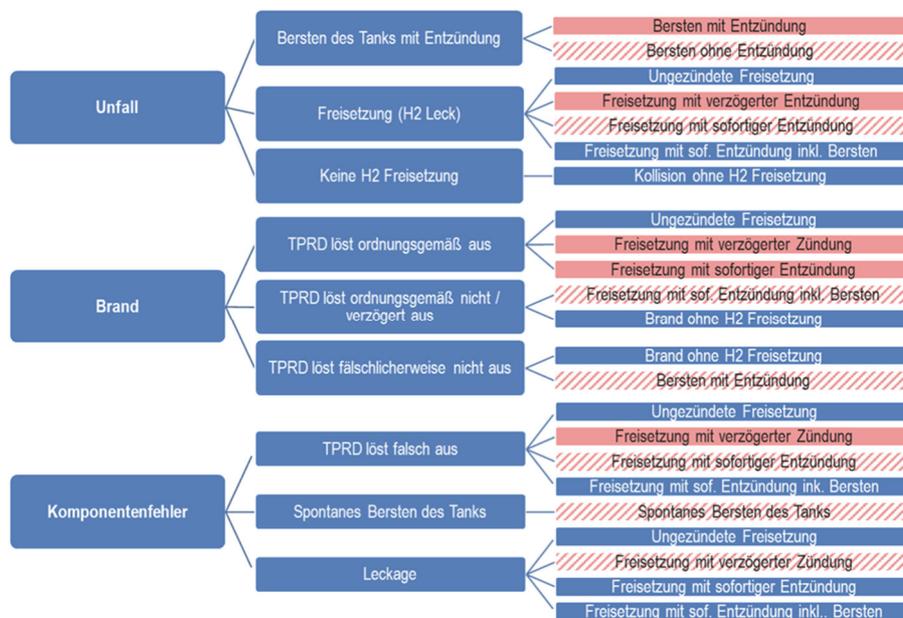


# Hydrogen Tunnel Risk Assessment HyTRA – Ergebnisbericht

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2020

**VIF 2020**

November 2023





## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien

 Bundesministerium  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Praterstern 3

1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-  
Aktiengesellschaft  
Austro Tower  
Schnirchgasse 17  
1030 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Technische Universität Graz  
Institut für Thermodynamik und nachhaltige Antriebssysteme  
Inffeldgasse 19  
8010 Graz



ILF Consulting Engineers Austria GmbH  
Feldkreuzstraße 3  
6063 Rum / Innsbruck

HYCENTA RESEARCH GMBH  
Inffeldgasse 15  
8010 Graz

### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien

 **FFG**  
Forschung wirkt.



# Hydrogen Tunnel Risk Assessment HyTRA

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
VIF 2020

**Autorinnen und Autoren:**

**Peter Sturm**  
**Daniel Fruhwirt**  
**Patrik Fößleitner**  
**Martin Aggarwal**  
**Oliver Heger**  
**Regina Schmidt**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und  
Technologie (BMK)

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG)

**Auftragnehmer:**

Technische Universität Graz - Institut für Thermodynamik und nachhaltige  
Antriebsysteme

HyCentA Reserach GmbH

ILF Consulting Engineers

Formale Vorgaben:

<b>Einrichtung der Seite</b>	<b>Abstand</b>  in cm
Oben:	3,5
Unten:	3
Links:	3
Rechts:	2,5

<b>Formatvorlage</b>	<b>Schriftart</b>	<b>Schriftgröße</b>
Hauptkapitelüberschriften	Arial, fett, Großbuchstaben	13pt
Überschriften	Arial, fett	13pt
Standardtext	Arial, 1,5-zeilig, Blocksatz	11pt
Überschriften von Verzeichnissen	Arial, fett, Großbuchstaben	13pt
Inhaltsverzeichnis Abbildungsverzeichnis Tabellenverzeichnis Literaturverzeichnis	Arial	12pt

Fußnotenzeichen	Arial, hochgestellt	10pt
Fußnotentext	Arial	10pt
Untertitel von Tabellen und Abbildungen	Arial, fett	10pt
Quelle von Tabellen und Abbildungen	Arial	8pt
Seitennummerierung	Arial, zentriert, Seitenende	10pt

## INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung.....	24
2. Grundlagen und Stand der Technik .....	26
2.1. Erhebung bestehender Untersuchungen.....	26
2.1.1. Dokumentierte Unfälle mit Wasserstoff .....	27
2.1.2. HyResponse 2016 .....	30
2.1.3. HyTunnel CS 2023.....	35
2.1.4. SANDIA Report 2017 .....	40
2.1.5. SANDIA Report 2020 .....	44
2.1.6. RISE 2021 .....	60
2.1.7. INERIS – DRIVE project 2012.....	62
2.1.8. Weitere Veröffentlichungen .....	62
2.2. Stand der Technik – Wasserstoff Fahrzeuge .....	66
2.2.1. Wasserstoff.....	66
2.2.2. FCEV – Antriebsstrang .....	67
2.2.3. Marktsituation.....	80
2.2.4. Standards und Normen .....	81
2.2.5. Gefahren und Risikovermeidung.....	85
2.2.6. H <sub>2</sub> -Speichersysteme .....	87
2.3. Stand der Technik Infrastruktur .....	100
2.3.1. EU Richtlinie Minimale Sicherheitsbedingungen /Straßentunnelsicherheits-gesetz .....	100
2.3.2. RVS 09.01.45 – Baulicher Brandschutz .....	100
2.3.3. RVS 09.02.22 – Tunnelausrüstung .....	102
2.3.4. RVS 09.02.31 – Tunnel Grundlagen (Belüftung) .....	103
2.3.5. RVS 09.02.51 – Ortsfeste Brandbekämpfungs- anlagen.....	105

2.3.6. Explosionsschutz .....	106
2.3.7. Stand der Technik – Risikoanalyse .....	109
2.4. Defizitanalyse .....	113
2.4.1. Defizite bezogen auf Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und e-fuels.....	113
2.4.2. Defizite bezogen auf Tunnel Infrastruktur.....	115
2.4.3. Defizite bezogen auf Risikoanalyse.....	120
3. Ermittlung der Gefahrenquellen und des Gefahrenpotentials .....	122
3.1. Sicherheitsrelevante Eigenschaften des Wasserstoffs .....	122
3.1.1. Physikalische und chemische Eigenschaften .....	122
3.1.2. Wasserstoffdiffusion.....	127
3.1.3. Wasserstoffversprödung .....	127
3.1.4. Schmierfähigkeit .....	128
3.2. Gefahren durch Wasserstoff .....	129
3.2.1. Ungezündete Freisetzung von Wasserstoff.....	129
3.2.2. Gezündete Freisetzung von Wasserstoff.....	130
3.2.3. Wasserstoffexplosion .....	131
3.3. Identifizierung von relevanten Unfalltypen.....	132
3.4. Definition relevanter Ereignisszenarien und Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit .....	134
4. Ermittlung der Schadenswirkungen in tunnelanlagen.....	138
4.1. Pressure Peaking Phänomen.....	140
4.1.1. Literaturrecherche .....	140
4.1.2. Analytische Berechnungen .....	142
4.2. Wasserstoff-Freistrahbrand .....	144
4.2.1. Literaturrecherche .....	144
4.2.2. Analytische Berechnungen .....	147
4.3. Tankbruch.....	152

