

Een literatuurstudie naar brandbestrijding in wegtunnels



Instituut Fysieke Veiligheid
Lectoraten Brandweerkunde en Transportveiligheid
Postbus 7010
6801 HA Arnhem
www.ifv.nl
info@ifv.nl
026 355 24 00

Colofon

Instituut Fysieke Veiligheid (2019). *Een literatuurstudie naar brandbestrijding in wegtunnels*.
Arnhem: Instituut Fysieke Veiligheid.

Oprachtgever:	Brandweeracademie
Contactpersoon:	Ricardo Weewer
Titel:	Een literatuurstudie naar brandbestrijding in wegtunnels
Datum:	29 april 2019
Status:	Definitief
Versie:	1.0
Auteur:	Jan Maarten Elbers
Projectleider:	Jos Post
Review:	Ricardo Weewer, Nils Rosmuller
Eindverantwoordelijk:	Ricardo Weewer
Coverfoto:	Brandweer Zuid-Limburg

Abstract

English

There are no evidence-based national guidelines – on an operational level – for the Dutch fire brigades on how to effectively, efficiently and safely suppress fires in tunnels. Safety regions often use their own operational plans, but these plans are not always supported by (scientific) evidence. To enable an evidence-based approach, this literature study explores the question *What is known in (inter)national literature on how to suppress tunnel fires and which factors are of importance during suppression?* Literature was searched using the snowballing method. The studied literature shows that there are several important factors in tunnel fire suppression: Choice of strategy and tactics, the (in)ability to move and work swiftly in smoke filled tunnels, physical limitations (e.g. range of hoses), use of (fixed or mobile) ventilation systems, tunnel design and used construction materials. All these factors should be taken into account by the fire brigade when suppressing fires in tunnels. This literature study exclusively focuses on fire suppression by the fire service, not on multidisciplinary actions or procedures.

Nederlands

Het ontbreekt de Nederlandse brandweer aan wetenschappelijk onderbouwde nationale richtlijnen voor een effectieve, efficiënte en veilige tunnelbrandbestrijding op operationeel niveau. Veiligheidsregio's hanteren vaak eigen calamiteitenplannen of inzetprocedures, die niet altijd (duidelijk) gebaseerd zijn op wetenschappelijke inzichten en vakliteratuur. Om een meer gefundeerde benadering mogelijk te maken, wordt in deze literatuurstudie gekeken naar de vraag: *Wat is er in de internationale en Nederlandse literatuur bekend over de aanpak van tunnelbranden door de brandweer en welke factoren zijn daarbij van belang?* Literatuur is gezocht met de sneeuwbal methode. De bestudeerde literatuur geeft aan dat de volgende factoren belangrijk zijn bij tunnelbrandbestrijding: de keuze van strategie en tactiek, de (on)mogelijkheid om snel voort te bewegen en te werken in met rook gevulde tunnels, fysieke beperkingen (bijv. het beperkte bereik van de straalpijpen), het gebruik van (vaste of mobiele) ventilatiesystemen, het tunneldesign en de gebruikte constructiematerialen. Deze factoren moeten worden meegenomen bij tunnelbrandbestrijding door de brandweer. Deze literatuurstudie behandelt brandbestrijding door de brandweer, geen multidisciplinaire handelingen of procedures.

Voorwoord

Branden in wegtunnels komen in Nederland gelukkig niet vaak voor. En als ze voorkomen zijn ze gelukkig veelal klein qua omvang en relatief eenvoudig te bestrijden. Maar het kan ook voorkomen dat ze groter zijn, bijvoorbeeld als er een vrachtwagen of een tankwagen bij de brand of het ongeval betrokken is.

Er zijn geen landelijk geldende procedures voor de bestrijding van branden in tunnels. Om die reden staat er niets over in de les- en leerstof voor brandweermensen. De belangrijkste reden die daarvoor tot nog toe bestond was dat elke tunnel anders is en er derhalve op maat gesneden procedures nodig zijn. Daarom stelt elke brandweerregio voor elke tunnel een aparte inzet of aanvalsplan op. Desondanks zijn er in de incidentbestrijdingsplannen voor verschillende specifieke tunnels wel dezelfde stappen te herkennen voor de bestrijding van incidenten en calamiteiten. Daarnaast is er wel één algemeen principe dat 'kopstukken van Brandweer Nederland' regelmatig uitspreken, namelijk dat de brandweer bij branden in tunnels en andere ondergrondse bouwwerken voor zichzelf een inspanningsverplichting ziet, maar geen resultaatverplichting. Hiermee wordt gezegd dat de brandweer niet alle branden in tunnels en ondergrondse bouwwerken zal kunnen bestrijden, en preventie daarom een belangrijke plaats inneemt om het risico te beheersen.

Wij hebben gemeend dat de verschillen tussen de tunnels (en zeker die van de Rijkstunnels) niet zo groot zijn dat er geen algemeen geldende principes kunnen worden afgesproken (waar uiteraard voor specifieke tunnels aanvullingen op mogelijk zijn).

In een eerste stap om tot die algemene principes te komen hebben we gemeend eerst eens te kijken wat er allemaal in de (internationale) literatuur bekend is over brandbestrijding in tunnels. Het resultaat van die literatuurstudie ligt nu voor u. Wij menen dat dit al een aardig overzicht geeft en een basis kan vormen voor een landelijk operationeel handelingsperspectief. Uiteraard staan er in deze studie ook maatregelen of inzichten die in de huidige wegtunnels in Nederland al lang en breed zijn verwerkt. Dat is mooi, want op die punten zijn we in Nederland blijkbaar state of the art.

Wij gaan de resultaten van deze studie gebruiken om samen met een aantal regio's te komen tot algemene uitgangspunten voor tunnelbandbestrijding. In de tussentijd is deze studie alvast een aanrader voor diegene die geïnteresseerd is in met name de wetenschappelijke kennis omtrent tunnelbrandbestrijding.

Nils Rosmuller, lector Transportveiligheid
Ricardo Weewer, lector Brandweerkunde

Inhoud

Abstract	3
Voorwoord	4
Inleiding	6
1 Tunnelbrandbestrijding	10
1.1 Doel en inzetprocedure	10
1.2 Voortbewegen in rook	16
1.3 Fysieke beperkingen	19
1.4 Ventilatie als procedure	22
1.5 Tunnelontwerp en constructiematerialen	28
1.6 Blusinstallaties in tunnels	32
2 Conclusies en aanbevelingen	34
2.1 Beantwoording hoofdvraag	34
2.2 Aanbevelingen voor praktijk, beleid en onderzoek	37
Literatuur	39
Bijlage 1 Begrippenlijst	46
Bijlage 2 Belemmerende factoren bij tunnelbrandbestrijding	49

Inleiding

In Nederland bevinden zich ongeveer 50 wegtunnels (IFV, 2016). In rijkstunnels in Nederland treedt in totaal zo'n twee keer per jaar een kleine brand op (zoals een personenautobrand), die in korte tijd dooft of wordt geblust – door de weggebruikers of de brandweer – zonder dat er slachtoffers vallen en zonder dat noemenswaardige materiële schade optreedt.¹ Grote tunnelbranden (> 25 MW) in wegtunnels vinden in Nederland gelukkig zelden plaats (TNO, 2012). Voor zover bekend zijn er sinds 1942 twee grote tunnelbranden in Nederland voorgevallen, waarbij in beide gevallen sprake was van een vrachtwagenbrand: in de Velsertunnel (1978) en in de Heinenoordtunnel (2014).² In de Velsertunnel lieten vijf personen het leven, in de Heinenoordtunnel één persoon. Beide branden zijn door de brandweer geblust.³ Grote tunnelbranden in wegtunnels komen ook in andere Europese landen niet vaak voor, al zijn er een aantal indrukwekkende casus bekend, zoals in Oostenrijk (Tauern tunnel, 1991), Frankrijk/Italië (Mont Blanc tunnel, 1999), Zwitserland (Viamalatunnel, 2006) en Noorwegen (Gudvangatunnel, 2013).⁴ Tussen 1987 en 2006 vonden er 43 branden plaats in Europese wegtunnels (Beard & Cope, 2007). Hoewel de kans op tunnelbranden gering blijkt, kunnen de effecten aanzienlijk zijn. De gevolgen van een brand in een tunnel zijn bovendien vaak ernstiger dan die van een brand op de open weg (Rijkswaterstaat (RWS), 2000).

Tunnelbrandbestrijding in Nederland

Tunnelbrandbestrijding is gericht op redding, het mogelijk maken van een ontruiming, het voorkomen van brandoverslag naar een aangrenzend gebouw en/of blussing. Dat zijn de strategische doelen volgens het Instituut Fysieke Veiligheid (IFV, 2014). Ingason, Li en Lönnermark (2015) geven aan dat tunnelbrandbestrijding door de brandweer erop is gericht om een brand in een tunnel te bestrijden, te controleren of de hitte van de brand te beheersen. Tot op zekere hoogte is de tunnelbrandbestrijding in Nederland in behoorlijke mate geüniformeerd: er zijn veel procedurele overeenkomsten geconstateerd tussen de calamiteitenplannen en incidentbestrijdingsplannen die voor wegtunnels zijn opgesteld (IFV, 2016). De rode draad in de procedures is dat de meldkamer een melding krijgt van een calamiteit of incident in de tunnel, waarna deze een uitrukbericht afgeeft en er een tankautospuit (TS) uitrukt. In de meeste gevallen rijdt deze TS naar de ingang van de ondersteunende tunnelbuis⁵, waar de bevelvoerder het hulpdienstenpaneel (met beelden vanuit de incidentbuis) raadpleegt. De TS rijdt vervolgens, met de rijrichting mee, de

¹ Zie: <http://www.a2maastricht.nl/vraag-en-antwoord/vraag-en-antwoord-hoe-gaat-tunnel-functioneren/tunnel-brand.aspx?vraag7>

² Zie: <https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/tunnels/betonkwaliteit/index.aspx>

³ De brand in de Heinenoordtunnel is mede door Rijkswaterstaat, de Veiligheidsregio Rotterdam-Rijnmond en Veiligheidsregio Zuid-Holland Zuid geëvalueerd. Ook Efectis heeft brandonderzoek gedaan. De evaluatie resulteerde voornamelijk in multidisciplinaire leerpunten gericht op communicatie. Het brandonderzoek richtte zich op de ontwikkeling van de brand en ventilatie (Efectis, 2015). De resultaten van de onderzoeken zijn besproken op het Kennisplatform Tunnelveiligheid, zie <https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20150422-kpt-bijeenkomst-evaluatie-incident-heinenoordtunnel.pdf>.

⁴ Voor een overzicht van historische internationale tunnelbranden, zie Carvel en Marlair (2011).

⁵ Zie bijlage 1 voor een beschrijving van de gebruikte begrippen.

ondersteunende tunnelbuis in. Vanuit deze buis treedt de brandweer via vluchtdeuren de incidentbuis binnen, bovenwinds van de brand en voert een eerste verkenning uit. Strategie en tactiek met betrekking tot tunnelbrandbestrijding door de brandweer is in Nederland niet systematisch beschreven; dit in tegenstelling tot gebouwbrandbestrijding.⁶ Voor het maken van die keuzes valt de bevelvoerder veelal terug op professionaliteit, ervaring, bekendheid met de locatie, materieel en (kennis van) overige factoren die bepalend zijn voor het verloop van het incident (IFV, 2019). De huidige regionale procedures zijn - voor zover bekend - meer dan eens gebaseerd op (trainings-) ervaring en expertise afkomstig van buitenlandse brandweercollega's. Het is onduidelijk in hoeverre deze procedures gebaseerd zijn op wetenschappelijk onderzoek. Die onduidelijkheid leidt niet direct tot onveilige (werk)situaties, maar werpt wel de vraag op welke inzetstrategieën en -tactieken bij wegtunnelbranden in Nederland het meest effectief, efficiënt en veilig zijn en welke factoren daarbij van belang zijn. Deze literatuurstudie zoekt antwoorden op die vragen.

Belemmerende factoren bij tunnelbrandbestrijding

Wat de beste strategie of tactiek is om een brand in een tunnel te bestrijden, laat zich voorafgaand aan een incident moeilijk voorspellen. Tunnelbranden kunnen verschillen door allerlei casus-specifieke factoren en hun onderlinge interacties (de locatie van de brand, de brandstof, het aantal personen in de tunnel, tunnelontwerp etc.). Een aantal van die factoren wordt in de literatuur aangeduid als belemmerend (zie bijlage 2). Om de juiste strategie en tactiek te kiezen voor een brandweerinzet, is kennis van deze factoren noodzakelijk. Ondanks deze kennisbehoefte en 43 grote tunnelbranden in de periode 1987 - 2006 heeft wetenschappelijk onderzoek naar de vraag welke (en hoe) verschillende factoren bij een tunnelbrand interacteren, zich pas in de laatste vijftien tot twintig jaar sterk ontwikkeld (Beard & Carvel, 2005; Ingason, Bergqvist, Frantzich, & Hasselrot, 2005; Ingason et al., 2015). Ondanks de toenemende kennis op dit terrein, heerst vandaag de dag nog steeds een sterke internationale behoefte om - door onderzoek en kennisdeling - meer inzicht te verkrijgen in de risico's die kleven aan een brandweerinzet in een tunnel en specifieke moeilijkheden die gepaard gaan met tunnelbranden (Palm, Kumm, & Ingason, 2015).

Deze behoefte komt in Nederland voort uit de wens van de veiligheidsregio's en het Instituut Fysieke Veiligheid (IFV) om de huidige inzet (strategieën, tactieken en methodes) van de brandweer bij tunnelbranden te verbeteren op het gebied van veiligheid, efficiëntie en effectiviteit. Nieuwe inzichten kunnen bijdragen aan een meer gefundeerde risico-inschatting en het keuzeprocess van de bevelvoerder, die voorafgaan aan en essentieel zijn voor de keuze van strategie, tactiek en (blus)methode (Ingason, Kumm, Palm, Vylund, & Lönnermark, 2015). Deze studie onderzoekt welke inzetstrategieën en -tactieken van de brandweer bij wegtunnelbranden in Nederland het meest effectief, efficiënt en veilig zijn en welke factoren tijdens de inzet van belang zijn.

⁶ Het IFV heeft in januari 2019 een *overzichtelijke Handreiking voor multidisciplinaire afstemming bij incidentbestrijding in wegtunnels* gepubliceerd, waarin wordt ingegaan op de afstemming tussen partijen bij incidentbestrijding. Deze handreiking richt zich niet op te nemen monodisciplinaire, operationele beslissingen door de brandweer bij een tunnelincident (breder dan brand).

Doel

De lectoraten Brandweerkunde en Transportveiligheid van het IFV willen de wetenschappelijke basis van inzetprocedures van de brandweer bij tunnelbranden in wegtunnels in beeld brengen door een verkenning van de internationale (wetenschappelijke) literatuur.

Het doel van deze verkennende literatuurstudie is het inventariseren van factoren waarmee brandweermensen tijdens hun inzet in een wegtunnel rekening moeten houden en, voor zover mogelijk, hoe. De inzichten die volgen uit deze literatuurstudie kunnen leiden tot gezamenlijke, onderbouwde uitgangspunten voor alle veiligheidsregio's ten aanzien van inzetprocedures voor tunnelbrandbestrijding.

Hoofdvraag

De centrale vraag van deze studie, die in dit rapport beantwoord wordt, luidt:

Wat is er in de internationale en Nederlandse literatuur bekend over de aanpak van tunnelbrandbestrijding door de brandweer en welke factoren zijn daarbij van belang?

Hierbij hebben we ons met name gericht op gereviewde teksten en minder op praktische handreikingen, handboeken of richtlijnen zoals die in de praktijk voor (specifieke) tunnels worden gebruikt. Uiteraard kunnen uit deze brede literatuurstudie ook factoren aan het licht komen, die in de Nederlandse situatie niet (meer) problematisch, maar reeds goed ondervangen zijn door technische, beleidsmatige en procesmatige ingrepen.

Onderzoeksmethode

Voor het verzamelen van literatuur over factoren die van belang zijn bij tunnelbrandbestrijding is gebruikgemaakt van de 'sneeuwbalmethode'. Op basis van enkele algemene en bekende (wetenschappelijke) publicaties over tunnelbrandbestrijding, zoals handboeken en internationale les- en leerstof, is aanvullende (wetenschappelijke) literatuur gezocht over deze factoren. Er is daarnaast systematisch gezocht in wetenschappelijk zoekmachines Web of Science en Google Scholar, evenals in Mendeley. De zoektermen waren: 'tunnelbrand', 'tunnelincidentbestrijding', 'tunnel fire', 'tunnel fire suppression', 'tunnel fire tactic' en 'tunnel fire strategy'. De zoektocht heeft allerlei verschillende soorten literatuur opgeleverd: wetenschappelijk (peer-reviewed artikelen in internationale tijdschriften), congrespublicaties, vakbladen, beleidsstukken en websites. Literatuur is meegenomen in deze studie wanneer deze relevant is in het kader van tunnelbrandbestrijding, kwalitatief of kwantitatief van aard is, (deels) geschreven is in het Nederlands of Engels en het peer-reviewed of niet peer-reviewed vak- of wetenschappelijke literatuur betreft. Een enkel Zweeds artikel is wel meegenomen. Gevonden literatuur die niet aan deze criteria voldoet, is niet meegenomen. Dat betekent onder meer dat sommige bevindingen een sterkere wetenschappelijke basis hebben dan anderen. Daarnaast betekent het dat enkel literatuur die direct gericht is op de monodisciplinaire taak van brandbestrijding, zoals evacueren, blussen of redden, is meegenomen. Literatuur over multidisciplinaire acties of procedures valt buiten de scope van deze studie. Ter illustratie: een wetenschappelijk artikel dat enkel gaat over het berekenen van kritische ventilatiesnelheden is niet meegenomen in deze

literatuurstudie. Wel meegenomen is een wetenschappelijk artikel dat ingaat op inzet van ventilatie bij de bestrijding van een tunnelbrand, omdat dit artikel raakt aan strategische en tactische keuzes. Zowel in de analyse, conclusie als in de literatuurlijst wordt onderscheid gemaakt in peer-reviewed en niet peer-reviewed literatuur, op onderzoek gebaseerde en niet op onderzoek gebaseerde literatuur. Hoewel de studie zich in essentie beperkt tot literatuur over wegtunnels, is soms ook literatuur meegenomen over andere soorten tunnels. Niet in alle gevallen is uit de bestudeerde onderzoeken achterhaald of de betreffende tunnel een wegtunnel, spoortunnel of andere tunnel betreft. Waar bekend, staat aangegeven om welke soort tunnel het gaat. Er is in deze studie geen onderscheid gemaakt in rijkstunnels, gemeentelijke, provinciale of private tunnels als dat onderscheid niet uit de literatuur is gebleken. Omdat er in Nederland geen rijkstunnels zijn bestaande uit één tunnelbuis, worden deze niet meegenomen in deze studie.

