

TNO-rapport**TNO 2013 R10511****Consequenties voor QRA-tunnels van het
vervoer van nieuwe stoffen****Earth, Environmental and Life
Sciences**Princetonlaan 6
3584 CB Utrecht
Postbus 80015
3508 TA Utrechtwww.tno.nlT +31 88 866 42 56
F +31 88 866 44 75
infodesk@tno.nl

Datum	25 april 2013
Auteur(s)	Johan Reinders, Cristina Cos Domingo
Aantal pagina's	76 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur Afdeling Veiligheid Postbus 20000 3502 LA UTRECHT
Projectnummer	054.03212
Postscannummer	TNO-060-UT-2013-00283

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

Samenvatting

Maatschappelijk lijkt een trend waarneembaar dat in toenemende mate gebruik wordt gemaakt van nieuwe brandstoffen, zoals bijvoorbeeld waterstof en aardgas. Dit betekent dat ook het transport van deze brandstoffen door tunnels kan toenemen. Onderzocht moet worden in welke mate een toename van nieuwe brandstoffen kan worden verwacht en welke consequenties dit heeft voor de tunnelveiligheid, bijvoorbeeld in het kader van de wettelijke veiligheidsnorm (groepsrisico) en de rekenmethode die wordt gebruikt om de veiligheid aan deze norm te toetsen (QRA-tunnels). Op verzoek van Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur heeft TNO in 2012 een verkennende studie uitgevoerd om vast te stellen welke nieuwe stoffen in dit kader dienen te worden beschouwd en voor welke van deze door de huidige methodiek de veiligheidsconsequenties onvoldoende kunnen worden vastgesteld en de rekenmethode dient te worden aangepast [1].

Het hier beschreven onderzoek is het vervolg hierop, waarbij Rijkswaterstaat TNO heeft verzocht om een aantal van de in de verkennende studie gedane aanbevelingen nader uit te werken. Het betreft:

- bulktransport van tot vloeistof gekoeld brandbare gassen waterstof en aardgas (LH2 en LNG);
- in hoge druk gasflessen vervoerd waterstof en aardgas (CH2 en CNG);
- vervoer van waterstof gebonden aan metaalhydrides;
- gebruik van deze stoffen als brandstof in bussen vrachtauto's en personenauto's

Op verzoek van de opdrachtgever heeft TNO ook gekeken naar het vervoer van N₂ en CO₂, die traditioneel niet (als 'gevaarlijke stoffen') worden beschouwd in de huidige rekenmethodiek. Ook hier betreft het bulktransport van tot vloeistof gekoelde gassen almede vervoer in hogedruk gasflessen.

Uit de berekeningen blijkt dat de risico's van bulkvervoer van CNG, CH2, LNG en LH2 grote overeenkomsten vertonen met het bulkvervoer van GF (LPG). Aangezien de hoeveelheden die als gecompriëerd gas (CNG en CH2) worden vervoerd kleiner zijn dan de als vloeistof vervoerde gassen, zullen de gevolgen ook minder ernstig zijn. Niettemin zijn gaswolkexplosies, deflagraties en zelfs detonaties mogelijk op basis van de uitgangspunten als gedefinieerd in het achtergronddocument van QRA-tunnels [2] ten aanzien van de relatie tussen gaswolkafmetingen en explosiegedrag.

Dit betekent dat de in QRA-tunnels gehanteerde voorwaarde dat uitstroming meer moet zijn dan 100 kg mogelijk moet worden heroverwogen bij het vervoer van deze 'nieuwe' gecompriëerde gassen. Sowieso zullen de scenariofrequenties van de onder druk vervoerde gassen, met name faalkansen van flessen en aansluitingen nog nader moeten worden bepaald. Dit type vervoer komt immers niet voor in het huidige model.

Hoewel bij het toepassen van deze stoffen als voertuigbrandstof de hoeveelheden nog kleiner zijn, kunnen de gevolgen toch nog zeer ernstig zijn. Met name indien een hoeveelheid gas zich met de lucht in de tunnel kan mengen tot een explosief mengsel voordat ontsteking optreedt, zijn gaswolkexplosies en zelfs deflagraties mogelijk, weer op basis van de uitgangspunten als gedefinieerd in het

achtergronddocument van QRA-tunnels [2]. Bij waterstof, met een explosieve bereik van 4 – 75%, kan zo'n situatie zich relatief gemakkelijk voordoen. Over grote lengtes in de tunnel kunnen dan letale slachtoffers vallen.

Indien directe ontsteking optreedt van een ontsnappend gas, bijvoorbeeld na afbreken van een aansluiting of bij opening van een veiligheidsventiel, kan de hitte en mogelijk het verbrandingsgas van de fakkel slachtoffers veroorzaken. De effecten kunnen worden gemodelleerd met de bestaande methodieken.

Indien het gebruik van deze stoffen als brandstof in omvang zal toenemen kan dit de berekende risico's in tunnels significant vergroten. Het verdient dan ook aanbeveling om de aannames in de huidige methodiek ten aanzien wolkgroottes die tot deflagratie of detonatie leiden nog eens nader te onderzoeken en mogelijk te verfijnen. Uit een studie door Gexcon, bijvoorbeeld, bleek dat, door een andere berekeningswijze van de omvang van de explosieve wolk in tunnels, de gegenereerde drukken, in geval van waterstof, mogelijk een factor 100 lager zijn [21]. Aan (de beperking van de bijdrage tot) het risico door fakkels zal mogelijk ook nog aandacht moeten worden besteed.

Ook hier geldt dat scenariofrequenties en dus faalkansen van de brandstoftanks en de aansluitingen nog nader moeten worden vastgesteld.

Gekoeld bulktransport van stikstof en kooldioxide wordt bij de huidige risicoanalysemethodiek niet meegenomen, omdat N_2 en CO_2 niet als gevaarlijke stoffen worden beschouwd. Voor CO_2 echter zijn in de literatuur probit relaties afgeleid voor de toxiciteit. Op basis van deze relaties kunnen ongevallen met CO_2 in tunnels tot significante aantallen letale slachtoffers leiden. Het verdient dan ook aanbeveling nader te overwegen of deze stof zal moeten worden meegenomen bij risicoberekeningen in tunnels.

Een ander aspect van het vervoer van cryogene vloeistoffen is de invloed van de extreem lage temperatuur: dit kan leiden tot bevroeringsverschijnselen en mistvorming (dus beperkingen bij vluchten). Ook de vorming van de verstikkende atmosfeer kan, hoewel die niet toxisch is, mogelijk van invloed zijn op het vluchtgedrag van personen in de tunnel en mogelijk tot slachtoffers leiden. Nader onderzoek hieromtrent is wenselijk.

Vervoer van 50l gasflessen van CO_2 en N_2 alsmede vervoer van waterstof geadsorbeerd aan metaalhydride zullen de risico's in tunnels niet vergroten.

Inhoudsopgave

1	Inleiding	6
2	GF0P: Onder druk vervoerde brandbare gassen	8
2.1	Scenario 1: Instantaan falen - Externe brand - Gaswolkexplosie	9
2.2	Scenario 2: Instantaan falen – Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie	11
2.3	Scenario 3: Instantaan falen – Geen ontsteking	13
2.4	Scenario 4: Afbreken kop of aansluiting - Vertraagde ontsteking - gaswolkexplosie	13
2.5	Scenario 5: Afbreken kop of aansluiting - Directe ontsteking - Fakkeld.....	19
2.6	Scenario 6: Afbreken kop of aansluiting - Geen ontsteking - Gelanceerd projectiel.....	21
2.7	Conclusie GFOP	21
3	GF0L: Tot vloeistof gekoelde brandbare gassen	24
3.1	Scenario 1: Instantaan falen - externe brand - Warme BLEVE.....	25
3.2	Scenario 2: Instantaan falen – geen externe brand - koude BLEVE.....	25
3.3	Scenario 3: Instantaan falen - Vertraagde ontsteking – Gaswolkexplosie en plasbrand	26
3.4	Scenario 4: Instantaan falen - Geen ontsteking	27
3.5	Scenario 5: Continue uitstroming - Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie	27
3.6	Scenario 6: Continue uitstroming - Directe ontsteking – Fakkeld	32
3.7	Conclusie GFOL	34
4	GNRP: N₂ en CO₂ onder druk	37
4.1	Scenario 1: Instantaan falen- Externe brand – Fysische explosie	37
4.2	Scenario 2: Afbreken kop of aansluiting- Continue uitstroming - Projectiel	38
4.3	Conclusie GNRP	38
5	GNRL: CO₂ en N₂ tot vloeistof gekoeld	39
5.1	Scenario 1: Instantaan falen – Externe brand	40
5.2	Scenario 2: Instantaan falen - geen brand	40
5.3	Scenario 3: Continue uitstroming uit 2” gat	42
5.4	Conclusie GNRL	45
6	NR: CO₂ vast.....	47
7	NR: Waterstof geadsorbeerd aan metaalhydride	48
7.1	Scenario.....	48
7.2	Uitwerking	48
7.3	Conclusie	48
8	Gebruik van GF0P als brandstof.....	49
8.1	Scenario 1: Instantaan falen - Externe brand - Gaswolkexplosie	50
8.2	Scenario 2: Instantaan falen – Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie	52
8.3	Scenario 3: Instantaan falen – Geen ontsteking	55
8.4	Scenario 4: Afbreken aansluiting - Vertraagde ontsteking- Gaswolkexplosie.....	55
8.5	Scenario 5: Afbreken aansluiting – Directe ontsteking - Fakkeld.....	57
8.6	Scenario 6: Afbreken aansluiting – Geen ontsteking	58
8.7	Scenario 7: (Externe) brand - Continue uitstroom door openen van het veiligheidsventiel - Fakkeld.....	58

8.8	Conclusie GFOP	62
9	Gebruik van GFOL als brandstof	65
9.1	Scenario 1: Instantaan falen – Externe brand - Warme BLEVE	66
9.2	Scenario 2: Instantaan falen - Vertraagde ontsteking – Gaswolkexplosie en plasbrand	66
9.3	Scenario 3: Continue uitstroming uit opening van 17 mm - Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie	67
9.4	Scenario 4: Continue uitstroming - Directe ontsteking – Fakkeltje	68
9.5	Conclusie GFOL	69
10	Conclusies en aanbevelingen	71
10.1	Algemeen	71
10.2	Bulkvervoer (gasflessen) van GFOP (CNG en CH ₂)	72
10.3	Bulktransport GFOL	72
10.4	Gasflessentransport GNRP (CO ₂ en N ₂)	73
10.5	Bulktransporten GNRL N ₂ en CO ₂	73
10.6	NR: transport van vast CO ₂ en waterstof geadsorbeerd aan metaalhydride	74
10.7	Gebruik van GFOP (CNG en CH ₂) als brandstof	74
10.8	GFOL (LNG) als brandstof	74
11	Referenties	75
12	Ondertekening	76

1 Inleiding

Maatschappelijk lijkt een trend waarneembaar dat in toenemende mate gebruik wordt gemaakt van nieuwe brandstoffen, zoals bijvoorbeeld waterstof. Dit betekent dat ook het transport van deze brandstoffen door tunnels kan toenemen.

Onderzocht moet worden in welke mate een toename van nieuwe brandstoffen kan worden verwacht en welke consequenties dit heeft voor de tunnelveiligheid, bijvoorbeeld in het kader van de wettelijke veiligheidsnorm (groepsrisico) en de rekenmethode die wordt gebruikt om de veiligheid aan deze norm te toetsen (QRA-tunnels). Een belangrijk aspect hierbij is dat, behalve dat het 'nieuwe' stoffen betreft, de wijze vervoer significant anders is dan tot nu toe beschouwd bij risicoberekeningen voor gevaarlijke stoffen. In de bestaande berekeningen betreft het steeds vervoer van stoffen in *vloeibare toestand*. Het betreft hier vloeistoffen die onder omgevingstemperatuur en –druk vloeibaar zijn (de categorieën LF en LT) en onder druk bij omgevingstemperatuur tot vloeistof verdichte gassen (GF en GT). De 'nieuwe' stoffen, zoals waterstof en aardgas, worden in *gasvormige toestand* onder verhoogde druk, of zeer sterk *gekoeld als vloeistoffen* vervoerd. Dit brengt mogelijk nieuwe gevaarsaspecten met zich mee.

Op verzoek van Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur heeft TNO in 2012 een verkennende studie uitgevoerd om vast te stellen welke nieuwe stoffen in dit kader dienen te worden beschouwd en voor welke van deze door de huidige methodiek de veiligheidsconsequenties onvoldoende kunnen worden vastgesteld en de rekenmethode dient te worden aangepast [1].

Op verzoek van de opdrachtgever heeft TNO hierbij ook gekeken naar het vervoer van N₂ en CO₂, die traditioneel niet (als 'gevaarlijke stoffen') worden beschouwd in de huidige rekenmethodiek.

Het onderhavige onderzoek is het vervolg hierop, waarbij Rijkswaterstaat TNO heeft verzocht om een aantal van de in de verkennende studie gedane aanbevelingen nader uit te werken. Dit is aangegeven in Tabel 1.

Tabel 1 Stoffen waarvoor gevolgen voor QRA-tunnels onderzocht zijn en te onderzoeken aspecten.

Nieuwe stof	Geadviseerde categorie	Geadviseerde modelstof	Te onderzoeken aspecten voor opname nieuwe stof in QRA-tunnels
waterstof, gas onder druk	GF0P	H ₂ of CH ₄	Onderzoek naar de risico's die ontstaan door rondvliegende en gelanceerde gasflesdelen en zo nodig voorstel voor effectafstanden t.b.v. QRA-Tunnels.
CNG en bio CNG	GF0P	H ₂ of CH ₄	Onderzoek naar representatieve modelstof voor H ₂ of CH ₄ . Ontwikkeling van model voor brandeffecten en bepaling schadegebieden ten gevolge van instantane ontsteking. Bepaling van de lengte van een fakkel en effectafstand voor deze categorie.
waterstof, tot vloeistof gekoeld	GF0L	H ₂ of CH ₄	Onderzoek naar een methode en voor de flash-off, plasvorming en plasverdamping en de invloed hiervan op de effectafstanden voor QRA-Tunnels. Onderzoek naar de gevolgen van mistvorming (zichtbeperking) en eventueel aangepaste effectafstanden voor QRA-Tunnels. Bepaling of één modelstof kan worden gebruikt voor vloeibaar waterstof en LNG of dat zowel H ₂ als CH ₄ gebruikt moeten worden voor de effectafstanden in QRA-Tunnels.
LNG	GF0L	H ₂ of CH ₄	
waterstof, geabsorbeerd aan metaalhydride	NR	H ₂	Bepaling bij welke voertuigbrand geabsorbeerd waterstof vrijkomt en hoe dit de brand en mogelijke effectafstanden beïnvloedt.
Gebruik van GF0P en GF0L als brandstof in	n.v.t.	n.v.t.	<i>Bij toepassing van sterk gecomprimeerde gassen:</i> Ontwikkeling model voor de vaststelling van de gevolgen van de hittestraling na instantane ontsteking. De gevolgen van gaswolkontbrandingen moeten ook worden

Nieuwe stof	Geadviseerde categorie	Geadviseerde modelstof	Te onderzoeken aspecten voor opname nieuwe stof in QRA-tunnels
personenauto's			beschouwd maar hiervoor is de bestaande methode bruikbaar. Berekening effectafstanden voor personenauto's. Bepaling effectafstand van een fakkel t.b.v. QRA-tunnels. Methode bepaling risico's die ontstaan door rondvliegende en gelanceerde gasflesdelen. <i>Bij toepassing van tot vloeistof gekoelde gassen bij atmosferische druk:</i> Onderzoek naar methodes voor de flash-off, plasvorming en de gevolgen van mistvorming zal worden gekeken en effectafstanden worden bepaald. Bepaling verdeling aantallen personenauto's, bussen en vrachtauto's naar rato over de verschillende categorieën.
CO ₂ , onder druk	GNRP	CO ₂	Onderzoek naar de risico's die ontstaan door rondvliegende en gelanceerde gasflesdelen en zo nodig voorstel voor effectafstanden t.b.v. QRA-Tunnels.
CO ₂ , tot vloeistof gekoeld	GNRL	CO ₂ of N ₂	Onderzoek naar een methode voor de flash-off, plasvorming en sublimatie. Aanpassing van de effectafstanden voor QRA-tunnels. Onderzoek naar verdringing van lucht (zuurstof) in de berekening van de lengte van de "toxische wolk". Onderzoek naar de gevolgen van mistvorming (zichtbeperking) en eventueel aangepaste effectafstanden voor QRA-Tunnels. Onderzoek of één modelstof (CO ₂) kan worden gebruikt voor CO ₂ en N ₂ of dat effectafstanden voor beide stoffen in QRA-Tunnels moeten worden opgenomen.
N ₂ , tot vloeistof gekoeld	GNRL	N ₂ of CO ₂	Onderzoek naar methode voor flash-off, plasvorming en plasverdamping van tot vloeistof gekoelde gassen en de invloed hiervan op de effectafstanden t.b.v. QRA-Tunnels. Onderzoek naar verdringing van lucht (zuurstof) in de berekening van de lengte van de effectafstand van de "toxische wolk" en eventueel aangepaste effectafstanden voor QRA-Tunnels. Onderzoek naar de gevolgen van mistvorming (zichtbeperking) en eventueel aangepaste effectafstanden voor QRA-Tunnels. Onderzoek of één modelstof (CO ₂) kan worden gebruikt voor CO ₂ en N ₂ of dat effectafstanden voor beide stoffen in QRA-Tunnels moeten worden opgenomen.
CO ₂ , vast	SNR	CO ₂	Onderzoek naar model voor het 'verdampend' oppervlak vanuit de vaste stof brokken moet een model worden gemaakt en effectafstanden voor QRA-tunnels worden bepaald. Onderzoek naar verdringing van lucht (zuurstof) in de berekening van de effectlengte van de "toxische wolk".

In deze vervolgoopdracht zijn de volgende werkzaamheden verricht:

- In de hoofdstukken 2 - 9 zijn, met de software EFFECTS versie 9.0, de gevolgen van de in Tabel 1 genoemde onderzoeksaspecten berekend. Er zijn hierbij alleen slachtoffers berekend die een gevolg zijn van de (gevaars)eigenschappen van de vervoerde stoffen. Slachtoffers als gevolg van de impact van het voertuig met wand of met ander voertuigen in de tunnel worden hier niet beschouwd, aangezien dit aspect niet zal afwijken van [2].
- De relevante gebeurtenissenbomen zijn weergegeven, alsmede de (vervolg)kansen van de scenario's. Hierbij is in eerste instantie uitgegaan van de aannames zoals die zijn gedaan in QRA-tunnels. Dit betreft bijvoorbeeld aannames t.a.v. significante hoeveelheden die vrijkomen (>100 kg) bij transport, relevante en niet relevante uitstromingen, verspreiding van gassen in tunnels, kansen op ongevallen en brand etc. Deze uitgangspunten staan niet ter discussie, maar indien ze niet als passend werden beschouwd is er van afgeweken.

2 GF0P: Onder druk vervoerde brandbare gassen

Dit betreft de onder hoge druk vervoerde gassen H_2 (CH_2 of CGH), (bio-)CNG en biogas. Door de hoge toegepaste drukken worden deze stoffen in flessen vervoerd. Voor CNG en H_2 is hierbij uitgegaan van dezelfde typen flessen. De uitgangspunten die zijn gebruikt bij de berekening van de effecten zijn weergegeven in Tabel 2.

Tabel 2 Vervoergegevens gebruikt bij de berekening van de effecten voor onder druk vervoerde brandbare gassen.

parameter	(bio)CNG, biogas	CH ₂	Ref.
Gemodelleerde stof	methaan	waterstof	
inhoud tank /fles	1100 liter		[3]
lengte fles	9 m		
doorsnede fles	0.4 m		
doorsnede grootste aansluiting / (vul)opening	10 mm		
doorsnede afblaasopening (veeriligheid o.i.d.)	geen veeriligheid aanwezig		
werkdruk (typisch)	200 bar		
werkdruk (max)	250 bar		[4]
barstdruk	400 bar [†]		
temperatuur	Omgeving (12 °C)		
wanddikte fles	1.6 - 2.5 cm		[5]
Gewicht lege fles	1200 kg		

De scenario's in de vorm van gebeurtenissenboom zijn weergegeven in Figuur 1. Conform [2] is een letselongeval als startpunt genomen en wordt er vanuit gegaan dat pechgevallen of ongevallen met uitsluitend materiële schade (UMS) hierbij niet tot het vrijkomen van gevaarlijke stoffen leiden. De verschillende takken van de gebeurtenissenboom worden hieronder besproken.

Scenario's / gebeurtenissenboom

ongeval met letsel (F_{letse})	ext brand (Pb)	volledig falen (Pvb)	1. gaswolkexplosie (hitte en druk) en scherven		
		niet falen (1-Pvb)			geen
	geen ext brand (1-Pb)	volledig falen (Pvn)	gaswolk	vertraagde ontsteking (1)	2. gaswolkexplosie (hitte en druk) en scherven
				geen ontsteking (0)	3. geen
		afbreken kop / aansluiting continue uitstroming (Pc)	gaswolk	vertraagde ontsteking (0.2)	4. gaswolkexplosie (hitte en druk); projectiel
				directe ontsteking (0.8)	5. fakkel (hitte)
				geen ontsteking (0)	6. gelanceerd projectiel
		niet falen (1-Pc-Pvn)			geen

Figuur 1 Gebeurtenissenboom voor onder druk vervoerde brandbare gassen; tussen haakjes zijn de (vervolg)kansen aangegeven.

[†] Met EFFECTS berekende druk op basis van in bijbehorende referentie gegeven faaltemperatuur van 350 °C.

2.1 Scenario 1: Instantaan falen - Externe brand - Gaswolkexplosie

Indien er een externe brand is, is het fenomeen vergelijkbaar met de beginfase die leidt tot een warme BLEVE van een LPG tankauto. Indien de fles volledig faalt zal er een gaswolkexplosie optreden met druk- en hitteopbouw. Ook kunnen de scherven van de geëxplodeerde fles schade en letsel veroorzaken.

2.1.1 Kansen

Zoals gezegd wordt een letselongeval als uitgangspunt genomen. De vervolgcans zoals deze in het achtergronddocument [2] worden gebruikt (uitstroming van meer dan 100 kg en relevante uitstroming) zijn afgeleid voor een druktankwagen. Deze kunnen niet zondermeer worden toegepast op gasflessen. Voor de vaststelling van de vervolgcansen op externe brand (P_b) en volledig falen van de fles hierin (P_{vb}) is een aanvullende studie noodzakelijk. Aangezien er geen drukaflaat op de flessen zit, zal de kans op volledig falen relatief groot zijn. Dit betekent:

- Kans op ongeval met letsel = F_{letsel}
- vervolgcans op brand = P_b
- vervolgcans op volledig falen in externe brand (warme BLEVE) = P_{vb}

2.1.2 Waterstof

Bij 200 bar bevat een 1100 liter fles 16.7 kg waterstof². Berekeningen met EFFECTS tonen aan dat deze hoeveelheid gas bij instantane ontsteking een **vuurbal met een straal van 5 m** zal geven. Gezien de korte duur van de vuurbal is dit ook de letale schadeafstand voor brandwonden als gevolg van hittestraling. De gegenereerde warmte zal in aanvulling hierop tot een temperatuurverhoging in de tunnel leiden. Het is, zonder geavanceerde berekeningen, moeilijk te voorspellen hoe deze warmte zal worden gedissipeerd, maar het valt te verwachten dat over enkele tientallen meters de temperatuur aanzienlijk zal stijgen waardoor mogelijk slachtoffers vallen. Volgens EFFECTS zal de aanvankelijk zeer hoge druk (400 bar) snel afnemen en al binnen ca. 20 m met een factor 1000 zijn afgenomen tot ca. 0,4 bar. Tot deze druk kunnen autoruiten naar binnen worden gedrukt [9] met slachtoffers als gevolg. In [9] zijn ook criteria gegeven voor schade aan de tunnel. De druk- en impuls asymptoten voor het bezwijken van een afgezonken tunnel en een overkapping zijn gegeven in [9].

Tabel 3 Druk en impuls asymptoot waarden voor bezwijken [9]

Tunnel type	Druk asymptoot [kPa]	Impuls asymptoot [kPa.s]
Afgezonken tunnel	300	60
Overkapping	350	25

De maximale druk (400 bar = 40 000 kPa) is weliswaar veel hoger dan de drukasymptoot gegeven in Tabel 3, maar de impuls is volgens EFFECTS maximaal 8 kPa.s. Deze is veel kleiner dan waarden in Tabel 3, die nodig zijn voor instorten. Hoewel op korte afstand van het ongeval zeker schade aan de tunnel zal worden aangericht zal de tunnel niet bezwijken. Op basis van (beperkte) ervaring is het faalmechanisme volgens [3] openscheuren van de fles. Door de druk (400 bar, faaldruk bij brand) kan de opengescheurde fles

² Op basis van de kleine hoeveelheid (<100kg) zou dit vervoer al afvallen bij de 'reguliere' risicoanalyses! In dit document zal er echter vanuit worden gegaan dat deze uitstroming wel relevant is.

met zo'n 70 m/s (250 km/h) worden gelanceerd. In de besloten omgeving van de tunnel zal het dan hooguit 1 s duren alvorens het object in aanraking komt met plafond, wegdek tunnelwand of andere auto's. Het lijkt reëel om te veronderstellen dat 1 auto door de fles wordt geraakt, waarbij dan de inzittenden om het leven komen.

Aangezien dit scenario optreedt als gevolg van een externe brand, moet ook met de gevolgen hiervan rekening worden gehouden. In het achtergronddocument [2] wordt hierbij uitgegaan van een letselbrand van 200 MW. Deze kan ook hier als uitgangspunt worden gehanteerd.

Samenvattend H₂:

Schadeafstand voor letaal letsel: door hittestraling: 5 m; door sterk verhoogde temperatuur: enkele tientallen meters; door ingedrukte autoruiten: 20 m.

Enige constructieve schade door overdrukken.

Schadeafstand door lancering gasfles: letaal letsel voor inzittenden van 1 personenauto.

Verder gevolgen a.g.v. een letselbrand van 200 MW.

2.1.3 CNG (methaan)

Bij 200 bar bevat een 1100 liter fles 251 kg methaan. Bij instantane ontsteking ontstaat hierdoor een **vuurbal met een straal van 10.3 m**. Gezien de korte duur van de vuurbal is dit ook de letale schadeafstand voor brandwonden als gevolg van hittestraling. Ook hier geldt dat de gegenereerde warmte in aanvulling hierop tot een temperatuurverhoging in de tunnel zal leiden, waarvan de hoogte, zonder geavanceerde berekeningen, moeilijk te voorspellen is, maar waarvan valt te verwachten dat deze over enkele tientallen meters letaal zal zijn. Ook hier zal de aanvankelijk zeer hoge druk (400 bar) snel afnemen en al binnen ca. 20 m met een factor 1000 zijn afgenomen tot ca. 0,4 bar zijn gezakt. Tot deze druk kunnen autoruiten naar binnen worden gedrukt [9] met slachtoffers als gevolg. Net als voor waterstof geldt ook hier dat de maximale druk (400 bar = 40 000 kPa) weliswaar veel hoger is dan de drukasympotoot gegeven in Tabel 3, maar dat de impuls (volgens EFFECTS maximaal 9 kPa.s) veel is kleiner dan de waardes in Tabel 3, die nodig zijn voor instorten. De tunnel zal op korte afstand van het ongeval zeker beschadigd worden, maar hij zal niet bezwijken.

De opengescheurde fles CNG zal met zo'n 500 km/h worden gelanceerd. Als hierbij een auto wordt geraakt is het niet onwaarschijnlijk dat de inzittenden om het leven komen.

Aangezien dit scenario optreedt als gevolg van een externe brand, moet ook met de gevolgen hiervan rekening worden gehouden. In het achtergronddocument [2] wordt hierbij uitgegaan van een letselbrand van 200 MW. Deze kan ook hier als uitgangspunt worden gehanteerd.

