

---

# **Einfluss von Fahrzeugen mit neuen Antriebs-Techno- nologien auf die Tunnelsi- cherheit**

---

Fachveröffentlichung der  
Bundesanstalt für  
Straßenwesen

---

# Einfluss von Fahrzeugen mit neuen Antriebs-Technologien auf die Tunnelsicherheit

---

von

Bernhard Kohl, Harald Kammerer, Regina Schmidt, Oliver Heger  
ILF Consulting Engineers Austria GmbH, Linz

Peter Sturm, Patrik Fössleitner  
Technische Universität Graz, Institut für Thermodynamik und nachhaltige  
Antriebssysteme (ITnA), Graz

---

## Impressum

Fachveröffentlichung zu Forschungsprojekt: 15.0675  
Einfluss von Fahrzeugen mit neuen Antriebs-Technologien auf die Tunnelsicherheit

Fachbetreuung:  
Anne Lehan

Referat:  
Tunnel- und Grundbau, Tunnelbetrieb, Zivile Sicherheit

Herausgeber:  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

<https://doi.org/10.60850/fv-b-15.0675>

Bergisch Gladbach, Juli 2024

Zu diesem Forschungsprojekt werden nur die Kurzfassung und der Kurzbericht veröffentlicht.  
Die Langfassung des Schlussberichts kann auf Anfrage an [verlag@bast.de](mailto:verlag@bast.de) zur Verfügung gestellt werden.

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben. Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

## Kurzfassung

Die „Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung“ ist das zentrale Instrument zur nachhaltigen Gestaltung der Energiewende und hat die Förderung innovativer Antriebe und alternativer Kraftstoffe sowie den Aufbau der notwendigen Infrastruktur zum Ziel. Derzeit wird der Straßenverkehr klar durch Benzin- und Diesel-betriebene Fahrzeuge dominiert. Die jährlich wachsende Zahl an Fahrzeugen und ansteigende Fahrleistungen ziehen dabei einen stetig anwachsenden Energiebedarf nach sich. Der Verkehrssektor trägt somit einen erheblichen Beitrag zu den Treibhausgasemissionen bei. Die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs durch die Etablierung klimafreundlicher Alternativen als Ersatz zu erdölbasierten Kraftstoffen ist daher eine Grundvoraussetzung für die Erreichung der Klimaschutzziele. Der Einsatz von Fahrzeugen mit neuen alternativen Antriebstechnologien, allen voran Elektro, aber auch Wasserstoff sowie verstärkt LNG und CNG, wird in Zukunft rasch zunehmen. Hinzu kommt die zunehmende Urbanisierung und daraus resultierend die verstärkte Verlagerung des Verkehrs in den Untergrund.

Bestehende Empfehlungen und Regelwerke zur Tunnelsicherheit, sowie Methoden zur Risikobewertung beschränken sich bislang jedoch ausschließlich auf Ereignisse im Zusammenhang mit Fahrzeugen mit konventionellen Antriebsformen. Um auch in Zukunft das bestehende Sicherheitsniveau halten zu können, sind die Auswirkungen von Ereignissen in Straßentunneln unter Beteiligung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben zu ermitteln und zu bewerten. Ziel des Projekts war daher die Auswirkungen von Leckagen, Kollisionen und Fahrzeugbränden mit dem Schwerpunkt alternativer Antriebstechnologien auf die Sicherheit der Tunnelnutzer zu analysieren, die risikoanalytische Bewertungsmethodik von Straßentunneln entsprechend zu adaptieren und gegebenenfalls erforderliche Anpassungen von Anforderungen an Straßentunnel abzuleiten.

Basierend auf der durchgeführten Grundlagenanalyse bzw. der prognostizierten Entwicklungen für 2030 und 2040 bezüglich möglicher alternativer Antriebe im Fahrzeugkollektiv wurden maßgebliche repräsentative Ereignisbäume entwickelt. Diese stellen die Grundlage für die weitere risikoanalytische Untersuchung dar, wobei die Häufigkeiten an den einzelnen Verzweigungspunkten, wo immer möglich, entsprechend der allgemeinen Straßentunnelrisikoanalyse, teils aber auch aufgrund von Expertenabschätzungen oder Erkenntnissen aus anderen Forschungsprojekten, getroffen wurden. Zur Abschätzung der Ausmaßermittlung der aus den Ereignisbäumen resultierenden Schadensszenarien wurden numerische Methoden, numerische Strömungsmodelle, Evakuierungsmodelle, Wirkungsmodelle oder auch analytische Modelle eingesetzt.

Die Risikoanalyse wurde für einen zuvor definierten Vergleichstunnel einmal entsprechend einem Vergleich der Risiken für maximale Anteile der Antriebsarten, einmal für den prognostizierten Verkehrsmix und einmal im Zuge einer Sensitivitätsanalyse (maximal involvierte Menge an alternativem Energieträger – maximales Schadensmaß), durchgeführt. Entsprechend der Untersuchung mit der Annahme, dass alle Antriebsarten zu 100% in den einzelnen Fahrzeugtypen verbaut sind, ergibt sich für den betrachteten Vergleichstunnel keine relevante Gesamtrisikoerhöhung durch alternative Antriebe. Bezogen auf die reinen Brand- und Explosionsrisiken, zeigt sich jedoch ein zum Teil deutlicher Risikoanstieg durch gasbetriebene Fahrzeuge. Für den betrachteten Vergleichstunnel spielen diese zwar dennoch absolut gesehen keine Rolle, für andersartige Vergleichstunnel, mit grundsätzlich höherem Brandrisiko, kann eine relevante Erhöhung des Gesamtrisikos aber nicht ausgeschlossen werden.

Ergebnisse für den Verkehrsmix bzw. dem Mix der Antriebsarten entsprechend der Prognosedaten weisen für den betrachteten Vergleichstunnel ebenso keine Erhöhung des Gesamtrisikos gegenüber dem Risiko des momentanen Verkehrsmix auf. Brand- und Explosionsrisiko sind zwar absolut gesehen für den Vergleichstunnel nicht relevant, könnten sich aber für die prognostizierten Anteile der alternativen Antriebe deutlich erhöhen. Aufgrund fehlender Erfahrungen aus realen Ereignissen und weil die Beteiligung mehrerer Tanks nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse

durchgeführt, in der die Beteiligung des gesamten Tanksystems angenommen wurde. Dies führte ausschließlich bei den Explosionsszenarien zu einer Erhöhung des Schadensausmaßes.

## **Abstract**

### **Impact of vehicles with new energy carrier technologies on tunnel safety**

The "Mobility and Fuel Strategy of the Federal Government" is the central instrument for the sustainable design of the energy transition and aims to promote innovative energy carriers and alternative fuels as well as the development of the necessary infrastructure. Road traffic is currently clearly dominated by petrol and diesel-powered vehicles. The annually growing number of vehicles and increasing mileage result in a steadily increasing energy requirement. The transport sector thus makes a significant contribution to greenhouse gas emissions. The decarbonization of road traffic through the establishment of climate-friendly alternatives as a substitute for petroleum-based fuels is therefore a basic requirement for achieving climate protection goals. The use of vehicles with new alternative energy carrier technologies, above all electric, but also hydrogen and increasingly LNG (liquefied natural gas) and CNG (compressed natural gas), will increase rapidly in the future. Moreover, as a result of the increasing urbanization the traffic is shifted to the underground.

Existing recommendations and regulations for tunnel safety, as well as methods for risk assessment, have so far been limited exclusively to events in connection with vehicles with conventional energy carrier systems. In order to be able to maintain the existing level of safety in the future, the effects of events in road tunnels involving vehicles with alternative energy carriers must continuously be determined and evaluated. The aim of the project was therefore to analyze the effects of leaks, collisions and vehicle fires with a focus on alternative energy carrier technologies on the safety of tunnel users, to adapt the risk-analytical assessment method for road tunnels accordingly and to derive any necessary adjustments to the requirements for road tunnels.

