

ONDERWERP

IJtunnel - Elektrische bussen

DATUM

8 februari 2019

VAN

Koen Gideonse / Leander Noordijk / Charlotte Boschloo / Bart Duijvestijn

PROJECTNUMMER

D04021.000623.1200

AAN

Albert Timmers

ONZE REFERENTIE

083693505 A

1 INLEIDING

Sinds medio augustus 2018 rijden 100%-elektrische lijnbussen door de IJtunnel. Deze bussen met een nieuwe aandrijvingsvorm brengen zowel in de open lucht als in tunnels andere risico's met zich mee dan de traditionele dieselmotoren. Voorliggende notitie bevat een beschouwing van de impact van elektrische bussen in de IJtunnel op de tunnelveiligheid, de uitgevoerde scenarioanalyse en een beoordeling in hoeverre elektrische bussen invloed hebben op de kwantitatieve risicoanalyse (QRA).

In geval van een incident waarbij sprake is van brand is daartoe nagegaan in hoeverre de aanwezigheid van elektrische bussen leidt tot een ander risicoprofiel. Belangrijke parameters die bepalen in hoeverre het proces zelfredding is geborgd, zijn de ontwikkeling van temperatuur, de rookproductie (zicht) en de toxiciteit van de vrijkomende stoffen. Voor hulpverlening is daarnaast de voorspelbaarheid van het verloop van een incident en de snelheid waarmee dit kan escaleren van belang evenals de gevaren van elektriciteit. Om inzicht te verkrijgen in de gevolgen van de inzet van elektrische bussen is middels een literatuuronderzoek een vergelijking gemaakt tussen voertuigen met een diesel-/benzinemotor enerzijds en elektrisch aangedreven voertuigen anderzijds, met de nadruk op busvervoer. Beschouwd is wat de specifieke risico's zijn bij incidenten met of nabij elektrische voertuigen in tunnels, gedurende het gehele verloop van een incident van start via incidentbestrijding tot en met het opnieuw in gebruik nemen van de tunnel na afloop van een incident.

2 LITERATUURONDERZOEK

In dit hoofdstuk wordt na een overzicht van de gehanteerde brondocumenten (§2.1) ingegaan op de volgende onderwerpen:

- Het brandverloop.
- De kans op een brand.
- De gevolgen van een brand.
- Een vergelijking van de brandvermogens.
- Een vergelijking van de mate waarin toxische gassen vrijkomen.
- Het gevolgsmodel voor het vrijkomen van HF.

2.1 Brondocumenten

Voor de belangrijkste brondocumenten die zijn beschouwd in het kader van het literatuuronderzoek zijn in Tabel 1 zijn de meest relevante onderwerpen per brondocument kort toegelicht.

Tabel 1 Belangrijkste onderwerpen brondocumenten.

Artikel	Belangrijkste onderwerpen
---------	---------------------------

Artikel	Belangrijkste onderwerpen
Full scale fire-test of an electric hybrid bus [1]	In dit onderzoek zijn brandproeven uitgevoerd voor een hybride bus (combinatie elektrisch / diesel). De brand is hierbij gestart in de brandstofmotor, achterin de bus. Tijdens de proeven is onderzocht of de batterijen door het dak van de bus in de passagiersruimte kunnen vallen en of de batterijen zouden exploderen. Met name het tijdsverloop uit dit onderzoek is in het kader van dit literatuuronderzoek interessant om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van een brand in het motorcompartiment richting de batterijen op het dak van de bus.
Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles [2]	In dit onderzoek zijn brandproeven uitgevoerd op twee elektrische auto's en twee vergelijkbare auto's met een benzinemotor waarbij tijdens de proeven de temperatuur en de Heat Release Rate (HRR, warmteafgifte) zijn gemeten.
Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle [3]	In dit onderzoek zijn brandproeven uitgevoerd op twee elektrische auto's en twee vergelijkbare auto's met een benzinemotor. De twee elektrische auto's hebben een accu met energie-inhoud van 16,5 kWh en 23,5 kWh. In dit onderzoek is naast de HRR ook de HF-productie (g/s) gemeten tijdens de proeven. Ook is de totale HF productie (g) bepaald die tijdens de brand vrijkomt.
Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires [4]	In dit onderzoek zijn brandproeven uitgevoerd op (relatief kleine) lithium-ion batterijen. De energie-inhoud van de batterijen varieert tussen de 10 en 69 Wh. In dit onderzoek is zowel de HRR als de HF-productie (g/s) gemeten.

2.2 Opbouw elektrische bus

Figuur 1 geeft het typische principe aan van een volledig elektrische bus. In een (typische) volledig elektrische bus bevinden de batterijen zich op het dak en bevindt de motor zich achterin de bus. Figuur 2 geeft het typische principe aan van een hybride bus, inclusief de traditionele brandstofmotor die zich achterin de bus bevindt.



Figuur 1 Typisch principe van een volledig elektrische bus, met de batterijen op het dak en een motor achterin de bus voor het omzetten van de elektrische energie naar kinetische energie (www.youtube.com).

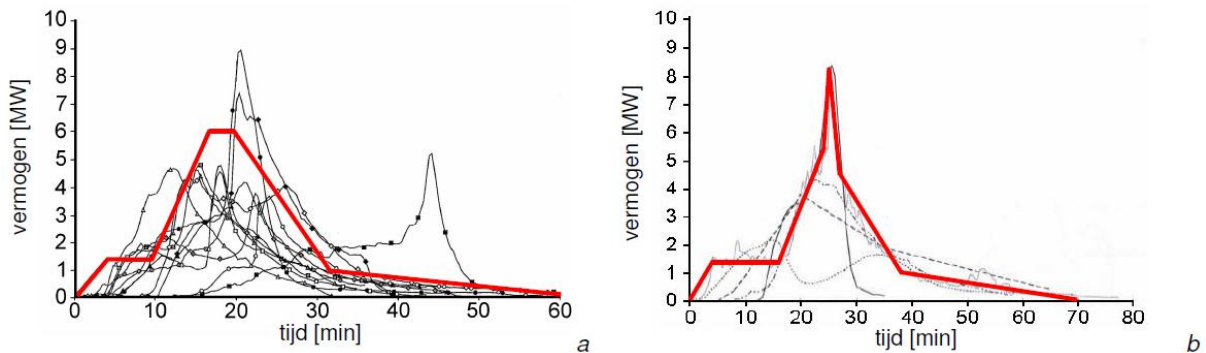


Figuur 2 Typisch principe van een hybride bus, met de traditionele brandstofmotor achterin de bus en de brandstoftanks tussen de achterwielen ([bron](#)). Ook hier bevinden de batterijen zich op het dak.

2.3 Beschrijving brandverloop batterijbrand

Een autobrand in een auto met een verbrandingsmotor ontwikkelt zich in het algemeen tot een brand met een beperkt vermogen. Na enige tijd te hebben gebrand met een relatief constant vermogen, kan een versnelde brandontwikkeling optreden tot het maximum vermogen. Vervolgens neemt het vermogen relatief snel af door gebrek aan brandbaar materiaal. Tenslotte neemt het vermogen geleidelijk af. De kortdurende vermogenstoename wordt toegeschreven aan vlamoverslag (flashover) in het passagierscompartiment,

bijvoorbeeld bij het breken van één van de ramen, of het ontsteken van de inhoud van de brandstoftank [5]. Een typisch verloop van het brandvermogen is weergegeven in Figuur 3, inclusief gebruikelijke ontwerpbrandkrommes. Merk op dat de huidige auto's meer kunststoffen bevatten, waardoor in het algemeen hogere vermogens kunnen worden verwacht.



Figuur 3 Typisch verloop van het brandvermogen bij een autobrand inclusief de ontwerpcurves (in rood) zoals gemeten in een parkeergarage Fleerde (1998) door TNO (links) en Europees EGKS onderzoek (rechts), beide uit [5]

Een brand in een elektrisch voertuig ontwikkelt zich in de eerste fase van de brand op vergelijkbare wijze als in een voertuig met een verbrandingsmotor (zie Figuur 12 en Figuur 13 uit [5]), ook vlamoverslag in het passagierscompartiment kan optreden. Het grote verschil is echter dat er geen brandstof is die kan ontbranden, de accu's zelf spelen wel een rol in de brandontwikkeling.

In de accu's van een elektrisch voertuig kan 'thermal runaway' optreden. Dit is het verschijnsel waarbij de batterij een bepaalde temperatuur bereikt die een exotherme reactie op gang brengt, waardoor meer warmte vrijkomt en het proces zichzelf in stand houdt en zelfs versterkt. In het algemeen geldt dat het enige tijd duurt voordat de benodigde warmte is gegenereerd en ontbranding van de batterij plaatsvindt (in tegenstelling tot de snelle ontwikkeling van ontbranding van de brandstof bij een voertuig met brandstofmotor). De typische temperatuur [1] waarbij thermal runaway kan optreden kan reeds tussen de 110 en 130°C liggen. Bij de verbranding van batterijen komen verder toxische gassen vrij, bijvoorbeeld HF (waterstoffluoride). De accupacks bestaan uit verschillende modules die weer zijn opgebouwd uit cellen. In het algemeen zal niet het gehele accupack tegelijkertijd ontbranden, maar zal thermal runaway cel na cel en module na module plaatsvinden.

Voor zelfredding zijn de volgende aspecten van belang voor elektrische en hybride voertuigen:

- De impact van batterijen/thermal runaway op de vermogens- en temperatuurontwikkeling.
- De impact van de uitstoot van toxische gassen op de leefbaarheidscondities.

Merk op dat ook nadat een elektrisch voertuig geblust is, in een latere fase alsnog (opnieuw) thermal runaway kan optreden en het voertuig (opnieuw) vlam kan vatten. Verder is het lastig de brandhaard te koelen tot de kern van de batterij doordat de batterijen compact tegen elkaar aan zijn verwerkt in het voertuig¹. Dit kan met name een probleem zijn tijdens de latere hulpverlening, het heeft geen impact voor de zelfredzaamheidsfase.

¹ Door de ligging van de batterijen is koelen bij personenauto (batterijen laag het voertuig) doorgaans moeilijker dan bij bussen (batterijen op het dak).

2.4 Oorzaken van en kans op brand

2.4.1 Oorzaken van brand

Brand in een voertuig kan ontstaan door een van de onderstaande oorzaken:

- Een technisch mankement:
 - Elektrisch: Door kortsluiting in een van de elektrische systemen.
 - Lekkage: Door lekkage van een ontvlambare vloeistof, die bijvoorbeeld in contact kan komen met een warm oppervlak zoals het uitlaatsysteem.
 - Wrijving: Overmatige wrijving in bijvoorbeeld de lagers van de wielen of het remsysteem.
- Een ongeval (in QRA-termen een ongeval met alleen materiele schade (UMS) of een letselongeval).
- Brandoverslag van een ander voertuig naar het voertuig door:
 - Het direct overslaan van vlammen van het ene voertuig naar het andere.
 - Ontsteken door warme rookgassen / straling uit de rooklaag.

In Tabel 2 is per oorzaak aangegeven of de kans op brand groter, kleiner of vergelijkbaar is voor elektrische voertuigen ten opzichte van voertuigen met een brandstofmotor.

Tabel 2 Kans op het ontstaan van brand in een elektrisch voertuig in vergelijking met een voertuig met een brandstofmotor, per oorzaak

Oorzaak	Kans op brand in elektrisch voertuig	Toelichting
Technisch mankement (gevolg van productiefout of degeneratie)		
Elektrisch	Groter	In een elektrisch voertuig bevindt zich meer elektrische apparatuur.
Lekkage	Kleiner	Er zijn minder of geen brandbare vloeistoffen, het aantal warme onderdelen is beperkt.
Wrijving	Vergelijkbaar	
Ongeval met brand		
Aanrijding	Vergelijkbaar	Kans op ongeval is even groot. Aanname is dat kans op brand bij ongeval ook vergelijkbaar zal zijn. Kans dat de batterijen direct betrokken zijn bij een botsing is beperkt.
Brandoverslag		
Directe vlamoverslag	Gelijk	De buitenzijde van beide typen voertuigen is vergelijkbaar.
Ontsteken door straling/warmte	Groter	De <i>batterijen</i> kunnen opwarmen door een warme rooklaag veroorzaakt door brand in een ander voertuig wat kan leiden tot thermal runaway.

2.5 Gevolgen van brand in een elektrische bus

Het brandverloop bij brand in een elektrische bus is afhankelijk van de locatie waar de brand ontstaat:

- Direct bij de batterijen.
- Op een andere plek in de bus.
- In een ander voertuig, in de nabijheid van de bus.

2.5.1 Brand direct bij de batterijen

In [1] blijkt dat, vanaf het moment dat er veel vlammen rondom de batterijen zijn, het circa 5,5 minuten duurt voordat thermal runaway optreedt. Dit is een relatief korte tijd en afhankelijk van de brandontwikkeling kan dit zich afspelen binnen de zelfredzaamheidsfase waardoor de kans bestaat dat extra (letale) slachtoffers vallen. De kans op een dergelijk scenario is het grootst als de brand zich direct ontwikkelt in de buurt van de batterijen. Er is geen casuïstiek gevonden van een busbrand die zich ontwikkelt heeft direct bij de batterijen. De branden met elektrische voertuigen die tot zover in het nieuws zijn geweest betreffen voornamelijk voertuigen waarbij brand is ontstaan door/na een ongeluk met het voertuig. De schade aan het voertuig zal hierbij indirect geleid hebben tot een brand rondom de batterij.

2.5.2 Branduitbreiding van onderin de bus naar de batterijen

In een volledig elektrische bus kan een brand ontstaan op een locatie onderin de bus, door bijvoorbeeld overmatige wrijving bij de wielen/remmen of in een van de elektrische systemen achterin de bus rondom de (elektro)motor. Voor dit geval is het relevant te beschouwen in hoeverre branduitbreiding kan optreden van een locatie onderin de bus naar de batterijen bovenop de bus.

In [1] zijn brandproeven uitgevoerd op een hybride bus (elektrisch / diesel). De brand is hierbij ontstoken nabij de brandstofmotor, achterin de bus. Tijdens de proeven is onderzocht of de batterijen door het dak van de bus in de passagiersruimte kunnen vallen en of de batterijen exploderen. In de proef is de batterij niet door het dak van de passagiersruimte gevallen. De temperatuurontwikkeling zoals gemeten tijdens de brandproeven is grafisch weergegeven in Figuur 4.

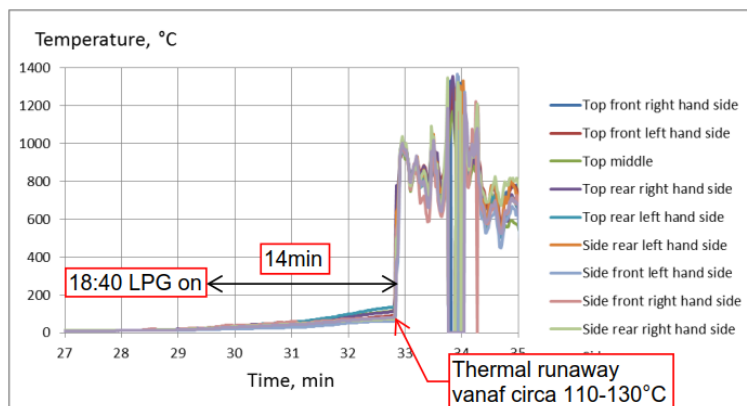


Figure 25 Temperature readings from thermocouples placed on the battery. Note the rapid increase in temperature on all thermocouples shortly before 33 minutes.