4.3.1. Literaturrecherche .....	152
4.4. Gaswolkenexplosion .....	157
4.4.1. Literaturrecherche .....	157
4.4.2. Numerische Simulationen .....	161
4.4.3. Wasserstoff Freisetzung – PKW .....	164
4.4.4. Wasserstoff Freisetzung – Bus .....	172
4.5. Auswirkungen von Ereignissen mit e-fuels .....	173
5. VERTIEFTE KONSEQUENZANALYSE HINSICHTLICH PERSONENGEFÄHRDUNGEN .....	179
5.1. Erarbeitung eines Bewertungsansatzes .....	179
5.1.1. Brände konventioneller Fahrzeuge.....	179
5.1.2. Kollision eines H <sub>2</sub> Fahrzeuges mit unmittelbarem Bersten des Tanks und Entzündung des H <sub>2</sub> – S1.....	181
5.1.3. H <sub>2</sub> Freisetzung über eine Tank-Leckage (Kollision, Komponentenfehler) mit verzögerter Entzündung – S2 .....	183
5.1.4. Karosseriebrand eines H <sub>2</sub> Fahrzeuges mit anschließender H <sub>2</sub> Freisetzung über TPRD und verzögerter Entzündung – S3.....	186
5.1.5. Karosseriebrand eines H <sub>2</sub> Fahrzeuges mit anschließender H <sub>2</sub> Freisetzung über TPRD und sofortiger Entzündung – S4.....	188
5.2. Konsequenzbewertung von Personenschäden .....	196
5.2.1. Österreichischer Vergleichstunnel.....	196
5.2.2. Evakuierungssimulation .....	197
5.2.3. Erläuterungen zu den Gefährdungsbereichen.....	198
5.2.4. Ergebnisse aus der Risikoanalyse .....	201
6. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN .....	210
6.1. Schlussfolgerungen .....	210
6.1.1. Schlussfolgerungen bezogen auf Auswirkungen auf die Tunnelinfrastruktur .....	215
6.1.2. Schlussfolgerungen bezogen auf Auswirkungen auf Ereignisbewältigung.....	216

6.2. Handlungsempfehlungen .....	220
6.2.1. Maßnahmen mit hoher Priorität .....	224
6.2.2. Maßnahmen mit mittlerer Priorität .....	226
6.2.3. Maßnahmen geringer Priorität.....	226
7. eiZusammenfassung und Ausblick.....	229
8. Literaturverzeichnis .....	238

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Einsatzbereich von Wasserstoff in der Mobilität [2] .....	24
Abbildung 2: Fotodokumentation des Unfallfahrzeugs .....	27
Abbildung 3: Röhren bzw. Tube-Trailer [4].....	28
Abbildung 4: Kjørbø Tankstellenfeuer, Norwegen .....	29
Abbildung 5: CFD-Simulationen von Freistrahldränden von H <sub>2</sub> -Speichersystemen [9] .....	31
Abbildung 6: Freistrahldrang durch unterschiedliche TPRD Geometrien [9].....	31
Abbildung 7: PKW mit gasförmigem H <sub>2</sub> -Speichersystem in Brand [9].....	32
Abbildung 8: Nomogramme für die Bestimmung der Gefahrenabstände bei Behälterbruch unter Fahrzeugen: Abstände zu Menschen (links) und Abstände zu Gebäuden (rechts) .	33
Abbildung 9: Nomogramm eines H <sub>2</sub> -Behälters für die Auslasszeit auf 2 bar bei aktiviertem TPRD [9].....	33
Abbildung 10: FCEV-Brand in einem Feuerwehrsimulator [9] .....	34
Abbildung 11: Abgeleiteter Ereignisbaum aus den Untersuchungen der SANDIA National Laboratories [11].....	42
Abbildung 12: H <sub>2</sub> -Freisetzungsraten über TPRD und zu erwartende Flammenlänge beim Abblasen eines H <sub>2</sub> Tanks mit 125 Liter Tankvolumen [11] .....	43
Abbildung 13: Vergleich der Wärmefreisetzungsraten von konventionell angetriebenen Fahrzeugen und Wasserstoff-Fahrzeugen [11] .....	44
Abbildung 14: Setup der Experimente zur Untersuchung der Entzündung von druckgespeichertem H <sub>2</sub> bei Freisetzung an die Umgebung [12] .....	47
Abbildung 15: Versuchstunnel im Maßstab 1:5 zur Durchführung von Deflagrations- und Detonationsversuchen [13] .....	49

Abbildung 16: Verlauf des Überdrucks während eines Explosionsversuchs im Testtunnel [13] .....	49
Abbildung 17: Vergleich der Ergebnisse von Experimenten und Simulation aus Validierungsversuchen [14]; links - H <sub>2</sub> Volumenanteile, rechts – Druckverläufe.....	50
Abbildung 18: Versuchsaufbau für Grundlagenuntersuchungen zum Brand- und Explosionsverhalten von Wasserstoff [15].....	51
Abbildung 19: Versuchsanordnung zur Untersuchung von Gas Cloud Explosions [16] ....	53
Abbildung 20: Ergebnismatrix zu den Gas Cloud Explosion Szenarien [16].....	54
Abbildung 21: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Gas Cloud Explosions im Freien [17] .....	55
Abbildung 22: Gemessene Druckspitzen mit zunehmendem Abstand zum Versuchsträger und paralleler Ausrichtung zur Wand [17] .....	57
Abbildung 23: Gemessene Druckspitzen mit zunehmendem Abstand zum Versuchsträger und zur Wand [17] .....	57
Abbildung 24: Tunnelgeometrie der numerischen Versuchsreihe zu Wasserstoff-Freisetzen im Tunnel [18].....	58
Abbildung 25: Ergebnisse aus numerischen Simulationen einer Wasserstoff-Freisetzung [18] .....	59
Abbildung 26: Ergebnisse aus numerischen Simulationen zu Explosionsereignissen im Tunnel [18] Grundströmung: links – 0 m/s, rechts – 6 m/s .....	60
Abbildung 27: Druckdynamik beim adiabatischen Abblasen aus einem 117-Liter-Tank mit 70 MPa für TPRD mit 2 mm (links) und 0,5 mm Durchmesser [22].....	63
Abbildung 28: Temperatur-Isflächen mit den Grenzwerten für Unschädlichkeit (343 K), Schmerz (388 K), Tod (582 K) und Temperatur der sichtbaren Flamme (1573 K) für die gezündete Wasserstofffreisetzung in Fall 6 (TPRD = 2 mm, 45°-Winkel nach hinten unten) [22] .....	64