Based on the fundamental analysis carried out and the forecast developments for 2030 and 2040 with regard to possible alternative energy carriers in the vehicle collective, relevant representative event trees were developed. These provided the basis for the further risk-analysis investigation, whereby the frequencies at the individual branching points were determined, wherever possible, in accordance with the general road tunnel risk analysis, but also partly on the basis of expert assessments or findings from other research projects. Numerical methods, numerical flow models, evacuation models, impact models or analytical models were used to estimate the extent of the damage scenarios resulting from the event trees.

The risk analysis was carried out for a previously defined comparison tunnel, once in accordance with a comparison of the risks for maximum share of energy carrier types, once for the forecast traffic mix and once in the course of a sensitivity analysis (maximum amount of alternative energy carrier involved – maximum extent of damage).

The results according to the maximum share of energy carrier types, applied to the comparison tunnel under consideration, showed no relevant overall increase in risk due to the consideration of alternative energy carriers. In relation to the pure fire and explosion risks, however, there is a significant increase in risk from gas-powered vehicles. For the tunnel under consideration, however, they are immaterial, but for different tunnels, with a fundamentally higher fire risk, a relevant increase in the overall risk cannot be ruled out.

Results according to the prognosticated traffic mix applied to the comparison tunnel showed no increase in the overall risk for the forecast traffic mix compared to the current traffic mix. Although the risk of fire and explosion is not relevant to the model tunnel in absolute terms, it could increase significantly for the forecast shares of alternative energy carriers.

Due to a lack of experience from real events and because the involvement of several tanks cannot be completely ruled out, a sensitivity analysis was also carried out in which the involvement of the entire tank system was assumed. This only led to an increase in the extent of damage in the explosion scenarios.

# KURZBERICHT

## EINFLUSS VON FAHRZEUGEN MIT NEUEN ANTRIEBS- TECHNOLOGIEN AUF DIE TUNNELSICHERHEIT

### 1 EINLEITUNG

Die „Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie der Bundesregierung“ ist das zentrale Instrument zur nachhaltigen Gestaltung der Energiewende und hat die Förderung innovativer Antriebe und alternativer Kraftstoffe sowie den Aufbau der notwendigen Infrastruktur zum Ziel. Derzeit wird der Straßenverkehr klar durch Benzin- und Diesel-betriebene Fahrzeuge dominiert. Die jährlich wachsende Zahl an Fahrzeugen und ansteigende Fahrleistungen ziehen dabei einen stetig anwachsenden Energiebedarf nach sich. Der Verkehrssektor trägt somit einen erheblichen Beitrag zu den Treibhausgasemissionen bei. Die Dekarbonisierung des Straßenverkehrs durch die Etablierung klimafreundlicher Alternativen als Ersatz zu erdölbasierten Kraftstoffen ist daher eine Grundvoraussetzung für die Erreichung der Klimaschutzziele. Der Einsatz von Fahrzeugen mit neuen alternativen Antriebstechnologien, allen voran Elektro, aber auch Wasserstoff sowie verstärkt LNG (Liquefied Natural Gas) und CNG (Compressed Natural Gas), wird in Zukunft rasch zunehmen. Hinzu kommt die zunehmende Urbanisierung und daraus resultierend die verstärkte Verlagerung des Verkehrs in den Untergrund.

Bestehende Empfehlungen und Regelwerke zur Tunnelsicherheit, sowie Methoden zur Risikobewertung beschränken sich bislang jedoch ausschließlich auf Ereignisse im Zusammenhang mit Fahrzeugen mit konventionellen Antriebsformen. Um auch in Zukunft das bestehende Sicherheitsniveau halten zu können, sind die Auswirkungen von Ereignissen in Straßentunneln unter Beteiligung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben zu ermitteln und zu bewerten. Ziel des Projekts war daher die Auswirkungen von Leckagen, Kollisionen und Fahrzeugbränden mit dem Schwerpunkt alternativer Antriebstechnologien auf die Sicherheit der Tunnelnutzer zu analysieren, die risikoanalytische Bewertungsmethodik von Straßentunneln entsprechend zu adaptieren und gegebenenfalls erforderliche Anpassungen von Anforderungen an Straßentunnel abzuleiten.

### 2 GRUNDLAGENANALYSE

In der Grundlagenanalyse konnte auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche eine Aussage über die mögliche Entwicklung der Zusammensetzung der Antriebssysteme getroffen werden, wobei diesbezüglich Daten aus der EU als auch weltweite Studien herangezogen wurden.

Nach genauer Analyse der bestehenden Fahrzeugflotte für das Jahr 2020 konnte eine Ausgangsbasis für die Entwicklung am Neuwagenmarkt gefunden werden. Für dessen Quantifizierung wurde der Durchschnittswert der Jahre 2016-2020 herangezogen<sup>1</sup>. Diese Analyse wurde für die Fahrzeugkategorien PKW, leichte LKW, schwere LKW als auch für Busse durchgeführt.

Alle diesbezüglich diskutierten Prognosen zeigten, dass konventionelle Antriebe für alle Fahrzeugkategorien an Bedeutung verlieren werden, nichtsdestotrotz aber einen Großteil der Fahrzeugflotte ausmachen werden. Der größte Wandel ist für PKW bzw. Busse zu erwarten da bereits heute ein Viertel aller neuzugelassenen Fahrzeuge Antriebe basierend auf alternativen Energiequellen besitzen.

<sup>1</sup> Aufgrund der Covid 19-Pandemie ist das Jahr 2020 alleine nicht repräsentativ in Bezug auf Neuzulassungen.

Tabelle 1 stellt die Relevanz der Antriebstypen für die 4 betrachteten Fahrzeugtypen in den Jahren 2020, 2030 sowie 2040 dar und fasst somit die identifizierten Prognosen in übersichtlicher Form zusammen. Grundsätzlich ist die zuverlässige Vorhersage des zu erwartenden Fahrzeugmix schwierig. Viele Einflussfaktoren, insbesondere technologische Entwicklungssprünge und politische Entscheidungen, beeinflussen die Durchsetzungskraft der einzelnen Technologien und die dargestellten Prognosen zeigen vielmehr einen momentan gültigen Trend als eine zuverlässige Vorausschau.

**Tabelle 1: Prognose der Relevanz der Antriebstypen auf Fahrzeugtypen für 2020, 2030 und 2040<sup>2</sup>**

	PKW			Leichte LKW			LKW schwer			BUS		
	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
Konventionell	hoch	hoch	mittel	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Hybrid	hoch	mittel	mittel	niedrig	mittel	mittel	niedrig	mittel	niedrig	hoch	mittel	hoch
BEV	mittel	hoch	hoch	niedrig	mittel	mittel	niedrig	niedrig	niedrig	mittel	hoch	hoch
CNG	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	mittel
LNG	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	mittel	niedrig	mittel
LPG	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig
FCEV	niedrig	niedrig	mittel	niedrig	niedrig	mittel	niedrig	niedrig	mittel	niedrig	niedrig	mittel
H <sub>2</sub> -VKM	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	niedrig	mittel	niedrig	niedrig	mittel

### 3 ANSÄTZE FÜR DIE ADAPTIERUNG DER BEWERTUNGSMETHODIK

Eines der zentralen Ziele des gegenständlichen Forschungsprojektes war es, Ansätze für die Adaptierung der risikoanalytischen Untersuchung von Tunnelereignissen mit Beteiligung alternativ angetriebener Fahrzeuge zu identifizieren. Dies geschah anhand von Ablaufmodellierungen von Unfällen mit Beteiligung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben. Basierend auf den gezogenen Schlüssen der Grundlagenanalyse wurden Gefährdungsbäume für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge, brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge als auch für Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen (CGH<sub>2</sub>, LNG) aufgestellt und diskutiert. Die angeführten Energieträger weisen besondere physikalische Eigenschaften auf, welche unmittelbar mit der Speicherart zusammenhängen und differenzierte potentielle Gefährdungstypen bei Unfallbeteiligung zur Folge haben können. Die für jede Antriebsart aufgestellten, sehr allgemein gehaltenen Gefährdungsbäume weisen alle dieselben Verzweigungspunkte wie Energieträger, Fahrzeugtyp, warmes bzw. kaltes Ereignis, Funktionstüchtigkeit der Sicherheitseinrichtung, Objekt der Gefährdung und potentielle Gefährdungstypen, auf. Ein beispielhafter Gefährdungsbäum für den batteriebetriebenen Elektromotor ist in Bild 1 gezeigt.