Leeswijzer

In hoofdstuk 1 worden de factoren beschreven waar in deze literatuurstudie naar gekeken is: doel en procedure (paragraaf 1.1), voortbewegen in rook (paragraaf 1.2), fysieke beperkingen (paragraaf 1.3), ventilatie als procedure (hoofdstuk 1.4), tunnelontwerp en constructiematerialen (paragraaf 1.5), en blusinstallaties in tunnels (paragraaf 1.6). In hoofdstuk 2 wordt antwoord gegeven op de onderzoeksvraag. Daarnaast worden aanbevelingen voor de operationele praktijk, beleid en toekomstig onderzoek gegeven. Bijlage 1 bevat een begrippenlijst waarin de termen en afkortingen worden beschreven, die in deze literatuurstudie worden gebruikt. In bijlage 2 wordt ingegaan op belemmerende factoren bij tunnelbrandbestrijding.

1 Tunnelbrandbestrijding

Omdat in de literatuur verschillende definities worden gehanteerd van 'strategie' en 'tactiek', wordt in deze studie gesproken van 'doel' en 'procedure'.

Onder *doel* wordt verstaan: het beoogde doel van de repressieve inzet, zoals redding, evacueren (mogelijk maken), voorkomen van branduitbreiding binnen/buiten het bouwwerk, blussing en/of beperken van milieu- en maatschappelijke effecten (gelijk aan 'strategie' van het kwadrantenmodel (Brandweer Nederland, 2014) en het generieke plan om dat doel te bereiken (Kim, Lönnermark, & Ingason, 2010).

De *inzetprocedure* is het stappenplan dat gehanteerd wordt om het (strategische) doel te kunnen bereiken en het incident te bestrijden. Voor gebouwbrandbestrijding kent de brandweer bijvoorbeeld vier procedures - inzetacties genoemd in het kwadrantenmodel (Brandweer Nederland, 2014) - afhankelijk van het gekozen doel:

1. defensieve buiteninzet
2. defensieve binneninzet
3. offensieve buiteninzet
4. offensieve binneninzet.

Wanneer geschreven wordt over *methode*, worden de operationele benodigheden voor het uitvoeren van de procedure bedoeld, zoals acties, mensen, middelen, structuur, resultaten, et cetera.

1.1 Doel en inzetprocedure

1.1.1 Doel tunnelbrandbestrijding

Onderzoekers onderscheiden twee hoofddoelen⁷ bij tunnelbrandbestrijding in wegtunnels: offensief en defensief (Kumm & Andreasson, 2009; Kim et al., 2010).

Een *offensief* doel is volgens deze onderzoekers gericht op het onmiddellijk bestrijden van de brand om brandverspreiding te voorkomen en gevaren weg te nemen voor vluchtende personen. Wanneer de brand snel gedoofd kan worden, heeft dit doel in elk geval de voorkeur. De nadruk ligt bij dit doel op brandbestrijding in plaats van bijvoorbeeld het uitvoeren van reddingen. Er wordt rekening gehouden met risico's met betrekking tot rook en hittestraling.

Een *defensief* doel beoogt volgens de onderzoekers het voorkomen van branduitbreiding en het beschermen van vluchtende personen, totdat een gunstige situatie gecreëerd is om een offensieve strategie in te zetten. Slachtoffers zoeken en redden heeft dan de focus in plaats van brandbestrijding.

⁷ De onderzoekers hanteren het woord 'strategy'. Daaronder verstaan zij: '[...] the general plan or course of action decided upon by the incident commander in order to achieve firefighting objectives which are to protect life and property by performing rescues, and by locating, confining and extinguishing fires.' (Kim et al., 2010, p. 50).

Kim et al. (2010) onderzochten een aantal casus van echte tunnelbranden en analyseerden deze aan de hand van het type brand. Op basis van – volgens de onderzoekers – essentiële informatie (type brand, betrokken voertuigen, beknelde personen en brandlocatie) stellen zij bevelvoerders voor offensief of defensief op te treden (Kim et al., 2010).

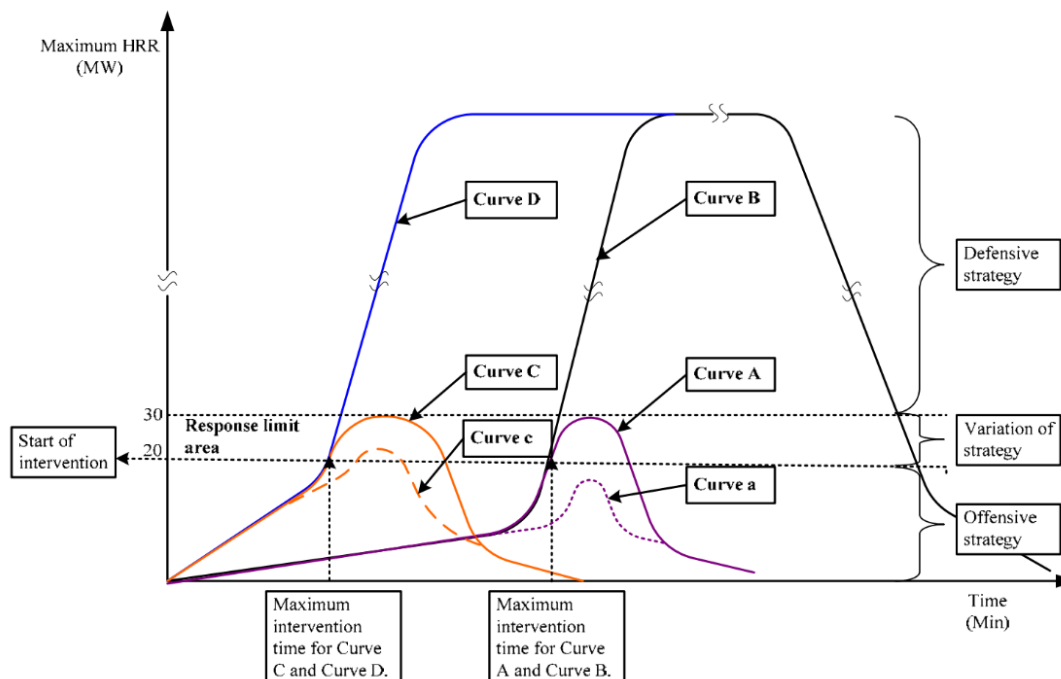
- > Type brand:
 - Enkelvoudige brand → offensief.
 - Meerdere voertuigen betrokken: mogelijk beknelde personen en lekkage gevaarlijke stoffen → defensief.
- > Aantal en soort voertuigen betrokken:
 - Enkel personenvoertuigen: lage kans brandverspreiding → offensief.
 - Vrachtwagen of tankwagen betrokken: mogelijk al grote brand bij aankomst, brandverspreiding mogelijk → defensief.
- > Beknelde personen:
 - Indien er beknelde personen zijn gelokaliseerd, moeten alle handelingen en inzet van capaciteit gericht zijn op het veilig stellen van deze personen → defensief.
- > Brandlocatie
 - Bij brand in een tunnel met twee tunnelbuizen moet de brand benaderd worden vanuit de dichtst bij de brand gelokaliseerde vluchtdeur in de ondersteunende buis.

De eerst arriverende bevelvoerder bepaalt het (strategische) doel. Volgens de onderzoekers is een aantal parameters bepalend voor de keuze van het doel: het type brand, de tijd tussen start van de brand en interventie door de brandweer en het (potentiële) brandvermogen van het type brand. Op grond van hun analyses komen ze tot een zestal brandscenario-curves en bijbehorende voorstellen voor wanneer welk doel nagestreefd dient te worden (zie grafiek 1.1):

- > Curve A: enkelvoudige, langzaam ontwikkelende brand. Brandverspreiding kan voorkomen worden door tunnelgebruikers of brandweer. Het maximaal brandvermogen wordt niet bereikt voordat de brandweer kan interveniëren (aanwezig is).
- > Curve a: enkelvoudige, langzaam ontwikkelende brand, zonder kans op brandverspreiding. Het maximaal brandvermogen wordt niet bereikt voordat de brandweer kan interveniëren en is te laag om de brand te verspreiden. Interventie van de brandweer is niet altijd nodig.
- > Curve B: enkelvoudige, langzaam ontwikkelende brand. Brandverspreiding is mogelijk. Het maximaal brandvermogen wordt bereikt voordat de brandweer kan interveniëren.
- > Curve C: meerdere voertuigen, snel ontwikkelende brand, zonder kans op brandverspreiding. Het maximaal brandvermogen is te laag om de brand te verspreiden of de brandweer intervenueert voordat verspreiding op kan treden.
- > Curve c: meerdere voertuigen, snel ontwikkelende brand, zonder kans op brandverspreiding. Het maximaal brandvermogen wordt niet bereikt voordat de brandweer kan interveniëren en is te laag om de brand te verspreiden. Interventie van de brandweer is niet altijd nodig.
- > Curve D: meerdere voertuigen, snel ontwikkelende brand. De brand verspreidt zich. Het brandvermogen breidt uit door brandverspreiding.

De grafiek laat zien dat – volgend uit de analyses van de onderzoekers – een offensief doel de voorkeur geniet wanneer de brandweer er snel (genoeg) bij is.

De grafiek toont ook dat vanaf een brandvermogen van 30 MW in elk geval een defensief doel zou moeten worden gekozen. Als de defensief gerichte inzet succesvol is en de brand kleiner is geworden (≤ 30 MW), kan er overgegaan worden naar een offensief doel.



Grafiek 1.1 Brandscenariocurves als basis voor keuze van het doel (ontleend aan Kim et al., 2010)

1.1.2 Algemene inzetprocedure tunnelbrandbestrijding

Op grond van het gekozen doel kan de inzetprocedure worden bepaald. Hoe die procedure wordt vormgegeven, hangt volgens Bergqvist (2003)⁸ af van de volgende kenmerken: het type incident, lokale omstandigheden, gevolgen van reeds ondernomen acties, de door de hulpdiensten (bevelvoerder) gestelde doelen en beschikbare voorzieningen. Kumm en Bergqvist (2005) stellen in een latere studie dat het doel (en daarmee de inzetprocedure) in een reddingsoperatie in een tunnel voornamelijk afhankelijk is van de tunnelkenmerken, het brandgedrag en welke capaciteit (kundig personeel en materieel) de brandweer tot zijn beschikking heeft.

Volgens Bergqvist gaan de hulpdiensten in Zweden bij tunnelbrandbestrijding uit van vijf verschillende procedurele benaderingen:

1. Brand bestrijden om de dreiging die uitgaat van de brand naar personen in de tunnel te doen stoppen.
2. Slachtoffers en personen in gevaar in de tunnel redden of bij evacuatie ondersteunen.
3. De tunnel ventileren om evacuatie en brandbestrijding te faciliteren.
4. De brand vanaf een veilige plek bestrijden om schade te beperken.
5. Vluchtende personen ondersteunen en opvangen.

In tegenstelling tot het kwadrantenmodel (Brandweer Nederland, 2014) zijn deze procedurele benaderingen niet alleen van toepassing op brandbestrijding, maar ook op

⁸ Bergqvist (2003) hanteert zelf het woord 'tactic', wat hij definieert als alle besluiten van de bevelvoerder aangaande te gebruiken voorzieningen en acties om de gestelde (strategische) doelen efficiënt te bereiken.

evacuatie en geneeskundige hulp. Sommige benaderingen zijn duidelijk offensief (1) of defensief (2, 4, 5), waar ventileren (3) beide doelen kan dienen.

Per brand moet worden bekeken welke (combinatie van) benaderingen bijdragen aan het gekozen doel. Bergqvist stelt ook mogelijke handelingen voor die binnen (meerdere) door hem voorgestelde procedurele benaderingen kunnen vallen:

1. De tunnel betreden om snel en effectief de situatie in de tunnel in beeld te brengen, op een veilige manier.
2. De tunnel betreden om de brand te blussen, in gevaarlijke omstandigheden (straling en rook), mogelijk met behulp van reguliere slangen en straalpijpen, mobiele waterkanonnen of op voertuigen, ventilatoren, het verplaatsen van het brandende object en op afstand bestuurbare blustechnieken (zoals een waterkanon).
3. Vluchtende personen gidsen, ondersteunen en redden.
4. Slachtoffers naar buiten dragen.
5. Slachtoffers die vastzitten nabij de brand helpen om te overleven in de nabijheid van de brand.
6. De tunnel ventileren om de hoeveelheid en richting van de rook te beïnvloeden.
7. Acute geneeskundige hulp verlenen, onder veilige werkomstandigheden, in de nabijheid van de brand.

1.1.3 Inzetprocedure bij twee tunnelbuizen⁹

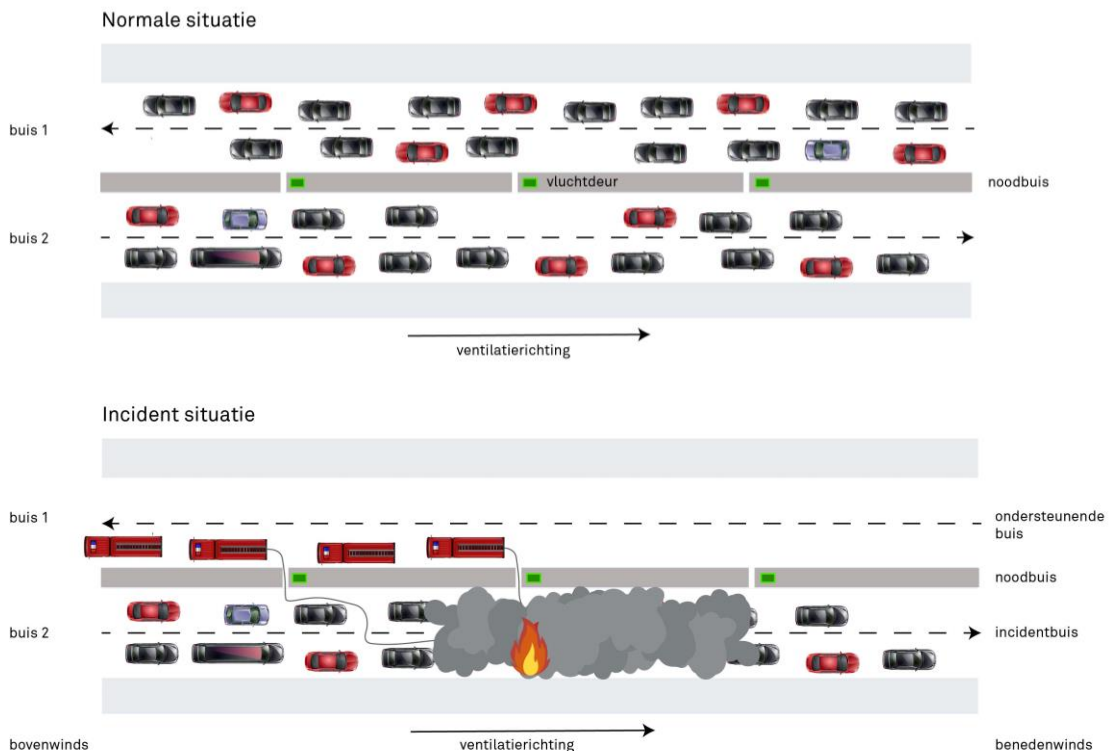
Voor de inzet bij een brand in een tunnel met twee tunnelbuizen (met in iedere buis één rijrichting), waarvan één incidentbuis en één ondersteunende buis, stellen Bergqvist (2003) en Kim et al. (2010) de volgende procedurele stappen voor (zie afbeelding 1.2):

1. Stop het verkeer in beide tunnelbuizen met behulp van fysieke barrières.
2. De eerste eenheid betreedt de incidentbuis met de rijrichting mee, via de vluchtdoor in de ondersteunende buis die het dichtstbij en bovenwinds van de brand ligt.
3. De eerste eenheid zet in op bovenwindse brandbestrijding.
4. De eerste eenheid zorgt ook voor ondersteuning van de evacuatie van het rookvrije tunneldeel bovenwinds van de brand.
5. De eenheden die volgen, assisteren de eerste eenheid bij handeling 3 en 4 en/of beginnen met het blussen van branden en zoeken naar personen benedenwinds van de brand, afhankelijk van de brandontwikkeling.

In geval van veel opgestroopt verkeer in de rook in de benedenwindse ruimte in de incidentbuis, voegt Bergqvist nog twee stappen toe:

6. Krachtig laten ventileren nadat de brand onder controle is, om zo rook en toxische gassen in de ruimte benedenwinds af te voeren.
7. Indien de brand niet kan worden gecontroleerd, na stap 4 omgekeerde ventilatie toepassen om de ruimte benedenwinds rookvrij te maken.

