

TNO-rapport**TNO 2012 R11094****De statistische kans op brand in tunnels****Technical Sciences**Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delftwww.tno.nl

T +31 88 866 30 00

F +31 88 866 30 10

infodesk@tno.nl

Datum	22 januari 2013
Auteur(s)	mevr. ir. R.M.L. Nelisse prof. ir. A.C.W.M. Vrouwenvelder
Exemplaarnummer	060-DTM-2012-03595
Oplage	
Aantal pagina's	48 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat, Steunpunt Tunnelveiligheid
Projectnaam	
Projectnummer	053.02574/01.01

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, foto-kopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belang-hebbenden is toegestaan.

© 2013 TNO

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Aanpak	4
1.2	Scope	5
1.3	Wijzigingsprotocol	5
1.4	Afkortingen	6
1.5	Leeswijzer	6
2	Theoretische kans op brand	7
2.1	QRA-tunnels	7
2.2	Gebeurtenissenboom	7
2.3	Theoretische kansen	7
3	Nederlandse data	9
3.1	Verslagen EU richtlijn	9
3.2	Overige branden	10
3.3	Verkeersintensiteit	12
3.4	Samenvatting	12
4	Europese data	14
4.1	België	14
4.2	Duitsland	14
4.3	Luxemburg	15
4.4	Noorwegen	15
4.5	Zweden	15
4.6	Denemarken	16
4.7	Frankrijk	16
4.8	Oostenrijk	17
4.9	Engeland	18
4.10	Overige landen	19
4.11	Samenvatting geregistreerde periodes	19
4.12	Incidentele registratie van grote branden	20
5	Analyse	22
5.1	Het statistische model	22
5.2	De schattingsprocedure	22
5.3	De likelihoodfunctie	23
5.4	De data	24
5.5	De Prior's	25
5.6	De predictive verdeling	27
5.7	Het resultaat	27
6	Conclusies en aanbevelingen	32
7	Literatuur	33
8	Ondertekening	37
	Bijlage(n)	
	A Berekening	

- B Gebeurtenissenboom QRA-tunnels 2.0
- C Incidentele registratie Europa

1 Inleiding

In de notitie “Grote vrachtwagenbrand in tunnel A2 Leidsche Rijn” [1] wordt gesteld dat de kans op een grote brand in tunnels in de praktijk vermoedelijk veel kleiner is dan de theoretische kans waarmee wordt gerekend in het kwantitatieve risicoanalyse model voor tunnels (QRA-tunnels¹). Deze theoretische kans wordt in het vervolg van dit rapport aangeduid als “huidige QRA kans”.

Rijkswaterstaat heeft aan TNO opdracht verstrekt om te onderzoeken hoe groot de kans op een grote brand in tunnels in de praktijk is, gebaseerd op statistiek en casuïstiek van branden in tunnels. Daarnaast wordt een vergelijking gemaakt met de theoretische kans die gebruikt wordt in QRA-tunnels, zoals vastgelegd in [2]. Het onderzoek resulteert in aanbevelingen over het handhaven dan wel aanpassen van de gehanteerde aannames in QRA-tunnels.

1.1 Aanpak

QRA-tunnels is een kwantitatief risicoanalyse-model dat specifiek voor Nederlandse tunnels is ontwikkeld. De aanbevolen initiële kans op brand waarmee in QRA-tunnels wordt gerekend, is dan ook specifiek vastgesteld voor Nederlandse tunnels en bedraagt voor zowel personenauto's, bussen en vrachtauto's $2 \cdot 10^{-8}$ per motorvoertuigkilometer (mvtkm) [2]. Dit betreft de initiële kans op brand, ongeacht het vermogen dat zich uiteindelijk ontwikkelt. Om de branden te differentiëren naar vermogen rekent QRA-tunnels met (conditionele) vervolgcansen, die aangeven wat de kans is dat een brand zich tot een bepaald vermogen ontwikkelt, gegeven de initiële kans op brand. De kans op een brand met een bepaald vermogen wordt daarmee het product van de initiële kans op brand en de vervolgcansen die horen bij het betreffende vermogen.

Idealiter wordt een onderzoek naar de kans op brand in tunnels in de praktijk gebaseerd op alle branden die tot nu toe in alle Nederlandse tunnels hebben plaatsgevonden. Voor de meest betrouwbare schatting is de statistische data over alle branden in alle Nederlandse wegtunnels benodigd over alle jaren dat die tunnels in gebruik waren. Tevens is de lengte van de tunnels en het aantal motorvoertuigen per jaar benodigd. Met deze gegevens kan de kans op een (grote) brand per voertuigkilometer worden berekend (en eventueel geëxtrapoleerd) en worden vergeleken met de theoretische kans die in QRA-tunnels wordt gebruikt.

Uit dit onderzoek blijkt dat branden in Nederlandse tunnels niet (of moeilijk terug vindbaar) zijn geregistreerd, met uitzondering van de branden in TERN-tunnels sinds 2006. De Richtlijn 2004/54/EC van het Europees parlement en de raad van 29 april 2004 inzake minimum veiligheidseisen voor tunnels in het trans-Europese wegennetwerk [45] stelt in artikel 15 dat *“lidstaten elke twee jaar een verslag opstellen over tunnelbranden en ongevallen die kennelijke gevolgen hebben voor de veiligheid van weggebruikers in tunnels. Zij (de lidstaten) melden hierin de frequenties en de oorzaken van dergelijke incidenten; zij evalueren deze en*

¹ Het vigerende (computer)model “RWSQRA” heeft een andere naam gekregen en is tegenwoordig bekend onder de nieuwe naam “QRA-tunnels”. In dit onderzoek wordt gerefereerd aan QRA-tunnels versie 2.0.

verschaffen informatie over de feitelijke rol en de doeltreffendheid van de veiligheidsvoorzieningen en -maatregelen. Deze verslagen worden vóór het einde van de maand september van het jaar dat volgt op de verslagperiode door de lidstaten ter beschikking gesteld van de Commissie. De Commissie stelt de verslagen ter beschikking van alle lidstaten". Hieruit volgt dat de Nederlandse verslagen van 2006 tot en met tenminste het jaar 2010 beschikbaar zouden moeten zijn. Ten behoeve van dit onderzoek is door de Commissie toestemming verleend om de betreffende verslagen in te zien en te gebruiken.

Uit de periode voor 2006 is de enige *grote* brand van betekenis die bekend is, de brand in de Velsertunnel in 1978. Voor zover bekend zijn geen andere grote branden in Nederlandse tunnels opgetreden.

Een probleem bij de schatting van de gevraagde kans is derhalve het lage aantal branden van betekenis dat in het verleden is opgetreden. Als er bijvoorbeeld maar 1 brand in Nederland is waargenomen op zeg N voertuigkilometers, dan is er sprake van een grote zogenaamde statistische onzekerheid. Het is te gemakkelijk te zeggen dat de kans dan gelijk is aan $1/N$ per voertuigkilometer². Bij 0 waarnemingen (zoals bijvoorbeeld bij zeer grote branden in de orde van 100-300 MW) wordt dit probleem nog pregnanter. Extrapolatie is dan noodzakelijk. Een alternatief is om gebruik te maken van Bayesiaanse statistische methoden. In dit onderzoek kan de huidige QRA kans en/of het (grotere) aantal van buitenlandse waarnemingen dienen als zogenaamde "a priori informatie". Vervolgens is er een standaard "updating procedure" om deze a priori informatie te combineren met Nederlandse data en zo te komen tot een "a posteriori verdeling". De daarbij behorende verwachtingswaarde is een goed uitgangspunt voor ontwerpen.

De uitkomsten van het onderzoek zijn vergeleken met de huidige kans in QRA-tunnels. Op basis hiervan zijn aanbevelingen gedaan voor het aanpassen van de in QRA-tunnels gehanteerde kans op een grote brand. Naar de wens van RWS is de procedure gebaseerd op conservatieve uitgangspunten. RWS wil de kans op brand alleen aanpassen als daar een goede motivering voor gevonden is.

1.2 Scope

De scope van het onderzoek betreft grote branden in voertuigen in (weg)tunnels. Een brand is groot wanneer deze een omvang heeft van tenminste 25 MW. Branden die niet plaatsvinden in voertuigen, maar bijvoorbeeld in tunneltechnische installaties (TTI) vallen buiten de scope van dit onderzoek. Ook voertuigbranden die buiten het omsloten deel van de tunnel plaatsvinden, vallen buiten de scope van dit onderzoek.

1.3 Wijzigingsprotocol

De opdrachtgever heeft het protocol zoals vastgelegd in [3] voorgeschreven. In dit protocol wordt aangegeven dat een voorstel tot wijziging van parameters van een kwantitatieve risicoanalyse, in het bijzonder QRA-tunnels, moet voldoen aan de volgende beoordelingscriteria (pagina 31):

² Dit is de frequentistische manier.

1. Transparantie
2. Verifieerbaarheid
3. Robuustheid
4. Validiteit

Hiermee is in dit rapport rekening gehouden.

1.4 Afkortingen

AADT: Annual Average Daily Traffic (jaarlijks daggemiddelde aan voertuigen) [mvt]

mvt: motorvoertuigen

mvtkm: motorvoertuigkilometer

Mmvtkm: miljoen motorvoertuigkilometer

RARVW: regeling aanvullende regels veiligheid wegtunnels

TERN: Trans-European Road Network

TTI: tunneltechnische installaties

vwkm: vrachtwagenkilometers (het equivalent van mvtkm, maar dan uitsluitend vrachtwagens betreffend)

1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de theoretische achtergrond van de kans op een grote brand uiteengezet. In hoofdstuk 3 en 4 worden respectievelijk de Nederlandse en Europese data gepresenteerd. Hoofdstuk 5 geeft de analyse, waarna in hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen worden gepresenteerd.

2 Theoretische kans op brand

2.1 QRA-tunnels

QRA-tunnels is het wettelijk (RARVW artikel 4) voorgeschreven model voor kwantitatieve risicoanalyses dat specifiek voor Nederlandse tunnels is ontwikkeld. Het model bestaat uit [2]:

- het kansenmodel, gebaseerd op een gebeurtenissenboomanalyse, voor de berekening van de kans van optreden van elk ongevalsscenario;
- het gevolgenmodel voor het berekenen van het effect per ongevalsscenario;
- een model voor het berekenen van het risico;
- een beschrijving van de invoer en de uitvoer.

Voor dit onderzoek is het kansenmodel, en dan specifiek het deel gerelateerd aan brand, van belang.

2.2 Gebeurtenissenboom

De gebeurtenissenboom [2] bestaat uit 20 gebeurtenissen. De voor dit onderzoek relevante gebeurtenissen zijn: G_vtgbrand, G_tankbrand en G_brandgrootte.

De gebeurtenis G_vtgbrand heeft de volgende onderverdeling:

1. Brand
2. Geblust
3. Geen brand

De gebeurtenis G_tankbrand heeft de volgende onderverdeling:

1. Directe ontsteking
2. Vertraagde ontsteking
3. Geen ontsteking

De gebeurtenis G_brandgrootte heeft de volgende onderverdeling:

1. 5 MW
2. 10 MW
3. 25 MW
4. 50 MW
5. 100 MW
6. 200 MW

Gegeven de beperkte beschikbare data over het blussen van branden, wordt in het vervolg van dit onderzoek de onderverdeling van de gebeurtenis 'G_vtgbrand' niet volledig meegenomen. Gegeven de onderzoeksvraag naar de kans op een *grote* brand, ligt de focus van dit onderzoek bij branden van tenminste 25 MW.

2.3 Theoretische kansen

In [2] wordt verwezen naar referentie [10], waarin "op basis van 145 branden in vracht- of tankauto's in 1984 een kans op brand van een vrachtauto is afgeleid in de orde van $2,3 \cdot 10^{-8}$ per voertuigkilometer. 30% van deze branden resulteerde in een schadebedrag van fl.10.000 of meer ($= > \text{€ } 4.500$) en 70% in een schadebedrag van minder dan fl.10.000".

In [10] staat "Om het risico te kunnen bepalen moet de kans op het optreden van brand bekend zijn. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de initiële brandfrequentie (jaarlijks aantal branden per voertuigkilometer). De kans op een brand valt uiteen in twee delen; namelijk de kans op een brand en de vervolgcans op een brand als gevolg van een ongeval. In de statistiek der branden van het CBS is gevonden dat 145 branden in vracht- of tankauto's hebben plaatsgevonden (1984), waarbij als oorzaken technische storingen en defecten werden genoemd. Dit zijn de zogenaamde spontane branden. Er zijn in dat jaar volgens het CBS geen branden in zwaar-transportvoertuigen als gevolg van ongevallen geweest. In de Verkeersongevallenregistratie (VOR) worden geen gegevens over branden in voertuigen als gevolg van ongevallen opgenomen. Daarom worden in deze module (redactie: van Vevoweg) vooralsnog alleen de spontane branden meegenomen".

Verder staat in [10] dat de generieke kans op een voertuigbrand is gebaseerd op het aantal voertuigkilometers van het zwaar verkeer (6,2 miljard mvtkm in 1994), hetgeen resulteert in een kans op brand in een zwaar-transportvoertuig van $2,3 \cdot 10^{-8}$ per mvtkm. Hierbij is onderscheid gemaakt naar een grote brand (ca. 30%, met een schade > 10.000 gulden) en een kleine brand (ca. 70%, met een schade < 10.000 gulden). De daaruit resulterende initiële brandfrequenties zijn als volgt:
P (grote brand) = $6,9 \cdot 10^{-9}$ per mvtkm.
P (kleine brand) = $1,61 \cdot 10^{-8}$ per mvtkm.
Voor personenauto's worden, bij afwezigheid van data, dezelfde kansen gehanteerd.