Für jede oben genannte alternative Antriebsart wurden vier verschiedene Fahrzeugtypen (PKW, leichter LKW, schwerer LKW, Bus) betrachtet und deren entsprechende Relevanz diskutiert denn nicht jedes Antriebssystem ist für jeden Fahrzeugtyp geeignet bzw. wird in jedem Fahrzeugtyp eingesetzt werden. So stellt z.B. ein batteriebetriebener Antrieb für einen Schwerttransporter aufgrund des hohen Gewichts der Batterie keine Alternative zu herkömmlichen

<sup>2</sup> BEV: Batterieelektrisches Fahrzeug (battery electric vehicle), CNG: komprimiertes Erdgas (compressed natural gas), LNG: verflüssigtes Erdgas (liquified natural gas), LPG: Flüssiggas, Autogas (liquified petroleum gas), FCEV: Brennstoffzellen-Fahrzeug (fuel cell electric vehicle), VKM: Verbrennungskraftmaschine

Antrieben dar. Des Weiteren ist eine Aufteilung in unterschiedliche Fahrzeugtypen von großer Wichtigkeit, da diese unterschiedlich große Energiespeicher besitzen, welche an unterschiedlichen Positionen platziert sind und somit differenzierte Gefahrenzonen bzw. Gefährdungen zu Folge haben können. Ein weiterer Verzweigungspunkt in den Gefährdungsbäumen, siehe Bild 1, bezieht sich auf die Art des Ereignisses. Handelt es sich um ein Ereignis mit Brand – warm oder um ein rein mechanisches Ereignis – kalt, ist die verbaute Sicherheitseinrichtung funktionstüchtig oder beschädigt bzw. nicht funktionstüchtig. Im Verzweigungspunkt Objekt der Gefährdung werden zusätzlich zum Ast bezüglich Risiko Tunnelnutzer auch Äste bezüglich Risiko Tunnelinfrastruktur und Risiko Fremdrettung diskutiert. Das Hauptaugenmerk liegt am letzten Verzweigungspunkt, den potentiellen Gefährdungstypen – wie z.B. Hitze, toxische Gase, Säure, Elektrizität, Überdruck, den Auswirkungen einer sich schnell ausbreitenden Flammenfront (Feuerball) und Kälte.

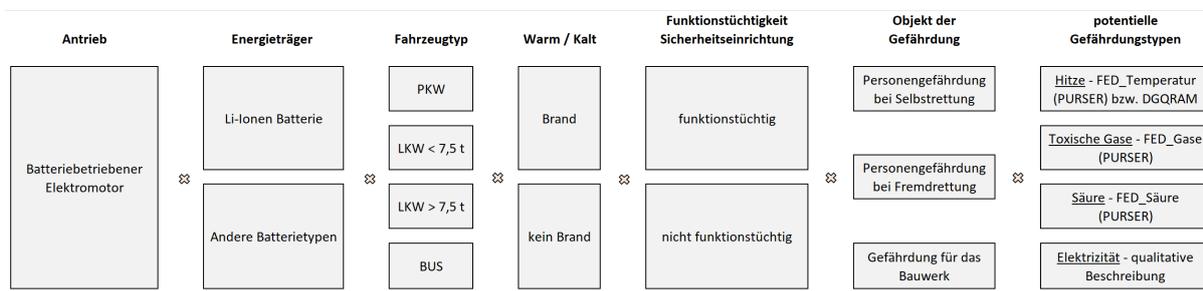


Bild 1: Batteriebetriebener Elektromotor – schematischer Gefährdungsbaum

## 4 RISIKOANALYTISCHE BETRACHTUNG

Basierend auf den Gefährdungsbäumen, verfügbaren Erfahrungsberichten als auch Experteneinschätzungen, wurden die, der Risikoanalyse zugrundeliegenden, Ereignisbäume entwickelt, welche eine überschaubare Anzahl an maßgeblichen Szenarien beinhalten. Je nach Gefährdungsszenario wurde dabei auf bestehende Modelle bzw. Modellgrundlagen zurückgegriffen und notwendige Adaptierungen zur Abbildung des Einflusses von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben vorgenommen. Ausgehend von den Erkenntnissen zur Personensicherheit wurden Schlussfolgerungen zur Bauwerkssicherheit abgeleitet.

### 4.1 Häufigkeitsermittlung

Eingangs ist festzuhalten, dass der Anteil der alternativ angetriebenen Fahrzeuge zu gering ist, um Häufigkeiten auf Basis statistischer Methoden abzuleiten, sodass Abschätzungen der Ereigniswahrscheinlichkeiten derzeit lediglich auf Basis von qualitativen Bewertungen getroffen werden konnten. Dies wird sich jedoch in Zukunft ändern und daher wurde die Möglichkeit zur Berücksichtigung, zukünftiger Daten bei der Entwicklung neuer Ansätze vorgesehen.

In den oben beschriebenen Ereignisbaumverzweigungen wurde, wo immer möglich, auf Häufigkeiten aus der allgemeinen Straßentunnelrisikoanalyse gemäß adaptierten BAST-Heft B66 [1] zurückgegriffen – etwa bei den Kollisions- und Brandhäufigkeiten, oder bei der Aufteilung der Brandgrößen für LKW-Brände. Wo keine entsprechenden Häufigkeiten zur Verfügung standen, wurden durch die am Projekt beteiligten Experten und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse und Annahmen aus ähnlichen Forschungsprojekten, entsprechende Abschätzungen getroffen.

## 4.2 Schadensausmodellierung alternativer Energieträger

### 4.2.1 Li-Ionen Batteriebrand

Bei Li-Ionen Batteriebränden konnte analog zu Bränden konventioneller Fahrzeuge von drei Hauptgefahren in Bezug auf die Personensicherheit ausgegangen werden. Dabei handelt es sich um die Gefährdung durch Hitze, die Gefährdung durch Einschränkung der Sicht (Rauchgase) und um die Gefährdung durch das Einatmen toxischer Stoffe. Demzufolge wurden die im Forschungsprojekt BRAFA [2] definierten Modellbrandkurven als auch die zugehörigen freigesetzten Schadstoffe als Grundlage für die dreidimensionalen CFD Simulationen herangezogen.

### 4.2.2 Wasserstoff VCE

Kommt es zu einem Unfall eines wasserstoffbetriebenen Fahrzeugs kann der Wasserstofftank aufgrund der mechanischen Einwirkung oder aufgrund der thermischen Belastung (bei nicht funktionstüchtiger Sicherheitseinrichtung am Tank) aufreißen und es kommt zu einer Gaswolkenexplosion (Vapour Cloud Explosion, VCE). Bei der Modellierung der VCE wurden zwei unterschiedliche Gefährdungen berücksichtigt: die Gefahr des Feuerballs und die Gefahr des Überdrucks. Der Gefährdungsbereich entsprechend dem Feuerball konnte mit einem experimentell fundierten Zusammenhang zwischen Feuerballdurchmesser und involvierter Masse abgeschätzt werden. Zur Abschätzung des Gefährdungsbereichs Überdruck wurde auf den allgemein gültigen Zusammenhang zwischen Überdruck und Abstand vom Detonationsursprung entsprechend Wasserstofftankexplosionen zurückgegriffen [3].