Abbildung 29: Temperatur-Isoflächen mit den Grenzwerten für Unschädlichkeit (343 K), Schmerz (388 K), Tod (582 K) und Temperatur der sichtbaren Flamme (1573 K) für die gezündete Wasserstofffreisetzung in Fall 11 (TPRD = 0,5 mm, 45°-Winkel nach hinten unten) [22] .....	64
Abbildung 30: Antriebsstrang eines FCEV [22] .....	68
Abbildung 31: Übersicht von FCEV Serienfahrzeugen .....	68
Abbildung 32: Antriebsstrang und H <sub>2</sub> -Speichersystem des Honda Clarity FCEV [24] .....	69
Abbildung 33: Antriebsstrang und H <sub>2</sub> -Speichersystem des Toyota Mirai [24] .....	69
Abbildung 34: FCE Truck, Vision Industries Corporation 2014 [25] .....	73
Abbildung 35: Schematische Darstellung des Nikola One [26] .....	73
Abbildung 36: Schematische Darstellung des Hyundai Xcient FCEV Trucks [27] .....	74
Abbildung 37: Schematische Darstellung des Mercedes Benz GenH <sub>2</sub> FCEV Trucks [28]	75
Abbildung 38: Solaris Urbino 12 Hydrogen [29] .....	77
Abbildung 39: Schematische Darstellung des Mercedes Citaro FuelCELL-Hybrid [30] .....	78
Abbildung 40: Anteil der unterschiedlichen FCEV Fahrzeugtypen weltweit 2020 [31] .....	80
Abbildung 41: Verteilung von FCEVs auf dem Weltmarkt 2020 [31] .....	80
Abbildung 42: Globale Fahrzeug Marktentwicklung [32] .....	81
Abbildung 43: Hierarchische Struktur der Regelwerke von H <sub>2</sub> /BZ-Produkten [34] .....	83
Abbildung 44: Gefahren von FCEVs .....	85
Abbildung 45: Crashtest und Behälter Tests des Hyundai Nexo [35] .....	86
Abbildung 46: Verformungswahrscheinlichkeiten des Fahrzeuges bei einem Unfall als Basis für die sichere Platzierung des HSS [36] .....	86

Abbildung 47: Strukturelle Verstärkungen des Chassis für erhöhte Sicherheit gegen Verformung für das HSS [24] .....	87
Abbildung 48: Möglichkeiten zur Wasserstoffspeicherung .....	88
Abbildung 49: Behälter Typen [37] .....	89
Abbildung 50: Schematisches Fließbild eines H <sub>2</sub> -Tanksystems.....	89
Abbildung 51: Speicherbehälter und montiertes Behälterventil in einem Fahrzeug (links), Schematisches Bild eines Behälterventils (rechts) [38] .....	90
Abbildung 52: Richtung der Wasserstofffreisetzung bei Aktivierung des TPRDs am Beispiel des Honda FCX Clarity [24] .....	92
Abbildung 53: Brandversuch von Behälter und Ventil gemäß UN ECE R134 (links), Behälter nach dem Versuch (rechts) [39] .....	93
Abbildung 54: Abhängigkeit von TPRD Durchmesser, Tankvolumen, Druckniveau und benötigte Ausströmungszeit [39].....	94
Abbildung 55: TPRD-loser Behälter mit schmelzfähigem Liner [41] .....	95
Abbildung 56: BMW Hydrogen 7 [47] .....	98
Abbildung 57: Schutzniveauekategorien gemäß RVS 09.01.45 .....	101
Abbildung 58: Auswahl an Ergebnisses der numerischen Untersuchungen aus [64] .....	110
Abbildung 59: Methodik der Risikoanalyse gemäß RVS 09.03.11.....	112
Abbildung 60: Berücksichtigte Komponenten in den verschiedenen Regelwerken [34]..	114
Abbildung 61: Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit eines Wasserstoff-Luft-Gemisches [36] .....	126
Abbildung 62: Schematische Darstellung der Fehlerbaum/Ereignisbaum Analyse von Wasserstoffereignissen.....	134

Abbildung 63: Bewertungsmatrix zur qualitativen Szenarienauswahl .....	135
Abbildung 64: Darstellung des Fehlerbaums/Ereignisbaums inklusive getroffener Priorisierung auf Basis der qualitativen Bewertung .....	136
Abbildung 65: Pressure Peaking Nomogramme zur Bestimmung des entstehenden Überdrucks [66] .....	141
Abbildung 66: Abklingkurve des Überdrucks nach einem Tankbruch im Tunnel für unterschiedliche Tanksysteme [82].....	154
Abbildung 67: Ausformung der Wasserstoffwolke bei ungezündeter Freisetzung in einem Tunnel [77]. (a) eine Sekunde, (b) 4 Sekunden, (c) 8 Sekunden und (d) 16 Sekunden nach Öffnung des TPRDs.....	159
Abbildung 68: Visualisierung der Bereiche, in denen das DDT Kriterium erreicht wird [77] .....	160
Abbildung 69: Auftretende Überdrücke bei der Detonation in einem Tunnel zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Zündung einer Wasserstoffwolke [77]. (a) nach 2 ms, (b) nach 4 ms, (c) nach 7 ms und (d) nach 9 ms. ....	161
Abbildung 70: Verlauf der Längsströmungsgeschwindigkeit im Tunnel nach abruptem Anhalten des Fließverkehrs .....	164
Abbildung 71: Detailansichten des Rechengebiets. a.) Tunnelquerschnitt, b.) Detailansicht des Fahrzeugs, c.) Fahrzeugatrappe d.) Tunnellängsschnitt.....	165
Abbildung 72: Vernetzung des Rechengebiets um die Fahrzeugatrappe in Ansys Fluent .....	166
Abbildung 73: Vernetzung des Rechengebiets um die Fahrzeugatrappe in Convergent CFD. a.) Basisgitter 0,4 m, b.) 0,1 m, c.) 0,05 m und d.) 0,025 m.....	167
Abbildung 74: Ergebnisse der Berechnung mit Ansys Fluent. (rote Bereiche markieren zündfähiges Gemisch) .....	169