In [2] wordt eveneens gesteld dat "Onderzoek in het buitenland (onder andere in de Alpenlanden) [43] laat zien dat de kans op een brand in zwaar verkeer groter is dan de kans op een brand in het overige verkeer. Hierbij dient te worden opgemerkt dat deze hogere kans op brand in zwaar verkeer veelal veroorzaakt wordt door het oververhitten van de motor bij het klimmen of het oververhitten van de remmen bij het dalen op lange en/of steile hellingen. In Frankrijk blijkt dat 60 á 70% van de vrachtautobranden in tunnels wordt veroorzaakt door oververhitte remmen. Daar dergelijke lange en/of steile hellingen niet voorkomen in Nederland is er vooralsnog geen reden om voor de Nederlandse situatie uit te gaan van een hogere kans op brand voor zwaar verkeer. Aanbevolen wordt om voor de kans op brand in Nederland voor zowel personenauto's, bussen als vrachtauto's $2 \cdot 10^{-8}$ per mvtkm aan te houden".

De aanbevolen initiële kans op brand waarmee in QRA-tunnels wordt gerekend, is op [10] gebaseerd en bedraagt voor zowel personenauto's, bussen en vrachtauto's afzonderlijk $2 \cdot 10^{-8}$ per mvtkm [2]. De gebruiker kan deze kans aanpassen door voor de drie verschillende voertuigtypen andere waarden in te vullen. De vervolgcansen op o.a. brandbare lading en een grote brand zijn weergegeven in Bijlage B. In dit rapport wordt onderzocht of er betere waarden voor de kans op vrachtwagenbranden uit de casuïstiek zijn af te leiden. Dit betreft dus de initiële kans op brand, vermenigvuldigd met de betreffende vervolgcansen zoals die in QRA-tunnels worden gehanteerd.

3 Nederlandse data

In dit hoofdstuk worden de branden zoals die in Nederlandse tunnels zijn opgetreden, gepresenteerd. Onderscheid wordt gemaakt tussen kleine en grote branden en tussen aaneengesloten geregistreerde periodes en incidentele registratie van branden.

3.1 Verslagen EU richtlijn

De "Richtlijn 2004/54/EC" stelt in artikel 15 dat lidstaten elke twee jaar een verslag opstellen over tunnelbranden en ongevallen die kennelijke gevolgen hebben voor de veiligheid van weggebruikers in tunnels. Nederland heeft drie van deze verslagen aan de Commissie gestuurd. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de TERN tunnels die hierin beschouwd worden en de branden die daarin zijn voorgekomen [4, 5, 33]:

Tabel 1: Overzicht tunnelbranden in TERN-tunnels, globaal 2006-2012

Tunnelnaam	Branden
Schipholtunnel	15-07-2009
Beneluxtunnels I en II	
Wijkertunnel	12-08-2008
Thomassentunnel	
Botlektunnel	
Noordtunnel	
Drechtunnel	02-03-2009
Heinenoordtunnel	
Tunnel Swalmen	
Roertunnel	
Leidsche Rijn	

In [4] wordt de periode van 01-10-2006 – 31-08-2008 gerapporteerd, m.u.v. de Schipholtunnel en de Wijkertunnel (01-01-2007 – 31-08-2008). Geen van de ongevallen betrof brand. In [5] wordt de periode van 01-10-2008 – 30-09-2010 gerapporteerd. Opvallend is dat over de periode 01-09-2008 t/m 30-09-2008 niet is gerapporteerd, m.u.v. de Roertunnel en tunnel Swalmen (01-08-2008 – 31-08-2010). In totaal zijn er in deze periode vier branden gerapporteerd, waarvan één buiten de scope valt. In [33] wordt gerapporteerd over de periode 01-09-2010 – 31-08-2012, m.u.v. de Leidsche Rijntunnel (28-01-2012 – 30-06-2012), de Schiphol- en Wijkertunnel (01-07-2010 – 30-06-2012) en de Roer- en Swalmentunnel (01-09-2010 – 31-07-2012). In deze periode was één brand, welke buiten de scope valt.

Hieronder worden de branden verder toegelicht.

Het ongeval op 2 maart 2009 in de **Drechtunnel** betrof een brand die is ontstaan in een bestelbus en is geblust door de brandweer [5]. Er waren geen slachtoffers en ook geen andere voertuigen bij het ongeval betrokken. Volgens de tunnelbeheerder, dhr. B. Staat, is uitsluitend het motorcompartiment uitgebrand. Uit [6] blijkt dat de weggebruiker een bluspoging heeft ondernomen met een handbrandblusser. De brand is geblust door de brandweer.

Het ongeval op 15 juli 2009 in de **Schipholtunnel** betrof een autobrand [5]. De auto is volledig uitgebrand en er waren vier gewonden.

Op 12 februari 2010 ontstond in de Schipholtunnel een brand in het noodstroomaggregaat [5]. Oorzaak van de brand was een lekkende olieslang. Er ontstond geen brand in de tunnel zelf. De brand is geblust door de brandweer van Schiphol. Deze brand valt buiten de scope van dit onderzoek.

Op 12 augustus 2008 sloeg een auto over de kop in de **Wijkertunnel**, wat resulteerde in een brand en twee zwaargewonden [5].

Op 4 januari 2012 is in de Beneluxtunnel een truck met oplegger geschaard waarbij de brandstoftank van de truck lek geslagen is [33]. Hierdoor stroomde er 600 – 1.000 liter dieselolie uit de tank. Er is geen brand ontstaan. Dit ongeval valt buiten de scope van het onderzoek.

Op 18 januari 2012 is een brand in een personenauto in de Noordtunnel opgetreden [33]. Het betrof een pechvoertuig dat tijdens de afhandeling van het incident vlam heeft gevat. Hoewel het brandende voertuig zich buiten het gesloten deel van de tunnel bevond en er feitelijk dus geen sprake was van een tunnelincident is toch besloten het incident als zodanig te evalueren. Dit ondermeer omdat de calamiteitenknop is gebruikt. Uit [6] blijkt dat een bluspoging door weggebruikers (drie handbrandblussers en gebruik van een slanghaspel door weggebruikers of de brandweer) niet heeft geresulteerd in het doven van de brand. Hierbij is de auto volledig uitgebrand.

3.2 Overige branden

Via tunnelbeheerders is aanvullende informatie opgevraagd. Deze informatie is op te delen in 1) informatie die een volledige periode beslaat en alle branden betreffen die daarbinnen zijn gebeurd en 2) incidentele branden, zonder dat een periode compleet is geregistreerd of gerapporteerd.

3.2.1 *Aaneengesloten periode*

Dit betreffen branden die gestructureerd zijn vastgelegd voor een specifieke periode. Hieronder wordt een overzicht gegeven van de betreffende tunnels, waarvan deze informatie achterhaald kon worden.

Tabel 2: Overzicht branden in geregistreerde periodes

Tunnelnaam	Periode	Branden
Westerscheldetunnel	14-03-2003 – 16-08-2012	25 augustus 2004 13 juli 2009 13 september 2011
Vlaketunnel	17-09-2002 – 17-09-2012	-

Volgens dhr. P. Dankkaart [39], tunnelbeheerder van de Westerscheldetunnel, hebben sinds de opening drie branden plaatsgevonden:

1. Op 25 augustus 2004 heeft een personenautobrand plaatsgevonden in de westbuis. De bestuurder is begonnen om de brand zelf te blussen. De brandweer heeft de brand volledig geblust. Ten gevolge van deze brand is een hulppost volledig vernield. Enkele betrokkenen zijn geëvacueerd.

2. Op 13 juli 2009 heeft een personenautobrand in de westbuis plaatsgevonden. De bestuurder is begonnen om de brand zelf te blussen. De brandweer heeft de brand volledig geblust. Ten gevolge van deze brand was er geen schade. Enkele betrokkenen zijn geëvacueerd.
3. Op 13 september 2011 heeft een personenautobrand in de westbuis plaatsgevonden. De brand is uit zichzelf gedoofd. De gehele westbuis is geëvacueerd. Door de brandweer is geconstateerd dat er geen brand meer aanwezig was. Er was ook geen schade.

Volgens dhr. C. Rozeboom [40], tunnelbeheerder van de Vlaketunnel, is er in 2011 een brand(je) in een elektrische installatiekast in het middentunnelkanaal geweest. Het middentunnelkanaal van de Vlaketunnel wordt niet gebruikt als vluchtroute voor automobilisten bij een calamiteit. Het verkeer heeft van deze brand geen hinder gehad. Omdat deze brand buiten de scope valt, namelijk niet in de tunnelbuis, wordt deze in dit onderzoek verder niet meegenomen. De afgelopen 10 jaar zijn er geen (auto)branden in de Vlaketunnel geweest.

3.2.2 Incidentele registratie

Dit betreffen branden in tunnels zonder dat de gehele periode is geregistreerd (hierna genoemd: niet-geregistreerde periode). In theorie zouden dus meer branden kunnen zijn voorgekomen dan hier vermeld is. Onderstaand worden de branden weergegeven voor zover deze informatie achterhaald kon worden.

Tabel 3: Incidentele registratie van branden in tunnels

Tunnelnaam	Branden
Drechtunnel ³	1998 of 1999 ⁴
Velsertunnel	11-08-1978

Volgens dhr. A. Bras [41], voormalig tunnelbeheerder van de Noord- en Drechtunnel en huidige tunnelbeheerder bij de Kiltunnel, zijn de volgende branden opgetreden:

1. In 1998 een autobrand kort voor het ingangsportaal van de Kiltunnel. Geen verdere informatie beschikbaar. Valt buiten de scope.
2. In 1998 of 1999 in de **Drechtunnel** oost 1-2 is kort voor het uitgangsportaal een personenauto uitgebrand. Hierbij is schade aan het asfalt opgetreden. De brand is door de brandweer geblust. Het is niet bekend of de weggebruiker ook een bluspoging heeft ondernomen.
3. In 1998 of 1999 is in de Drechtunnel een personenauto tegen het puntstuk op de kopdeur gereden en geheel uitgebrand. De brand is door de brandweer geblust. De bestuurder is overleden. Er was forse brandschade aan de frontmuur, er is een aanzienlijke hoeveelheid beton afgespat. De kopdeur moest als verloren worden beschouwd. Boven de kopdeur bevindt zich een jalouzieraam waarachter in het middentunnelkanaal een grote hoeveelheid kabels is gesitueerd. De brand is echter niet naar binnen geslagen waardoor hier geen schade is ontstaan. De brand valt buiten de scope.

³ De Drechtunnel komt zowel voor in de periodieke registratie aan de Europese Commissie als in de incidentele registratie, omdat voor 2006 geen sluitende registratie van branden plaatsvond.

⁴ Er heeft één brand plaatsgevonden in 1998 of 1999. Het precieze jaar is niet bekend.

De grootste brand in Nederland is de brand in de Velsertunnel op 11 augustus 1978, waarbij vijf voertuigen betrokken waren. De geschatte brandomvang was minimaal 40 MW [44] en kleiner dan 50 MW [1].

3.3 Verkeersintensiteit

Ten behoeve van de analyse is naast de data over de branden ook de data over de verkeersintensiteit benodigd. Deze informatie is aangeleverd door Rijkswaterstaat in een Excel sheet [42]. In deze Excel sheet staat van elke tunnel zowel de verkeersintensiteit per dag en per jaar als cumulatief over de gehele periode van openstelling, evenals de lengte van de tunnel vermeld. Een samenvatting van de informatie is gegeven in onderstaande Tabel 4.

Tabel 4: Overzicht verkeersintensiteiten (alle typen voertuigen) in tunnels [42]

Tunnel	Lengte [m]	Jaar van openstelling	Totaal aantal mvt door tunnel sinds openstelling	Totaal aantal mvt.km door tunnel sinds openstelling
Maastunnel	1070	1942	941.679.103	1.007.596.640
Velsertunnel	768	1957	1.102.631.940	846.821.330
Coentunnel	587	1966	1.442.359.959	846.665.296
Schiphol tunnels (1+2)	530 / 650	1966 / 2000	2.489.707.879	1.468.927.648
Beneluxtunnels (1+2)	795 / 902	1967 / 2002	1.540.590.115	1.307.190.712
IJ-tunnel	1039	1968	922.185.548	958.150.785
Heinenoordtunnel	614	1969	951.890.907	584.461.017
Vlaketunnel	327	1975	427.395.295	139.758.262
Drechtunnel	569	1977	1.487.550.382	846.416.168
Kiltunnel	406	1977	101.804.351	41.332.567
Botlektunnel	507	1980	1.088.288.318	551.762.177
Zeeburgertunnel	546	1990	782.203.030	427.082.854
Noordtunnel	540	1991	714.474.725	385.816.352
Wijkertunnel	684	1996	308.717.647	211.162.870
Piet Heintunnel	1500	1997	130.802.570	196.203.855
Stationspleintunnel	335	1997	27.025.324	9.053.484
Koningstunnel	680	2000	22.423.817	14.575.481
Abdijtunnel	1360	2002	2.409.000	3.276.240
Westerscheldetunnel	6700	2003	53.871.731	360.940.600
Sijtwendetunnels	1893	2003	155.888.961	295.097.803
Maasboulevardtunnel	450	2003	17.586.870	7.914.092
Thomassentunnel	1100	2004	172.700.896	189.970.986
Roertunnel	2040	2008	72.431.603	147.760.470
Tunnel Swalmen	400	2008	63.196.574	25.278.629
Hubertustunnel	1500	2008	34.999.850	52.499.775
A2 Leidsche Rijn	1650	2012	31.755.000	52.395.750
Totaal				10.978.111.843

3.4 Samenvatting

Hieronder wordt een overzicht gegeven van de voor de analyse beschikbare data.