Samenvattend CNG:

Schadeafstand voor letaal letsel door hittestraling: 10.3 m; door sterk verhoogde temperatuur: enkele tientallen meters; door ingedrukte autoruiten: 20 m.

Enige constructieve schade door overdrukken.

Schadeafstand door lancering gasfles: letaal letsel voor inzittenden van 1 personenauto.

Verder gevolgen a.g.v. een letselbrand van 200 MW.

2.1.4 Scenario 1 en het achtergronddocument

Als we het indrukken van autoruiten als maatstaf nemen geldt voor zowel CNG als CH₂ een afstand van 20 m. Omdat het enige tijd (geschat op minimaal een aantal minuten, maar dit zal moeten worden bekeken) zal duren alvorens de gasflessen zullen falen, hebben aanwezigen in de gevarezone van de tunnel de gelegenheid te vluchten. De gevolgen zullen dan ook worden bepaald door de brand die uiteindelijk de cilinder(s) zal doen falen, gegeven door de waardes voor een 200 MW brand in Tabel 7-3 en § 7.4 in het achtergronddocument [2], mogelijk aangevuld met de hitte gegenereerd door de

2.2 Scenario 2: Instantaan falen – Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie³

Indien er geen externe brand is zal bij instantaan vrijkomen uit de fles de aanwezige lucht instantaan worden verdrongen door 100% gas. Instantane ontsteking (door bijvoorbeeld de impact) is dan niet mogelijk, doordat alle zuurstof is verdrongen. Er zal eerst enige opmenging met de omgevingslucht plaats moeten vinden alvorens ontsteking mogelijk is. Derhalve kan alleen van vertraagde ontsteking worden gesproken.

2.2.1 Vervolgkans

Dit scenario is wel te vergelijken met een koude BLEVE. Dit betekent voor de vervolgkans (zie § 3.9 en fig. 4-1 in [2]):

- vervolgkans op geen externe brand = $(1 - P_b)$
- vervolgkans op volledig falen = P_{vn}

De gasflessen zijn gemaakt voor zeer hoge druk. De kans op instantaan falen is zeer klein. Zeer waarschijnlijk zal de “kop” of een aansluiting afbreken, waardoor de kans op dit scenario waarschijnlijk zeer klein zal zijn. Dit zal nader moeten worden onderzocht.

2.2.2 Waterstof

De 16.7 kg H₂ zal bij expansie naar omgevingsdruk een volume hebben van 196 m³. Deze gaswolk zal met de lichtsnelheid in de tunnel worden meegenomen (2 m/s gedurende de eerste 2 minuten na het ongeval, zie [2]) en worden verdund / opgemengd met lucht. Voor de twee in [2] gebruikte tunneldoorsnedes leidt dit tot de resultaten als gegeven in Tabel 4.

Tabel 4 Resultaten voor waterstof van scenario 2 op basis van gebruikte tunnelafmetingen in [2].

Tunnelhoogte (m)	5	
Tunnelbreedte (m)	9	13.5
Tunneldoorsnede (m ²)	45	67.5
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's (m ²)	34	51
Lengte H ₂ gaswolk meteen na vrijkomen (conc. = 100%) (m)	5.8	3.9
Min. lengte explosieve wolk (conc. = 75% UEL) (m)	7.8	5.2
Max lengte explosieve wolk (conc. = 4% LEL) (m)	135	97

³ In de buitenlucht zal vaak sprake zijn van een (gas)wolkbrand, omdat de gaswolk niet is opgesloten en drukeffecten niet of zo goed als niet zullen optreden. In een tunnel echter is altijd sprake van opsluiting. Vandaar dat in dit document de term gaswolkexplosie wordt gebruikt.

Uit Tabel 4 blijkt dat over een grote lengte in de tunnel een explosieve wolk kan ontstaan. In [2] wordt er vanuit gegaan dat een deflagratie zal ontstaan indien een explosieve wolk van meer dan 50 m ontstoken wordt en zelfs een detonatie bij een wolk lengte groter dan 100 m. Deze waardes zijn bepaald voor propaan [10]]. In [10] wordt ook aangegeven dat stoffen met een duidelijk hogere reactiviteit, waarbij met name waterstof wordt genoemd, grotere effecten geven. Ofwel, al voor kleiner wolk lengtes zullen deflagratie en detonatie optreden.

Bij instantaan falen zal het waterstof zich zeer snel mengen met de omgevingslucht en het valt te verwachten dat een groot gedeelte van de tunnel zich al snel in het brede explosieve gebied (4-75%) zal bevinden, waarbij de kritische lengte voor een deflagratie (<50 m), zeker bij de 9 m brede tunnel, al snel zal zijn bereikt. Vlak na het vrijkomen zal de gaswolk zich half beneden en half bovenstrooms van het verkeer in de tunnel bevinden. Bij een file benedenstrooms zal deze wolk met luchtstroom over de file worden geblazen en zeker worden ontstoken. Bij alleen een file bovenstrooms zal een (halve) wolk zich gedurende enige tijd boven/tussen de auto's bevinden. Bij 2 m/s luchtsnelheid heeft een 25 m lange wolk na 12.5 sec het gebied met auto's verlaten. In die tijd bestaat er ca. 50% kans op ontsteking in geval van 2 rijstroken. In geval van 3 rijstroken is die kans 70% (berekend met bijlage D in [2]). Mocht de wolk snel zijn maximale lengte bereiken (135 m voor de 9 m brede tunnel en 97 m voor de 13.5 m brede tunnel) dan zijn de ontstekingskansen > 99% voor beide tunnelbreedtes. Het lijkt dan ook niet onredelijk om de kans op ontsteking voor al deze scenario's op 1 te stellen. Er vanuit gaande dat de kritische wolk lengtes kleiner zijn dan voor propaan zal instantaan falen in beide tunnels tot detonatie leiden met als gevolg 100% sterfte in beide tunnelbuizen alsmede in een gebied tot 150 m buiten de buizen. Schade als gevolg van scherven is nu niet meer relevant en zal niet worden berekend.

Samenvattend H2:

Op basis van de aannames in het achtergronddocument [2], waarbij een lengte van de explosieve wolk van minder dan 50 resp. 100 m tot deflagratie respectievelijk detonatie leidt, zal instantaan falen in beide tunnels tot een detonatie leiden, waardoor ook in de andere tunnelbuis 100% sterfte zal optreden alsmede in een gebied tot 150 m buiten de buizen (zie §8.5.2. in [2]). Gezien de ernst van de op deze wijze voorspelde effecten van relatief geringe hoeveelheden gevaarlijke stof verdient het zeker aanbeveling om deze (conservatieve?) aannames nog eens onder de loep te nemen en een meer gedetailleerde studie uit te voeren naar het (explosie)gedrag van dit gas-lucht mengsel in tunnels.

2.2.3 CNG / Methaan

De 251 kg CH₄ zal bij expansie naar omgevingsdruk een volume hebben van 365 m³ die met de luchtsnelheid in de tunnel worden meegenomen en worden verdund / opgemengd met lucht. Voor de beide tunneldoorsnedes leidt dit tot de resultaten als gegeven in Tabel 5.

Tabel 5 Resultaten voor CNG van scenario 2 op basis van gebruikte tunnelafmetingen in [2].

Tunnelhoogte (m)	5	
Tunnelbreedte (m)	9	13.5
Tunneldoorsnede (m ²)	45	67.5
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's (m ²)	34	51
Lengte methaan gaswolk meteen na vrijkomen (conc. = 100%) (m)	10.7	7.2
Min. lengte explosieve wolk (conc. = 17% UEL) (m)	63	42
Max lengte explosieve wolk (conc. = 4.4% LEL) (m)	244	163

Ook nu blijkt dat over een grote lengte in de tunnel een explosieve wolk kan ontstaan. Door de lagere UEL zal het wel wat langer duren dan bij waterstof totdat de methaanconcentratie tot het explosieve gebied (4.4 -17%) gedaald is. Toch valt te verwachten dat dit, gezien de kracht waarmee instantaan falen optreedt nog zeer snel het geval zal zijn. In [10] wordt aangegeven dat de reactiviteit van methaan lager is dan van propaan, hetgeen dus inhoudt dat de kritische lengtes voor deflagratie en detonatie groter zullen zijn dan respectievelijk 50 en 100 m. De maximale lengtes van de explosieven wolken zijn echter aanzienlijk groter dan 100 m (Tabel 5). Hierdoor kan instantaan falen voor beide tunnelbreedtes tot een detonatie leiden, waardoor ook in de andere tunnelbuis 100% sterfte zal optreden alsmede in een gebied tot 150 m buiten de buizen. Schade als gevolg van scherven is nu niet meer relevant en zal niet worden berekend. Scenario 3 heeft nu een kans van 0.

Samenvattend CNG:

Ook hier geldt dat, op basis van de (conservatieve) aannames in het achtergronddocument [2], instantaan falen voor beide tunnelbreedtes tot een detonatie zal leiden, waardoor ook in de andere tunnelbuis 100% sterfte zal optreden alsmede in een gebied tot 150 m buiten de buizen (zie §8.5.2. in [2]). En ook hier verdient het aanbeveling om deze (conservatieve?) aannames nog eens onder de loop te nemen en een meer gedetailleerde studie uit te voeren naar het (explosie)gedrag van het gas-lucht mengsel in tunnels.

2.2.4 Scenario 2 en het achtergronddocument

Als we de uitkomsten van dit scenario vergelijken met de verschillende scenario's in het achtergronddocument [2] dan komt het sterk overeen met het scenario van een grote continue uitstroming van brandbare gassen met vertraagde ontsteking (§8.5.2. in [2]). En de gevolgen van dit scenario kunnen hier dan ook worden gehanteerd. Zoals gezegd, echter, verdient het aanbeveling om de (conservatieve?) aannames ten aanzien van het ontstaan van een deflagratie of detonatie nog eens onder de loop te nemen, gezien de ernstige effecten die op basis van deze aannames worden voorspeld voor deze relatief geringe (zeker bij waterstof) hoeveelheden gevaarlijke stoffen. Verder is de kans op dit scenario waarschijnlijk zeer klein. Instantaan falen door impact van dergelijke voor hoge drukken gemaakte flessen lijkt zeer onwaarschijnlijk. Dit zal echter ook nader moeten worden onderzocht.

2.3 Scenario 3: Instantaan falen –Geen ontsteking

Scenario 3 heeft nu een kans van 0. Bovendien zou dit geen schadelijke effecten opleveren, zoals aangegeven in de beschrijving van Scenario 1.

2.4 Scenario 4: Afbreken kop of aansluiting - Vertraagde ontsteking - gaswolkexplosie

Het ontstaan van een gat in een dergelijke gasfles doordat een extern voorwerp er doorheen prikt is zeer onwaarschijnlijk. Het meest waarschijnlijke bij impact is het afbreken van de kop / aansluiting waardoor er gas naar buiten spuit en een fles kan worden gelanceerd. Deze aansluiting heeft volgens [3] een diameter van 10 mm (Tabel 2). Hiermee zal dan ook worden gerekend voor de effecten.

2.4.1 Vervolgkansen

- Vervolgkansen op afbreken van kop / aansluiting = P_c . De waarde kan niet uit het achtergronddocument [2] worden afgeleid. Dit zal nader moeten worden uitgezocht.
- De kans op een vertraagde ontsteking wordt in het achtergronddocument [2] op 0.2 gesteld (zie Tabel 3-10, in [2]). Deze waarde kan ook hier worden gehanteerd.

2.4.2 Waterstof

In Tabel 6 zijn de resultaten samengevat voor beide tunnelbreedtes.

Tabel 6 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van H_2 uit een gat van 10 mm diameter.

Tunnelhoogte	5 m	
Diameter gat	10 mm	
Initiële uitstroomsnelheid	1.0 kg/s (=12.3 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	107 s	
Max. uitstroomafstand (turbulente vrijstraal)	21 m	
Tunnelbreedte	9 m	13.5 m
Tunneldoorsnede	45 m ²	67.5 m ²
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's	34 m ²	51 m ²
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Percentage H_2 in lucht op t=0	15.3 %	10.8 %
Tijd tot concentratie onder LEL (4%) zakt	24 s	16 s
Maximale lengte explosieve wolk	52 m	35 m
Tijdstip waarop lengte explosieve wolk 50 m wordt bereikt	22 s	-

Uitgaande van een maximale werkdruk van 250 bar zal de uitstroomsnelheid bij aanvang ca. 1 kg/s bedragen. Door de afnemende druk in de fles zal de uitstroomsnelheid geleidelijk afnemen tot 0 na 107 s als de fles leeg is. Na expansie tot atmosferische omstandigheden, komt 1 kg/s overeen met 12.3 m³/s. Deze flux aan H_2 mengt op met de luchtstroom in de tunnel. Bij 2 m/s komt dit, voor bijvoorbeeld de 9 m brede tunnel (met 2 rijstroken en effectieve doorsnede van 34 m², zie Tabel 2) overeen met 68 m³/s. Dit resulteert in 15.3% H_2 in de gemengde luchtstroom. Dit is in de explosieve zone. In Figuur 2 is het percentage waterstof in de luchtstroom aangeven als functie van de tijd voor de twee tunnelbreedtes. Na 24 s zakt de waterstofconcentratie tot beneden de LEL waarde van 4% in de 9 m brede tunnel. De lengte van de explosieve wolk is dan 52 m. Indien de uitstroomrichting naar achteren is (stroomopwaarts) zal de wolk zich aanvankelijk uitstrekken tot 21 m bovenstrooms (de reikwijdte van de 'gasjet' = max. uitstroomafstand (turbulente vrijstraal) in Tabel 6). Door de afnemende druk en de luchtverplaatsing zal het bovenstroomse deel snel in lengte afnemen, waarna zich alleen nog benedenstrooms van het ongeval een gaswolk bevindt. Indien de uitstroomrichting naar voren is, zal zich alleen benedenstrooms brandbaar gas bevinden.

Na 22 s bereikt de explosieve wolk in de 9 m brede tunnel een lengte van 50 m. Dit betekent dat, indien ontsteking plaatsvindt binnen 22 s er geen deflagratie zal optreden maar alleen een gaswolkexplosie. Het 100% letaliteitsgebied heeft hierbij een lengte van ca. 3 x de gaswolk lengte, door uitzetting van de wolk als gevolg van de gegenereerde hitte (zie blz. 157 in [2]). Bij ontsteking na 22 s, als de gaswolk een lengte heeft van meer dan 10 tunnelhoogtes, ofwel 50 m (zie blz. 147 in [2]), kan deflagratie optreden met 100% letaliteit binnen de gehele tunnelbuis. De kans

op ontsteking van een 50 m lange wolk binnen 22 s bij aanwezigheid van 20 auto's in de file is 95%. (blz. 148 en Bijlage D in [2]). In werkelijkheid zal de kans kleiner zijn omdat de wolk zich gedurende deze 22 sec nog aan het vormen is en het aantal auto's dat zich in de gaswolk bevindt afhangt van de richting van de 'gasjet' en aanwezigheid van een file benedenstrooms. Omdat bij waterstof de kritische lengte voor deflagratie kleiner zal zijn dan 50 m zal ook hierdoor de kans op ontsteking voordat deflagratie optreedt (dus de kans op een gaswolkexplosie) kleiner zijn. Mogelijk kan hierdoor ook in de 13.5 m brede tunnel een deflagratie ontstaan. Zonder geavanceerde berekening is de exacte kans niet te bepalen maar 50% lijkt een redelijke schatting. Ook de maximale lengte van het 100% letaliteitsgebied zal kleiner zijn dan 150 m door de kortere kritische lengte voor deflagratie. Doordat ontsteking kan plaatsvinden nog voordat de kritische lengte is bereikt kan de werkelijke lengte variëren van 0 m tot dit maximum. Het lijkt redelijk om als uitgangspunt 100 m te nemen voor de lengte van het 100% letaliteitsgebied. Overigens zouden ook de tunneltechnische installaties (TTI) voor ontsteking kunnen zorgen. In het achtergronddocument ([2] blz. 148) wordt er vanuit gegaan dat deze kans verwaarloosbaar klein is omdat gas eerst in de armaturen zou moeten doordringen. Van deze aanname gebruik makend kunnen de volgende situaties ontstaan:

1. File benedenstrooms

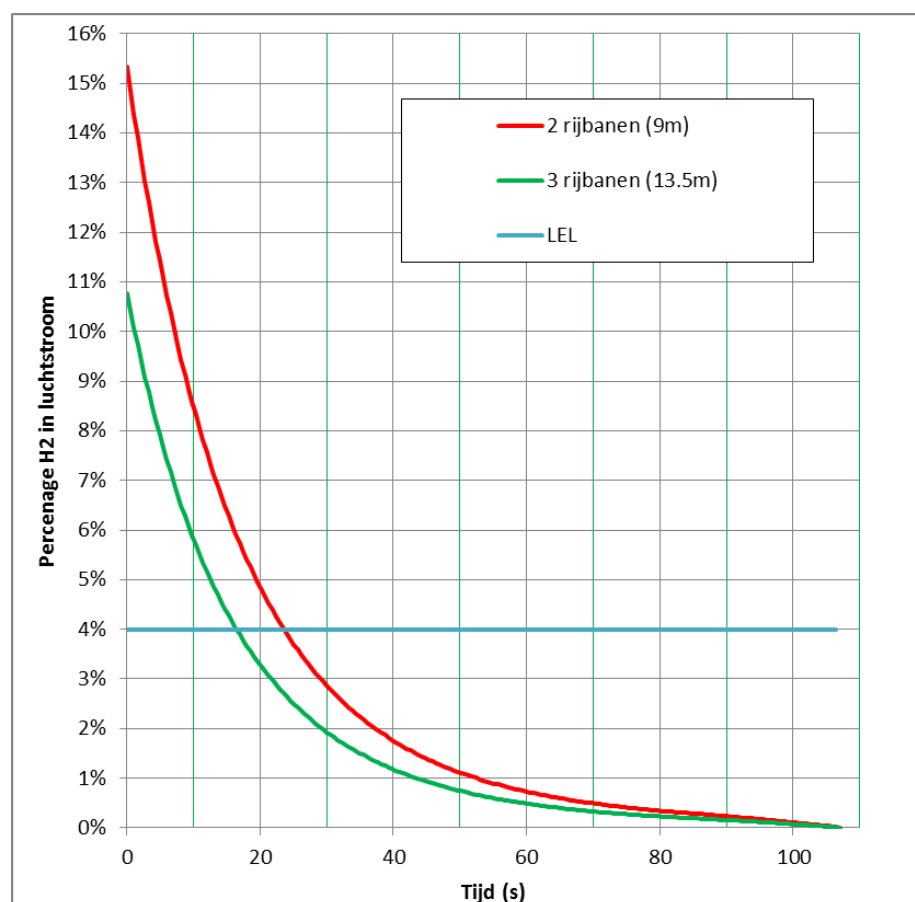
Indien er een file benedenstrooms is zal de gasjet altijd een gebied bestrijken waar auto's staan, hetzij benedenstrooms, hetzij bovenstrooms. De kans op ontsteking door auto's van deze wolk voordat deflagratie optreedt wordt geschat op 50% (dus leidend tot een gaswolkexplosie), met 100% letaliteit over een gebied van 100 m lengte, gelijk verdeeld beneden- en bovenstrooms. Dit resulteert in een kans van 50% op een deflagratie en 100% letaliteit in de gehele tunnelbuis.

2. Geen file benedenstrooms en gasjet "naar voren":

In dit geval zal het gas in het autoloze deel van de tunnel worden geblazen en met de luchtstroom worden afgevoerd naar buiten. Auto's zullen geen ontstekingsbronnen vormen, alleen de tunneltechnische installaties (ventilatoren, lampen) kunnen voor ontsteking zorgen. De kans op ontsteking (en dus een deflagratie of gaswolkexplosie) wordt als verwaarloosbaar beschouwd.

3. Geen file benedenstrooms en gasjet "naar achteren":

Doordat er alleen auto's bovenstrooms van het ongeval staan zal de ontstekingskans kleiner zijn. Aanvankelijk echter zal de kans niet anders zijn dan in situatie 1, omdat alle gas over de auto's (ontstekingsbronnen) wordt geblazen. Bij het uitdoven van de jet zal de ontstekingskans afnemen. De jet dooft echter relatief langzaam uit: als de druk na 22 s tot 50 bar is gedaald is deze nog altijd 12.5 m. De kans dat de wolk na 107 s ontstoken is meer dan 95% bij de 13.5 m brede tunnel en ruim 87% bij de 9 m brede tunnel. Hoewel dus de kans op een 'vroeg' ontsteking, resulterend in een gaswolkexplosie, wat kleiner zal zijn dan in situatie 1, zullen we toch uitgaan van dezelfde kansen als in situatie 1.



Figuur 2 Percentage H₂ in de luchtstroom bij continue uitstroming.

Door het afbreken van de kop bij een druk van 250 bar zal de fles met zo'n 54 m/s (195 km/h) worden gelanceerd. Op basis van de argumentatie bij scenario 1 (§2.1) gaan we er van uit dat 1 auto door de fles wordt geraakt, waarbij de inzittenden om het leven komen.

2.4.3 CNG / methaan

In Tabel 7 zijn de resultaten samengevat voor beide tunnelbreedtes.

Tabel 7 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van CNG uit een gat van 10 mm diameter.

Tunnelhoogte	5 m	
Diameter gat	10 mm	
Initiële uitstroomsnelheid	3.95 kg/s (=5.75 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	347 s	
Max. uitstroomafstand (turbulente vrijstraal)	23 m	
Tunnelbreedte	9 m	13.5 m
Tunneldoorsnede	45 m ²	67.5 m ²
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's	34 m ²	51 m ²
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Percentage CNG in lucht op t=0	7.8 %	5.3 %
Tijd tot concentratie onder LEL (4.4%) zakt	33 s	11 s
Maximale lengte explosieve wolk	70 m	23 m
Tijdstip waarop lengte explosieve wolk 50 m wordt bereikt	24 s	-

Uitgaande van een maximale werkdruk van 250 bar zal de uitstroomsnelheid bij aanvang ca. 3.95 kg/s bedragen. Na ca. 347 s is de fles leeg. Na expansie tot atmosferische omstandigheden, komt 1kg/s overeen met 1.46 m³/s. Deze flux aan methaan mengt op met de luchtstroom in de tunnel. Opmengen met lucht resulteert bij aanvang in 7.8% methaan in de gemengde luchtstroom voor de 9 m brede tunnel en 5.3 % in de 13,5 m brede tunnel. Dit is in de explosieve zone tussen 4.4 en 17%. In Figuur 3 is het percentage methaan in de luchtstroom aangeven als functie van de tijd voor de twee tunnelbreedtes. Na 33 s zakt het CNG percentage tot beneden de LEL waarde van 4.4%. De lengte van de explosieve wolk is dan 70 m. Indien de uitstroomrichting naar achteren is (stroomopwaarts) zal de wolk zich aanvankelijk uitstrekken tot 23 m bovenstrooms (de reikwijdte van de 'gasjet = Max. uitstroomafstand (turbulente vrijstraal) in Tabel 7). Door de afnemende druk en de luchtverplaatsing zal het bovenstroomse deel snel in lengte afnemen, waarna zich alleen nog benedenstrooms van het ongeval een gaswolk bevindt. Indien de uitstroomrichting naar voren is, zal zich alleen benedenstrooms brandbaar gas bevinden.

Na 24 s wordt een lengte van 50 m bereikt. In Tabel 7 zijn de resultaten samengevat voor beide tunnelbreedtes. Bij ontsteking binnen 24 s zal geen deflagratie optreden maar alleen een gaswolkexplosie met een 100% letaliteitsgebied ongeveer ter grootte van 3x de lengte van de gaswolk (er hierbij vanuit gaande dat dit de kritische lengte is voor deflagratie, zie hiervoor). Bij ontsteking na 24 sec. kan deflagratie optreden met 100% letaliteit binnen de gehele tunnelbuis. De kans op ontsteking van een 50 m lange wolk binnen 24 sec (dus voordat een deflagratie zal optreden) bij aanwezigheid van 20 auto's in de file is 96%. (blz. 148 en Bijlage D in [2]).

In werkelijkheid zal de kans kleiner worden omdat de wolk zich gedurende deze 24 sec nog aan het vormen is en het aantal auto's dat zich in de gaswolk bevindt afhangt van de richting van de 'gasjet' en aanwezigheid van een file benedenstrooms. Omdat bij methaan de kritische lengte voor deflagratie groter zal zijn dan 50 m zal hierdoor de kans op ontsteking voordat deflagratie optreedt weer groter worden. Zonder geavanceerde berekening is de exacte kans niet te bepalen maar een waarde van meer dan 90% lijkt niet onwaarschijnlijk. Hoewel de maximale lengte groter kan zijn dan 150 m door de grotere kritische lengte voor deflagratie is de kans heel klein dat deze wordt bereikt. Het lijkt redelijk om er vanuit te gaan dat ontsteking zal plaatsvinden voordat de kritische lengte voor deflagratie is bereikt en dat het 100% letaliteitsgebied dan een lengte van 100 m zal hebben. De kans op ontsteking door de TTI wordt ook hier weer op 0 gesteld (zie hiervoor). Analooq aan de situatie met waterstof kunnen de volgende situaties ontstaan:

1. File benedenstrooms

Indien er een file benedenstrooms is zal de gasjet altijd een gebied bestrijken waar auto's staan, hetzij benedenstrooms, hetzij bovenstrooms. De kans op ontsteking van deze groeiende wolk door auto's voordat een deflagratie optreedt wordt op 1 gesteld. Dit is dus de kans op een gaswolkexplosie. Het 100% letaliteitsgebied is dan 100 m, gelijk verdeeld beneden- en bovenstrooms. Dit resulteert in een kans van 0 op een deflagratie. De wolklengte in de tunnel met drie rijstroken is sowieso te klein voor een deflagratie.

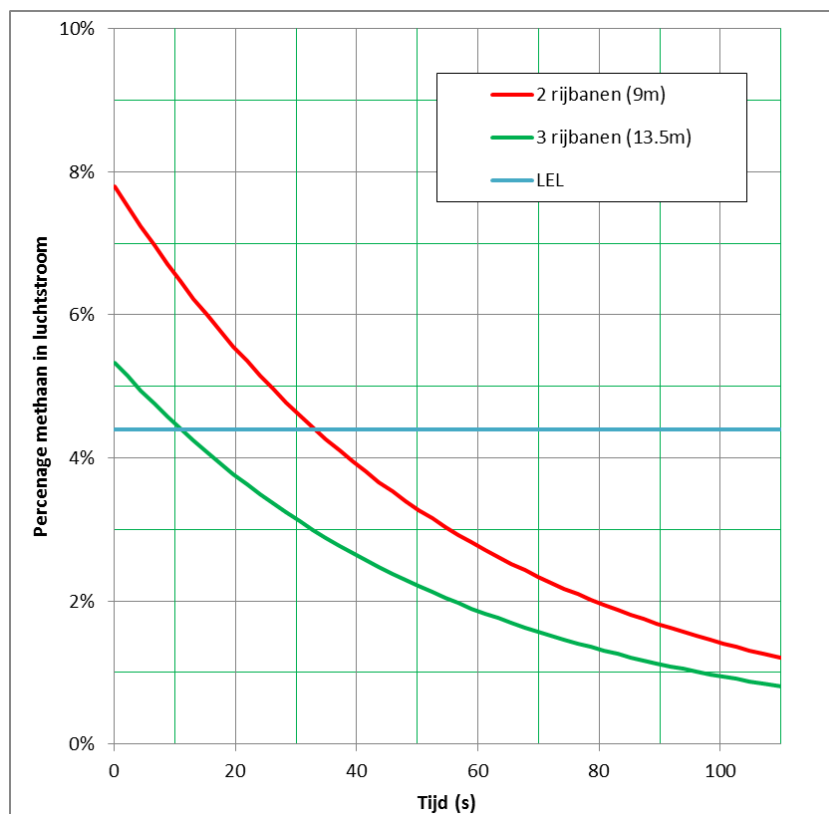
2. Geen file benedenstrooms en gasjet "naar voren":

In dit geval zal het gas in het autoloze deel van de tunnel worden geblazen en met de luchtstroom worden afgevoerd naar buiten. Auto's zullen geen

ontstekingsbronnen vormen. Er zal geen ontsteking plaatsvinden en er zullen geen slachtoffers vallen

3. Geen file benedenstrooms en gasjet “naar achteren”:

Doordat er alleen auto's bovenstrooms van het ongeval staan zal de ontstekingskans kleiner zijn. Aanvankelijk echter zal de kans niet anders zijn dan in situatie 1, omdat alle gas over de auto's (ontstekingsbronnen) wordt geblazen. Bij het uitdoven van de jet zal de ontstekingskans afnemen. De jet dooft echter relatief langzaam uit: als de druk na 24 s tot ca. 150 bar is gedaald is deze nog altijd 18 m. De kans dat de wolk na 347 s ontstoken is bij alleen een file bovenstrooms is meer dan 99% bij beide tunnelbreedtes. Hoewel dus de kans op een 'vroeg' ontsteking, resulterend in een gaswolkexplosie, wat kleiner zal zijn dan in situatie 1 hierboven lijkt het reëel om dezelfde kansen te hanteren als in situatie 1: dus een gaswolkexplosie met een 100% schadegebied van 100 m, gelijk verdeeld beneden- en bovenstrooms.