### 4.2.3 Wasserstoff Freistrahbrand

Kommt es zu einem Brand eines wasserstoffbetriebenen Fahrzeuges und die Temperatur am Sicherheitsventil erreicht einen Grenzwert, wird Wasserstoff gezielt abgeblasen. Dieser wird aufgrund des schon bestehenden Brandes sofort entzündet und führt folglich zu einem Freistrahbrand. Der entsprechende Gefährdungsbereich wurde anhand von Modellergebnissen welche experimentell verifiziert wurden, für alle betrachteten Fahrzeugtypen abgeschätzt [4]. Dabei wurden im Speziellen die unterschiedliche Anzahl an Tanks, die unterschiedlichen Tankvolumina, der mögliche unterschiedliche Speicherdruck und mögliche unterschiedliche Ausblasrichtungen berücksichtigt.

### 4.2.4 LNG BLEVE

Der Überdruck eines explodierenden LNG Tanks im Tunnel wurde mit dem bewährten TNT-Äquivalenzmodell (etwa wie im OECD/PIAR DG-QRAM Model [5]) modelliert. Dabei wird die vorhandene Masse an LNG im Tank in eine äquivalente Masse TNT umgerechnet. Aus zahlreichen Experimenten in Bezug auf den Schaden von TNT-Explosionen kann dann der Schaden bzw. der Gefährdungsbereich der LNG BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) abgeschätzt werden.

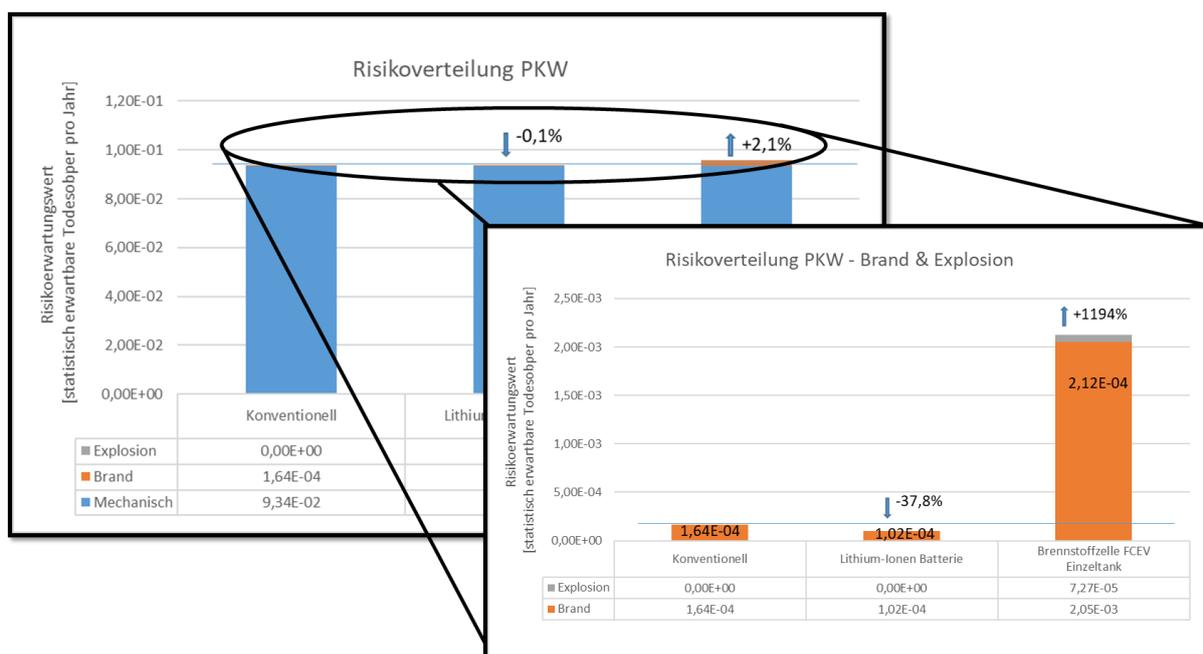
## 4.3 Bewertung und Darstellung von Risiken

Um mögliche zusätzliche Risiken aufgrund alternativ angetriebener Fahrzeuge im Tunnel aufzeigen zu können und zu bewerten, wurde ein geeigneter Vergleichstunnel definiert. Letzterer wurde auf Basis der Ergebnisse im BAST-Forschungsvorhaben FE 15.0663/2019/ERB [6] als ein repräsentativer Richtungsverkehrstunnel (ohne auftretender Verkehrsüberlastung) definiert. Auf Basis dieses Vergleichstunnels wird ein relativer Bewertungsansatz verfolgt, bei dem unterschiedliche Sicherheitsniveaus durch Relativvergleich unterschiedlicher Fahrzeugflottenkonstellationen verglichen werden können. Durch die Verwendung eines relativen Bewer-

tungsansatzes kann der Einfluss von Unschärfen auf das Bewertungsergebnis minimiert werden und dementsprechend auch kleinste sicherheitstechnische Änderungen sichtbar gemacht werden.

#### 4.3.1 Vergleich der Risiken für maximale Anteile der Antriebe

Um das potenzielle Risiko der einzelnen Energieträger objektiv zu vergleichen, wurden die ermittelten Risikowerte je Fahrzeugtyp und je Antriebstechnologie verglichen, wobei jeweils davon ausgegangen wurde, dass der Fahrzeugtyp zu 100% mit der jeweiligen Antriebstechnologie betrieben wird. Repräsentativ für alle untersuchten Fahrzeugtypen sind die Ergebnisse für die drei realistischen zukünftigen PKW-Antriebstechnologien in Bild 2 gezeigt.

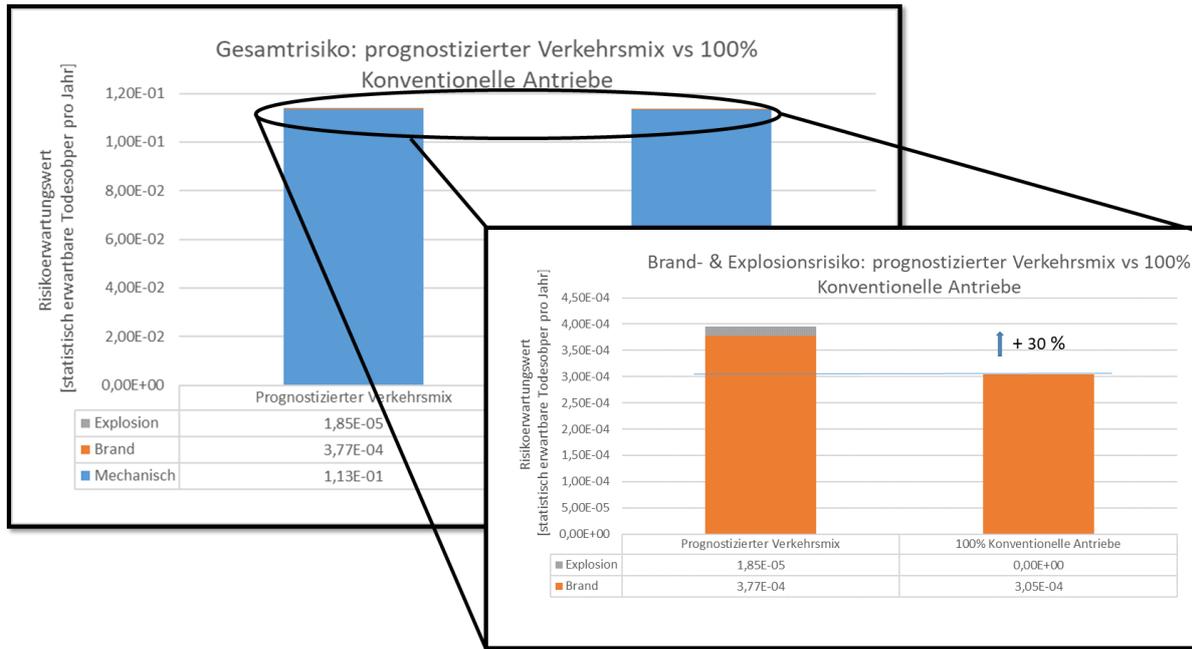


**Bild 2: Vergleich Gesamtrisiko bzw. Brandrisiko und Explosionsrisiko für die drei realistischen zukünftigen PKW-Antriebstechnologien, jeweils unter Annahme eines 100% Anteils der Antriebstechnologie am Fahrzeugtyp – PKW.**