Tabel 5a: Overzicht branden in Nederlandse tunnels (geregistreerde periode)

Tunnel	Aantal mvt/jr [mln mvt/jaar]	Aantal jaren [jr]	Lengte tunnel [km]	Cum. Aantal mtvkm [mln vtgkm]	Aantal branden
Schiphol tunnel	67	6	0,6	238	1
Beneluxtunnel	47	6	0,8	238	0
Wijkertunnel	21	6	0,7	85	1
Thomassentunnel	20	6	1,1	129	0
Botlektunnel	41	6	0,5	125	0
Noordtunnel	38	6	0,5	123	0
Drechtunnel	50	6	0,6	171	1
Heinenoordtunnel	31	6	0,6	114	0
Tunnel Swalmen	13	6	0,4	30	0
Roertunnel	14	6	2,0	177	0
Leidsche Rijn	32	1	1,7	52	0
Westerscheldetunnel	5	10	6,7	361	3
Vlaketunnel	16	10	0,3	51	0
Totaal				1896	6

Tabel 5b: Overzicht branden in Nederlandse tunnels (incidentele registratie)

Tunnel	Aantal mvt/jr [mln mvt/jaar]	Aantal jaren [jr]	Lengte tunnel [km]	Cum. Aantal mtvkm [mln vtgkm]	Aantal branden
Alle tunnels ⁵				9082	
Drechtunnel					1
Velsertunnel					1

De omvang van de branden is niet bekend, met uitzondering van de brand in de Velsertunnel. Deze wordt geschat op 40-50 MW. Voor de overige branden geldt dat wordt aangenomen dat deze een omvang hebben van minder dan 25 MW. Deze aanname veronderstelt dat branden met een omvang van 25 MW of meer wel in de media bekend waren gemaakt. Het is aannemelijk dat deze branden waarschijnlijk zelfs maar een omvang kleiner of gelijk aan 5 MW hadden, maar om aan de veilige kant te blijven, wordt een grens van 25 MW gehanteerd.

⁵ In totaal zijn in Nederland 10.978 mln voertuigkilometer in tunnels afgelegd, waarvan 1896 in de geregistreerde periode en 9082 in de niet-geregistreerde periode.

4 Europese data

In dit hoofdstuk worden de branden gepresenteerd die in Europese tunnels zijn opgetreden. Onderscheid wordt gemaakt naar aaneengesloten geregistreerde periodes (uit hoofde van de EU Richtlijn) respectievelijk incidentele registratie van branden en naar kleine en grote branden.

4.1 België

In [11] wordt melding gemaakt van 2 branden in 2006 en geen branden in 2007 en 2008. Een brand vond plaats op 28 april 2006 in de Kinkempois tunnel. Een kleine vrachtwagen vatte brand. Hierbij zijn geen slachtoffers gevallen. In eerste instantie zijn blusmiddelen uit de hulpposten gebruikt. De brandweer heeft de brand geblust. De andere brand vond plaats op 3 juni 2006 in de Cointe tunnel en betrof een autobrand. De brand is geblust door de automobilisten met gebruik van de blusmiddelen uit de hulpposten. In [34] wordt gerapporteerd over het jaar 2010. In dit jaar hebben geen branden plaatsgevonden.

In [12, 14, 35] worden de branden en ongevallen in drie tunnels in de periode 2006-2007, 2008-2009 respectievelijk 2010-2011 opgesomd: de Kennedytunnel, de Craeybeckxtunnel en de 4-Armentunnel. In deze periode zijn geen branden opgetreden.

Tabel 6: Branden in Belgische tunnels

Tunnel	Lengte tunnel [km]	Cum. aantal mvtkm [mln mvtkm]	Branden	Periode [jaar]
Kinkempois	0,6	65	1	4
Cointe	1,6	160	1	4
Grosses Battes	0,4	10	0	1
Kennedy	0,7	199	0	6
Craeybeckx ⁶	1,6	350	0	6
4-Armen	0,5	107	0	6
Totaal	5,4	891	2	varieert

4.2 Duitsland

In [15] is gesteld dat met de in gebruik name van de Hopfenbergtunnel en de Lobdeburgtunnel in totaal 27 tunnels met een gezamenlijke lengte van ca. 40km onder het onderzoek vallen. In deze periode (01-05-2006 – 31-12-2007) zijn 26 branden opgetreden.

In [16] wordt gesproken over 28 tunnels⁷ met een gezamenlijke lengte van ca. 41 km. Kennelijk is in de periode van 01-01-2008 tot 31-12-2009 één nieuwe tunnel in gebruik genomen met een lengte van ca. 1 km. In de betreffende periode zijn 41 branden opgetreden. Gedurende deze periode zijn gezamenlijk ca. 3,3 mrd. motorvoertuigkilometer afgelegd.

⁶ Een brand in de elektrische systemen in de controle ruimte, maar geen voertuigbrand of brand in de tunnelbuis.

⁷ Een overzicht van de tunnels, de lengte en de AADT is gegeven in [16]

In [36] worden 36 branden gerapporteerd in de periode 01-01-2010 – 31-12-2011. Er is niet aangegeven in welke tunnels deze branden zijn opgetreden.

Tabel 7: Branden in Duitse tunnels

Tunnel	Lengte tunnel [km]	Cum. aantal mvtkm [mln mvtkm]	Branden	Periode [jaar]
Totaal	41,1 ⁸	9900 ⁹	103	6

4.3 Luxemburg

Geen rapporten beschikbaar (en dus vermoedelijk geen TERN tunnels met een minimale lengte van 500m).

4.4 Noorwegen

In [23] is gerapporteerd over de Noorse tunnels. Het gaat om in totaal 797 tunnels met een gezamenlijk lengte van 778,5km. Helaas is geen onderscheid gemaakt naar TERN tunnels > 500m en overige tunnels. Ook is geen informatie over branden gegeven. Uit navraag blijkt dat meer informatie te vinden is in [37]. Hierin staat een overzicht van alle branden die tussen 2002 en 2011 in wegtunnels zijn opgetreden. Dit betreffen in totaal 160 branden, dus gemiddeld 16 per jaar.

Tabel 8: Branden in Noorse tunnels

Tunnel	Lengte tunnel [km]	Cum. aantal mvtkm [mln mvtkm]	Branden	Periode [jaar]
Totaal	778,5	18470 ¹⁰	160	10

4.5 Zweden

In [24] wordt gesteld dat er drie TERN tunnels in Zweden zijn: de Götatunnel, de Lundbytunnel en de Gnistångstunnel. Dit rapport betreft echter alleen de Götatunnel voor de periode 2010-2011. De Götatunnel heeft een AADT van 55000 motorvoertuigen per dag en een lengte van 1600m. In genoemde periode zijn geen branden opgetreden. In [25] wordt gesteld dat sinds de opening in 2006 geen branden in de Götatunnel hebben plaatsgevonden. Dit wordt nog eens bevestigd in [26]. Er is geen informatie over de beide andere tunnels voorhanden.

⁸ Totale lengte van de laatste periode genomen.

⁹ Er zijn 3,3 miljard voertuigkilometers gereden in twee jaar (2008-2009). Op basis daarvan wordt geschat dat in een periode van 6 jaar 9,9 miljard voertuigkilometer wordt gereden.

¹⁰ De mediaan bedraagt 6500. Op basis daarvan is het cumulatief aantal mvtkm (AADT* #dagen per jaar*cum. tunnallengte*periode/1000000): 6500*365*778,5*10/1000000

Tabel 9: Branden in Zweedse tunnels

Tunnel	Lengte tunnel [km]	Cum. aantal mvtkm [mln mvtkm]	Branden	Periode [jaar]
Totaal	1,6	193 ¹¹	0	6

4.6 Denemarken

In [17] en [18] wordt gerapporteerd over de Øresund Tunnel. Deze bestaat uit twee buizen van elk 4050m met een AADT van 20.000 mvt per dag. In de periode 2006/2007 heeft op 12 januari 2006 een beginnende brand in het motorcompartiment van een voertuig plaatsgevonden. De bestuurder slaagde in minder dan 10 minuten erin om de brand te blussen met een handbrandblussers uit een hulppost. In de periode 2008/2009 en, zo blijkt uit [17], sinds de opening van de tunnel in juli 2000, zijn verder geen branden opgetreden.

In [19] en [20] wordt gerapporteerd over de Limfjord tunnel met een lengte van 583m, 3 rijstroken per buis en een AADT van ca. 60.000 motorvoertuigen per dag. In de periode 2006/2007 en 2008/2009 zijn geen branden opgetreden.

In [21] en [22] wordt gerapporteerd over de Tårnby tunnel. Deze tunnel heeft een lengte van 700m en een AADT van ca. 40.000 motorvoertuigen per dag. Er hebben geen branden plaatsgevonden.

Tabel 10: Branden in Deense tunnels

Tunnel	Lengte tunnel [km]	Cum. aantal mvtkm [mln mvtkm]	Branden	Periode [jaar]
Øresund Tunnel	4,1	296 ¹²	1	10
Limfjord tunnel	0,6	51 ¹³	0	4
Tårnby tunnel	0,7	41 ¹⁴	0	4
Totaal	5,3	388	1	varieert

4.7 Frankrijk

In [27] is aangegeven dat de rapportage 30 tunnels betreft die volledig in Frankrijk zijn gelegen en drie tunnels die grensoverschrijdend zijn, te weten, de Fréjustunnel, de Mont-Blanctunnel en de Somporttunnel¹⁵. Voor de grensoverschrijdende tunnels geldt dat alleen de branden en ongevallen worden gerapporteerd die in het Franse deel van de tunnel gebeuren, om dubbeltelling te voorkomen.

In 2006 was er 1 brand in de Chamois tunnel, 3 branden in de Orelletunnel, 8 in de Fréjustunnel en 1 in de Mont Blanctunnel. Dit betroffen 'branden niet als gevolg van een ongeval' waarbij geen slachtoffers zijn gevallen. In 2007 waren er 6 'branden

¹¹ $(55000 \cdot 365 \cdot 1,6 \cdot 6) / 1000000$

¹² $(20000 \cdot 365 \cdot 4,1 \cdot 10) / 1000000$

¹³ $(60000 \cdot 365 \cdot 0,6 \cdot 4) / 1000000$

¹⁴ $(40000 \cdot 365 \cdot 0,7 \cdot 4) / 1000000$

¹⁵ Een overzicht van de tunnels is gegeven in [27]

niet als gevolg van een ongeval' in de Orelletunnel, 1 in de La Grand-Maretunnel en 3 in de Fréjustunnel. In totaal ging het in 2006 om 13 en in 2007 om 10 branden.

Van de 13 branden in 2006 blijken 12 branden een vrachtwagen en één een personenauto te betreffen. De duur van de branden is meestal kort, vier keer onbekend en één keer lang met 58 minuten. De branden zijn eenmaal door de externe brandweer, 5 door de tunnelbeheerder, 2 keer door de automobilisten, eenmaal onbekend en 4 keer spontaan gedoofd.

Van de 10 branden in 2007 blijken 9 een vrachtauto en 1 een personenauto. De duur van de branden is meestal kort, met 2 langere van elk 5 minuten en 1 van 18 minuten. De branden zijn 4 keer door de tunnelbeheerder, 4 keer door de automobilisten, eenmaal onbekend en eenmaal spontaan gedoofd.

In [28] wordt wederom over 33 tunnels gerapporteerd. In 2008 hebben 9 en in 2009 3 branden plaatsgevonden. Deze branden hebben in de volgende tunnels plaatsgevonden: in 2008 in Pas de l'escalette (1), Orelle (5), Epine (1), Traversee de Toulon (1) en in 2009 in Chamoise (1), Pas de l'escalette (1), Hardelot (1) en Pessicart (1). Van de in totaal 12 branden in de beschouwde periode is één als gevolg van een ongeval ontstaan en de rest betreft 'spontane branden'.

Van de 11 zelfontbrandingen betrof het in zeven gevallen een vrachtwagen, driemaal een auto en eenmaal een bestelbus. De brandduur is niet van alle branden bekend en varieert van 3 tot 115 minuten. Opvallend is de brand in een bestelbus met een duur van 73 minuten. Zeven branden zijn uit zichzelf gedoofd of geblust door automobilisten of de tunnelbeheerder. Vier zijn geblust door de brandweer en van één brand is onbekend hoe hij is geblust/gedoofd.

De brand als gevolg van een ongeval in de Pessicart tunnel is ontstaan in een personenauto en geblust door de automobilisten.

In [38] is aangegeven dat in 2010 acht branden en in 2011 vier branden zijn opgetreden. De branden vonden plaats in de volgende tunnels: in 2010 in Chamoise (1), Orelle (5), Fréjus (2), in 2011 in Pas de l'escalette (1), Fréjus (2) en Mont Blanc (1). De oorzaken zijn in alle gevallen zelfontbranding, waarvan in acht gevallen bij een vrachtwagen. Zes branden zijn uit zichzelf gedoofd of door automobilisten geblust, bij vijf branden heeft de brandweer geblust en bij een brand is het onbekend hoe deze geblust is.

Tabel 11: Branden in Franse tunnels

Tunnel	Lengte tunnel [km]	Cum. aantal mvtkm [mln mvtkm]	Branden	Periode [jaar]
Totaal	60,5	2886 ¹⁶	47	6

4.8 Oostenrijk

Er zijn drie Oostenrijkse rapporten verschenen [7, 8, 9]. Hierin zijn het aantal branden en de betrokken voertuigen als volgt aangegeven.

¹⁶ $\Sigma(\text{AADT} \cdot 365 \cdot \text{tunnellengte} \cdot 6) / 1000000$, waarbij de AADT volgt uit [70]

In 2006 en 2007 zijn in totaal 11 auto's, 9 vrachtwagens, één bus en één voertuig in de overige categorie (soort voertuig is onbekend) betrokken bij de 20 opgetreden branden. Volgens de documentatie van de tunnelbeheerders is hierbij één persoon overleden.

Uit [8] kan worden afgeleid dat in 2008 en 2009 14 auto's 11 vrachtwagens en een overig voertuig (onbekend) bij branden waren betrokken.