Figuur 4 Temperatuur ter plaatse van de batterijen in [1]. Vanaf $t = 33$ min vindt thermal runaway van de batterijen plaats

Circa 14-15 minuten na het ontsteken van de brand in de brandstofmotor smoorde de brand enigszins en was een afname van de temperatuur te zien. Er werd vervolgens extra LPG toegevoegd om de brand verder te laten ontwikkelen om ook uitbreiding richting de batterijen te kunnen onderzoeken. Dit tijdstip en de volgende belangrijke waarnemingen in de proef zijn weergegeven in Tabel 3. Vanaf het moment van het toevoegen van extra LPG duurde het circa 14 minuten voordat een duidelijke verhoging van de temperatuur van de batterijen (thermal runaway) waar te nemen is. Vanaf het moment dat er veel vlammen rondom de batterijen zijn, duurt het nog circa 5,5 minuten voordat er thermal runaway van de batterijen optreedt.

Tabel 3 Belangrijkste waarneming tijdens de brandproef in [1].

Tijd in proef [min:sec]	Gecorrigeerde tijd [min:sec]	Waarneming
18:40	00:00	LPG aan (toevoeging extra LPG aan de brand)
21:20	02:40	Vlammen naar het dak van de bus
21:35	02:55	LPG uit
27:20	08:40	Veel vlammen en geluid rondom de batterijen
32:50	14:10	Duidelijke temperatuurstijging rondom batterijen (thermal runaway)

Voor een brand die zich ontwikkelt vanaf een locatie in de bus elders dan het batterijcompartiment volgt dat het relatief lang duurt voordat de brand de batterijen heeft bereikt en thermal runaway optreedt. Vanaf het tijdstip dat een dergelijke brand zich gaat ontwikkelen (tijdstip 18:40 in de proef) is duidelijk waar te nemen dat er brand is en zal de zelfredzaamheidsfase beginnen. Er wordt verondersteld dat 14 minuten ruim voldoende is om op een veilige afstand van de bus te komen. Branduitbreiding van een locatie onderin de bus naar de batterijen wordt daarom voor zelfredzaamheid niet als extra risico gezien.

2.5.3 Brandoverslag vanaf een naastgelegen voertuig

Het veiligheidsconcept in de meeste tunnels is gebaseerd op het voorkomen van file in de tunnel en het in geval van brand inschakelen van de langsventilatie in de rijrichting. In geval van file benedenstrooms van een brand, worden in de IJtunnel afwijkende ventilatieschakelingen toegepast om uiteindelijk minder tunnelgebruikers bloot te stellen aan de schadelijke rookgassen. Hierdoor is het mogelijk dat tijdens een calamiteit de langsventilatie niet wordt ingeschakeld en er rookverspreiding plaatsvindt over stilstaande voertuigen. In deze paragraaf wordt geanalyseerd wat de invloed is op een elektrische bus die zich in de buurt van een brandend voertuig bevindt.

Uit Figuur 5 [1] blijkt dat kort voor het tijdstip van thermal runaway ($t = 32:50$) temperaturen worden bereikt van 500°C tot 900°C in de luchtkanalen van het plafond van de bus, net onder de batterijen.

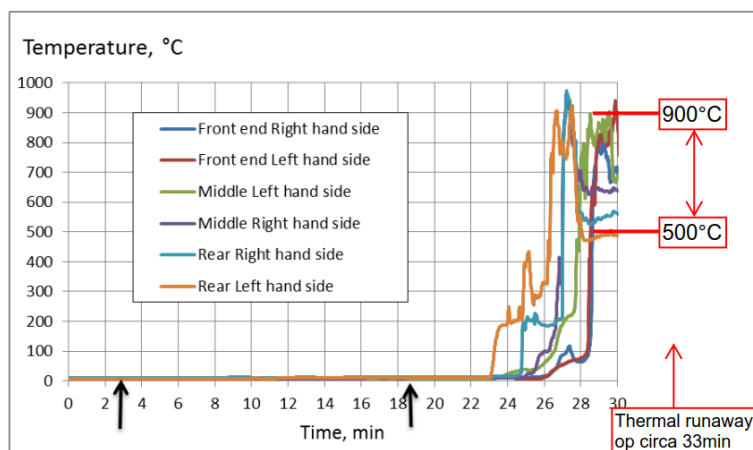
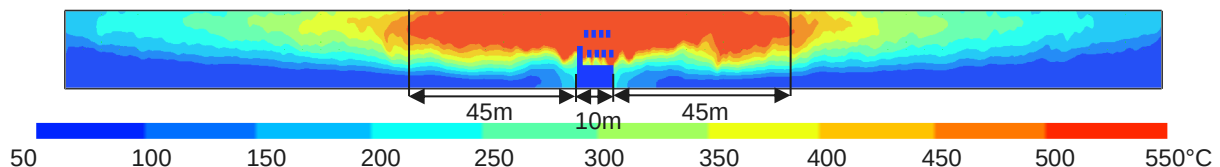


Figure 20 Thermocouple readings in the air channels throughout the bus with a focus on the early stages of the fire.

Figuur 5 Temperatuur in de luchtkanalen van het plafond van de bus, net onder de batterijen in [1].

Voor een brand in een tunnel (auto, bus of vrachtwagen) kan worden bekeken welke temperaturen optreden in de rooklaag en of deze temperaturen kunnen leiden tot thermal runaway in de batterijen van een elektrische bus als deze zich in de warme rooklaag bevinden.

Een CFD (Computational Fluid Dynamics) berekening is uitgevoerd om een beeld te krijgen van de ordegrrootte en uitgebreidheid van de optredende rooktemperaturen bij een 100 MW-vrachtwagenbrand. Dit is gedaan in een lege tunnel zonder ingeschakelde mechanische ventilatie, waarbij is uitgegaan van een breedte van 9,6 m en een hoogte van 4,2 m. Dit komt overeen met de maatgevende doorsnede van de IJtunnel in sectie I en II. De resultaten voor de stationaire situatie zijn weergegeven in Figuur 6. Merk op dat het temperatuurveld voor de stationaire situatie reeds optreedt kort nadat het maximale brandvermogen wordt bereikt (dus bij een snelgroeijende brand zoals gemodelleerd in QRA-tunnels na iets meer dan 2 minuten en voor een langzaamgroeijende brand na 10 minuten).



Figuur 6 Temperatuur voor een volledig ontwikkelde 100 MW brand in een tunnel zonder ventilatie (stationaire situatie).

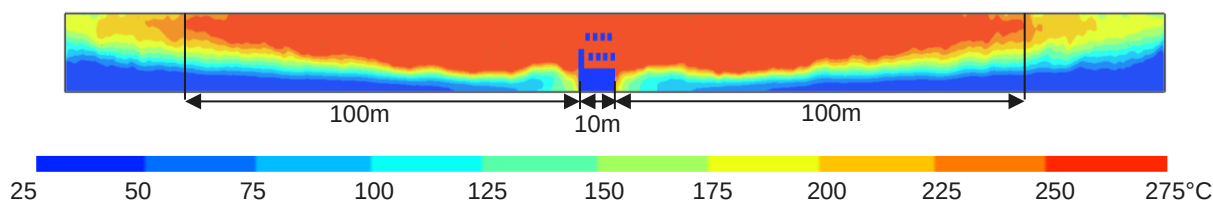
Bij een volledig ontwikkelde 100 MW-brand zonder ingeschakelde mechanische ventilatie (natuurlijke ventilatie) is nabij de brand de gehele tunneldoorsnede gevuld met rook. De zeer hoge temperaturen van 900°C en meer treden alleen op in de directe nabijheid van de brandende vrachtwagen. Temperaturen van 500°C en meer treden op tot circa 45 m stroomafwaarts en stroomopwaarts van de brandende vrachtwagen.

De grootte van het gebied waar de temperaturen hoger zijn dan bijvoorbeeld 500°C is afhankelijk van de afmetingen van de tunneldoorsnede. Als dezelfde brand zich ontwikkelt in een grotere tunneldoorsnede (bijvoorbeeld sectie 0 of III van de IJtunnel), zal rook met een temperatuur van 500°C zich minder ver verspreiden. In sectie III bijvoorbeeld is dit gebied circa 35 m in plaats van de 45 m zoals bepaald voor sectie I en II.

Op basis van bovenstaande is het binnen korte tijd optreden van thermal runaway van de batterijen van een elektrische bus voornamelijk te verwachten wanneer de bus zich binnen 45 m afstand van een brandende vrachtwagen bevindt. Wanneer zich lucht van 500°C of meer rondom de batterijen bevindt, duurt het nog enkele minuten voordat thermal runaway daadwerkelijk optreedt. In [1] duurt het nog circa 5,5 minuten voordat thermal runaway optreedt vanaf het moment dat vlammen rondom de batterijen aanwezig zijn. Daarnaast zal het (minimaal) enkele minuten duren voordat een dergelijke grote 100 MW vrachtwagenbrand zich volledig ontwikkelt (volgens de uitgangspunten van QRA-tunnels bij een snelgroeijende brand 2 minuten en bij een langzaamgroeijende brand 10 minuten) en de rookgassen met deze hoge temperaturen zich verspreiden, zie ook [6]. Bij een snel ontwikkelende grote brand zal al relatief snel duidelijk zijn dat er brand is en zal de zelfredzaamheidsfase normaal gesproken ook snel in gang worden gezet.

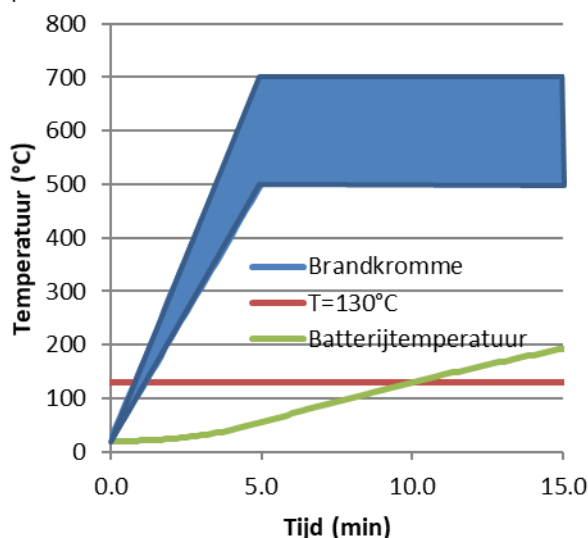
Om de impact van de toxische gassen die vrijkomen na een thermal runaway op de tunnelgebruikers te bepalen wordt beschouwd hoe omgevingscondities in het invloedsgebied zijn. Wanneer de omgevingscondities zodanig zijn dat vluchtende tunnelgebruikers hier ook zonder de invloed van HF niet kunnen overleven, beïnvloedt het vrijkomen van HF de totale letaliteit niet. Op het moment dat de 100 MW vrachtwagenbrand volledig is ontwikkeld, zullen de condities ook op grotere afstand van de brandlocatie niet meer leefbaar zijn door de aanwezige rook, hoge temperatuur en straling uit de rooklaag. In Figuur 7 is te zien dat tot op een afstand van ongeveer 100 meter afstand stroomopwaarts en stroomafwaarts de temperatuur van de rooklaag meer dan 250°C bedraagt². In dit gebied zullen de condities niet meer leefbaar zijn, door de hoge stralingsflux uit de rooklaag en verhoogde luchttemperatuur op lagere hoogten.

² In de ATS [12] wordt voor veilig vluchten in tabel 34 een maximale temperatuur van de rooklaag van 200°C gedurende 30 seconden vermeld.



Figuur 7 Temperatuur voor een volledig ontwikkelde 100 MW brand in een tunnel zonder ventilatie (stationaire situatie).

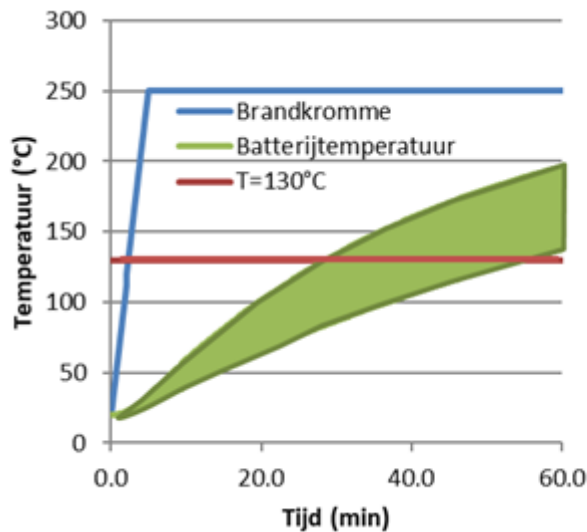
Als zich lucht van 250°C rondom de batterijen van de bus bevindt, zal het langer duren voordat deze worden opgewarmd tot thermal runaway optreedt. Om een beeld te krijgen hoeveel langer dit duurt, is op basis van het gemeten temperatuurverloop in Figuur 5 een brandkromme opgesteld voor de thermische belasting als functie van de tijd rond de batterijen. Dit is gedaan voor brandkrommes die tot respectievelijk 500°C en tot 700°C stijgen (gemiddelde thermische belasting) na een groeifase van 5 minuten. De warmteoverdracht naar de batterijen is gemodelleerd met een lumped-parametermodel met daarin warmteoverdracht door straling en convectie. Vervolgens is een parameterfit gemaakt van de thermische eigenschappen van de batterijen, zodat de batterijtemperatuur na 5 minuten blootstelling aan de maximale temperatuur van de brandkromme 130°C bereikt (thermal runaway)³. Vervolgens is bij blootstelling aan een andere brandkromme berekend wanneer de batterijtemperatuur de 130°C bereikt bij gelijkblijvende thermische eigenschappen. In Figuur 8 zijn de brandkrommes weergegeven en het verloop van de batterijtemperatuur op basis van de parameterfit. Te zien is dat de batterijtemperatuur 130°C bedraagt na 10 minuten blootstelling, waarvan 5 minuten op maximale temperatuur.



Figuur 8 Brandkrommes die in een groeifase van 5 minuten stijgen tot 500°C en 700°C en verloop batterijtemperatuur op basis van parameterfit

Bij blootstelling aan een brandkromme die in 5 minuten oploopt tot 250°C, zal het langer duren voordat de batterijen de temperatuur van 130°C bereiken dan bij de temperaturen van 500 à 700°C. De resultaten van deze berekening (bij gelijkblijvende thermische eigenschappen uit de parameterfit) zijn weergegeven in Figuur 9. Te zien is dat het voor de sets thermische eigenschappen behorende bij de 500°C en 700°C brandkrommes respectievelijk bijna 30 en 60 minuten duurt voordat 130°C wordt bereikt.

³ Hiervoor is gebruik gemaakt van $\alpha_{\text{conv}} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ en $\epsilon = 0,7$. Voor de batterijen met omhulsel zijn de temperatuurafhankelijke thermische eigenschappen van staal volgens Eurocode EN 1993-1-2 gehanteerd. De batterijen zijn gemodelleerd als een oneindig grote geïsoleerde staalplaat met een bepaalde dikte en een uniforme temperatuur. De resterende te fitten parameter wordt daarmee een maat voor de relatieve thermische massa van de batterijen (een soort profielfactor).