Die Ergebnisse zeigen, dass sich (für den betrachteten Vergleichstunnel) keine relevante Gesamtrisikoerhöhung durch alternative Antriebe ableiten lässt. Bezogen auf die reinen Brand- und Explosionsrisiken, zeigt sich jedoch ein zum Teil deutlicher Risikoanstieg durch gasbetriebene Fahrzeuge (FCEV, VKM CGH2, VKM LNG). Für den betrachteten Tunnel spielen diese zwar dennoch absolut gesehen keine Rolle, für andersartige Vergleichstunnel, mit grundsätzlich höherem Brandrisiko, kann eine relevante Erhöhung des Gesamtrisikos aber nicht ausgeschlossen werden. Die Untersuchung der Auswirkungen von Bränden und Explosionen alternativer Energieträger auf weitere Vergleichstunnel, mit potenziell höherem Brandrisiko (insbesondere Tunnel mit relevantem Stauanteil, oder Gegenverkehrstunnel), stellt daher einen zusätzlichen Forschungsbedarf dar.

#### 4.3.2 Risiken für Anteile der Antriebsarten gemäß Verkehrsprognose

Die Ergebnisse zeigen weiter, dass sich keine Erhöhung des Gesamtrisikos für den prognostizierten Verkehrsmix gegenüber dem momentanen Verkehrsmix ableiten lässt, siehe dazu Bild 3.



**Bild 3: Vergleich des Gesamtrisikos bzw. der Brand und Explosionsrisiken für den prognostizierten Verkehrsmix und für 100% konventionelle Antriebe**

Brand- und Explosionsrisiko sind zwar absolut gesehen für den als repräsentativ angesehenen Vergleichstunnel nicht relevant, können sich aber für die prognostizierten Anteile der alternativen Antriebe deutlich erhöhen. Inwieweit sich die Erhöhung des Brand- und Explosionsrisikos bei anderen Rahmenbedingungen relativiert bzw. auch inwieweit sich bei geänderten Rahmenbedingungen doch eine Erhöhung des Gesamtrisikos ergibt (insbesondere für Tunnel mit relevantem Stauanteil), sollte über zusätzliche Forschungsbemühungen untersucht werden.

#### 4.3.3 Sensitivitätsanalyse bzgl. der Anzahl involvierter Gastanks

Aufgrund fehlender Erfahrungen aus realen Ereignissen und weil die Beteiligung mehrerer Tanks nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann, wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in der die Beteiligung des gesamten Tanksystems angenommen wurde. Dies führte ausschließlich bei den Explosionsszenarien zu einer Erhöhung des Schadensausmaßes. Im Zuge von zusätzlichen Forschungsbemühungen sollten weitere Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden.

### 4.4 Empfehlungen hinsichtlich Selbst-, Fremdrehtung und Bauwerksschutz

#### 4.4.1 Auswirkungen auf die Selbstrettung und die Personensicherheit

Aufgrund der Forschungsergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass nach derzeitigem Wissensstand batteriebetriebene PKW kein maßgeblich höheres Brandrisiko bedingen, als konventionell betriebene Fahrzeuge. Für batteriebetriebene Busse liefert die Risikountersuchung zwar ein geringeres Brandrisiko als für konventionell betriebene Busse, die Ergebnisse für diesen Fahrzeugtyp beruhen aber auf groben Annahmen und Hoch-Skalierungen von PKW-Brandversuchen und sollten daher nur mit Vorbehalt interpretiert werden. Bezüglich der Auswirkungen von Bränden batteriebetriebener Busse gibt es jedenfalls noch grundlegenden Forschungsbedarf, speziell was das Brandverhalten und die Zusammensetzung der Rauchgase betrifft.

Für gasbetriebene Fahrzeuge zeigte die Risikobetrachtung zwar ebenfalls ein annähernd gleichbleibendes Gesamtrisiko wie für konventionell betriebene Fahrzeuge; es konnte jedoch eine deutliche Erhöhung des Brand- und Explosionsrisiko identifiziert werden. Auch wenn

diese Ereignisse (VCE, Freistahlbrand, BLEVE) aus heutiger Sicht als extrem unwahrscheinlich eingestuft werden sollten, gilt für sie grundsätzlich dasselbe wie für große Brandereignisse, und zwar, dass ihnen, auch wenn sie im Gesamtrisikokontext nicht relevant sein mögen, gesellschaftlich eine hohe Aufmerksamkeit zu kommt.

#### 4.4.2 Auswirkungen auf die Tunnelinfrastruktur und den Bauwerksschutz

Für Ereignisse mit batteriebetriebenen Fahrzeugen sind grundsätzlich keine signifikanten Änderungen bzgl. deren Auswirkung auf die Tunnelinfrastruktur zu erwarten. Die Brandlasten sind zwar leicht gegenüber den Brandlasten konventionell angetriebener Fahrzeuge erhöht, sind aber dennoch vergleichbar.

Für gasbetriebene Fahrzeuge ist hingegen sehr wohl eine Änderung der Auswirkungen auf die Infrastruktur denkbar. Den bei einer Tankexplosion entstehenden Überdrücken sollte die Tunnelstruktur zwar grundsätzlich standhalten, insbesondere bei Tunneln in geschlossener Bauweise, mechanische Einbauten, wie Lüftungskomponenten, Notausgangstüren können aber sehr wohl beschädigt werden. Auch eine Zwischendecke könnte den Überdrücken eventuell nicht standhalten und über Teilbereiche ihre Integrität verlieren. Es kann jedoch geschlussfolgert werden, dass Brände von gasbetriebenen Fahrzeugen zwar grundsätzlich zu Beschädigungen der Infrastruktur führen können, es aber aufgrund der geringen abgeschätzten Häufigkeit zu keiner signifikanten Erhöhung der Anzahl von Tunnelsperrern oder der Reparaturkosten kommen sollte.

#### 4.4.3 Auswirkungen auf Fremdrettungskräfte

Nach momentanem Kenntnisstand stellen die bei Bränden batteriebetriebener Fahrzeuge entstehenden Rauchgase / Atemgifte keine signifikant geänderte Gefährdung für Einsatzkräfte dar, da diese mit einer hochwertigen Schutzausrüstung ausgestattet sind. Als problematisch stellt sich momentan die Rettung / Bergung von Fahrzeuginsassen dar, da unter gewissen Umständen, die Karosserie des batterieelektrischen Fahrzeuges unter hoher Spannung stehen könnte. Die in heutigen Fahrzeugbatterien vorgesehenen Sicherheitsmechanismen sollten aber, im Falle eines Unfalls bzw. eines „Thermal-Runaway“, zu einem Abschalten der Batterie führen und damit eine Gefährdung der Einsatzkräfte und Fahrzeuginsassen verhindern. Bei Bränden gasbetriebener Fahrzeuge können vor allem durch eine mögliche Tankexplosion während der Fremdrettungs- bzw. Löschphase erhebliche Gefahren für die Fremdrettungskräfte entstehen. Es gilt daher geeignete Einsatzstrategien zu entwickeln bzw. bestehende Strategien für Tunnelbrände zu adaptieren.

