening aanwezig bovenin het schip (Taylor & Whitley, 2011). Vermoedelijk heeft dit een rol gespeeld in de uitkomst van de experimenten: er was een flow path aanwezig waardoor overtollige energie kon ontsnappen. Taylor en Whitley betogen dat wanneer de instroom- en de uitstroomopening hetzelfde zijn, er in de ruimte een 'plug' van hete rook kan ontstaan die alleen via de dezelfde opening weg kan. Opvallend is overigens dat er in geen enkel artikel over de toepassing van de indirecte methode met nevelstralen of sproei-stralen wordt gesproken over de hoeveelheid lucht die met sproei-stralen wordt meegevoerd, terwijl die blijkens onderzoek van Underwriters Laboratories substantieel is, en grote invloed kan hebben op de brandontwikkeling en de brandbestrijding, zeker bij afwezigheid van uitstroomopeningen (Weinschenk et al, 2017).

Tijdens experimenten uitgevoerd door Underwriters Laboratories (Zevotek et al., 2017) zijn tijdens het toepassen van de gebonden straalsoort tegen wand en plafond zonder uitstroomopening geen negatieve effecten en stoomvorming waargenomen. In een email-wisseling met Zevotek geeft hij aan dat, ook als er geen uitstroomopening is, de hete gassen en de stoom met een gebonden straal die continu is geopend voortgeduwd kunnen worden. Hij geeft aan dat zijn ervaring is dat de hitte die wordt gevoeld tijdens het voortgaan (door stoom) slechts kort duurt en dat als de straalsoort wordt gesloten, de hete rook terugkomt. Bij de experimenten door Underwriters Laboratories is steeds de ingang deur opengehouden, terwijl de ploeg voortging in de hal met de gebonden straal. Volgens Zevotek is het open houden van de deur altijd nodig om de stoom te laten uitstromen. Het leek hem vreemd om tijdens het blussen de deur gesloten te houden, zeker als er geen (andere) uitstroomopening is.

2.8.2 Deurcontrole

In een ander rapport van Underwriters Laboratories, geschreven door Kerber, komen het nut en de noodzaak van deurcontrole tijdens de binneninzet aan bod (Kerber, 2013). Hoewel het uiteraard nodig is om de deur te openen om naar binnen te kunnen gaan, is het raadzaam om de hoeveelheid lucht die op dat moment naar binnen komt zo veel mogelijk te beperken, om zo de kans voor het vuur om te groeien gering te houden; de deur moet dus zoveel mogelijk gesloten blijven. De experimenten in het onderzoek naar horizontale ventilatie (Kerber, 2010) hebben aangetoond dat het openen van de voordeur moet worden gezien als ventileren.

In het interview met Axelsson zegt Rosander niets over het openen van de deur op het moment dat er wordt geblust. Wel noemt hij een aantal zaken die te maken hebben met de derde man bij de deur. Deze moet niet alleen de rook bekijken en beoordelen of deze kan gaan ontbranden, maar hij moet ook redden als er iets fout gaat, waarschuwen voor gevaar en de deur dichthouden (Axelsson, 2016).

3 Beschouwing

In dit hoofdstuk worden eerst de onderzoeksvragen beantwoord. Daarna wordt beschreven wat dit literatuuronderzoek betekent voor de praktijk en voor de uitkomsten van het onderzoek naar rookgaskoeling (Brandweeracademie, 2021).

3.1 Antwoorden op hoofd- en deelvragen

De hoofdvraag van deze literatuurscan luidde:

Wat kan er in de internationale literatuur gevonden worden over de toepassingsgebieden van verschillende straalpijptechnieken en de risico's die aan die verschillende technieken zijn verbonden, in het bijzonder met als doel om rookgassen te koelen in kleine ruimtes bij het uitvoeren van een offensieve binneninzet.

De deelvragen waren:

1. Welke straalpijptechnieken bestaan er en welk doel hebben deze?
2. Welke experimentele studies zijn er verricht naar het effect van deze technieken?
3. Wat zijn de voor- en nadelen van de technieken wanneer zij worden toegepast om rookgassen te koelen en welke risico's worden in de literatuur genoemd?