Abbildung 75: Ergebnisse der Berechnung mit Convergent CFD (gelbe Bereiche markieren zündfähiges Gemisch).....	171
Abbildung 76: Detailansichten zur erstellten Geometrie. a.) Tunnel Querschnitt, b.) Bus-Attrappe, c.) Tunnelgeometrie inklusive Bus Attrappe.....	173
Abbildung 77: Detailansichten des generierten Rechengitters. a.) Querschnitt inklusive Prismenschichten, b.) unterschiedliche Zellgrößen, c.) Detailansicht TPRDs.....	175
Abbildung 78: CFD 1 - Ergebnisse der Berechnung mit Ansys Fluent (rote Bereiche markieren zündfähiges Gemisch).....	177
Abbildung 79: CFD 1 - Ergebnisse der Berechnung mit Ansys Fluent (rote Bereiche markieren detonationsfähiges Gemisch).....	178
Abbildung 80: Brandkurven – konventionelle PKW und Bus Brandkurven entsprechend RVS 09.03.11 [86] – durchgezogene Linie und Brandkurven entsprechend der Karosseriebrände – strichlierte Linie.....	180
Abbildung 81: Zusammenhang zwischen dimensionslosem Überdruck und dimensionslosem Abstand vom Detonationsursprung [82].....	183
Abbildung 82: Temperatur am TPRD, Gastemperatur und entsprechender TPRD Auslösezeitpunkt für einen zugrundeliegenden PKW-Karosseriebrand.....	192
Abbildung 83: Temperatur am TPRD, Gastemperatur und entsprechender TPRD Auslösezeitpunkt für einen zugrundeliegenden Bus- bzw.. LKW Karosseriebrand.....	193
Abbildung 84: Unterschiedliche Ausblaszeiten je nach TPRD Durchmesser und Wasserstofftankvolumen und Speicherdruck [66] .....	194
Abbildung 85: Feuerwiderstandsklassen als Funktion der HRR pro Fläche [71].....	195
Abbildung 86: Evakuierungsmodell: Agenten Konfiguration .....	197
Abbildung 87: Verkehrsdichte (schwarze Linien) und entsprechende Gefahrenzonen bezüglich Freistrahbrand (mittleres Bild) und Tankexplosion (oberstes bzw. unterstes Bild	

für sofortige bzw. verzögerte Tankexplosion) eines PKW – gestrichelte bzw. gepunktete Linie.....	200
Abbildung 88: Schadensausmaßwerte bei Involvierung eines wasserstoffbetriebenen PKW .....	202
Abbildung 89: Schadensausmaßwerte bei Involvierung eines wasserstoffbetriebenen LKW .....	205
Abbildung 90: Schadensausmaßwerte bei Involvierung eines wasserstoffbetriebenen Bus .....	207

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Flammenlängen und Sicherheitsabstände für Freistahlbrände von H <sub>2</sub> -Speichersystemen .....	32
Tabelle 2: Notfallmaßnahmen und Interventionsstrategie bei einem H <sub>2</sub> -Leck mit gezündeter Flamme [9].....	34
Tabelle 3: Verletzungskriterien für Menschen durch Wärmeeinwirkung [12] .....	45
Tabelle 4: Verletzungskriterien für Menschen durch mechanische Einwirkung (Druckwelle) [12] .....	45
Tabelle 5: Verletzungskriterien für Menschen durch Temperatureinwirkung [12].....	46
Tabelle 6: Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen im Versuchscontainer [15].....	52
Tabelle 7: Testbedingungen bei der Untersuchung der Gas Cloud Explosion [17].....	55
Tabelle 8: Anordnung der Drucksensoren in Relation zum Zentrum des Versuchsträgers (Käfig) [17] .....	56
Tabelle 9: Kritische Zeiträume bis zur Aktivierung des TPRDs respektive bis zur Explosion eines Tanks [20] .....	61
Tabelle 10: Die meisten repräsentativen FCH-Anwendungen auf dem Automobilmarkt. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.....	71
Tabelle 11: Die repräsentativsten FC-Anwendungen für den Straßengüterverkehrsmarkt. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.....	76
Tabelle 12: Die repräsentativsten FCEV-Anwendungen für den Bussektor. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. ....	79
Tabelle 13: TPRD-Anforderungen aus der EU406/2010 .....	91
Tabelle 14: FCEV Tanksystem-Spezifikationen .....	96
Tabelle 15: Anforderungen an automatische Branddetektion gemäß RVS 09.02.22 .....	102

Tabelle 16: Kriterien zu Systemwahl für mechanische Belüftungsanlagen .....	103
Tabelle 17: Gefährdungsklassen gemäß RVS 09.03.11 .....	111
Tabelle 18: Mögliche Gefahren durch Ereignisse mit Wasserstofffahrzeugen .....	115
Tabelle 19: Übersicht über mögliche Unfallereignisse, deren Gefahrenpotentiale und die Gefahrenabwehr .....	119
Tabelle 20: Verbrennungseigenschaften von Wasserstoff und anderen gängigen Kraftstoffen unter normalen Bedingungen.....	125
Tabelle 21: Reaktion des Menschen auf Sauerstoffmangel und entsprechende Wasserstoffkonzentration unter normalen Bedingungen [36] .....	129
Tabelle 22: Grundszenarien für die weitere Betrachtung in AP 4 und AP 5.....	137
Tabelle 23: Wasserstoff Freisetzungsrates als Funktion der Zeit und in Abhängigkeit des Speicherdrucks sowie des TPRD Durchmessers. ....	143
Tabelle 24: Charakteristiken einer Wasserstoff Stichflamme für unterschiedliche Speicherdrücke und TPRD Durchmesser [70].....	145
Tabelle 25: Gefahrenbereiche durch den Strahlungswärmefluss zufolge einer Wasserstoff-Stichflamme in Abhängigkeit des Speicherdrucks sowie des TPRD Durchmessers. ....	150
Tabelle 26: Gefahrenbereiche (Flammenlängen) durch hohe Temperaturen zufolge einer Wasserstoff-Stichflamme in Abhängigkeit des Speicherdrucks sowie des TPRD Durchmessers.....	151
Tabelle 27: Anwendungsbereich des Berechnungsmodells zum Abbau des Überdrucks nach Bersten eines <b>H<sub>2</sub></b> Tanks nach [82] .....	153
Tabelle 28: Gefahrenbereiche zufolge der Druckwelle bei Tankbruch eines FCEVs gemäß HyTunnel-CS Projekt .....	155
Tabelle 29: Beschreibung der betrachteten CFD Rechenfälle inklusive zu Grunde gelegter Strömungssituation im Tunnel.....	163