⁹ Bergqvist (2003) en andere Zweedse onderzoekers (Kim, Lönnemark, & Ingason, 2010) stellen ook een (niet per definitie chronologische) inzetprocedure voor bij brand in een tunnel met één tunnelbuis met twee rijrichtingen. Maar omdat deze situatie in Nederland niet voorkomt, is deze procedure buiten beschouwing gelaten.



Afbeelding 1.2 Brandbestrijding in een tunnel met twee tunnelbuizen

Carvel en Beard (2005) zijn van mening dat specialistische eenheden die dicht bij de tunnel gestationeerd zijn een voordeel kunnen bieden ten opzichte van reguliere eenheden, wegens hun snelle opkomsttijd en specifieke kennis van de tunnel en tunnelbrandbestrijding. De Zwitserse *International Fire Academy* (IFA) onderstreept die behoefte aan specialistische kennis en heeft specifieke les- en leerstof voor tunnelbrandbestrijding in wegtunnels ontwikkeld in opdracht van de Zwitserse overheid (IFA, 2016).¹⁰ De IFA leert dat elk doel en elke inzetprocedure gericht moet zijn op het vergemakkelijken van reddingen van mensen, niet op het beperken van materiële schade. Voorts stelt zij dat bij een incident idealiter twee bevelvoerders, een verkenningseenheid, brandbestrijdingseenheid, reddingseenheid en bemanning van tankautospuiten en/of ander operationeel materieel ingezet worden. De IFA beschrijft hoe deze eenheden in verschillende tunnels de brand kunnen benaderen en bestrijden, en slachtoffers kunnen redden. De keuze van de inzetprocedure is volgens de IFA vooral afhankelijk van de tunnelkenmerken; bijvoorbeeld of er sprake is van eenrichtings- of tweerichtingsverkeer, van één tunnelbuis of twee, van een vluchtdeur waar men doorheen kan lopen of rijden etc. De meest optimale route is ook afhankelijk van de rookontwikkeling (luchtstroom en -afvoer) en (aantal en locatie van) voertuigen in de tunnel. Soms kan het de beste keuze zijn om via een ondersteunende buis of service-/noodbuis de incidentbuis te benaderen. In andere gevallen kan het beter zijn om de brand te benaderen via de incidentbuis, met de luchtstroom mee. In alle gevallen is het monitoren en controleren van de luchtstroom volgens de IFA cruciaal voor een effectieve en veilige hulpverlening. Om brandverspreiding te voorkomen, moet de ruimte rondom de brand gekoeld worden.

¹⁰ Deze les- en leerstof is gebaseerd op het oordeel van een groep ervaren Zwitserse experts van de IFA op het gebied van (tunnel)brandbestrijding. Zij hebben gekeken naar relevante onderzoeken, evalueerden casuïstiek en putten uit hun eigen ervaringen omtrent wegtunnels. De IFA zou naar eigen zeggen de les- en leerstof ook hebben opgesteld samen met andere Europese brandweerkorpsen. Of deze les- en leerstof een wetenschappelijke basis heeft is niet duidelijk.

De IFA heeft een basis inzetprocedure opgesteld voor brandweeroptredens in wegtunnels, bestaande uit zes stappen:

1. Onderhoud voortdurend contact met hulpdiensten aan de andere zijde van de tunnel.
2. Voer een verkenning uit onderweg naar het incident en blijf tijdens de inzet het effect monitoren; stel de inzet zo nodig bij.
3. Lokaliseer de brand.
4. Stel de luchtstroomrichting vast.
5. Bestrijd de brand.
6. Zoek en red slachtoffers.

In vijf scenario's zet de IFA uiteen welke stappen er volgens haar (door de verkenning-, brandbestrijdings- en reddingseenheid) moeten worden ontplooid om tot een succesvolle reddingsoperatie te komen.¹¹ De scenario's en activiteiten lijken op de stappen van Bergqvist (2003) en Kim et al. (2010) en laten zich bij brand in een tunnel met twee tunnelbuizen als volgt samenvatten:

- > Aanrijden door de verkenningseenheid in beide buizen, verkennen in de incidentbuis vanaf de bovenwindse zijde en via de ondersteunende buis.
- > Aanrijden en redden door de reddingseenheid vanaf de benedenwindse zijde en via de ondersteunende buis.
- > Aanrijden en blussen door de brandbestrijdingseenheid vanaf de bovenwindse zijde.
- > Als de bovenwindse zijde van de incidentbuis geblokkeerd is, wordt de ondersteunende buis óók gebruikt door de brandbestrijdingseenheid om bij de vluchtdeur te komen die het dichtst bovenwinds bij de brand is. Vanuit die positie wordt de brand bestreden.

1.1.4 Conclusie

De in de literatuur voorgestelde procedurele stappen dienen ofwel een offensief doel (nadruk op brandbestrijding) ofwel een defensief doel (nadruk op redding). Dit lijkt op het kwadrantenmodel dat gebruikt wordt voor gebouwenbrandbestrijding in Nederland, maar zonder het onderscheid binneninzet/buiteninzet. De brandcurves ontwikkeld door Kim et al. (2010) kunnen een handvat bieden bij het inschatten van de haalbaarheid en de keuze van het doel.

Indien de brandweer wil inzetten op offensieve doelen, dan is snelle interventie van belang. In dat geval kunnen specialistische eenheden die dicht bij de tunnel gestationeerd zijn een voordeel bieden (Carvel & Beard, 2005).

De voorgestelde procedurele stappen lijken inhoudelijk qua handelingen veel op elkaar, al onderscheidt de IFA (2016) afzonderlijke eenheden met specialistische taken en schrijven Bergqvist (2003) en Kim et al. (2010) een set aan taken toe aan respectievelijk de eerste brandweereenheid ter plaatse en de eenheden die daarop volgen.

Voor zover kan worden nagegaan in de literatuur, baseren Bergqvist (2003), Kumm en Bergqvist (2005), Kumm en Andreasson (2009) zich bij hun mogelijke stappenplannen niet op (wetenschappelijk) onderzoek, maar op ervaring. Kim et al. (2010) hun voorgestelde procedures op eigen analyses van een groot aantal casestudies.

¹¹ Voor afbeeldingen die deze scenario's uitgebreid uiteenzetten, zie IFA (2016).

1.2 Voortbewegen in rook

Er is een aantal onderzoeken verricht naar de voortbewegingsnelheid van brandweermensen in ondergrondse ruimtes, zoals tunnels, metrostations en mijnen. Onder 'voortbewegingsnelheid' wordt verstaan: de loopsnelheid én de snelheid van het uitvoeren van handelingen, zoals het aansluiten van slangen. Gezien de grote afstand die brandweermensen soms moeten overbruggen in tunnels, zijn de uitkomsten van deze onderzoeken mogelijk relevant in het kader van tunnelbrandbestrijding.

1.2.1 Tunnels

In de bestudeerde onderzoeken is loopsnelheid gemeten in meerdere scenario's. De brandweer in Stockholm heeft getest hoe snel brandweermensen konden voortbewegen (inclusief het aansluiten van slangen) in drie scenario's:

1. met rook in tunnel en zonder straal
2. zonder rook in tunnel en met straal
3. zonder rook in tunnel en zonder straal.

De resultaten waren respectievelijk (1) 5-8 m/min, (2) 60 m/min en (3) 80 m/min (Bergqvist, Frantzich, Hasselrot, & Ingason, 2001). Later Zweeds onderzoek (Ingason, Bergqvist, Lönnemark, Frantzich, & Hasselrot, 2005) hanteerde soortgelijke scenario's en kwam tot soortgelijke conclusies (zie tabel 1.4).

1.2.2 Metrostations

Er zijn eveneens experimenten verricht naar (onder meer) voortbewegingsnelheid van de brandweer in ondergrondse metrostations. Onderzoekers van het Zweedse METRO-project vonden een voorwaartse bewegingsnelheid van 0,1 tot 0,2 m/s. Bij deze snelheid is het dragen van materiaal, gevulde slangen en ademlucht inbegrepen, evenals de tijd nodig voor het aansluiten van slangen, dit alles met gebruik van infraroodcamera's in een met rook gevuld metrostation. De onderzoekers concluderen onder meer dat de beschikbare hoeveelheid ademlucht bepalend is voor de duur van de inzet van brandweermensen en daarmee het verloop van de inzet (Ingason et al., 2010).

1.2.3 Mijnen

Een onderzoek naar zes verschillende bestrijdingsmethodes in een Zweedse mijn geeft ook belangrijke data over voortbewegingsnelheid van brandweermensen (Palm, Kumm, & Ingason, 2015). Zes brandweermensen met ademlucht werden gemonitord voor wat betreft luchtverbruik, loopsnelheid en keuzes en acties ter plaatse tijdens een inzet in een mijn. De af te leggen afstand bedroeg ongeveer 150 meter van de mijnopening tot aan de aangestoken brandhaard (18 MW) in een speciale container. Die afstand werd vol witte rook gezet met een mobiele ventilator; er was geen vaste ventilatie in de mijn aanwezig. Het zicht was 0,5 tot 1 meter. De zes scenario's waren als volgt (zie ook tabel 1.3):

1. Standaard slang, standaard metalen draagkoffer en met straal.
2. Standaard slang, backpack om slang te dragen en met straal.
3. Standaard slang, standaard metalen draagkoffer en zonder straal.
4. Standaard uitrusting, maar met gebruik van CAFS (Compressed Air Foam System) met een 38 mm-slang.
5. Standaard uitrusting, maar met gebruik van een cutting extinguisher.
6. Standaard uitrusting, met gebruik van transportrolley om uitrusting, blusmiddelen en extra ademlucht te verplaatsen.

De voortbewegingssnelheid in deze scenario's was respectievelijk 8,4, 10,2, 13,2, 10,8, 9 en 5,4 m/min (een gemiddelde van 9,5 m/min), over een afstand van 150 meter. Met standaard slang, standaard metalen draagkoffer en zonder straal was de voortbewegingssnelheid het hoogst en de tijd die op de plaats van inzet nodig was om slangen aan te sluiten het kortst (15 minuten). Met een transportrolley duurde het in vergelijking het langst om de brand te bereiken (30 minuten). Het blussen duurde variërend van 15 seconden tot 3 minuten en 55 seconden (zie tabel 1.3).

Tabel 1.3 Voortbewegingssnelheid, tijd tot blussing en ademluchtverbruik in de experimenten van Palm, Kumm en Ingason (2015)

Test nr.	Tijd tot bereiken brand (150 m)	Tijd tot brand geblust*	Gemiddelde voortbewegingssnelheid	Tijd gebruikt voor blussen	Ademluchtverbruik (tot) (bar)**	Ademluchtverbruik (tot) (l)**
1	14 min 45 s	15 min***	8,4 m/min	15 s	930	6324
2	18 min 9 s	20 min 23 s	10,2 m/min	2 min 14 s	878	11.765
3	11 min 30 s	15 min 25 s	13,2 m/min	3 min 55 s	946	12.676
4	21 min 22 s	23 min 4 s	10,8 m/min	1 min 42 s	1163	15.584
5	16 min 10 s	-	9 m/min	-	958	12.837
6	29 min 12 s	31 min 9 s****	5,4 m/min	1 min 30 s****	1260	12.495

* Vastgesteld door observatie. Wanneer er geen vlammen meer tevoorschijn kwamen en er geen nieuwe ontbranding plaatsvond, is dit gerekend als 'brand geblust'.

** Totaal van zes brandweermensen.

*** Wegens hoog brandvermogen raakte de brandstof (vroegtijdig) op.

**** 27 seconden vertraging wegens problemen met de waterdruk.

Factoren die de snelheid van voortbewegen en handelen van brandweermensen het meest leken te beïnvloeden waren: het gewicht van de uitrusting, de complexiteit van het meedragen van onderdelen (slang, straalpijp etc.), frictie van de slang op (grond)oppervlakken en miscommunicatie tussen brandweermensen bij het organiseren en uitvoeren van taken in een met rook gevulde omgeving. Daarnaast benoemden de onderzoekers de hoeveelheid ademlucht (dus tijd) als limiterende factor tijdens de inzet. Het is aannemelijk dat zichtbeperking door rook ook in belangrijke mate de voortbewegingssnelheid van brandweermensen in deze testen heeft beïnvloed, maar omdat alle testen in rook werden uitgevoerd, was dat niet een van de conclusies van de onderzoekers.

Dat zichtbeperking door rook – die zich niet homogeen maar in lagen (gestratificeerd) in ondergrondse ruimten zoals tunnels begeeft (Ingason et al., 2015, p. 321 e.v.) – de voortbewegingssnelheid kan beïnvloeden, blijkt ook uit andere bronnen.

Tabel 1.4 Voortbewegingssnelheid van brandweermensen in ondergrondse ruimtes in m/min¹² (deels gebaseerd op Kumm en Bergqvist, 2010)

Test nr.	Scenario	Gemiddelde snelheid (m/min)	Theoretisch maximaal af te leggen afstand o.g.v. beschikbare ademlucht (m)	Bron
1	> Met rook gevulde tunnel > Geen straal mee > Ademlucht	4,8 -7,8** (gemiddeld 6.3)**	58***	Bergqvist et al. (2001) Ingason et al. (2005)
2	> Heldere tunnel > Straal meegedragen > Ademlucht	18* 6**	243***	Bergqvist et al. (2001) Ingason et al. (2005)
3	> Heldere tunnel > Geen straal mee > Ademlucht	79,8*	1080***	Bergqvist et al. (2001) Ingason et al. (2005)
4	> Met rook gevulde tunnel > Straal meegedragen > Ademlucht	5,4**	52*****	Kumm, & Andreasson (2009)
5	> Met rook gevuld metrostation > Straal mee > Ademlucht > infraroodcamera's	6-12**	141****	Ingason et al. (2010)
6	> Met koude rook gevulde mijn > Zes verschillende scenario's: - druk/geen druk - standaard uitrusting/backpack - water/CAFS	5,4-13,2**	-	Palm, Kumm, & Ingason (2015)

* Waarden gebaseerd op bewegingssnelheid zonder aansluiten slangen.

** Waarden inclusief aansluiten slangen.

*** Bij 1600 liter beschikbare ademlucht en een gemiddelde consumptie van 62 l/m.

**** Bij 1600 liter beschikbare ademlucht en een gemiddelde consumptie van 68,2 l/m¹³.

***** Waarde gebaseerd op schattingen van eerdere resultaten.

De onderzoeksresultaten in tabel 1.4 geven aan dat brandweermensen zich in rook trager voortbewegen dan in een heldere ondergrondse ruimte.¹⁴ Dat wordt ook bevestigd door drie Duitstalige bronnen die putten uit veldexperimenten, opgenomen in de leerstof van de IFA. Deze bronnen komen uit op waarden van 4,8-10,2 m/min zonder gebruik van een infraroodcamera (IFA, 2016, p. 119).¹⁵

De IFA gaat op grond van eigen experimenten uit van een voortbewegingssnelheid van 11-31 m/min in een met rook gevulde tunnel, bij gebruik van een infraroodcamera (IFA, 2006).

¹² Waar in de literatuur de eenheid 'm/s' is gebruikt, is dit omgerekend naar 'm/min'.

¹³ Dit ademluchtgebruik is in het METRO-project gemeten bij brandweermensen die hevige inspanning leveren: ver lopen, het moeten passeren van obstakels, thermische stress (Ingason et al., 2010).

¹⁴ In de (rookloze) testen 2 en 3 bewogen brandweermensen sneller voort dan in de overige testen waarbij de ruimtes vol stonden met rook.

¹⁵ Deze bronnen zijn niet inhoudelijk bestudeerd.

In de experimenten zouden het scenario van het doorzoeken van voertuigen (11 m/min) en een verkenning (31 m/min) nagebootst zijn. De brandweermensen die de experimenten uitvoerden, waren hiervoor speciaal getraind. De IFA geeft in haar lesmateriaal niet meer uitleg over de omstandigheden waaronder deze snelheden zijn gemeten. De voortbewegingssnelheden zijn dus niet representatief voor alle brandweermensen. In alle in deze paragraaf genoemde experimenten is ademlucht gebruikt.

Studies naar evacuaties tonen aan dat de voortbewegingssnelheid van niet brandweermensen eveneens correleert met voornamelijk rookdichtheid: dichtere rook betekent trager voortbewegen (Jin, 1985; Frantzich & Nilsson, 2003; Lin & Chuah, 2008; Caliendo, Ciambelli, De Guglielmo, Meo, & Russo, 2013; Fridolf, 2013; Fridolf, Andrée, Nilsson, & Frantzich, 2014; Ingason et al., 2015, p. 371 e.v.). Omdat bij tunnelbrandbestrijding vaak gebruikgemaakt wordt van ventilatie en infraroodcamera's, wordt de belemmering door rook in de brandbestrijdingspraktijk vermoedelijk vaak minder sterk ervaren (Ingason et al., 2015). Hoewel een infraroodcamera slechts een klein deel van het blikveld beslaat en de sensor foutieve interpretaties kan geven door aanwezigheid van ramen, blijkt uit meerdere experimenten dat brandweermensen zich sneller voortbewegen met zo'n camera (IFA, 2016, p. 109 en 119). De IFA adviseert uit te gaan van een snelheid van ongeveer 20 m/min van brandweermensen met ademlucht bij tunnelbrandbestrijding.