3.1.1 Welke straalpijptechnieken bestaan er en welk doel hebben deze?

Er zijn verschillende straalpijptechnieken. De variabelen die kunnen worden onderscheiden zijn:

- > De manier waarop de straal uit de straalpijp komt (gebonden, sproeiend, of als een nevel (hele fijne druppels)). Dit hangt samen de kegelhoek.
- > De hoek waaronder de straalpijp wordt gericht.
- > De duur van de opening (pulsen, of een continue straal).

Deze technieken worden toegepast om de brandhaard te blussen of om veilig naar de brandhaard te kunnen vorderen. Voor het blussen van de brandhaard worden vijf mechanismen onderscheiden. De straalpijptechnieken die hiervoor worden gebruikt, zijn de directe en de indirecte methode. Bij de directe methode wordt water direct op of bij de brandhaard gebracht, veelal met een gebonden straal. De indirecte methode maakt gebruik van het mechanisme van verstikking door zo veel mogelijk stoom in de ruimte te vormen. Dat gebeurt van buiten de ruimte door een nevelstraal in de ruimte te richten of een gebonden straal tegen de hete oppervlakken. Met de gebonden straal is het ook mogelijk om de straal te laten breken tegen plafond en muren om de druppels op of bij de brandhaard te laten landen (dus direct te blussen) en tegelijkertijd ook stoom te vormen voor verstikking en om het pyrolyseren van materialen van wanden en plafond te beperken.

Voor het vorderen naar de brandhaard is het van belang de rookgassen te koelen. Daarvoor zijn er twee mogelijkheden, namelijk een 3D-methode waarbij een sproeistraal wordt toegepast en een gebonden straal. Ook is er een methode waarbij de straal wordt bewogen

in een O-,T-,Z- of n-vorm. Daarbij wordt gebruikgemaakt van een combinatie van koelen van de wanden en het plafond alsook van stoomvorming en druppelvorming.

3.1.2 Welke experimentele studies zijn er verricht naar het effect van deze technieken?

Het blijkt dat er slechts enkele praktijkonderzoeken zijn gedaan naar rookgaskoeling met verschillende straalpijptechnieken. Die onderzoeken zijn uitgevoerd in stalen schepen. Volgend op die praktijkonderzoeken is er wel veel gepubliceerd in de vorm van reviews of boeken gebaseerd op meningen en ervaringen, maar niet gebaseerd op experimenteel onderzoek (feiten). De gepubliceerde onderzoeken zijn in dit document beschreven.

3.1.3 Wat zijn de voor- en nadelen van de technieken wanneer zij worden toegepast om rookgassen te koelen en welke risico's worden in de literatuur genoemd?

Op basis van de bestudeerde literatuur is het niet eenvoudig om hierover een uitspraak te doen. Er is eigenlijk geen studie bekend waarin de verschillende methoden specifiek voor rookgaskoeling met elkaar zijn vergeleken. Het lijkt erop dat voor rookgaskoeling in kleine ruimten een 3D-koelingstechniek goed werkt. Daar staat tegenover dat verschillende auteurs het erover eens zijn dat de 3D-techniek, waarbij brandweermensen in een met dikke rook gevulde ruimte pulsen moeten geven zonder de wanden te raken, in de praktijk moeilijk uitvoerbaar is en veel oefening, training en ervaring vraagt.

Hoewel er in de literatuur vaak verschillende situaties met elkaar zijn vergeleken, bijvoorbeeld een directe blussing met een gebonden straal met een rookgaskoelingmethode zoals de 3D-methode, is er geen nadeel gevonden van de toepassing van gebonden stralen bij het vorderen naar een brand. Dit geldt zowel voor de methode waarbij een gebonden straal in een boog wordt toegepast met als doel de straal te laten breken in druppels, als voor de methode waarbij de wanden en de plafonds worden gekoeld. Een nadeel waar vaak naar verwezen wordt, zou de stoomvorming kunnen zijn, maar het bewijs daarvoor is onduidelijk en niet eenduidig. In elk geval lijkt de methode met gebonden straal eenvoudiger uitvoerbaar, en is er direct voldoende koelend vermogen beschikbaar voor een directe blussing. De zogenaamde Layman-methode, de indirecte aanval in zijn oorspronkelijke vorm (met nevelstraal en klein debiet), wordt wel gezien als gevaarlijk wanneer grote hoeveelheden stoom in de brandruimte worden gevormd – maar dat was ook niet de bedoeling van deze techniek.