Tabelle 30: Chemisch-physikalische Eigenschaften konventioneller Kraftstoffe und ausgewählter Alternativen.....	174
Tabelle 31: Quellraten konventioneller Fahrzeugbrände, Tabelle 37 aus Ref. [86].....	181
Tabelle 32: Länge der Gefahrenbereiche entsprechend Tabelle 26.....	190
Tabelle 33: In der Schadensausmaßanalyse betrachtete Fahrzeugtypen und Tankparameter .....	193
Tabelle 34: Österreichischer Vergleichstunnel – Parameter für die Konsequenzanalyse .....	196
Tabelle 35: Detailergebnisse der quantitativen Konsequenz Analyse: Konsequenzen in statistisch erwartbaren Todesopfern pro Ereignis – PKW .....	201
Tabelle 36: Zeitschiene – Schadensszenarien PKW .....	204
Tabelle 37: Detailergebnisse der quantitativen Konsequenz Analyse: Konsequenzen in statistisch erwartbaren Todesopfern pro Ereignis - LKW.....	206
Tabelle 38: Detailergebnisse der quantitativen Konsequenz Analyse: Konsequenzen in statistisch erwartbaren Todesopfern pro Ereignis – Bus .....	208
Tabelle 39: Bewertungssystem für Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos. ....	220
Tabelle 40: Maßnahmenmatrix inklusive Zuständigkeitsbereich und Priorisierung hinsichtlich Effektivität und Umsetzbarkeit (Benotungssystem). ....	222

## ABSTRACT

Das Projekt HyTRA befasst sich mit den Auswirkungen der Wasserstoff-Technologie auf die Sicherheit in Österreichischen Tunnelanlagen. Auf Grund der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff, die deutlich von jenen konventioneller Kraftstoffe abweichen, ist eine detaillierte Betrachtung der möglichen Ereignisszenarien notwendig, um das Sicherheitsniveau nachhaltig hoch zu halten. Grundsätzlich unterliegen Wasserstoff-angetriebene Fahrzeuge einer strengen Standardisierung und Regulierung, sodass bei einem Unfall eine Freisetzung einer relevanten Menge an Wasserstoff als unwahrscheinlich angenommen werden kann. Dennoch kann ein solches Szenario nicht ausgeschlossen werden. Unter der Voraussetzung, dass Wasserstoff freigesetzt wird, sind drei unterschiedliche Folgen denkbar. Eine Freisetzung ohne Entzündung, eine Freisetzung mit sofortiger Entzündung des Wasserstoffs ("Jet Flame" bzw. Freistrahbrand) sowie eine Freisetzung mit verzögerter Entzündung (Gas Cloud Explosion bzw. GCE). Zudem kann es unter starker thermischer oder mechanischer Einwirkung (z.B. Kollision oder Brand des Wasserstofffahrzeuges bzw. eines benachbarten Fahrzeugs), zu einer Explosion des Wasserstofftanks kommen. Bei beiden Explosionsszenarien, kann auf Grund der auftretenden Druckstöße und Temperaturen, von massiven Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit sowie auf die Infrastruktur ausgegangen werden. Die beschriebenen Ereignisszenarien sind Gegenstand von Untersuchungen in diversen Forschungsvorhaben. Im Vergleich zu diesen Forschungsprojekten, liegt bei HyTRA der Fokus auf dem Zusammenwirken der Sicherheitssysteme von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen und den sicherheitsrelevanten Anlagen (Lüftung, Sensorik, etc.) in österreichischen Tunneln. Übergeordnete Ziele des Forschungsprojekts HyTRA sind die Identifizierung von Sicherheitsrisiken sowie die Implementierung der beschriebenen Ereignisszenarien in das österreichische Tunnelrisikomodell.

## Ziele des Berichts

Dieser Bericht gibt eine Detailbeschreibung der in HyTRA erzielten Projektergebnisse. Diese inkludieren folgende Punkte:

- Beschreibung des Stands der Technik inklusive Defizitanalyse
- Ermittlung der Gefahrenquellen und des Gefahrenpotentials
- Ermittlung der Schadensauswirkungen in Tunnelanlagen

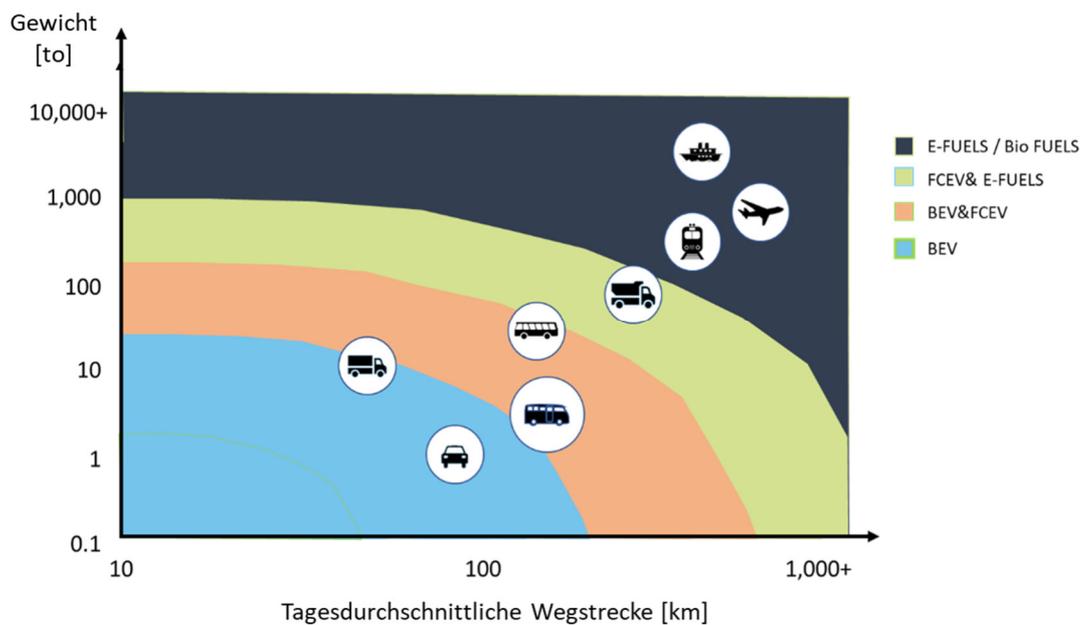
- Vertiefte Konsequenzanalyse
- Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

## Abkürzungsverzeichnis

BEV	Battery electric vehicle
CGH <sub>2</sub>	Compressed gaseous hydrogen
CHSS	Compressed hydrogen storage system
CNG	Compressed natural gas
FCEV	Fuel cell electric vehicle (Brennstoffzellenfahrzeug)
FRR	Fire resistance rating
GCE	Gas cloud explosion
HEV	Hybrid electric vehicle
HSS	Hydrogen storage system
ICEV	Internal combustion engine vehicle
LHSS	Liquified hydrogen storage system
OEG	Obere Explosionsgrenze
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
TPRD	Thermal pressure relief device
UEG	Untere Explosionsgrenze