Uit [9] kan worden afgeleid dat in 2010 en 2011 7 auto's, 7 vrachtwagens, 2 bussen en één overig voertuig betrokken waren. Bij de in totaal 63 branden tussen 2006 en 2011 waren 32 personenauto's, 27 vrachtwagens, 3 bussen en 3 overige vervoermiddelen betrokken. Volgens de documentatie van de tunnelbeheerders is hierbij één persoon overleden.

Branden kunnen meerdere oorzaken toegewezen hebben gekregen. Van de branden zijn 21 na rookontwikkeling ontstaan, 20 door zelfontbranding, 8 door explosie en 13 door overige oorzaken. Onder overige oorzaken geven de tunnelbeheerders motorbrand (5 maal), technisch defect, bandenbrand (2 maal) en een defecte machine aan. In 3 gevallen kon geen oorzaak aangegeven worden.

Tabel 12: Branden in Oostenrijkse tunnels

Tunnel	Lengte tunnel [km]	Cum. aantal mvtkm [mln mvtkm]	Branden	Periode [jaar]
Totaal	348	10454 ¹⁷	63	6

4.9 Engeland

In [29] wordt gerapporteerd over de periode van 1 april 2006 t/m 31 maart 2008. De Hatfield tunnel bestaat uit twee buizen met elk drie rijstroken en een lengte van 1140m. Op 2 januari 2008 vond een brand plaats in een auto die over de kop was geslagen. Er is geen informatie beschikbaar over het blussen van de brand.

In [30] wordt over dezelfde periode als hierboven gerapporteerd over de Holmesdale tunnel. Deze tunnel bestaat uit twee buizen met elk 4 rijstroken en een lengte van 684 meter. Er zijn in de betreffende periode geen branden gerapporteerd.

In [31] wordt gerapporteerd over de Conwy, Penmaenbach en Pen-Y-Clip tunnels. Er zijn twee branden buiten de Penmaenbachtunnel opgetreden. Deze vallen buiten de scope van dit onderzoek. Er zijn geen branden in de tunnels opgetreden.

In [32] wordt gerapporteerd over de Dartford tunnels, bestaande uit tweemaal twee rijstroken. Er waren geen branden in de periode van 1 april 2006 t/m 31 maart 2008.

¹⁷ $(15874 \cdot 365 \cdot 234 + 10087 \cdot 365 \cdot 105) / 1000000 = 1356 + 387 = 1742$ Mmvtkm/jaar [9]. $1743 \cdot 6 = 10.454$ Mmvtkm.

Tabel 13: Branden in Engelse tunnels

Tunnel	Lengte tunnel [km]	Cum. aantal mvtkm [mln mvtkm]	Branden	Periode [jaar]
Totaal	5,7	144 ¹⁸	1	2

4.10 Overige landen

Van de volgende landen zijn de verslagen uit hoofde van de EU Richtlijn ook beschikbaar:

1. Spanje
2. Italië
3. Griekenland
4. Finland
5. Portugal
6. Polen
7. Bulgarije
8. Cyprus
9. Tsjechië
10. Estland
11. Hongarije
12. Ierland
13. Litouwen
14. Letland
15. Malta
16. Roemenië
17. Slovenië
18. Slowakije

Omdat de verkeerssituatie en de tunnels in deze landen minder vergelijkbaar zijn met Nederland en niet alle gegevens over de tunnels bekend zijn, is in overleg met de opdrachtgever besloten deze data niet in het onderzoek mee te nemen.

4.11 Samenvatting geregistreerde periodes

Hieronder volgt een samenvatting van de (kleine) branden in Europese tunnels die in een zekere periode zijn geregistreerd.

Tabel 14: Overzicht Europese branden in tunnels in geregistreerde periode

Tunnel	Lengte tunnel [km]	Cum. [mln mvtkm]	Aantal Branden (<15 MW)	Periode [jaar]
België	5,4	891	2	varieert
Duitsland	41,1	9900	103	6
Noorwegen	778,5	18470	160	10
Zweden	1,6	193	0	6
Denemarken	5,3	388	1	varieert
Frankrijk	60,5	2886	47	6

¹⁸ AADT uit [46], behalve voor de Pen-Y-Cliptunnel. Deze is geschat op basis van de gemiddelde AADT van de Conwy en Penmaenbach tunnels, aangezien deze in dezelfde snelweg liggen.

Oostenrijk	348	10454	63	6
Engeland	5,7	144	1	2
Totaal	1246,1	43.326	377	varieert

4.12 Incidentele registratie van grote branden

In DARTS [63] zijn grote branden geïnventariseerd. Op basis hiervan en met aanvullingen uit andere bronnen is Tabel 15 met grote branden samengesteld. Dit betreffen allen incidentele registraties en geen aaneengesloten geregistreerde periodes.

Tabel 15: Grote branden in Europese tunnels

Tunnel	Leeftijd [jr]	Lengte buis [km]	Cum. aantal mvt sinds opening	Cum. Mln. vtgkm	Aantal branden	RHR [MW]	Bron
Mont Blanc tunnel	44 ¹⁹	12	62.213.509	722	1	300	47
Tauern	37	6	214.729.500 ²⁰	1374	1	200	48
Hovden	20	1	13.870.000	18	1	150	-
Ekeberg	17	2	291.635.000	456	1	35	51, 49
Mt Blanc	44	12	62.213.509	722	1	30	47
Pfänder	32	7	205.568.000	1381	1	20	52, 49
L'Arme	33	1	100.322.805	110	1	20	46, 53
Castellar	43	1	221.613.400	126	1	20	54, 46
Hitra	18	6	8.081.100	46	1	20	55, 49
Felbertauern	45	5	50.000.000	264	1	15	56
Frejus	32	13	32.000.000	412	1	15	57
Porte d'Italie	42	0	1.533.000.000	652	1	15	58
Moorfleet	49	0	733.285.000	178	1	15	59, 49
Røldal	48	5	17.520.000	82	1	15	60, 49
Kingsway	41	2	493.845.000	988	1	15	61, 49
Totaal					15		

Om bovenstaande data te kunnen gebruiken is een inventarisatie gedaan van alle bekende tunnels in Europa. Deze inventarisatie is gebaseerd op een quick scan [9, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 28, 42, 64, 65, 66, 67] en resulteerde in 1590 tunnels. Bijlage C geeft een overzicht. Omdat bleek dat de informatie over de verkeersintensiteit van een deel van de landen niet beschikbaar was, is ervoor gekozen met een beperkte set te rekenen, namelijk die landen waarvan de verkeersintensiteit bekend was (zie gearceerde landen van Tabel 25). Deze set komt overeen met de landen die branden in een aaneengesloten periode hebben geregistreerd en in voorgaande paragrafen zijn gepresenteerd. Het aantal tunnels waarmee gerekend wordt, komt daarmee op 1148.

¹⁹ Geel gearceerd: het getal is gebaseerd op feiten

²⁰ Rood gearceerd: het getal is gebaseerd op een schatting. Voor de leeftijd van de tunnel is die bijvoorbeeld gebaseerd op het aantal jaren sinds de betreffende brand. Voor het aantal voertuigen is dat bijvoorbeeld gebaseerd op een inschatting van de AADT.

Uit het overzicht in Bijlage C volgt voor deze set tunnels een bezetting van 8939 miljoen motorvoertuigkilometers per jaar.

De gemiddelde leeftijd van tunnels in Nederland is, gebaseerd op [42], 25 jaar. Deze gemiddelde leeftijd wordt ook voor de Europese tunnels aangehouden. Daarmee volgt een totaal van $8939 \cdot 25 = 223.463$ miljoen mvtkm. Als we hier de 43.326 miljoen motorvoertuigkilometers uit de geregistreerde periode (volgens Tabel 14) vanaf trekken volgt een aantal van 180.137 miljoen mvtkm voor de niet-geregistreerde periode.

De veronderstelling is dat voor dit aantal van 180.137 miljoen mvtkm, afgezien van de branden in Tabel 15, geen brand heeft plaatsgevonden groter dan zeg 50 MW omdat dit anders niet aan analyses als DARTS was ontsnapt. De heat release rate (HRR) is bewust iets groter gekozen dan bij de analyse van de branden in Nederland omdat op Europese schaal wellicht een grote brand toch iets eerder wordt gemist.

5 Analyse

5.1 Het statistische model

Voor de kans op brand in een tunnel gaan we uit van een model dat bestaat uit het product van de kans op brand en de conditionele kans dat het vermogen van de brand hoger is dan een bepaalde waarde X :

$$P(HRR > X) = p \exp(-X/b) \quad (5.1)$$

met:

HRR = de heat release rate (brandvermogensdichtheid) in [MW]
 p = de kans op een voertuigbrand per miljoen voertuigkm [1/Mmvtkm].
 $\exp(-X/b)$ = kans op brand met $HRR > X$, gegeven optreden van de brand [-]
 b = gemiddelde waarde van HRR , gegeven optreden van de brand [MW]

Voor de kansverdeling van de heat release rate, gegeven dat de brand is uitgebroken, is dus gekozen voor een exponentieel model. Deze kansverdeling komt tegemoet aan het vermoeden dat er relatief veel kleine branden en weinig grote branden zijn. Op logaritmische schaal is de brandvermogensdichtheid een lineaire functie van het aantal motorvoertuigkilometers. Een dergelijk verband ziet men vaker bij extreme gebeurtenissen (stormvloedstanden, aardbevingen) en geldt meestal als "aan de conservatieve kant". In het hoofdstuk conclusies wordt nog teruggekomen op deze keuze.

De parameters p en b in (5.1) zijn onbekend en dienen te worden geschat op basis van de beschikbare data. Zoals gesteld in de inleiding zal gebruik worden gemaakt van een Bayesiaanse schattingsprocedure.

5.2 De schattingsprocedure

De Bayesiaanse schattingsprocedure gaat in eerste instantie uit van het Theorema van Bayes:

$$P(A|B) = P(B|A) \cdot P(A) / P(B) \quad (5.2)$$

Wij passen dit theorema op het schattingsvraagstuk toe door gebeurtenis A te vereenzelvigen met waarden die door de onbekende parameters p en b kunnen worden aangenomen en de gebeurtenis B met de beschikbare data. Kort genoteerd:

$$A = (p, b) \text{ en } B = (\text{data})$$

Daarmee gaat (5.2) over in:

$$P(p, b | \text{data}) = C \cdot P(\text{data} | p, b) \cdot P(p, b) \quad (5.3)$$

waarbij C overeenkomt met $1/P(B)$ uit (5.2). Verder is:

$P(p, b)$ = de "a priori kansverdeling" van de parameters p en b als nog geen data bekend zijn.

$P(p,b|data)$ = de "a posteriori kansverdeling" van parameters p en b na verwerking van de data.
 $P(data|p,b)$ = de kans dat de data optreedt bij bekend veronderstelde waarden van de parameters p en b (meestal aangeduid als de "Likelihood")
 C = een normeringsconstante

In woorden staat er dus:

$$\text{POSTERIOR} = C \times \text{LIKELIHOOD} \times \text{PRIOR}$$

De waarde C is eenvoudig uit te rekenen zodra de likelihood en de prior eenmaal bekend zijn. De constante zorgt ervoor dat de som van (of integraal over) alle posterior-kansen gelijk is aan 1.0, zoals het elke nette kansverdeling betaamt.

In onderstaande wordt zowel op de likelihood als op de prior nader ingegaan. Hoofdstuk 5.4 beschrijft de data waarmee de likelihood wordt uitgerekend. Zodra de posterior verdeling van p en b is bepaald zal in 5.6 de kans op optreden van de verschillende in de QRA onderscheiden categorieën branden (25, 50, 100 en 200 MW) worden bepaald.

5.3 De likelihoodfunctie

De likelihood is de kans op het vinden van de beschikbare data als de waarden van p en b bekend worden verondersteld. Dit behoort geheel tot het domein van de "gewone" kansberekening. In statistische analyses op basis van een frequentistische grondslag worden de waarden van de parameters p en b waarbij de likelihood zo groot mogelijk is, vaak als beste schatters gezien (maximum likelihoodschatters) en op basis van de likelihoodfunctie een betrouwbaarheidsinterval aangegeven.

In het onderhavige geval moeten we gezien de data in hoofdstukken 3 en 4 de likelihoodfunctie uitwerken voor drie typen data (zie ook 5.4, Tabel 16):

- er zijn $n1$ miljoen mvtkm met een brand met HRR gelijk aan X ;
- er zijn $n2$ miljoen mvtkm met geen brand
- er zijn $n3$ miljoen mvtkm met een brand en HRR kleiner dan X .

De categorie "groter dan" is niet uitgewerkt omdat er geen data van dat type aanwezig is.

In formulevorm uitgewerkt:

$$P(data|p,b) = [p/b \exp(-X/b)]^{n1} \quad (5.4a)$$

$$P(data|p,b) = [1-p]^{n2} \quad (5.4b)$$

$$P(data|p,b) = [1-p+p(1-\exp(-X/b))]^{n3} \quad (5.4c)$$

Vermenigvuldiging van (5.4a), (5.4b) en (5.4c), eventueel voor verschillende waarden van X , geeft dus de likelihood.

Data wordt in de berekening uitgedrukt in aantal branden per miljoen voertuigkilometers; het voorkomen van twee branden op eenzelfde pakket van 1 miljoen voertuigkilometers wordt verwaarloosd.

NB: Voor de eenheid van “een miljoen motorvoertuigkilometer” is in de berekening ook een keer 100.000 mvtkm gekozen. Dit had geen invloed op het resultaat hetgeen de correctheid van de veronderstelling bevestigt. De reden om te kiezen voor 1 miljoen voertuigkilometer en bijvoorbeeld niet voor 1 voertuigkilometer is een zuiver praktische en heeft te maken met het hanteerbaar houden van de getalwaarden in de computer.