1.2.4 Conclusie

Op grond van de bestudeerde literatuur kan worden gesteld dat brandweermensen zich in een met rook gevulde ruimte kunnen voortbewegen tussen de 4,8 en 13,2 m/min. Factoren die deze snelheid lijken te beïnvloeden, zijn zicht en rook(dichtheid), gewicht en gebruiksgemak van uitrusting, beschikbaar materiaal, complexiteit van uit te voeren handelingen en communicatie. Als de brandweermensen getraind zijn om in tunnels op te treden en infraroodcamera's gebruiken, kunnen zij zich – mogelijk - sneller voortbewegen (11-31 m/min).

1.3 Fysieke beperkingen

Het unieke ontwerp van een tunnel (een lange buis) werpt de vraag op of blusmethodes voor gebouwbrandbestrijding of andere afgesloten ruimtes ook effectief en efficiënt zijn in wegtunnels. Mogelijk zijn er concrete limieten of beperkingen verbonden aan de bestrijding van (voornamelijk grote) tunnelbranden (Peeters, 2013).

1.3.1 Bereik blusmiddelen

Hoewel de tunnelomgeving uniek is, zijn er volgens de IFA (2016) geen speciale blusmiddelen nodig voor het bestrijden van tunnelbranden. Voor wat betreft de keuze voor blusmiddelen geeft de IFA aan dat deze gelijk is aan de keuze voor blusmiddelen bij branden in de open lucht, conform de brandklassen.

Er zijn ook geen studies gevonden naar (de effectiviteit, efficiëntie en veiligheid van) verschillende soorten en toepassingen van blusmiddelen (hoge druk, lage druk, schuimvormende middelen etc.) die door de brandweer gebruikt (kunnen) worden bij tunnelbrandbestrijding. Het hier gevonden internationale onderzoek richt zich binnen het terrein van tunnelbrandbestrijding namelijk voornamelijk op *fixed fire suppression systems*, niet op hoe de brandweer de brand zelf met blusmiddelen zou kunnen blussen.

Tabel 1.5 Maximaal bereik van blusmiddelen (gebaseerd op Bergqvist en Lundström, 2003)

Straalpijp	Pompdruk (bar)	Max. afstand van brand (m)	Debiet (l/m ² , min)	Water per m ² op brand (l/m ² , min)
Fogfighter (300 l/min)	5	27	320	40
Fogfighter (300 l/min)	10	32	431	17
TFT-jet (1300 l/min)	5	20	702	26
TFT-jet (1300 l/min)	10	35	946	58
Water monitor (1000 l/min)	5	-	-	-
Water monitor (1000 l/min)	10	-	-	-

Wel kan het bereik van blusmiddelen een issue zijn bij de effectiviteit, efficiëntie van en veiligheid tijdens tunnelbrandbestrijding. Bergqvist en Lundström (2003)¹⁶ voerden tests uit naar de maximale afstand waarover water gespoten kan worden met verschillende straalpijpen in een tunnel van 4,5 meter hoog (in lijn met veel Nederlandse tunnels). De bevindingen wezen uit dat, om de brand te kunnen bereiken (en dus enige mate van effectiviteit te behalen), de straalpijpen niet verder dan 20 tot 35 meter van de brandhaard bediend moesten worden, afhankelijk van druk en debiet.

Kim et al. (2010) onderzochten de optimale (niet de maximale) afstand waarop blusmiddelen effectief zijn in tunnels. Zij concludeerden op grond van experimenten dat voor de effectieve bestrijding van een brand in een tunnel – waar longitudinale ventilatie wordt toegepast – de brandweer idealiter op 4-12 meter afstand van de brand zou moeten staan, afhankelijk van straalpijp, druk en debiet. De optimale werpafstanden voor verschillende straalpijpen waren:

- > Akron straalpijp: 9-12 meter (bij 115-360 l/min en 7 bar),
- > TFT straalpijp 4 meter (bij 320 l/min en 7 bar)
- > Fogfighter straalpijp 10 meter (bij 300 l/min en 7 bar).¹⁷

De onderzoekers gebruikten in hun experimenten een zeecontainer om een vrachtwagen te simuleren en bleven met de straal onder de gesimuleerde tunnelhoogte van 5,23 meter. De optimale aanvalsafstand is volgens de onderzoekers lager wanneer het een personenauto (en dus een lager brandvermogen) betreft. Zij vonden eveneens uit dat hoe hoger het debiet, hoe korter de afstand moet zijn om de brand te kunnen bereiken met de straal.

¹⁶ Zie ook: Rosmuller, Beer, & Gomez (2015).

¹⁷ Voor meer informatie over deze typen straalpijpen, zie: <https://www.akronbrass.com/nozzles> ; <https://www.tft.com/> ; https://en.wikipedia.org/wiki/Fog_nozzle.

1.3.2 Hittestraling

Het tot dichtbij naderen van de brand (4-12 meter) is vaak moeilijk wegens de extreme hitte die van de brand afstraalt. Oud onderzoek van Persson (1990) toont aan dat de pijngrens van brandweermensen, in stilstand en uitgerust met standaard brandweerkleding, wordt bereikt na vijf minuten blootstaan aan een straling van 5 kW/m². Recente analyses van het IFV (2016b) tonen (in lijn met Persson's bevindingen) aan dat voor reguliere brandweerkleding (NEN-EN469) inzet mogelijk is tot een warmtestralingscontour van 4,6 kW/m² en bij het dragen van een gealuminiseerd brandweerpak (NEN-EN1486) 6,3 kW/m². Bij een straling van 2,7 kW/m² wordt de pijngrens van 43°C niet bereikt, maar bij een straling van 3 kW/m² wordt de pijngrens na ruim 7 minuten wel bereikt en bij reguliere kleding treedt hittestuwing op na 20 minuten. Bij testen met *Heavy Goods Vehicles* (HGV's) in de Noorse Runehammertunnel bleek dat op 10 meter van de brand (stroomopwaarts) de straling 9 tot 18 kW/m² was en op 20 meter van de brand 2 tot 3 kW/m² (Lemaire, 2004; Lönnermark & Ingason, 2004) (zie tabel 1.6). De metingen betreffen de hoogst gemeten stralingen, gemeten vanaf het centrum van de brand. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat voor deze testen gebruik gemaakt is van pallets om het brandvermogen te creëren en er mogelijk een verschil is met het scenario waarin daadwerkelijk voertuigen afbranden.

Uit experimenten blijkt bovendien dat het blussen van grote branden (100-200 MW), zoals bijvoorbeeld een grote vrachtwagen of tankwagen, niet altijd mogelijk is vanwege de grootte van de brand, de rook, hittestraling en de daaruit volgende onmogelijkheid om de brand veilig te naderen (Ingason et al., 2005). De onderzoekers die deze experimenten uitvoerden, berekenden op grond van deze parameters (de grens voor geaccepteerde straling stelden zij op 5 kW/m²) dat een veilige werkafstand van een grote tunnelbrand ongeveer 15 tot 20 meter bedraagt.¹⁸ Opereren op een dergelijke afstand betekent dat een hoge waterdruk en veel materiaal nodig zijn om de brand te bereiken (Lönnermark, 2005).

Tabel 1.6 Maximaal gemeten straling in kW/m² tijdens testen in de Runehammertunnel op 5/10/15/20 meter bovenwinds van de brand (gebaseerd op Lönnermark, 2005)

Test	Maximaal brandvermogen	Straling op 5 meter (kW/m ²)	Straling op 10 meter (kW/m ²)	Straling op 15 meter (kW/m ²)	Straling op 20 meter (kW/m ²)
1	202 MW	80	14	-	2
2	157 MW	35	18	-	3
3	119 MW	20	9	-	2
4	66 MW	40	10	4	-

1.3.3 Ademlucht

Ingason et al. (2005) onderzochten in praktijkexperimenten of brandweermensen uitgerust met ademlucht genoeg ademlucht hadden om tunnelbranden van verschillende groottes te blussen. De hoeveelheid ademlucht was in deze experimenten 1600 normaal-liter. Bij branden tot 8 MW bleek die hoeveelheid toereikend. Bij een brand van 25 MW zou bij

¹⁸ Helaas is deze publicatie enkel geheel beschikbaar in het Zweeds en daarom niet inhoudelijk bestudeerd.

efficiënt werken de brand geblust kunnen worden met de aanwezige ademlucht, uiteraard afhankelijk van waar de brand plaatsvindt.

In Nederland bevat de standaard fles ademlucht 1800 normaal-liter. Er wordt uitgegaan van een luchtverbruik van 40-100 l/min afhankelijk van het type zware arbeid (zie tabel 1.7).

Tabel 1.7 Gebruiksduur van een ademfles van 1800 normaal-liter bij verschillend luchtverbruik

Luchtverbruik (l/min)	Duur ademlucht (min) (bij 1800 normaal-liter fles)	Type arbeid
40	45	Normaal (geen hitte, geen rook)
60	30	Middelzwaar (mogelijk enige hitte, rook)
80	22	Zwaar (bijv. in hitte en rook)
100	16	Zwaar (bijv. in hitte en rook)

1.3.4 Conclusie

Uit de bestudeerde literatuur blijkt dat er beperkingen verbonden zijn aan de bestrijding van tunnelbranden (Peeters, 2013). Deze hebben te maken met de afmetingen en vorm van de tunnel, arbeidsveiligheid en functionaliteit (het bereik van de straalpijpen).

Om de brand met de straalpijp te kunnen bereiken, dient de brandweer de brand te naderen op 20 tot 35 meter. Om een optimaal effect van het blussen te sorteren (water op de vlammen), is een afstand van 4 tot 12 meter ideaal bij een tunnel van 5,23 m hoog.

Aangezien Nederlandse tunnels vaak minder hoog zijn en deze afstanden volgen uit een experimentele opstelling die zich buiten een tunnel bevond en waarbij geen brand was, is het wenselijk om aanvullende experimenten in Nederland te verrichten naar de optimale werpafstand bij tunnelbranden. Bij een grote brand van 100-200 MW is (afhankelijk van het brandvermogen en de hittestraling) echter 15 tot 20 meter een veilige werkafstand voor brandweermensen. De hittestraling blijft op 20 meter van een grote brand waarschijnlijk onder de pijngrens (2,7 kW/m²). Wat een veilige afstand is tot kleinere branden (bijvoorbeeld een enkele voertuigbrand), blijkt niet uit de literatuur. Aanvullend onderzoek is nodig om daar conclusies over te kunnen trekken. Bovendien moet nagedacht worden over de beschikbaarheid van voldoende ademlucht. Met 1800 normaal-liter zou een brand van 25 MW geblust kunnen worden, afhankelijk van waar de brand zich bevindt.

1.4 Ventilatie als procedure

Deze paragraaf licht enkele onderzoeken toe met betrekking tot ventilatie en brandbestrijding in wegtunnels. De focus ligt daarbij op de werking en effecten van ventilatie in relatie tot de procedurele en methodische keuzes bij tunnelbrandbestrijding, niet op een technische duiding van ventilatie(systemen). Aan bod komen de toepassing van ventilatie op rookverspreiding, ventilatie bij grote branden, toepassing van mobiele ventilatoren en obstakels. In de meeste Nederlandse wegtunnels zijn vaste ventilatiesystemen aanwezig.

1.4.1 Algemeen

Ventilatie in tunnels is één van de meest onderzochte thema's op het terrein van tunnelveiligheid (Ingason, 2008) en volgens sommigen ook het thema waar de meeste kennis over is ontwikkeld (Carvel, Bishop, & Welch, 2012). Ventilatie kan naast brandontwikkeling ook branduitbreiding, rookontwikkeling, -locatie en –stratificatie beïnvloeden of zelfs beheersen (Carvel, 2016). Vuur heeft immers zuurstof nodig om voort te bestaan en rook maakt gebruik van luchtlagen om zich voort te bewegen. Omdat ventilatie luchtstromen en luchtlagen kan beïnvloeden en zo rook en hitte kan afvoeren, is ventilatie van belang bij (de procedurebepaling van de brandweer tijdens) tunnelbrandbestrijding. Kumm en Bergqvist (2005) stellen dat de mate waarin ventilatie bij tunnelbranden succesvol wordt gebruikt, afhankelijk is van de kennis van de brandweer, de beschikbare vooraf aangebrachte of mobiele ventilatiesystemen en de gekozen procedure bij het bestrijden van het incident. Ergo, ventilatie draagt volgens deze onderzoekers niet altijd bij aan de gekozen procedure.

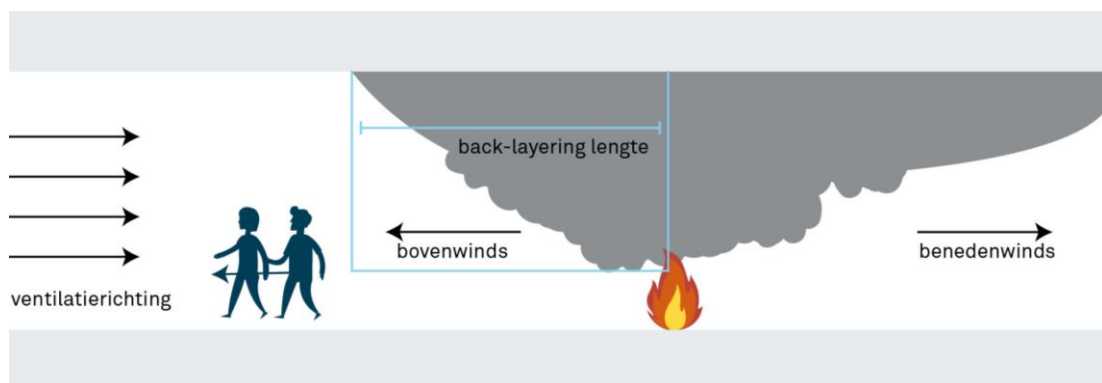
Ventilatiesystemen zijn conform de Wet aanvullende regels veiligheid wegtunnels (Warvw) ingebouwd in vrijwel alle Nederlandse (rijks)tunnels. Ventilatie wordt bij tunnelbranden veelal gebruikt om de rook weg te drijven van personen in nood en de brandbestrijding te ondersteunen (Kumm & Bergqvist, 2005). Er zijn in de kern twee manieren waarop in tunnels geventileerd kan worden: dwarsventilatie (verse lucht wordt de tunnel ingeblazen en rook wordt afgezogen en afgevoerd) en langsventilatie (rook wordt met ventilatoren door de tunnel weggeblazen). Een tussenvorm is semi-dwarsventilatie, er is dan één luchtkanaal aanwezig waarmee lucht ingeblazen of afgezogen kan worden.¹⁹



Afbeelding 1.8 Drie manieren van ventileren in tunnels. Van links naar rechts: dwarsventilatie, semi-dwarsventilatie en langsventilatie

¹⁹ Li en Chow (2003) onderscheiden ook nog *partial (pseudo) transverse* en een combinatie van langsventilatie en semi-dwarsventilatie. De onderzoekers beschrijven voor- en nadelen van al deze ventilatiesystemen.

Langsventilatie stuwt lucht (rook) langs de muren van de tunnelbuis naar buiten. De kritische ventilatiesnelheid (*critical ventilation velocity, CVV*) is de ideale ventilatiesnelheid waarbij die luchtstromen (rook) gecontroleerd kunnen worden (Ingason et al., 2015). Daarvan is sprake wanneer de ventilatie de rook bovenwinds (stroomopwaarts) vrijwel geheel elimineert en voorkomt dat rook zich tegen de ventilatierichting in beweegt. In concreto houdt rook zich dan maar aan één zijde van de brand (benedenwinds) op. Bij te lage ventilatiesnelheid kan rook zich bovenwinds van de brand en tegen de ventilatierichting in bewegen. Dat verschijnsel wordt ook wel *backlayering* genoemd (Carvel et al., 2012). Backlayering kan onder meer implicaties hebben voor het zicht van de brandweer. Bij dwarsventilatie is het wenselijk om rooklagen intact en tegen het plafond te houden. Die rook wordt dan afgevoerd via schachten die zich in het plafond of bovenaan de tunnelmuren bevinden (PIARC, 2008). Er is een grote variëteit aan rekenmethodes waarmee de gewenste ventilatiesnelheden berekend kunnen worden. De verschillen tussen berekeningen worden veroorzaakt door de keuze van (het aantal) factoren die worden meegenomen in de berekeningen, zoals capaciteit van ventilatiestromen, brandvermogen, tunnelgeometrie, overige factoren etc. (Barbato, Cascetta, Musto, & Rotondo, 2014).²⁰



Afbeelding 1.9 Rookverspreiding bij ventilatie (afkomstig van Heidarinejad, Mapar, & Pasdarsahri, 2016)

1.4.2 Grote branden

Carvel, Beard, Jowitt en Drysdale (2001) hebben onderzoek gedaan naar de ventilatie bij grote branden van 100-200 MW (zoals bij *Heavy Goods Vehicles*, afgekort *HGV's*). Daaruit blijkt dat wanneer de ventilatiesnelheid wordt verhoogd, het brandvermogen toeneemt; dat wil zeggen, de brand wordt groter.²¹ Bovendien kan het verhogen van de snelheid van de dwarse luchtstroom bij een HGV-brand de kans op branduitbreiding naar voertuigen benedenwinds doen toenemen (Carvel, Beard, & Jowitt, 2001). Uit dit onderzoek blijkt daarnaast dat het verhogen van de ventilatiesnelheid tijdens een reguliere autobrand het brandvermogen niet doet toenemen. In een volgend onderzoek werden de voornoemde onderzoeken gecombineerd in een computermodel (Carvel, Beard, Jowitt, & Drysdale, 2005). Het computermodel toonde aan dat het verhogen van de dwarsventilatiesnelheid wel het brandvermogen van een HGV-brand kan verhogen, maar - in tegenstelling tot eerder onderzoek - niet per definitie de kans op branduitbreiding naar een nabije HGV doet toenemen. Het model liet namelijk zien dat bij een ventilatiesnelheid van 9 of 10 m/s⁻¹ een afstand van 8 meter niet overbrugd kan worden. Er vindt over die afstand geen aanstraling plaats.