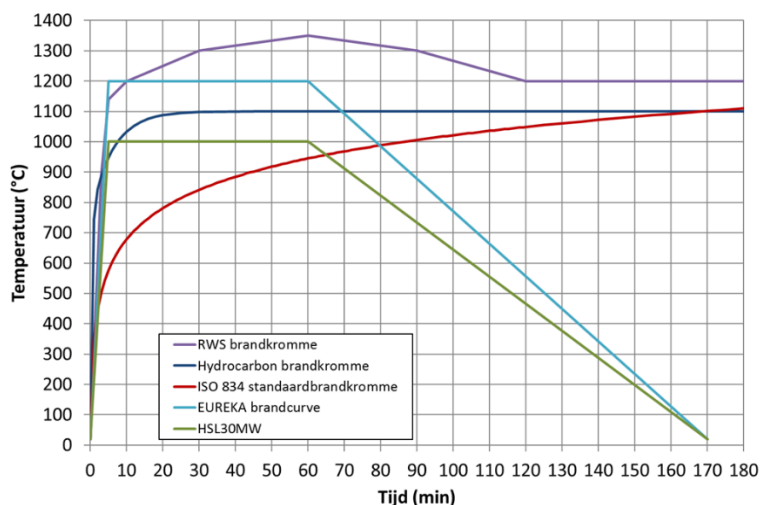
Figuur 9 Resultaten tijd tot bereiken 130°C (thermal runaway) bij andere thermische belasting (250°C)

Voor een 'normaal verlopende' zelfredzaamheidsfase zal de aanwezigheid van een elektrische bus dichtbij een brandende vrachtwagen naar verwachting geen extra risico meer opleveren voor de tunnelgebruikers. Indien de bus dichtbij de brandhaard staat, nemen de omgevingscondities op die positie reeds door de gevolgen van de brandende vrachtwagen reeds zo sterk af dat dit gebied niet leefbaar is. Op grotere afstand van de brandende vrachtwagen, waar veilig vluchten (langer) mogelijk blijft, zal het ook langer duren voordat een thermal runaway optreedt. Bij een relatief late start van of lange duur van het ontruimingsproces kan niet worden uitgesloten dat wel additionele slachtoffers vallen bij een dergelijk scenarioverloop.

Brandoverslag naar een elektrische bus vanaf een naastgelegen voertuig levert ook in een latere fase, voor de hulpdiensten, geen significant extra risico op. Ontbranding van batterijen wordt gekenmerkt door een relatief langzaam proces met kleine pieken in het brandvermogen, in tegenstelling tot bijvoorbeeld de explosieve verbranding van een tank met benzine, diesel of waterstof.

2.5.4 Invloed brand elektrische bus op tunnelconstructie

Naast de impact op zelfredzaamheid en hulpverlening door de bijdrage van een batterypack bij een brand, is onderzocht of een dergelijke brand aanvullende gevolgen heeft op de constructieve integriteit van een tunnel. In Figuur 4 is te zien dat maximale temperaturen van meer dan 1.300°C zijn gemeten nabij de batterijen. De figuur suggereert (gezien de verticale lijnen) dat dat niet de maximale temperatuur is, maar de temperatuur waarbij de type K thermokoppels falen (type K thermokoppels worden meestal in brandlaboratoria gebruikt). Dit betekent dat de optredende (gas-)temperaturen (nog) hoger zijn geweest dan 1.370°C. In Figuur 10 zijn gebruikelijke brandkrommes gegeven om de brandwerendheid van (tunnel)constructies te bepalen.



Figuur 10 Gebruikelijke brandkrommes toegepast om de brandwerendheid van (tunnel)constructies te bepalen.

Te zien is dat bij de brand van de batterijen zeer hoge temperaturen zijn opgetreden. In Figuur 11 is voor een aantal scenario's aangegeven welke brandkromme representatief is voor de thermische impact op de constructie.

Table 6.2 Fire scenario recommendation, UPTUN WP2 proposal [14, 15]

Risk for life	Risk for construction	HRR (MW)	Road, examples vehicles	Rail, examples vehicles	Metro, examples vehicles	At the fire boundary
		5	1-2 cars			ISO 834
		10	Small van, 2-3 cars, ++	Electric locomotive	Low combustible passengers carriage	ISO 834
		20	Big van, public bus, multiple vehicles		Normal combustible passengers carriage	ISO 834
		30	Bus, empty HGV	Passengers carriage	Two carriages	ISO 834
		50	Combustibles load on truck	Open freight wagons with lorries	Multiple carriages (more than two)	ISO 834
		70	HGV load with combustibles (approx. 4 tonne)			HC
		100	HGV (average)			HC
		150	Loaded with easy comb. HGV (approx. 10 tons)			RWS
		200 or higher	Limited by oxygen, petrol tanker, multiple HGVs	Limited by oxygen		RWS

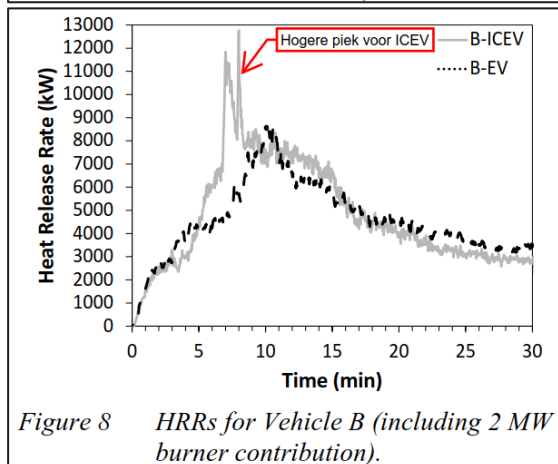
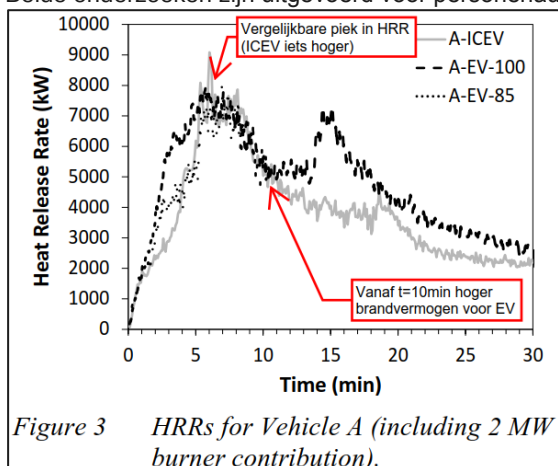
Figuur 11 Representatieve brandkrommes voor verschillende brandscenario's [7]

Dit betekent dat de batterijbrand (gedurende korte tijd) tot zeer hoge temperaturen leidt, hoger dan de ontwerpbrandkromme voor een dergelijk scenario. Een brandwerende oplossing ontworpen op brandkrommen met een lagere maximale temperatuur kan minder goed presteren bij dergelijke hoge temperaturen, bijvoorbeeld door desintegratie van brandwerende beschermingsmaterialen (dit is met name het geval voor brandkrommes met maximale temperaturen onder de 1.200°C; een typisch voorbeeld is steenwol waarvan het bindmiddel smelt rond een temperatuur van 1.200°C).

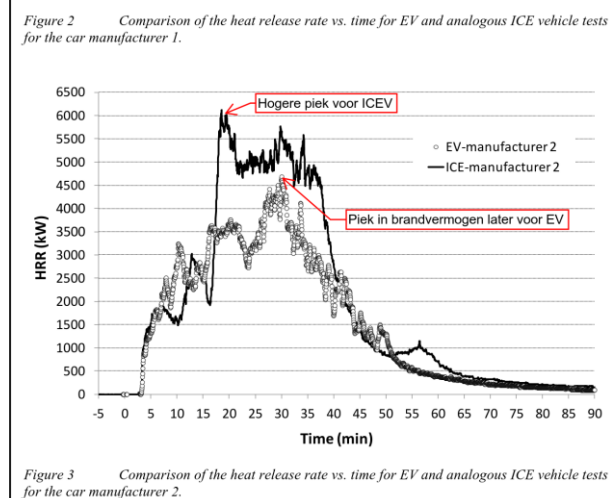
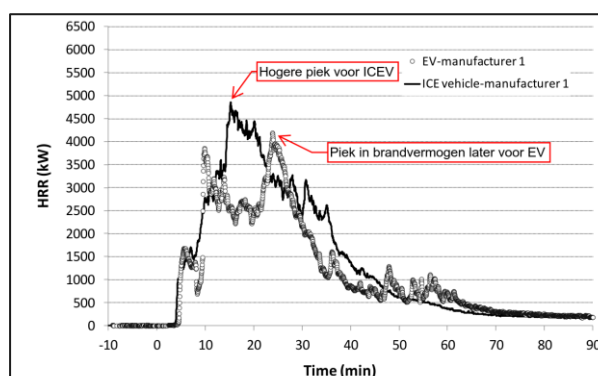
In de IJtunnel is de brandwerendheid van de constructie ontworpen op de Rijkswaterstaatbrandkromme die een maximale temperatuur bereikt van 1.350°C. De kortdurende, hoge temperaturen uit Figuur 4 worden voor de IJtunnel daarom niet als een significante afwijking beschouwd en vallen binnen de thermische belasting volgens de Rijkswaterstaat brandkromme.

2.6 Vergelijking brandvermogen

Voor de vergelijking van het brandvermogen ofwel de HRR (Heat Release Rate) tussen een voertuig met brandstofmotor en een elektrisch voertuig zijn de bronnen [2] en [3] gebruikt (zie Figuur 12 en Figuur 13). Beide onderzoeken zijn uitgevoerd voor personenauto's, niet voor bussen.



Figuur 12 HRR voor voertuigen uit [2].



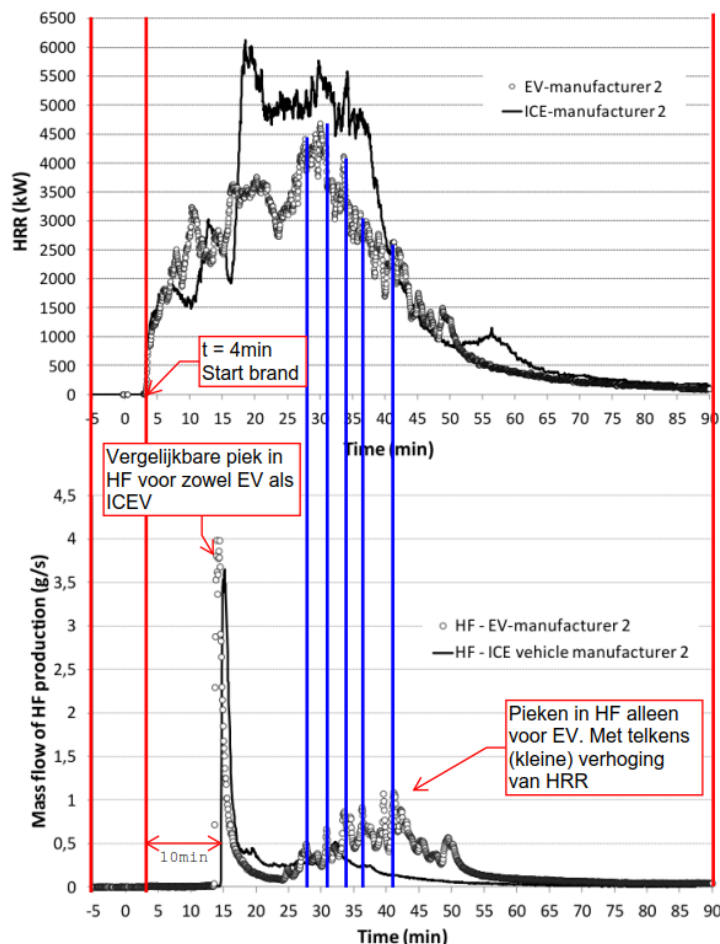
Figuur 13 HRR voor voertuigen uit [3].

Uit beide onderzoeken kan voor de onderzochte personenautobranden het volgende worden geconcludeerd:

- Een ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle) vertoont in alle gevallen een hogere maximale waarde voor het brandvermogen.
- Een EV (Electric Vehicle) vertoont naast het maximale brandvermogen op latere momenten tijdens de brand verschillende (minder hoge) pieken in het brandvermogen. Deze 'latere pieken' zijn gerelateerd aan de ontbranding van de batterijen. Het maximale brandvermogen voor een EV is echter in de proeven niet hoger dan voor een ICEV.
- De totale energie-inhoud (= oppervlakte onder de grafiek) die vrijkomt bij een brand is voor een EV in de meeste gevallen lager dan voor een ICEV. Uitzondering hierop is 'Vehicle A' uit [2] waar een EV een hogere energie-inhoud heeft (circa 25% hoger).

2.7 Vergelijking toxische gassen

Bij voertuigbranden komen toxische stoffen vrij. Veelal zijn de vrijkomende stoffen bij een brand met een elektrisch voertuig gelijk aan die van voertuigen met verbrandingsmotoren. Afwijkend is het vrijkomen van waterstoffluoride (HF). HF is een kleurloos, hoog irriterend, corrosief gas. Het reageert sterk met water waarbij warmte vrijkomt en giftig fluorwaterstofzuur. Waterstoffluoride (HF) wordt beschouwd als een van de meest toxische gassen die vrijkomen bij een brand met een elektrisch voertuig. In [3] is zowel het brandvermogen als de uitstoot van HF gemeten (zie Figuur 14).



Figuur 14 HRR en HF productie uit [3].

Met betrekking tot de uitstoot van HF kan op basis van de curves in Figuur 14 voor deze proeven het volgende worden geconcludeerd:

- HF wordt uitgestoten in significante hoeveelheden voor zowel een ICEV als een EV.
- Voor zowel een ICEV als een EV is een vergelijkbare maximale piek te zien in de HF-uitstoot, circa 10 minuten na het ontsteken van de brand. Het vermoeden is dat dit van fluorhoudende elementen in de auto afkomstig is die zowel bij een ICEV als een EV aanwezig zijn, zoals de koelvloeistof van het aircosysteem. Deze hypothese is echter niet bevestigd in het onderzoek.
- De totale, cumulatieve uitstoot van HF (oppervlakte onder de grafiek) is voor een EV groter dan voor een ICEV. In de tests is voor elektrische voertuigen een tot 2,5 maal zo grote cumulatieve uitstoot van HF gemeten.
- Bij een EV zijn verschillende pieken in HF-uitstoot te zien circa 25-30 min. na het ontsteken van de brand.
 - Deze pieken worden veroorzaakt door het verbranden van de lithium-ion-batterijen.
 - De pieken in HF-uitstoot worden gelijktijdig met een kleine piek in het brandvermogen waargenomen.
 - De uitstoot tijdens de latere pieken is aanzienlijk lager dan tijdens de eerste piek (na 10 min).

Er wordt verondersteld dat de latere pieken (25-30 min. na het ontsteken van de brand) geen extra risico vormen, omdat tegen deze tijd de zelfredzaamheidsfase al voorbij is. In Figuur 15 is een voorbeeld gegeven van een

autobrand met op het moment van de foto een brandvermogen van circa 2 MW. Hier is duidelijk waar te nemen dat het voertuig in brand staat en er mag verondersteld worden dat dit voldoende aanleiding is om de zelfredzaamheidsfase in gang te zetten. Uit Figuur 14 blijkt dat een brandvermogen van 2 MW al bereikt wordt enkele minuten na het ontsteken van de brand, waardoor dus nog ruim voldoende tijd overblijft tussen de start van de zelfredzaamheidsfase tot aan het moment van ontbranding van de batterij.



Figuur 15 Autobrand met een vermogen van 2 MW [8].

2.8 Gevolgmodel HF-productie

2.8.1 Berekeningswijze QRA-tunnels

In het wettelijk voorgeschreven QRA-model 'QRA-tunnels 2.0' wordt voor een groot aantal vooraf gedefinieerde ongevalsscenario's het aantal letale slachtoffers berekend ten gevolge van hoge temperaturen, warmtestraling en toxische gassen waarbij als de zichtlengte door rook beperkt wordt, wordt gerekend met een relatief lage vluchtsnelheid van tunnelgebruikers en immobiliteit (mensen stoppen met vluchten) door rookgasvergiftiging. De berekeningen die in aanvulling op QRA-tunnels zijn gemaakt om een inschatting te geven van de bijdrage van HF door een brandende bus, zijn opgenomen in bijlage C bij deze notitie.