5.4 De data

Nederland

Voor Nederland volgt uit hoofdstuk 3 dat slechts over een beperkt aantal jaren en een deel van de tunnels precieze data bekend is; de meeste branden zijn kleine (personenwagen)branden. Verder is bekend dat er over de gehele periode slechts één grote brand is geweest, zijnde de brand in de Velsertunnel in 1978 waarvan de HRR geschat wordt op 40-50 MW [44, 1]. Van de voertuigkilometers in de overige jaren is dus alleen bekend dat geen grote brand is opgetreden. We vertalen dat in de analyse in “kleiner dan 25 MW”; dit lijkt aan de veilige kant en dat is ook de bedoeling.

Ook de bekende “personenwagenbranden van ≤ 5 MW” worden meegenomen via de < 25 MW procedure. Eigenlijk zouden personenwagenbranden en de grotere vrachtwagenbranden geheel gescheiden moeten worden behandeld omdat ze eigenlijk niet te vangen zijn met een simpel model als (5.1), maar dat is mogelijk een verfijning voor later. De samengevatte data levert dan de volgende categorieën op (op basis van Tabel 5, a en b):

Tabel 16: Data Nederland

1	miljoen mvtkm	met 1 brand gelijk aan 30 MW ²¹
1890	miljoen mvtkm	geen brand (dit is dus 1896 - 6)
9087	miljoen mvtkm	geen brand of in ieder geval kleiner dan 25 MW

Het aantal van 1890 keer geen brand is het totaal aantal van 1896 uit de geregistreerde periode minus de 6 kleine brandincidenten.

Het aantal van 9087 keer geen of een kleine brand is het totaal van 10978 minus 1890 en minus de ene grote brand in de Velsertunnel. De 6 kleine branden uit de geregistreerde periode vallen ook in deze categorie.

Europa

Op vergelijkbare wijze kan op basis van hoofdstuk 4 (4.11 en 4.12) de Europese data als volgt worden samengevat:

²¹ Voor de Velsertunnel is varieerd met een HRR van 30 MW en 50 MW. De verschillen waren beperkt

Tabel 17: Data Europa

1 miljoen mvtkm	met een brand gelijk aan 300 MW
2 miljoen mvtkm	met een brand gelijk aan 200 MW ²²
0 miljoen mvtkm	met een brand gelijk aan 100 MW
0 miljoen mvtkm	met een brand gelijk aan 50 MW
2 miljoen mvtkm	met een brand gelijk aan 30 MW ²³
10 miljoen mvtkm	met een brand gelijk aan 20 MW ²⁴
42.949 miljoen mvtkm	geen brand (dit is dus 43.326-377)
180.499 miljoen mvtkm	geen brand of in ieder geval kleiner dan 50 MW

Het aantal van 42.949 keer geen brand is het totaal aantal van 43.326 uit de geregistreerde periode minus de 377 kleine brandincidenten.

Het aantal van 180.499 keer geen of een kleine brand is het totaal van 223.463 minus 42.949 en minus de 15 grote branden. De 377 kleine branden uit de geregistreerde periode vallen ook in deze categorie.

Hier is (voorzichtigheidshalve) gekozen voor kleiner dan 50 MW omdat een grotere brand in het buitenland wellicht eerder onopgemerkt kan blijven dan één in Nederland.

5.5 De Prior's

De keuze van de a priori kansverdeling voor de parameters p en b dient gebaseerd te zijn op de beschikbare voorkennis. Als die er niet is, wordt in het algemeen aanbevolen een brede verdeling te kiezen. Voorkomen moet worden dat op weinig echte informatie gebaseerde voorkennis, het eindantwoord gaat domineren.

Bij het opstellen van de prior wordt er verder vanuit gegaan dat p en b onafhankelijk van elkaar zijn, dus dat $P(p,b)$ (zie (5.3)) geschreven kan worden als:

$$P(p,b) = P(b) \cdot P(p) \quad (5.5)$$

We bespreken nu achtereenvolgens beide afzonderlijke priors $P(b)$ en $P(p)$.

Voor b (in wezen zowel het positieve gemiddelde als de standaardafwijking van de conditionele verdeling gegeven brand) wordt in de literatuur vaak gekozen voor een verdeling die daalt volgens $1/b$. Hier is gekozen voor een verdeling die daalt volgens $1/\log(b)$. Op deze manier wordt a priori veel ruimte gelaten voor grote branden, hetgeen conform de uitgangspunten van de analyse aan de veilige kant is. Ten behoeve van de numerieke uitwerking wordt de verdeling gediscretiseerd. We gaan uit van de discrete waarden 10 MW, 30 MW et cetera tot 190 MW. Kleinere waarden dan 10 MW zijn alleen van belang voor personenwagenbranden en kunnen dus buiten beschouwing blijven in deze analyse. Grotere²⁵ waarden van b dan 190 MW lijken uitermate onwaarschijnlijk. Op personenwagens komen we later nog terug. De resulterende verdeling (kansen evenredig met $1/\log(b)$ en

²² Waarbij de brand in de Hovdentunnel is meegenomen in de categorie 200 MW

²³ Waarbij de brand in de Ekeberggtunnel is meegenomen in de categorie 30 MW

²⁴ Waarbij de 15 MW branden zijn meegenomen in de categorie 20 MW

²⁵ b = gemiddelde HRR van alle branden, zie 5.1

genormeerd naar een som gelijk aan 1.0) is dan volgens a-priori-kans (1) in Tabel 18:

Tabel 18: A priori verdeling voor parameter b

b	A priori kans $P(b)$ (1)	A priori kans $P(b)$ (2)
[MW]	[-]	[-]
10	0,177655	0,116204
30	0,120271	0,116204
50	0,104566	0,116204
70	0,096285	0,104967
90	0,090907	0,099104
110	0,087026	0,094874
130	0,084039	0,091617
150	0,081639	0,089001
170	0,079650	0,086832
190	0,077961	0,084991
Totaal	1,00	1,00

Omdat het ook een gegeven is dat vrachtwagenbranden van 10 MW vanuit fysisch oogpunt minder zullen voorkomen, is in kolom (2) een correctie aangebracht waarbij de kansen op 10, 30 en 50 MW gelijk zijn getrokken. Dit zou in de Bayesiaanse analyse ook zijn gedaan als de parameter b een echt gemiddelde zou zijn geweest en een andere parameter de spreiding voor zijn rekening had genomen (zoals bijvoorbeeld bij de normale verdeling). De dubbelrol van b (het is zowel het gemiddelde en de standaardafwijking van de conditionele HRR-verdeling) vraagt hier om een kleine aanpassing. De invloed op de uitkomsten is overigens gering (orde 10 procent).

Op vergelijkbare manier is voor de parameter p een verdeling gekozen die evenredig is met $-1/\log(p)$. Als traject is gekozen voor 0,001 tot 0,1. De waarde $p=0,01/\text{Mmvtkm}$ (ofwel $p = 10^{-8}$ per mvtkm) ligt daar middenin. Er kan aanleiding zijn om op basis van de uitkomsten de grenzen of stapgrootte aan te passen, met name als de posterior-verdeling niet voldoende laag is aan de grenzen van het integratiegebied. De verdeling is weergegeven in Tabel 19.

Tabel 19: A priori verdeling voor parameter p

p [per Mmvtkm]	prior verdeling $P(p)$ voor p		p [per Mmvtkm]	prior verdeling $P(p)$ voor p
0,000100	0,033		0,003981	0,055
0,000158	0,034		0,006310	0,060
0,000251	0,036		0,010000	0,066
0,000398	0,038		0,015849	0,073
0,000631	0,041		0,025119	0,082
0,001000	0,044		0,039811	0,094

0,001585	0,047		0,063096	0,110
0,002512	0,050		0,100000	0,132

Er zijn dus grote a priori kansen voor grote waarden van p gekozen: de kans op gemiddeld één brand per 10^7 mvtkm is gelijk aan 0,132, de kans op gemiddeld één brand per 10^8 mvtkm is gelijk aan 0,066. Dit is dus een benadering aan de veilige kant.

NB: gegeven alle bekende data en de verwerking daarvan in de QRA zou het voor de hand kunnen liggen de kans op $p=0,01$ hoog te kiezen en daarna zowel in de hogere als lagere regionen de waarde af te laten nemen. Op die manier gebruiken we de data echter twee keer. De prior hoort zo neutraal mogelijk te zijn en nog geen gebruik te maken van de data die via de likelihoodberekening wordt toegevoegd. Bovendien willen we om aan de veilige kant te blijven zeker niet bij voorbaat hoge waarden van p een kleine a-priori waarschijnlijkheid geven. Overtuigender is de prior ongunstig te kiezen en de data voor de meevallers te laten zorgen.

5.6 De predictive verdeling

Als de prior-verdeling voor p en b zijn gekozen (zie 5.5) en de likelihood is berekend uit de data (5.3 en 5.4) kan de posteriorverdeling voor p en b worden vastgesteld met behulp van vergelijking (5.3). We hebben dan niet p en b berekend, maar alleen hun verdeling vastgesteld. Om nu de kans op overschrijding van een bepaalde waarde voor de HRR te vinden moet gebruik worden gemaakt van het Theorema van de totale waarschijnlijkheid:

$$P(\text{HRR} > X | \text{data}) = \sum \sum p \cdot \exp(-X/b) \cdot P(p, b | \text{data}) \quad (5.6)$$

Hierbij wordt dus de overschrijdingskans berekend voor alle mogelijke waarden van p en b , vermenigvuldigd met de a posteriori-kansen en vervolgens opgeteld.

5.7 Het resultaat

Nederland

Uitgaande van de Nederlandse data volgens Tabel 16 vinden we via de in 5.6 geschetste berekeningsgang (per mvtkm):

Tabel 20: Resulterende kansen op verschillende brandklassen met kolom (a) de geschatte intensiteit in de Velsertunnel gelijk aan 30 MW en bij kolom (b) 50 MW.

Brandklasse	Interval HRR	Kans per mvtkm (a)	Kans per mvtkm (b)
25 MW	15 – 35 MW	$6,9 \cdot 10^{-11}$	$5,3 \cdot 10^{-11}$
50 MW	35 – 75 MW	$4,4 \cdot 10^{-11}$	$5,1 \cdot 10^{-11}$
100 MW	75 – 150 MW	$2,7 \cdot 10^{-11}$	$3,7 \cdot 10^{-11}$
200 MW	150 – 300 MW	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$
Totaal		$1,5 \cdot 10^{-10}$	$1,6 \cdot 10^{-10}$

De eerste kolom geeft de brandklassen weer zoals momenteel in de QRA worden gehanteerd. In de tweede kolom staat het interval dat in combinatie met de via

vergelijking (5.6) berekende kansverdeling is gebruikt om de kans op de brand in de eerste kolom uit te rekenen. In de derde kolom staan de resultaten van de berekening wanneer als uitgangspunt voor de brand in de Velsertunnel 30 MW is gekozen en in de vierde kolom wanneer 50 MW is gekozen. De verschillen tussen kolommen 3 en 4 zijn niet significant.

De totaalkans voor alle brandklassen van 25 MW en hoger is ook uitgerekend voor de a-prioriverdeling, dat wil zeggen door toepassing van (5.6) maar met $P(p,b)$ in plaats van $P(p,b|data)$. Het resultaat is $2,2 \cdot 10^{-8}$. Dit bevestigt het (beoogde) conservatieve karakter van de prior.

We kunnen de gevonden kans ook vergelijken met de waarde die we zouden krijgen op basis van de Maximum Likelihoodschatters van p en b . Dit is een schatter uit de klassieke frequentistische statistiek. Het blijkt uit de berekening dat de likelihoodfunctie maximaal is voor:

$$p = 0,00016 / \text{Mmvtkm}$$

$$b = 30 \text{ MW}$$

De bijbehorende kans volgt uit:

$$P(\text{HRR} > 15 \text{ MW}) = 0,00016 \exp(-15/30) = 9,7 \cdot 10^{-11} / \text{mvtkm}$$

Dit ligt dicht in de buurt van de hierboven gegeven schatting en is een indicatie dat de statistische onzekerheid niet erg groot is.

Een andere vergelijking is de volgende: er is op de ca. 11000 miljoen mvtkm slechts een enkele brand van grote omvang geconstateerd. Dat geeft een directe schatting van:

$$P(\text{Grote Brand}) = 1/11000 = 9,1 \cdot 10^{-5} / \text{Mmvtkm} = 0,91 \cdot 10^{-10} / \text{mvtkm}$$

We zien dat ook deze schatting dicht in de buurt ligt. De statistische procedure pakt iets conservatiever uit. In feite houdt die rekening met het feit dat de kans groter is, maar door toeval niet meer branden zijn opgetreden.

Tenslotte is er nog de kans die met een 95 % betrouwbaarheid wordt gehaald. In dat geval is $p = 0,0005 / \text{Mmvtkm}$ en $b = 90 \text{ MW}$ waarmee $P(\text{HRR} > 15 \text{ MW}) = 4,2 \cdot 10^{-10}$. Deze ligt dus een factor 3 boven de gevonden Bayesiaanse schatting.

Vergelijking met huidige QRA

In onderstaande is een berekening gemaakt van hetzelfde als Tabel 20, maar dan volgens de huidige QRA [36].

Tabel 21: Resulterende kansen op verschillende brandklassen volgens QRA-tunnels 2.0:

Brandklasse	Initiële kans per mvtkm	Kans per mvtkm QRA-tunnels 2.0
25 MW	$2 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
50 MW	$2 \cdot 10^{-8}$	$6,0 \cdot 10^{-10}$
100 MW	$2 \cdot 10^{-8}$	$4,0 \cdot 10^{-10}$
200 MW	$2 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-12}$
Totaal		$2,2 \cdot 10^{-9}$

Uitgangspunt in de QRA is de initiële kans op een brand van $2 \cdot 10^{-8}$ per mvtkm. Deze wordt gecombineerd met zaken als bluskans, de fractie vrachtwagens, de kans op brandbare lading of geen brandbare lading en vervolgekansen op respectievelijk branden van 25, 50, 100 en 200 MW. Voor details wordt verwezen naar Bijlage B.