²⁰ Op de rekenkundige kant wordt hier verder niet ingegaan, maar kan Ingason et al. (2015) worden geraadpleegd.

²¹ Zie ook: Carvel (2008).

Opvallend genoeg toonde het model ook aan dat het verhogen van de ventilatiesnelheid van 4 naar 6 m/s⁻¹ de kans op branduitbreiding verhoogt. Op grond van die resultaten concluderen de onderzoekers dat het geen zin heeft om de ventilatiesnelheid na 4 m/s⁻¹ te verhogen, tenzij overgegaan wordt naar 8 m/s⁻¹ of hoger.

De IFA (2016) waarschuwt er - op grond van een Duitse bron - daarentegen wel voor dat ventilatie naast tactische voordelen ook gevaren op kan leveren. Warme rook verspreidt zich door langsventilatie immers sneller en verder (benedenwinds) in de tunnel, in plaats van zich bij het tunnelplafond op te hopen. En als de warme rook afkoelt, zakt deze en kan het zo het zicht in de tunnel bemoeilijken. Bovendien kan langsventilatie volgens de IFA het brandvermogen wel snel vergroten. Een ventilatiesnelheid van 4 m/s⁻¹ kan de brand met een factor zes vergroten (IFA, 2016, p. 72).²²

1.4.3 Mobiele ventilatoren

Uit computersimulaties blijkt dat bij een brand tot 15 MW mobiele ventilatoren genoeg kracht (kunnen) bezitten om luchtstromen te beheersen door rook af te voeren en backlayering te voorkomen (Ingason & Romanov, 2002). Simulaties laten zien dat door middel van ventilatie in een 500 meter lange tunnel de brand binnen een minuut onder controle kan zijn en in een 2000 meter lange tunnel binnen drie minuten. Ingason en Romanov (2002) vonden ook dat de tijd die het kost om die controle van de brand te bewerkstelligen, afhangt van de capaciteit en diameter van de ventilatoren, evenals van de geometrie en lengte van de tunnel. Zij ontwikkelden onderstaande basisvergelijking waarmee de invloed van mobiele ventilatoren op de luchtstroomsnelheid kan worden berekend. Zo kan dus ook worden berekend hoeveel invloed nodig is om de kritische ventilatiesnelheid te bereiken.

$$\rho_0 L \frac{du}{dt} + \frac{1}{2} \rho_0 u^2 (1 + k_L + f_D \frac{L}{D_h}) = \frac{1}{2} \rho_0 U_e^2$$

Waarbij ρ = de luchtdichtheid (kg/m³), L = de tunnellengte in meters, u = de gemiddelde luchtstroomsnelheid in de tunnel, k_L = de ingang verlies coëfficiënt, f_D = de Darcy frictie factor, D_h = de hydraulische diameter van de tunnel en U_e = de luchtstroomsnelheid bij de ingang van de tunnel. De vergelijking kan dus opgelost worden als de luchtstroomsnelheid bij de ingang van de tunnel bekend is. De aannames bij deze vergelijking zijn dat tijd is t = 0 en de temperatuur in de tunnel is gelijk aan die van de buitenlucht.

Obstakels in de tunnel zouden de tijd die het kost om de brand te controleren, kunnen vertragen. Dat de geometrie, de lengte en de breedte van een tunnel de ventilatiesnelheid en dus de kritische ventilatiesnelheid kunnen beïnvloeden, werd in latere studies bevestigd (Vauquelin & Wu, 2006).

Kumm en Bergqvist (2005) stelden op basis van literatuuronderzoek dat mobiele ventilatoren vooral van nut kunnen zijn bij branden in tunnels waar geen vooraf geïnstalleerd ventilatiesysteem aanwezig is of waar het aanwezige systeem niet voldoende capaciteit kan genereren om de luchtstromen te controleren (Kumm & Bergqvist, 2005).

²² De Duitse bron waarop de IFA deze snelheid baseert, is niet onderzocht. Het betreft: Pleß en Seliger (2009). Adequaet ontwerp en functionaliteit van het langsventilatiesysteem zou deze nadelen kunnen ondervangen.

In hoeverre de mobiele ventilatiesystemen daarin succesvol zijn, is volgens de onderzoekers afhankelijk van de capaciteit van de ventilatoren, de geometrie van de tunnel en overige factoren zoals wind van buitenaf of het thermische drijfvermogen (opwaartse druk) van de brand. De onderzoekers hebben vervolgens met behulp van computermodellering (en op basis van de formules van Ingason en Romanov, 2002) de effectiviteit van drie mogelijke opstellingen van mobiele ventilatoren getest:

1. Vier parallelle ventilatoren (maximale snelheid: 30 m³/s). Locatie: één tunnelhoogte in de tunnel.
2. Vier parallelle ventilatoren (maximale snelheid: 8/9 m³/s) mét *tunnel cover*.²³ Locatie: één tunnelhoogte in de tunnel.
3. Eén ventilator (maximale snelheid: 30 m³/s). Locatie: één tunnelhoogte buiten de tunnel.

De resultaten (zie tabel 1.10) van de modelleringen laten zien dat vier mobiele ventilatoren, in de tunnel, met een stroomsnelheid van 8-9 m³/s (1) goed toegepast zouden kunnen worden in tunnels tot 250 meter lang, die een kleine of middelmatige dwarsdoorsnede kennen (10-30 m³) en ongeacht de windsnelheid van tegenstromende wind. Voor langere tunnels vanaf 1000 meter kunnen opstellingen 2 en 3 effectief zijn om de luchtstroom te controleren.

Tabel 1.10 Effectiviteit van diverse opstellingen van mobiele ventilatoren in een tunnel (afkomstig van Kumm en Bergqvist, 2005)

Tunnel lengte → ↓ Tunnel dwarsdoorsnede	250 m	1000 m	2000 m	Windsnelheid tegen de ventilatierichting in
10 m ³	1,2 en 3	1,2 en 3	2 en 3	0 m/s
	1,2 en 3	2 en 3	2 en 3	1 m/s
	1,2 en 3	2 en 3	2 en 3	2 m/s
30 m ³	1,2 en 3	2 en 3	2 en 3	0 m/s
	1,2 en 3	2 en 3	2 en 3	1 m/s
	2 en 3	2 en 3	2 en 3	2 m/s
50 m ³	2 en 3	2 en 3	2 en 3	0 m/s
	2 en 3	2 en 3	2 en 3	1 m/s
	2 en 3	-	-	2 m/s

Vaitkevicius, Colella en Carvel (2016) bestudeerden met computermodellering (Computational Fluid Dynamics, CFD) het luchtweerstandeffect (*throttling effect*) van tunnelbranden, dat groter is naarmate de brand groter is.

²³ Een *tunnel cover* kan over ventilatoren worden geplaatst om te voorkomen dat lucht uit de ventilatoren direct weer terug over de ventilatoren wordt geblazen.

Van dit effect is sprake wanneer een brand zich verzet tegen de luchtstroom. Backlayering is dan een mogelijk, ongewenst resultaat. De auteurs vonden in enkele van negen simulaties (met een brandvermogen variërend van 10 MW tot 90 MW) dat de geometrie van de tunnel, in combinatie met een grote brand, voor een luchtweerstandeffect kan zorgen. Hierdoor werkt ventileren met het standaard aantal ventilatoren waarmee tunnels zijn toegerust, niet altijd optimaal. De auteurs adviseren daarom om bij grotere branden meer mobiele ventilatie in te zetten om zo de luchtstroom te blijven beheersen. Zij geven hierbij geen indicatie voor het benodigde vermogen van de ventilatoren.

1.4.4 Obstakels

Een aantal onderzoekers kwam tot de conclusie dat een obstakel backlayering vermindert en er dus een lagere kritische ventilatiesnelheid (CVV) nodig is om de brand te controleren (zie afbeelding 1.11). Oka en Atkinson (1995) onderzochten met experimenten op schaal (1:10), met een propaanbrander buiten de experimentele constructie, in hoeverre een voertuig in een tunnel invloed heeft op deze snelheid. Zij kwamen tot de conclusie dat wanneer een voertuig ongeveer 12% en 32% van de (dwarsdoorsnede van de) tunnel in beslag neemt, de CVV met respectievelijk 15% en 40-45% afneemt, maar dat de CVV zich onafhankelijk ontwikkelt van het brandvermogen bij grote branden (zoals 150 MW). Een Zweedse simulatie en bijbehorende experimenten toonden aan dat bij langsventilatie backlayering en CVV tijdens een brand met ongeveer 23% afnemen, wanneer er een auto in de tunnel staat die ongeveer 20% van de tunnel (dwarsdoorsnede) in beslag neemt (Li, Lei, & Ingason, 2010). Andere experimenten op kleine schaal (respectievelijk 1:15 en 1:30) en computermodellering lieten eveneens zien, dat bij langsventilatie die de brand direct bereikt, de CVV afneemt wanneer zich voertuigen bovenwinds dichtbij - op 5 cm van - de brandhaard bevinden (Lee & Tsai, 2012; Rojas Alva, Jomaad & Dederichs, 2017). Op ware grootte staat die afstand gelijk aan 75 centimeter.



Afbeelding 1.11 Obstakels in wegtunnels (afkomstig van Rojas Alva, Jomaad en Dederichs, 2017)

Simulaties van Gannouni en Maad (2015) bevestigden deze resultaten en vonden eveneens dat de benodigde CVV lager was naarmate het obstakel zich hoger boven het wegdek bevond. Wanneer de ventilatie de brand niet direct kan bereiken, stijgt de CVV daarentegen volgens experimenten van Lee en Tsai (2012).

Volgens Ingason et al. (2015) staan voertuigen die zich bovenwinds van de brand in de tunnel bevinden in de praktijk ver en los van elkaar en is het effect van die obstakels op backlayering en CVV daarom te verwaarlozen.

Carvel, Bishop en Welch (2012) kwamen tot een andere conclusie. Met computer-modellering onderzochten zij CVV in relatie tot obstakels die zich benedenwinds of boven²⁴ de brand bevinden. Resultaten wezen uit dat, na het (separaat) toevoegen van obstakels, in drie gevallen backlayering ontstond. Uit deze resultaten concluderen de auteurs, dat de CVV benodigd om de rook te controleren hoger is wanneer zich een obstakel in de tunnel bevindt. De auteurs bepleiten daarom dat obstakels moeten worden meegenomen in de berekening van CVV's.

1.4.5 Conclusie

Concluderend blijkt uit deze wetenschappelijke inzichten dat ventilatie een cruciale rol kan spelen in de beïnvloeding van rook en daarmee het zicht en de vrij beschikbare zuurstof in de tunnel tijdens incidenten. Modellen laten zien dat vier mobiele ventilatoren met een snelheid van 8-9 m³/s enkel de luchtstromen in tunnels tot 250 meter en met een dwarsdoorsnede van 10-30 m³ kunnen controleren, bij een tegenwind van 0-2 m/s. Voor langere (1000-2000 meter) en grotere (>50 m³) tunnels zijn vier krachtigere ventilatoren nodig (30 m³/s), bij een tegenwind van 0-2 m/s. Of mobiele ventilatie succesvol is, hangt onder meer af van de capaciteit en diameter van de ventilatoren, de geometrie en lengte van de tunnel, wind van buitenaf en de door thermische effecten veroorzaakte luchtstroming inclusief de rook(laag). Deze resultaten zijn afkomstig van modellen, maar voor zover bekend niet bewezen in praktijkexperimenten. Er is geen aanleiding om te veronderstellen dat de vaste ventilatie in Nederlandse wegtunnels ontoereikend is en de inzet van mobiele ventilatoren genoodzaakt is. De literatuur over de rol van obstakels (auto's, verlaagde plafonds) bij tunnelbranden geeft geen eenduidig antwoord op de vraag of, en zo ja, hoe obstakels de kritische ventilatiesnelheid beïnvloeden. De bestudeerde literatuur betreft voornamelijk modellen en kleinschalige experimenten.

De accuratesse van computermodellering wordt door sommige experts als laag gezien, omdat het model niet alle fysieke factoren kan bevatten waarvan sprake is bij een tunnelbrand. Volgens McAlpine (2010) heerst er een gebrek aan begrip van hoe fysische processen leiden tot de ontwikkeling van modellen die de werkelijkheid pogen te benaderen. Hij pleit er daarom voor niet enkel af te gaan op modellering, maar ook fysische testen uit te voeren.

1.5 Tunnelontwerp en constructiematerialen

Kennis van de impact van hitte en brand op tunnelmaterialen en de stabiliteit van het bouwwerk is van het grootste belang bij de bestrijding van grote tunnelbranden (Ingason et al., 2015). Het is voor procedurele keuzes van de brandweer voornamelijk van belang dat alle betrokken partijen begrip hebben van het ontwerp van de tunnel en de (werking van) de aanwezige veiligheidsvoorzieningen, want: '*The design of the tunnel is only one of many factors in the safety equation. [...] 'safety' cannot be fully designed-in to a tunnel*' (Beard, & Carvel, 2005, p. 477). Een veilig tunnelontwerp kan zeggezegd pas effectief zijn als ook operationele partijen begrijpen *hoe* het ontwerp tot veiligheid leidt en zij dit inzicht meewegen in hun operationele beslissingen.

²⁴ Niet bovenwinds, maar letterlijk boven de brand, zoals een verlaagd plafond

1.5.1 Ontwerpbranden

Om de (maximale) hitte te berekenen waar een tunnelconstructie (en ander materiaal) aan blootgesteld kan worden, wordt door tunnelontwerpers gebruikgemaakt van *design fires* (hierna: ontwerpbranden). Volgens Ingason et al. (2015) bestaat een ontwerpbrand meestal uit een vaste waarde²⁵ die het brandvermogen (HRR) aangeeft in megawatt (MW), een tijdsafhankelijke brandvermogenswaarde of een gestandaardiseerde tijd-temperatuur curve (zoals de ISO 834, de *hydrocarbon curve* of de RWS-curve).

De vaste waarden waarmee gerekend wordt in de bestudeerde literatuur, verschillen (zie tabel 1.12). Ingason (2008) concludeerde aan de hand van meerdere wetenschappelijke onderzoeken dat wanneer een personenvoertuig in een tunnel ontbrandt, dat kan leiden tot een brandvermogen van 1,5-8 MW. Bij een brand met twee personenvoertuigen ligt die waarde tussen 3,5 en 10 MW. Een doorsnee bus bereikt na ongeveer tien minuten een brandvermogen van 30 MW en een HGV na tien tot twintig minuten een brandvermogen van 13 tot 203 MW, afhankelijk van de lading.

Tabel 1.12 Weergave van diverse brandscenario's en bijbehorend brandvermogen waar bij tunnelontwerpen mee gerekend wordt, in bandbreedtes

Brandscenario	Maximaal brandvermogen (in MW)	Tijdsduur tot maximaal brandvermogen (in minuten)
Personenvoertuig	5-10	10
Meerdere personenvoertuigen	3.5-20	20
Bestelbusje	15-30	15
Bus	20-60	10-15
Kleine geladen vrachtwagen	30	-
Grote geladen vrachtwagen (HGV)	50-150	15-20
Plasbrand door een gespecificeerde lekkage van een tankwagen	200-300	-

PIARC (2016) geeft daarentegen aan dat in Nederland vaak gerekend wordt met de volgende gegevens:

- > personenvoertuigbrand (5 MW)
- > bus (20 MW)
- > klein geladen vrachtwagen (30 MW)
- > groot geladen vrachtwagen (100 MW)
- > tankwagen (200 MW).

De Amerikaanse tunnelveiligheidsnorm NFPA 502 (2017) hanteert weer andere categorieën en maximale brandvermogens:

- > personenvoertuigbrand (5 MW)
- > meerdere personenvoertuigen (15 MW)

²⁵ De resultaten van de Runehammertunneltesten gaven bovendien aanleiding voor de NFPA om nieuwe waarden in design fires te hanteren voor wat betreft HGV-branden. Eerdere design fires hielden rekening met 20-30 MW (NFPA 502, versie 2008), terwijl de nieuwe design fires uitgaan van 70-200 MW (NFPA 502, versie 2017).

- > bus (30 MW)
- > HGV (150 MW)
- > tankwagen (300 MW).

Bovenstaande brandscenario's zijn samengevoegd en weergegeven in tabel 1.12 (Ingason, 2008; PIARC, 2016; NFPA 502, 2017).²⁶

1.5.2 Brandwerendheid: beton en asfalt

De temperatuur van branden in tunnels kan hoog oplopen. In praktijkexperimenten in de Memorialtunnel (Massachusetts Highway Department, 1995) en de Runehammertunnel zijn (uitzonderlijk hoge) temperaturen gemeten van 1365-1370°C aan het plafond (Ingason, Lönnermark, & Li, 2011), al werd daar gebruikgemaakt van vrachtwagens en was er dus sprake van een groot brandvermogen. Ook in geval van een kleiner brandvermogen kunnen de temperaturen flink oplopen. Uit modelberekeningen blijkt dat wanneer een voertuigbrand (à 5 MW) dicht tegen de tunnelwand aan plaatsvindt, de temperatuur bij het plafond (tot 20 meter van de brandhaard) kan oplopen tot ongeveer 700°C (Poreh & Garrad, 2000; Li & Chow, 2003). De onderzoekers concluderen bovendien dat de locatie van de brandhaard de brandverspreiding beïnvloedt.