3.1.4 De hoofdvraag

Wat kan er in de internationale literatuur gevonden worden over de toepassingsgebieden van verschillende straalpijptechnieken en de risico's die aan die verschillende technieken zijn verbonden, in het bijzonder met als doel om rookgassen te koelen in kleine ruimtes bij het uitvoeren van een offensieve binneninzet.

In de literatuur is vrij weinig experimenteel onderzoek te vinden naar de toepassing van verschillende technieken om rookgassen te koelen. In de discussies maar ook in de experimenten lopen verschillende technieken en omstandigheden door elkaar heen, zodat er geen harde conclusie kan worden getrokken.

Stoomvorming lijkt het grootste risico te zijn, hoewel niet helder is hoe groot dat probleem nu daadwerkelijk is, omdat er geen praktijkonderzoek naar is gedaan. Als definitie voor stoom

moet overigens voor de duidelijkheid een onderscheid gemaakt worden tussen natte en droge stoom. Met droge stoom doelen we op stoom in de (onzichtbare) gasvorm. De stoom die het zicht belemmert en dus ondoorzichtig is, is natte stoom. Natte stoom bestaat uit gas en (gecondenseerde) waterdruppeltjes. Gesteld dat er bij het raken van hete oppervlakken met veel water veel stoom wordt gevormd, dan is het 't veiligst om ook voor een uitstroom te zorgen en om uit de uitstroom te blijven. Maar de hoeveelheid waarin stoom zorgt voor overdruk en uitstroom is niet helder. Ook de mate waarin krimp of juist uitzetting van de rookgaslaag plaatsvindt, is niet duidelijk. Er is wel enig bewijs dat stoomvorming afhankelijk is van het debiet en de omstandigheden (in stalen containers kan het gedrag anders zijn dan in de praktijk). Het toepassen van optimale debieten lijkt belangrijker te zijn dan de straalpijptechniek.

3.2 Het geheel overziend

Deze literatuurscan is uitgevoerd omdat er op basis van de experimenten die de Brandweeracademie heeft uitgevoerd naar rookgaskoelingstechnieken (Brandweeracademie, 2021) aanleiding was om op zoek te gaan naar feiten over de mogelijke risico's van de boogmethode zoals die is toegepast in dat onderzoek. Uit het onderzoek was namelijk gebleken dat de boogmethode een effectieve en eenvoudig uit te voeren manier is om rookgassen te koelen tijdens het vorderen naar een brand. Uit de voorliggende literatuurscan blijkt dat er geen eenduidige conclusie te trekken valt over wat de beste en veiligste methode is om rookgassen te koelen. Het debiet is waarschijnlijk belangrijker dan de straalpijptechniek.

Helder is wel, dat de 3D-methode algemeen als ingewikkeld en in de praktijk moeilijk toepasbaar wordt beschouwd, en dat er veel oefening en training voor nodig zijn om ze toe te passen. Ook is het in de praktijk lastig om de wanden niet te raken, omdat het zicht meestal beperkt is. Dat geldt dus zelfs voor ervaren brandweermensen. Er is geen literatuur die eenduidig en beargumenteerd aangeeft of, en zo ja welk risico bestaat van het toepassen van een gebonden straal. Verschillende zaken zijn van invloed op de (nadelige) effecten van de verschillende straalpijptechnieken, maar omdat deze zaken in de literatuur niet altijd op dezelfde manier worden gedefinieerd of beschreven, worden vaak appels met peren vergeleken. De zaken die een rol spelen, zijn de volgende:

1. Gebonden straal of sproeistraal; luchtverplaatsing
2. Puls(lengte) of continu open
3. Afvoer van energie
4. Debiet (koelend vermogen)
5. Wijze van voortbewegen
6. Uitvoerbaarheid
7. Gebouweigenschappen van de (brand)ruimte (opwarmen, energiebuffer).

Het geheel overziend, is er geen reden gevonden waarom het toepassen van een gebonden straal in de boogmethode een risico voor brandweermensen zou opleveren wanneer deze wordt gebruikt bij het vorderen in kleine ruimte met als doel om rookgassen te koelen en zo een rookgasontbranding te voorkomen. Als de stoom een probleem zou vormen, kan het risico van stoom worden verkleind door laag te blijven en bij de deurcontrole de deur te openen wanneer de straalpijp geopend wordt, zodat de stoom kan ontsnappen. Zo is de boogmethode uitgevoerd in de experimenten van Underwriters Laboratories. Ook bij

afwezigheid van een uitstroom achter de brandhaard heeft deze werkwijze niet tot excessieve stoomvorming geleid bij de straalpijvoerder.