Immobiliteit door rookgasvergiftiging

In §7.4.3 van [9] wordt ingegaan op de immobiliteit door rookgasvergiftiging. Om te bepalen wanneer personen niet meer in staat zijn tot vluchten door het inademen van giftige stoffen, wordt in QRA-tunnels de Fractional Incapacitating Dose (FID) gebruikt. Het criterium is dat iemand niet meer kan vluchten, als óf de FID voor CO₂ die de persoon ten gevolge van CO₂ te verwerken heeft gekregen minstens 1 is, óf de FID ten gevolge van de aanwezigheid van CO, HCN, CO₂ en zuurstofgebrek minstens 1 is. Daarbij wordt meegenomen dat de ademhaling versnelt door de aanwezigheid van CO₂. In de CFD-berekeningen die ten grondslag liggen aan QRA-tunnels is daarom voor verschillende branden de concentratie CO, CO₂ en O₂ bepaald. Op basis van verhoudingen in productiefactoren voor HCl, NO_x⁴ en HCN zijn de concentraties van deze stoffen bepaald. QRA-tunnels houdt geen rekening met de effecten van HF.

⁴ In QRA-tunnels wordt afhankelijk van het specifieke aspect NO₂ of NO_x als stofnaam genoemd. Deze worden in het kader van de QRA verondersteld 'inwisselbaar' te zijn (er wordt geen onderscheid gemaakt. Zo is bijvoorbeeld in 7.4.4 van [9] aangegeven: Voor NO_x worden de parameters gebruikt die horen bij NO₂ conform [26], paragraaf 2.2 en [2], paragraaf 4.3. In voorliggende notitie wordt zoveel mogelijk aangesloten bij de in [9] gehanteerde terminologie waardoor beide stofnamen door elkaar gebruikt worden.

Op basis van tabel 7-5 uit [9] wordt in [9] gesteld dat in veel, maar niet alle, gevallen de bijdragen van andere stoffen dan CO mogen worden verwaarloosd. De gevallen waarin dat niet zo is worden als volgt behandeld:

- Bij de plasbranden [...]⁵.
- Bij branden met ventilatie kunnen andere stoffen dan CO een bijdrage aan de FID leveren die kan oplopen tot 50% van de bijdrage van CO. Daarom wordt voor deze branden de uiteindelijke FID vermenigvuldigd met 1,5.
- Bij branden van 10 MW kan de bijdrage van HCN substantieel zijn. Voor zulke branden is de FID na 5 minuten hoogstens gelijk aan 0,11. Omdat de FID lineair is in de blootstellingstijd, duurt het bij die branden 5 minuten/0,11 = 45 minuten voordat de FID gelijk wordt aan 1. Daarom zullen alle aanwezigen gevlucht zijn voordat een FID van 1 wordt bereikt, en heeft het geen gevolgen als de bijdragen van andere stoffen dan CO worden verwaarloosd.
- Bij 200 MW in tunnels zonder ventilatie speelt zuurstofgebrek een dominante rol, maar dit blijkt alleen uit de waarden op 25 m van de brand. Daar is het effect van de temperatuur veel groter dan dat van rookgassen of zuurstofgebrek, zoals in onderstaande tabel [red: Tabel 7-6] te zien is. Hierbij moet worden opgemerkt dat aangehouden is dat personen direct overlijden bij een temperatuur van 300 °C, zoals verderop zal worden beschreven. Het heeft dus ook in deze situaties geen gevolgen als zuurstofgebrek wordt verwaarloosd.

Om deze redenen zullen FIDHCN, FIDO₂, en FIDCO₂ niet expliciet afzonderlijk worden opgenomen in het model, maar zal de gevonden FID vermenigvuldigd worden met een correctiefactor F_{corgas} om deze termen in rekening te brengen.

Voor voertuigbranden mét en zonder ventilatie wordt gerekend met een F_{corgas} van respectievelijk 1,5 en 1 voor correctie van HCN, O₂ en CO₂.

Rookgasvergiftiging

Rookgasvergiftiging is naast hoge temperaturen en warmtestraling een van de doodsoorzaken die in QRA-tunnels per brandscenario wordt bepaald. Over het gevolgmodel is in §7.4.4 van [9] beschreven:

Naast het effect van rookgassen op mobiliteit, kunnen deze gassen ook een direct dodelijk effect hebben. Dit effect kan bepaald worden met behulp van probitrelaties. In dit model zal het dodelijke effect van rookgassen echter op een eenvoudige manier verdisconteerd worden.

Ten eerste zal blijken dat de kans om te overlijden door inademing van giftige rookgassen, voordat een FID van 1 is bereikt in de meeste gevallen verwaarloosbaar is. Ten tweede zullen we laten zien dat als iemand niet meer in staat is om te vluchten doordat de FID de waarde 1 bereikt, het waarschijnlijk is dat deze persoon komt te overlijden door langdurige blootstelling aan giftige rookgassen. Daarom kan het effect van giftige rookgassen gemodelleerd worden door:

1. de aanname dat een FID van 1 leidt tot overlijden;
2. een verkleining van de tijd tot de FID gelijk wordt aan 1 in de (zeldzame) gevallen waarbij de kans op overlijden aan vergiftiging voor die tijd substantieel is.

De kans om te overlijden door rookgasverstikking voordat een FID van 1 wordt bereikt (voor personen die niet meer in staat zijn om te vluchten) wordt berekend op basis van een blootstellingstijd van een uur.

Deze laatstgenoemde kans wordt bepaald op basis van probitfuncties voor de verschillende gassen. In [9] is in Tabel 7-10 voor verschillende fictieve CO-concentraties (gebaseerd op berekende CO-concentraties en verhoudingsgewijs daaraan toegevoegde andere gassen) gepresenteerd wat de kans op verstikking is bij blootstelling van een uur. De concentraties CO in mg/m³ zijn bepaald door omrekening van de concentraties CO in ppm. Vervolgens zijn op basis van de verhouding in productiefactoren uit Tabel 7-4 in [9] tussen CO en HCl, NO_x en HCN de concentraties van deze toxische gassen bepaald.

Tabel 7-4: Productiefactoren voor giftige rookgassen.

stof	productiefactor
CO	3,33 g/MJ
HCl	1,95 g/MJ
NO _x	0,1 g/MJ
HCN	0,0125 g/MJ

Tabel 4: Productiefactoren voor giftige rookgassen uit [9].

⁵ Plasbranden zullen door de indeling in categorie D in de IJtunnel niet optreden.

Bij de vertaling naar concentraties van de andere stoffen lijken echter ten onrechte de verhoudingen uit Tabel 7-4 te zijn toegepast op de concentratie CO in ppm in plaats van de concentratie CO in mg/m³ waardoor de concentraties HCl, NO_x en HCN in Tabel 7-10 circa 10% te laag zijn.

Tabel 5 Kans op overlijden door verstikking uit (Tabel 7-4 uit [9]).

Tabel 7-10: Kans op overlijden door verstikking.

[CO]	tijd tot FID _{CO} = 1 (minuten)	concentraties van alle stoffen (mg/m ³)	kans op verstikking voordat FID _{CO} = 1	kans op verstikking bij blootstelling van een uur
100 ppm	305	CO: 110	2 %	< 1 %
		HCl: 59	< 1 %	< 1 %
		NO _x : 3,0	< 1 %	< 1 %
		HCN: 0,41	< 1 %	< 1 %
1000 ppm	28	CO: 1100	2 %	3 %
		HCl: 586	< 1 %	1 %
		NO _x : 30	< 1 %	< 1 %
		HCN: 4,1	< 1 %	< 1 %
3000 ppm	9,0	CO: 3300	2 %	20 %
		HCl: 1759	< 1 %	97 %
		NO _x : 90	< 1 %	< 1 %
		HCN: 12	< 1 %	< 1 %
5000 ppm	5,3	CO: 5500	2 %	37 %
		HCl: 2928	< 1 %	100 %
		NO _x : 150	< 1 %	16 %
		HCN: 21	< 1 %	< 1 %
8000 ppm	3,3	CO: 8800	2 %	56 %
		HCl: 4685	< 1 %	100 %
		NO _x : 240	12 %	78 %
		HCN: 33	< 1 %	1 %
10000 ppm	2,6	CO: 11000	2 %	64 %
		HCl: 5856	< 1 %	100 %
		NO _x : 300	28 %	95 %
		HCN: 41	< 1 %	4 %

6

In §7.4.6 van [9] wordt de maximaal mogelijk vluchtijd bepaald. Als eerste wordt daartoe op basis van de CO-concentratie bepaald wat de maximale tijd is die iemand heeft voordat hij niet meer kan vluchten door rookgassen ($t_{\text{rook, dood}}$). Om dit te berekenen wordt de FID die bepaald is op basis van de FID voor CO, de correctiefactor voor sneller ademen door CO₂ en de correctiefactor F_{corgas} voor de overige rookgassen gelijk gesteld aan de parameter $\text{maxFID}_{\text{rook}}$ (dit is de FID waarde van rookgassen waarbij onvermogen tot vluchten optreedt; defaultwaarde in QRA-tunnels voor $\text{maxFID}_{\text{rook}}$ is 0,3).

In de volgende subparagrafen worden de parameters beschouwd die nodig zijn om in analogie hiermee te bepalen hoe groot de additionele risico's voor zelfredzaamheid van HF zijn. Hiervoor zijn de volgende parameters voor een brand van een elektrische bus van belang:

- De productie en concentratie van HF versus CO (de verhouding in productiefactor) in respectievelijk §2.8.3 en § 2.8.2.
- De verhouding van de mate waarin HF en CO schadelijk zijn.

⁶ Opgemerkt wordt dat het niet gelukt is middels een berekening met de in [9] gestelde probitfuncties voor CO, HCl, NO_x en HCN en de CO-concentraties in de eerste kolom in Tabel 7-10 de kans op verstikking bij blootstelling van een uur in Tabel 7-10 te reproduceren. Het lijkt alsof hier gerekend is met blootstellingstijden die lager zijn dan 1 uur.

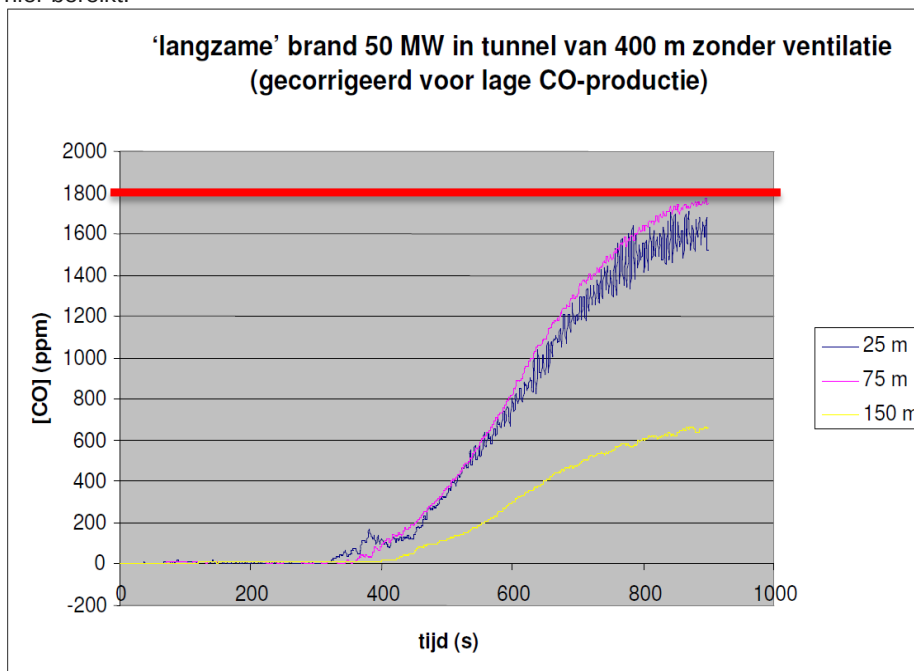
2.8.2 CO-productie en CO-concentratie elektrische bus

CO-productie busbrand

Om de productie van CO te bepalen voor een busbrand is uitgegaan van de productiefactor van CO van 3,33 g/MJ, zoals beschreven in Tabel 7-4 van [9] (zie Tabel 4). Door de HRR van een busbrand (25 MW) te vermenigvuldigen met de productiefactor voor CO is de productie vastgesteld op 83 g/s.

CO-concentratie busbrand

Naast de productie van CO is ook nog een concentratie benodigd behorend bij een busbrand om hieruit de HF-concentratie te bepalen. In [9] Figuur 7-10 is het concentratieverloop CO weergegeven voor een langzaam ontwikkelende 50 MW brand in een tunnel zonder ventilatie. Een maximale CO-concentratie van 1.800 ppm wordt hier bereikt.



Figuur 16 CO-concentratieverloop voor een langzaam ontwikkelende brand (Figuur 7-10 uit [9])

Op basis van de resultaten van de CFD-berekeningen die als basis dienen voor QRA-tunnels is in [9] de volgende formule opgesteld voor de CO-concentratie bovenstrooms van een brand zonder langsventilatie voor de periode waarin conform bovenstaande grafiek de CO-concentratie ongeveer lineair toeneemt in de tijd:

$$C_{co_L}(x) := \frac{13.5m}{B_{buis}} \cdot (a \cdot x + b)$$

In deze formule zit een correctiefactor voor een tunnelbuisbreedte die afwijkt van de breedte van een standaard tunnel. Per brandvermogen en voor zowel de langzaamgroeiende als de snelgroeiende brand zijn in QRA-tunnels de parameters a en b bepaald. Gegeven deze parameters a en b voor de diverse branden blijkt de CO-productie voor een snelgroeiende 25 MW-brand hoger (circa 20%) te liggen dan van een langzaamgroeiende 25 MW-brand. Als voor de IJtunnel in deze formule gerekend wordt met de fictieve breedte zoals gehanteerd in QRA-tunnels (met een correctie voor de beperkte breedte én hoogte) is het verloop van de CO-concentratie van een langzaamgroeiende 50 MW-brand in een standaard tunneldoorsnede vrijwel gelijk gemodelleerd aan een snelgroeiende 25 MW-brand in de IJtunnel (met de aanzienlijk kleinere, fictieve tunneldoorsnede).

Voor de berekeningen in deze notitie voor een (snelgroeiende) busbrand in de IJtunnel wordt daarom uitgegaan van de hiervoor benoemde maximale CO-concentratie van 1.800 ppm.

2.8.3 HF-productie en HF-concentratie elektrische bus

HF-productie

In [3] zijn brandproeven uitgevoerd voor een elektrisch voertuig en een voertuig met een brandstofmotor. Hieruit blijkt een maximale totale uitstoot van HF van 1.540 gram, voor een 16,5 kWh-accu. Dit komt neer op een HF-uitstoot van $1.540 / 16,5 = 93$ gram/kWh. Daarnaast is af te lezen dat de productie van HF in de latere pieken (= verbranding van de accu) maximaal op 1,3 g/s uitkomt (zie ook Figuur 21). Deze waarden zijn echter afgeleid voor een personenauto en niet direct bruikbaar voor een bus.

In de berekeningen voor het bepalen van het extra risico dat HF met zich meebrengt is uitgegaan van een ondergrens en een bovengrens in HF-productie voor een bus op basis van het volgende:

- Ondergrens: $Productie_{HF,bus,ondergrens} = 1,3$ g/s. Dit is gebaseerd op de aanname dat de HF-productie van een bus gelijk is aan de piekproductie die optreedt bij een personenauto.
- Bovengrens: $Productie_{HF,bus,bovengrens} = 93 \text{ gram/kWh} * 250 \text{ kWh} / 3600 \text{ s} = 6,5$ g/s. Dit is gebaseerd op de aanname dat de totale HF-uitstoot lineair schaalbaar is met de energie-inhoud van de accu. Voor een bus wordt conservatief een energie-inhoud aangenomen van 250 kWh [10], waar de meeste elektrische bussen in Amsterdam een energie-inhoud van 169 kWh hebben (VDLbuscoach.com). Hierbij wordt tevens gesteld dat de totale HF-uitstoot uitgespreid over een uur (= 3600 s) zal plaatsvinden. Merk op dat dit ook een conservatieve aanname is, omdat de bovengrens van de productie van HF niet een uur lang zal plaatsvinden, maar slechts tijdens de enkele pieken in de ontbranding van de batterij, zoals ook zichtbaar is in Figuur 21. Dit wordt daarom ook gezien als de meest conservatieve benadering.