In Nederlandse brandproeven naar de brandwerendheid van beton in tunnels (Efectis, 2015) werd een brand van 200 MW gecreëerd in een testsetting, die zich conform de RWS-brandcurve²⁷ ontwikkelde. In de eerste testen van drie typen gewapend beton zonder hittewerende bekleding, begon de oppervlakkige afspatting van het beton vrij snel. Het doorgaand (destructief) afspatten begon na 10 minuten. In de daaropvolgende testen werden proefstukken gewapend beton bekleed met hittewerende bekleding²⁸ en onder dezelfde condities getest. Deze proefstukken waren iets dikker dan standaard toegepast in Nederlandse rijkstunnels. De resultaten toonden aan dat na ruim twee uur afspatting plaatsvond. De afspatting vond in de twee testen plaats bij respectievelijk 210°C en 230°C (Rijkswaterstaat, 2017). Die temperaturen zijn een stuk lager dan de temperatuur van 380°C die tunneldelen met ROK-beton, zonder overdikte²⁹ (en dus directe blootstelling van de bewapening), maar met hittewerende bekleding in principe zouden moeten kunnen weerstaan. Ook vonden de onderzoekers dat de tijd tussen de start van afspatting en het bloot komen te liggen van de bewapening, korter was dan bij beton zonder hittewerende bekleding (ca. 6-8 minuten) (Rijkswaterstaat, 2017).³⁰ Of in een specifieke tunnel een risico op afspatting bestaat (en na hoeveel tijd), kan met deze resultaten niet worden uitgewezen.

²⁶ In Nederland is het brandvermogen als vaste waarde voor een ontwerpbrand niet opgenomen in het Bouwbesluit, maar wordt bij tunnelontwerpen wel uitgegaan van brandscenario's.

²⁷ De RWS-brandcurve is gebaseerd op het scenario dat een grote tankwagen (200 à 300 MW) in 2 uur leeg brandt. Binnen vijf minuten is de temperatuur 1100°C en ontwikkelt zich nog tot ongeveer 1350°C (Centrum Ondergronds Bouwen, 2014).

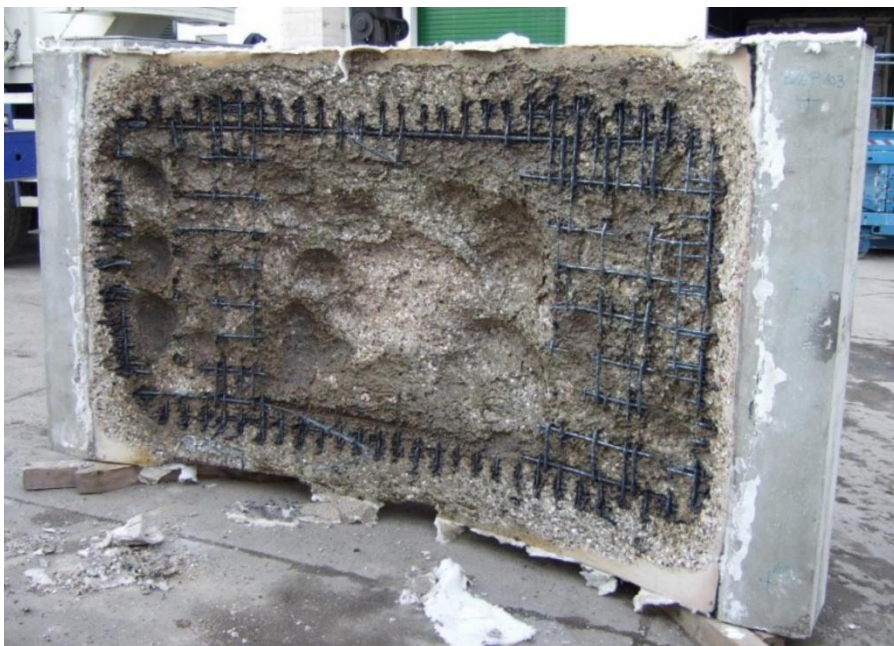
²⁸ Hittewerende bekleding betreft bijvoorbeeld speciale platen, zoals in de Gaasperdamtunnel zijn gebruikt. Zie: <https://bezoekerscentrum.rijkswaterstaat.nl/SchipholAmsterdamAlmere/news/aanbrengen-hittewerende-bekleding-tunnel/#.XJtwLphKjD4>

²⁹ De overdikte is extra dikte die wordt toegevoegd bovenop de benodigde dekking om de wapening voldoende te beschermen tegen (te) hoge temperaturen.

³⁰ Deze resultaten leidden de onderzoekers van Efectis tot de conclusie dat op dat moment voor vier wegtunnels de brandwerendheid niet kon worden aangetoond: de Salland-Twentetunnel (N35), de Ketheltunnel (A4), de Tweede Coentunnel (A10) en de Koning Willem-Alexandertunnel (A2). Rijkswaterstaat heeft met een kwalitatieve risicoanalyse vastgesteld dat er in die tunnels geen extra risico's aanwezig zijn voor vluchtenden.

Rijkswaterstaat noemt testen per tunnel 'noodzakelijk' om die claims te kunnen maken, aangezien het risico afhankelijk is van meerdere specifieke factoren.

Afbeelding 1.13 Indicatie van betonafspatting (afkomstig van Lottman, 2017)



Asfalt kan in sommige gevallen ook aangetast worden door tunnelbranden. Carvel en Torero (2006) vonden in hun experimenten met (proefstukken) asfalt dat in Engelse tunnels wordt gebruikt, dat asfalt naar verloop van tijd kan ontbranden in geval van brand (bij een brandvermogen van 40 tot 60 kW per m²) en daarmee bijdragen aan de brand en branduitbreiding. Bij 40 kW ontbrandde het proefstuk asfalt binnen twee minuten. Bij de testen in de Runehammertunnel zijn op wegdekkniveau, tot op 5 meter afstand benedenwinds van de brandhaard, temperaturen gemeten tot 100 kW/m² (Lemaire, 2004). De onderzoekers vonden dat ontbranding sterk samenhangt met de mix van materialen aan het oppervlak van het asfalt.

1.5.3 Conclusie

Concluderend kan gesteld worden dat de effectiviteit en veiligheid van de brandweerinzet samenhangt met de kennis van de betreffende tunnel (veiligheidssystemen, constructie, ontwerp, et cetera) in de keuze van inzetprocedures. Betonafspat kan optreden na 10 minuten blootstelling aan temperaturen van meer dan 210°C bij ROK-beton zonder hittewerende bekleding en na 16-18 minuten bij ROK-beton mét hittewerende bekleding (Efectis, 2015). Het is nog onbekend hoe andere betonsoorten en -mixen (die gebruikt worden in andere Nederlandse wegtunnels) reageren op brand. Dat is volgens de gevonden literatuur afhankelijk van de betonsoort, locatie van de brand en de bereikte temperatuur. Er zijn indicaties dat asfalt ook kan ontbranden bij hevige brand in tunnels, maar wetenschappelijk bewijs is gering, zeker in de Nederlandse context.

1.6 Blusinstallaties in tunnels

Blusinstallaties in tunnels worden in de internationale literatuur aangeduid met *Fixed Fire Fighting Systems* (FFFS). Er zijn twee soorten systemen: op water gebaseerde en op schuim gebaseerde systemen. Op water gebaseerde systemen zijn vaak sprinklers. Sprinklers kunnen worden onderverdeeld in *water spray systems* (lage druk, relatief grote druppels) en *water mist systems* (hoge druk, kleine druppels). Binnen watermistsystemen wordt nog verschil gemaakt tussen hoge en lage druk systemen (Ingason et al., 2015). Daarnaast kan activering van FFFS gezoneerd plaatsvinden (*deluge system*) of automatisch bij voldoende hitte (per sprinkler). Een gezoneerd waterspraysysteem wordt veelal gebruikt voor het koelen van het brandstofoppervlak, terwijl een watermiststelsysteem voornamelijk de rookgassen zou moeten verdunnen en koelen (PIARC, 2008). Zoals eerder beschreven kan dat laatste effect worden verminderd door ventilatie toe te passen.

Omdat blussystemen in Nederlandse wegtunnels weinig tot niet voorkomen, is overige literatuur op dit thema in deze studie niet geanalyseerd. De geïnteresseerde lezer kan de volgende literatuur raadplegen om meer te weten te komen over blussystemen in wegtunnels.

- > Carvel, R. (2015). A review of tunnel fire research from Edinburgh. *Fire Safety Journal*. Elsevier Ltd. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.02.004>
- > Carvel, R., Rein, G., & Torero, J. L. (2009). Ventilation and suppression systems in road tunnels: some issues regarding their appropriate use in a fire emergency. *2nd International Tunnel Safety Forum for Road and Rail, 20-22 April 2009*, (April), 375–382.
- > Crosfield, R., Cavallo, A., Colella, F., Carvel, R., Torero, J. L., & Rein, G. (2009). Approximate travelling distances of water mist droplets in tunnels. *Proceedings of the International Water Mist Conference, London, September 2009*, 23-24.
- > Fernández Martín, S., Rey Llorente, I. D., Grande Pérez, A., Espinosa Antelo, I., & Alarcón Álvarez, E. (2012). Large Scale Fire Tests for the “Calle 30 Project”. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, New York, March 2012*.
- > Ingason, H., Li, Y.Z., & Lönnemark, A. (2015). *Tunnel fire dynamics*. Springer: New York.
- > Ingason, H., Li, Y. Z., Appel, G., Lundström, U., & Becker, C. (2016). Large Scale Tunnel Fire Tests with Large Droplet Water-Based Fixed Fire Fighting System. *Fire Technology*, 52(5), 1539–1558. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0479-9>
- > Jha, A. (2017). *Impact of Fixed Firefighting Systems on Road Tunnel Resilience* (Doctoral dissertation). The University of North Carolina at Charlotte.
- > Miles, S., Kumar, S., & Chong, K., (2002). Development of a CFD methodology for predicting the combined effect of sprinklers and smoke ventilation in tunnels. *Proceedings Fourth International Conference on Tunnel Fires, 2–4 December, Basel, Switzerland, Tunnel, Management International*, 329–338.
- > Mofidi N., & Manafi M., (2014) CFD Simulation of water mist sprinkler system in Resalat Tunnel of Tehran. *Proceedings of the 14th international water mist conference, Istanbul, Turkey, 2014*.
- > Nmira, F., Consalvi, J. L., Kaiss, A., Fernandez-Pello, A. C., & Porterie, B. (2009). A numerical study of water mist mitigation of tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 44(2), 198–211. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.06.002>
- > PIARC Technical Committee (2008). *Road tunnels: an assessment of fixed fire fighting systems*. World Road Association.

- > PIARC Technical Committee (2016). *Fixed fire fighting systems in road tunnels: Current practices and recommendations*. World Road Association.
- > Sun, J., Fang, Z., Tang, Z., Beji, T., & Merci, B. (2016). Experimental study of the effectiveness of a water system in blocking fire-induced smoke and heat in reduced-scale tunnel tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 34–44. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.005>

2 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk wordt kort teruggeblikt op de hoofdvraag en de antwoorden die daarop zijn gevonden in de internationale literatuur. Tot slot wordt er een aantal aanbevelingen gegeven voor de Nederlandse brandbestrijdingsprocedures, beleid en toekomstig onderzoek.

2.1 Beantwoording hoofdvraag

Deze literatuurstudie was gericht op het beantwoorden van de vraag:

Wat is er in de internationale en Nederlandse literatuur bekend over de aanpak van tunnelbrandbestrijding door de brandweer en welke factoren zijn daarbij van belang?

Op basis van de bestudeerde literatuur zijn de volgende antwoorden op deze vraag te geven.

2.1.1 Doel en inzetprocedure

Allereerst valt op dat de gevonden literatuur over doelmatige en procedurele keuzes bij tunnelbrandbestrijding zich niet vaak baseert op (wetenschappelijke) experimenten, modellering en casestudies (uitzonderingen daargelaten zoals Kim et al., 2010).

Het *doel* van de inzet kan zijn redding, evacueren (mogelijk maken), voorkomen van branduitbreiding binnen/buiten het object, blussing en/of beperken van milieu- en maatschappelijke effecten (Brandweer Nederland, 2014). De in de literatuur voorgestelde doelen zijn onder te brengen in doelen met een meer offensieve (nadruk op brandbestrijding) of meer defensieve focus (nadruk op reddingen), wat lijkt op de indeling van het kwadrantenmodel dat wordt gebruikt voor gebouwbrandbestrijding in Nederland (Brandweer Nederland, 2014), maar zonder het onderscheid binneninzet/buiteninzet.

Ontwikkelde brandscenario-curves in tunnels kunnen een handvat bieden bij de keuze van het doel van de inzet (Kim et al., 2010). Deze scenario's zijn gebaseerd op het type brand, de tijd tussen start van de brand, de interventie door de brandweer en het (potentiële) brandvermogen van het type brand. Op grond van de scenario's stellen Kim et al. (2010) een offensief doel voor bij een enkelvoudige brand, mits de brandweer snel genoeg ter plaatse is en het brandvermogen nog relatief klein is. Vanaf een (potentieel) brandvermogen van 30 MW (vrachtwagen, tankwagen of meerdere voertuigen) stellen zij een defensief doel voor. Bij het succesvol terugdringen van de brand (≤ 30 MW) kan er volgens de Kim et al. (2010) overgegaan worden tot een offensief doel. Welke procedure gevolgd en methode gebruikt zou moeten worden in deze scenario's, is onduidelijk.

Indien de brandweer wil inzetten op offensieve doelen, dan is snelle interventie van belang. In dat geval kunnen snelle, specialistische brandweereenheden die dicht bij de tunnel gestationeerd zijn een voordeel bieden (Carvel & Beard, 2005). In Nederland worden snelle, specialistische brandweereenheden al ingezet bij de Westerscheldetunnel, Sluiskiltunnel en de A2-tunnel bij Maastricht.

De *inzetprocedure* is gedefinieerd als het stappenplan dat gehanteerd wordt om het (strategische) doel te kunnen bereiken en het incident te bestrijden. Voor gebouwbrandbestrijding werkt de brandweer met het kwadrantenmodel dat vier procedures (inzettactieken) kent: defensieve buiteninzet, defensieve binneninzet, offensieve buiteninzet, offensieve binneninzet (Brandweer Nederland, 2014).

De in de literatuur voorgestelde inzetprocedures zijn generiek en lijken qua inhoudelijke activiteiten veel op elkaar, al onderscheidt de IFA afzonderlijke eenheden met specialistische taken en beschrijven de overige onderzoekers enkel gehele eenheden met een set aan taken. Die verschillende procedurele benaderingen laten zich samenvatten in de volgende taken in geval van brand in tunnels met twee tunnelbuizen:

1. Zorg voor voortdurend contact tussen alle hulpdiensten aan beide zijden van de tunnel.
2. Betreed de incidentbuis veilig (afhankelijk van hittestraling/rook/afstand en beschikbare ademlucht) met beschermende kleding, om efficiënt en effectief een beeld van de situatie te krijgen.
3. Blijf tijdens de inzet het effect monitoren en stel de inzet zo nodig bij.
4. Lokaliseer de brand.
5. Stel de luchtstroomrichting vast en (indien veilig) ventileer de tunnel om evacuatie en brandbestrijding te faciliteren, eventueel met mobiele ventilatoren.
6. Bestrijd de brand vanaf een veilige plek, om schade te beperken, eventueel met op afstand bestuurbare blustechnieken (zoals een waterkanon).
7. Zoek, red en ondersteun slachtoffers bij evacuatie en verleen acute geneeskundige hulp in de nabijheid van de brand.

2.1.2 Voortbewegen in rook

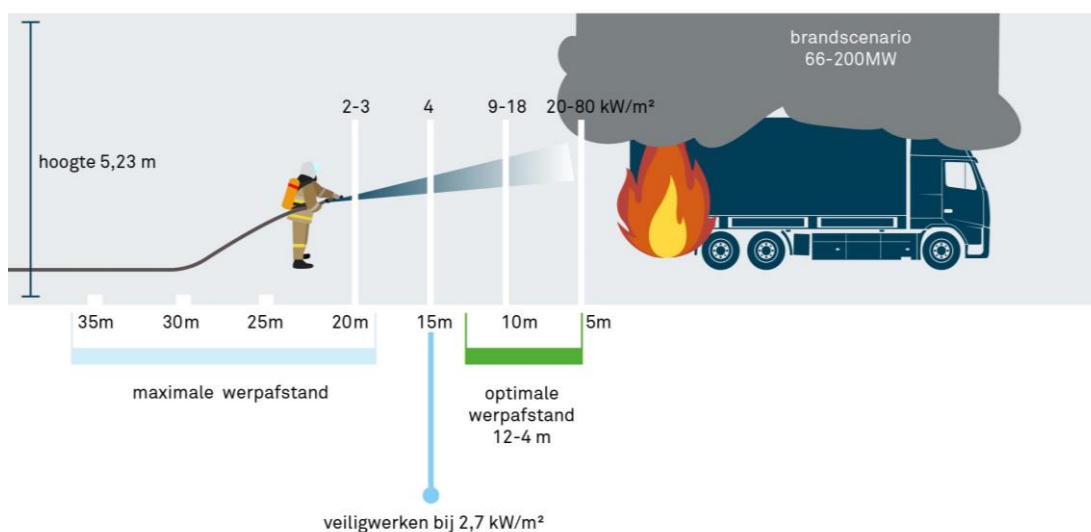
Uit de literatuur blijkt dat brandweermensen zich in een met rook gevulde tunnel kunnen voortbewegen met een snelheid tussen de 5,4-1,2 meter per minuut, maar mogelijk sneller als de brandweermensen getraind zijn om in tunnels op te treden (11-31 m/min). Factoren die deze snelheid lijken te beïnvloeden zijn zicht en rook(dichtheid), gewicht en gebruiksgemak van uitrusting, beschikbaar materiaal, complexiteit van de uit te voeren handelingen en communicatie. Het gebruik van infraroodcamera's kan deze snelheid doen toenemen.