## 1. EINLEITUNG

Aus Klimaschutzgründen kommt es zu einer sukzessiven Umstellung von Antriebssystemen im motorisierten Verkehr. Der Trend geht eindeutig weg von fossilen Antrieben mit Benzin oder Diesel als Energieträger hin zu emissionsfreien Antriebskonzepten mit Batterien oder auch Wasserstoff (bzw. Wasserstoffträger) als Energiespeicher. Der Einsatzbereich von Wasserstoff in der Mobilität ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung wird die Nutzung von H<sub>2</sub> als Energieträger für Brennstoffzellen von Seiten der Europäischen Union, vor allem für den Bereich des Personen-Fernverkehrs, aber verstärkt auch für den Nutzfahrzeugverkehr, als äußerst vielversprechend erachtet. Gemäß EU-Wasserstoffstrategie [1] muss zeitnah eine Forcierung von Wasserstoff-Fahrzeugen im Güterverkehr erfolgen.



**Abbildung 1: Einsatzbereich von Wasserstoff in der Mobilität [2]**

In den letzten Jahren wurden die Forschungstätigkeiten verstärkt in Richtung der (Batterie)Elektro-Mobilität gerichtet. Das Thema Wasserstoff stellt bezogen auf die Tunnelsicherheit jedoch einen neuen Aspekt dar, wodurch derzeit auch nur wenige publizierte Forschungsergebnisse in diesem Bereich verfügbar sind. Die von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen ausgehenden Gefahren, können unterschiedlicher Natur sein. Einige davon (z.B. mechanische Gefahren - Kollision) decken sich mit jenen

konventionell angetriebener Fahrzeuge, da sie weitgehend unabhängig von der Antriebstechnologie sind. Andere sind hingegen speziell durch den Einsatz von Wasserstoff bedingt und damit für die derzeit mit Wasserstoff angetriebenen Fahrzeuge charakteristisch (z.B. Freistrahland am Austritt des Sicherheitsventils). Im Allgemeinen können unterschiedliche Einflüsse zu einer Freisetzung von H<sub>2</sub> führen. So können mechanische Einwirkungen bei einer Kollision mit anderen Fahrzeugen oder Tunnelwänden zum Austritt von H<sub>2</sub> aus dem Tank führen. Derselbe Effekt kann auch durch thermische Einflüsse (z.B. Brand) auftreten, wenn es hierbei zu unzulässig hohen Drücken respektive Temperaturen im H<sub>2</sub>-Tank kommt.

Um das Explosionsrisiko zu minimieren, sind die Tanksysteme verpflichtend mit Sicherheitsventilen ausgestattet, welche im Ereignisfall ein kontrolliertes Ablassen von H<sub>2</sub> ermöglichen. Auf Grund der weiten Zünd- und Explosionsgrenzen sowie der sehr geringen Zündenergie des H<sub>2</sub>, kann es hier im Tunnel rasch zu einer Zündung kommen.

Während die Sicherheitsausrüstung von wasserstoffbetriebenen KFZ wie auch jene von Tunneln bekannt sind, kann über deren Zusammenwirken auf Basis der bisher verfügbaren Forschungsergebnisse nur sehr wenig gesagt werden.

Das Projekt HyTRA setzt genau an diesem Punkt an. Nach einer umfangreichen Grundlagenrecherche (AP2) und der Ableitung von relevante Unfallszenarien (AP3), werden diese Szenarien in weiterer Folge mit Hilfe von analytischen und numerischen Simulationen betrachtet (AP4). Diese stellen bei H<sub>2</sub>-Freisetzungen die einzige realistische Untersuchungsmethode dar. Eine Analyse der Konsequenzen (AP5) führt schließlich die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Arbeitspaketen zusammen und zeigt den notwendigen Handlungsbedarf für den Erhalt eines hohen Sicherheitsniveaus auf. Im abschließenden Arbeitspaket (AP6) werden basierend auf den zuvor gewonnenen Erkenntnissen, Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen formuliert. Diese inkludieren Maßnahmen zur Erkennung von Gefahren, zur Vermeidung von Gefahren sowie zur Minderung des Schadensausmaßes. Die gesammelten Ergebnisse sollen Fachgremien sowie dem Gesetzgeber zur Verfügung stehen, um die Sicherheit für Tunnelnutzer, Tunnelbetreiber und Einsatzkräfte auch weiterhin zu gewährleisten.

## 2. GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

In diesem Arbeitspaket wurden projektspezifische Grundlagen erarbeitet und der Stand der Technik von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen und Tunnelanlagen in Bezug auf die Wasserstoffsicherheit erhoben. Die Literaturrecherche umfasst Standards, Regularien, Berichte und Projekte zu diesen Themen und mündet in einer Beschreibung des Stands der Technik bezogen auf die wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge (z.B. FCEVs), die Infrastruktur sowie die Methoden der Risikoanalyse. Diese werden mit dem Ziel, die Wissenslücken und technologischen Engpässe für die Gewährleistung der Wasserstoffsicherheit in Tunnelanlagen zu identifizieren, eingehend diskutiert. Sicherheitstechnische Anforderungen an wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und deren Komponenten, werden detailliert beschrieben, und auf Crash-Tests und Brandversuche wird näher eingegangen. Architektur, Betrieb, Struktur und Sicherheitstechnik von Tunnelanlagen werden erläutert. Mit Hilfe einer Defizitanalyse werden fehlende Informationen identifiziert.

### 2.1. Erhebung bestehender Untersuchungen

Ein Grund für die bei vielen Personen verbreitete Skepsis bezüglich der Sicherheit von Wasserstoff findet sich häufig in den prominenten historischen Unfällen, die sich in Luft- und Raumfahrt ereigneten. Bei den wohl bekanntesten Fällen handelt es sich um die Abstürze bzw. Explosionen des Hindenburg Zeppelins und der Challenger Rakete in den Jahren 1937 und 1986. In beiden Fällen war Wasserstoff allerdings nicht der Auslöser der Katastrophe (Zeppelinhüllenbrand vermutlich durch einen Funkensprung infolge einer Potentialdifferenz bei einem Gewitter und Challenger Unfall durch einen versagenden Dichtring bzw. brennender Treibstoff der Feststoffrakete).

Im Automobilbereich wurden in den letzten 30 Jahren über 10 Millionen Kilometer von Wasserstoff- und Brennstoffzellenfahrzeugen zurückgelegt, ohne dass größerer Sach- oder Personenschaden dokumentiert wurde. Dennoch gibt es Aufzeichnungen zu einigen wenigen Zwischenfällen mit Wasserstoff, welche an dieser Stelle anhand der wesentlichen Eckdaten erläutert werden.