Figuur 3 percentage CNG (methaan) in de luchtstroom bij continue uitstroming.

Door het afbreken van de kop bij een druk van 250 bar zal de fles met zo'n 105 m/s (380 km/h) worden gelanceerd. Op basis van de argumentatie bij scenario 1 (§2.1) gaan we er vanuit dat 1 auto door de fles wordt geraakt, waarbij de inzittenden om het leven komen.

2.4.4 Scenario 4 in vergelijking met het achtergronddocument

Als we de uitkomsten van dit scenario vergelijken met de verschillende scenario's in het achtergronddocument [2] lijkt een grote continue uitstroming van brandbare gassen met vertraagde ontsteking (§8.5.2. in [2]) nog het dichtste bij dit scenario te komen. Hierbij worden echter zowel het aantal slachtoffers als de frequentie

overschat. Op basis van dit scenario is het derhalve beter om deze categorie apart te behandelen. De effecten voor CH₂ (kan deflagratie opleveren) zijn nog wat ernstiger dan voor CNG (maximaal gaswolkexplosie). Mocht men deze categorieën willen bundelen, dan kan men het beste de gevolgen voor CH₂ als uitgangspunt nemen. Een en ander zal mogelijk ook afhangen van toekomstige vervoersfrequenties. Ook hier geldt weer dat het aanbeveling verdient om de conservatieve aannames ten aanzien van het ontstaan van een deflagratie of detonatie nog eens onder de loep te nemen, gezien de ernstige effecten die op basis van deze aannames worden voorspeld voor deze relatief geringe (zeker bij waterstof) hoeveelheden gevaarlijke stoffen.

2.5 Scenario 5: Afbreken kop of aansluiting - Directe ontsteking - Fakkels

Indien, na het afbreken van de kop van de fles of de aansluiting, het vrijkomende gas direct wordt ontstoken zal er een fakkel ontstaan

2.5.1 Vervolgkansen

De kans op directe ontsteking van een brandbaar gas = $P_{ont.dir.GF} = 0.8$ (zie Tabel 3-10, in [2]).

2.5.2 Waterstof

De resultaten van de berekeningen met EFFECTS 9.0 zijn weergegeven in Tabel 8. Hierbij is uitgegaan van een druk van 250 bar

Door de verbranding en de uitzetting als gevolg van de hoge temperatuur (2000 °C is bij waterstof haalbaar) is de uitstroomsnelheid, gemeten in m³/s, naar verhouding groot. Niettemin zullen, bij een gatgrootte van 10 mm, de rookgassen zich met een lagere snelheid door de tunnel verspreiden dan 2 m/s, de snelheid van luchtverplaatsing in de tunnel gedurende de eerste twee minuten na het incident. De rookgassen zullen dus niet het verkeer bovenstrooms van de ongevallocatie bereiken. Op pag. 156 van [2] wordt voorgesteld om de gevolgen van de warmteproductie door de fakkel te modelleren als een brand. Waterstof produceert 120 MJ aan energie per kg bij verbranding. Bij de uitstroomsnelheid van 1 kg/s betekent dit dus een warmteproductie van 120 MW. De uitstroming en dus de fakkel ("brand") zal echter maar kort duren (max. 107 s) en al heel snel in intensiteit afnemen. Binnen 1 min is de uitstroomflux met een factor 20 tot ca. 0,05 kg/s gedaald, zal de fakkel nog slechts 3.5 m lang zijn en nog slechts 6 MW warmte produceren.

Tabel 8 Fakkellengte H₂ bij 10mm gatgrootte.

Diameter gat	10 mm	
Initiële uitstroomsnelheid bij 2000 C	1.0 kg/s (=65.4 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	107 s	
Initiële lengte fakkel	14 m	
warmteproductie	120 MW	
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Rookgassnelheid	0.96 m/s	0.64 m/s

Samenvattend

1. fakkel "naar achteren"

100% letaliteit over de lengte van de fakkel ($L_3 = 14$ m bij H₂). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een brand van 120 MW, die echter snel in intensiteit afneemt.

2. File benedenstrooms en fakkel “naar voren”:
100% letaliteit over de lengte van de fakkel ($L_4 = 14$ m bij H_2). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een brand van 120 MW, die snel in intensiteit afneemt.
3. Geen file benedenstrooms en fakkel “naar voren”:
De gevolgen van hittestraling voor de file achter het incident kunnen worden gemodelleerd met een brand van 120 MW, die snel in intensiteit afneemt.

2.5.3 CNG / methaan

De resultaten van de berekeningen met EFFECTS 9.0 zijn weergegeven in Tabel 9. Door de verbranding en de uitzetting als gevolg van de hoge temperatuur (voor CNG zal 800 °C worden aangehouden, zoals ook voor LPG in [2]) is de uitstroomsnelheid, gemeten in m^3/s , naar verhouding groot. Bij CNG duurt de uitstroming langer dan 2 minuten. Echter, indien na 2 minuten de ventilatie niet wordt ingeschakeld, is de uitstroomsnelheid van CNG al zo laag, dat de rookgassnelheid nog slechts enkele cm/s bedraagt en dus geen slachtoffers zal veroorzaken, omdat deze gemakkelijk sneller kunnen vluchten. Methaan produceert 50 MJ aan energie per kg bij verbranding. Bij de uitstroomsnelheid van ca. 4 kg/s betekent dit dus een warmteproductie van 200 MW. Na 3 minuten is de uitstroomsnelheid met een factor 20 gedaald, zal de fakkel nog slechts 5 m lang zijn en nog slechts 10 MW warmte produceren.

Tabel 9 Fakkellengte CNG bij 10 mm gatgrootte.

Diameter gat	10 mm	
Initiële uitstroomsnelheid bij 800 C	3.95 kg/s ($\approx 21.6 m^3/s$)	
Totale uitstroomtijd (= tijdsduur fakkel)	347 s	
Initiële lengte fakkel	20 m	
warmteproductie	200 MW	
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m^3/s	102 m^3/s
Rookgassnelheid	0.32 m/s	0.21 m/s
Rookgassnelheid na 2 minuten	0.04 m/s	0.03 m/s

Samenvattend

1. fakkel “naar achteren”
100% letaliteit over de lengte van de fakkel ($L_3 = 20$ m bij CNG). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een brand van 200 MW, die echter snel in intensiteit afneemt.
2. File benedenstrooms en fakkel “naar voren”:
100% letaliteit over de lengte van de fakkel ($L_4 = 20$ m bij CNG). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een brand van 200 MW, die echter snel in intensiteit afneemt.
3. Geen file benedenstrooms en fakkel “naar voren”:
De gevolgen van hittestraling voor de file achter het incident kunnen worden gemodelleerd met een brand van 200 MW, die echter snel in intensiteit afneemt.

2.5.4 Scenario 5 en het achtergronddocument

Als we de uitkomsten van dit scenario vergelijken met de verschillende scenario's in het achtergronddocument [2] lijkt een kleine continue uitstroming van brandbare gassen met vertraagde ontsteking (§8.5.3. in [2]) nog het meest overeen te komen. Hierbij wordt immers uitgegaan van uitstroming uit een ½ inch gat, een waarde die niet al te veel afwijkt van de hier gehanteerde 10 mm. De lengte van de fakkel is

hierbij 15 m, een waarde tussen de hier berekende waarden voor waterstof en CNG in. Voor hittestraling worden de waarden van een plasbrand van 300 m² gehanteerd. Dit zou volgens § 3.3.2. in het achtergronddocument [2] overeenkomen met 390 tot 600 MW (plasbrand van 300 m² met stralingswarmte van 1.3 – 2 MW/m²), hetgeen enigszins een overschatting zou betekenen van de voor waterstof en CNG berekende waarden. Al met al zijn de waarden zoals gegeven in § 8.5.2. van het achtergronddocument [2] goed bruikbaar voor dit scenario.

2.6 Scenario 6: Afbreken kop of aansluiting - Geen ontsteking - Gelanceerd projectiel

De kans dat er geen ontsteking zal optreden na een ongeval wordt in [2] op 0 gesteld. Dit scenario zal niet verder worden behandeld.

2.7 Conclusie GFOP

In Tabel 10 zijn de resultaten samengevat. De scenario's die bij deze wijze van vervoer horen vertonen grote overeenkomsten met het vervoer van tot vloeistof verdichte brandbare gassen (GF). Het zijn echter geen vloeistoffen en hoewel de drukken veel hoger zijn dan bij GF zijn de hoeveelheden die per unit (fles) vervoerd worden aanzienlijk kleiner, en daarmee i.h.a. ook de gevolgen. Niettemin is de inhoud voldoende om bij enkele scenario's eenieder in de tunnel in beide buizen letaal te verwonden, althans op basis van de ruwe aannames ten aanzien wolkgroottes die tot deflagratie of detonatie leiden die in het achtergronddocument [2] worden gehanteerd. Dit kan gebeuren bij instantaan vrijkomen van de gehele inhoud, gevolgd door vertraagde ontsteking. Voor dit scenario zouden dan ook, weliswaar met enige overschatting, de gevolgen uit de bestaande berekeningen voor GF kunnen worden gebruikt. Het verdient echter aanbeveling om de aannames ten aanzien wolkgroottes die tot deflagratie of detonatie leiden nog eens nader te onderzoeken.

Voor de berekeningen van de gevolgen van een fakkelbrand (afbreken van kop of aansluiting en directe ontsteking van het vrijgekomen gas) zijn de resultaten zoals deze in het achtergronddocument [2] voor een kleine uitstroming van GF zijn berekend goed bruikbaar.

Voor de overige scenario's zal 1 op 1 overnemen van de GF-scenario's tot aanzienlijke overschatting van gevolgen en risico's leiden.

Derhalve zal hiervoor een aparte categorie moeten worden ingevoerd in QRA tunnels. Mogelijk kan men de gevolgen voor CNG en CH₂ wel bundelen waarbij de meeste ernstige gevolgen worden gehanteerd voor beide categorieën.

Voor de berekening van de faalkansen van de gasflessen en het afbreken van leidingen zullen aanvullende studies moeten worden uitgevoerd. Verder zal de relevantie van de in QRA-tunnels gebruikte voorwaarde dat de uitstroming meer dan 100 kg moet bedragen nader moeten worden onderzocht.

Tabel 10 Overzicht van de gevolgen en frequenties van de scenario's voor GFOP. L1 – L6 en P1 – P6 refereren naar de notatie in [2].

GFOP	P(scenario)		condities	Type effect en P(effect)	Lengte deelgebieden (m)						Overlijdenskans					
Scenario					L1	L2	L3	L4	L5	L6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1: Instantaan falen in externe brand	$= F(\text{letsel}) \cdot P_b \cdot P_{vb}$	CH2		hitte	Door lange aanloop tot explosie: gevolgen als bij een 200 MW letselbrand: Tabel 7-3 en § 7.4 in het achtergronddocument [2].											
		CNG		Hitte en rookgassen	Door lange aanloop tot explosie: gevolgen als bij een 200 MW letselbrand: Tabel 7-3 en § 7.4 in het achtergronddocument [2].											
2: Instantaan falen – Vertraagde ontsteking	$= F(\text{letsel}) \cdot (1 - P_b) \cdot P_{vn}$	CH2		detonatie	150	gehele tunnel				150	1	1				1
		CNG		detonatie	150	gehele tunnel				150	1	1				1
3: Instantaan falen – Geen ontsteking	0	CH2		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		CNG		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4: Afbreken kop of aansluiting - Vertraagde ontsteking - gaswolkexplosie	$= F(\text{letsel}) \cdot (1 - P_b) \cdot P_c \cdot 0.2$	CH2	file benedenstrooms	Gaswolkexplosie (0.5)	0	0	50	50	0	0	0	0	1	1	0	0
				Deflagratie (0.5)	0	lengte tunnelbuis				0	0	1				0
			Geen file benedenstrooms en gasjet "naar voren":	geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Geen file benedenstrooms en gasjet "naar achteren":	Gaswolkexplosie (0.5)	0	0	50	50	0	0	0	0	1	1	0	0
				Deflagratie (0.5)	0	lengte tunnelbuis				0	0	1				0
		CNG	file benedenstrooms	gaswolkexplosie	0	0	50	50	0	0	0	0	1	1	0	0
			Geen file benedenstrooms en gasjet "naar voren":	geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			Geen file benedenstrooms en gasjet "naar achteren":	gaswolkexplosie	0	0	50	50	0	0	0	0	1	1	0	0

GFOP	P(scenario)		condities	Type effect en P(effect)	Lengte deelgebieden (m)						Overlijdenskans						
Scenario					L1	L2	L3	L4	L5	L6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
5: Afbreken kop of aansluiting - Directe ontsteking - Fakkel	= F(letsel)*(1-Pb)*Pc*0.8	CH2	File benedenstrooms en fakkel "naar achteren"	hitte en fakkel*	0	120MW brand (hitte)	14	0	120MW brand (hitte en hete lucht)	0	0	1	1	1	1	0	
			File benedenstrooms en fakkel "naar voren":		0	120MW brand (hitte)	0	14	120MW brand (hitte en hete lucht)	0	0	1	1	1	1	0	
			Geen file benedenstrooms en fakkel "naar achteren		0	120MW brand (hitte)	14	0	0	0	0	1	1	0	0	0	
			Geen file benedenstrooms en fakkel "naar voren":		0	120MW brand (hitte)	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	
		CNG	File benedenstrooms en fakkel "naar achteren"		0	200MW brand (hitte)	20	0	200MW brand (hitte en rookgas)	0	0	1	1	1	1	1	0
			File benedenstrooms en fakkel "naar voren":		0	200MW brand (hitte)	0	14	200MW brand (hitte en rookgas)	0	0	1	1	1	1	1	0
			Geen file benedenstrooms en fakkel "naar achteren		0	200MW brand (hitte)	14	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
			Geen file benedenstrooms en fakkel "naar voren":		0	200MW brand (hitte)	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
6: Afbreken kop of aansluiting - Geen ontsteking - Gelanceerd projectiel	0	CH2		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		CNG		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

* Ook goed bruikbaar zijn de waardes in § 3.3.2. van het achtergronddocument [2]: fakkellengte 14 m; hittestraling van een plasbrand van 300 m²

3 GF0L: Tot vloeistof gekoelde brandbare gassen

Dit betreft de tot vloeistof gekoelde gassen H_2 (LH_2 of LHG) en LNG. De uitgangspunten die zijn gebruikt bij de berekening van de effecten zijn weergegeven in Tabel 11. Het gaat hier om veel grotere hoeveelheden dan bij GFOP.

Tabel 11 Vervoergegevens gebruikt bij de berekening van de effecten voor tot vloeistof gekoelde brandbare gassen.

parameter	LNG	LH2	Ref.
Gemodelleerde stof	methaan	waterstof	
inhoud tank (dubbelwandig)	40 m ³	50 m ³	[3] [6] [7]
Lengte tank	13 m	13.5 m	
doorsnede tank	2.5 m	2.5 m	
doorsnede grootste aansluiting / (vul)opening	2"	2"	
doorsnede afblaasopening (veerveiligheid o.i.d.)	4"	4"	
werkdruk (typisch)	2.4 bar	2.4 bar	
werkdruk (max)	10 bar	10 bar	
barstdruk	12.1 bar	12.1 bar	
temperatuur	-150 °C	-250 °C	
Gewicht tank	10 ton	10 ton	

De scenario's in de vorm van gebeurtenissenboom zijn weergegeven in Figuur 4. Aangezien dit vervoer plaatsvindt in druktankwagens, kunnen de hiervoor in [2] afgeleide kansen en frequenties worden gebruikt. Conform [2] is een letselongeval als startpunt genomen. Pechgevallen of ongevallen met uitsluitend materiële schade (UMS) leiden hierbij niet tot het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. De verschillende takken van de gebeurtenissenboom worden hieronder besproken.

Scenario's/ gebeurtenissenboom			effecten	
ongeval met letsel + Uitstr >100kg ($F_{letsel} * .039$)	relevante uitstroming (0.3)	volledig falen tank in externe brand (0.245)	1. warme BLEVE	
		volledig falen tank geen externe brand (0.105)	Directe ontsteking (0)	2. Koude BLEVE
			vertraagde ontsteking (1)	3. gaswolkexplosie (hitte en druk) en plasbrand, scherven (mist)
			geen ontsteking (0)	4. verstikking, mist
		continue uitstroming uit 2" gat (0.65)	vertraagde ontsteking (0.2)	5. gaswolkexplosie (hitte en druk) en plasbrand (mist)
			directe ontsteking (0.8)	6. fakkel
			geen ontsteking (0)	7. geen effect (mist)
		Niet relevante uitstroming (0.7)	geen	

Figuur 4 Gebeurtenissenboom voor tot vloeistof gekoelde brandbare gassen; tussen haakjes zijn de (vervolg)kansen aangegeven.

3.1 Scenario 1: Instantaan falen - externe brand - Warme BLEVE

Een warme BLEVE in de buitenlucht zal voor LNG een vuurbal opleveren van 144 m doorsnede. Bij de faaldruk van 12.1 bar is de temperatuur in de tank is dan -120 °C. Een dergelijk volume kan een 13.5 m brede tunnel over 30 km vullen! Voor waterstof geldt een doorsnede van de van vuurbal van 84 m doorsnede waarbij de tunnel 6 km kan worden gevuld. De vloeistof temperatuur is dan -241 °C (12.1 bar faaldruk). Het zal duidelijk zijn dat hierdoor eenieder in de tunnel komt te overlijden alsmede een aantal personen buiten de tunnel. Exacte overdruk berekeningen zijn complex en tijdrovend. Maar het valt te verwachten dat de drukken in dezelfde grootteorde zullen liggen als voor een BLEVE van LPG. Voor een warme BLEVE van LNG of LH2 kunnen dan ook het beste dezelfde schadecriteria worden gehanteerd als voor een BLEVE van LPG.

3.1.1 Kansen

Voor de kansen geldt (zie tabel 3.9 en fig. 4.1 in [2]):

- Kans op ongeval met letsel en significante uitstroming = $F_{\text{letsel}} * P_{\text{uit, druk}} = F_{\text{letsel}} * 0.039$
- vervol kans op significante uitstroming = 0.3
- vervol kans op volledig falen in externe brand (warme BLEVE) = $0.35 * P_{\text{warm}} = 0.35 * 0.7 = 0.245$

3.2 Scenario 2: Instantaan falen – geen externe brand - koude BLEVE

Een BLEVE met substantiële blasteffecten zal alleen optreden indien de tankinhoud een temperatuur heeft die hoger is dan de homogene nucleatietemperatuur (zie ook [9]). De homogene nucleatietemperatuur ligt i.h.a. op ongeveer 90% van de kritische temperatuur. In Tabel 12 zijn de relevante temperaturen gegeven. Hieruit blijkt dat er geen koude BLEVE zal optreden.

Tabel 12 Kritische temperatuur en homogene nucleatie temperatuur voor waterstof en methaan.

Stof	Kritische temperatuur (°C)	Homogenen nucleatie temperatuur (°C)	Temperatuur bij vervoer
Methaan	- 82.7 °C	- 101 °C	-150 °C
waterstof	-240 °C	- 243 °C	- 250 °C

Beneden de homogene nucleatietemperatuur zal alleen de in de tank aanwezige gasfractie expanderen en bij instantaan vrijkomen tot drukeffecten leiden. De, onder relatief lage druk staande, gasfractie zal geen overdruk van betekenis veroorzaken. Het resterende (overgrote) gedeelte (de vloeibare fractie) zal instantaan vrijkomen, deels verdampen en een plas vormen. Dit scenario kan dan ook beter bij scenario 3 worden gevoegd, ofwel de kans op scenario 2 is 0⁴.

⁴ Uit scenario 3 blijkt dat instantaan vrijkomen van de gehele inhoud tot verdringing van de lucht (en dus zuurstof) leidt waardoor directe ontsteking niet mogelijk is. Hiervoor zal eerst de methaan- of waterstofconcentratie tot onder de UEL moeten zijn gezakt.

3.3 Scenario 3: Instantaan falen - Vertraagde ontsteking – Gaswolkexplosie en plasbrand

3.3.1 Kansen

Voor de kansen geldt (zie tabel 3.9 en fig. 4.1 in [2]):

- Kans op ongeval met letsel en significante uitstroming = $F_{\text{letsel}} * P_{\text{uit, druk}} = F_{\text{letsel}} * 0.039$
- vervolgcans op significante uitstroming = 0.3
- vervolgcans op volledig falen en vertraagde ontsteking (geen warme BLEVE) = $0.35 * (1 - P_{\text{warm}}) = 0.35 * (1 - 0.7) = 0.105$

3.3.2 LNG

Bij instantaan vrijkomen van LNG zal er een deel meteen verdampen (flash-off) en een deel zal een plas vormen. Het verdampte deel zal de aanwezige lucht over een grote afstand verdringen (107 m bij de 9 m brede tunnel en 72 m bij de 13.5 m brede tunnel) (zie Tabel 13). Om te kunnen ontsteken zal de methaanconcentratie in deze wolk tot onder de LEL (17%) moeten zakken. Dit zal aan de uiteinden van de wolk relatief snel gebeuren. Uit de ontstane plas zal aanvankelijk veel verdampen omdat deze in contact is met de warme tunnelwand en de auto's in de tunnel. Het is zo goed als onvoorspelbaar op welk moment er een explosieve wolk ontstaat die in aanraking komt met een ontstekingsbron. Het is echter zeer waarschijnlijk dat deze op enig moment in het zeer lange getroffen traject (344 m bij een 9 m brede tunnel en 230 m bij een 13.5 m brede tunnel) zal ontstaan. Tot die tijd is vluchten ook zo goed als onmogelijk vanwege de verstikkende atmosfeer (lucht is verdrongen door methaan) of de mist en kou die in het getroffen gebied zal heersen door de afkoeling van de lucht. Een deflagratie (wolklengte meer dan ruim 50 m – zie hiervoor) of zelfs detonatie (wolklengte meer dan ruim 100m – zie hiervoor) is dan ook mogelijk.

Tabel 13 Berekeningsresultaten met EFFECTS voor instantaan vrijkomen van LNG.

Totale hoeveelheid LNG in tank	38 m ³ = 15393 kg bij 2.4 bar en -150 °C	
Flash-off	2477 kg (= 3653 m ³ gas bij 1 bar)	
Hoeveelheid in plas	12916 kg (= 31 m ³ bij -162 °C en 1 bar)	
Tunnelhoogte	5 m	
Tunnelbreedte	9 m	13.5 m
Tunneldoorsnede	45 m ²	67.5 m ²
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's	34 m ²	51 m ²
Initiële lengte gaswolk (100 % methaan)	107 m	72 m
Plasoppervlak bij 1 cm plasdikte	3100 m ² (=9 m * 344 m)	3100 m ² (=13.5 m * 230 m)

3.3.3 LH2

Voor LH2 zijn de berekeningsresultaten weergegeven in Tabel 14. Hiervoor geldt hetzelfde als voor LNG. Door de relatief grote reactiviteit waardoor wolklengtes van minder dan 100 m reeds tot detonatie leiden moet met detonatie rekening worden gehouden.

Tabel 14 Berekeningsresultaten met EFFECTS voor instantaan vrijkomen van LH2.

Totale hoeveelheid LNG in tank	45 m ³ = 2998 kg bij 2.4 bar en -250 °C	
Flash-off	494 kg (= 5727 m ³ gas bij 1 bar, 12 °C)	
Hoeveelheid in plas	2504 kg (= 35.4 m ³ bij -253 °C en 1 bar)	
Tunnelhoogte	5 m	
Tunnelbreedte	9 m	13.5 m
Tunneldoorsnede	45 m ²	67.5 m ²
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's	34 m ²	51 m ²
Initiële lengte gaswolk (100 % H ₂)	168 m	112 m
Plasoppervlak bij 1 cm plasdikte	3530 m ² (=9 m * 392 m)	3530 m ² (=13.5 m * 262 m)

3.3.4 Samengevat

Op basis van de aannames uit het achtergronddocument [2], ten aanzien van de relatie tussen explosiegedrag en wolklengte, moet bij instantaan vrijkomen van LNG of LH2 met een deflagratie of detonatie rekening worden gehouden. Conservatief uitgaande van een detonatie, zullen beide tunnelbuizen worden vernield en zullen alle aanwezigen in de tunnel zullen komen te overlijden plus de personen die zich binnen 150 m van beide tunnelmonden bevinden. Opgemerkt hierbij moet echter worden dat bij instantaan vrijkomen in een groot gedeelte van de wolk de concentratie boven de UEL ligt. De effectieve lengte van de explosieve gaswolk is derhalve mogelijk kleiner en de effecten mogelijk wat minder ernstig. Om te bepalen hoeveel geringer de effecten zijn zal aanvullen onderzoek moeten worden uitgevoerd.

3.4 Scenario 4: Instantaan falen - Geen ontsteking

Het is onwaarschijnlijk dat er geen ontsteking zal zijn (zie scenario 3). Derhalve zal dit scenario niet nader worden uitgewerkt.

3.5 Scenario 5: Continue uitstroming - Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie

3.5.1 Vervolgkansen

- Vervolgkansen op significante uitstroming en pijpbreuk = 0.65 (zie fig. 4-1 in [2])
- Kans op vertraagde ontsteking brandbaar gas = 0.2 (zie Tabel 3-10, in [2]).

3.5.2 Waterstof

Bij het afbreken van de grootste aansluiting zal er een gat ontstaan van 2". (zie Tabel 11). In Tabel 15 zijn de resultaten samengevat voor beide tunnelbreedtes.

Tabel 15 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van H₂ uit een gat met 2" diameter.