HF-concentratie elektrische bus

Op basis van de productie van CO en HF kan een verhouding tussen de twee giftige rookgassen worden bepaald:

Voor de ondergrens van de HF-productie: $\frac{[productie_{CO}]}{[productie_{HF}]_{ondergrens}} = \frac{83 \text{ g/s}}{1,3 \text{ g/s}} = 64$

Voor de bovengrens van de HF-productie: $\frac{[productie_{CO}]}{[productie_{HF}]_{bovengrens}} = \frac{83 \text{ g/s}}{6,5 \text{ g/s}} = 13$

Op basis van deze verhouding en de concentratie van CO van 1.800 ppm voor een snelgroeijende busbrand (zie §2.8.2) kan de concentratie HF worden bepaald:

Voor de ondergrens van de HF-productie: $Concentratie_{HF,ondergrens} = \frac{1.800 \text{ ppm CO}}{64} = 31 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = 37 \text{ ppm}$

Voor de bovengrens van de HF-productie: $Concentratie_{HF,bovengrens} = \frac{1.800 \text{ ppm CO}}{13} = 154 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} = 185 \text{ ppm}$

2.8.4 Additionele letaliteit door HF-uitstoot

Met de hiervoor HF-concentraties voor een snelgroeijende 25 MW-brand van een elektrische bus zonder ingeschakelde langsventilatie kan worden bepaald wat de kans is op verstikking bij een blootstelling gedurende een uur. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van de probitfunctie zoals beschreven in de PGS3 [11], ook wel bekend als het 'purple book'.

$Pr = a + b \times \ln(C^n \times t),$		(5.3)
with:		
Pr	probit corresponding to the probability of death	(-)
a, b, n	constants describing the toxicity of a substance	(-)
C	concentration	(mg m ⁻³)
t	exposure time	(minutes)

Figuur 17 Probitfunctie zoals beschreven in [11].

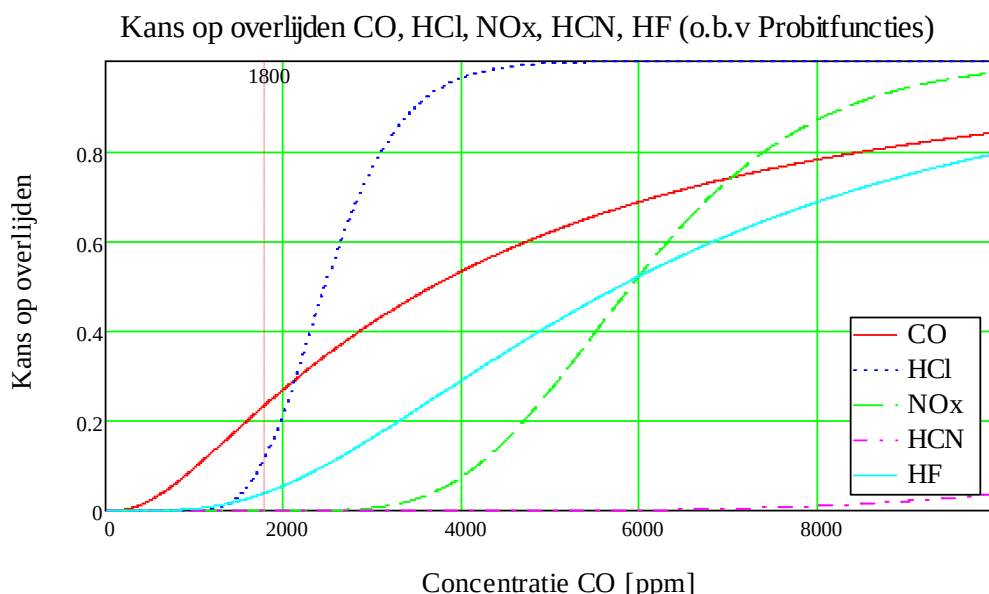
Voor HF zijn de toxiciteitsconstanten gebruikt zoals beschreven in Tabel 5.2 uit de PGS3 [11] ($a = -8,4$; $b = 1$; $n = 1,5$) om de kans op verstikking bij blootstelling van een uur te berekenen. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6: Kans op overlijden door verstikking uit [9] met HF toegevoegd.

Stof	Concentratie [ppm]	Concentratie [mg/m ³]	Kans op verstikking bij blootstelling van een uur
CO	1.800 ppm	1.980	24%
HCl		1.159	12%
NO _x		59	< 1%
HCN		7,4	< 1%
HF		31 - 154	< 1% – 4%

De kans op verstikking door de HF is, in verhouding tot een CO-concentratie van 1.800 ppm, bepaald voor zowel de ondergrens en bovengrens in HF-concentratie (zoals beschreven in §2.8.3) en ligt tussen de <1% en 4%. Deze kans op overlijden is gegeven deze concentraties lager dan de bijbehorende kansen op overlijden door CO (24%) en HCl (12%), maar hoger dan de kans op overlijden door NO_x en HCN.

In Figuur 18 is tevens voor andere concentraties CO, maar met dezelfde verhouding tussen CO, HCl, NO_x, HCN en (de bovengrens van) HF op basis van de gehanteerde probitfuncties de kans op overlijden gepresenteerd.



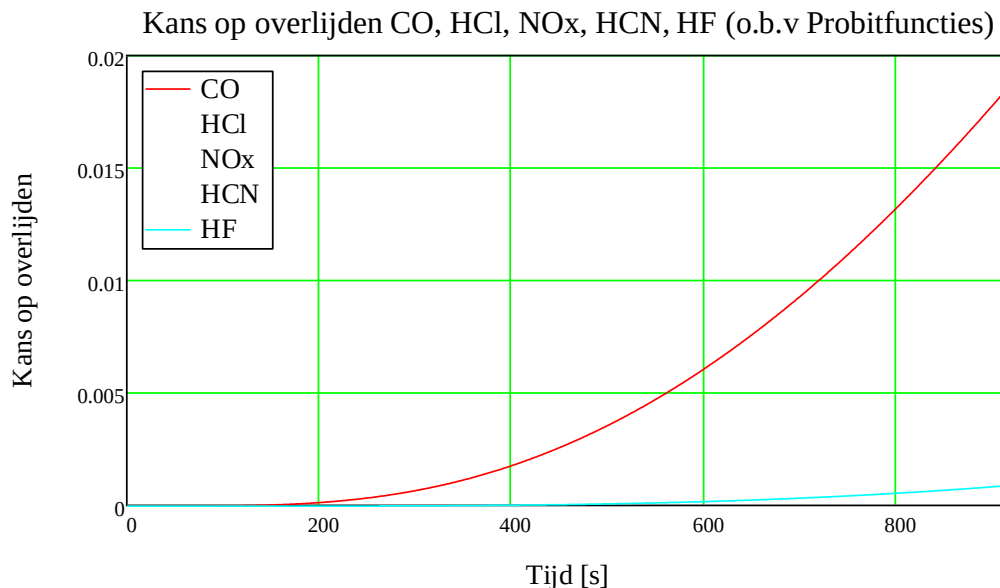
Figuur 18 Kans op overlijden door CO, HCl, NO_x, HCN en HF bij een blootstellingsduur van 60 minuten afhankelijk van de concentratie CO

Uit de figuur kan worden opgemaakt dat gegeven de gehanteerde uitgangspunten en aannames:

- De probitfunctie voor HF nooit de bovenste lijn is.
- De kans om te overlijden aan de gevolgen van CO tot circa 14.000 ppm hoger ligt dan voor HF.
- De kans om te overlijden aan de gevolgen van HCl vanaf circa 1.400 ppm hoger ligt dan voor HF.

De resultaten hiervoor zijn voor een blootstellingsduur van 60 minuten. Dit betreft mensen die door immobiliteit langdurig in dergelijke condities verblijven. Aanvullend is onderzocht hoe groot de kans op overlijden is in de tijd gegeven een CO-concentratie van 1.800 ppm en corresponderende concentraties van de andere toxische

gassen. Het resultaat hiervan is gepresenteerd in Figuur 19 voor een tijdsduur tot 15 minuten, het moment waarop bij deze CO-concentratie immobiliteit optreedt.



Figuur 19 Kans op overlijden door CO, HCl, NO_x, HCN en HF bij een concentratie CO van 1800 ppm in de tijd

Uit de grafiek blijkt CO het maatgevende gas te zijn voor de kans op overlijden. De verhouding tussen het gevolg van CO en van HF is ongeveer een factor 20. De andere vrijkomende gassen spelen in deze 15 minuten geen rol van betekenis voor de kans van overlijden.

Er zijn geen gegevens beschikbaar over de wijze waarop de per gas berekende kansen moeten worden gecombineerd om te komen tot een totale kans op overlijden door toxische gassen. De ondergrens hiervoor is voor iedere concentratie in Figuur 18 de bovenste probitlijn. De bovengrens zou, als bij iedere stof een ander mechanisme speelt een sommatie kunnen zijn van de verschillende probits, maar als stoffen elkaars impact op de mens versterken, zou de bovengrens ook boven deze sommatie kunnen liggen. Voor de letaliteit onder niet-direct-betrokkenen dient naast de kans op overlijden door toxische gassen de kans op overlijden door warmtestraling en hoge temperaturen te worden meegenomen. Ook over de wijze waarop deze moeten worden gecombineerd is niet in een formule vastgelegd. Een meer nauwkeurige inschatting is op basis van de beschikbare literatuur en de wijze waarop dit in QRA-tunnels is geschematiseerd vooralsnog niet te maken.

Geconcludeerd wordt dat bij de gehanteerde uitgangspunten en aannames HF op zich leidt tot een lagere letaliteit dan CO en HCL, maar dat op basis van de berekeningen voor de elektrische bus hiervoor niet kan worden geconcludeerd dat de impact van HF op de totale kans op overlijden niet significant is.

3 CONCLUSIES

Sinds medio augustus 2018 rijden elektrische lijnbussen door de IJtunnel. Deze bussen met een nieuwe aandrijvingsvorm brengen zowel in de open lucht als in tunnels andere risico's met zich mee dan de traditionele dieselmotoren. In voorliggende notitie is de impact van elektrische bussen in de IJtunnel op de tunnelveiligheid en de uitgevoerde scenarioanalyse beschouwd en is beoordeeld in hoeverre elektrische bussen invloed hebben op de kwantitatieve risicoanalyse.

3.1 Kans op brand elektrische bus

Op basis van de gebruikte literatuur is het, door het ontbreken van statistische gegevens, niet mogelijk een kans op een brand in een elektrische bus te bepalen. Wel wordt in de literatuur ingegaan op verschillende oorzaken van een brand. Zo kan een brand zich ontwikkelen door bijvoorbeeld een technisch mankement in het voertuig, naar aanleiding van een ongeval of door brandoverslag van een naastgelegen voertuig. De grootste gevolgen heeft een brand die ontstaat nabij de accu-pakketten. Bij een dergelijke brand zullen namelijk relatief snel toxische gassen vrijkomen. Van de kans op een dergelijk scenario is geen casuïstiek

gevonden. De branden met elektrische voertuigen die tot zover ons bekend in het nieuws zijn geweest, betreffen voornamelijk voertuigen waarbij brand is ontstaan door een ongeval waarbij het voertuig betrokken raakte. De schade aan het voertuig zal hierbij vermoedelijk indirect geleid hebben tot een brand rondom de batterij of ergens anders in het voertuig. De kans op directe betrokkenheid van het meest brandgevaarlijke onderdeel van de bus, het batterijpakket, is bij een ongeval voor een elektrische bus relatief klein omdat de batterijen op het dak van de bus zijn gemonteerd.

3.2 Gevolgen van brand elektrische bus

Voor het gevolg kan onderscheid gemaakt worden tussen een aantal scenario's:

- Brand in een elektrische bus met brandoverslag van onderin de bus naar de batterijen:
Voor een brand die zich ontwikkelt vanuit een locatie in de bus elders dan het batterijcompartiment geldt dat de tijdsduur tot de brand de batterijen heeft bereikt afhankelijk is van de locatie waar de brand start en de voortplantingssnelheid door de bus (bepaald door de gehanteerde materialen en bagage). Het is bij brandontwikkeling elders in de bus waarschijnlijk dat het batterijcompartiment in veel gevallen pas in een laat stadium van de zelfredzaamheidsfase betrokken zal raken bij de brand. Als in het batterijpakket thermal runaway ontstaat, dan komt er waterstoffluoride vrij, naast toxische stoffen die ook bij voertuigen met een verbrandingsmotor voorkomen. Er wordt verondersteld dat de extra uitstoot van HF tijdens ontbranding van de batterijen in een elektrische bus leidt tot een toename van de bedreiging door toxische stoffen. Niet zonder meer kan worden gesteld dat de letaliteit hiermee toeneemt omdat niet bekend is of het effect cumulatief optreedt, of dat reeds eerder andere toxische stoffen tot letaliteit hebben geleid. De inschatting is dat deze toename als gevolg van het vrijkomen van HF daarmee ligt tussen 0 en 10% bedraagt. Inschatting is dat deze situatie laat in de zelfredzaamheidsfase ontstaat, waardoor het effect op de letaliteit in veel gevallen mogelijk beperkt is. Een meer nauwkeurige inschatting is op basis van de beschikbare literatuur en de wijze waarop dit in QRA-tunnels is geschematiseerd vooralsnog niet te maken. Gezien de beschikbare literatuur en de wijze waarop QRA tunnels is gemodelleerd kan dit effect niet worden meegenomen in de QRA.
- Brand in een elektrische bus door brandoverslag vanaf een naastgelegen voertuig:
In de IJtunnel is het mogelijk dat tijdens een calamiteit de langsventilatie niet zal worden ingeschakeld vanwege een file benedenstrooms van het incident. In dit geval is het interessant om te kijken wat de invloed is op een elektrische bus die zich bevindt in de buurt van een brandend voertuig. Voor een 100 MW-brand is het risico op thermal runaway van de batterijen van een elektrische bus voornamelijk aanwezig wanneer de bus zich relatief kleine afstand van een brandende vrachtwagen bevindt. De wijze van opwarming van het batterijpakket is belangrijk om de tijdsduur tot thermal runaway te bepalen. Verwacht wordt dat opwarming van de batterijen door overslag vanaf een naast gelegen voertuig pas plaats heeft nadat de omstandigheden in de tunnelbuis ter hoogte van het batterijpakket al geruime tijd niet meer leefbaar zijn. Verwacht wordt dat deze situatie bij een 'normaal verloop' van het ontruimingsproces daardoor niet leidt tot additionele letaliteit. Bij een relatief late start van of lange duur van het ontruimingsproces kan niet worden uitgesloten dat wel additionele slachtoffers vallen bij een dergelijk scenarioverloop. Brandoverslag van een ander voertuig naar een elektrische bus lijkt dit vooralsnog geen significante invloed te hebben op de inzetmogelijkheden van de brandweer.