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BMVBS und BAST, „Heft B 66: „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ Bericht zum Forschungsprojekt FE 03.378/2004/FRB,“ 2009.
- [2] FFG, „Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen (BRAFA),“ [Online]. Available: <https://projekte.ffg.at/projekt/3290205>.
- [3] V. Molkov und W. Dery, „The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire,“ International Journal of Hydrogen Energy 45, 2020.
- [4] H. Hussein, S. Brennan und V. Molkov, „Hydrogen JEt Fire from a Thermally Activated Pressure Relief Device (TPRD) form Onboard Storage in a NAturally Ventilated Covered Car Park,“ MDPI, 2021.
- [5] OECD/PIARC/EU, „Transport of dangerous Goods through tunnels: Quantitative Risk Assessment Model (v4.04) - Reference Manual,“ 2019.
- [6] B. Kohl, H. Kammerer, O. Heger, G. Mayer, S. Brennberger, C. Zulauf und P. Locher, „Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen für Staßentunnel: FE 15.0663/20197,“ 2019.

# SUMMARY

## IMPACT OF VEHICLES WITH NEW ENERGY CARRIER TECHNOLOGIES ON TUNNEL SAFETY

### 1 INTRODUCTION

The "Mobility and Fuel Strategy of the Federal Government" is the central instrument for the sustainable design of the energy transition and aims to promote innovative energy carriers and alternative fuels as well as the development of the necessary infrastructure. Road traffic is currently clearly dominated by petrol and diesel-powered vehicles. The annually growing number of vehicles and increasing mileage result in a steadily increasing energy requirement. The transport sector thus makes a significant contribution to greenhouse gas emissions. The decarbonization of road traffic through the establishment of climate-friendly alternatives as a substitute for petroleum-based fuels is therefore a basic requirement for achieving climate protection goals. The use of vehicles with new alternative energy carrier technologies, above all electric, but also hydrogen and increasingly LNG (liquefied natural gas) and CNG (compressed natural gas), will increase rapidly in the future. Moreover, as a result of the increasing urbanization the traffic is shifted to the underground.

Existing recommendations and regulations for tunnel safety, as well as methods for risk assessment, have so far been limited exclusively to events in connection with vehicles with conventional energy carrier systems. In order to be able to maintain the existing level of safety in the future, the effects of events in road tunnels involving vehicles with alternative energy carriers must constantly be determined and evaluated. The aim of the project was therefore to analyze the effects of leaks, collisions and vehicle fires with a focus on alternative energy carrier technologies on the safety of tunnel users, to adapt the risk-analytical assessment method for road tunnels accordingly and to derive any necessary adjustments to the requirements for road tunnels.

### 2 BASIC ANALYSIS

In the basic analysis, a statement about the possible development concerning the composition of new energy carrier systems could be made on the basis of a comprehensive literature research, whereby data from the EU and worldwide studies were used in this regard.

After a precise analysis of the existing vehicle fleet for the year 2020, a starting point for the development on the new car market could be found. The average value for the years 2016-2020 was used to quantify it<sup>1</sup>. This analysis was carried out for the vehicle categories passenger cars, light trucks, heavy trucks and buses.

All of the forecasts discussed in this regard showed that conventional energy carriers will become less important for all vehicle categories, but will nonetheless make up a large part of the vehicle fleet. The greatest change can be expected for passenger cars and buses, since a quarter of all newly registered vehicles already use energy carriers based on alternative energy sources.

Table 1 shows the relevance of the energy carrier types for the 4 vehicle types considered for the years 2020, 2030 as well as for the year 2040 and thus summarizes the forecasts identified in a clear form. Basically, it is difficult to reliably predict the vehicle mix to be expected. Many influencing factors, in particular leaps in technological development and political decisions,

<sup>1</sup> due to the Covid 19 pandemic, the year 2020 alone is not representative in terms of new registrations

influence the assertiveness of the individual technologies and the forecasts presented show a currently valid trend rather than a reliable forecast.

**Table 1: Relevance of energy carrier types to vehicle types for 2020, 2030 and 2040<sup>2</sup>**

	Cars			Light HGV			Heavy HGV			Bus		
	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040	2020	2030	2040
Conventional	high	high	medium	high	high	high	high	high	high	high	high	high
Hybrid	high	medium	medium	low	medium	medium	low	medium	low	high	medium	high
BEV	medium	high	high	low	medium	medium	low	low	low	medium	high	high
CNG	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low	medium
LNG	low	low	low	low	low	low	low	low	medium	low	low	medium
LPG	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low	low
FCEV	low	low	medium	low	low	medium	low	low	medium	low	low	medium
H <sub>2</sub>	low	low	low	low	low	low	low	low	medium	low	low	medium

### 3 APPROACHES FOR THE ADAPTION OF THE EVALUATION METHOD

One of the central goals of the present research project was to identify approaches for the adaptation of the risk analysis investigation of tunnel events involving alternatively powered vehicles. This was done using models of accidents involving vehicles with alternative energy carriers, using exemplary, simplified hazard trees. Based on the conclusions drawn from the basic analysis, hazard trees for battery-powered electric vehicles, fuel cell-powered vehicles and vehicles with internal combustion engines (CGH, LNG) were constructed and discussed. The listed energy carriers exhibit each special physical properties that are directly related to the type of storage and result in differentiated potential types of risk when involved in an accident.

As an example, Figure 1 shows the schematically represented hazard tree according to battery electric engines and it will now be used to discuss the different branching points in a bit more detail. For each of the alternative energy carrier types mentioned above, four different vehicle types (car, light truck, heavy truck, bus) have been considered and their respective relevance discussed since not every new energy carrier system is suitable for every vehicle type or will be used in every vehicle type. For example, due to the high weight of the battery a battery-powered heavy transporter is not an alternative to a heavy truck that runs on a conventional energy source. Furthermore, a division into different vehicle types is of great importance, since the respective energy storage devices are of different sizes and most often are placed in different positions and thus may lead to differentiated danger zones or hazards. The next branching points in the hazard trees relate to the type of event. Is it an event with fire - hot or a purely mechanical event - cold, is the built-in safety device functional or damaged respectively not functional. The branching point concerning the object of hazard does in addition to the risk of tunnel users also consider the risk of third-party rescue teams as well as the risk for the tunnel infrastructure. However, the focus is on the last branching point, the potential hazard types - such as heat, toxic gases, acid, electricity, overpressure, the effects of a rapidly expanding flame front (fireball) and cold.