## 2.1.1. Dokumentierte Unfälle mit Wasserstoff

### Unfall eines Brennstoffzellenfahrzeugs

In Washington DC kam es am 22. Februar 2010 zu einem Verkehrsunfall, bei dem ein Pickup ein Brennstoffzellenfahrzeug (Opel HydroGen4) in einen anderen Pickup (Chevrolet Equinox) schob. Das Ergebnis war ein deutlich sichtbarer Schaden am Wasserstoff-Fahrzeug (siehe Abbildung 2), wobei die Sicherheitssysteme des Fahrzeugs ihre Funktion erfüllten und es zu keinem Austritt des Wasserstoffgases kam. Auch wurden keine Personenschäden dokumentiert. Zum Zeitpunkt des Unfalls handelte es sich um den fünften Unfall eines Brennstoffzellenfahrzeugs von GM, wobei es in keinem Fall zu einer Explosion kam [3].



**Abbildung 2: Fotodokumentation des Unfallfahrzeugs**

### Unfall von Wasserstofftransportern

In Deutschland ist im Jahr durchschnittlich ein Wasserstofftransportfahrzeug in einen Unfall verwickelt. Bedingt durch die hohen Sicherheitsstandards kam es allerdings zu keinen gravierenden Unfallfolgen und keinen dokumentierten Todesfällen [3].

Am 7. März 2001 kam es auf der A1 in Deutschland auf der Höhe Köln-Lövenich zu einem Unfall, bei dem ein LKW im Stop-and-Go Verkehr auf einen Wasserstofftransporter auffuhr. Der Transporter kippte daraufhin um, wodurch in weiterer Folge drei der neun mitgeführten Tanks an den Ventilen beschädigt wurden. Der freigesetzte Wasserstoff entzündete sich sofort und bildete zwei Meter lange Flammen, die auf den LKW übergriffen. In einem Großeinsatz von 200 Feuerwehrmänner und 100 Polizisten wurden die Behälter von 20 Tanklöschfahrzeugen gekühlt, um das Bersten der Tanks zu verhindern. Da die

Wasserkapazitäten der Löschfahrzeuge nicht ausreichten, wurden zudem sechs zusätzliche Löschleitungen an den Unfallort verlegt und ein unbemannter Wasserwerfer eingesetzt [3].

Im selben Jahr kippte am 3. April ein LKW bei einem Ausweichmanöver um, wodurch eine Verbindungsleitung zwischen den mitgeführten Gastanks versagte. Die Feuerwehr sicherte den Bereich und ließ das Gas kontrolliert entweichen [3].

In Italien kam es im März 2003 zu einem Unfall, in dem mehrere Fahrzeuge inklusive einem Röhren-Trailer (Beispiel siehe Abbildung 3) verwickelt waren. Die Feuerwehr konnte mittels Infrarotkameras eine Wasserstoffflamme aus einer am Boden liegenden Wasserstoffflasche erkennen, welche im Anschluss mit Löschwasser gekühlt wurde, bis die Flamme erlosch [3].

Im Februar 2004 verunfallte ein weiteres Mal ein Röhren-Trailer in Italien. Der Fahrer kam mit seinem Transporter von der Straße ab und blieb mit diesem in weiterer Folge im Feld liegen. Die Feuerwehr stellte später lediglich einen Ventilbruch fest - es kam zu keinem Brand [3].



**Abbildung 3: Röhren bzw. Tube-Trailer [4]**

Im Mai 2003 kam es in Los Angeles zu einem Wasserstoffaustritt, als ein H<sub>2</sub> Trailer Druckbehälter umfüllte. In weiterer Folge entzündete sich das ausgestoßene Gas vermutlich aufgrund einer elektrostatischen Aufladung und entwickelte dabei einen 30 Meter hohen Flammenball. Die nachfolgend eintreffenden Einsatzkräfte konnten den

Austritt des Wasserstoffs nicht unterbinden, weshalb man sich für eine Kühlung der Druckbehälter entschied und nach zwei Stunden die verbliebene schwache Flamme löschte. Bei dem Vorfall entwichen 570 m<sup>3</sup> Wasserstoff. Trotz der großen Menge an freigesetztem Wasserstoff kam es zu keinem Personenschaden [3].

Im Dezember 2009 kippte ein mit 4000 m<sup>3</sup> Wasserstoff beladener Transporter, der auf der Autobahn A4 in Reichshof (Nordrhein-Westfalen) unterwegs war um. Etwa ein Viertel der Ladung entwich bei dem Unfall und entzündete sich. Die knapp zwanzig angerückten Löschfahrzeuge kühlten die gefährdeten Druckbehälter und legten einen großen Teppich aus Löschschaum. Laut der Feuerwehr bestand keine Explosionsgefahr, der verletzte Fahrer wurde ins Krankenhaus gebracht [5].

#### Wasserstoff Explosion an einer Tankstelle in Norwegen

In Norwegen kam es am 10. Juni 2019 infolge eines Montagefehlers eines Steckers in einem Wasserstofftank im Hochdruckspeicher zu einem Austritt von Wasserstoff mit folgender Zündung und Explosion (siehe Abbildung 4) [6]. Bis in die Morgenstunden des Folgetages führten Einsatzkräfte Löscharbeiten und erste Untersuchungen durch. Die Kühlung der anwesenden Wasserstofftanks wurden dabei auch durch einen Löschroboter unterstützt. Einem Medienbericht zufolge verursachten durch den Druckstoß ausgelöste Airbags bei zwei Personen leichte Verletzungen. An der Tankstelle befand sich zu dem Zeitpunkt keine Person [7].



**Abbildung 4: Kjørbo Tankstellenfeuer, Norwegen**

Bisher kam es zu keinen dokumentierten, kritischen Unfällen an Wasserstofftankstellen, welche durch PKW-Fahrer verursacht wurden. In einem Vorfall jedoch beschädigte ein Fahrer beim Reversieren eine Zapfsäule und verschob diese um 20 Zentimeter. Dabei schlossen sich die doppelseitigen Ventile, weshalb nur eine sehr geringe Menge Wasserstoff austreten konnte [3].