Rijkswaterstaat als beheerder van QRA-tunnels voorziet vooralsnog geen aanpassingen in QRA-tunnels in verband met elektrische voertuigen. In voorliggende notitie is een analyse gedaan op de kans op en gevolgen van een brand in een elektrische bus. Dit geeft geen directe aanleiding om de kans op een brand in een elektrische bus anders in te schatten dan voor een bus aangedreven met een brandstofmotor. Ook de hoeveelheid warmte die vrijkomt bij een brand in een elektrische bus wordt niet significant anders ingeschat dan bij een bus met een brandstofmotor. Bij brand van het batterijpakket van een elektrische bus komt naast reguliere verbrandingsproducten HF vrij. Dit heeft mogelijk invloed op de letaliteit in de zelfredzaamheidsfase zoals getoetst in de QRA. Alhoewel het effect niet berekend kan worden, wordt verwacht dat dit effect relatief beperkt is omdat het in de meeste gevallen laat in de zelfredzaamheidsfase zal optreden én omdat de het effect mogelijk niet volledig gesuperponeerd moet worden ten opzichte van andere letale hoeveelheden giftige stoffen. Voor de IJtunnel wordt daarom voorgesteld om in de huidige situatie, na invoering van elektrische bussen, vooralsnog gebruik te maken van de vigerende versie van QRA-tunnels. Geadviseerd wordt de ontwikkelingen op het gebied van elektrische voertuigen en het model QRA-tunnels te volgen en indien daar aanleiding toe is (en de mogelijkheden hiertoe geboden worden in QRA-tunnels) aanvullende berekeningen uit te voeren.

4 VERWIJZINGEN

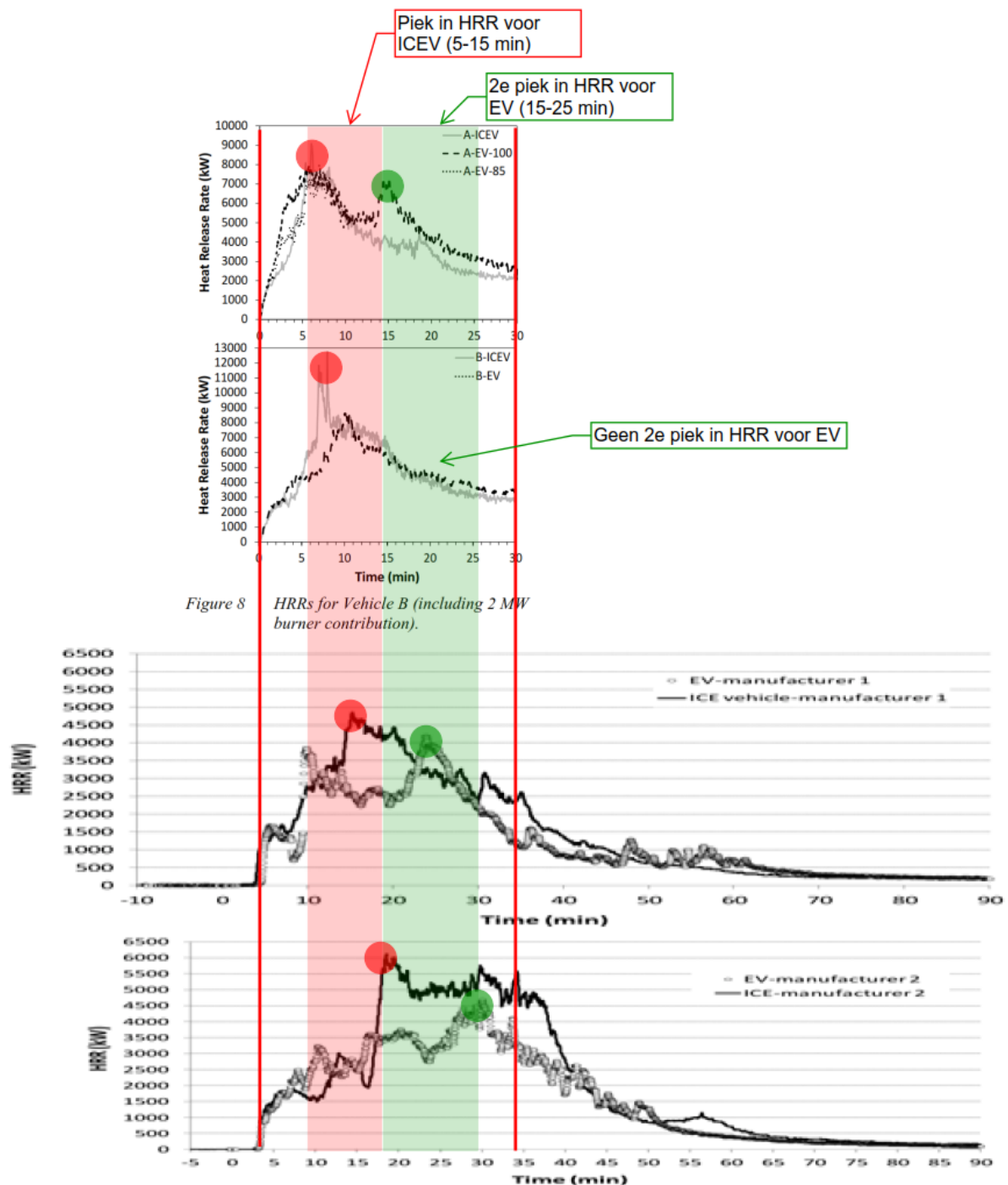
[1] P. Andersson, J. Brandt en O. Willstrand, „Full scale fire-test of an electric hybrid bus,” SP Report 2016:05.

- [2] C. Lam, D. MacNeil, R. Kroeker, G. Loughheed en G. Lalime, „Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal (proceedings Fourth International Conference on Fire in Vehicles, October 5-6, 2016),” 2016.
- [3] A. Lecocq, M. Bertana, B. Truchot en G. Marlair, „Comparison of the fire consequences of an electric,” 4 april 2014.
- [4] F. Larsson, P. Andersson, P. Blomqvist en B.-E. Mellander, „Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires (Nature),” 30 Augustus 2017.
- [5] ir. Daan Jansen, „(Masterthesis Postgraduaat Fire Safety Engineering Universiteit Gent) Autobranden in parkeergarages - brandscenario's, brandsimulaties en de gevolgen voor constructies,” 24 juni 2010.
- [6] M. K. Cheong, W. O. Cheong, K. W. Leong, A. D. Lemaire & L.M. Noordijk, „Heat Release Rate of Heavy Goods Vehicle Fire in Tunnels with Fixed Water Based Fire-Fighting System,” *Fire Technology* ISSN 0015-2684, vol. 50, p. 249–266, 2014.
- [7] H. Ingason, Y. Z. Li en A. Lönnemark, Tunnel Fire Dynamics, New York: Springer Science+Business Media, 2015.
- [8] Y. Shintani, „Experimental Investigation of Burning Behavior of Automobiles,” International Association for Fire Safety Science, 2004.
- [9] Steunpunt Tunnelveiligheid (RWS), „Achtergronddocument QRA-tunnels,” 2 februari 2012.
- [10] IFV, „Brandveiligheid van elektrische bussen,” 30 september 2016.
- [11] PGS, „PGS3: Guidelines for quantitative risk assessment,” 1999/2005.
- [12] „Standaardisatie Gemeentelijke Wegtunnels Amsterdam,” 9 december 2014.

5 AFKORTINGEN EN BEGRIPPEN

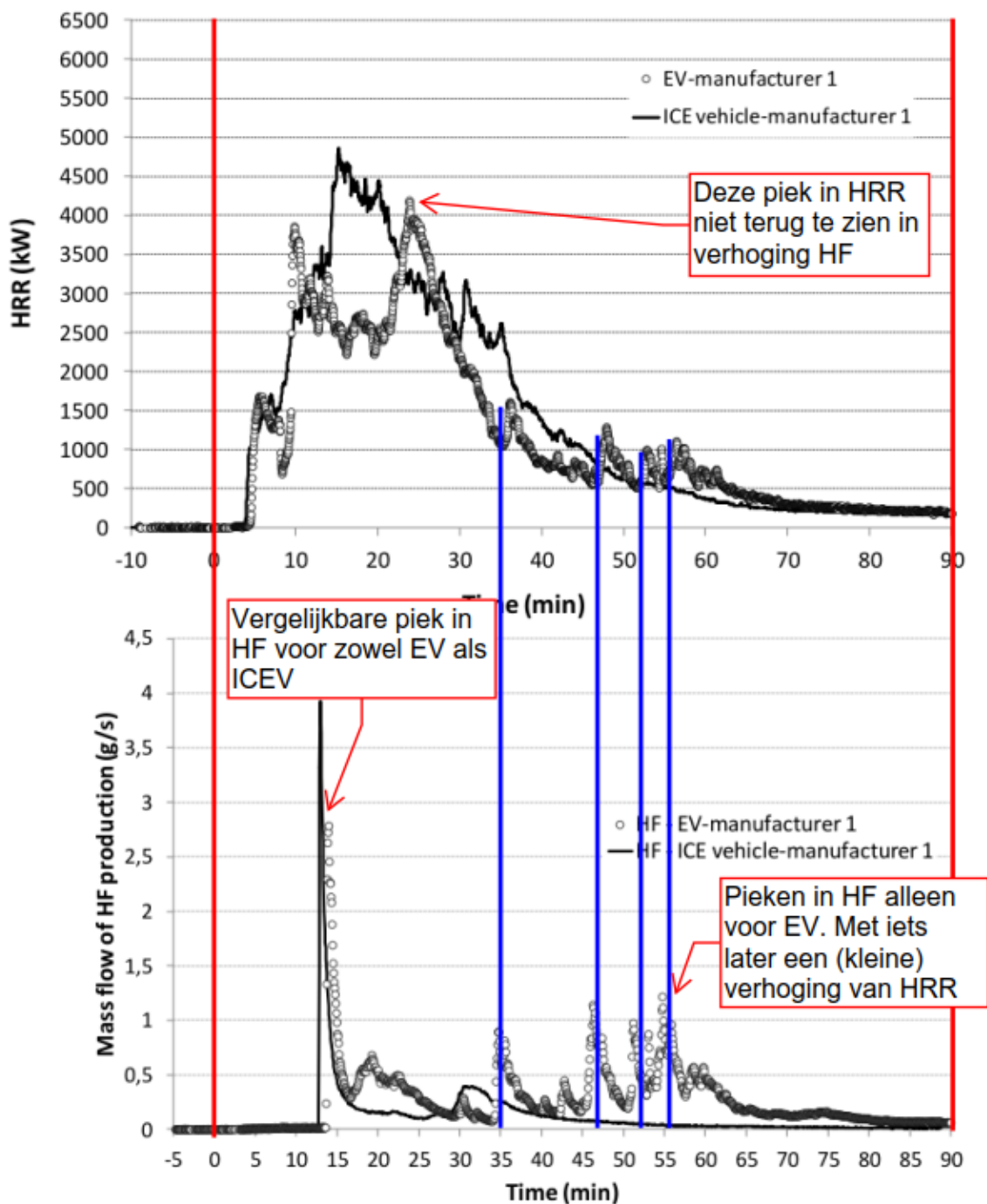
Afkorting / begrip		
CFD	Computational Fluid Dynamics	
EV	Electric Vehicle	Elektrisch voertuig
FID	Fractional Incapacitating Dose	
HF	Hydrogen Fluoride	Waterstoffluoride
HRR	Heat Release Rate	Warmte afgifte
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle	Voertuig met een interne verbrandingsmotor
LPG	Liquefied Petroleum Gas	
QRA	Quantitative Risk Analysis	Kwantitatieve risicoanalyse
RWS		Rijkswaterstaat
UMS		Uitsluitend Materiele Schade

BIJLAGE A: VERGELIJKING BRANDVERMOGEN

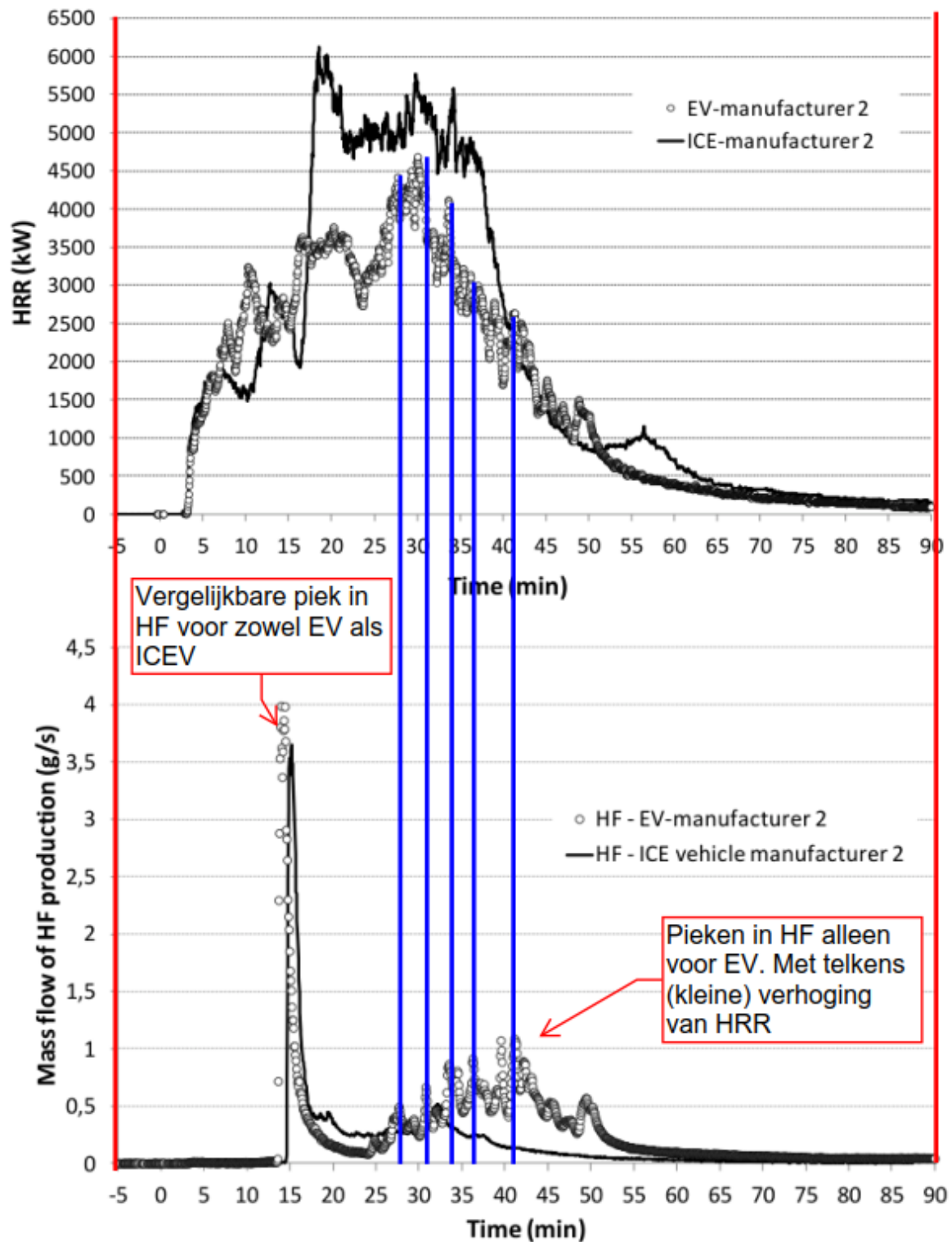


Figuur 20 HRR voor voertuigen uit [2] en [3].

BIJLAGE B: VERGELIJKING BRANDVERMOGEN- TOXISCHE GASSEN



Figuur 21 HRR en HF productie uit [3] voor leverancier 1.