Tunnelhoogte	5 m	
Diameter gat	2"	
Initiële uitstroomsnelheid	8.7 kg/s (=100 m ³ /s gas bij 1 bar, 12 °C)	
Totale uitstroomtijd	531 s	
Tunnelbreedte	9 m	13.5 m
Tunneldoorsnede	45 m ²	67.5 m ²
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's	34 m ²	51 m ²
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
uitbreidingsnelheid gaswolk in tunnel	1.15 m/s	1.1 m/s
Percentage H ₂ in lucht op t=0	59.6 %	49.6 %
Initiële gaswolktemperatuur	-140 °C	-114 °C
Tijd tot concentratie onder LEL (4%) zakt	525 s	520 s
Maximale lengte explosieve wolk	2050 m	1720 m
Tijdstip waarop lengte explosieve wolk 50 m wordt bereikt	12 s	14 s
Tijdstip waarop lengte explosieve wolk 100 m wordt bereikt	23 s	28 s

Uitgaande van een maximale werkdruk van 2.4 bar zal de uitstroomsnelheid bij aanvang 8.7 kg/s bedragen. Door de afnemende druk in de tank zal de uitstroomsnelheid geleidelijk afnemen tot 0 na 531 s als de tank leeg is. Volgens berekeningen met EFFECTS zal alle vrijgekomen waterstof zich meteen in de gasfase bevinden. Na expansie tot atmosferische omstandigheden, komt 8.7 kg/s overeen met 100 m³/s. Deze flux aan H₂ mengt op met de luchtstroom in de tunnel. Bij 2 m/s resulteert dit, voor de 9 m brede tunnel, in ca. 60% H₂ in de gemengde luchtstroom. Dit is in de explosieve zone. In Figuur 5 is het percentage waterstof in de luchtstroom aangegeven als functie van de tijd voor de twee tunnelbreedtes. Gedurende vrijwel de gehele uitstroomperiode zal de waterstofconcentratie zich in het explosieve gebied tussen 4% en 75% bevinden. De explosieve wolk kan dan ook een lengte van ca. 2 km bereiken in de tunnel. Al na 12 s (in de 9 m brede tunnel) is de lengte 50 m en na 23 s 100 m. Bij een file benedenstrooms in de 9 m brede tunnel is de kans 50% dat de wolk binnen 12 s ontstoken zal zijn en 76% dat ontsteking binnen 23 s plaatsvindt (berekend op basis van bijlage D in [2]). Bij een file benedenstrooms in de 13.5 m brede tunnel is de kans 75% dat de wolk binnen 14 s ontstoken zal zijn en 95% dat ontsteking binnen 24 s plaatsvindt. Door menging van het zeer koude (-250 °C) waterstof met de luchtstroom zal de temperatuur van de gemengde gasstroom aanvankelijk zo'n -140 °C zijn (9 m brede tunnel). Dit 'krimpend' effect op het totale gasvolume zal de volumetoename en effectieve luchtverplaatsingssnelheid doen afnemen. Hierdoor zal de wolk zich niet tegen de luchtstroom in bewegen: bij de 9 m brede tunnel bijvoorbeeld breidt de gaswolk nog zich met 1.15 m/s uit. Dit is een lagere snelheid dan de luchtstroming van 2 m/s.

De volgende situaties kunnen worden onderscheiden:

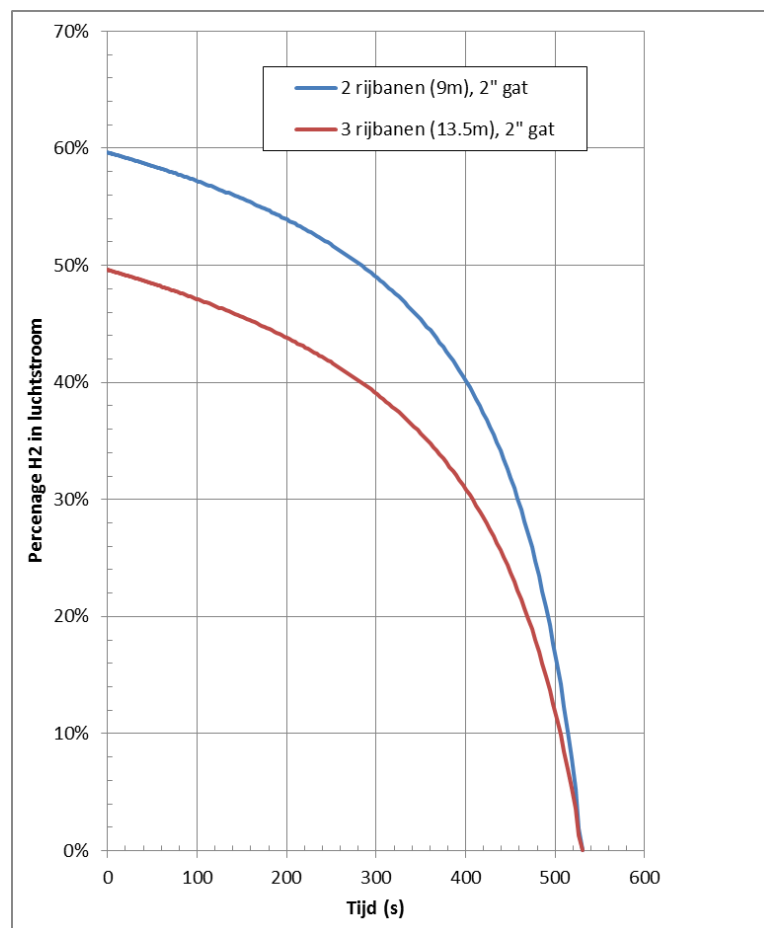
1. File benedenstrooms

Bij een file benedenstrooms in de 9 m brede tunnel is de kans 50% dat de wolk binnen 12 s ontstoken zal zijn (zich binnen de ontstoken wolk bevindende personen komen dan te overlijden) en 76% dat ontsteking binnen 23 s plaatsvindt. Op basis van wolklengtes van 50 en 100 m, als criteria voor deflagratie en detonatie, is de kans op een gaswolkexplosie 50%, de kans op deflagratie 26% (=76-50%) en op detonatie 24% (=100-76%). In werkelijkheid zullen de kansen op detonatie en/of deflagratie mogelijk echter groter zijn aangezien deze reeds bij kleinere wolklengtes kunnen optreden.

Bij een file benedenstrooms in de 13.5 m brede tunnel is de kans 75% dat de wolk binnen 14 s ontstoken zal zijn (zich binnen de wolk (van 50 m) bevindende personen komen dan te overlijden) en 95% dat ontsteking binnen 24 s plaatsvindt. De kans op een gaswolkexplosie is derhalve is 75%, op deflagratie is 20 % (=95-75%) en op detonatie 5% (=100-95%), gebaseerd op 50m en 100m wolklengtes. Ook hier geldt weer dat in werkelijkheid de kansen op detonatie en/of deflagratie mogelijk groter zullen zijn aangezien deze reeds bij kleinere wolklengtes kunnen optreden. Samengenomen lijken de volgende kansen reëel: gaswolkexplosie: 50% met een 100% letaliteitsgebied van 100 m (zie hiervoor), deflagratie (letaal gebied: gehele tunnelbuis) en detonatie (letaal gebied gehele tunnel + 150 m aan beide uiteinden): ieder 25%.

2. Geen file benedenstrooms:

De tunnelventilatie zal de explosieve wolk wegvoeren stroomafwaarts, waarbij er vanuit wordt gegaan dat de wolk in het autoloze deel van de tunnel niet door TTI tot ontsteking kan worden gebracht.



Figuur 5 Percentage H₂ in de luchtstroom bij continue uitstroming uiteen LH2 tank met een gat van 2".

3.5.3 LNG

Bij het afbreken van de grootste aansluiting zal er een gat ontstaan van 2" (zie Tabel 11). In Tabel 16 zijn de resultaten samengevat voor beide tunnelbreedtes.

Tabel 16 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van LNG uit een gat met 2" diameter.

Tunnelhoogte	5 m	
Diameter gat	2"	
Initiële uitstroomsnelheid	21.8 kg/s (=32.2 m ³ /s gas bij 1 bar, 12 °C)	
Totale uitstroomtijd	775 s	
Tunnelbreedte	9 m	13.5 m
Tunneldoorsnede	45 m ²	67.5 m ²
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's	34 m ²	51 m ²
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
uitbreidingsnelheid gaswolk in tunnel	1.18 m/s	1.1 m/s
Percentage methaan in lucht op t=0	32.1 %	24 %
Initiële gaswolktemperatuur	-44 °C	-30 °C
Tijd tot concentratie onder UEL (17%) zakt	774 s	770 s
Tijd tot concentratie onder LEL (4.4%) zakt	775 s	775 s
Maximale lengte explosieve wolk	<10 m	<15 m
Tijdstip waarop lengte explosieve wolk 50 m wordt bereikt	-	-

Uitgaande van een maximale werkdruk van 2.4 bar zal de uitstroomsnelheid bij aanvang 8.7 kg/s bedragen. Door de afnemende druk in de tank zal de uitstroomsnelheid geleidelijk afnemen tot 0 na 775 s als de tank leeg is. Volgens berekeningen met EFFECTS zal alle vrijgekomen LNG zich meteen in de gasfase bevinden. Na expansie tot atmosferische omstandigheden, komt 21.8 kg/s overeen met 32.2 m³/s. Deze flux aan methaan mengt op met de luchtstroom in de tunnel. Bij 2 m/s resulteert dit, voor de 9 m brede tunnel in ca. 32% methaan in de gemengde luchtstroom. Dit is niet in de explosieve zone. In Figuur 6 is het percentage methaan in de luchtstroom aangegeven als functie van de tijd voor de twee tunnelbreedtes. Gedurende vrijwel de gehele uitstroomperiode zal de methaanconcentratie zich boven de UEL van 17% bevinden. Het vervolg zal nu zeer vergelijkbaar zijn met instantaan falen (scenario 3). Voor een explosie zal de concentratie tot beneden de UEL moeten dalen. Dit zal aan de uiteinden relatief snel gebeuren. Het is zo goed als onvoorspelbaar op welk moment er een explosieve wolk ontstaat die in aanraking komt met een ontstekingsbron. Het is echter zeer waarschijnlijk dat dit op enig moment in de zich snel uitbreidende wolk (2.4 m/s in de 9 m brede buis en 2.2 m/s in de 13.5 m brede buis) zal gebeuren. Tot die tijd wordt vluchten bemoeilijkt door de mist / kou die in het getroffen gebied zal heersen a.g.v. afkoeling van de lucht.

Hoewel in een groot gedeelte van de wolk de methaanconcentratie boven de UEL ligt, zullen er (door lokale inhomogeniteiten) delen zijn die in het explosieve gebied liggen. Conservatief moet er dan ook met de mogelijkheid van een deflagratie (wolklengte vanaf minder dan 50 m – zie hiervoor) of zelfs detonatie (wolklengte vanaf minder dan 100 m – zie hiervoor) rekening worden gehouden.

De wolk zal zich (in de 9 m brede tunnel) uitbreiden met een snelheid van 2.4 m/s, ofwel 1.2 m/s stroomafwaarts en 1.2 m/s stroomopwaarts. Bij een ventilatiesnelheid van 2 m/s zal de wolk zich niet stroomopwaarts verspreiden.

De volgende situaties kunnen worden onderscheiden:

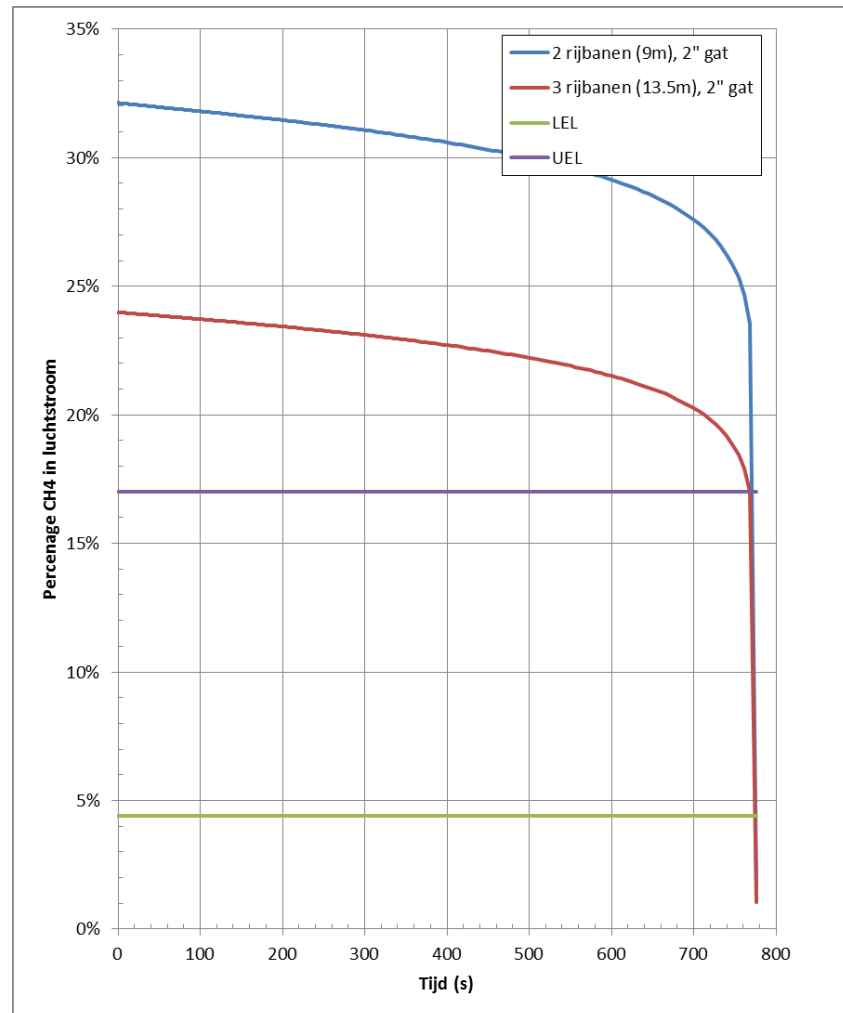
1. File benedenstrooms.

Continu vrijkomen van LNG uit een 2" zal tot een deflagratie of detonatie leiden. Conservatief kan het beste worden uitgegaan van een detonatie, waarbij beide tunnelbuizen worden vernield. Alle aanwezigen in de tunnel zullen komen te

overlijden plus de personen die zie binnen 150 m van beide tunnelmonden bevinden.

2. Geen file benedenstrooms:

De tunnelventilatie zal de wolk wegvoeren stroomafwaarts, waarbij er vanuit wordt gegaan dat de wolk in het autoloze deel van de tunnel niet door TTI tot ontsteking kan worden gebracht.



Figuur 6 Percentage methaan in de luchtstroom bij continue uitstroming uiteen LNG tank met een gat van 2".

3.5.4 Scenario 5 en het achtergronddocument

Dit scenario vertoont grote overeenkomsten met de grote continue uitstroming en vertraagde ontsteking van GF (§8.5.2) uit het achtergronddocument [2]. Hierin werd een ontsteking verondersteld 2 minuten na het incident. Dit betekende een detonatie en slachtoffers tot 150 m buiten de tunnel. Deze waarden zouden ook hier als (conservatieve) aannames gehanteerd kunnen worden.

3.6 Scenario 6: Continue uitstroming - Directe ontsteking – Fakkels

Bij direct ontsteking en continue uitstroming zal er een fakkel ontstaan. De resultaten van de berekeningen met EFFECTS 9.0 zijn voor waterstof weergegeven in Tabel 17 en voor LNG in Tabel 18. Hierbij is uitgegaan van een druk van 2.4 bar

3.6.1 kansen

De kans op directe ontsteking van een brandbaar gas = $P_{ont,dir,GF} = 0.8$ (zie Tabel 3-10, in [2]).

3.6.2 LH2

De gevolgen van warmteproductie door de fakkel kunnen we weer modelleren als een brand. Waterstof produceert 120 MJ aan energie per kg bij verbranding. Bij de uitstroomsnelheid van 8.7 kg/s betekent dit dus een warmteproductie van ruim 1000 MW!

Door de verbranding en de uitzetting als gevolg van de hoge temperatuur (2000 °C is bij waterstof haalbaar) is de uitstroomsnelheid, gemeten in m³/s, naar verhouding groot. De hete rookgassen (alleen hete lucht, waterstof verbrand “schoon”) verspreiden zich dan ook met veel grotere snelheid dan de lichtsnelheid. Gedurende de eerste 2 minuten (bij een luchtverplaatsingssnelheid van 2 m/s) bedraagt deze snelheid 8-2 = 6 m/s voor de 9 m brede tunnel. In de 13.5 m brede tunnel is dit 5.3-2 = 3.3 m/s. Het letaliteitsgebied verplaatst zich dus met deze snelheid stroomopwaarts. Benedenstrooms zal de verplaatsing groter zijn: 10 resp. 7.3 m/s voor de beide tunnels. Als er na 2 minuten geen ventilatie is verplaatst dit gebied zich met gelijke snelheid in beide richtingen (8 resp. 5.3 m/s). Doordat de uitstromende flux van gas relatief langzaam daalt (zie Figuur 5) zal gedurende een groot gedeelte van de uitstroomtijd de fakkel zo ongeveer de maximale lengte hebben.

Tabel 17 Fakkellengte LH2 bij 2" gatgrootte.

Diameter gat	2"	
Initiële uitstroomsnelheid bij 2000 C	8.7 kg/s (=541 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	531 s	
Initiële lengte fakkel	74 m	
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Rookgassnelheid	8.0 m/s	5.3 m/s

Samenvattend

100% letaliteit over de lengte van de fakkel ($L_3 = 74$ m - fakkel “naar achteren”; $L_4 = 74$ m - fakkel “naar voren”). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een brand van 1000 MW.

In het secundaire effectgebied (L_2 en L_5) zal de letaliteitsgrens toenemen met de rookgassnelheid vermeerderd of verminderd met de luchtverplaatsingssnelheid. De mogelijkheden tot evacuatie ($T_{instructie}$, $T_{uitstap}$, loopsnelheid, afstand tot vluchtdeuren) bepalen dan het aantal personen in het secundaire letaliteitsgebied.

3.6.3 LNG

De gevolgen van warmteproductie door de fakkel kunnen we ook hier weer modelleren als een brand. Methaan produceert 50 MJ aan energie per kg bij verbranding. Bij de uitstroomsnelheid van 21.8 kg/s betekent dit dus een warmteproductie van bijna 1100 MW!

Ook hier is door de verbranding en de uitzetting als gevolg van de hoge temperatuur (800 °C, zie ook [2]) de uitstroomsnelheid, gemeten in m³/s, naar verhouding groot. Niettemin zullen voor LNG, bij een gatgrootte van 2", de hete rookgassen zich met een lagere snelheid door de tunnel verspreiden dan 2 m/s, de snelheid van luchtverplaatsing in de tunnel gedurende de eerste twee minuten na het incident. De rookgassen zullen dus niet het verkeer bovenstrooms van de ongevallocatie bereiken. Dit betekent dat alleen bij een file benedenstrooms slachtoffers zullen vallen a.g.v. hete verbrandingsgassen. Indien na 2 minuten de ventilatie niet wordt ingeschakeld, zal er rookgas stroomopwaarts worden verspreid. Aangezien deze snelheid mogelijk groter is dan de vluchtsnelheid moet vanaf dit moment met een opschuivend letaliteitfront rekening worden gehouden, waarbij dan dezelfde overweging een rol spelen als hiervoor voor LH2 beschreven. Doordat de uitstromende flux van gas relatief langzaam daalt (zie Figuur 6) zal gedurende een groot gedeelte van de uitstroomtijd de fakkel zo ongeveer de maximale lengte hebben.

Tabel 18 Fakkellengte LNG bij 2" gatgrootte.

Diameter gat	10 mm	
Initiële uitstroomsnelheid bij 800 C	21.8 kg/s (=120 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	775 s	
Initiële lengte fakkel	79 m	
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Rookgassnelheid	1.7 m/s	1.2 m/s
Rookgassnelheid na 2 minuten	1.7 m/s	1.2 m/s

Samenvattend:

Bij aanwezigheid van 2 m/s luchtverplaatsing:

1. File benedenstrooms

Eerst zal 100% letaliteit worden aangenomen over de lengte van de fakkel (L_3 of $L_4 = 79$ m, afhankelijk van fakkelrichting). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een brand van 1100 MW. Vervolgens zal het 'letaliteitsfront' opschuiven met de rookgassnelheid vermeerderd of verminderd met de ventilatiesnelheid. Bij 2 m/s zullen de rookgassen alleen het gedeelte benedenstrooms bereiken. Mogelijkheden tot evacuatie ($T_{\text{instructie}}$, T_{uitstap} , loopsnelheid, afstand tot vluchtdeuren) bepalen dan het aantal personen in het letaliteitsgebied.

2. Geen file benedenstrooms en fakkel "naar achteren":

Eerst zal 100% letaliteit worden aangenomen over de lengte van de fakkel ($L_3 = 79$ m). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een brand van 1100 MW. Verbrandingsgassen worden met de rijwind stroomafwaarts meegenomen, waardoor er in de secundaire effectgebieden hierdoor geen slachtoffers vallen.

3. Geen file benedenstrooms en fakkel "naar voren":

De gevolgen van hittestraling voor de file achter het incident kunnen worden gemodelleerd met een brand van 1100 MW.

Bij geen of lage luchtverplaatsingssnelheid:

Eerst zal 100% letaliteit worden aangenomen over de lengte van de fakkel (79 m) en worden de gevolgen van hittestraling gemodelleerd met een brand van 1100 MW. zal het 'letaliteitsfront' opschuiven met de rookgassnelheid, eventueel vermeerderd of verminderd met de ventilatiesnelheid. Wel of geen file stroomafwaarts en mogelijkheden tot evacuatie ($T_{\text{instructie}}$, T_{uitstap} ,

loopsnelheid, afstand tot vluchtdeuren) bepalen dan het aantal personen in het secundaire effect (letaliteit)gebied.

3.6.4 Scenario 6 en het achtergronddocument

Dit scenario vertoont grote overeenkomsten met de grote continue uitstroming met directe ontsteking van GF (§8.5.1) uit het achtergronddocument [2]. Hoewel voor LPG een brand van 1400 MW wordt voorgesteld lijken de effecten toch iets minder ernstig. Voor zowel LH2 als CNG is de fakkel wat langer en voor LH2 zullen de hete rookgassen zich ook stroomopwaarts van de ventilatierichting bewegen. Als conservatieve aanname lijkt het dan ook het beste om de gegevens voor waterstof als uitgangspunt te nemen.

3.7 Conclusie GFOL

De resultaten zijn samengevat in Tabel 19. Meer nog dan bij GFOP vertonen de scenario's die bij deze wijze van vervoer horen grote overeenkomsten met het vervoer van tot vloeistof verdichte brandbare gassen (GF). De gevolgen van een BLEVE en instantaan vrijkomen met vertraagde ontsteking zijn gelijk doordat de tunnel zal bezwijken en eenieder in de tunnel plus in een gebied 150 m buiten de tunnel zal omkomen. Hiervoor kunnen dan ook de gevolgen uit de bestaande berekeningen voor GF worden gebruikt.

Bij continue uitstroming en vertraagde ontsteking is de aanname voor GF dat altijd de tunnel zal bezwijken en tot 150 m buiten de tunnel eenieder komt te overlijden een goed (enigszins conservatief) uitgangspunt.

Voor fakkels (continue uitstroming, directe ontsteking) is het GF scenario te optimistisch. De fakkellengte is wat aan de korte kant (59 m voor propaan versus 74 en 79 m voor waterstof en methaan respectievelijk). De snelheid waarmee de hete verbrandingsgassen zich door de tunnel verplaatsen is groter dan de initiële luchtverplaatsingssnelheid (2 m/s) en groter dan 1 m/s (13.5 m brede tunnel) en 1.6 m/s (9 m brede tunnel) voor propaan. Hierdoor zullen er stroomopwaarts van de fakkel slachtoffers vallen en zullen er stroomafwaarts meer slachtoffers vallen dan bij GF. Aparte waardes voor GFOL zijn derhalve wenselijk. Mogelijk kan dan de schadeafstanden van LNG worden gehanteerd voor zowel LNG als LH2, waardoor ook deze categorieën kunnen worden gebundeld.

Aangezien dit vervoer plaatsvindt in druktankwagens, kunnen de hiervoor in [2] afgeleide kansen en frequenties worden gebruikt.

Tabel 19 Overzicht van de gevolgen en frequenties van de scenario's voor GFOL. L1 – L6 en P1 – P6 refereren naar de notatie in [2]

[illegible]

GFOL	P(scenario)		condities	Type effect en P(effect)	Lengte deelgebieden (m)						Overlijdenskans						
Scenario					L1	L2	L3	L4	L5	L6	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
6: Continue uitstroming - Directe ontsteking - Fakkel	= F(letsel)*0.39*0.3*0.65*0.8	LH2	File benedenstroom s en fakkel “naar achteren”	hitte en fakkel	0	1000MW brand (hitte en rookgas)	74	1000MW brand (hitte en rookgas)		0	0	1	1	1		0	
			File benedenstroom s en fakkel “naar voren”:		0	1000MW brand (hitte en rookgas)		74	1000MW brand (hitte en rookgas)		0	0	1		1	1	0
			Geen file benedenstroom s en fakkel “naar achteren		0	1000MW brand (hitte en rookgas)	74	0	0	0	0	1	1	0	0		
			Geen file benedenstroom s en fakkel “naar voren”:		0	1000MW brand (hitte en rookgas)		0	0	0	0	1		0	0	0	
		LNG	file benedenstroom s en fakkel naar achteren	0	1100MW brand (hitte)	79	1100MW brand (hitte en rookgas)		0	0	1	1	1		0		
			File benedenstroom s en fakkel “naar voren”:	0	1100MW brand (hitte)		79	1100MW brand (hitte en rookgas)	0	0	1		1	1	0		
			Geen file benedenstroom s en fakkel “naar achteren”	0	1100MW brand (hitte)	79	0	0	0	0	1	1	0	0	0		
			Geen file benedenstroom s en fakkel “naar voren”:	0	1100MW brand (hitte)		0	0	0	0	1		0	0	0		

*In het achtergronddocument [2] wordt uitsluitend dit gevolg voor dit scenario bij GF gehanteerd.

4 GNRP: N₂ en CO₂ onder druk

Het betreft hier in gascilinders (flessen) van 50 l onder hoge druk vervoerd N₂ en CO₂. De uitgangspunten die zijn gebruikt bij de berekening van de effecten zijn weergegeven in Tabel 20.

Tabel 20 Vervoergegevens gebruikt bij de berekening van de effecten voor onder druk in flessen vervoerde niet brandbare gasen.

wegtransport gasflessen CO ₂ en N ₂	N ₂ [4]	CO ₂ [11]
inhoud tank / fles (typisch) (kg of m ³)	50 l (9.6 Nm ³)	50 l
lengte tank / fles	1.8 m	1.8 m
breedte tank / fles	25 cm	25 cm
hoogte tank / fles	25 cm	25 cm
doorsnede tank / fles	25 cm	25 cm
maximaal vulpercentage	100%	76%
doorsnede grootste aansluiting / (vul)opening	1/4 " (6.35 mm)	7.5 mm
doorsnede afblaasopening (veeriligheid o.i.d.)	geen veeriligheid aanwezig	geen veeriligheid aanwezig
druk (typisch) (bar of Pa)	200 bar (max)	50-70 bar (250 bar max)
druk (max) (bar of Pa)	400 bar (barstdruk) ⁵	400 bar (barstdruk) ⁵
temperatuur	15 °C	15 °C

De scenario's in de vorm van gebeurtenissenboom zijn weergegeven in Figuur 7. Deze zijn goed vergelijkbaar met de scenario's van de onder druk vervoerde brandbare gasen (Hoofdstuk 2). Conform [2] is een letselongeval als startpunt genomen. Pechgevallen of ongevallen met uitsluitend materiële schade (UMS) leiden hierbij niet tot het vrijkomen van gevaarlijke stoffen. Verder zal volledig falen door externe impact niet voorkomen. Door het relatief lage gewicht en beperkte omvang zal een dergelijke fles bij een impact die volledig falen kan veroorzaken waarschijnlijk als geheel worden 'weggeduwd', waardoor mogelijk de kop zal afbreken. Dit scenario is dan ook onderdeel van het scenario "afbreken kop / aansluiting" (scenario 2). De takken van de gebeurtenissenboom worden hieronder besproken.

Scenario's / gebeurtenissenboom

ongeval met letsel (F _{letsel})	ext brand (Pb)	volledig falen fles (Pvb)	1. Fysische explosie (druk) en scherven
		niet falen (1-Pvb)	geen
	geen ext brand (1-Pb)	afbreken kop / aansluiting continue uitstroming (Pc)	gaswolk 2. projectiel
		niet falen (1-Pvb)	geen

Figuur 7 Gebeurtenissenboom voor onder druk in 50 l vervoerde niet brandbare gasen; tussen haakjes zijn de (vervolg)kansen aangegeven.