Het lijkt erop dat de verschillen tussen de verschillende technieken steeds kleiner worden, en min of meer in elkaars verlengde liggen (kegelhoek en reikwijdte). Lange pulsen met een kegelhoek van 30 graden raken ook vrij gemakkelijk wanden en plafonds, en zorgen dus naast de directe koeling van de rook door druppels ook voor verstoming aan hete oppervlakken. Van lange pulsen naar boogmethode met gebonden straal is daarom een kleine stap, en het is dus de vraag waarom bij de ene methode wel en bij de andere geen gevaarlijke hoeveelheid stoom wordt gevormd.

Een ander opvallende waarneming is dat in de literatuur niet expliciet wordt gesproken over een methode waarbij bij een binnenaanval met gebonden straal tegen de oppervlakken gespoten wordt met als doel het koelen van de rooklaag door de gebonden straal te laten opbreken in druppels die naar beneden vallen. Daarom heeft die methode (nog) geen naam. Het is geen oppervlaktekoeling en het is geen indirecte methode, en het is binnen en daarom ook geen transitional attack (waarbij men wel een sprinklereffect beoogt), maar lijkt wel erg op de flow and move techniek zoals toegepast in de Verenigde Staten.

In feite is het een combinatie van meerdere dingen, die een blussend en een koelend effect hebben op zowel de wanden en plafonds als de rook. Water wordt tegen het plafond gespoten waardoor de straal in druppels breekt. De druppels in vloeibare vorm nemen energie op door verdamping (een faseovergang kost energie) en het opwarmen van de waterdruppels. Door het spuiten van water tegen de oppervlakken van de ruimte worden constructiedelen gekoeld. Hierdoor zijn de koude(re) constructiedelen in staat om (opnieuw) energie uit de rooklaag op te nemen, waardoor de energie in de rooklaag afneemt. De effectiviteit van dit mechanisme wordt bepaald door de gebruikte materialen. Bijvoorbeeld: baksteen en beton kunnen veel energie bufferen (zijn 'thermisch dik') voordat ze warmte afgeven, terwijl een enkele stalen wand weinig energie kan opnemen, voordat hij energie afgeeft aan de 'koude' kant (staal is 'thermisch dun'). De stoom die wordt gevormd door het koelen van constructiedelen en de hete gassen is in staat nog meer energie op te nemen, doordat de stoom verder wordt opgewarmd tot de temperatuur van de rooklaag. Als de druppels door de hoek waaronder ze van de wanden en plafonds afketsen de brandhaard en de omgeving daarvan raken, is er ook nog sprake van een blussend effect. Doordat er met een gebonden straal wordt gewerkt die in de ruimte opbreekt, is de hoeveelheid lucht die wordt meegevoerd naar de brandhaard minimaal. In een gesloten ruimte kan de stoom wel leiden tot verstikking.

Alles bij elkaar genomen is er geen aanleiding gevonden waarom de boogmethode een risico voor brandweermensen zou opleveren.

Literatuur

Axelsson, L. (2016). *Interview with Mats Rosander*
<https://www.youtube.com/watch?v=JM6zjDSHDWo>.

Baldwin (1970). *The use of water in the extinction of fires by brigades*. Ministry of Technology and Fire Offices' Committee Joint Fire Research Organization FR Note No. 803.

Brandweeracademie (2021). *Als water in rook opgaat. Een experimenteel onderzoek naar de 3D pulsmethode en de boogmethode om rookgassen te koelen*. IFV.

Brandweeracademie (2020). *Voorkomen van rookgasontbrandingen*. IFV.

Cool, T. (2005). Interior indirect and combination attacks: A misunderstanding? *Fire Engineering*, 158(2).

[Fire Dynamics Curriculum Portal](#), *From Knowledge to Practice (FKTP)*. Structural Firefighting FC205.

Fredericks, A.A. (2000). Little drops of water: 50 years later, part 1. *Fire engineering*, 153(2), 63-64.