<sup>2</sup> BEV: battery electric vehicle, CNG: compressed natural gas, LNG: liquified natural gas, LPG: Flüssiggas, liquified petroleum gas, FCEV: fuel cell electric vehicle, VKM: internal combustion engine

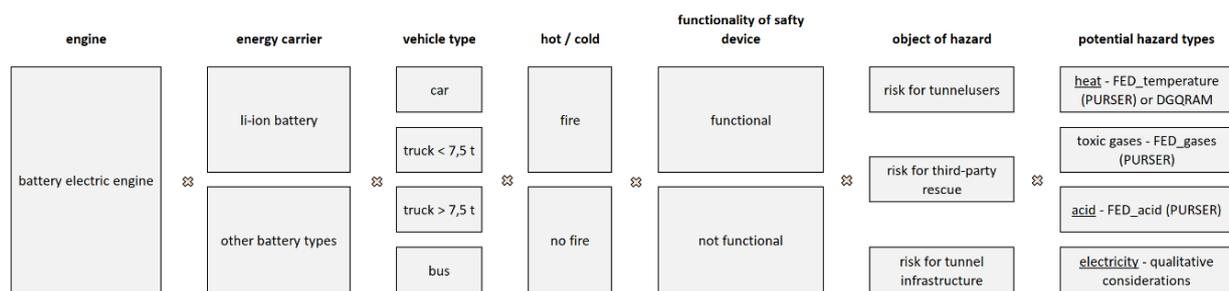


Figure 1: battery electric engine – schematically represented hazard tree

## 4 CONSIDERATIONS IN REGARD TO RISK ANALYSIS

Based on the very general hazard trees, presented in chapter 2 in combination with available experience reports and expert assessments the, the risk analysis underlying, event trees have been developed. The latter contain a manageable number of relevant scenarios. Depending on the type of scenario, numerical methods such as numerical flow models, analytical models or already existing models have been used and necessary adaptations have been made to identify the influence of vehicles with alternative energy carriers on the hazard extent in the tunnel structure and in order to estimate the potential extent of damage with regard to people in the tunnel. Based on the findings on risks for tunnel users, conclusions on the risk for third-party rescue teams as well as for the tunnel infrastructure were derived.

### 4.1 Determination of frequencies

Initially, it should be noted that the proportion of alternatively powered vehicles is too small to derive frequencies based on statistical methods, so that estimates of the above probabilities can currently only be made on the basis of qualitative assessments. However, this will change in the future and therefore the possibility of considering future data when developing new approaches has been provided.

Wherever possible, frequencies from the general road tunnel risk analysis in accordance with the adapted BAST booklet B66 [1] have been used in the event tree branches described above – for example in the collision and fire frequencies, or in the distribution of fire sizes for truck fires. Where there have been no corresponding frequencies available, corresponding estimates have been made by the experts involved in the project, taking into account the findings and assumptions from similar research projects.

### 4.2 Damage extent modeling of alternative energy carriers

#### 4.2.1 Li-Ion battery fire

In the case of Li-ion battery fires, analogous to fires in conventional vehicles, three main hazards with regard to personal safety have been assumed. These refer to the hazard from heat, the hazard from restricted visibility (smoke gases) and the hazard from inhaling toxic substances. As a result, the model fire curves defined in the BRAFA research project [2] and the associated pollutants released were used as the basis for the three-dimensional CFD simulations.

#### 4.2.2 Hydrogen VCE

In case of an accident involving a hydrogen-powered vehicle, the hydrogen tank can rupture due to the mechanical impact or due to thermal stress (if the safety device on the tank is not

working) and a gas cloud explosion (Vapour Cloud Explosion, VCE) may occur. When modeling the VCE, two different hazards have been considered: the hazard of a fast expanding fireball and the overpressure hazard. The hazard area corresponding to the fireball could be estimated with an experimentally based relationship between the diameter of the fireball and the mass involved. To estimate the overpressure hazard area, the generally valid relationship between overpressure and distance from the origin of the detonation corresponding to hydrogen tank explosions has been used [2].

#### 4.2.3 Hydrogen jet fire

If a hydrogen-powered vehicle catches fire and the temperature at the safety valve reaches the threshold value, hydrogen is released. Due to the already existing fire, the released hydrogen is immediately ignited and consequently leads to a jet fire. The corresponding risk area was estimated for all considered vehicle types by using model results that were experimentally verified [2]. In particular, the different number of tanks, the different tank volumes, the possible different storage pressures and possible different blow-out directions have been explicitly taken into account.

#### 4.2.4 LNG BLEVE

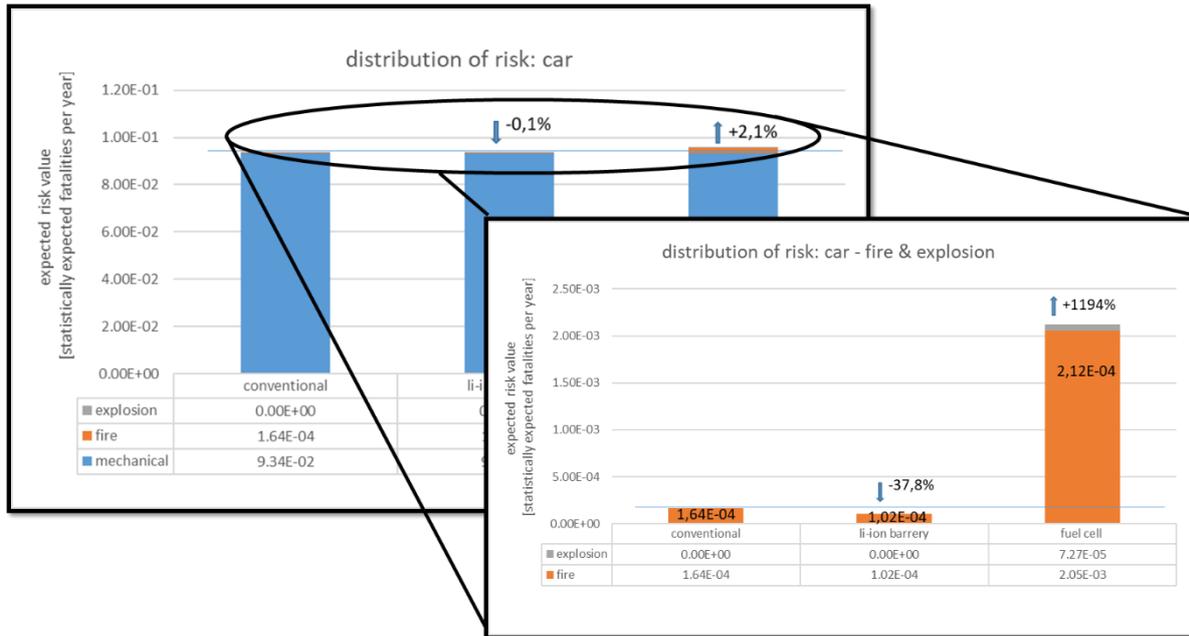
The overpressure of an exploding LNG tank in the tunnel has been modeled with the well-established TNT equivalence model (similar to the OECD/PIAR DG-QRAM model [2]). The existing mass of LNG in the tank is converted into an equivalent mass of TNT. From numerous experiments relating to the damage caused by TNT explosions, the damage respectively the hazard area of the LNG BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) has been estimated.

### 4.3 Evaluation and interpretation of risks

In order to be able to evaluate and identify possible additional risks due to alternatively powered vehicles in the tunnel, a suitable hypothetical tunnel was defined as comparison tunnel. Based on the results of the BAST research project FE 15.0663/2019/ERB [2] a representative one-way traffic tunnel (without traffic congestion) has been chosen as comparison tunnel. On the basis of this tunnel, a relative assessment approach has been pursued, in which different safety levels have been compared through a relative comparison of different vehicle fleet constellations. By using a relative evaluation approach, the influence of imprecision on the evaluation result can be minimized and accordingly even the smallest safety-related changes can be made visible.

#### 4.3.1 Risks according to maximal share of the respective energy carrier

In order to objectively compare the potential risk of the individual energy carriers, the determined risk values for each vehicle type and each energy carrier technology have been compared, whereby it has been assumed in each case that the vehicle type is operated to 100% with the respective energy carrier technology. Representative for all vehicle types, the results according to all three, most promising alternative engines according to cars are shown in Figure 2.