De analyse in dit rapport komt voor branden van de klasse 25 MW en hoger dus op $1,5 \cdot 10^{-10}$ per mvtkm en de huidige analyse op $2,2 \cdot 10^{-9}$. We concluderen dat de huidige analyse aanleiding is de uiteindelijke kansen op grote branden minimaal een orde factor 10 te verlagen. Over hoe dit moet gebeuren doet de analyse feitelijk geen uitspraak.

In onderstaande wordt een suggestie gedaan.

Allereerst geldt dat in het onderhavige rapport de kans op een brand groter dan klasse 25 MW gerelateerd is aan het totaal aantal motorvoertuigkilometers door de tunnels, dus personenauto's, vrachtauto's, bussen e.d. bij elkaar. Grote branden kunnen echter beter gerelateerd worden aan het aantal vrachtwagenkilometers. Er kan namelijk redelijkerwijs van worden uitgegaan dat branden in de orde van 25MW of meer verbonden zijn met brandincidenten met vrachtwagens. Binnen de huidige versie van de QRA gebeurt dat ook.

Uit data van het CBS [69] blijkt dat in er in 1987 t/m 2011 sprake was van een groei van het aandeel kilometers vrachtvervoer (bestelauto's + vrachtauto's) ten opzichte van het totale aantal voertuigkilometers van 10,96% naar 15,47%. Als deze groei conservatief ook wordt aangehouden voor de periode 1942 t/m 1986, dan bedraagt het gemiddelde aandeel vrachtvervoerkilometers door de jaren heen circa 10% van het totaal aantal voertuigkilometers. Dit betekent dat de kans op een brand in de klasse 25 MW of hoger (zie tabel 20) $10 \cdot 1,5 \cdot 10^{-10} = 1,5 \cdot 10^{-9}$ per vrachtwagenkilometer [vwkm] bedraagt. De huidige kans volgens de QRA is $1,8 \cdot 10^{-8}$ per vwkm.

Er zijn drie kandidaten voor de reductie:

- Toevoegen kans op kleine vrachtwagens en bestelwagens;
- De kans op blussen;
- De initiële kans op brand.

Uit [69] blijkt dat het vrachtverkeer voor het overgrote deel bestaat uit bestelauto's en slechts voor een klein deel uit zware vrachtwagens (HGV, Heavy Goods

Vehicles), namelijk gemiddeld 20% in de periode 1987-2011; er kan redelijkerwijs worden aangenomen dat bestelauto's niet leiden tot een brand in de klasse 25MW of hoger; meestal zal dit resulteren in branden in de categorie zeg 5-15 MW.

Momenteel wordt in de QRA een bluskans van 10 % aangehouden, maar uit data in dit rapport (zie bijvoorbeeld paragraaf 4.7) lijkt te volgen dat succesvol blussen vaker voorkomt. Men zou kunnen overwegen de kans op blussen te verhogen. Voor de getalsmatige aanpassing is nader onderzoek noodzakelijk.

De initiële brandkans kan tenslotte zodanig worden aangepast dat de totale reductie op een factor 10 (of desgewenst 15) uitkomt.

We analyseren tot slot ook nog de onderlinge verhouding van de brandklassen 25 MW, 50 MW, 100 MW en 200 MW volgens de huidige analyse en de QRA, zie Tabel 22.

Tabel 22: Onderverdeling vrachtwagenbranden

brandklasse	Analyse dit rapport (volgens tabel 20, kolom (a))	QRA (zie Tabel 24)
25 MW	44%	50 %
50 MW	28%	30 %
100 MW	17%	20 %
200 MW	8%	0,08 %

Alleen de kans op een zeer grote brand van 200 MW wijkt eigenlijk substantieel af, de andere verschillen zijn klein. Of de kans op een 200 MW brand werkelijk zoveel hoger is, valt eigenlijk niet uit de analyse te concluderen. Het veronderstelde exponentiële kansmodel (5.1) gaat nu eenmaal voorbij aan de fysische werkelijkheid: als fysisch gesproken bijvoorbeeld extra gebeurtenissen (tweede voertuig, brandoverslag) nodig zijn om een dergelijke grote brand te veroorzaken, dan kan daar op basis van de Nederlandse data geen uitspraak over worden gedaan.

Kleine branden

In deze analyse in dit rapport heeft de nadruk gelegen op de grote branden die geïnitieerd worden door vrachtwagens. Op basis van de geregistreerde data over de laatste 6 jaren valt echter ook iets te zeggen over de kleinere branden die door personenwagens worden geïnitieerd. Er zijn van dit type 6 branden (orde ≤ 5 MW) geweest op 1896 miljoen mvtkm. Dit geeft een kans voor brand op de brandklasse van 5 MW van $6/1896 = 3,2 \cdot 10^{-9}$ per mvtkm. In de huidige QRA is het uitgangspunt dat alle personenautobranden tezamen met de gebluste branden kleiner dan 25MW blijven. De kans op een kleine brand (< 25 MW) is, afhankelijk van de fractie personenauto's, ca. $1,8 \cdot 10^{-8}$ per mvtkm. Ook hier zou dus een reductie in de kans gerechtvaardigd zijn op basis van de beschikbare data.

Europa

Uitgaande van de Europese data volgens hoofdstuk 5.4 en de prior's voor p en b volgens hoofdstuk 5.5 vinden we via de geschetste berekeningsgang (per mvtkm):

$-P(\text{HRR} > 15 \text{ MW}) = 1,1 \cdot 10^{-10}$	(Nederland $1,6 \cdot 10^{-10}$)
$-P(\text{HRR} > 35 \text{ MW}) = 6,5 \cdot 10^{-11}$	(Nederland $8,9 \cdot 10^{-11}$)
$-P(\text{HRR} > 75 \text{ MW}) = 2,3 \cdot 10^{-11}$	(Nederland $4,5 \cdot 10^{-11}$)

We zien dat voor alle brandgroottes de Europese kansen ongeveer gelijk zijn aan de kansen die volgen uit de Nederlandse data. De Europese data waren bedoeld om bij te dragen aan een conservatieve prior, maar dat is dus niet aan de orde. De Europese data zullen dus verder niet worden meegenomen. Dit laat onverlet dat van dit resultaat een geruststellende boodschap uitgaat als de kans op een grote brand in de QRA wordt verlaagd.

6 Conclusies en aanbevelingen

Rijkswaterstaat heeft TNO opdracht gegeven om te onderzoeken hoe groot de kans op een grote brand in tunnels in de praktijk is, gebaseerd op statistiek en casuïstiek van branden in tunnels. De uitkomsten zijn vergeleken met de theoretische kans die gebruikt wordt in QRA-tunnels, zoals vastgelegd in [2]. Het onderzoek resulteert in aanbevelingen over het handhaven dan wel aanpassen van de gehanteerde aannames in QRA-tunnels.

Uit het onderhavige onderzoek blijkt dat, uitgaande van de Nederlandse data en een conservatieve a priori-verdeling, voor de kans op een grote vrachtwagenbrand (HRR groter dan brandklasse 25 MW) wordt gevonden:

$$-P(\text{vrachtwagenbrand}) = P(\text{HRR-klasse} > 25\text{MW}) = 1,5 \cdot 10^{-10} \text{ per mvtkm}$$

Volgens de huidige initiële kans gehanteerd in QRA-tunnels is deze kans $2,2 \cdot 10^{-9}$ per mvtkm. Er is dus aanleiding om de QRA-schatting bij te stellen.

Alhoewel de data verzameld waren als aantallen branden in verhouding tot de aantallen motorvoertuigkilometers is het zuiverder om onderscheid te maken tussen (minimaal) personenwagens en vrachtwagens. In de huidige versie van de QRA gebeurt dat ook. Uitgaande van een fractie van 10% vrachtwagens op het totale verkeer komen we dan op:

$$-P(\text{vrachtwagenbrand}) = P(\text{HRR-klasse} > 25\text{MW}) = 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ per vwkm}$$

Ter verificatie zijn er diverse vergelijkende berekeningen uitgevoerd, o.a. op de frequentistische wijze en op basis van de Maximum Likelihoodschatters van p en b , waaruit vergelijkbare uitkomsten als bovenstaande komen.

De onderzochte Europese data geven een vergelijkbaar beeld, ondanks de grote branden in de Mont Blanc tunnel en dergelijke. In het kader van de conservatieve benadering is besloten hier geen gebruik van te maken. Dit laat onverlet dat van het gevonden resultaat een geruststellende boodschap uitgaat als de kans op een grote brand in de QRA wordt verlaagd.

Gezien de conservatieve benadering zou de kans met een factor 10 of zelfs iets meer kunnen worden verkleind. Over hoe dit moet gebeuren doet de uitgevoerde analyse feitelijk geen uitspraak. Mogelijkheden zijn te vinden in de bluskans, een differentiering naar Heavy Goods Vehicles en kleinere vrachtwagens en de initiële brandkans. In hoofdstuk 5.7 is een suggestie gedaan. Indien tot aanpassing van de brandkans wordt overgegaan, verdient het aanbeveling te onderzoeken of het verschil maakt hoe (keuze voor en eventueel verhouding tussen de drie mogelijkheden voor aanpassing) de factor 10 wordt verdisconteerd.

Tenslotte is in het rapport nog kort aandacht besteed aan de kleine branden (orde tot 5 MW) die vooral door personenwagens worden veroorzaakt. Ook daar lijkt een reductie te rechtvaardigen.

7 Literatuur

1. Steunpunt Tunnelveiligheid, Grote vrachtwagenbrand in tunnel A2 Leidsche Rijn, risico's schade en kosteneffectiviteit maatregelen, 27 juli 2010
2. RWS Steunpunt Tunnelveiligheid, QRA-tunnels 2.0, Achtergronddocument, 2 februari 2012
3. RIVM, Protocol aanpassing rekenmethodiek(en) kwantitatieve risicoanalyses Externe Veiligheid, 13 september 2011
4. Jong, B. de, Report on incidents and their evaluation in tunnels in the trans-European road network (art15, par2, directive 2004/54/EC), 6 januari 2009
5. Swaak, F., Report of the Netherlands to the European Commission on significant incidents and their evaluation in tunnels in the trans-European road network (Article 15 (1) European Directive 2004/54/EC), 12 oktober 2010
6. Auteur onbekend, Evaluatieverslag autobrand Noordtunnel 18-01-2012, versie 1.0 definitief, datum onbekend
7. Nussbaumer, C., F.H. Nitsche, Safety of road tunnels, traffic safety in highway and expressway tunnels, 1999-2007
8. Nussbaumer, C., G. Nossek, Safety of road tunnels, traffic safety in highway and expressway tunnels, 1999-2009
9. Schwaighofer, P., F.Schneider, Sicherheit von Straßentunnels, Verkehrssicherheit in Tunnels auf Autobahnen und Schnellstraßen (1999-2011)
10. Commandeur, P., et al, VeVoWeg, Handreikingen voor de bepaling van interne- en externe veiligheidsrisico's bij zwaar verkeer, inclusief het transport van gevaarlijke stoffen, 4 januari 1998
11. A602 – Liège, Tunnels de Cointe et de Kinkempois, Directive 2004/54 – Article 15.1, Incendies et accidents significatifs, Rapport de synthèse, Années 2006 à 2008
12. Report on fires and on accidents in tunnels (Art. 15, par. 1). Deadline 30/09/2008. Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the TERN (Kennedytunnel, Craeybeckxtunnel, 4-Armentunnel), report period 2006-2007, 15 march 2010
13. Dehalu, J., Langendries, R. (Sofico), Brief betreffende "Directive européenne 200²⁶/54 art. 15.1 – Rapport d'incidents 2006-2008 – Tunnel de Cointe et Kinkempois, Angleur, 08/04/2010
14. Report on fires and on accidents in tunnels (Art. 15, par. 1). Deadline 30/09/2010. Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the TERN (Kennedytunnel, Craeybeckxtunnel, 4-Armentunnel), report period 2008-2009, 15 october 2010
15. Krieger, J., Bericht über Brände und Unfälle in tunneln, Berichtszeitraum 01.05.2006 – 31.12.2007, 30/09/2008
16. Krieger, J., Bericht über Brände und Unfälle in tunneln, Berichtszeitraum 01.01.2008 – 31.12.2009, 30/09/2010
17. Øresundsbro Konsortiet, Report on fires and accidents in the Øresund Tunnel 2006/2007, 22 september 2008
18. Øresundsbro Konsortiet, Report on fires and accidents in the Øresund Tunnel 2008/2009, 30 August 2010
19. The Danish Road directorate, operation and maintenance, Report on fires and accidents, The Limfjord Tunnel in Denmark, 28.10.2008