2.1.3 Fysieke beperkingen

Er zijn kwantificeerbare limieten aan de bestrijding van (grote) tunnelbranden. In elk geval wegens de afmetingen en vorm van de tunnel, arbeidsveiligheid en functionaliteit (het bereik van straalpijpen). Om de brand met de straalpijp te kunnen bereiken, dient de brandweer de brand te naderen op 20 tot 35 meter. Om een optimaal effect van het blussen te sorteren (water op de vlammen), is een afstand van 4 tot 12 meter mogelijk ideaal bij een tunnel van iets meer dan 5 meter hoog. Aangezien Nederlandse tunnels vaak minder hoog zijn, is het wenselijk om aanvullende experimenten in Nederland te verrichten naar de optimale werpafstand.

Bij een grote brand van 100-200 MW is echter (afhankelijk van het brandvermogen en de hittestraling) 15 tot 20 meter tot de brand een veilige werkafstand voor brandweermensen.

De hittestraling blijft op 20 meter van een grote brand waarschijnlijk onder de pijngrens ($2,7 \text{ kW/m}^2$). Afbeelding 2.1 vat deze bevindingen samen. Wat een veilige afstand is tot kleinere branden (bijvoorbeeld een enkele voertuigbrand), blijkt niet uit de literatuur. Aanvullend onderzoek is nodig om daar conclusies over te kunnen trekken. Een onbeantwoorde vraag is eveneens voor hoe lang 15-20 meter een veilige afstand is, bij gelijkblijvende omstandigheden, maar zeker ook bij zich ontwikkelende branden. Tevens moet nagedacht worden over de beschikbaarheid over voldoende ademplucht. Zo zijn er indicaties (maar geen garanties) dat 1800 normaal-liter ademplucht toereikend is om een brand van 25 MW te blussen, afhankelijk van de locatie van de brand (Ingason et al., 2005).



Afbeelding 2.1 De bevindingen over fysieke beperkingen

2.1.4 Ventilatie

Ventilatie kan een cruciale rol spelen in de beïnvloeding van rook en daarmee het zicht en de vrij beschikbare zuurstof in de tunnel tijdens incidenten. Modellen laten zien dat vier mobiele ventilatoren met een snelheid van $8-9 \text{ m}^3/\text{s}$ enkel de luchtstromen in tunnels tot 250 meter en met een dwarsdoorsnede van $10-30 \text{ m}^3$ kunnen controleren, bij een tegenwind van $0-2 \text{ m/s}$. Voor langere (1000-2000 meter) en grotere ($>50 \text{ m}^3$) tunnels zijn vier krachtigere ventilatoren nodig ($30 \text{ m}^3/\text{s}$), bij een tegenwind van $0-2 \text{ m/s}$. Of mobiele ventilatie succesvol is, hangt onder meer af van de capaciteit en diameter van de ventilatoren, de geometrie en lengte van de tunnel, wind van buitenaf en de door thermische effecten veroorzaakte luchtstroming inclusief de rook(laag). Deze resultaten zijn afkomstig van modellen, maar voor zover bekend niet bewezen in praktijkexperimenten. De literatuur over de rol van obstakels (auto's, verlaagde plafonds) bij tunnelbranden geeft geen eenduidig antwoord op de vraag of, en zo ja, hoe obstakels de kritische ventilatiesnelheid beïnvloeden. De bestudeerde literatuur betreft voornamelijk modellen en kleinschalige experimenten. De literatuur is evenmin eenduidig over de effecten van ventilatie op kleinere branden: modellen geven aan dat het aannemelijk is dat het verhogen van de ventilatiesnelheid tijdens een reguliere autobrand het brandvermogen niet doet toenemen (Carvel et al., 2005), terwijl andere bronnen melden dat een ventilatiesnelheid van $4 \text{ m}^3/\text{s}$ de brand met een factor zes kan vergroten (IFA, 2016).

De accuratesse van computermodellering wordt door sommige experts als laag gezien, omdat het model niet alle fysieke factoren kan bevatten waarvan sprake is bij een tunnelbrand. Volgens McAlpine (2010) is er een gebrek aan begrip van hoe fysieke processen leiden tot de ontwikkeling van modellen die de werkelijkheid pogen te benaderen. Fysieke testen zijn daarom aan te raden om modellen te testen.

2.1.5 Tunnelontwerp en constructiemateriaal

De effectiviteit en veiligheid van de brandweerinzet bij tunnelbranden hangt ook samen met de aanwezigheid van specifieke kennis bij de brandweer van de betreffende tunnel (veiligheidssystemen, constructie, ontwerp etc.), in inzetprocedures en tactische keuzes ter plaatse. Betonafspat kan optreden na 10 minuten blootstelling aan temperaturen van meer dan 210°C bij ROK-beton zonder hittewerende bekleding en na 16-18 minuten bij ROK-beton mét hittewerende bekleding (Efectis, 2015). Het is nog onbekend hoe andere betonsoorten en -mixen (die gebruikt worden in andere Nederlandse wegtunnels) reageren op brand. Dat is volgens de gevonden literatuur afhankelijk van de betonsoort, locatie van de brand en de bereikte temperatuur. Dat is volgens de gevonden literatuur afhankelijk van de betonsoort, locatie van de brand en de bereikte temperatuur. Er zijn indicaties dat asfalt ook kan ontbranden bij hevige brand in tunnels, maar wetenschappelijk bewijs is gering, zeker in de Nederlandse context. Voor zover bekend zijn hitteproeven met asfalt dat gebruikt wordt in Nederland niet verricht.

2.2 Aanbevelingen voor praktijk, beleid en onderzoek

2.2.1 Onderzoek operationele inzet bij tunnelbranden

De bestudeerde (wetenschappelijke) literatuur aangaande tunnelbrandbestrijding richt zich op twee domeinen. Een overgroot deel van deze literatuur betreft afzonderlijke factoren, zoals rookontwikkeling, ventilatie, brandontwikkeling, *design fires*, tunnelconstructies en risicobeoordelingen (en in zekere mate hun interactie-effecten). Daarnaast worden algemene strategieën en inzetacties aangedragen, die veelal gebaseerd lijken te zijn op ervaringen van experts. Hoe de brandweer ter plaatse risico-inschattingen moet maken van de aanwezige risico's en ontwikkelingen is tot op heden een onderbelicht thema in de literatuur (Kim et al., 2010). Tot op zekere hoogte is dat logisch, omdat elke tunnelbrand anders is en algemene handvatten tekort zouden doen aan de complexiteit van de situatie. Verder onderzoek naar het beslissingsproces bij complexe incidenten en calamiteiten in tunnels is aan te bevelen. Hierbij gaat het onder meer om de strategische, tactische en methodische afwegingen en keuzes die de brandweer moet maken in een complexe werkomgeving. Daarbij kunnen nieuwe inzichten in situationele commandovoering³¹ onder brandweermensen mogelijk van nut zijn.

2.2.2 Nieuwe brandstoffen, nieuw onderzoek

De bestudeerde wetenschappelijke onderzoeken richten zich met name op brandscenario's waarbij geëxperimenteerd of gerekend wordt met een brandvermogen van een personenauto, vrachtwagen of tankwagen. In sommige experimenten is gebruikgemaakt van (plastic en houten) pallets om het brandvermogen van deze voertuigen te simuleren, zoals in de Runehammertesten.

³¹ Zie onderzoeken van het IFV naar situationele commandovoering:

<https://www.ifv.nl/adviesennovatie/Paginas/Onderzoek-Situationele-commandovoering-bij-de-brandweer-gepubliceerd.aspx>

In de bestudeerde onderzoeken is opvallend weinig aandacht geschonken aan brandscenario's waarbij sprake is van (een combinatie van) 'nieuwe brandstoffen' zoals LPG, LNG, CNG, elektriciteit en waterstof. In het licht van de energietransitie en de al lopende ontwikkelingen wat betreft het gebruik van deze brandstoffen, is het zinvol om onderzoek uit te voeren naar de effecten ervan in geval van een tunnelbrand. Voortschrijdend (wetenschappelijk) inzicht leert namelijk dat (plas- of voertuig)branden waarbij sprake is van fossiele brandstoffen zich anders gedragen dan branden met deze nieuwe brandstoffen (TNO, 2012). Hoewel het brandvermogen waarmee gerekend dient te worden wellicht niet aanzienlijk zal veranderen, verschillen mogelijk wel overige kenmerken (het brandgedrag, de rookontwikkeling, de arbeidsveiligheidsgevaren e.d.) van branden met fossiele brandstoffen. Indien dat het geval is, hebben die verschillen zeker invloed op de (operationele) risicobeoordelingen en tactische en methodische keuzes van de brandweer, die de tunnelbrand probeert te onder controle te krijgen.

2.2.3 Landelijke uitgangspunten

Elke tunnelbrand is uniek. Toch heeft deze literatuurstudie aangetoond dat er een aantal algemene factoren van wezenlijk belang is bij tunnelbrandbestrijding. Het is aanbevelenswaardig om op landelijk niveau afspraken te maken over generieke strategische en tactische uitgangspunten – per fase van de incidentbestrijding – gebaseerd op deze (wetenschappelijke) inzichten, om zo het beleid op tunnelbrandbestrijding meer theoretische en empirische onderbouwing te geven. Daarnaast kunnen deze inzichten op regionaal niveau worden gebruikt om incidenten- en calamiteitenbestrijdingsplannen op te stellen. Het is daarbij van belang uit te gaan van bevindingen die empirisch onderbouwd zijn.

Literatuur

Wetenschappelijke literatuur

Rojas Alva, W. U., Jomaas, G., & Dederichs, A.S. (2017). The influence of vehicular obstacles on longitudinal ventilation control in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 87, 25–36. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.11.001>

Alvares, N., Hasegawa, H., & Staggs, K. (2016). Ignition, Heat Release Rate and Suppression of Elastomeric Materials. *Fire Technology*, 52(5), 1575–1593. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0483-0>

Barbato, L., Cascetta, F., Musto, M., & Rotondo, G. (2014). Fire safety investigation for road tunnel ventilation systems - An overview. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Elsevier Ltd. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.012>

Beard, A., & Carvel, R. (2005). *The Handbook of Tunnel Fire Safety*. 1st Edition, ICE Publishing, London. ISBN 978-0-7277-4153-0.

Beard, A., Cope, D. (2007). *Assessment of the Safety of Tunnels. Study*. Final Report for the STOA (Science and Technology Options Assessment) Project. European Parliament, May 2007.

Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K., & Ingason, H. (2001). *Reddingsoperaties bij tunnelbranden; Räddningsinsatser vid tunnelbränder: probleminventering och miljöbeskrivning vid brand i spårtunnel*. The Swedish Rescue Services Agency, SRV report P21-391/01, 2001.

Brandweer Nederland (2014). *Kwadrantenmodel voor gebouwbrandbestrijding*. Brandweer Nederland: Arnhem.

Caliendo, C., Ciambelli, P., De Guglielmo, M. L., Meo, M. G., & Russo, P. (2013). Simulation of fire scenarios due to different vehicle types with and without traffic in a bi-directional road tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 22–36. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.03.004>

Carvel, R. (2015). A review of tunnel fire research from Edinburgh. *Fire Safety Journal*, December 16. Elsevier Ltd. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2016.02.004>

Carvel, R. O., Beard, A. N., Jowitt, P. W., & Drysdale, D.D. (2001). Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels. *Fire Safety Journal*, 36(6), 569–596. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(01\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(01)00010-8)

Carvel, R. O., Beard, A. N., Jowitt, P. W., & Drysdale, D.D. (2005). Fire size and fire spread in tunnels with longitudinal ventilation systems. *Journal of Fire Sciences*, 23(6), 485–518. Retrieved from <https://doi.org/10.1177/0734904105052578>

Carvel, R., & Marlair, G. (2011). Accidental fires in tunnels: a history. In: A. Beard, R. Carvel (Eds.), *Handbook of Tunnel Fire Safety* (2nd Ed.), ICE Publishing, 3-23.

Centrum Ondergronds Bouwen (2014). *Handboek Tunnelbouw*.

Efectis (2015). *Investigation into the fire in the Heinenoordtunnel on 21 may 2014*. Efectis Nederland BV.

Frantzich, H., & Nilsson, D. (2003). Fire Safety Engineering and Systems Safety; Utrymning genom tät rök: beteende och förflyttning. *LUTVDG/TVBB--3126—SE, Volume 3126*.

Fridolf K. (2013). *Evacuation of a Smoke Filled Tunnel: Human Behaviour, Movement Speed and Exit Choice*. Lund University: Lund.

Fridolf, K., Andrée, K., Nilsson, D., & Frantzich, H. (2014). The impact of smoke on walking speed. *Fire and Materials*, 38(7), 744–759. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/fam.2217>

Heidarinejad, G., Mapar, M., & Pasharshahi, H. (2016). A comprehensive study of two fire sources in a road tunnel: Considering different arrangement of obstacles. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 59, 91–99. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.06.016>

IFV (2014). *Kwadrantenmodel voor gebouwbrandbestrijding*. IFV: Arnhem.

IFV (2016). *Handreiking voorbereiding Tunnelincidentbestrijding. Inventarisatiefase. Versie 2, 4 oktober 2016*, IFV: Arnhem.

IFV (2016b). *Maximum allowable exposure to different heat radiation levels*. IFV: Arnhem

IFV (2018). *Handreiking incidentbestrijding wegtunnels. Ter voorbereiding op de samenwerking tussen Rijkswaterstaat en hulpverleningsdiensten*. IFV: Arnhem.

IFV (2019). *Handvatten voor de bevelvoerder bij tunnelbrandbestrijding*. IFV: Arnhem

Ingason, H. (2008). State of the art of tunnel fire research. *Fire Safety Science*, 9, 33-48.

Ingason, H, Bergqvist A., Lönnemark A., Frantzich H., & Hasselrot, K. (2005). Rescue Operation in Road Tunnels; Räddningsinsatser i vägtunnlar. *Räddningsverket, P21-459/05*.

Ingason, H., Kumm, M., Nilsson, D., Lönnemark, A., Claesson, A., Li, Y. Z., & Forsén, R. (2012). *The METRO project*.

Ingason, H., Lönnemark, A., Frantzich, H., & Kumm, M. (2010). *Fire Incidents during construction work of tunnels*. SP Technical Research Institute of Sweden.

Ingason, H., Li, Y. Z., Appel, G., Lundström, U., & Becker, C. (2016). Large Scale Tunnel Fire Tests with Large Droplet Water-Based Fixed Fire Fighting System. *Fire Technology*, 52(5), 1539–1558. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0479-9>

- Ingason, H., Li, Y. Z., & Lönnemark, A. (2015). *Tunnel fire dynamics*. *Tunnel Fire Dynamics* (pp. 1–504). Springer New York. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2199-7>
- Ingason, H., & Li, Y. Z. (2017). Spilled liquid fires in tunnels. *Fire Safety Journal*, *91*, 399–406. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.065>
- Ingason H, & Romanov, L. (2002). *Use of Mobile Fans in Tunnels*. SP Report 2002:06, ISBN 91-7848-895-8
- Jin, T., & Yamada, T. (1985). Irritating effects of fire smoke on visibility. *Fire Science and Technology*, *5*(1), 79-90.
- Kim, H. K., Lönnemark, A., & Ingason, H. (2010). *Effective Firefighting Operations in Road Tunnels*. *Fire Technology*, *89*. Retrieved from <https://doi.org/10.1259/bjr/63333975>
- Lee, D. H., Park, W. H., Hwang, J., & Hadjisophocleous, G. (2016). Full-Scale Fire Test of an Intercity Train Car. *Fire Technology*, *52*(5), 1559–1574. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0482-1>
- Lee, Y. P., & Tsai, K. C. (2012). Effect of vehicular blockage on critical ventilation velocity and tunnel fire behavior in longitudinally ventilated tunnels. *Fire Safety Journal*, *53*, 35–42. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.06.013>
- Li, J.S.M., & Chow, W.K. (2003). Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems. *Tunneling Underground Space Technology*, *18*(5), 435-452.
- Li, Y. Z., & Ingason, H. (2016). A New Methodology of Design Fires for Train Carriages Based on Exponential Curve Method. *Fire Technology*, *52*(5), 1449–1464. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0464-3>
- Lin, C. J., & Chuah, Y. K. (2008). A study on long tunnel smoke extraction strategies by numerical simulation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *23*(5), 522–530. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.09.003>
- Lönnemark, A. (2005). *On the Characteristics of Fires in Tunnels*. Department of Fire Safety Engineering, Lund Universiteit: Lund.
- Lönnemark, A., & Ingason, H. (2005). Gas temperatures in heavy goods vehicle fires in tunnels. *Fire Safety Journal*, *40*(6), 506–527. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.05.003>
- Meacham, B., & Custer, R. (1995). Performance-Based Fire Safety Engineering: An Introduction of Basic Concepts. *Journal of Fire Protection Engineering*, *7*(2), 35–53. Retrieved from <https://doi.org/10.1177/104239159500700201>
- Njå, O., & Svela, M. (2018). A review of competencies in tunnel fire response seen from the first responders' perspectives. *Fire Safety Journal*, *97*, 137–145. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.005>

Oka, Y., & Atkinson, G.T. (1995). Control of smoke flow in tunnel fires. *Fire Safety Journal*, 25(4), 305-322.

Palm, A., Kumm, M., & Ingason, H. (2015). Full Scale Firefighting Tests in the Tistbrottet Mine. *Fire Technology*, 52(5), 1519–1537. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0476-z>

Peeters, P. (2013). *Karakteristieke tunnelincidentscenario's. Bachelorscriptie*. Instituut voor Engineering, Hanzehogeschool Groningen: Groningen.