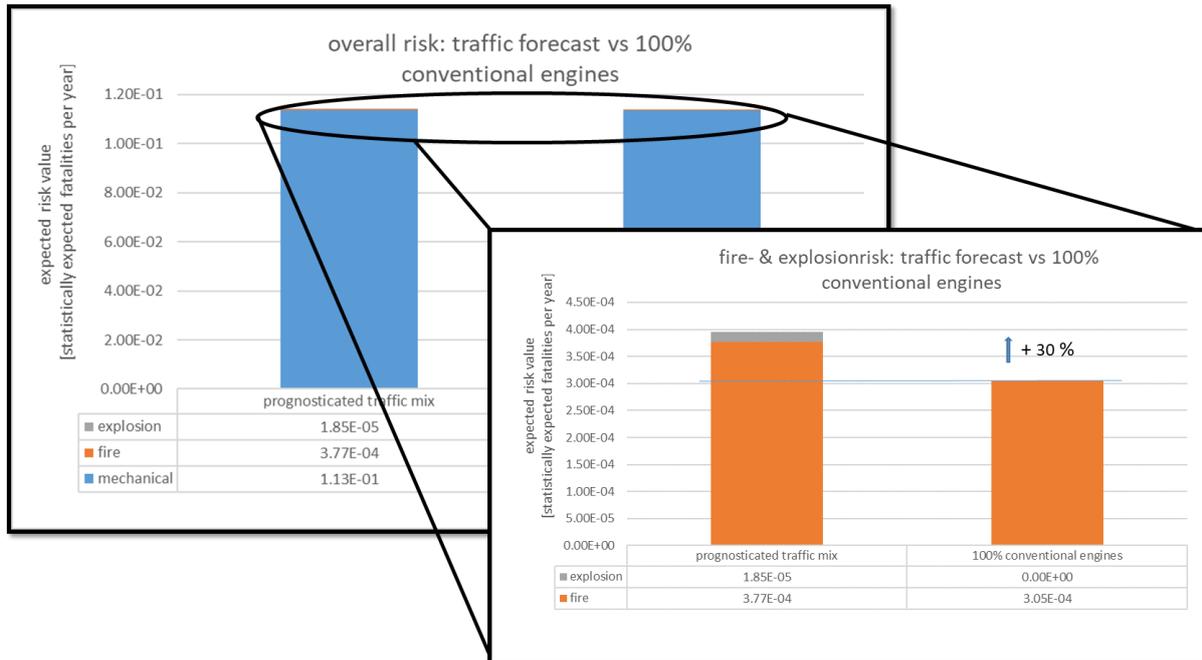


**Figure 2: Comparison of total risk respectively fire and explosion risk according to the three alternative engines that will most probably be used for cars in future. 100% share for each propulsion technology for each vehicle type, here the car, is assumed**

The results show that (for the considered comparison tunnel), concerning the alternative energy carriers, there can no relevant increase of the overall risk be identified. However, in considering the pure fire and explosion risks, there is a significant increase in risk from gas-powered vehicles (FCEV, VKM CGH2, VKM LNG). For the comparison tunnel under consideration, in total these play no role, however for different tunnels, with a fundamentally higher fire risk, a relevant increase in the overall risk cannot be ruled out. The investigation of the effects of fires and explosions from alternative energy sources on other model tunnels with a potentially higher fire risk (in particular tunnels with a relevant proportion of traffic jams or bidirectional traffic tunnels) therefore represents an additional need for research.

#### 4.3.2 Risks according to the predicted share of the respective energy carrier

The results of the risk analysis show that no increase in the overall risk for the traffic forecast compared to the current traffic mix can be derived. Fire and explosion risks are not relevant for the model tunnel in absolute terms, but can increase significantly for the forecast shares of alternative energy carriers. The extent to which the increase in the risk according to fire and explosion is relevant under other conditions or to what extent the overall risk increases with changed conditions (especially for tunnels with a relevant proportion of traffic jams) should be clarified through additional research efforts.



**Figure 3: Comparison of the total risk as well as the fire and explosion risks according to the traffic forecast and for 100% conventional engines.**

#### 4.3.3 Sensitivity analysis regarding the number of gas tanks involved

Due to a lack of experience from real events and because the involvement of several tanks cannot be completely ruled out, additionally a sensitivity analysis was carried out in which the involvement of the entire tank system was assumed. This, however, only led to an increase in the extent of damage in the explosion scenarios. In the course of additional research efforts, further sensitivity analyses should be carried out.

### 4.4 Recommendations regarding self-rescue, third party rescue and building protection

#### 4.4.1 Effects on self-rescue and safety of tunnel users

Based on the research efforts, it can be concluded that, according to the current state of knowledge, battery-powered cars do not cause a significantly higher fire risk than conventional vehicles. Although the risk analysis provides a lower fire risk for battery-powered buses than for conventional buses, the results for this type of vehicle are based on rough assumptions and upscaling of car fire tests and should therefore only be interpreted with reservations. Consequently the effects of fires in battery-powered buses still shows a fundamental need for research, especially with regard to fire behavior and the composition of smoke gases.

For gas-powered vehicles, the risk assessment also showed that the overall risk remained almost the same as for conventionally powered vehicles; however, a significant increase in the risk according to fire and explosion scenarios could be identified. Even if these events (VCE, jet fire, BLEVE) should be classified as extremely unlikely from today's perspective, the same statement applies to them as to large fire events, namely that they may not be relevant in the overall risk context, however, they will rouse socially a lot of attention.

#### 4.4.2 Effects on the tunnel infrastructure and on the structural protection

For events with battery-powered vehicles, no significant changes are to be expected with regard to their impact on the tunnel infrastructure. Although the fire loads are slightly higher than the fire loads of conventionally powered vehicles, they are still comparable.

For gas-powered vehicles, on the other hand, a change in the impact on the infrastructure is conceivable. In principle, the tunnel structure should be able to withstand the overpressures arising from a tank explosion, especially in closed tunnels, but mechanical installations such as ventilation components and emergency exit doors can very well be damaged. Even an intermediate ceiling could possibly not withstand the overpressures and lose its integrity in some areas. However, it can be concluded that although fires in gas-powered vehicles can in principle lead to damage to the infrastructure, there should be no significant increase in the number of tunnel closures or repair costs due to their low estimated frequency.

#### 4.4.3 Effects on third party rescue workers

According to the current state of knowledge, the smoke as well as the toxins produced by fires of battery-powered vehicles do not represent a significantly changed hazard scenario for emergency services, since they are equipped with high-quality protective equipment. However, rescuing vehicle occupants may be a problem, since under certain circumstances the body of the battery-electric vehicle could be under high voltage. However, in the event of an accident or a "thermal-runaway", the safety mechanisms provided in today's vehicle batteries should lead to the battery being switched off and thus prevent the emergency services and vehicle occupants from being endangered. In the case of fires in gas-powered vehicles, there can be considerable danger for the third party rescue services, especially as a result of a possible tank explosion during the rescue or extinguishing phase. It is therefore necessary to develop suitable deployment strategies or to adapt existing strategies for tunnel fires.

## LITERATURE

- [1] BMVBS and BAST, "Heft B 66: „Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln“ Bericht zum Forschungsprojekt FE 03.378/2004/FRB," 2009.
- [2] FFG, "Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen (BRAFA)," [Online]. Available: <https://projekte.ffg.at/projekt/3290205>.
- [3] OECD/PIARC/EU, "Transport of dangerous Goods through tunnels: Quantitative Risk Assessment Model (v4.04) - Reference Manual," 2019.
- [4] V. Molkov and W. Dery, "The blast wave decay correlation for hydrogen tank rupture in a tunnel fire," *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 2020.
- [5] H. Hussein, S. Brennan and V. Molkov, "Hydrogen JEt Fire from a Thermally Activated Pressure Relief Device (TPRD) form Onboard Storage in a NAturally Ventilated Covered Car Park," MDPI, 2021.
- [6] B. Kohl, H. Kammerer, O. Heger, G. Mayer, S. Brennberger, C. Zulauf and P. Locher, "Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen für Staßentunnel: FE 15.0663/20197," 2019.