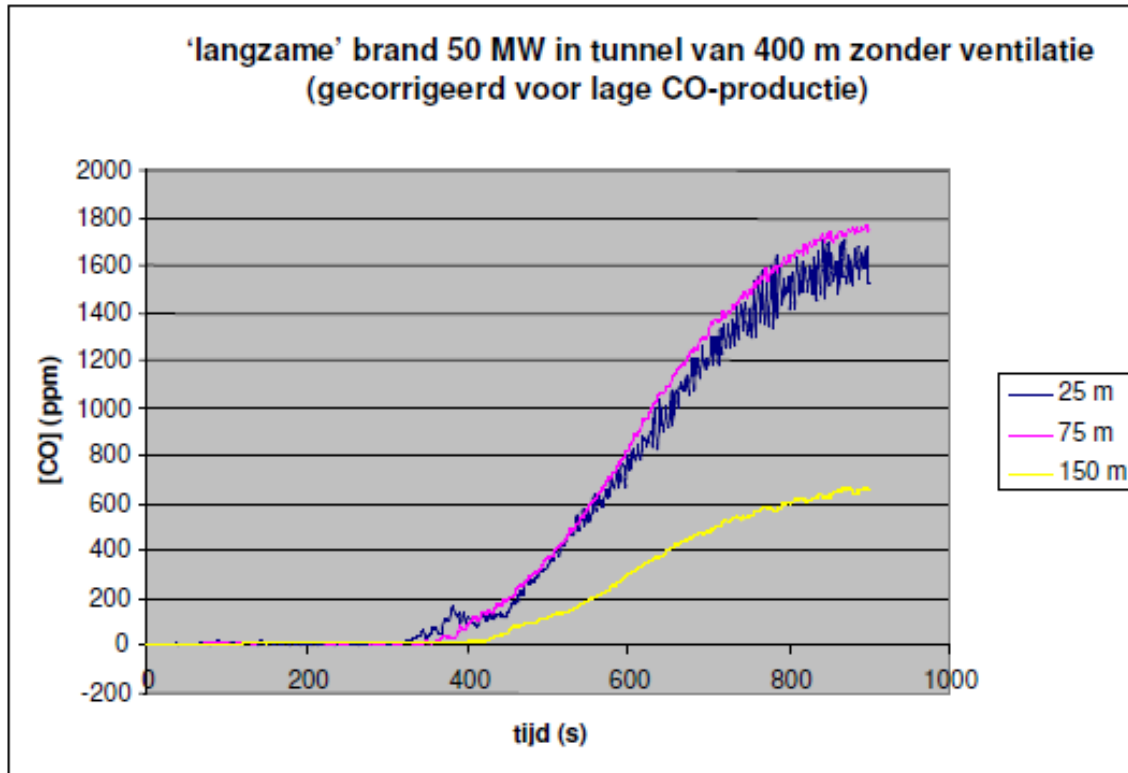
Figuur 22 HRR en HF productie uit [3] voor leverancier 2.

BIJLAGE C: BEREKENINGEN

Concentratie CO en andere toxische gassen

In het Achtergronddocument bij QRA-tunnels is beschreven hoe het concentratieverloop voor CO en diverse andere toxische gassen is gemodelleerd:

Op basis van een aantal CFD-berekeningen voor verschillende brandscenario's (langzaam en snelgroeiende branden met een brandvermogen van 5, 10, 25, 50, 100, 200 MW en een plasbrand) is in eerste instantie de CO-concentratie op een afstand x van een brand bepaald. Een voorbeeld hiervan staat in Figuur 7-10.



Figuur 7-10: CO- concentratieverloop voor een langzaam ontwikkelende brand.

Op basis van de resultaten van die berekeningen is de volgende formule opgesteld voor de CO-concentratie bovenstrooms van een brand zonder langsventilatie:

$$C_{co_L2}(x) := \frac{13.5m}{B_{buis}} \cdot (a \cdot x + b)$$

Per brandvermogen en voor zowel de langzaamgroeiende als de snelgroeiende brand zijn de parameters a en b bepaald.

In deze formule zit een correctiefactor voor een tunnelbuisbreedte die afwijkt van de breedte van een standaard tunnel.

De breedte van een standaardtunnel (waarvoor door RWS de CFD-berekeningen zijn gemaakt) is:

$$B_{buis_standaard} := 13.5m$$

De fictieve breedte van de IJtunnel (in verband met de beperkte breedte en hoogte) zoals gehanteerd in de QRA is :

$$B_{buis_fictief_IJT} := 7.52m$$

In de broncode van QRA-tunnels 2.0 versie 0.56 staan de volgende waarden voor de parameters a en b (letselbrand = snelgroeiend; pechbrand = langzaamgroeiend):

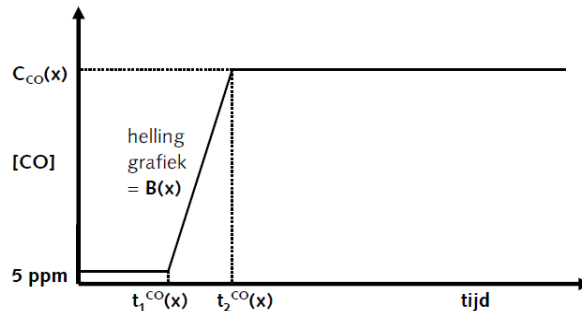
Brandtype	parameter a	parameter b
(plasbrand_1200)	(-70.37)	(12713)
plasbrand_300	-70.37	12713
plasbrand_30	-20.76	4948
200MW_letsel	-70.37	12713
100MW_letsel	-20.76	4948
50MW_letsel	-14.24	3135
25MW_letsel	-7.28	1591
10MW_letsel	-2.4	600
5MW_letsel	-1.09	290
200MW_pech	-37.67	7374
100MW_pech	-14.76	3764
50MW_pech	-12.79	2801
25MW_pech	-6.16	1332
10MW_pech	-1.06	315
5MW_pech	-0.22	98

Tussen de tijdstippen $t1_CO$ en $t2_CO$ is de concentratie CO als volgt geschematiseerd:

$$C_{co_L2}(x, i, B_{buis}) := \frac{13.5m}{B_{buis}} \cdot (a_i \cdot x + b_i)$$

$$25 \text{ MW snel: } i_{25S} := 7 - 1$$

$$50 \text{ MW langzaam: } i_{50L} := 12 - 1$$



De CO-productie voor een snelgroeiende 25 MW-brand ligt hoger (circa 20%) dan van een langzaamgroeiende 25 MW-brand. Het verloop van de CO-concentratie van een langzaamgroeiende 50 MW-brand in een standaard tunneldoorsnede wordt vrijwel gelijk gemodelleerd aan een snelgroeiende 25 MW-brand in de Ijtunnel (met de aanzienlijk kleinere, fictieve tunneldoorsnede).

$$\frac{C_{co_L2}(25, i_{50L}, B_{buis_standaard})}{C_{co_L2}(25, i_{25S}, B_{buis_fictief_IJT})} = 0.981$$

$$\frac{C_{co_L2}(75, i_{50L}, B_{buis_standaard})}{C_{co_L2}(75, i_{25S}, B_{buis_fictief_IJT})} = 0.982$$

$$\frac{C_{co_L2}(150, i_{50L}, B_{buis_standaard})}{C_{co_L2}(150, i_{25S}, B_{buis_fictief_IJT})} = 0.985$$

De verhouding tussen beide is 1 wat betekent dat de in QRA-tunnels gehanteerde CO-productie voor beide branden gelijk wordt verondersteld.

Voor de maximale CO-concentratie voor een snelgroeiende 25 MW-brand wordt daarom uitgegaan van circa 1800 ppm (bovengrens van figuur 7-10 voor de langzaamgroeiende 50 MW-brand).

$$ppm_{CO} := \frac{110mg \cdot m^{-3}}{100}$$

$$C_{CO, ppm, 25MW_snel} := 1800 ppm_{CO}$$

Op basis van Tabel 7-4 uit het Achtergronddocument bij QRA-tunnels is de verhouding in productiefactoren gebruikt om de concentraties van de andere stoffen te bepalen:

Tabel 7-4: Productiefactoren voor giftige rookgassen.

<i>stof</i>	<i>productiefactor</i>
CO	3,33 g/MJ
HCl	1,95 g/MJ
NO _x	0,1 g/MJ
HCN	0,0125 g/MJ

In de CFD-berekeningen zijn concentraties gegeven van CO, CO₂, en zuurstof. Er kan een schatting gemaakt worden van de concentraties van HCl, NO_x en HCN met behulp van de productiefactoren in Tabel 7-4. Voor elke gram CO die in de brand wordt geproduceerd, ontstaat er volgens die tabel bijvoorbeeld $1,95/3,33 = 0,59$ gram HCl.

$$C_{\text{CO.mg_m3}}(C_{\text{CO.ppm}}) := C_{\text{CO.ppm}}$$

$$C_{\text{HCl.mg_m3}}(C_{\text{CO.ppm}}) := \frac{1.95}{3.33} \cdot C_{\text{CO.mg_m3}}(C_{\text{CO.ppm}})$$

$$C_{\text{NOx.mg_m3}}(C_{\text{CO.ppm}}) := \frac{0.1}{3.33} \cdot C_{\text{CO.mg_m3}}(C_{\text{CO.ppm}})$$

$$C_{\text{HCN.mg_m3}}(C_{\text{CO.ppm}}) := \frac{0.0125}{3.33} \cdot C_{\text{CO.mg_m3}}(C_{\text{CO.ppm}})$$

In het achtergronddocument van QRA-tunnels is de volgende tabel opgenomen:

Tabel 7-10: Kans op overlijden door verstikking.

[CO]	tijd tot FID _{CO} = 1 (minuten)	concentraties van alle stoffen (mg/m ³)	kans op verstikking voordat FID _{CO} = 1	kans op verstikking bij blootstelling van een uur
100 ppm	305	CO: 110 HCl: 59 NO _x : 3,0 HCN: 0,41	2 % < 1 % < 1 % < 1 %	< 1 % < 1 % < 1 % < 1 %
1000 ppm	28	CO: 1100 HCl: 586 NO _x : 30 HCN: 4,1	2 % < 1 % < 1 % < 1 %	3 % 1 % < 1 % < 1 %
3000 ppm	9,0	CO: 3300 HCl: 1759 NO _x : 90 HCN: 12	2 % < 1 % < 1 % < 1 %	20 % 97 % < 1 % < 1 %
5000 ppm	5,3	CO: 5500 HCl: 2928 NO _x : 150 HCN: 21	2 % < 1 % < 1 % < 1 %	37 % 100 % 16 % < 1 %
8000 ppm	3,3	CO: 8800 HCl: 4685 NO _x : 240 HCN: 33	2 % < 1 % 12 % < 1 %	56 % 100 % 78 % 1 %
10000 ppm	2,6	CO: 11000 HCl: 5856 NO _x : 300 HCN: 41	2 % < 1 % 28 % < 1 %	64 % 100 % 95 % 4 %

De concentraties CO in mg/m³ zijn bepaald door omrekening van de concentraties CO in ppm. Bij de vertaling naar concentraties van de andere stoffen lijken echter ten onrechte de verhoudingen uit Tabel 7-4 te zijn toegepast op de concentratie CO in ppm in plaats van de concentratie CO in mg/m³.

Het tijdstip waarop gegeven de CO-concentratie een FID van 1 wordt bereikt en mensen dus stoppen met vluchten (kolom 2 in Tabel 7-10) wordt als volgt berekend:

RMV := 25

$$t_{\text{FID}_1} := \frac{1}{\left[1.11 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{C_{\text{CO.ppm}} \cdot 25 \text{MW}_{\text{snel}}}{\text{ppm}_{\text{CO}}} \right)^{1.036} \cdot \text{RMV} \right]} = 15 \text{minuten}$$

De corresponderende concentraties voor HCl, NOx en HCN zijn:

$$C_{\text{HCl.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW}_\text{snel}}) = 1159 \cdot \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$C_{\text{NOx.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW}_\text{snel}}) = 59 \cdot \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$C_{\text{HCN.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW}_\text{snel}}) = 7 \cdot \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Deze waarden wijken dus een factor 1,1 af van de waarden in Tabel 7-10 zoals hiervoor toegelicht.

De parameters voor de probitfuncties voor CO, HCl, NO₂, HCN, propylamine en HF zijn (op basis van het Purple book,(PGS3):

$$\text{stof} := \begin{pmatrix} \text{CO} \\ \text{HCl} \\ \text{NO}_2 \\ \text{HCN} \\ \text{propylamine} \\ \text{HF} \end{pmatrix} \quad a := \begin{pmatrix} -7.4 \\ -37.3 \\ -18.6 \\ -9.8 \\ 8.5 \\ -8.4 \end{pmatrix} \quad b := \begin{pmatrix} 1 \\ 3.69 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad n := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 3.7 \\ 2.4 \\ 2 \\ 1.5 \end{pmatrix}$$

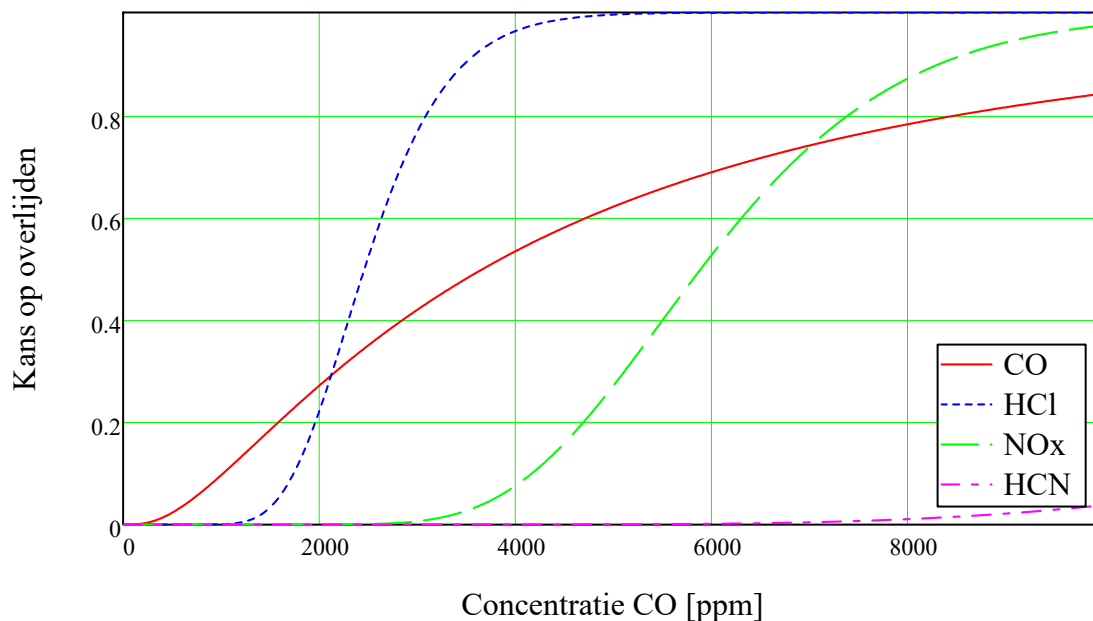
Opgemerkt wordt dat in het Achtergronddocument bij QRA-tunnels NO_x en NO₂ door elkaar heen worden gebruikt. In deze berekening is zoveel mogelijk bij de terminologie uit het Achtergronddocument aangesloten (QRA-tunnels 7.4.4: *Voor NO_x worden de parameters gebruikt die horen bij NO₂ conform [26], paragraaf 2.2 en [2], paragraaf 4.3).*

Voor CO, HCl, NO₂, HCN, HF (eenheden min. en mg/m³):

$$\text{Pr}(\text{stof}, C, t) := a_{\text{stof}} + b_{\text{stof}} \cdot \ln \left[\left(\frac{C}{\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}} \right)^{n_{\text{stof}}} \cdot \frac{t}{\text{min}} \right]$$

$$P(\text{stof}, C, t) := 0.5 \cdot \left(1 + \text{erf} \left(\frac{\text{Pr}(\text{stof}, C, t) - 5}{\sqrt{2}} \right) \right)$$

Kans op overlijden CO, HCl, NOx en HCN (o.b.v Probitfuncties)



Ter verificatie met de resultaten in Tabel 7-10 bij een CO-concentratie van 10.000 ppm, na 1 uur:

$$C_{\text{CO.ppm.vgl}} := 10000 \text{ ppm}_{\text{CO}}$$

$$\text{CO} \quad P(\text{CO}, C_{\text{CO.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.vgl}}), 1 \text{ hr}) = 0.841$$

$$\text{HCl} \quad P(\text{HCl}, C_{\text{HCl.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.vgl}}), 1 \text{ hr}) = 1$$

$$\text{NO}_2 \quad P(\text{NO}_2, C_{\text{NOx.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.vgl}}), 1 \text{ hr}) = 0.975$$

$$\text{HCN} \quad P(\text{HCN}, C_{\text{HCN.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.vgl}}), 1 \text{ hr}) = 0.038$$

Verskil met het resultaat in Tabel 7-10 voor CO wordt veroorzaakt door het feit dat daar wordt gerekend met een blootstellingsduur 1 uur minus de tijd tot de FID_CO = 1. In de berekening hierboven wordt gerekend met het volledige uur.