²⁶ De '4' ontbreekt in het jaartal van de EU Directive

20. The Danish Road directorate, operation and maintenance, Report on fires and accidents, The Limfjord Tunnel in Denmark, 01.10.2010
21. Tårnby tunnellen, Report of fires and accidents in the Tårnby tunnel, 07/10/2008
22. A/S Øresund, Report of fires and accidents in the Tårnby tunnel 2008/2009, 30/09/2010
23. Amundsen, F.H., Engebretsen, A., Statens Vegvesen, Studies on Norwegian road tunnels II, an analysis on traffic accidents in road tunnels 2001-2006, 09-06-2009
24. Marton, M., Swedish transport Agency, Report of fires and accidents for tunnels on the Swedish Trans-European road network 2010-2011, 26 September 2012
25. Freiholtz, B., Trafikverket, Report at the 7th meeting of the Committee, 04-05-2010
26. Larsson, A., Report on fires and accidents for tunnels in the Swedish Trans-European road network 2006-2010, 26-08-2010
27. Centre d' Etudes des Tunnels, rapport sur les accidents et les incendies dans les tunnels français de plus de 500 m du réseau routier transeuropéen, années 2006 – 2007, février 2009
28. Centre d' Etudes des Tunnels, rapport sur les accidents et les incendies dans les tunnels français de plus de 500 m du réseau routier transeuropéen, années 2008 – 2009, septembre 2010
29. Legay, A., EU Directive 2004/54/EC Article 15 Reporting (April 2006 – March 2008) Road Tunnel Safety Regulations EU TERN Route - A1(M) Hatfield report, 24.07.2008
30. Legay, A., EU Directive 2004/54/EC Article 15 Reporting (April 2006 – March 2008) Road Tunnel Safety Regulations EU TERN Route – M25 Holmesdale tunnel, 24.07.2008
31. Williams, R., A., EU Directive 2004/54/EC and Road Tunnel Safety Regulations 2007, Article 15 and Regulation 6 Reporting, EU TERN Route E22 and UK 55 Trunk Road A55 tunnels, (Conwy, Penmaenbach and Pen-y-Clip), April 2006 – March 2008, 27.08.2008
32. Mack, A., Dartford – Thurrock crossing, the road tunnel safety regulations 2007, two yearly tunnel fire/accident report for the Dartford tunnels to 31st March 2008, August 2008
33. Dronkers, J.H., Report of the Netherlands on significant incidents and their evaluation in tunnels in the trans European road network (Article 15 (1) European Directive 2004/54/EC), 24 september 2012
34. Coussemaeker, P., Bihin, J-F., Egis mobilité, Liaison E40-E25, Bilan Trafic/incidents Année 2010, 09/06/2011
35. Report on fires and on accidents in tunnels (Art. 15, par. 1). Deadline 30/09/2012. Directive 2004/54/EC on minimum safety requirements for tunnels in the TERN (Kennedytunnel, Craeybeckxtunnel, 4-Armentunnel), report period 2010-2011, 28/09/2012
36. Krieger, J., Bericht über Brände und Unfälle in tunneln, Berichtszeitraum 01.01.2010 – 31.12.2011, 30/09/2012
37. Naevestad, T-O., Frislid Meyer, S., Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2011, Oslo, april 2012
38. Willmann, C., Centre d' Etudes des Tunnels, rapport sur les accidents et les incendies dans les tunnels français de plus de 500 m du réseau routier transeuropéen, années 2010 – 2011, 14 septembre 2011

39. Dankaart, P., Email betreffende 'autobranden in de Westerscheldetunnel', d.d. 16-08-2012
40. Rozeboom, C., Email betreffende 'Registratie branden in Vlaketunnel', d.d. 17-09-2012
41. Bras, A., Emails betreffende 'Tunnelbeheerders', d.d. 17-09-2012 en 19-09-2012
42. Mante, R.W., 4814-2012-0053 Overzicht voertuigkilometers en grote branden in Nederlandse tunnels.xls, d.d. 22-11-2012
43. PIARC Committee on Road tunnels (C5), Fire and smoke control in road tunnels, World Road Association, 1999
44. Amundsen, F.H., Amundsen b3.xls, OECD study: Large tunnel fires, FHA/AHO 3-2-2000
45. Richtlijn 2004/54/EC van het Europees parlement en de raad van 29 april 2004 inzake minimum veiligheidseisen voor tunnels in het trans-Europese wegennetwerk
46. OECD/PIARC, ERS2 "Transport of dangerous goods through road tunnels", Technical report of Mission 2
47. <http://www.atmb.com/atmb/fr/tunnel/102/le-tunnel-du-mont-blanc/le-tunnel-aujourd-hui/trafic.html> (opgevraagd op 07-11-2012)
48. <http://www.wegenwiki.nl/Tauerntunnel> (opgevraagd op 07-11-2012)
49. Amundsen, F.H., Data on large tunnel fires, Oslo, Norway, April 20th, 2000
50. http://en.wikipedia.org/wiki/Gotthard_Road_Tunnel (opgevraagd op 07-11-2012)
51. <http://no.wikipedia.org/wiki/Ekebergstunnelen> (opgevraagd op 07-11-2012)
52. <http://de.wikipedia.org/wiki/Pf%C3%A4ndertunnel> (opgevraagd op 07-11-2012)
53. http://routes.wikia.com/wiki/Tunnel_de_l%27Arme (opgevraagd op 07-11-2012)
54. http://routes.wikia.com/wiki/Tunnel_de_Castellar (opgevraagd op 07-11-2012)
55. http://en.wikipedia.org/wiki/Hitra_Tunnel (opgevraagd op 07-11-2012)
56. <http://www.felbertauernstrasse.at/de/aktuelles.html> (opgevraagd op 07-11-2012)
57. http://en.wikipedia.org/wiki/Fr%C3%A9jus_Road_Tunnel (opgevraagd op 07-11-2012)
58. <http://www.leparisien.fr/espace-premium/val-de-marne-94/19-accidents-le-week-end-dernier-dans-ce-tunnel-03-01-2012-1793927.php> (opgevraagd op 07-11-2012)
59. UPTUN, Workpackage 4 Fire effects and tunnel performance: system structural response, D411, Critical Structural and Functional Components, official deliverable © version September 2008
60. <http://no.wikipedia.org/wiki/R%C3%B8dalstunnelen> (opgevraagd op 07-11-2012)
61. http://en.wikipedia.org/wiki/Kingsway_Tunnel (opgevraagd op 07-11-2012)
62. UNECE 28-12-2001 (Geen nadere informatie beschikbaar)
63. DARTS
64. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_tunnels_by_location (opgevraagd op 07-11-2012)
65. UPTUN, Workpackage 1, Prevention, detection and monitoring, D11c, Tunneldata, september 2008
66. UNECE Ad hoc multidisciplinary group of experts on safety in tunnels, Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels, Trans/AC./7/9, 10 December 2001
67. <http://www.lotsberg.net>

68. Gebruikershandleiding QRA-tunnels 2.0, 2 februari 2012, pagina 36-37
69. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Statline en Historische Data voor de periode 1987 t/m 2011, met betrekking tot het aantal voertuigkilometers per jaar voor de verschillende voertuigtypen: personenauto's, bestelauto's (< 3.500 kg laadvermogen) en vrachtauto's
70. Cétu, EU REPORTS, French tunnels of the trans - European transport network that are longer than 500 m (Email d.d. 29-10-2012)
71. Boom-vrachtagenbrand5.xlsx, per email ontvangen van RWS Steunpunt tunnelveiligheid, d.d. 18-12-2012

8 Ondertekening

Delft, 22 januari 2013

A handwritten signature in blue ink that reads "Nelisse". The signature is enclosed within a large, hand-drawn oval.

Mevr. ir. R.M.L. Nelisse
Auteur

A handwritten signature in blue ink, consisting of several stylized, overlapping loops and lines.

Dr. ir. A.H.J.M. Vervuurt

A handwritten signature in blue ink, featuring a complex, scribbled design with multiple overlapping lines.

Ir. M.D. Stamm
Research Manager

A Berekening

De berekening is uitgevoerd met behulp van een spreadsheet (zie Tabel 23). Achtereenvolgens zijn er de volgende stappen:

- DATA en RESULTATEN
- PRIOR
- LIKELIHOOD
- LIKELIHOOD x PRIOR
- POSTERIOR
- P(X|pb)
- PREDICTIVE

Ter toelichting:

De DATA zijn overeenkomstig de laatste regels van hoofdstuk 5.4

Het RESULTAAT wordt ontleend aan de uitkomst onderaan de PREDICTIVE-tabel en geeft de kans op overschrijding van X. De waarde X is een invoerparameter. Door X=0 te kiezen krijgt men de predictive waarde van p en dus de kans op brand per (miljoen) mvtkm (afgezien van gebluste branden).

De PRIOR komt overeen met de tabellen in Hoofdstuk 4, waarbij $P(p,b)=P(b) \cdot P(p)$. De breedte van deze tabel is gelijk aan het aantal gekozen p-waarden en de lengte is gelijk aan het aantal gekozen b-waarden. Dit geldt ook voor de volgende tabellen.

De LIKELIHOOD volgt de formules uit hoofdstuk 5.3. Voor p en b gelden dezelfde waarden als in de PRIOR, de X en n-waarden volgen uit de data-tabel.

Daarna volgt een blok met de vermenigvuldiging van PRIOR en LIKELIHOOD voor elke combinatie van p en b. Alle gevonden getallen worden vervolgens bij elkaar geteld tot het getal "sum".

In de Tabel POSTERIOR worden de getallen van het bovenstaande blok genormeerd via delen door "sum". De som van alle getallen in het blok is dan gelijk aan 1.0 en we hebben dus een nette kansverdeling $P(p,b|data)$.

Het blok $P(X|b,p)$ bevat de conditionele kans op overschrijding van X voor alle gegeven combinaties p en b op basis van (5.1).

In het blok predictive wordt de conditionele kans op overschrijding van X gegeven de data bepaald op grond van het Theorema van de Totale Waarschijnlijkheid:

$$P(HRR > X | data) = \sum \sum P(X | b, p) \cdot P(p, b | data)$$

In feite komt dit dus neer op het vermenigvuldigen van overeenkomstige elementen uit de twee bovenliggende blokken en het optellen van al deze producten. Het resultaat staat in het rode vak rechts onderaan en een kopie daarvan staat in het RESULTATEN-blok bovenin.

Daarna volgt nog een berekening om de betrouwbaarheidsband te bepalen. Het blijkt dat de gevonden Bayesiaanse resultaten vrijwel overeenkomen met de 5% betrouwbaarheids grens van de puntschatters.

B Gebeurtenissenboom QRA-tunnels 2.0

In figuren 1 en 2 wordt het deel van de gebeurtenissenboom uit QRA-tunnels 2.0 weergegeven dat relevant is voor het onderhavige onderzoek. In tabel 24 wordt de som zoals gebruikt in het hoofdrapport weergegeven. De figuren en tabel zijn afkomstig uit [71].

N.B in dit (deel van de) boom worden alleen de snelontwikkelende branden die bij een vrachtwagen zijn begonnen getoond					
Dus bijv. een 25MW die ontstaan is bij een personenauto en overgeslagen naar een vrachtwagen wordt hier niet in dit deel van de boom getoond (maar uiteindelijk in model wel mee genomen)					
Bij snelle branden is er brandoverslag, 10% v. branden is snel)					
Snel ontwikkelende branden					
Voorbeeldwaarden A2LR		Type lading	Omvang brand	vervolgkans	Frequentie
Poverslagauto	0,1		50 MW		
Poverslagbrandbaar	0,5		$P50*(1-Poverslag*Abrrb*(Avracht-Atank)-Poverlag*Atank)$		5,83365E-10
Poverslagbus/nietbrandbaar	0,3		$= 0,6*(1-0,5*0,5*0,1091-0,5*0,0009)$	0,583365	
P50	0,6				
Aauto	0,88	brandbare lading	100 MW		
Abus	0,01	Abrrb	$(1-P50)*(1-Poverslag*Atank) + P50*Poverslag*Abrrb*(Avracht-Atank)$		4,16185E-10
Avracht	0,11	0,5	$= 0,4*(1-0,5*0,0009) + 0,6*0,5*0,5*0,1091$	0,416185	
Atank	0,0009				
kans geblust P_blus	0	(Poverslag=0,5)	200 MW		
brandkans	2,00E-08		Poverslag - Atank		4,5E-13
percentage snel (Pverd,snel)	0,1		0,5*0,0009	0,00045	
				som	1,0000
	Wel brand				
	2E-08. (1-P_blus)				
	0,00000002				
	1		25 MW		
1 vrachtwagenkilometer			$(1 - Poverslag) + Poverslag. Aauto$	0,964	9,64E-10
			$= 0,7 + 0,3*0,88$		
			50 MW		
		(Poverslag=0,3)	$Poverslag*(Abus + (1-Abrrb)*(Avracht-Atank) + P50*Abrrb*(Avracht-Atank)$		2,9184E-11
		niet-brandbare	$0,3*(0,01+0,5*0,1091+0,6*0,5*0,1091)$	0,029184	
		0,5 (1-Abrrb)			
		0,5	100 MW		
			$Poverslag*(1 - P50)*Abrrb*(Avracht-Atank)$		6,546E-12
			$0,3*0,4*0,5*0,1091$	0,006546	
			200 MW		
			$Poverslag*Atank$	0,00027	2,7E-13
	0		$0,3*0,0009$		
	geblust			som	1,000
	2E-08. p_blus				
	0,00E+00				0,00E+00
	Geen brand				
resultaten (dux excl branden die in een ander voertuig zijn begonnen)					
vervolgkans op brandgrootte gegeven dat snelle brand in vrachtwagen start:					
25MW	0,4820				
50MW	0,3063				
100MW	0,2114				
200MW	0,0004				
geblust:	0,0000				
	1,00				
freq. per vrachtwagenkm		per autokm	per buskm	per vrtgkm	
25MW	9,64E-10	1,30E-11	1,93E-09	1,36E-10	
50MW	6,13E-10	6,60E-12	5,84E-11	7,32E-11	
100MW	4,23E-10	4,40E-12	1,31E-11	5,01E-11	
200MW	7,20E-13	0	5,40E-13	8,40E-14	1,67E-12
geblust:	0,00E+00				(incl. uitstr GS)
	2,00E-09				
branden met GS (plasbranden, fakkels, gaswolken etc), ter indicatie, is ter vereenvoudiging incl niet brandbare toxische releases					
	uitstr	ontst.			
atm. Tank	0,076	0,2		0,0152	
druk tank	0,039	1		0,039	
	ca, 10x zoveel LF als GF, gewogen vervolgkans op ernstig incident":				
				0,01758	
kans op ongeval met GS (per Gskm)				1,76E-09	
kans op ongeval met GS (per vrachtwagenkmkm)				1,44E-11	
kans op ongeval met GS (per vrtgkm)				1,58E-12	
letselongevalsfrequentie		0,0000001			

Figuur 1: Gebeurtenissenboom QRA-tunnels 2.0 (snel)