4.1 Scenario 1: Instantaan falen- Externe brand – Fysische explosie

In Tabel 21 zijn de resultaten van de berekeningen met EFFECTS weergegeven.

⁵ Hierover zijn geen gegevens bekend. Daarom is dezelfde waarde gebruikt als in Tabel 2.

Tabel 21 Berekeningsresultaten voor instantaan vrijkomen van CO₂ en N₂.

Stof	CO ₂		N ₂	
Totale vrijgekomen massa	32.8 kg (17.7 m ³)		12.6 kg (10.5 m ³)	
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Percentage gas in lucht op t=0	26 %	17 %	15 %	12 %

Uit de berekeningen blijkt dat het gas hooguit 1/4^e van de lucht (gedurende korte tijd, hooguit enkele seconden) zal verdringen. Hierdoor zal de zuurstofconcentratie kortstondig tot ca. 15% zakken, waarna deze door de luchtstroming weer snel zal oplopen. Dit leidt derhalve niet tot slachtoffers. Ook toxische effecten van CO₂ (zie verderop) worden niet verwacht: Gedurende het korte tijdsbestek dat het incident plaatsvindt bevinden de overige weggebruikers zich nog in de auto's. Tegen de tijd dat zij mogelijk uitstappen zal het CO₂ reeds verdund zijn met de aangevoerde lucht.

Overdrukken die ontstaan zijn volgens EFFECTS, door de geringe inhoud van de flessen, verwaarloosbaar.

Door de kleine inhoud is EFFECTS niet in staat om uit te rekenen met welke snelheid de fles wordt gelanceerd. Er zijn echter praktijkvoorbeelden waarbij een dergelijke fles over enkele honderden meters werd weggeslingerd. Derhalve zullen we er vanuit gaan dat 1 auto door de fles wordt geraakt. Gezien het relatief lage gewicht van de fles (60 kg) zal naar verwachting de auto voldoende bescherming bieden om dodelijke slachtoffers te voorkomen.

4.2 Scenario 2: Afbreken kop of aansluiting- Continue uitstroming - Projectiel

In Tabel 22 zijn de resultaten van de berekeningen met EFFECTS weergegeven.

Tabel 22 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van CO₂ en N₂ uit een gat ter grootte van de grootste aansluiting.

Stof	CO ₂		N ₂	
Initiële uitstroombelasting	0.72 kg/s (=0.4 m ³ /s)		0.95 kg/s (=0.81 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	85 s		79 s	
Totale vrijgekomen massa	32.8 kg		12.6 kg	
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Percentage gas in lucht op t=0	0.5 %	0.4 %	1.2 %	0.8 %

De uitstroming van de gassen zal slechts tot geringe verdringing van zuurstof leiden. Hierdoor zullen er geen slachtoffers vallen.

Voor de effecten van lancering kan dezelfde redenering worden aangehouden als bij het vorige scenario. Er zullen hier naar verwachting geen dodelijke slachtoffers door vallen.

4.3 Conclusie GNRP

Ongevallen met in 50 liter flessen vervoerd gasvormig N₂ en CO₂ zullen niet tot letale slachtoffers leiden. Derhalve hoeven voor deze stoffen geen scenario's in [2] worden toegevoegd.

5 GNRL: CO₂ en N₂ tot vloeistof gekoeld

Dit betreft de tot vloeistof gekoelde, in bulk vervoerde, niet toxische gassen N₂ en CO₂. De uitgangspunten die zijn gebruikt bij de berekening van de effecten zijn weergegeven in Tabel 23. Deze stoffen worden al geruime tijd in bulk vervoerd, maar worden niet tot de 'gevaarlijke stoffen' gerekend, waardoor ze in traditionele risicoberekeningen niet worden beschouwd.

Tabel 23 Vervoergegevens gebruikt bij de berekening van de effecten voor tot vloeistof gekoelde niet brandbare gassen.

Tot vloeistof gekoeld bulktransport CO ₂ en N ₂	vloeistof (tanks)	
	N ₂	CO ₂
inhoud tank	50 m ³	28 m ³
lengte tank / fles (m)	13	12
breedte tank / fles (m)	2.5	2.5
hoogte tank / fles (m)	2.5	2.5
doorsnede tank / fles (m)	2.5	2.5
maximaal vulpercentage	95%	95%
doorsnede grootste aansluiting / (vul)opening	2"	2"
doorsnede afblaasopening (veerveiligheid o.i.d.)		1 " (2 x2 per tankauto)
afblaasdruk veerveiligheid	3 bar	26 bar
druk (typisch) (bar of Pa)		14-15 bar
druk (max) (bar of Pa)	3 bar	26 bar
temperatuur	-196 C	-20 C
wanddikte tank	1 cm	

De scenario's in de vorm van gebeurtenissenboom zijn weergegeven in Figuur 8. Dit transport zal plaatsvinden in druktankwagens, hetgeen toepassing van de aannames voor falen van dergelijke tanks in het achtergronddocument [2] rechtvaardigt. Weer is een letselongeval als startpunt genomen. Pechgevallen of ongevallen met uitsluitend materiële schade (UMS) leiden hierbij niet tot het vrijkomen van gevaarlijke stoffen, conform [2]. De verschillende takken van de gebeurtenissenboom worden hieronder besproken.

Scenario's/ gebeurtenissenboom			effecten	
ongeval met letsel + Uitstr >100kg ($F_{letsel} \cdot 0.039$)	relevante uitstroming (0.3)	volledig falen tank in externe brand (0.245)	BLEVE (CO ₂) verdamping (N ₂) vanuit 'plas'	1. N ₂ : vorming verstikkende wolk. CO ₂ : warme BLEVE
		volledig falen tank geen externe brand (0.105)	gaswolk, sublimatie (CO ₂) verdamping (N ₂) vanuit 'plas'	2. vorming verstikkende wolk, mist
		continue uitstroming uit 2" gat (0.65)	gaswolk, sublimatie (CO ₂) verdamping (N ₂) vanuit 'plas'	3. vorming verstikkende wolk, mist
	Niet relevante uitstroming (0.7)			geen

Figuur 8 Gebeurtenissenboom voor tot vloeistof gekoelde niet brandbare gassen CO₂ en N₂; tussen haakjes zijn de (vervolg)kansen aangegeven.

5.1 Scenario 1: Instantaan falen – Externe brand

5.1.1 Vervolgkansen

Voor de kansen geldt (zie tabel 3.9 en fig. 4.1 in [2]):

- Kans op ongeval met letsel en significante uitstroming = $F_{\text{letsel}} * P_{\text{uit, druk}} = F_{\text{letsel}} * 0.039$
- vervolgkansen op significante uitstroming = 0.3
- CO₂: vervolgkansen op volledig falen in externe brand (warme BLEVE) = $0.35 * P_{\text{warm}} = 0.35 * 0.7 = 0.245$
- N₂: vervolgkansen op volledig falen = 0.35 (scenario's 1 en 2 tezamen, wel of geen brand)

Gevolgen CO₂: Warme BLEVE

De gevolgen van een warme BLEVE van CO₂ komen overeen met die bij een BLEVE van toxische gassen (ammoniak) zoals beschreven in par. 8.6 van het achtergronddocument [2]. Dit betekent 100% letaliteit in de gehele tunnelbuis plus een gebied van 150 m daarbuiten. Slachtoffers a.g.v. brokstukken zijn nu niet meer van belang.

Gevolgen N₂

Voor N₂ zijn de gevolgen hetzelfde voor falen met en zonder brand. Deze zullen bij scenario 2 worden besproken.

5.2 Scenario 2: Instantaan falen - geen brand

5.2.1 Koude BLEVE CO₂

Zoals uiteengezet in § 3.2 zal een BLEVE met substantiële blasteffecten alleen optreden indien de tankinhoud een temperatuur heeft die hoger is dan de homogene nucleatietemperatuur die i.h.a. op ongeveer 90% van de kritische temperatuur ligt. In Tabel 12 zijn de relevante temperaturen voor CO₂ gegeven. Hieruit blijkt dat er geen koude BLEVE zal optreden.

Tabel 24 Kritische temperatuur en homogene nucleatie temperatuur voor kooldioxide.

Stof	Kritische temperatuur (°C)	Homogenen nucleatie temperatuur (90% van kritische temperatuur aangenomen) (°C)	Temperatuur bij vervoer
CO ₂	31.1 °C	1 °C	-20 °C

Beneden de homogene nucleatietemperatuur zal alleen de in de tank aanwezige gasfractie expanderen en bij instantaan vrijkomen tot drukeffecten leiden. Deze gasfractie zal geen overdruk van betekenis veroorzaken. Het resterende (overgrote) gedeelte (de vloeibare fractie) zal instantaan vrijkomen, deels verdampen en een plas vormen. Dit is beschreven in de volgende paragraaf.

5.2.2 Instantaan vrijkomen CO₂ en N₂

In Tabel 25 zijn de resultaten van de berekeningen met EFFECTS weergegeven.

Tabel 25 Berekeningsresultaten voor instantaan vrijkomen van CO₂ en N₂.

Stof	CO ₂		N ₂	
Totale vrijgekomen massa	27495 kg		38455 kg	
hoeveelheid instantaan verdampt	24364 kg (=13049 m ³ bij 12 °C; = 8725 m ³ bij -79 °C)		35 kg (=29.4 m ³ bij 12 °C)	
hoeveelheid als vloeistof vrijgekomen	3131 kg (=3.24 m ³ bij -79 °C, wordt vaste stof)		38420 kg (=47.5 m ³ bij -196 °C)	
Temp. Plas	-79 °C		-196 °C	
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Tunnelbreedte	9 m	13.5 m	9 m	13.5 m
Tunneldoorsnede	45 m ²	67.5 m ²	45 m ²	67.5 m ²
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's	34 m ²	51 m ²	34 m ²	51 m ²
Initiële lengte gaswolk (100 % gas)	257 m (-79 °C) 384 m (12 °C)	171 m (-79 °C) 255 m (12 °C)	0.9 m	0.6
Plasoppervlak bij 1 cm plasdikte (bij CO ₂ : vaste stof)	324 m ² (=9 m * 36 m)	324 m ² (= 13.5 m * 24 m)	4750 m ² (=9 m * 527 m)	4750 m ² (= 13.5 m * 352 m)

CO₂ komt vrijwel geheel instantaan in de dampfase. In de 9 m brede tunnel kan het dan over een lengte van 257 tot 384 m de lucht volledig verdringen. Voor de 13.5 m brede tunnel is dit 171 tot 255 m. In dit gebied is dan alle zuurstof verdrongen en zal er mist hangen. Bij 2 m/s luchtstroming zal het dan 1.5 tot 3 minuten duren alvorens de lucht ververst is⁶. Personen zullen zeker onwel worden en mogelijk het bewustzijn verliezen door de afwezigheid van zuurstof.

Hoewel CO₂ als niet toxisch wordt gekwalificeerd, zijn er aanwijzingen dat deze stof ook toxische effecten kan hebben die al levensbedreigend kunnen zijn nog voordat de zuurstofconcentratie te laag wordt [17]. In de literatuur voor QRA's van CO₂-pijpleiding kunnen drie probit-relaties voor CO₂ worden gevonden:

- $Pr = 4.45 + \ln(C^{5.2} \times t)$; (C in kg/m³, t in s), afgeleid door TNO [19];
- $Pr = -90.80 + 1.01 \ln(C^8 \times t)$; (C in ppm, t in min), afgeleid door de Engelse HSE (zie bijv. [18]);
- $Pr = -90.80 + 1.01 \ln(C^8 \times t)$; (C in ppm, t in min), afgeleid door Tebodin [20].

Op basis van al deze relaties kan worden afgeleid dat eenieder in de (100%) gaswolk zal komen te overlijden. Zelfs de meest kortstondige blootstelling aan 100% CO₂ is letaal. Door het instantane falen zal de wolk zich aanvankelijk half beneden- en half bovenstrooms van het ongeval bevinden. Daarna zal deze met de rijwind of tunnelventilatie in benedenstroomse richting worden afgevoerd. Dit betekent het volgende voor slachtoffers:

- Geen file benedenstrooms: 100% letaliteit over de halve wolklengte bovenstrooms (tot 192 m bij een 9 m brede tunnel).
- Wel file benedenstrooms: In aanvulling op deze slachtoffers bovenstrooms zullen alle aanwezigen in de tunnel benedenstrooms komen te overlijden aangezien de 100% gaswolk over deze file wordt geblazen.

EFFECTS bevat geen modellen voor sublimatie. In [8], een artikel om de sublimatiesnelheid van verpakt droogijs vast te stellen, wordt een gemiddelde waarde van 2% per uur gehanteerd. Bij een groot oppervlak zal verdamping

⁶ In deze gevallen verdient het dus aanbeveling om in de auto (die zal afslaan, maar waar mogelijk nog zuurstof in de cabine aanwezig is) te blijven zitten en eerst na enkele minuten uit te stappen.

waarschijnlijk sneller gaan. Maar gezien de kleine hoeveelheid vast CO₂ zal sublimatie de gevolgen niet beïnvloeden.

N₂ zal voor een klein deel meteen verdampen en komt voor het overgrote deel als vloeistof op de tunnelvloer en tegen de tunnelwand terecht. Gezien echter het grote temperatuurverschil tussen de tunnel (zeg 12 °C) en de vloeibare stikstof (-196 °C) zal een aanzienlijk deel van de (zich verspreidende plas) zeer snel verdampen. Het valt niet te voorspellen hoeveel dit zal zijn, maar er zal zeker mistvorming optreden en mogelijk zal er hierdoor ook een verstikkende atmosfeer ontstaan, totdat deze met de luchtstroming is weggevoerd⁶. Aangezien er geen toxische effecten optreden vallen er naar verwachting geen letale slachtoffers, tenzij de tunnelventilatie uitvalt en de verstikken gassen zich in de tunnel kunnen ophopen.

5.2.3 Vervolgkansen

Voor de kansen geldt (zie tabel 3.9 en fig. 4.1 in [2]):

- Kans op ongeval met letsel en significante uitstroming = $F_{\text{letsel}} * P_{\text{uit, druk}} = F_{\text{letsel}} * 0.039$
- vervolgkans op significante uitstroming = 0.3
- CO₂: vervolgkans op volledig falen (geen brand) = $0.35 * (1 - P_{\text{warm}}) = 0.35 * (1 - 0.7) = 0.105$
- N₂: vervolgkans op volledig falen = 0.35 (scenario's 1 en 2 tezamen, wel of geen brand)

5.3 Scenario 3: Continue uitstroming uit 2" gat

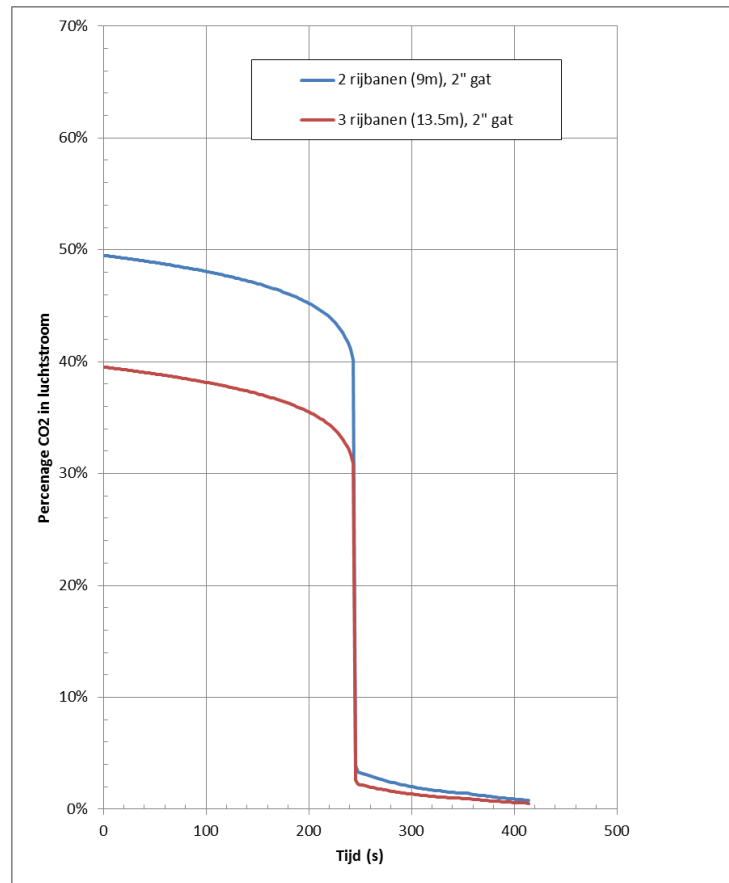
In Tabel 22 zijn de resultaten van de berekeningen met EFFECTS weergegeven.

Tabel 26 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van CO₂ en N₂ uit een gat met 2" diameter.

Stof	CO ₂		N ₂	
Initiële uitstroomsnelheid uit 2" gat.	126.36 kg/s (=66.9 m ³ /s) gas		10.3 kg/s (vloeibaar N ₂)	
Totale uitstroomtijd	414s		Ca. 100 min.	
Totale vrijgekomen massa	27350 kg		38530 kg	
Tunnelbreedte	9 m	13.5 m	9 m	13.5 m
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Max. percentage gas in lucht	49.5 % (t = 0)	39.5 % (t = 0)	Ca. 10% (vanaf ca. 10 min)	Ca. 7% (vanaf ca. 10 min)

5.3.1 CO₂

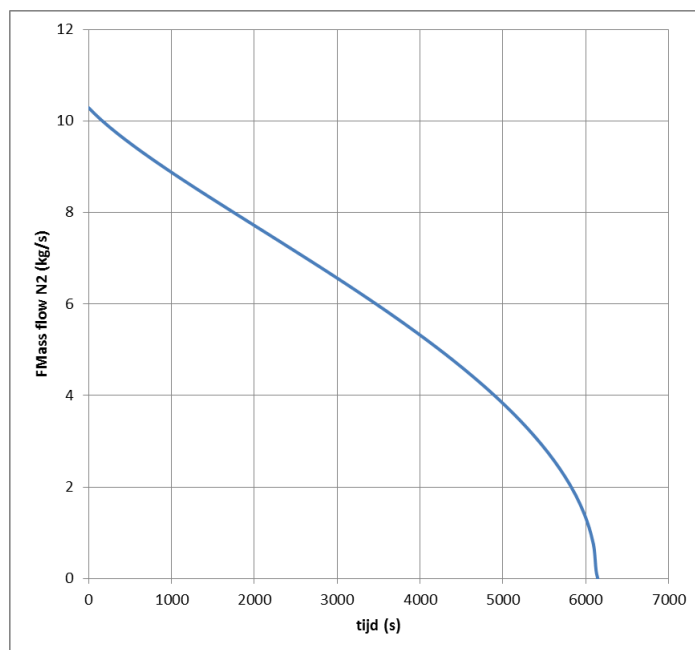
Bij vrijkomen zal het CO₂ volgens berekeningen met EFFECTS meteen in de gasfase overgaan. In Figuur 9 is het percentage CO₂ in de lucht aangegeven bij opmenging van het vrijkomende gas met de inkomende luchtstroom van 2 m/s. Tot ca. 4 minuten na het ongeval wordt 40-50% van de lucht verdrongen door de CO₂. Volgens de bij scenario 1 en 2 afgeleide probit functies (§ 5.2.2) zijn dit dodelijke percentages, zelfs bij zeer korte blootstellingstijden. De gasstroom zal met de luchtstroming mee worden gevoerd stroomafwaarts van het incident. Stroomopwaarts zullen er derhalve geen slachtoffers vallen. Mocht er echter een file benedenstrooms staan, dan zal eenieder die zich daar bevindt komen te overlijden.



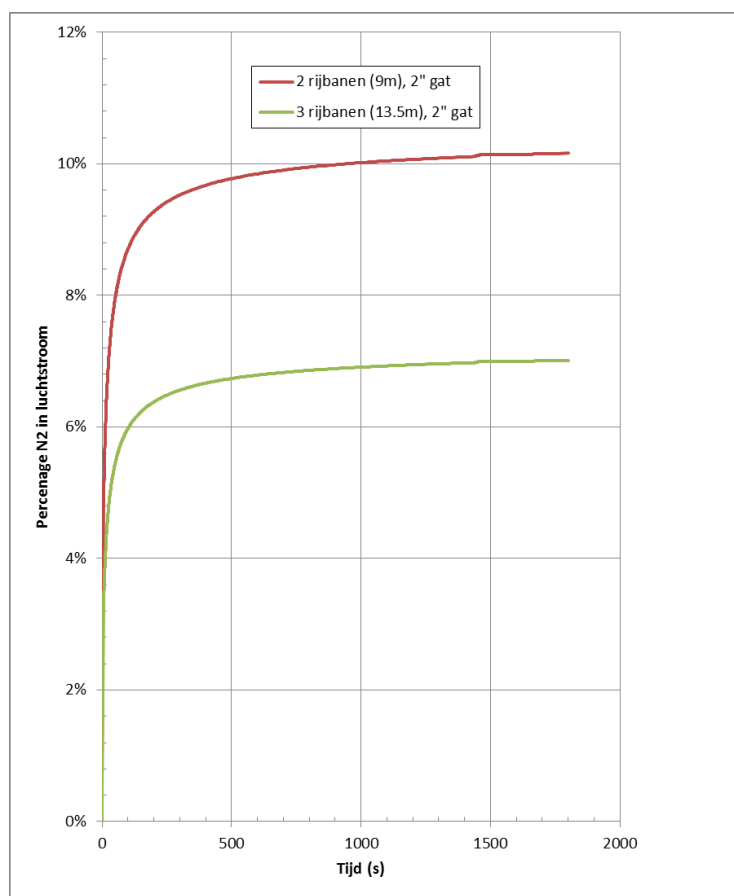
Figuur 9 Percentage CO₂ in de luchtstroom bij continue uitstroming uit een tank met een gat van 2".

5.3.2 N₂

Stikstof zal als een vloeistof vrijkomen uit de tank en een plas gaan vormen die snel zal gaan verdampen. In Figuur 10 is de uitstroomsnelheid van de vloeibare N₂ weergegeven. In Figuur 11 de verdamping gegeven uit de ontstane plas gedurende de eerst 30 minuten. Als gevolg van een groter wordende plas zal de verdamping aanvankelijk toenemen. Na verloop van tijd zal, door de afnemende uitstroomsnelheid van vloeibaar N₂, de verdamping weer afnemen. Na ca. 10 minuten wordt een maximale verdampingssnelheid bereikt. Het plasoppervlak is dan volgens EFFECTS ca. 160 m². Figuur 11 laat duidelijk zien dat de hoeveelheid N₂ die aan de luchtstroom wordt toegevoegd maximaal ca. 10% is. Deze zal geen verstikking veroorzaken. Wel zal er weer mistvorming optreden. Door het koude N₂ kan de luchttemperatuur in de 9 m brede tunnel tot ca. -8 °C dalen. In de 13.5 m brede tunnel zal de temperatuur tot ca. -2 °C dalen. Indien de tunnelventilatie uitvalt kan mogelijk wel een verstikkende atmosfeer ontstaan, met mogelijk letale slachtoffers.



Figuur 10 Uitroomflux (vloeibaar) N₂ uit 2" gat.



Figuur 11 Percentage verdampt N₂ dat in de luchtstroom wordt bijgemengd bij continue vloeistof uitstroming uit een tank met een gat van 2".

5.3.3 Vervolgkansen

Voor de kansen geldt (zie tabel 3.9 en fig. 4.1 in [2]):

- Kans op ongeval met letsel en significante uitstroming = $F_{\text{letsel}} * P_{\text{uit, druk}} = F_{\text{letsel}} * 0.039$
- vervolgekans op significante uitstroming en pijpbreuk = 0.65 (zie fig. 4-1 in [2])

5.4 Conclusie GNRL

N₂:

Ongevallen met bulkvervoer van tot vloeistof gekoeld N₂ kan leiden tot situaties waarin personen enkele minuten aan een verstikkende (niet toxische) en koude atmosfeer worden blootgesteld. Hierdoor kan men onwel worden, maar indien de tunnelventilatie niet wordt uitgeschakeld zal dit naar verwachting niet tot letale verwondingen leiden. Wel kunnen er bevroeringsverschijnselen optreden. Indien echter de tunnelventilatie uitvalt kunnen dodelijke slachtoffers vallen a.g.v. verstikking.

Niettemin verdient het aanbeveling om nader onderzoek te doen naar de gevolgen van het vrijkomen van grote hoeveelheden cryogene vloeistoffen, waarbij in het bijzonder wordt gekeken naar:

- De verstikkende atmosfeer
- De invloed van de extreem koude vloeistof op aanwezigen en mogelijk getroffen installaties
- De verdamping / warmteopname vanuit de omgeving
- Zichtbeperking door mistvorming die vluchten hindert.

CO₂:

Er vanuit gaande dat CO₂ toxisch eigenschappen heeft, die kunnen worden beschreven met de (voor toxische stoffen gebruikelijke) probit functies zoals beschreven in dit hoofdstuk kunnen ongevallen met bulktransporten van CO₂ in tunnels tot letale slachtoffers leiden.

In Tabel 27 zijn de resultaten voor CO₂ samengevat. Dit transport zal plaatsvinden in druktankwagens, hetgeen toepassing van de aannames voor falen van dergelijke tanks in het achtergronddocument [2] rechtvaardigt.

Tabel 27 Overzicht van de gevolgen en frequenties van de scenario's voor GNRL (CO₂). L1 – L6 en P1 – P6 refereren naar de notatie in [2]

GNRL	P(scenario)		condities	Type effect en P(effect)	Lengte deelgebieden (m)						Overlijdenskans					
Scenario					L1	L2	L3	L4	L5	L6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1: Instantaan falen – Externe brand	= $F(\text{letsel}) \cdot 0.39 \cdot 0.3 \cdot 0.245$	CO2		Warme BLEVE / hitte en druk	als bij een warme BEVE van toxische gassen (GT)											
2: Instantaan falen - geen brand	= $F(\text{letsel}) \cdot 0.39 \cdot 0.3 \cdot 0.105$	CO2	Geen file benedenstrooms	Toxische wolk	0	0	192 m	0	0	0	0	0	1	0	0	0
			File benedenstrooms		0	0		Gehele lengte		0	0	0	1	1		0
3: Continue uitstroming uit 2" gat	= $F(\text{letsel}) \cdot 0.39 \cdot 0.3 \cdot 0.65$	CO2	Geen file benedenstrooms	Toxische wolk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			File benedenstrooms		0	0	0	Gehele lengte		0	0	0	0	1		0

6 NR: CO₂ vast

Vast CO₂ wordt vervoerd in speciaal geïsoleerde containers bij temperaturen beneden de -78.5 °C in de vorm van brokken van verschillende grootte. De kleinste zijn ca. 3mm; de grootste wegen 13 kg [11]. Zelfs bij een hoeveelheid van 50 ton CO₂ leidt dit slechts tot het vrijkomen van 278 g/s, ofwel zo'n 150 l/s. Deze hoeveelheid valt in het niet bij de 68 resp. 102 m³/s luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid in de tunnel met 2 resp. 3 rijstroken. Het vrijkomen van het vaste CO₂ zal dan ook geen significante invloed hebben op de gevolgen bij een ongeval. Wel kunnen mogelijk de personen die direct in contact komen met de vrijkomende stukken CO₂ verwondingen oplopen als gevolg van bevriezing.

7 NR: Waterstof geadsorbeerd aan metaalhydride

7.1 Scenario

Hierbij is waterstof chemisch gebonden aan (veelal) vaste stoffen zoals as MgH_2 , NaAlH_4 , LiAlH_4 , LiH , LaNi_5H_6 , TiFeH_2 . Het zijn sterke bindingen, waarbij het waterstof alleen los kan worden gemaakt bij verhoogde temperaturen van 120 – 200 °C. Het zal duidelijk zijn dat bij een ongeval het waterstof niet vanzelf vrij zal komen en het zal dus geen gevaar opleveren voor de omgeving. Alleen in geval van brand zal het waterstof bijdragen aan de warmteontwikkeling.