Voor de overige stoffen is er daarnaast een verschil door het feit dat in Tabel 7-10 de verhouding in productiefactoren lijkt te zijn toegepast op de concentratie CO in ppm plaats van in mg/m³.

Dit leidt tot de volgende kansen op overlijden bij 1 uur blootstelling voor de concentraties bij een snelgroeiende 25 MW-brand:

$$\text{CO} \quad P(\text{CO}, C_{\text{CO.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW_snel}}), 1 \text{ hr}) = 0.237$$

$$\text{HCl} \quad P(\text{HCl}, C_{\text{HCl.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW_snel}}), 1 \text{ hr}) = 0.124$$

$$\text{NO}_2 \quad P(\text{NO}_2, C_{\text{NOx.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW_snel}}), 1 \text{ hr}) = 5.666 \times 10^{-6}$$

$$\text{HCN} \quad P(\text{HCN}, C_{\text{HCN.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW_snel}}), 1 \text{ hr}) = 1.912 \times 10^{-9}$$

Aan de letaliteit zoals berekend op basis van de CFD's in QRA-tunnels en de probitfuncties uit PGS3 dient de letaliteit door HF (uit de battery-packs van de elektrische bus) te worden toegevoegd.

Bij een brand in een batterij komt per Wh aan HF vrij tussen [*bron: Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires*]:

$$HF_{\min} := 20 \frac{\text{mg}}{\text{W} \cdot \text{hr}} \quad \text{en} \quad HF_{\max} := 200 \frac{\text{mg}}{\text{W} \cdot \text{hr}}$$

Voor de energieinhoud van een het battery-pack van een elektrische bus wordt aangehouden [IFV]:

$$\text{Batterypack}_{\text{Ebus}} := 250 \text{ kWh}$$

$$HF_{\text{totaal.max}} := \text{Batterypack}_{\text{Ebus}} \cdot HF_{\max} = 50 \text{ kg}$$

Bron: 2012 - Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle

Verskil tussen elektrisch (EV) en benzineauto (ICE):

Voertuig 1 (EV1):

$$HF_{\text{uitstoot_EV1}} := 1540 \text{ gr}$$

$$\Delta HF_{\text{vrijkomt.EV_ICE.1}} := HF_{\text{uitstoot_EV1}} - 621 \text{ gr} = 0.919 \text{ kg}$$

$$\text{Accu}_1 := 16.5 \text{ kWh}$$

Voertuig 2 (EV2):

$$HF_{\text{uitstoot_EV2}} := 1470 \text{ gr}$$

$$\Delta HF_{\text{vrijkomt.EV_ICE.2}} := HF_{\text{uitstoot_EV2}} - 813 \text{ gr} = 0.657 \text{ kg}$$

$$\text{Accu}_2 := 23.5 \text{ kWh}$$

Maximale HF productie in de pieken tijdens ontbranding van de batterij:

$$HF_{\text{productie_EV1}} := 1.3 \text{ gr} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$HF_{\text{productie_EV2}} := 1 \text{ gr} \cdot \text{s}^{-1}$$

HF uitstoot per kWh:

$$HF_{\text{uitstoot_per_kWh_EV1}} := \frac{HF_{\text{uitstoot_EV1}}}{\text{Accu}_1} = 93.333 \cdot \frac{\text{gr}}{\text{kWh}}$$

$$HF_{\text{uitstoot_per_kWh_EV2}} := \frac{HF_{\text{uitstoot_EV2}}}{\text{Accu}_2} = 62.553 \cdot \frac{\text{gr}}{\text{kWh}}$$

Voor een elektrische bus [**Bron: Achtergronddocument QRA-tunnels**]:

$$\text{HRR}_{\text{busbrand}} := 25\text{MW} \quad \text{brandvermogen bus}$$

$$\text{productie}_{\text{CO}} := 3.33\text{gr}\cdot\text{MJ}^{-1} \quad (\text{zie Tabel 7-4})$$

$$\text{productie}_{\text{CO.bus}} := \text{HRR}_{\text{busbrand}} \cdot \text{productie}_{\text{CO}} = 83.25 \cdot \text{gr}\cdot\text{s}^{-1}$$

Voor de HF productie van een bus wordt als ondergrens aangehouden dat de productie gelijk is aan de piekproductie van een EV (elektrische auto). Voor de HF productie van een bus wordt als bovengrens uitgegaan van de HF uitstoot van een EV (g/kWh) linear te schalen met de energie inhoud van de accu (kWh).

$$\text{HF}_{\text{uitstoot_Ebus_bovengrens}} := \text{HF}_{\text{uitstoot_per_kWh_EV1}} \cdot \text{Batterypack}_{\text{Ebus}} = 23.333 \text{ kg}$$

$$\text{HF}_{\text{productie_Ebus_bovengrens}} := \frac{\text{HF}_{\text{uitstoot_Ebus_bovengrens}}}{3600\text{s}} = 6.481 \cdot \frac{\text{gr}}{\text{s}}$$

$$\text{HF}_{\text{productie_Ebus}} := \left(\frac{\text{HF}_{\text{productie_EV1}}}{\text{HF}_{\text{productie_Ebus_bovengrens}}} \right) = \left(\frac{1.3}{6.481} \right) \cdot \frac{\text{gr}}{\text{s}}$$

$$\text{verhouding}_{\text{productieCO.HF}} := \frac{\text{productie}_{\text{CO.bus}}}{\text{HF}_{\text{productie_Ebus}}} = \left(\frac{64}{13} \right)$$

Met de verhouding zoals hierboven berekend, leidt dit tot een concentratie HF van:

$$\text{ppm}_{\text{HF}} := 0.833\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$$

$$\text{concentratie}_{\text{HF.zonder.ventilatie}} := \frac{C_{\text{CO.ppm.25MW_snel}}}{\text{verhouding}_{\text{productieCO.HF}}} = \left(\frac{37.118}{185.059} \right) \cdot \text{ppm}_{\text{HF}}$$

De Probit voor HF is voor deze ondergrens en bovengrens van de concentratie [ppm]:

$$\text{Ondergrens} \quad P(\text{HF}, \text{concentratie}_{\text{HF.zonder.ventilatie}_0}, 1\text{hr}) = 1.601 \times 10^{-3} \cdot \%$$

$$\text{Bovengrens} \quad P(\text{HF}, \text{concentratie}_{\text{HF.zonder.ventilatie}_1}, 1\text{hr}) = 4 \cdot \%$$

Bij de corresponderende concentraties CO en HCl horen probits van respectievelijk:

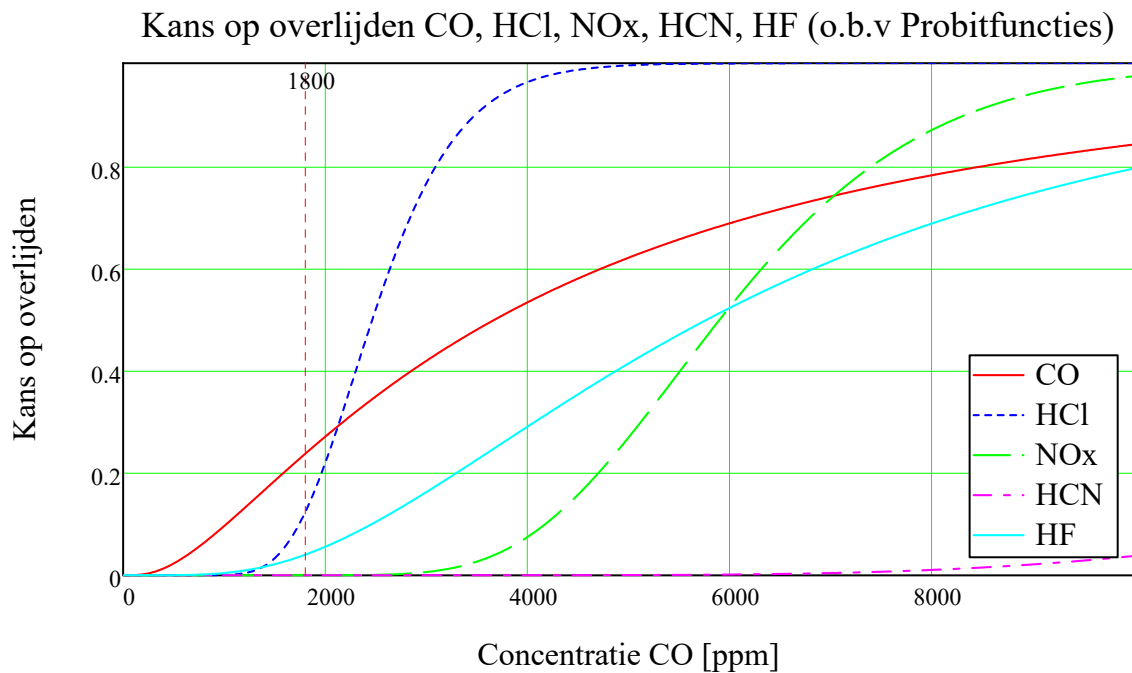
$$\text{CO} \quad P(\text{CO}, C_{\text{CO.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW_snel}}), 1\text{hr}) = 24 \cdot \%$$

$$\text{HCl} \quad P(\text{HCl}, C_{\text{HCl.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW_snel}}), 1\text{hr}) = 12 \cdot \%$$

De kans op overlijden door NO₂ of HCN is voor de bijbehorende concentraties niet significant.

De bovengrens van de kans op overlijden door HF (4%) is bij de gehanteerde uitgangspunten en aannames bij een blootstellingsduur van 60 min. lager dan die door CO (24%) en HCl (12%), maar is wel degelijk aanwezig.

Om bij diverse constante concentraties CO de kans van overlijden aan de verschillende stoffen in beeld te brengen bij een blootstellingsduur van 60 min. is aan de figuur met probitfuncties voor CO, HCl, NOx en HCN is de probitfunctie voor de bovengrens van HF toegevoegd.



Uit de figuur kan worden opgemaakt dat gegeven de gehanteerde uitgangspunten en aannames de probitfunctie voor HF nooit de bovenste lijn is.

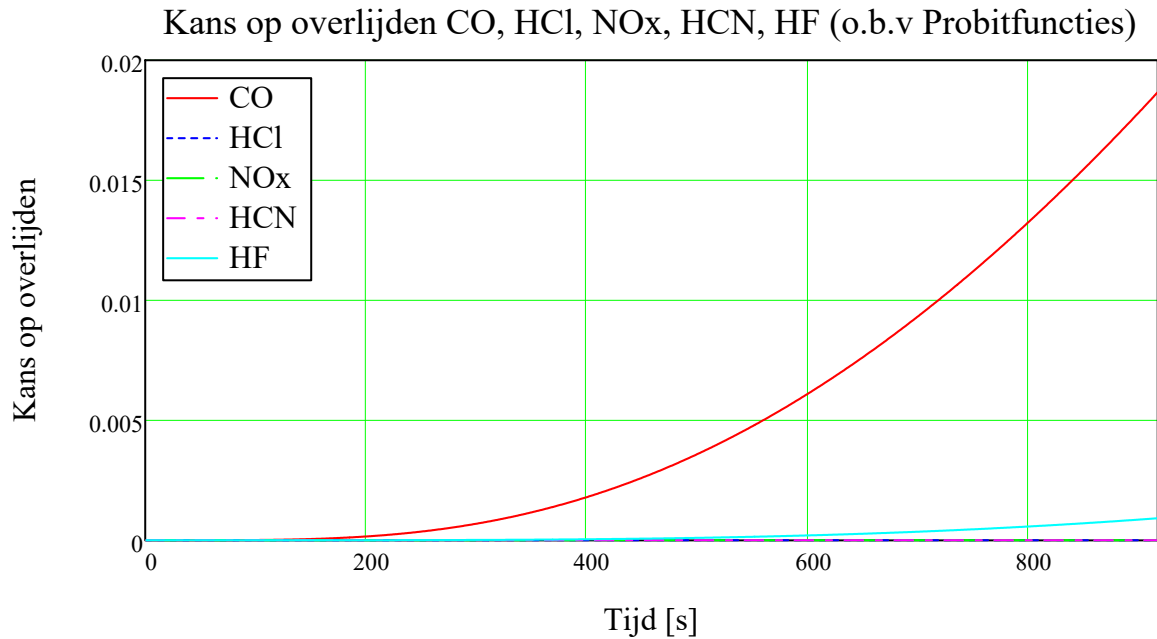
- De kans om te overlijden aan de gevolgen van CO ligt tot circa 14.000 ppm hoger dan voor HF.
- De kans om te overlijden aan de gevolgen van HCl ligt vanaf circa 1.400 ppm hoger dan voor HF.

Onduidelijk is hoe de kans op overlijden door de verschillende stoffen gecombineerd moet worden tot een totale kans op overlijden. De vraag is of een combinatie van meerdere toxische gassen leidt tot een grotere kans op letaliteit dan een enkele stof.

De hiervoor berekende overlijdenskansen horen bij een verblijftijd van 60 min. bij mensen die zijn gestopt met vluchten (FID = 1). Deze FID wordt bij een CO-concentratie van 1800 ppm bereikt na:

$$t_{\text{FID}_1} = 15 \text{ min}$$

In de periode tot dit moment zijn de probits (van de dan dus nog vluchtende mensen) getoond in onderstaande figuur.



De probits voor CO en HF op $t = t_{\text{FID}_1}$ zijn:

$$P(\text{CO}, C_{\text{CO.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW}_{\text{snel}}}), t_{\text{FID}_1} \text{ min}) = 2. \%$$

$$P(\text{HF}, \text{concentratie}_{\text{HF.zonder.ventilatie}_1}, t_{\text{FID}_1} \text{ min}) = 0.09. \%$$

De andere probits zijn meerdere ordes kleiner dus niet niet maatgevend.

De kans op overlijden door HF ten opzichte van CO is na een blootstellingsduur van $t = t_{\text{FID}_1}$ en een CO-concentratie van 1800 ppm gelijk aan:

$$\frac{P(\text{HF}, \text{concentratie}_{\text{HF.zonder.ventilatie}_1}, t_{\text{FID}_1} \text{ min})}{P(\text{CO}, C_{\text{CO.mg}_m3}(C_{\text{CO.ppm.25MW}_{\text{snel}}}), t_{\text{FID}_1} \text{ min})} = 4.9. \%$$

Deze verhouding is kleiner dan voor een blootstellingsduur van 60 min.