Persson, H. (1990). *Basustrustning för skumsläckning - Försöksresultat och rekommendationer som underlag för dimensionering och utförande*. SP Swedish National Testing and Research Institute, SP RAPPORT 1990:36, Borås, Zweden (in Zweeds).

Poreh, M., & Garrad, G. (2000). Study of wall and corner fire plumes. *Fire Safety Journal*, 34(1), 81–98. Retrieved from [https://doi.org/10.1016/S0379-7112\(99\)00040-5](https://doi.org/10.1016/S0379-7112(99)00040-5)

Rijkswaterstaat (2000). *Tunnelbranden – Een literatuurstudie naar brandproeven en echte branden in tunnels*.

Rosmuller, N., Beer, G., & Gomez, R. (2005). *SafeT. Work package 3. Task 3.1, 3.2 and 3.3 Evacuation and intervention management*.

Stolz, A. & Ruiz-Ripoll, M. L. (2016). Experimental and Computational Characterization of Dynamic Loading and Structural Resistance of Tunnels in Blast Scenarios. *Fire Technology*, 52(5), 1595–1618. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0496-8>

Sun, J., Fang, Z., Tang, Z., Beji, T., & Merci, B. (2016). Experimental study of the effectiveness of a water system in blocking fire-induced smoke and heat in reduced-scale tunnel tests. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 56, 34–44. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.02.005>

TNO (2012). *De statistische kans op brand in tunnels*. TNO: Delft.

Vaitkevicius, A., Colella, F., & Carvel, R. (2016). Investigating the Throttling Effect in Tunnel Fires. *Fire Technology*, 52(5), 1619–1628. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10694-015-0512-z>

Vauquelin, O. & Wu, Y. (2006). Influence of tunnel width on longitudinal smoke control. *Fire Safety Journal*, 41(6), 420–426. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.02.007>

Congresliteratuur en vakliteratuur

Brandweer Zuid-Limburg (2016). Rapportage tunneloefeningen Zwitserland. *Focus* (4), 2-7.

Bergqvist, A. (2003). What can the fire brigade do about catastrophic tunnel fires?, *Proceedings of International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), Borås, Sweden*, 161–175

Bergqvist A. & Lundström, U. (2003). Throw tests. *Stockholm Fire Service, July 2003*.

Carvel, R. (2008). Design fires for tunnel water mist suppression systems. *Proceedings of 3rd International Symposium on Tunnel Safety and Security, Stockholm*, 163–171. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1842/3518>.

Carvel, R.O., Beard, A.N., & Jowitt, P.W. (2004) The influence of longitudinal ventilation on fire spread between HGV fires in tunnels. *Proceedings of the 5th International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels, London, October 2004*, 307-319.

Carvel, R.O., Bishop, D., & Welch, S. *The influence of blockages on backlayering in tunnel fires: A numerical study*. ISTSS 2012.

Carvel, R.O., Rein, G., & Torero, J.L. (2009). Ventilation and suppression systems in road tunnels: some issues regarding their appropriate use in a fire emergency. *Proceedings of the 2nd International Tunnel Safety Forum for Road and Rail, 20-22 April 2009*, 375-382.

Carvel, R.O. & Torero, J.L. (2006). The Contribution of Asphalt road surfaces to fire risk in tunnel fires: Preliminary Findings. *Proceedings of the International Conference Risk and Fire Engineering for Tunnels, Stations and Linked Underground Spaces, 19-20 April 2006, Hong Kong, Organised by Tunnel Management International*, 83-87. ISBN: 1 901808 25 4

Crosfield, R., Cavallo, A., Colella, F., Carvel, R., Torero, J. L., & Rein, G. (2009). Approximate travelling distances of water mist droplets in tunnels. *Proceedings of the International Water Mist Conference, London, September 2009*, 23-24.

Fernández Martín, S., Rey Llorente, I. D., Grande Pérez, A., Espinosa Antelo, I., & Alarcón Álvarez, E. (2012). Large Scale Fire Tests for the “Calle 30 Project”. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Tunnel Safety and Security, New York, March 2012*.

Ingason, H., (2008_). State of the art of tunnel fire research. *Proceedings of the 9th International Symposium on Fire Safety Science, Karlsruhe, Germany, 2008*, 33-48.

Kumm, M. (2006). *Tunnel fire in Eurotunnel Link under construction 17th of August 2005*. Mälardalen University, Working paper MdH ISt.

Kumm, M. (2010). Rescue operations during construction of tunnels – a study of the fire and rescue services possibilities and their interaction with the tunnel contractor; Räddningsinsatser under byggnation av tunnlar – en studie av räddningstjänstens möjligheter och dess interaktion med tunnelentreprenören, in *SiST – Studies in Sustainable Technology 2010:11*. 2010, Mälardalen University.

Kumm, M. & Andreasson, R. (2009). *Emergency Exercise Hallandsås Tunnel*, 7th of November 2008.

Kumm, M. & Bergqvist, A. (2005) *Mobile Ventilation as a Tactic Resource at Tunnel Fires*.

Kumm, M. & Bergqvist, A. (2010). Fire and Rescue Operations during Construction of Tunnels. In A. Lönnermark, & H. Ingason (Eds.), *Proceedings of the Fourth International Symposium on Tunnel Safety and Security*, 383–392. Retrieved from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:318344/FULLTEXT01.pdf>

Lemaire, T. (2004). Runehammar Tunnel Fire Tests: Radiation, Fire Spread and Back Layering, *International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF)*, SP Report 2004:05, Borås, Sweden, 20-21 November, 2003, 105-116.

Lönnermark, A. & Ingason, H., 2003. Large Scale Fire Tests in the Runehammar Tunnel - Gas Temperature and Radiation, *International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF)*, Borås, Sweden, 20-21 November, 2003, SP Report 2004:05, 93-103.

McAlpine, J. D. (2010). Computational fluid dynamics or wind tunnel modeling. *Envirometrics, Inc*, 1–5.

Mofidi, N. & Manafi M., (2014) CFD Simulation of water mist sprinkler system in Resalat Tunnel of Tehran, *14th international water mist conference- Istanbul, Turkey, 2014*.

Wahlstrom, B. (2004). Engineering solutions for rescue and fire-fighting. *SP RAPPORT-STATENS PROVNINGSANSTALT*, 187-192.

Beleidsdocumenten en leerstof

International Fire Academy (2006). *Bericht über die Versuche vom 11.04.2006*. Unpublished internal document.

International Fire Academy (2016). *Firefighting Operations in Road Tunnels. Tactics – Techniques – Background*. Saulheim: Kehsler Verlag.

Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration (1995). *Memorial tunnel fire ventilation test program*.

NFPA 502 (2017). *Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*.

PIARC Technical Committee (2008). *Road tunnels: an assessment of fixed fire fighting systems*. World Road Association.

PIARC (2016). *Design fire characteristics for road tunnels*. World Road Association: Singapore.

Pleiß, G., & Seliger, U. (2009). *Untersuchung der Bedingungen für die Feuerwehren bei der Bekämpfung von Bränden in Verkehrstunneln unter Berücksichtigung der in den Risikoanalysen der OECD-PIARC zugrundeliegenden Brandszenarien für verschiedene Unfälle*.

Rijkswaterstaat (2017). *Memo: toelichting bij resultaten brandproeven augustus 2017*.

SOLIT (2012). *Engineering guidance for a comprehensive evaluation of tunnels with fixed firefighting systems*. Scientific report of the SOLIT² research project, prepared by the SOLIT² consortium.

The Stationary Office, Department for Communities and Local Government (2013). *Fire and Rescue Authorities Operational Guidance. Generic Risk Assessment 2.7, Rescues from tunnels and underground structures*. UK: Stationary office.

Websites

<http://www.a2maastricht.nl/nl/vraag-en-antwoord/vraag-en-antwoord-hoe-gaat-tunnel-functioneren/tunnel-brand.aspx#vraag7>

<http://www.a2maastricht.nl/nl/nieuwsberichten/nieuws-op-homepage/2016/voorbereidingen-brandweer.aspx>

<https://www.cob.nl/magazines-brochures-en-nieuws/verdieping/mei-2018/gesprekstafels-aan-de-slag-met-brandwerendheid-tunnels/>

http://www.ctif.no/uploads/2017_Tunellbrannseminar/VOGT_Tunneltraining_under_realistic_condition.pdf

<http://www.ifa-swiss.ch/en/ifa-uva.html>

<https://www.ifv.nl/kennisplein/Documents/20150422-kpt-bijeenkomst-evaluatie-incident-heinenoordtunnel.pdf>

<https://www.kennisplatformtunnelveiligheid.nl/wp-content/uploads/2018/03/Presentatie-16-11-2017-KPTv3-Ron-Albert.pdf>

<https://www.kennisplatformtunnelveiligheid.nl/wp-content/uploads/2018/03/Verslag-bijeenkomst-Betonperikelen-16-11-2017-def.pdf>

<https://www.kennisplatformtunnelveiligheid.nl/wp-content/uploads/2018/03/Tunneloverzicht.pdf>

<https://www.nen.nl/NEN-Shop/Actuele-themas-Gas-Water/Fire-Safety-Engineering-FSE.htm>
<https://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/wegbeheer/tunnels/betonkwaliteit/index.aspx>

https://staticresources.rijkswaterstaat.nl/binaries/20171207%20oplegnotitie%20proeven%20augustus%20def_tcm21-132511.pdf

https://www.veiligheidsregiozeeland.nl/sites/veiligheidsregiozeeland/files/2018-03/20150226_ibp_wegtunnels_v_1.0.pdf

Bijlage 1 Begrippenlijst

Hieronder worden de termen en afkortingen beschreven die in deze literatuurstudie veel worden gebruikt.

Begrip	Beschrijving
Backlayering	Het terugstromen van rook en gassen tegen de ventilatiestroom in.
Benedenwinds (of benedenstrooms)	Voorbij het incident of de uitgang van de tunnel, gezien vanuit de rijrichting.
Betonafspat	Als gevolg van een brand in de tunnel en derhalve de hoge temperatuur het vergruizen/afbrokkelen/losraken van betondelen (enkele centimeters en groter) van de tunnelwand/het tunnelplafond.
Betonperikel	Tunnel waarvan bekend is dat de brandwerendheid niet gegarandeerd is gedurende de wettelijke eis van 60 minuten (landtunnel) of 120 minuten (onderwatertunnel).
Bovenwinds (of bovenstrooms)	Vóór de ingang van de tunnel of het incident gezien vanuit de rijrichting mee.
Branduitbreiding	Uitbreiding van een brand naar andere voertuigen of lading/goederen, waardoor de omvang en de intensiteit van de brand substantieel toeneemt.
Calamiteit	Een ernstig incident, waarbij sprake is van: > beknelling en/of ernstig gewond zijn van personen (zodanig dat de hulp van de brandweer nodig wordt geacht) > brand of > het vrijkomen van gevaarlijke stoffen.
Critical Ventilation Velocity (CVV of kritische ventilatiesnelheid)	De minimale luchtsnelheid die nodig is in geval van brand om rookverspreiding, tegen de langsventilatie richting in, tegen te gaan.
Computational Fluid Dynamics (CFD)	Een methode om gas-/vloeistofstroming en energietransport te visualiseren/kwantificeren en het effect van stroming op omgeving zichtbaar te maken.
Doel	Het beoogde doel van de repressieve inzet, zoals redding, evacueren (mogelijk maken), voorkomen van branduitbreiding binnen/buiten het bouwwerk, blussing en/of beperken van milieu- en maatschappelijke effecten (kwadrantenmodel; Brandweer Nederland, 2014) en het generieke plan om dat doel te bereiken (Kim et al., 2010).

Heat Release Rate (HRR)	Het brandvermogen.
Heavy Goods Vehicles (of HGV of Large Goods Vehicle (LGV) of Medium Goods Vehicle)	Term die in de Europese Unie wordt gehanteerd voor elke truck met een gross combination mass (GCM) van meer dan 3,500 kilo (Wikipedia).
Incidentbuis	De tunnelbuis waarin zich het incident voordoet.
Inzetprocedure	Het stappenplan dat gehanteerd wordt om het (strategische) doel te kunnen bereiken en het incident te bestrijden. Voor gebouwbrandbestrijding kent de brandweer het kwadrantenmodel, dat vier inzetacties voorstelt, afhankelijk van het gekozen strategische doel: defensieve buiteninzet, defensieve binneninzet, offensieve buiteninzet, offensieve binneninzet (Brandweer Nederland, 2014).
Methode	De operationele benodigheden voor het uitvoeren van de procedure, zoals acties, mensen, middelen, structuur, resultaten etc.
Noodbuis (of servicebuis of vluchtbuis)	Buis waardoor personen kunnen vluchten en die gebruikt kan worden door hulpdiensten.
Ondersteunende buis (of veilige buis, niet-incidentbuis, nevenbuis)	Een voor het verkeer afgesloten (naastgelegen) buis waarmee in het geval van een calamiteit aan de hulpverleningsdiensten een veilige aanvalsroute en werkomgeving kan worden geboden. Daarnaast kan, in specifieke situaties, deze buis ook als vluchtbuis worden gebruikt (dit is het geval in de Salland-Twentetunnel te Nijverdal). De ondersteunende buis staat in directe verbinding met de incidentbuis.
Incident	Elke gebeurtenis die de capaciteit van de weg nadelig beïnvloedt of kan beïnvloeden en als zodanig de doorstroming van het verkeer belemmert of kan belemmeren, uitgezonderd pechgevallen op de vluchstrook voor zover sprake is van een aanvaardbaar risico ten aanzien van de doorstroming en de veiligheid van het overige verkeer. NB Het Handboek voorbereiding rampenbestrijding hanteert een andere definitie van incident.
Throttling effect	Het verschijnsel waarbij rook zich tegen de luchtweerstand verzet. Dit kan leiden tot backlayering.
Tunnel	Het geheel van tunnelbuizen, installatieruimten en (indien aanwezig) middentunnelkanaal binnen het omsloten deel van de weg, zijnde langer dan 250 meter.
Tunnelbuis (of verkeersbuis)	Buis die onderdeel is van een tunnel en waarin verkeer kan rijden.
Tunnelbrand	Elke brand die start binnen de tunnel, inclusief de technische ruimtes, exclusief de verdiepte ligging en toe- en uitritten.
Tunnelbrandbestrijding	Alle maatregelen die getroffen kunnen worden na het ontdekken van een brand, welke gericht zijn op het blussen of

	beperken van de brand, voorkoming of beperking van ongevallen en slachtoffers, evenals het redden van slachtoffers.
Voertuigbrand	Het branden van een personenvoertuig, bestelbusje, motorcompartiment van een bus of cabine van een vrachtwagen. Dus geen brandende lading.
Wapening	De ijzeren staven die zorgen voor de afdracht van de trekspanningen in de tunnelwand.

Bijlage 2 Belemmerende factoren bij tunnelbrandbestrijding

De bestrijding van tunnelbranden verschilt significant van brandbestrijding in bijvoorbeeld woningen of andere afgesloten ruimten. Denk bijvoorbeeld aan mogelijk langere aanrijd- of looproutes en de beperkte toegang naar en terugtocht van de brand. Tabel 1.1 geeft een overzicht van belemmerende factoren die in de literatuur worden geassocieerd met tunnelbrandbestrijding in (weg)tunnels.

Tabel B2.1 Belemmerende factoren bij tunnelbrandbestrijding, genoemd in de literatuur

Factoren	Bron
Beperkt zicht, het (niet kunnen) controleren van de luchtstromen, grote en gecompliceerde objecten in de tunnel, rook, het blussen van een brand met een hoog brandvermogen, water bij de brand krijgen, evacueren en redden tegelijkertijd, risico's analyseren tijdens het verrichten van alle andere werkzaamheden en het communiceren met andere partijen.	Bergqvist (2003) (wegtunnels)
Beperkte communicatietechnologie.	Kumm & Andreasson (2009) (wegtunnels)
Berekeningen van het omkeren van luchtstromen, verschillen in bewegingssnelheid en verbruik van ademlucht door manschappen, het beschikbaar hebben van de minimaal benodigde hoeveelheid bluswater en de beperkingen van het bereik van de straalpijp door de kleine ruimte in en constructie van de tunnel.	Lönnermark & Ingason (2010)
Botsingen, opgesloten raken, elektrocutie, verdrinking (bij tunnels onder water), wegglijden of vallen, blootstelling aan chemicaliën, beperkte toegang/ terugtocht, brandlast, omgevingsomstandigheden, onvoorspelbaar gedrag van personen in de tunnel, falen van de tunnelconstructie (zoals betonspat), obstakels op de route, beperkte werkruimte, grote afstanden moeten afleggen, desoriëntatie, falen van communicatiesystemen, fysieke uitdagingen (zoals hitte, energielevel), brandontwikkeling, duister, lawaai en waterverontreiniging.	The Stationary Office, Department for Communities and Local Government (2013) (ondergrondse structuren)
Rook, snel voortbewegen in rook en over lange afstand, backlayering en beperkt zicht.	Ingason, Vylund, Lönnermark, Kumm, Fridolf, Frantzich, Palm, & Palmkvist (2015) (mijnen)

Rook, hittestress, niet fysiek kunnen overleggen van brandweermensen aan beide zijden van de tunnel, afhankelijkheid van beperkt radiocontact, culturele en/of taalbarrières tussen brandweermensen onderling en personen in de tunnel, lange vluchtroutes.	International Fire Academy (2016) (wegtunnels)
Ongeziene lekkage van gevaarlijke stoffen uit voertuigen en lading.	Ingason & Li (2017) (wegtunnels)

Deze belemmerende factoren houden direct verband met sommige onderwerpen die in deze literatuurstudie aan de orde zijn komen, zoals doel en procedure, rook en fysieke beperkingen.