Scenario:

1. Ongeval – brand – vrijkomen en verbranden H_2 .

7.2 Uitwerking

Nagegaan moet worden met welke van de in QRA-tunnels berekende voertuigbranden ([5] § 4.6) een dergelijke brand het meest overeenkomt. Deze kan dan als modelbrand worden gebruikt.

Vervoer van waterstof in deze vorm betekent i.h.a. vervoer van een unit die bij een klant wordt neergezet. Groottes kunnen erg wisselend zijn, maar van het totaal gewicht van een unit is ca. 1% waterstof [12]. Uitgaande van een maximum gewicht van 50 ton voor een vrachtauto, waarvan hooguit 40 ton beschikbaar is voor lading, betekent dit dat maximaal zo'n 400 kg waterstof vervoerd zou kunnen worden. Wat energie-inhoud betreft komt dit overeen met ca. 1000 kg benzine of ongeveer 2500 kg hout. Een goede vergelijking zou derhalve zijn een met brandbare goederen geladen vrachtauto, die een brand tot 50 MW kan veroorzaken. Aangezien H_2 "schoon" brandt (alleen waterdamp wordt gevormd) hoeft met toxische of irriterende rookgassen geen rekening te worden gehouden.

7.3 Conclusie

Een ongeval met een vrachtauto met aan metaalhydride geadsorbeerd waterstof zal niet tot extra slachtoffers leiden buiten die afkomstig van de impact.

8 Gebruik van GF0P als brandstof

CNG en CH₂ worden, in Nederland vooral in bussen, al als brandstof toegepast. In Tabel 28 zijn de relevante gegevens voor de brandstoftanks, zoals bij de berekeningen gebruikt, weergegeven. Grootte en plaatsing van CNG tanks bij vrachtauto's zijn sterk afhankelijk van het type vrachtauto en de beschikbare ruimte voor de tanks. Volgens [3] wordt CH₂ in vrachtauto's (nog) niet toegepast, enerzijds omdat de ruimte voor de relatief grote tanks ten koste gaat van vrachtruimte en anderzijds omdat het belangrijkste voordeel, geen luchtvervuiling, vooral in stadse omgeving relevant is.

Bij bussen worden de tanks veelal op het dak geplaatst. Voor de berekeningen voor vrachtauto's en bussen is gebruik gemaakt van de gegevens van de tanks zoals deze op bussen worden toegepast. Voor personenauto's kon niet alle informatie worden achterhaald. Bij de berekeningen is in eerste instantie uitgegaan van schattingen of is gebruik gemaakt van dezelfde gegevens als bij bussen. Indien de uitkomst erg gevoelig bleek voor de waarde van een bepaalde parameter is een conservatieve(re) waarde gebruikt voor de uiteindelijke berekeningen. Niet ingevulde waardes in de tabel zijn voor de berekeningen niet van belang.

Tabel 28 Gegevens van brandstoftanks voor CNG en CH₂.

brandstoftanks	CNG		CH ₂	
	Bussen en vrachtauto's ^(a)	personenauto	Bussen ^(b)	personenauto
inhoud tank / fles (typisch)	214 l [13] (~ 47 kg CNG)	20 kg [15] (~60 l bij 250 bar)	205 l [14] (~ 5 kg H ₂)	120 l / 5 kg H ₂ (700 bar) [3]
lengte tank / fles	1.818 m [13]	0.45 m ^(d)	2.05 m [14]	0.79 m ^(d)
doorsnede tank / fles	0.456 m [13]	0.41 m ^(d)	0.413 m [14]	0.44 m ^(d)
maximale vuldruk	260 bar referentie [14]		438 bar [14]	
doorsnede grootste aansluiting / (vul)opening	1.015 inch [13]	^(c)	1.125 of 2 " [14]	^(c)
doorsnede afblaasopening / veerveiligheid	6 mm [16]	^(c)	1 drukaflaat voor alle gekoppelde cilinders: 9 mm [16]	^(c)
afblaasdruk veerveiligheid	PRV opent bij 110 °C (R110) ^(e)	^(c)	PRV opent bij 110 °C ^(e)	^(c)
werkdruk (typisch)	200 bar bij 15 °C [13] [14]	200 of 250 bar [14]	350 bar [3]	250, 350, 700 bar [14]
temperatuur	-40 - 65 (gas), -40 - 82 (tank) [13] [14]		-40 - 85 °C [14]	
wanddikte tank / fles / container	min. 16 mm [13]			
wijze van plaatsing	pakket cilinders, liggend op dak [13]		8 cilinders in lengterichting liggend op dak [16]	
gewicht lege cilinder	75 kg [13]	40 kg ^(d)	86.4 kg [16]	40 kg ^(d)
faaldruk	470 bar [13] bij test als in R110			
Barstdruk (=afblaasdruk veerveiligheid)	350 bar	470 bar (250 bar werkdruk)	480 bar	1000 bar (700 bar werkdruk)
^(a) Grootte en plaatsing in vrachtauto's zijn sterk afhankelijk van type vrachtauto en beschikbare ruimte voor de gastank. Derhalve is hier alleen met tanks voor bussen gerekend. ^(b) brandstof wordt (nog) niet toegepast in vrachtauto's: a) te grote tanks, geen ruimte voor plaatsing; gaat ten koste van vracht; b) voordelen, zoals geen luchtvervuiling, zijn vooral in stadse omgeving relevant [3] ^(c) Waarde van bus genomen bij berekeningen ^(d) Geschatte waarde; deze is gebruikt bij berekeningen ^(e) Men kan zich afvragen of openen bij een bepaalde temperatuur wel het juiste criterium is. Bij een				

(vrij groot) pakket aan brandstofcilinders is het niet uit te sluiten dat (een deel van) de cilinders wel aan een brand wordt blootgesteld en, de zich op enige afstand bevindende, veerveiligheid niet, waardoor deze niet zal opengaan en de veerhitte cilinder uiteindelijk door de oplopende druk instantaan zal falen.

De scenario's in de vorm van gebeurtenissenboom zijn vrijwel gelijk aan die voor het bulkvervoer van deze stoffen. Ze zijn weergegeven in Figuur 12. De verschillende takken van de gebeurtenissenboom worden hieronder besproken. Omdat, in tegenstelling tot de transportcilinders, de brandstofcilinders wel van een veiligheidsventiel zijn voorzien, zal de kans op volledig falen in een externe brand kleiner zijn en de kans op een fakkel groter. In aanvulling hierop kunnen pechbranden en branden met uitsluitend materiële schade (UMS) ook een bijdrage aan de kans op een fakkel leveren. Om deze kans vast te stellen is aanvullend onderzoek nodig.

Scenario's / gebeurtenissenboom

ongeval met letsel (Fletsel)	ext brand (Pb)	Afblazen door veiligheidsventiel (Psv)	7. fakkel (hitte)
		volledig falen (Pvb)*	1. gaswolkexplosie (hitte en druk) en scherven
		niet falen (1-Pvb-Psv)*	geen
	geen ext brand (1-Pb)	volledig falen (Pvn)	(vertraagde) ontsteking (1) 2. gaswolkexplosie (hitte en druk) en scherven
		gaswolk	geen ontsteking (0) 3. geen
		afbreken kop / aansluiting continue uitstroming (Pc)	(vertraagde) ontsteking (0.2) 4. gaswolkexplosie (hitte en druk); projectiel
		gaswolk	directe ontsteking (0.8) 5. fakkel (hitte)
			geen ontsteking (0) 6. gelanceerd projectiel
pech of ongeval met UMS (Fpech+Fums)	Voertuigbrand (Pib)	niet falen (1-Pc-Pvn)	Geen
		Afblazen door veiligheidsventiel (Psv)	7. fakkel (hitte)
		niet falen (1-Pvb-Psv)*	geen

* Door aanwezigheid van een afblaasveiligheid is de kans op instantaan/volledig falen kleiner dan bij transportcilinders

Figuur 12 Gebeurtenissenboom voor gebruik van CNG en CH₂ als brandstof; tussen haakjes zijn de (vervolg)kansen aangegeven.

8.1 Scenario 1: Instantaan falen - Externe brand - Gaswolkexplosie

Indien de fles volledig faalt zal er een gaswolkexplosie optreden met druk- en hitteopbouw. Ook kunnen de scherven van de geëxplodeerde fles schade en letsel veroorzaken.

8.1.1 Kansen

Zoals gezegd wordt een letselongeval als uitgangspunt genomen. De vervolgkans zoals deze in het achtergronddocument [2] worden gebruikt (uitstroming van meer dan 100 kg en relevante uitstroming) zijn afgeleid voor een druktankwagen. Deze kunnen niet zondermeer worden toegepast op gasflessen. Voor de vaststelling van de vervolgkansen op externe brand (P_b) en volledig falen van de fles hierin (P_{vb}) is een aanvullende studie noodzakelijk.

Omdat, zoals gezegd, de brandstofcilinders van een veiligheidsventiel zijn voorzien, zal de kans op volledig falen in een externe brand kleiner zijn en de kans op een fakkel groter.

Dit betekent:

- Kans op ongeval met letsel = F_{letsel}
- vervol kans op brand = P_b
- vervol kans op volledig falen in externe brand (warme BLEVE) = P_{vb}

8.1.2 Waterstof (CH₂)

Bussen en vrachtauto's

Bij 350 bar bevat een fles met een inhoud van 205 liter 5 kg waterstof².

Berekeningen met EFFECTS tonen aan dat deze hoeveelheid gas bij instantane ontsteking een **vuurbal met een straal van 3.4 m** zal geven. Gezien de korte duur van de vuurbal is dit ook de letale schadeafstand voor brandwonden als gevolg van hittestraling. De gegenereerde warmte zal in aanvulling hierop tot een temperatuurverhoging in de tunnel leiden. Het is, zonder geavanceerde berekeningen, moeilijk te voorspellen hoe deze warmte zal worden gedissipeerd, maar het valt te verwachten dat over een aantal, wellicht enkele tientallen, meters de temperatuur aanzienlijk zal stijgen waardoor mogelijk slachtoffers vallen.

Dit is ook de letale schadeafstand voor brandwonden. Volgens EFFECTS zal de aanvankelijk zeer hoge druk (480 bar) snel afnemen en al binnen ca. 10 m zijn afgenomen tot ca. 0,4 bar. Tot deze druk kunnen autoruiten naar binnen worden gedrukt [9] met slachtoffers als gevolg. De drukimpuls is volgens EFFECTS maximaal 3.7 kPa.s. De maximale druk (480 bar) is weliswaar veel hoger dan de drukasymptoot gegeven in Tabel 3, maar de impuls is veel kleiner dan waarden in Tabel 3, die nodig zijn voor instorten. Hierdoor zal mogelijk op korte afstand van het ongeval wat schade aan de tunnel kunnen worden aangericht.

Er vanuit gaande dat openscheuren het faalmechanisme zal zijn van de fles [3] dan zullen flesdelen met bijna 160 m/s (ruim 560 km/h) worden gelanceerd. Vrijwel meteen na de explosie zullen deze delen de tunnelwand, het plafond of een andere auto raken. Het lijkt redelijk om er vanuit te gaan dat 1 auto door de fles (van ca. 85 kg) wordt geraakt, waarbij de inzittenden om het leven komen.

Personenauto's

Voor personenauto's kan het volgende worden berekend:

- Inhoud fles van 120 liter: 5 kg waterstof² (700 bar).
- Hitte: door hittestraling vuurbal: letale afstand 3.4 m; door sterk verhoogde temperatuur: enkele (tientallen) meters
- Maximale druk (bezwijkdruk); 1000 bar;
- Druk is tot 400 mbar gezakt na 11 m (afstand tot indrukken autoruiten)
- Max drukimpuls: 4 kPa s (dus geen constructieve schade)
- Snelheid waarmee fragmenten worden weggeslingerd: meer dan geluidssnelheid: Tank zit echter ingebouwd in auto. Deze zal wat bescherming bieden. Dus naar verwachting zullen rondvliegende delen geen letale slachtoffers eisen.

Samenvattend H₂:

Schadeafstand voor letaal letsel: door hitte: enkele (teintallen) meters; door ingedrukte autoruiten: 10 m bij bussen, 11 m bij personenauto's
Enige constructieve schade door overdrukken.

Schadeafstand door lancering gasfles van bus / vrachtauto: letaal letsel voor inzittenden van 1 personenauto.

8.1.3 CNG (methaan)

Bussen en vrachtauto's

Voor bussen en vrachtauto's kan het volgende worden berekend:

- Inhoud fles van 214 liter: 47 kg CNG² (200 bar).
- Hitte: door hittestraling vuurbal: letale afstand 5.9 m; door sterk verhoogde temperatuur: enkele (tientallen) meters
- Maximale druk (bezwijkdruk); 350 bar;
- Druk is tot 400 mbar gezakt na 11 m (afstand tot indrukken autoruiten)
- Max drukimpuls: 3.7 kPa s. (dus geen constructieve schade)
- Snelheid waarmee fragmenten worden weggeslingerd: ongeveer geluidssnelheid. Het lijkt redelijk om er vanuit te gaan dat 1 auto door de fles (van ca. 75 kg) wordt geraakt, waarbij de inzittenden om het leven komen.

Personenauto's

Voor personenauto's kan het volgende worden berekend:

- Inhoud fles van 60 liter: 20 kg CNG² (250 bar).
- Hitte: door hittestraling vuurbal: letale afstand 4.4 m; door sterk verhoogde temperatuur: enkele (tientallen) meters
- Maximale druk (bezwijkdruk); 470 bar;
- Druk is tot 400 mbar gezakt na 16 m (afstand tot indrukken autoruiten)
- Max drukimpuls: 2.3 kPa s. (dus geen constructieve schade)
- Snelheid waarmee fragmenten worden weggeslingerd: 940 m/s: Tank zit echter ingebouwd in auto. Deze zal wat bescherming bieden. Dus naar verwachting zullen rondvliegende delen geen letale slachtoffers eisen.

Samenvattend CNG:

Schadeafstand voor letaal letsel: door hitte: enkele tientallen meters; door ingedrukte autoruiten: 11 m bij bussen, 16 m bij personenauto's

Enige constructieve schade door overdrukken.

Schadeafstand door lancering gasfles van bus / vrachtauto: letaal letsel voor inzittenden van 1 personenauto.

8.1.4 Scenario 1 en het achtergronddocument

Evenals bij het transport van CH₂ en CNG zal het ook hier een tijd duren alvorens de gascilinders falen. Het ligt dan ook voor de hand om de gevolgen van dit scenario op dezelfde manier te behandelen als voor transport van gecompriëerde gassen (§ 2.1.4 hierboven en Tabel 7-3 en § 7.4 in het achtergronddocument [2]). Dit betekent dat de gevolgen zullen worden bepaald door de brand die uiteindelijk de cilinders zal doen falen vermeerderd met de door het verbrande gas gegenereerde warmte.

8.2 Scenario 2: Instantaan falen – Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie

Indien er geen externe brand is zal bij instantaan vrijkomen uit de fles de aanwezige lucht instantaan worden verdrongen door 100% gas.

8.2.1 Vervolgkans

De kans op dit scenario zal waarschijnlijk zeer klein zijn, omdat de cilinders voor grote drukken zijn ontworpen. Veeleer zal de “kop” of een aansluiting afbreken. Aanvullend onderzoek is nodig om de exacte kansen vast te stellen:

- Kans op ongeval met letsel = F_{letsel}
- vervolgcans op geen brand = $1 - P_b$
- vervolgcans op volledig falen = P_{vn}

8.2.2 Waterstof

Bus, vrachtauto en personenauto

De 5 kg H₂ (zie Tabel 28) zal bij expansie naar omgevingsdruk een volume hebben van 59 m³. Deze gaswolk zal met de lichtsnelheid in de tunnel worden meegenomen (2 m/s gedurende de eerste 2 minuten na het ongeval, zie [2]) en worden verdund / opgemengd met lucht. Voor de twee in [2] gebruikte tunneldoorsneden leidt dit tot de resultaten als gegeven in Tabel 29.

Tabel 29 Resultaten voor waterstof van scenario 2 op basis van gebruikte tunnelafmetingen in [2].

Tunnelhoogte (m)	5	
Tunnelbreedte (m)	9	13.5
Tunneldoorsnede (m ²)	45	67.5
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's (m ²)	34	51
Lengte H ₂ gaswolk meteen na vrijkomen (conc. = 100%) (m)	1.7	1.2
Min. lengte explosieve wolk (conc. = 75% UEL) (m)	2.3	1.5
Max. lengte explosieve wolk (conc. = 4% LEL) (m)	43	29

Uit Tabel 29 blijkt dat over enkele tientallen meters lengte in de tunnel een explosieve wolk kan ontstaan. Voor LPG wordt er in [2] vanuit gegaan dat een deflagratie zal ontstaan indien een explosieve wolk van meer dan 50 m ontstoken wordt. Voor waterstof, met een duidelijk hogere reactiviteit, kan dit reeds bij kortere wolk lengtes gebeuren [10].

Bij instantaan falen zal het waterstof zeer snel opmengen met de omgevingslucht en een groot gedeelte van het vrijgekomen waterstof zal zich al snel in het brede (4-75%) explosieve gebied bevinden. Het valt dan ook te verwachten dat de kritische lengte voor een deflagratie (minder dan 50 m), zeker bij de 9 m brede tunnel, al snel zal zijn bereikt. Vlak na het vrijkomen zal de gaswolk zich half beneden en half bovenstrooms van het verkeer in de tunnel bevinden. Bij een file benedenstrooms zal deze wolk met luchtstroom over de file worden geblazen en zeker worden ontstoken. Bij alleen een file bovenstrooms zal een (halve) wolk zich gedurende enige tijd boven/tussen de auto's bevinden. Bij 2 m/s lichtsnelheid heeft een 21.5 m lange wolk na 10.25 sec het gebied met auto's verlaten. In die tijd bestaat er ca. 45% kans op ontsteking in geval van 2 rijstroken. In geval van 3 rijstroken is die kans 58% (berekend met bijlage D in [2]). Het lijkt redelijk om de kans op een deflagratie op 50% te stellen (met 100% letaliteit in de tunnel) en de kans op een gaswolkexplosie ook op 50% (met 100% letaliteit tot 3x gaswolk lengte, zeg 100 m).

Samenvattend H2:

- 50% kans op gaswolkexplosie, met 100% letaliteit over een gebied van 100 m lengte, gelijk verdeeld beneden- en bovenstrooms.
- 50% op een deflagratie en 100% letaliteit in de gehele tunnelbuis.

8.2.3 CNG / Methaan

Vrachtauto's en bussen

De 47 kg CH₄ zal bij expansie naar omgevingsdruk een volume hebben van 69.2 m³ die met de lichtsnelheid in de tunnel worden meegenomen en worden verdund / opgemengd met lucht. Voor de beide tunneldoorsnedes leidt dit tot de resultaten als gegeven in Tabel 30.

Tabel 30 Resultaten voor CNG brandstoftanks in vrachtauto's en bussen van scenario 2 op basis van gebruikte tunnelafmetingen in [2].

Tunnelhoogte (m)	5	
Tunnelbreedte (m)	9	13.5
Tunneldoorsnede (m ²)	45	67.5
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's (m ²)	34	51
Lengte methaan gaswolk meteen na vrijkomen (conc. = 100%) (m)	2	1.4
Min. lengte explosieve wolk (conc. = 17% UEL) (m)	12	8
Max lengte explosieve wolk (conc. = 4.4% LEL) (m)	46	31

Over enkele tientallen meters lengte in de tunnel zal een explosieve wolk ontstaan. In [10] wordt aangegeven dat de reactiviteit van methaan lager is dan van propaan, hetgeen dus inhoudt dat de kritische lengte voor deflagratie groter zal zijn dan 50 m. Er zal derhalve geen deflagratie optreden. Ontsteking zal tot een gaswolkexplosie leiden.

Samenvattend CNG in vrachtauto's en bussen:

- 100 % kans op gaswolkexplosie met een 100% letaliteitsgebied van 3x gaswolklengte (zie blz. 157 in [2]), zeg 100 m, gelijk verdeeld beneden- en bovenstreams.
- 0% op een deflagratie.

Personenauto's

De 20 kg CH₄ zal bij expansie naar omgevingsdruk een volume hebben van 29.4 m³ die met de lichtsnelheid in de tunnel worden meegenomen en worden verdund / opgemengd met lucht. Voor de beide tunneldoorsnedes leidt dit tot de resultaten als gegeven in Tabel 31.

Tabel 31 Resultaten voor CNG brandstoftanks in personenauto's van scenario 2 op basis van gebruikte tunnelafmetingen in [2].

Tunnelhoogte (m)	5	
Tunnelbreedte (m)	9	13.5
Tunneldoorsnede (m ²)	45	67.5
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's (m ²)	34	51
Lengte methaan gaswolk meteen na vrijkomen (conc. = 100%) (m)	0.86	0.57
Min. lengte explosieve wolk (conc. = 17% UEL) (m)	5.1	3.4
Max lengte explosieve wolk (conc. = 4.4% LEL) (m)	19.6	13.1

Over enkele meters lengte in de tunnel zal een explosieve wolk ontstaan. Ontsteking zal tot een gaswolkexplosie leiden met een letaliteitsgebied tot 3 x de lengte van de gaswolk (zie blz. 157 in [2]), zeg tot 50 m.

Samenvattend CNG in personenauto's:

- 100 % kans op gaswolkexplosie met een 100% letaliteitsgebied van 50 m, gelijk verdeeld beneden- en bovenstreams.

8.2.4 Scenario 2 en het achtergronddocument

Door de kleinere hoeveelheden zijn de gevolgen weliswaar minder ernstig dan bij transportcilinders (§ 2.2), maar toch kunnen nog gaswolkexplosies en deflagraties ontstaan. Als deze brandstoffen in grote(re) getale zullen worden toegepast kan dit een significante impact op de risico's in tunnels hebben. Met name CH₂ onder 700 bar in personenauto's kan hierbij een belangrijke rol gaan spelen. Het valt derhalve aan te bevelen om de aannames aangaande wolklengthe en gasexplosies, die zijn gebruikt in het achtergronddocument [2] en aan de hier berekende gevolgen ten grondslag liggen, aan een meer gedetailleerde studie te onderwerpen. In een studie door Gexcon [21], bijvoorbeeld, wordt niet het volledige volume van een explosieve wolk als maatstaf genomen in tunnels, maar een veel kleinere "equivalent stoichiometric flammable gas cloud". In geval van waterstof leidde dit tot een reductie in gegenereerde drukken met een factor 100.

8.3 Scenario 3: Instantaan falen – Geen ontsteking

De kans dat er geen ontsteking zal optreden na een ongeval wordt in [2] op 0 gesteld. Dit scenario zal niet verder worden behandeld.

8.4 Scenario 4: Afbreken aansluiting - Vertraagde ontsteking-Gaswolkexplosie

Het ontstaan van een gat in een dergelijke gasfles doordat een extern voorwerp er doorheen prikt is zeer onwaarschijnlijk. Het meest waarschijnlijke bij impact is het afbreken van een aansluiting waardoor er gas naar buiten spuit en een fles kan worden gelanceerd.

8.4.1 Vervolgkansen

- Kans op ongeval met letsel = F_{letsel}
- vervolgkans op geen brand = $1 - P_b$
- vervolgkans op afbreken kop of afbreken aansluiting = P_c
- vervolgkans directe ontsteking = 0.2 (zie Tabel 3-10, in [2]). Deze waarde kan ook hier worden gehanteerd.

8.4.2 Waterstof Bussen

In Tabel 32 zijn de resultaten samengevat voor beide tunnelbreedtes. Bij de berekeningen is er vanuit gegaan dat 1 tank zal leegstromen.

Tabel 32 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van H₂ bij afbreken van de grootste aansluiting van een brandstoftank van een bus.

Diameter gat	1.125" (=28.6 mm)	2" (= 5.08 mm)
Initiële uitstroomsnelheid (bij 350 bar)	12.9 kg/s (=150 m ³ /s)	40.5 kg/s (=475 m ³ /s)
Totale uitstroomtijd	3 s	1 s

Gezien de snelheid waarmee de gastanks leeglopen in deze scenario's kan dit scenario worden beschouwd als instantaan vrijkomen van de gehele inhoud (§ 8.2.2).

Schade als gevolg van lancering van de fles is hierdoor niet meer van belang.

Samenvattend H2:

- 50% kans op gaswolkexplosie, met 100% letaliteit over een gebied van 100 m lengte, gelijk verdeeld beneden- en bovenstrooms.
- 50% op een deflagratie en 100% letaliteit in de gehele tunnelbuis.

Personenauto's

In Tabel 32 zijn de resultaten samengevat voor beide tunnelbreedtes.

Tabel 33 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van H₂ bij afbreken van de grootste aansluiting van een brandstoftank van een personenauto.

Diameter gat	1.125" (=28.6 mm)	2" (= 5.08 mm)
Initiële uitstroomsnelheid (bij 700 bar)	23.7 kg/s (=280 m ³ /s)	75 kg/s (=880 m ³ /s)
Totale uitstroomtijd	2 s	0.7 s

Ook hier geldt dat, door de snelheid waarmee de gastanks leeglopen, dit scenario kan worden beschouwd als instantaan vrijkomen van de gehele inhoud. (§ 8.2.2).

Samenvattend H₂:

- 50% kans op gaswolkexplosie, met 100% letaliteit over een gebied van 100 m lengte, gelijk verdeeld beneden- en bovenstrooms.
- 50% op een deflagratie en 100% letaliteit in de gehele tunnelbuis .

8.4.3 CNG

Bussen

In Tabel 34 zijn de resultaten samengevat. Bij de berekeningen is er vanuit gegaan dat 1 tank zal leegstromen.

Tabel 34 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van CNG bij afbreken van de grootste aansluiting van een brandstoftank van een bus.

Diameter gat	1.015" (=25.8 mm)
Initiële uitstroomsnelheid (bij 200 bar)	23.2 kg/s (=34 m ³ /s)
Totale uitstroomtijd	10 s

Gezien de snelheid waarmee de gastank leegloopt (in 10 s.) kan dit scenario worden beschouwd als instantaan vrijkomen van de gehele inhoud (§ 8.2.3).
Schade als gevolg van lancering van de fles is hierdoor niet meer van belang.

Samenvattend CNG bussen:

- 100 % kans op gaswolkexplosie met een 100% letaliteitsgebied van 100 m, gelijk verdeeld beneden- en bovenstrooms
- 0% op een deflagratie.

Personenauto's

In Tabel 35 zijn de resultaten samengevat.

Tabel 35 Berekeningsresultaten voor continue uitstroming van CNG bij afbreken van de grootste aansluiting van een brandstoftank van een personenauto.

Diameter gat	1.015" (=25.8 mm)
Initiële uitstroomsnelheid (bij 250 bar)	31.6 kg/s (=46 m ³ /s)
Totale uitstroomtijd	3 s

Ook hier geldt dat, gezien de snelheid waarmee de gastank leegloopt (in 3 s.), dit scenario kan worden beschouwd als instantaan vrijkomen van de gehele inhoud (§ 8.2.3).

Samenvattend CNG in personenauto's:

- 100 % kans op gaswolkexplosie met een 100% letaliteitsgebied van 50 m, gelijk verdeeld beneden- en bovenstrooms.

8.4.4 Scenario 4 in vergelijking met het achtergronddocument

Hiervoor geldt hetzelfde als voor scenario 2 (§8.2.4).

8.5 Scenario 5: Afbreken aansluiting – Directe ontsteking - Fakkels

Indien, na het afbreken van een aansluiting het naar buiten stromende gas direct wordt ontstoken zal een fakkel ontstaan en de fles kan worden gelanceerd.

8.5.1 Vervolgkansen

- Kans op ongeval met letsel = F_{letsel}
- vervolgsans op geen brand = $1 - P_b$
- vervolgsans op afbreken kop of afbreken aansluiting = P_c
- vervolgsans directe ontsteking = 0.8 (zie Tabel 3-10, in [2]). Deze waarde kan ook hier worden gehanteerd.