Fredericks, A.A. (2000). Little drops of water: 50 years later, part 2. *Fire engineering*, 153(3), 113-114.

Grimwood, P. & Desmet, K. (2003). *Tactical Firefighting A comprehensive guide*. Scandinavian research CEMAC Belgium.

Grimwood, P. (1992). *Fog Attack*. DMG Business Media.

Grimwood, P. (2002). *Flashover and Nozzle Techniques*. CEMAC.

Grimwood, P. (2017). *Eurofirefighter 2*. D&M Heritage Press.

Grimwood, P. (2020). *Adequate Firefighting water*. Kent Fire and Rescue Service BSPD 7974:5-2020. Glasgow Caledonian University.

Grimwood, P. (2022). Persoonlijk contact betreffende de review van deze literatuurstudie.

Grimwood, P., & Sanderson, I. (2015). A performance based approach to defining and calculating adequate firefighting water using s.8.5 of the design guide BS PD 7974:5:2014 (fire service intervention). *Fire Safety Journal*, 78, 155-167.

Kaloz, (2013). The History of the Fog Nozzle & Indirect Fire Attack. [Firefighter Nation](#).

Kerber, S., (2010). *Impact of Horizontal Ventilation on Fire Behavior in Legacy and Contemporary Residential Construction*. Underwriters Laboratories.

Kerber, S. (2013). *Study of the effectiveness of fire service vertical ventilation and suppression tactics in single family homes*. Underwriters Laboratories.

Knapp, J., Pillsworth, T, & Flatley, C. (2003). Nozzle tests prove fireground realities, Part 2. *Fire Engineering*, 9, 71-76.

- Knapp, J., Pillsworth, T., & White, S.P. (2003). Nozzle tests prove fireground realities. *Fire Engineering*, 2, 71-80.
- Lambert, K. & Baaij, S. (2011). *Brandverloop Technisch bekeken, tactisch toegepast*. SDU-uitgevers.
- Layman, L. (1952). *Attacking and Extinguishing Interior Fires*, National Fire Protection Association.
- Liu, Z. , Kashef, A., Loughheed, G.D., Bénichou, N. (2002). Review of three dimensional water fog techniques for firefighting, *IRC-RR-124*, National Research Council Canada.
- Maaht Tuomisaari (1995). *Suppression of compartment fires with a small amount of water*. VTT Finland.
- McBride (2021). Telefonisch contact.
- National Fire Prevention Agency (2021). *NFPA 1700 Guide for structural firefighting*.
- Obach, M. Weckman, E. and Strong, A. (2011). Effects of Different Suppression Tactics on the Firefighter and Compartment Environment. *Fire safety science – Proceedings of the tenth international symposium* (pp. 321-334). International Association for Fire Safety Science.
- Royer, K. & Nelson, F.W. (1952). *Water for firefighting - rate of flow formula. Technical report* Iowa state university bulletin nr 18.
- Särgvist, S. & Holmstedt, G. (2001). Water for manual fire suppression. *Journal of Fire Protection Engineering*, 11, 4.
- Särgvist, S. (2002). *Water and other extinguishing agents*, Swedish Rescue Services Agency.
- Scheffey, J.P., Siegmann, C.W., Toomey, T.A. (1997). *1994 Attack Team Workshop, Phase II- Full-Scale- Offensive Fog Attack tests*. Naval research Laboratory.
- Taylor, J. & Whitley, W. (2011). The plug. *Fire Rescue Magazine*, 72-79.
- Weinschenk, C., Stakes, K., & Zevotek, R. (2017). *Impact of Fire Attack Utilizing Interior and exterior Streams on Firefighter Safety and Occupant Survival: Air Entrainment*. UL Firefighter Safety Research Institute.
- Whitley, W. (2011). [Why Lloyd Layman is still relevant](#). *Firefighter Nation*.
- Willi, Stakes, Regan & Zevotek (2018). *Evaluation of ventilation-controlled Fires in L-Shaped training Props*. UL Firefighter Safety Research Institute.
- Zevotek, R., Stakes, K. & Willi, J. (2017). *Impact of Fire Attack Utilizing interior and exterior streams on firefighter safety and occupant survival: full scale experiments*. UL Firefighter Safety Research Institute.
- Zevotek, R. (2021). E-mailwisseling.