N.B in deze boom alleen de "langzaam ontwikkelende" branden die bij een vrachtwagen zijn begonnen.				
Dus bijv. een 25MW die ontstaan is bij een personenauto en overgeslagen naar een vrachtwagen wordt hier niet in de boom opgenomen.				
Tuseen [] de uitkomst voor alle voertuigbranden.				
Langzaam ontwikkelende branden				
Voorbeeldwaarden A2LR	Type lading	Omvang brand	vervolgkans	
Poverslagauto	0	50 MW		
Poverslagbrandbaar	0	$P50 * (1 - Poverslag * Abrb * (Avracht - Atank) - Poverslag * Atank)$	4,86E-09	
Poverslagbus/nietbrandbaar	0	$= 0,6 * 1 - 0$	0,6	
P50	0,6			
Aauto	0,88	brandbare lading	100 MW	
Abus	0,01	Abrb	$(1 - P50) * (1 - Poverslag * Atank) + P50 * Poverslag * Abrb * (Avracht - Atank)$	3,24E-09
Avracht	0,11	0,5	$= 0,4 * 1 + 0$	0,4
Atank	0,0009			
kans geblust P_blus va	0,1	(Poverslag=0)	200 MW	
brandkans	2,00E-08		Poverslag * Atank	0
percentage langzaam	0,9		= 0	0
geblust P_blus auto	0,25			
	Wel brand		som	1,0000
	2E-08. (1-P_blus)			
	0,00000018			
	0,9		25 MW	
1 vrachtwagenkilometer			$(1 - Poverslag) + Poverslag * Aauto$	1
			$= 1 + 0$	8,1E-09
			50 MW	
		(Poverslag=0)	$Poverslag * (Abus + (1 - Abrb) * (Avracht - Atank) + P50 * Abrb * (Avracht - Atank))$	0
	niet-brandbare lading		0	0
	0,5 (1-Abrb)			
	0,5		100 MW	
			$Poverslag * (1 - P50) * Abrb * (Avracht - Atank)$	0
			0	0
			200 MW	
			Poverslag * Atank	0
	0,1		0	0
	geblust		som	1,000
	2E-08. p_blus			
	2,00E-09			1,80E-09
	Geen brand			
resultaten (dux excl branden die in een ander voertuig zijn begonnen)				
vervolgkans op brandgrootte gegeven dat langzame brand in vrachtwagen start:				
25MW	0,4500			
50MW	0,2700			
100MW	0,1800			
200MW	0,0000			
geblust:	0,1000			
	1,00			
freq. per vrachtwagenkm		per autokm	per buskm	per vrtgkm
25MW	8,10E-09	0,00E+00	1,62E-08	1,05E-09
50MW	4,86E-09	0,00E+00	0,00E+00	5,30E-10
100MW	3,24E-09	0,00E+00	0,00E+00	3,53E-10
200MW	0,00E+00	0	0,00E+00	0,00E+00
geblust:	1,80E-09			
	1,80E-08			

Figuur 2: Gebeurtenissenboom QRA-tunnels 2.0 (langzaam)

Tabel 24: Berekening volgens QRA-tunnels 2.0

	snel	langzaam	gewogen som							
vervolgkans op brandgrootte gegeven dat brand in vrachtwagen start: % totaal										
25MW	0,4820	0,4500		0,4532	0,50					
50MW	0,3063	0,2700		0,2736	0,30					
100MW	0,2114	0,1800		0,1831	0,20					
200MW	0,0004	0,0000		0,0000	0,00004					
geblust:	0,0000	0,1000		0,0900	0,91					
		0								
freq. per vrachtwagenkm										
			GS	totaal		per vrtgkm	snel	langzaam	GS	totaal
25MW	9,64E-10	8,10E-09		9,06E-09	50		1,36E-10	1,05E-09		1,2E-09
50MW	6,13E-10	4,86E-09		5,47E-09	30		7,32E-11	5,30E-10		6,0E-10
100MW	4,23E-10	3,24E-09		3,66E-09	20		5,01E-11	3,53E-10		4,0E-10
200MW	7,20E-13	0,00E+00	1,44E-11	1,51E-11	0,08		8,40E-14	0,00E+00	1,58E-12	1,7E-12
geblust:	0,00E+00	1,80E-09		1,80E-09	1,82E-08					2,2E-09
	2,00E-09	1,80E-08		2,00E-08						

C Incidentele registratie Europa

Hieronder is een overzicht gegeven van alle Europese tunnels en hun cumulatieve lengte die zijn gevonden. De landen die branden binnen een aaneengesloten periode hebben geregistreerd, zijn gekleurd weergegeven.

Tabel 25: Overzicht van aantal en cumulatieve lengte van Europese tunnels

Land	Aantal tunnels	Lengte [km]
België [67]	45	26
Duitsland ²⁷	28	41,1
Noorwegen	797	778,5
Zweden [67]	12 ³⁰	24
Denemarken [67]	8	24
Frankrijk ²⁸	46	138
Oostenrijk	150	348
Engeland [67]	36	35
Nederland	26	30
Andorra [67]	6	13
Italië	177	338 ²⁹
IJsland	10	6
Kroatië [67]	47 ³⁰	67
Luxemburg [67]	8 ³⁰	12
Portugal [67]	48 ³⁰	61
Slovenië [67]	17 ³⁰	28
Slowakije [67]	13 ³⁰	33
Spanje ³¹	25	63
Tsjechië [67]	24 ³⁰	29
Zwitserland ³²	67	168
Totaal	1590	2262,6
Totaal gekleurd	1148	1444,6

²⁷ Op basis van [66] zijn er 38 tunnels >1km en komt met dezelfde berekening als hieronder (voetnoot 29) de totale lengte op gemiddeld 74km. Omdat het verschil niet heel groot is en de data uit de EU database betrouwbaarder lijkt, wordt deze gehanteerd.

²⁸ Op basis van [66] zijn er 46 tunnels met een totale lengte van gemiddeld 138km. Omdat het verschil aanzienlijk is, wordt deze data gehanteerd.

²⁹ Op basis van [66] is telkens de kortste lengte van de klasse als uitgangspunt genomen. Dat resulteert in een lengte van 251 km. Vervolgens is telkens de langste lengte genomen. Dat resulteert in een lengte van 425km. Gemiddeld is de totale lengte 338km.

³⁰ Met een lengte \geq 500m.

³¹ Op basis van [66] zijn er 25 tunnels > 1km. De totale lengte is gemiddeld 63km.

³² Op basis van [66] zijn er 67 tunnels > 1km. De totale lengte is gemiddeld 168km.

Op basis van de beschikbare gegevens over de aaneengesloten geregistreerde periodes is een berekening gemaakt van het jaarlijkse aantal voertuigkilometers voor alle tunnels in de in Tabel 25 gekleurd aangegeven landen. Deze berekening is als volgt: de verhouding tussen het totaal aantal kilometer tunnel in een land en de tunnallengtes in de geregistreerde periode wordt vermenigvuldigd met het aantal mvtkm/jaar in de geregistreerde periode om tot het aantal mvtkm/jaar voor het totaal aan tunnelkilometers te komen. Voor België geldt bijvoorbeeld: $26/5,4 * 175 = 839$. De totalen van alle landen zijn vervolgens gesommeerd en resulteren gezamenlijk in 8913 miljoen motorvoertuigkilometer/jaar.

Tabel 26: Berekening mvtkm/jaar voor alle bekende tunnels

	Geregistreerde periode			Totaal	
	km	Mvt/jaar	Mmvtkm/jaar	km	Mmvtkm/jaar
België ³³	5,4		175	26	839
Duitsland ³⁴	41,1		1650	41,1	1650
Noorwegen ³⁵	778,5	2,37	1847	778,5	1847
Zweden ³⁶	1,6	20	32	24	480
Denemarken ³⁷	5,3		53	24	239
Frankrijk ³⁸	60,5		481	138	1097
Oostenrijk ³⁹	348,0		1742	348	1742
Engeland ⁴⁰	5,7		72	35	445
Nederland ⁴¹	16,6		332	30	600
Totaal					8939

De waarden in de kolom Mmvtkm/jaar in de geregistreerde periode zijn berekend door de producten van de AADT en de tunnallengte van elke tunnel in het betreffende land te sommeren. De berekening is voor de volledigheid in onderstaande tabel weergegeven. De getallen komen uit de bronnen zoals in hoofdstuk 3 (voor Nederland) en hoofdstuk 4 (voor de overige landen) zijn genoemd. Voor Duitsland is alleen het totaal aantal voertuigkilometers per jaar bekend.

³³ De gemiddelde verkeersintensiteit is berekend op basis van de AADT van de tunnels zoals genoemd in 4.1.

³⁴ De gemiddelde verkeersintensiteit is berekend als jaarlijkse voertuigkilometers gedeeld door de tunnallengte (1,65 miljard/85)

³⁵ De gemiddelde verkeersintensiteit is berekend op basis van de AADT van de tunnels zoals genoemd in 4.4.

³⁶ De gemiddelde verkeersintensiteit is berekend op basis van de AADT van de tunnels zoals genoemd in 4.5.

³⁷ De gemiddelde verkeersintensiteit is berekend op basis van de AADT van de tunnels zoals genoemd in 4.6.

³⁸ De gemiddelde verkeersintensiteit is berekend op basis van de AADT van de tunnels zoals genoemd in 4.7.

³⁹ De gemiddelde verkeersintensiteit is berekend op basis van de AADT van de tunnels zoals genoemd in 4.8.

⁴⁰ De gemiddelde verkeersintensiteit is berekend op basis van de AADT van de tunnels zoals genoemd in 4.9.

⁴¹ Gebaseerd op [42].

Tabel 27: Overzicht tunnels geregistreerde periode

Land	Tunnel	Lengte tunnel [km]	Aantal [mvt/jr]	Mmvtkm/jaar	
Nederland	Schiphol tunnel	0,6	67.160.000	40	
	Beneluxtunnels I en II	0,8	46.725.840	40	
	Wijkertunnel	0,7	20.777.625	14	
	Thomassentunnel	1,1	19.531.379	21	
	Botlektunnel	0,5	41.250.155	21	
	Noordtunnel	0,5	37.896.125	20	
	Drechtunnel	0,6	50.578.734	29	
	Heinenoordtunnel	0,6	30.943.605	19	
	Tunnel Swalmen	0,4	12.639.315	5	
	Roertunnel	2,0	14.486.321	30	
	Leidsche Rijn	1,7	31.755.000	52	
	Westerscheldetunnel	6,7	5.387.173	36	
	Vlaketunnel	0,3	15.736.477	5	
		Subtotaal	16,6		332
	België	Kinkempois	0,64	25.440.500	16
Cointe		1,58	25.440.500	40	
Grosses Battes		0,38	25.440.500	10	
Kennedy		0,69	48.180.000	33	
Craeybeckx		1,60	36.500.000	58	
4-Armen		0,54	32.850.000	18	
		Subtotaal	5,4		175
Duitsland	Prüfening	0,7			
	Pfaffenstein	0,9			
	Emstunnel	0,9			
	Pellinger-Berg	0,6			
	Königshainer Berge	3,3			
	Einhausung Goldbach-Hösbach	1,1			
	Engelberg Basis	2,5			
	Hohentwiel	0,8			
	Schönbuch	0,6			
	Agnesburg	0,7			
	Elbtunnel	2,8			
	Schwarzer Berg	0,7			
	Laemmerbuckel	0,6			
	Allach	1,0			
	Ettersschlag	0,5			
	Kohlberg	0,6			
	Dölzschen	1,1			
	Coschütz	2,4			
	Hopfenberg	0,5			
	Heidkopftunnel	1,7			
Rennsteig	7,9				
Berg Bock	2,7				
Hochwald	1,1				
Alte Burg	0,9				

	Eichelberg	1,1		
	Aubing	1,9		
	Lobdeburgtunnel	0,6		
	Höllberg	0,9		
	Subtotaal	41,1		1650
Noorwegen	Subtotaal	778,5	2372500	1847
Zweden	Götatunnel	1,6	20075000	32
	Subtotaal	1,6	20075000	32
Denemarken	Øresund	4,05	7300000	30
	Limfjord	0,58	21900000	13
	Tårnby	0,70	14600000	10
	Subtotaal	5,3		53
Frankrijk	Chamoise	3,3	8004085	26
	Saint germain de joux	1,2	7742745	9
	Chatillon	0,6	7742745	5
	La baume a51	0,5	4175600	2
	Canta galet	0,6	26068300	15
	Pessicart	0,6	26068300	16
	Las planas	1,1	26068300	28
	Col de l'arme	1,1	8661450	10
	La coupiere	0,8	12782300	10
	Castellar	0,6	8113950	5
	Foix	2,2	5480110	12
	Pas de l'escalette	0,9	6907990	6
	Petit brion	0,5	2102400	1
	Sinard	1,0	2102400	2
	T. Couverte de firminy	0,5	14600000	8
	Montjezieu	0,6	5300530	3
	T. Couverte d'angers	1,7	0	0
	Hardelot	0,8	49273175	39
	Puymorens	4,8	535820	3
	Fourviere	1,8	40478500	75
	Orelle	3,7	2191095	8
	Dullin	1,5	12536290	19
	Epine	3,1	14862435	46
	Aiguebelle	0,9	3635035	3
	Hurtieres	1,2	3635035	4
	Les monts	0,9	29989130	27
	Chavants	1,0	6588250	7
	Vuache	1,4	7797860	11
	La grand-mare	1,5	15229990	23
	Traversee de toulon	3,0	10517840	31
	Somport	2,9	389090	1
	Frejus	6,6	1772805	12
	Mont blanc	7,6	1773900	14
	Subtotaal	60,5	373127455	481
Oostenrijk	Subtotaal	348,0		1742
Engeland	Hatfield	1,14	22995000	26
	Holmesdale	0,68	16972500	12
	Conwy	1,06	5475000	6

	Penmaenbach	0,42	2737500	1
	Pen-y-Clip	0,93	4106250	4
	Dartford	1,43	16425000	23
	Subtotaal	5,7	11451875	72