8.5.2 Waterstof

Uit de berekeningen bij scenario 4 bleek dat het waterstof zo snel vrijkomt dat de gevolgen (zo goed als) gelijk zijn aan instantaan uitstromen. Dit betekent dus de gevolgen gelijk kunnen worden gesteld met die uit scenario 1: volledig falen in een externe brand § 8.1.2. Er is nu echter geen externe brand en geen “aanlooptijd” tussen het moment van het ongeval en het vrijkomen van de gevaarlijke stof.

Samenvatting H2:

Schadeafstand voor letaal letsel: door hitte: enkele (tientallen) meters; door ingedrukte autoruiten: 10 m bij bussen, 11 m bij personenauto's

Enige constructieve schade door overdrukken.

Schadeafstand door lancering gasfles van bus / vrachtauto: letaal letsel voor inzittenden van 1 personenauto.

8.5.3 CNG

Ook hiervoor geldt dat vrijkomen van de inhoud zo snel gaat dat de gevolgen (zo goed als) identiek zijn aan die bij instantaan falen (§ 8.1.3), met dien verstande dat er geen externe brand is en geen “aanlooptijd” tussen het moment van het ongeval en het vrijkomen van de gevaarlijke stof.

Samenvatting CNG:

Schadeafstand voor letaal letsel: door hitte: enkele (tientallen) meters; door ingedrukte autoruiten: 11 m bij bussen, 16 m bij personenauto's

Enige constructieve schade door overdrukken.

Schadeafstand door lancering gasfles van bus / vrachtauto: letaal letsel voor inzittenden van 1 personenauto.

8.5.4 Scenario 5 en het achtergronddocument

Hiervoor kunnen in het achtergronddocument [2] geen vergelijkbare scenario's worden gevonden en zal dus separaat moeten worden behandeld.

8.6 Scenario 6: Afbreken aansluiting – Geen ontsteking

De kans dat er geen ontsteking zal optreden na een ongeval wordt in [2] op 0 gesteld. Dit scenario zal niet verder worden behandeld.

8.7 Scenario 7: (Externe) brand - Continue uitstroom door openen van het veiligheidsventiel - Fakkels

Dit scenario zal optreden indien de brandstoftanks worden blootgesteld aan brand, bijvoorbeeld door een voertuigbrand of door een externe brand.

8.7.1 Vervolgkansen

Omdat, i.t.t. de transportcilinders, de brandstofcilinders wel van een veiligheidsventiel zijn voorzien, kan in een externe brand een fakkel ontstaan, maar ook bij een pechbrand of een brand na een ongeval met uitsluitend materiële schade:

- Kans op fakkel door externe brand = $F_{letsel} * P_b * P_{sv}$
- Kans op fakkel door voertuigbrand na pech of ongeval met uitsluitend materiële schade = $(F_{pech} + F_{ums}) * P_{ib} * P_{sv}$
- Som van deze kansen is kans op scenario 7.

Bussen

In Tabel 36 zijn de resultaten samengevat voor beide tunnelbreedtes. Bij de berekeningen is uitgegaan van een totaal volume van 8 cilinders (1640 l), die zijn aangesloten op 1 veiligheidsventiel.

De gevolgen van warmteproductie door de fakkel kunnen we weer modelleren als een brand. Waterstof produceert 120 MJ aan energie per kg bij verbranding. Bij de uitstroomsnelheid van 1.5 kg/s betekent dit dus een warmteproductie van ruim 180 MW

Door de verbranding en de uitzetting als gevolg van de hoge temperatuur (2000 °C is bij waterstof haalbaar) is de uitstroomsnelheid, gemeten in m³/s, naar verhouding groot. Niettemin is deze snelheid lager dan de luchtverplaatsingssnelheid, nl. 1.4 of 0.9 m/s voor de beide tunnelbreedtes. Dit betekent dus dat de hete rookgassen zich (als de tunnelventilatie aan staat) niet stroomopwaarts zullen verplaatsen, maar alleen stroomafwaarts met een snelheid van 1.4 + 2 m/s = 3.4 m/s . De fakkel zal een lengte hebben van 19 m.

Tabel 36 Fakkellengte CH2 bij bussen bij 9 mm uitstroomopening.

Tunnelhoogte (m)	5	
Diameter uitstroomopening	9 mm	
Initiële uitstroomsnelheid bij 2000 C	1.5 kg/s (=92.8 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	222 s (*)	
Initiële lengte fakkel	19 m	
Tunnelbreedte (m)	9	13.5
Tunneldoorsnede (m ²)	45	67.5
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's (m ²)	34	51
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Rookgassnelheid	1.4 m/s	0.9 m/s
(*) Dit geldt bij continue opening van de veerveiligheid. Gedurende het afblazen kan de veerveiligheid zo nu en dan weer dicht gaan (afhankelijk van ontwerp), waardoor pulsering kan optreden en het langer kan duren voordat de cilinders leeg zijn.		

Samenvattend:

100% letaliteit over de lengte van de fakkel ($L_3 = 19$ m - fakkel "naar achteren"; $L_4 = 19$ m - fakkel "naar voren"). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een kortstondige (43 s) brand van 180 MW.

In het secundaire effectgebied (alleen L_5 , benedenstrooms) zal de letaliteitsgrens toenemen met de rookgassnelheid vermeerderd met de luchtverplaatsingssnelheid. De mogelijkheden tot evacuatie ($T_{\text{instructie}}$, T_{uitstap} , loopsnelheid, afstand tot vluchtdeuren) bepalen dan het aantal personen in het secundaire letaliteitsgebied.

Personenauto's

In Tabel 37 zijn de resultaten samengevat voor beide tunnelbreedtes.

De gevolgen van warmteproductie door de fakkel kunnen we weer modelleren als een brand. Waterstof produceert 120 MJ aan energie per kg bij verbranding. Bij de uitstroomsnelheid van 1.3 kg/s betekent dit dus een warmteproductie van bijna 160 MW.

De uitstroomsnelheid is ook hier lager dan de luchtverplaatsingssnelheid, nl. 1.1 m/s of 0.8 m/s voor de beide tunnelbreedtes, waardoor de hete rookgassen zich (als de tunnelventilatie aan staat) niet stroomopwaarts zullen verplaatsen, maar alleen stroomafwaarts met een snelheid van $1.1 + 2 \text{ m/s} = 3.1 \text{ m/s}$. De fakkel zal een lengte hebben van 17 m.

Tabel 37 Fakkellengte CH2 bij personenauto's bij 6 mm uitstroomopening.

Tunnelhoogte (m)	5	
Diameter uitstroomopening	6 mm	
Initiële uitstroomsnelheid bij 2000 C	1.2 kg/s (=77.8 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	43 s (*)	
Initiële lengte fakkel	17 m	
Tunnelbreedte (m)	9	13.5
Tunneldoorsnede (m ²)	45	67.5
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's (m ²)	34	51
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Rookgassnelheid	1.1 m/s	0.8 m/s
(*) Dit geldt bij continue opening van de veerveiligheid. Gedurende het afblazen kan de veerveiligheid zo nu en dan weer dicht gaan (afhankelijk van ontwerp), waardoor pulsering kan optreden en het langer kan duren voordat de cilinders leeg zijn.		

Samenvattend:

100% letaliteit over de lengte van de fakkel ($L_3 = 17$ m - fakkel “naar achteren”; $L_4 = 17$ m - fakkel “naar voren”). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een, driekwart minuut durende, brand van 160 MW. In het secundaire effectgebied (alleen L_5 , benedenstrooms) zal de letaliteitsgrens toenemen met de rookgassnelheid vermeerderd met de luchtverplaatsingssnelheid. De mogelijkheden tot evacuatie ($T_{\text{instructie}}$, T_{uitstap} , loopsnelheid, afstand tot vluchtdeuren) bepalen dan het aantal personen in het secundaire letaliteitsgebied.

8.7.2 CNG / methaan**Bussen en vrachtauto's**

De resultaten van de berekeningen met EFFECTS 9.0 zijn weergegeven in Tabel 38. Bij de berekeningen is uitgegaan van een totaal volume van 8 cilinders (1712 l), die zijn aangesloten op 1 veiligheidsventiel.

Door de verbranding en de uitzetting als gevolg van de hoge temperatuur (voor CNG zal 800 °C worden aangehouden, is ook hier de uitstroomsnelheid, gemeten in m^3/s , naar verhouding groot. Niettemin is de uitstroomsnelheid zo laag (0.1 m/s of 0.09 m/s voor de beide tunnelbreedtes), dat de hete rookgassen zich met ongeveer de tunnelventilatiesnelheid zullen verplaatsen.

De fakkel zal een lengte hebben van 16 m.

Methaan produceert 50 MJ aan energie per kg bij verbranding. Bij de uitstroomsnelheid van ca. 1.6 kg/s betekent dit dus een warmteproductie van 80 MW.

Tabel 38 Fakkellengte CNG bij bussen en vrachtauto's bij 6 mm uitstroomopening.

Tunnelhoogte (m)	5	
Diameter uitstroomopening	6 mm	
Initiële uitstroomsnelheid bij 800 C	1.6 kg/s (=9.1 m^3/s)	
Totale uitstroomtijd	1433 s (*)	
Initiële lengte fakkel	16 m	
Tunnelbreedte (m)	9	13.5
Tunneldoorsnede (m^2)	45	67.5
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's (m^2)	34	51
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m^3/s	102 m^3/s
Rookgassnelheid	0.1 m/s	0.09 m/s
(*) Dit geldt bij continue opening van de veerveiligheid. Gedurende het afblazen kan de veerveiligheid zo nu en dan weer dicht gaan (afhankelijk van ontwerp), waardoor pulsering kan optreden en het langer kan duren voordat de cilinders leeg zijn.		

Samenvattend

100% letaliteit over de lengte van de fakkel ($L_3 = 16$ m - fakkel “naar achteren”; $L_4 = 16$ m - fakkel “naar voren”). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een, ca. 24 minuten durende, brand van 80 MW. In het secundaire effectgebied (alleen L_5 , benedenstrooms) zal de letaliteitsgrens toenemen met de luchtverplaatsingssnelheid. De mogelijkheden tot evacuatie ($T_{\text{instructie}}$, T_{uitstap} , loopsnelheid, afstand tot vluchtdeuren) bepalen dan het aantal personen in het secundaire letaliteitsgebied.

Personenauto's

De resultaten van de berekeningen met EFFECTS 9.0 zijn weergegeven in Tabel 38.

Door de verbranding en de uitzetting als gevolg van de hoge temperatuur (voor CNG zal 800 °C worden aangehouden, is ook hier de uitstroomsnelheid (0.2 m/s of 0.12 m/s voor de beide tunnelbreedtes) zo laag, dat de hete rookgassen zich met ongeveer de tunnelventilatiesnelheid zullen verplaatsen. De fakkel zal een lengte hebben van 15 m.

Methaan produceert 50 MJ aan energie per kg bij verbranding. Bij de uitstroomsnelheid van ca. 2.3 kg/s betekent dit dus een warmteproductie van 115 MW.

Tabel 39 Fakkellengte CNG bij personenauto's bij 6 mm uitstroomopening.

Tunnelhoogte (m)	5	
Diameter uitstroomopening	6 mm	
Initiële uitstroomsnelheid bij 800 C	2.3 kg/s (=12.7 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	55 s (*)	
Initiële lengte fakkel	15 m	
Tunnelbreedte (m)	9	13.5
Tunneldoorsnede (m ²)	45	67.5
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's (m ²)	34	51
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Rookgassnelheid	0.2 m/s	0.1 m/s
(*) Dit geldt bij continue opening van de veerveiligheid. Gedurende het afblazen kan de veerveiligheid zo nu en dan weer dicht gaan (afhankelijk van ontwerp), waardoor pulsing kan optreden en het langer kan duren voordat de cilinders leeg zijn.		

Samenvattend

100% letaliteit over de lengte van de fakkel ($L_3 = 15$ m - fakkel "naar achteren"; $L_4 = 15$ m - fakkel "naar voren"). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een ca. 1 min durende brand van 115 MW.

In het secundaire effectgebied (alleen L_5 , benedenstrooms) zal de letaliteitsgrens toenemen met de luchtverplaatsingssnelheid. De mogelijkheden tot evacuatie ($T_{\text{instructie}}$, T_{uitstap} , loopsnelheid, afstand tot vluchtdeuren) bepalen dan het aantal personen in het secundaire letaliteitsgebied.

8.7.3 Scenario 7 en het achtergronddocument

Net als bij de eerdere uitgewerkte 'fakkelscenario's' kunnen de gevolgen voor dit scenario ook goed worden gerepresenteerd door het scenario "kleine (niet relevante) continue uitstroming (§ 8.5.3) in het achtergronddocument [2] (fakkellengte 15 m en plasbrand van 300 m²). De fakkellengtes komen hierbij goed overeen. Ook hier blijkt dat berekeningen van de effecten van de fakkelbrand op de gebieden boven- en benedenstrooms op basis van een 300 m² plasbrand (390 – 600 MW) een erg conservatieve benadering is (zie ook §2.5.4). Echter deze overschatting compenseert voor het feit dat in de berekeningen voor fakkels binnen dit hoofdstuk de effecten van de externe brand of voertuigbrand niet zijn meegenomen. Derhalve zijn de gevolgen voor scenario 7 goed weer te geven met het scenario "kleine (niet relevante) continue uitstroming (§ 8.5.3) in het achtergronddocument [2].

8.8 Conclusie GFOP

De resultaten zijn samengevat in Tabel 40 voor bussen en vrachtauto's en in Tabel 41 voor personenauto's. Door de kleinere hoeveelheden zijn de gevolgen minder ernstig dan bij transportcilinders (§ 2.2), maar zeker niet verwaarloosbaar. De gevolgen kunnen nog zeer significant zijn. In het bijzonder bij de scenario's waar zich een explosief gasmengsel in de tunnel kan ophopen (scenario's 2 en 4): gaswolkexplosies en deflagraties. Als CNG en CH₂ brandstoftanks in grote(re) getale toegepast gaan worden kunnen deze een significante impact op de berekende risico's in tunnels hebben. Met name CH₂ onder 700 bar in personenauto's kan hierbij een belangrijke rol gaan spelen. Het valt derhalve aan te bevelen om de aannames aangaande wolklengte en gasexplosies die zijn gebruikt in het achtergronddocument [2] en aan de hier berekende gevolgen ten grondslag liggen, aan een meer gedetailleerde studie te onderwerpen. Uit een studie door Gexcon, bijvoorbeeld, bleek dat de gegenereerde drukken in geval van waterstof hierdoor in de praktijk mogelijk een factor 100 lager zijn [21]. Om de faalfrequenties van deze brandstoftanks te bepalen zal aanvullend onderzoek nodig zijn. Verder zal de relevantie van de in QRA-tunnels gebruikte voorwaarde dat de uitstroming meer dan 100 kg moet bedragen nader moeten worden onderzocht.

Tabel 40 Overzicht van de gevolgen en frequenties van de scenario's voor GFOP als brandstof voor bussen en vrachtauto's. L1 – L6 en P1 – P6 refereren naar de notatie in [2].

GFOP	P(scenario)		condities	Type effect en P(effect)	Lengte deelgebieden (m)						Overlijdenskans					
Scenario					L1	L2	L3	L4	L5	L6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1: Instantaan falen - Externe brand - Gaswolkexplosie	$= F(\text{letsel}) * 0.3 * 0.245 - x$	CH2		hitte	Door lange aanloop tot explosie: gevolgen als bij een 200 MW letselbrand: Tabel 7-3 en § 7.4 in het achtergronddocument [2].											
		CNG		Hitte en rookgassen												
2: Instantaan falen – Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie	$= F(\text{letsel}) * 0.3 * 0.105 - y$	CH2		gaswolkexplosie	0	0	50	50	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
				deflagratie	0	lengte tunnelbuis				0	0	0.5			0	
		CNG		gaswolkexplosie	0	0	50	50	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
				deflagratie	0	lengte tunnelbuis				0	0	0.5			0	
3: Instantaan falen – Geen ontsteking	0	CH2		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		CNG		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4: Afbreken aansluiting - Vertraagde ontsteking- Gaswolkexplosie	$= F(\text{letsel}) * 0.3 * 0.65 * 0.2$	CH2		gaswolkexplosie	0	0	50	50	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
				deflagratie	0	lengte tunnelbuis				0	0	0.5			0	
		CNG		gaswolkexplosie	0	0	50	50	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
				deflagratie	0	lengte tunnelbuis				0	0	0.5			0	
5: Afbreken aansluiting – Directe ontsteking- Fakkels	$= F(\text{letsel}) * 0.39 * 0.3 * 0.65 * 0.8$	CH2		hitte	0	0	Enkele tientallen meters		0	0	0	0	1	1	0	0
		CNG		hitte	0	0			0	0	0	0	1	1	0	0
6: Afbreken aansluiting – Geen ontsteking	0	CH2		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		CNG		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7: (Externe) brand - Continue uitstroom door openen van het veiligheidsventiel – Fakkels**	$= F(\text{letsel}) * 0.3 * (x+y)+z$	CH2	File benedenstrooms en fakkels "naar achteren"	hitte en fakkels	0	180MW brand (hitte)	19	180MW brand (hitte en rookgas)		0	0	1	1	1		0
			File benedenstrooms en fakkels "naar voren":		0	180MW brand (hitte)	19	180MW brand (hitte en rookgas)		0	0	1		1	1	0
			Geen file benedenstrooms en fakkels "naar achteren"		0	180MW brand (hitte)	19	0		0	0	1	1	0		0
			Geen file benedenstrooms en fakkels "naar voren":		0	180MW brand (hitte)	0		0	0	1	1	0		0	
		CNG	File benedenstrooms en fakkels "naar achteren"		0	80MW brand (hitte)	16	80MW brand (hitte en rookgas)		0	0	1	1	1		0
			File benedenstrooms en fakkels "naar voren":		0	80MW brand (hitte)	16	80MW brand (hitte en rookgas)		0	0	1		1	1	0
			Geen file benedenstrooms en fakkels "naar achteren"		0	80MW brand (hitte)	16	0		0	0	1	1	0		0
			Geen file benedenstrooms en fakkels "naar voren":		0	80MW brand (hitte)	0		0	0	1		0		0	

** Ook goed bruikbaar zijn de waarden in § 3.3.2. van het achtergronddocument: fakkellengte 14 m; hittestraling van een plasbrand van 300 m^{2v}

Tabel 41 Overzicht van de gevolgen en frequenties van de scenario's voor GFOP als brandstof voor personenauto's. L1 – L6 en P1 – P6 refereren naar de notatie in [2].

GFOP	P(scenario)		condities	type effect en P(effect)	Lengte deelgebieden (m)						Overlijdenskans					
Scenario					L1	L2	L3	L4	L5	L6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1: Instantaan falen - Externe brand - Gaswolkexplosie	$= F(\text{letsel}) * 0.3 * 0.245 - x$	CH2		hitte	Door lange aanloop tot explosie: gevolgen als bij een 200 MW letselbrand: Tabel 7-3 en § 7.4 in het achtergronddocument [2].											
		CNG		hitte												
2: Instantaan falen – Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie	$= F(\text{letsel}) * 0.3 * 0.105 - y$	CH2		gaswolkexplosie	0	0	50	50	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
				deflagratie	0	lengte tunnelbuis				0	0	0.5				0
		CNG		gaswolkexplosie	0	0	25	25	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
3: Instantaan falen – Geen ontsteking	0	CH2		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		CNG		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4: Afbreken aansluiting - Vertraagde ontsteking- Gaswolkexplosie	$= F(\text{letsel}) * 0.3 * 0.65 * 0.2$	CH2		gaswolkexplosie	0	0	50	50	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
				deflagratie	0	lengte tunnelbuis				0	0	0.5				0
		CNG		gaswolkexplosie	0	0	25	25	0	0	0	0	0.5	0.5	0	0
5: Afbreken aansluiting – Directe ontsteking- Fakkel	$= F(\text{letsel}) * 0.39 * 0.3 * 0.65 * 0.8$	CH2		hitte	0	0	Enkele tientallen meters		0	0	0	0	1	1	0	0
		CNG		hitte	0	0			0	0	0	0	1	1	0	0
6: Afbreken aansluiting – Geen ontsteking	0	CH2		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		CNG		geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7: (Externe) brand - Continue uitstroom door openen van het veiligheidsventiel – Fakkel**	$= F(\text{letsel}) * 0.3 * (x+y)+z$	CH2	File benedenstrooms en fakkel "naar achteren"	hitte en fakkel	0	160MW brand (hitte)	17	160MW brand (hitte en rookgas)			0	0	1	1	1	0
			File benedenstrooms en fakkel "naar voren".		0	160MW brand (hitte)	17	160MW brand (hitte en rookgas)			0	0	1	1	1	0
			Geen file benedenstrooms en fakkel "naar achteren"		0	160MW brand (hitte)	17	0			0	0	1	1	0	0
			Geen file benedenstrooms en fakkel "naar voren".		0	160MW brand (hitte)	0			0	0	1	0		0	0
		CNG	File benedenstrooms en fakkel "naar achteren"		0	115MW brand (hitte)	15	115MW brand (hitte en rookgas)			0	0	1	1	1	0
			File benedenstrooms en fakkel "naar voren".		0	115MW brand (hitte)	15	115MW brand (hitte en rookgas)			0	0	1	1	1	0
			Geen file benedenstrooms en fakkel "naar achteren"		0	115MW brand (hitte)	15	0			0	0	1	1	0	0
			Geen file benedenstrooms en fakkel "naar voren".		0	115MW brand (hitte)	0			0	0	1	0		0	0

** Ook goed bruikbaar zijn de waardes in § 3.3.2. van het achtergronddocument [2]: fakkellengte 14 m; hittestraling van een plasbrand van 300 m²

9 Gebruik van GF0L als brandstof

Brandstoftanks met tot vloeistof gekoelde gassen komen (nog) weinig voor. Dit komt vooral door de relatief kleine volumes van vloeistoftanks in verhouding tot bulkvervoer. Dit leidt tot relatief grote verdampingsverliezen, zeker bij de tankvolumes van personenauto's van slechts enkele tientallen liters [3]. Noch LNG noch LH2 worden dan ook als brandstof bij personenauto's gebruikt. Volgens [15] is LNG wel geschikt als brandstof voor bussen en vrachtauto's die lange afstanden moeten afleggen. In [15] wordt hiervoor een tankinhoud genoemd voor 300 kg LNG. Deze zal hier als uitgangspunt worden genomen voor de berekeningen. Van LH2 als transportbrandstof in bussen of vrachtauto's zijn geen gegevens bekend en deze brandstof zal dan ook niet verder worden behandeld in dit rapport. In Tabel 42 zijn de bij de berekeningen gebruikte gegevens weergegeven. Alleen de 300 kg is bekend. Veel van de overige gegevens zijn geschat, mede op basis van de gegevens voor transport van deze stoffen (zie Tabel 11).

Tabel 42 Gegevens gebruikt bij de berekening van de effecten voor LNG als transportbrandstof bij vrachtwagens en bussen.

parameter	LNG
Gemodelleerde stof	methaan
inhoud tank (dubbelwandig)	300 kg [15]; 823 l (90% gevuld) (*)
Lengte tank	1.6 m (**)
doorsnede tank	0.8 m (**)
doorsnede grootste aansluiting / (vul)opening	17mm (**)
doorsnede afblaasopening (veerveiligheid o.i.d.)	10 mm (**)
werkdruk (typisch)	2.4 bar (**)
werkdruk (max)	10 bar (**)
barstdruk	12.1 bar (**)
temperatuur	-150 °C (**)
Gewicht tank	250 kg (**)
(*) berekend met EFFECTS 9.0 o.b.v. gegeven druk, temp, vulgraad en hoeveelheid.	
(**) geschat of bepaald o.b.v. Tabel 11 of vastgesteld voor 'worst case" scenario	

Hier zijn dezelfde scenario's van belang als bij bulktransport van deze tot vloeistof gekoelde gassen (hoofdstuk 3). Deze zijn weergegeven in Figuur 13. Het zijn echter geen tanks voor bulktransport, dus of uitsluitend een uitstroming van meer dan 100 kg en het onderscheid tussen 'relevante' en 'niet relevante' uitstroming een rol spelen zal nader moeten worden onderzocht. Dit geldt ook voor de kans op volledig falen (al dan niet in een externe brand) en de kans op een continue uitstroming. Wel is, conform [2], een letselongeval als startpunt genomen en is er in eerste instantie van uitgegaan dat ongevallen met uitsluitend materiële schade (UMS) niet tot het vrijkomen van gevaarlijke stoffen zullen leiden. De scenario's die in hoofdstuk 3 een kans gelijk aan 0 hadden zijn hierin weggelaten.

Scenario's/ gebeurtenissenboom			effecten
ongeval met letsel (F_{letsel})	relevante uitstroming (x)	volledig falen tank in externe brand (y)	1. warme BLEVE
		volledig falen tank geen externe brand (z)	2. gaswolkexplosie (hitte en druk) en plasbrand, scherven (mist)
		continue uitstroming (1-y- z)	3. gaswolkexplosie (hitte en druk) en plasbrand (mist)
			directe ontsteking (0.8)
			4. fakkels
	Niet relevante uitstroming (1-x)		geen

Figuur 13 Gebeurtenissenboom voor tot vloeistof gekoelde brandbare gassen; tussen haakjes zijn de (vervolg)kansen aangegeven.

9.1 Scenario 1: Instantaan falen – Externe brand - Warme BLEVE

Een warme BLEVE in de buitenlucht zal voor LNG een vuurbal opleveren van 39 m doorsnede. Bij de faaldruk van 12.1 bar is de temperatuur in de tank is dan -120 °C. Een dergelijk volume kan een 13.5 m brede tunnel over 460 m vullen! Over deze afstand (gelijk verdeeld beneden- en bovenstrooms) zal eenieder in de tunnel komen te overlijden alsmede een aantal personen buiten de tunnel indien de tunnelmond zich dicht bij de ongevallocatie bevindt dan 230 m.

De maximale druk zal volgens EFFECTS 11 bar (1100 kPa) bedragen. Dit is hoger dan de drukasymptoot gegeven in Tabel 3. De impuls is volgens EFFECTS maximaal 65 kPa.s. Ook deze is hoger dan de minimumwaarde voor instorten in Tabel 3. Echter binnen 1.5 m is deze waarde tot onder 25 kPa.s gezakt. Dit betekent dat de tunnel niet zal bezwijken, maar op korte afstand van het ongeval zal zeker ernstige schade aan de tunnel worden aangericht.

Aangezien het (nog) niet duidelijk is hoeveel tijd er zit tussen het ontstaan van de brand en de BLEVE wordt er vooralsnog vanuit gegaan dat deze gevolgen inderdaad zullen optreden.

9.1.1 Kansen

Voor de kansen geldt:

- Kans op ongeval met letsel = F_{letsel}
- vervolgkans op relevante uitstroming = x
- vervolgkans op volledig falen in externe brand (warme BLEVE) = y

De waarde van x en y zal door nader onderzoek moeten worden vastgesteld.

9.2 Scenario 2: Instantaan falen - Vertraagde ontsteking – Gaswolkexplosie en plasbrand

Bij instantaan vrijkomen van LNG zal er een deel meteen verdampen (flash-off) en een deel zal een plas vormen. Het verdampte deel zal snel verdunnen en een explosieve wolk zal snel ontstaan. De maximale explosieve wolklengte uit de flash-off bedraagt 20 m in de 9 m brede tunnel en 14 m in de 13,5 m brede tunnel (zie Tabel 43). Uit de ontstane plas zal aanvankelijk veel verdampen omdat deze in contact is met de warme tunnelwand en de auto's in de tunnel. Dit zal kan de explosieve wolk doen groeien, maar de luchtstroming zal ook voor verdere

verduunning (tot mogelijk onder de LEL zorgen. Het is onwaarschijnlijk dat de explosieve wolk de kritische lengte voor deflagratie (zeg 50 m) zal halen. Wel is een gaswolkexplosie denkbaar met een 100% letaliteitsafstand tot 3x de gaswolklengte, zeg zo'n 50 m.

Samenvatting:

100% kans op een gaswolkexplosie met een 100% letaliteitsgebied van 50 m, gelijk verdeeld boven- en benedenstrooms.

Tabel 43 Berekeningsresultaten met EFFECTS voor instantaan vrijkomen van LNG.

Totale hoeveelheid LNG in tank	300 kg	
Flash-off	50 kg (= 30.6 m ³ gas bij 1 bar)	
Hoeveelheid in plas	250 kg (= 59.2 l bij -162 °C en 1 bar)	
Tunnelhoogte	5 m	
Tunnelbreedte	9 m	13.5 m
Tunneldoorsnede	45 m ²	67.5 m ²
Effectieve doorsnede, na aftrek van 25% voor doorsnede auto's	34 m ²	51 m ²
Initiële lengte gaswolk (100 % methaan)	0.9 m	0.6 m
Lengte gaswolk na verduunning tot LEL	20 m	14 m
Plasoppervlak bij 1 cm plasdikte	592 m ² (=9 m * 66 m)	592 m ² (=13.5 m * 44 m)

9.2.1 Kansen

Voor de kansen geldt:

- Kans op ongeval met letsel = $F_{\text{letsel}} = F_{\text{letsel}}$
- vervolgcans op relevante uitstroming = x
- vervolgcans op volledig falen (geen externe brand) = y

ook de waarde van z zal door nader onderzoek moeten worden vastgesteld.

9.3 Scenario 3: Continue uitstroming uit opening van 17 mm - Vertraagde ontsteking - Gaswolkexplosie

De doorsnede van een aansluiting die kan afbreken is niet bekend. Echter een "worst case" scenario zal ontstaan wanneer de ventilatielucht door het uitstromende gas uit de brandstoftank tot de LEL-concentratie van methaan wordt voorzien. Dit zal het geval zijn indien er een gat in de tank ontstaat van ca. 17 mm (9 m brede tunnel) De uitstroomtijd zal dan ca. 2 minuten bedragen. In deze tijd kan zich een explosieve wolk ontwikkelen van 240 m (=120 s x 2 m/s) lengte! Echter de kans dat deze wolk eerder ontstoken raakt is zeer groot, indien er auto's in de wolk staan. Dit laatste zal het geval zijn bij een file benedenstrooms. De kans op ontsteking voordat de kritische (voor deflagratie) grens van 50 m is bereikt is echter meer dan 95%, hetgeen een deflagratie onwaarschijnlijk maakt.

Met onderstaande gevolgen moet derhalve rekening worden gehouden:

1. File benedenstrooms.
100% kans op gaswolkexplosie met een 100% letaliteitsgebied van 150 m (3 x gaswolklengte).
2. Geen file benedenstrooms:
Geen ontsteking en geen schade of slachtoffers, aangezien de explosieve wolk naar het autoloze deel van de tunnel wordt geblazen.

Net als voor de hiervoor reeds uitgewerkte scenario's waarbij er (door continue uitstroming) een explosief gasmengsel wordt opgebouwd in de tunnel, verdient het

ook hier weer aanbeveling om de relatie tussen de grootte van de explosieve wolk en het explosiegedrag nader te onderzoeken.

9.3.1 Kansen

Voor de kansen geldt:

- Kans op ongeval met letsel = $F_{\text{letsel}} = F_{\text{letsel}}$
- vervol kans op relevante uitstroming = x
- vervol kans op continue uitstroming = 1-y-z
- De kans op vertraagde ontsteking van een brandbaar gas = $1 - P_{\text{ont.dir.GF}} = 0.2$ (zie Tabel 3-10, in [2]).

9.4 Scenario 4: Continue uitstroming - Directe ontsteking – Fakkels

Bij directe ontsteking en continue uitstroming zal er een fakkel ontstaan. De gevolgen zullen afhangen van de gatdoorsnede. Een grote opening zal een langere en hetere, maar korter durende fakkel tot gevolg hebben dan een kleine opening. De gevolgen voor een 2" gatgrootte zijn reeds in § 3.6.3 behandeld (79 m lange fakkel, warmteproductie 1100 MW), waarbij een brandstoftank uiteraard eerder leeg zal zijn (na 15 s) dan een bulk tank (na 775 s). Bij de in de vorige paragraaf gebruikte 17 mm gatgrootte (deze is waarschijnlijk realistischer dan 2") komt 2.4 kg/s aan verbrandingsgassen vrij, resulterend in een fakkelengte van 32 m (Tabel 44). De rookgassnelheid is zeer laag en rookgassen zullen dus het verkeer bovenstrooms van de ongevallocatie niet bereiken, zelfs niet bij uitgeschakelde ventilatie. Dit betekent dat alleen bij een file benedenstrooms slachtoffers kunnen vallen a.g.v. hete verbrandingsgassen gedurende de tijd dat de ventilatie aanstaat.

Tabel 44 Fakkellengte LNG bij 17 mm gatgrootte.

Diameter gat	17 mm	
Initiële uitstroomsnelheid bij 800 C	2.4 kg/s (=13 m ³ /s)	
Totale uitstroomtijd	125 s	
Initiële lengte fakkel	32 m	
Debiet luchtaanvoer bij 2 m/s ventilatiesnelheid	68 m ³ /s	102 m ³ /s
Rookgassnelheid	0.2 m/s	0.1 m/s

Samenvattend:

Bij aanwezigheid van 2 m/s luchtverplaatsing en een gatgrootte van 17 mm:

1. File benedenstrooms
 - 100% letaliteit over de lengte van de fakkel (L_3 of $L_4 = 32$ m, afhankelijk van fakkelrichting). De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een, ca. 2 minuten durende, brand van 120 MW.
2. Geen file benedenstrooms en fakkel "naar achteren":
 - Eerst zal 100% letaliteit worden aangenomen over de lengte van de fakkel ($L_3 = 32$ m).
 - Verbrandingsgassen worden met de rijwind stroomafwaarts meegenomen, waardoor er in de secundaire effectgebieden alleen slachtoffers vallen a.g.v. hittestraling van de fakkel, te modelleren als een brand van 120 MW.
3. Geen file benedenstrooms en fakkel "naar voren":
 - De gevolgen van hittestraling voor de file achter het incident kunnen worden gemodelleerd met een brand van 120 MW.

Bij geen of lage luchtverplaatsingssnelheid:

- 100% letaliteit over de lengte van de fakkel (32 m).

- De gevolgen van hittestraling kunnen worden gemodelleerd met een brand van 120 MW.
- Het 'letaliteitsfront' zal opschuiven met de rookgassnelheid, eventueel vermeerderd of verminderd met de ventilatiesnelheid. Wel of geen file stroomafwaarts en mogelijkheden tot evacuatie ($T_{\text{instructie}}$, T_{uitstap} , loopsnelheid, afstand tot vluchtdeuren) bepalen dan het aantal personen in het secundaire effect (letaliteit)gebied.

9.4.1 Scenario 4 en het achtergronddocument

Net als bij de eerdere uitgewerkte 'fakkelscenario's' kunnen de gevolgen voor dit scenario ook worden gerepresenteerd door het scenario "kleine (niet relevante) continue uitstroming (§ 8.5.3) in het achtergronddocument [2] (fakkellengte 15 m en plasbrand van 300 m²). De fakkellengte is wat korter, maar de berekeningen van de effecten van de fakkelbrand op de gebieden boven- en benedenstrooms op basis van een 300 m² plasbrand (390 – 600 MW) worden enigszins overschat (zie ook §2.5.4). Derhalve lijken de gevolgen van scenario "kleine (niet relevante) continue uitstroming (§ 8.5.3) in het achtergronddocument [2] voor scenario 4 wel bruikbaar.

9.4.2 Kansen

Voor de kansen geldt:

- Kans op ongeval met letsel = $F_{\text{letsel}} = F_{\text{letsel}}$
- vervolgekans op relevante uitstroming = x
- vervolgekans op continue uitstroming = 1-y-z
- De kans op directe ontsteking van een brandbaar gas = $P_{\text{ont.dir.GF}} = 0.8$ (zie Tabel 3-10, in [2]).

9.5 Conclusie GFOL

In Tabel 45 zijn de resultaten samengevat. Doordat de hoeveelheden kleiner zijn zullen de gevolgen ook minder ernstig zijn dan bij bulktransport van LNG. Niettemin zijn ze, met name het continue uitstroom scenario waarbij gasophoping kan plaatsvinden, significant, en zullen ze, zeker als deze transportbrandstof meer gebruikt zal gaan worden, een bijdrage leveren aan de risico's in tunnels. Zoals reeds enige malen gezegd verdient het aanbeveling om de relatie tussen de grootte van de explosieve wolk en het explosiegedrag nader te onderzoeken. Ook zullen de faalfrequenties nog moeten worden vastgesteld.

Tabel 45 Overzicht van de gevolgen en frequenties van de scenario's voor GFOL (LNG alleen) als brandstof voor bussen en vrachtauto's. L1 – L6 en P1 – P6 refereren naar de notatie in [2].

GFOL	P(scenario)		condities	Type effect en P(effect)	Lengte deelgebieden (m)						Overlijdenskans					
Scenario					L1	L2	L3	L4	L5	L6	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1: Instantaan falen – Externe brand - Warme BLEVE	$= F(\text{letsel}) * x * y$	LNG		Warme BLEVE / hitte en druk	230			230			1			1		
2: Instantaan falen Vertraagde ontsteking – Gaswolkexplosie en plasbrand	$= F(\text{letsel}) * x * z$	LNG		gaswolkexplosie	0	0	25	25	0	0	0	0	1	1	0	0
3: Continue uitstroming uit opening van 17 mm - Vertraagde ontsteking, - Gaswolkexplosie	$= F(\text{letsel}) * x * (1-y-z) * 0.2$	LNG	File benedenstrooms	gaswolkexplosie	0	0	75	75	0	0	0	0	1	1	0	0
			geen file benedenstrooms	geen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4: Continue uitstroming - Directe ontsteking – Fakkels**	$= F(\text{letsel}) * x * (1-y-z) * 0.8$	LNG	File benedenstrooms en fakkels "naar achteren"	hitte en fakkels	0	120MW brand		32		120MW brand		0	0	1	1	0
			File benedenstrooms en fakkels "naar voren"		0	120MW brand		32		120MW brand		0	0	1	1	0
			Geen file benedenstrooms en fakkels "naar achteren"		0	120MW brand		32		0	0	0	1	1	0	0
			Geen file benedenstrooms en fakkels "naar voren"		0	120MW brand		32		0	0	0	1	1	0	0

** Ook goed bruikbaar zijn de waardes in § 3.3.2. van het achtergronddocument [2]: fakkellengte 14 m; hittestraling van een plasbrand van 300 m²

10 Conclusies en aanbevelingen

10.1 Algemeen

Uit de berekeningen blijkt dat de risico's van bulkvervoer van CNG, CH₂, LNG en LH₂ grote overeenkomsten vertonen met het bulkvervoer van GF (LPG). Aangezien de hoeveelheden die als gecompriëerd gas (CNG en CH₂) worden vervoerd kleiner zijn dan de als vloeistof vervoerde gassen, zullen de gevolgen ook minder ernstig zijn. Niettemin zijn gaswolkexplosies, deflagraties en zelfs detonaties mogelijk op basis van de uitgangspunten als gedefinieerd in het achtergronddocument van QRA-tunnels [2] ten aanzien van de relatie tussen gaswolkafmetingen en explosiegedrag.

Dit betekent dat de in QRA-tunnels gehanteerde voorwaarde dat uitstroming meer moet zijn dan 100 kg mogelijk moet worden heroverwogen bij het vervoer van deze 'nieuwe' gecompriëerde gassen. Sowieso zullen de scenariofrequenties van de onder druk vervoerde gassen, met name faalkansen van flessen en aansluitingen nog nader moeten worden bepaald. Dit type vervoer komt immers niet voor in het huidige model.

Hoewel bij het toepassen van deze stoffen als voertuigbrandstof de hoeveelheden nog kleiner zijn, kunnen de gevolgen toch nog zeer ernstig zijn. Met name indien een hoeveelheid gas zich met de lucht in de tunnel kan mengen tot een explosief mengsel voordat ontsteking optreedt, zijn gaswolkexplosies en zelfs deflagraties mogelijk, weer op basis van de uitgangspunten als gedefinieerd in het achtergronddocument van QRA-tunnels [2]. Bij waterstof, met een explosieve bereik van 4 – 75%, kan zo'n situatie zich relatief gemakkelijk voordoen. Over grote lengtes in de tunnel kunnen dan letale slachtoffers vallen.

Indien directe ontsteking optreedt van een ontsnappend gas, bijvoorbeeld na afbreken van een aansluiting of bij opening van een veiligheidsventiel, kan de hitte en mogelijk het verbrandingsgas van de fakkel slachtoffers veroorzaken. De effecten kunnen worden gemodelleerd met de bestaande methodieken.

Indien het gebruik van deze stoffen als brandstof in omvang zal toenemen kan dit de berekende risico's in tunnels significant vergroten. Het verdient dan ook aanbeveling om de aannames in de huidige methodiek ten aanzien van wolkgroottes die tot deflagratie of detonatie leiden nog eens nader te onderzoeken en mogelijk te verfijnen. Uit een studie door Gexcon, bijvoorbeeld, bleek dat, door een andere berekeningswijze van de omvang van de explosieve wolk in tunnels, de gegenereerde drukken, in geval van waterstof, mogelijk een factor 100 lager zijn [21]. Aan (de beperking van de bijdrage tot) het risico door fakkels zal mogelijk ook nog aandacht moeten worden besteed.

Ook hier geldt dat scenariofrequenties en dus faalkansen van de brandstoftanks en de aansluitingen nog nader moeten worden vastgesteld.

Gekoeld bulktransport van stikstof en kooldioxide wordt bij de huidige risicoanalysemethodiek niet meegenomen, omdat N₂ en CO₂ niet als gevaarlijke stoffen worden beschouwd. Voor CO₂ echter zijn in de literatuur probit relaties afgeleid voor de toxiciteit. Op basis van deze relaties kunnen ongevallen met CO₂ in tunnels tot significante aantallen letale slachtoffers leiden. Het verdient dan ook aanbeveling nader te overwegen of deze stof zal moeten worden meegenomen bij risicoberekeningen in tunnels.

Een ander aspect van het vervoer van cryogene vloeistoffen is de invloed van de extreem lage temperatuur: dit kan leiden tot bevroeringsverschijnselen en mistvorming (dus beperkingen bij vluchten). Ook de vorming van de verstikkende atmosfeer kan, hoewel die niet toxisch is, mogelijk van invloed zijn op het vluchtgedrag van personen in de tunnel en mogelijk tot slachtoffers leiden. Nader onderzoek hieromtrent is wenselijk.

Vervoer van 50l gasflessen van CO₂ en N₂ alsmede vervoer van waterstof geadsorbeerd aan metaalhydride zullen de risico's in tunnels niet vergroten.

10.2 Bulkvervoer (gasflessen) van GFOP (CNG en CH₂)

De scenario's die bij deze wijze van vervoer horen vertonen grote overeenkomsten met het vervoer van tot vloeistof verdichte brandbare gassen (GF). Het zijn echter geen vloeistoffen en hoewel de drukken veel hoger zijn dan bij GF zijn de hoeveelheden die per unit (fles) vervoerd worden aanzienlijk kleiner, en daarmee i.h.a. ook de gevolgen. Niettemin is de inhoud voldoende om bij enkele scenario's eenieder in de tunnel in beide buizen letaal te verwonden, althans op basis van de ruwe aannames ten aanzien wolkgroottes die tot deflagratie of detonatie leiden die in het achtergronddocument [2] worden gehanteerd. Dit kan gebeuren bij *instantaan vrijkomen van de gehele inhoud, gevolgd door vertraagde ontsteking*. Voor dit scenario zouden dan ook, weliswaar met enige overschatting, de gevolgen uit de bestaande berekeningen voor GF kunnen worden gebruikt. Het verdient echter aanbeveling om de aannames ten aanzien wolkgroottes die tot deflagratie of detonatie leiden nog eens nader te onderzoeken.

Voor de berekeningen van de gevolgen van een fakkelbrand (afbreken van kop of aansluiting en directe ontsteking van het vrijgekomen gas) zijn de resultaten zoals deze in het achtergronddocument [2] voor een kleine uitstroming van GF zijn berekend goed bruikbaar.

Voor de overige scenario's zal 1 op 1 overnemen van de GF-scenario's tot aanzienlijke overschatting van gevolgen en risico's leiden.

Derhalve zal hiervoor een aparte categorie moeten worden ingevoerd in QRA tunnels. Mogelijk kan men de gevolgen voor CNG en CH₂ wel bundelen waarbij de meeste ernstige gevolgen worden gehanteerd voor beide categorieën.

Voor de berekening van de faalkansen van de gasflessen en het afbreken van leidingen zullen aanvullende studies moeten worden uitgevoerd. Verder zal de relevantie van de in QRA-tunnels gebruikte voorwaarde dat de uitstroming meer dan 100 kg moet bedragen nader moeten worden onderzocht.

10.3 Bulktransport GFOL

Meer nog dan bij GFOP vertonen de scenario's die bij deze wijze van vervoer horen grote overeenkomsten met het vervoer van tot vloeistof verdichte brandbare gassen (GF). De gevolgen van een BLEVE en instantaan vrijkomen met vertraagde ontsteking zijn gelijk doordat de tunnel zal bezwijken en eenieder in de tunnel plus in een gebied 150 m buiten de tunnel zal omkomen. Hiervoor kunnen dan ook de gevolgen uit de bestaande berekeningen voor GF worden gebruikt.

Bij continue uitstroming en vertraagde ontsteking is de aanname voor GF dat altijd de tunnel zal bezwijken en tot 150 m buiten de tunnel eenieder komt te overlijden mogelijk wat conservatief, maar dit lijkt niettemin een goed uitgangspunt.

Voor fakkels (continue uitstroming, directe ontsteking) is het GF scenario te optimistisch. De fakkellengte is wat aan de korte kant (59 m voor propaan versus 74 en 79 m voor waterstof en methaan respectievelijk). De snelheid waarmee de hete verbrandingsgassen zich door de tunnel verplaatsen is groter dan de initiële luchtverplaatsingssnelheid (2 m/s) en groter dan 1 m/s (13.5 m brede tunnel) en 1.6 m/s (9 m brede tunnel) voor propaan. Hierdoor zullen er stroomopwaarts van de fakkel slachtoffers vallen en zullen er stroomafwaarts meer slachtoffers vallen dan bij GF. Aparte gevolgberekeningen voor GFOL zijn derhalve wenselijk. Mogelijk kunnen dan de schadeafstanden van LNG worden gehanteerd voor zowel LNG als LH2, waardoor ook deze categorieën kunnen worden gebundeld.

Aangezien dit vervoer plaatsvindt in druktankwagens, kunnen de hiervoor in het achtergronddocument [2] afgeleide kansen en frequenties worden gebruikt.

10.4 Gasflessentransport GNRP (CO₂ en N₂)

Ongevallen met in 50 liter flessen vervoerd gasvormig N₂ en CO₂ zullen niet tot letale slachtoffers leiden. Derhalve hoeven voor deze stoffen geen scenario's in [2] worden toegevoegd.

10.5 Bulktransporten GNRL N₂ en CO₂

Stikstof:

Ongevallen met bulkvervoer van tot vloeistof gekoeld N₂ kan leiden tot situaties waarin personen enkele minuten aan een verstikkende (niet toxische) en koude atmosfeer worden blootgesteld. Hierdoor kan men onwel worden, maar indien de tunnelventilatie niet wordt uitgeschakeld zal dit naar verwachting niet tot letale verwondingen leiden. Wel kunnen er bevroeringsverschijnselen optreden. Indien echter de tunnelventilatie uitvalt kunnen dodelijke slachtoffers vallen a.g.v. verstikking.

Niettemin verdient het aanbeveling om nader onderzoek te doen naar de gevolgen van het vrijkomen van grote hoeveelheden cryogene vloeistoffen, waarbij in het bijzonder wordt gekeken naar:

- De verstikkende atmosfeer
- De invloed van de extreem koude vloeistof op aanwezigen en mogelijk getroffen installaties
- De verdamping / warmteopname vanuit de omgeving
- Zichtbeperking door mistvorming die vluchten hindert.

Kooldioxide:

CO₂ wordt als een niet toxische stof gekwalificeerd en wordt als zodanig niet meegenomen in de standaard risicoberekeningen. In de literatuur zijn echter probit functies gegeven voor de toxiciteit van CO₂. Als we hier vanuit gaan, zoals bij de berekeningen in dit document is gebeurd, kunnen ongevallen met bulktransporten van CO₂ in tunnels tot letale slachtoffers leiden.

Uitgezocht zal moeten worden of en zo ja welke probit relatie het beste kan worden gehanteerd bij risicoberekeningen met CO₂.

Aangezien het transport van cryogeen CO₂ en N₂ plaatsvindt in druktankwagens, kunnen de faalfrequentie van dergelijke tanks uit het achtergronddocument [2] worden toegepast.

10.6 NR: transport van vast CO₂ en waterstof geadsorbeerd aan metaalhydride

Het vrijkomen van vast CO₂ zal geen significante invloed hebben op de gevolgen bij een ongeval. Wel kunnen mogelijk de personen die direct in contact komen met de vrijkomende stukken CO₂ verwondingen oplopen als gevolg van bevriezing. Ook een ongeval met een vrachtauto met aan metaalhydride geadsorbeerd waterstof zal niet tot extra slachtoffers leiden buiten die afkomstig van de impact.

10.7 Gebruik van GFOP (CNG en CH₂) als brandstof

Evenals bij het transport van deze stoffen wordt bij gebruik van CNG en CH₂ als brandstof gebruik gemaakt van gascilinders die onder hoge druk staan. De hoeveelheden zijn weliswaar kleiner maar de gevolgen zijn zeker niet verwaarloosbaar. Zij kunnen nog zeer significant zijn. In het bijzonder bij de scenario's waar zich een explosief gasmengsel in de tunnel kan ophopen kunnen gaswolkexplosies en mogelijk deflagraties ontstaan, althans op basis van de (conservatieve) aannames die ten grondslag liggen aan de huidige berekeningsmethodiek. Als CNG en CH₂ brandstoftanks in grote(re) getale toegepast gaan worden zou dit een significante impact op de berekende risico's in tunnels hebben. Dit geldt met name voor CH₂ onder 700 bar in personenauto's. Het valt derhalve aan te bevelen om de aannames aangaande wolklengte en gasexplosies die zijn gebruikt in het achtergronddocument [2] en aan de hier berekende gevolgen ten grondslag liggen, aan een meer gedetailleerde studie te onderwerpen. Uit een studie door Gexcon, bijvoorbeeld, bleek dat, door een andere berekeningswijze van de omvang van de explosieve wolk in tunnels, de gegenereerde drukken, in geval van waterstof, mogelijk een factor 100 lager zijn [21].

Om de faalfrequenties van deze brandstoftanks te bepalen zal aanvullend onderzoek nodig zijn.

10.8 GFOL (LNG) als brandstof

LNG wordt nog weinig als brandstof gebruikt. Alleen gegevens voor gebruik als brandstof bij vrachtvervoer of bussen zijn bekend. Doordat de hoeveelheden kleiner zijn dan bij bulktransport van LNG zullen de gevolgen ook minder ernstig zijn. Niettemin zijn ze, met name het continue uitstroom scenario, significant, en zullen ze, zeker als deze transportbrandstof meer gebruikt zal gaan worden, een bijdrage leveren aan de risico's in tunnels. Zoals reeds enige malen gezegd verdient het ook nu aanbeveling om de relatie tussen de grootte van de explosieve wolk en het explosiegedrag nader te onderzoeken. Ook hier zullen de faalfrequenties nog moeten worden vastgesteld.

11 Referenties

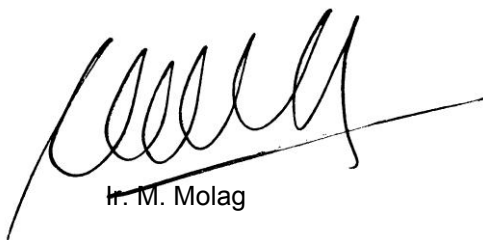
- [1] “Verkennde studie t.b.v. de modellering van het risico van vervoer van nieuwe stoffen door tunnels”, J.E.A. Reinders, TNO rapport TNO-060-UT2012-01425, 2012
- [2] QRA-tunnels 2.0 Achtergronddocument; Rijkswaterstaat Ministerie van Infrastructuur en Milieu, Steunpunt Tunnelveiligheid, 2 februari 2012,
- [3] persoonlijke communicatie met Air Products, Rotterdam
- [4] Vereniging van Fabrikanten van Industriële Gassen – VFIG: “Informatie over de gascilinder voor industriële gassen”.
- [5] persoonlijke communicatie met Van der Giessen en van Bellen, Oud-Bijerland
- [6] persoonlijke communicatie met Schenk, Barendrecht
- [7] “Concept rekenmethodiek LNG-Tankstations”, L. Vijgen, september 2012.
- [8] “Sublimation Rate of Dry Ice Packaged in Commonly Used Quantities by the air Cargo Industry”, Douglas C. Caldwell, Russell J. Lewis, Robert M. Shaffstall, Robert D. Johnson, Civil Aerospace Medical Institute Federal Aviation Administration Oklahoma City, OK 73125, August 2006.
- [9] “Rekenmethodiek Externe Veiligheid Tunnels”. J.E.A. Reinders, M. Molag, J. Weerheim, M. Luppi, A.C. van de berg, TNO rapport TNO-060-UT-2011-01055, 2011.
- [10] “Vuistregels voor explosiebelasting en respons van verkeerstunnels”. A.C. van den Berg, M.P.M. Rhijnsburger, J. Weerheijm, TNO-rapport PML 2001-C121, 2001.
- [11] persoonlijke communicatie met Carbolim, Geleen
(<http://www.chemelot.nl/default.aspx?id=3&template=bedrijf.htm&bid=64&taal=nl>)
- [12] Using Metal Hydride to Store Hydrogen, L. Kit Heung, Savannah River Technology Center, Aiken, SC 29808 USA, 2003.
- [13] persoonlijke communicatie met MAN-trucks
- [14] Dynetek (<http://www.dynetek.com/index.php>)
- [15] Factsheet Brandstoffen voor het wegverkeer – kenmerken en perspectief, Ruud Verbeek, Bettina Kampman, TNO / CE Delft, 2012.
- [16] Gemeentelijk Vervoerbedrijf Amsterdam (GVB)
- [17] C. Vianello, S. Machietto and G. Maschio, Risk assessment of a CO₂ pipeline network for CCS: a UK case study. 3rd International Forum on the Transportation of CO₂ by Pipeline, June 2012.
- [18] M. Molag, I.M.E. Raben, Externe veiligheid onderzoek CO₂ buisleiding bij Zoetermeer. TNO, Apeldoorn, 2006, p. 46.
- [19] Green book (CPR 16E) - Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials (CPR 16E - Green book). TNO, 1992.
- [20] J.S.P. Dijkshoorn and F.J.H. Kaman, QRA CO₂ transport ROAD. Tebodin, November 2011. Ref. 3413184.
- [21] Prankul Middha, Olav R. Hansen. CFD simulation study to investigate the risk from hydrogen vehicles in tunnels. International Journal of Hydrogen Energy Volume 34, Issue 14, July 2009, Pages 5875–5886.

12 Ondertekening

Naam en adres van de opdrachtgever:

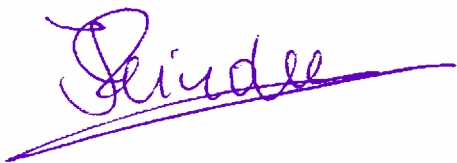
Rijkswaterstaat Dienst Infrastructuur
Afdeling Veiligheid
Postbus 20000
3502 LA UTRECHT

Naam en paraaf tweede lezer:



H. M. Molag

Ondertekening:



Dr. ir. J.E.A. Reinders
Projectleider

Autorisatie vrijgave:



Drs. H.C. Borst
Research Manager