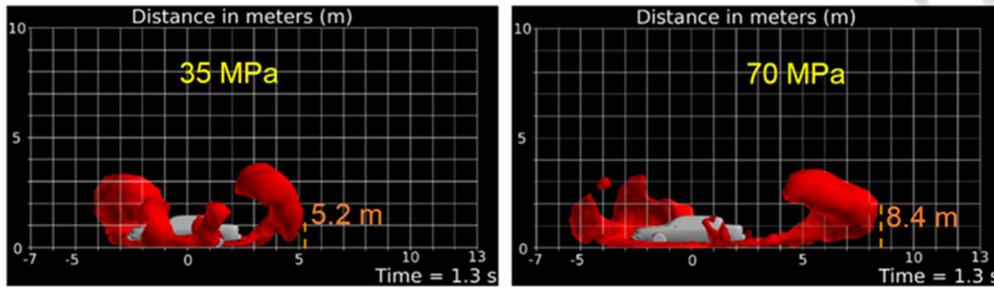
## 2.1.2. HyResponse 2016

HyResponse [8] war ein durch die Europäische Union gefördertes Forschungsprojekt, mit dem Ziel, das weltweit erste umfassende Schulungsprogramm für Ersthelfer einzurichten, um den sicheren Einsatz von FCH-Systemen (Wasserstoff-Systeme) und -Infrastrukturen zu erleichtern. Im Zuge des Projekts wurde eine europäische Schulungsplattform für Wasserstoffsicherheit (European Hydrogen Safety Training Platform - EHSTP) erstellt. Das entwickelte Kernschulungsprogramm besteht aus drei Teilen: einer pädagogischen Schulung, die den neuesten Stand des Wissens im Bereich der Wasserstoffsicherheit vermitteln soll, einer betrieblichen Schulung an nachgebildeten Wasserstoff- und Brennstoffzellenanlagen im realen Maßstab und einer innovativen Schulung in virtueller Realität, bei der ein komplettes Unfallszenario, einschließlich des Einflusses der Ersthelfer, detailliert nachgestellt wird. Im Rahmen des Projekts wurden drei Pilotschulungen durchgeführt. Ein Leitfaden für Notfallmaßnahmen, in dem die Einzelheiten der Interventionsstrategie und -taktik beschrieben sind, wurde entwickelt.

Im Rahmen des Projekts wurden CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) von H<sub>2</sub>-Freistrahlsbränden durchgeführt und auf Basis von Temperatur und Druck Abschätzungen bezüglich notwendiger Sicherheitsabstände abgeleitet, siehe Abbildung 5.

Mittels experimenteller Versuche wurden die Simulationsergebnisse validiert. Des Weiteren wurden Versuche zur H<sub>2</sub>-Flamme aus unterschiedlichen TPRD-Geometrien durchgeführt, siehe Abbildung 6. In Tabelle 1 wurden Flammenlängen und notwendige Sicherheitsabstände zusammengefasst.

### Hazard distance from visible hydrogen fire (1300 °C flame)



### Hazard distance for people standing on the ground (below 2m)

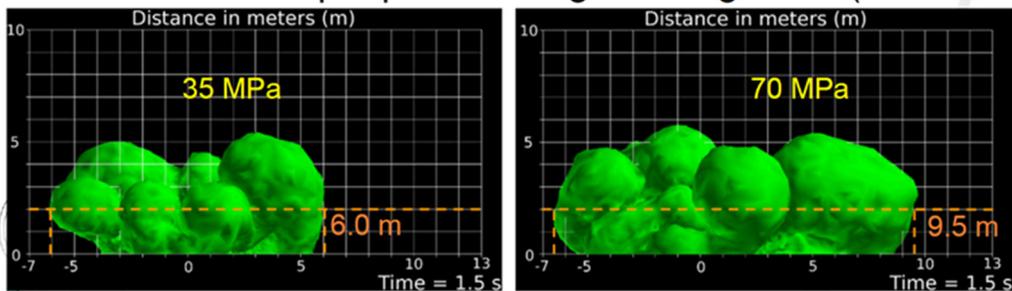


Abbildung 5: CFD-Simulationen von Freistrahlbländen von H<sub>2</sub>-Speichersystemen [9]

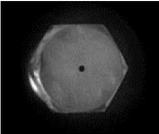
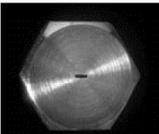
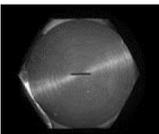
Nozzle	Side view	Front view
 $d = 0.001 \text{ m}$	 00:00:02:99	 00:00:03:00
 $0.0004 \times 0.002 \text{ m}$ $(AF = 5)$	 00:00:04:00	 00:00:03:99
 $0.00025 \times 0.0032 \text{ m}$ $(AF = 12.8)$	 00:00:06:99	 00:00:06:01

Abbildung 6: Freistrahlbland durch unterschiedliche TPRD Geometrien [9]

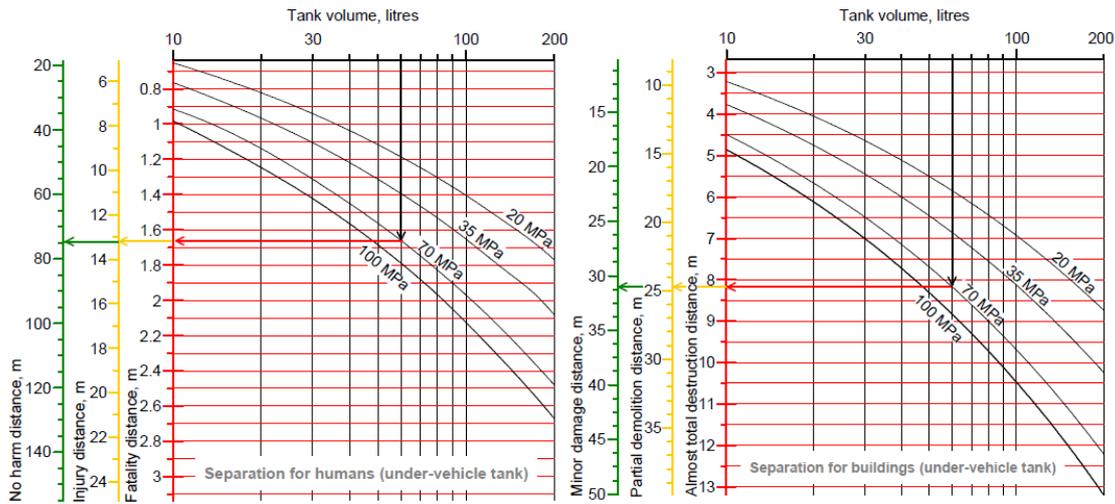
Pressure in storage tank, MPa	TPRD orifice, mm	Flame length, m	SD (no harm), m	SD (pain threshold), m	SD (3 <sup>rd</sup> degree burn), m
35	2	5	18	16	10
35	3	8	27	23	16
35	4	10	36	26	18
35	5	13	46	39	26
35	6	16	55	47	31
70	2	7	23	20	13
70	3	10	35	30	20
70	4	13	46	40	27
70	5	17	58	50	33
70	6	20	70	60	40

**Tabelle 1: Flammenlängen und Sicherheitsabstände für Freistahlbrände von H<sub>2</sub>-Speichersystemen**

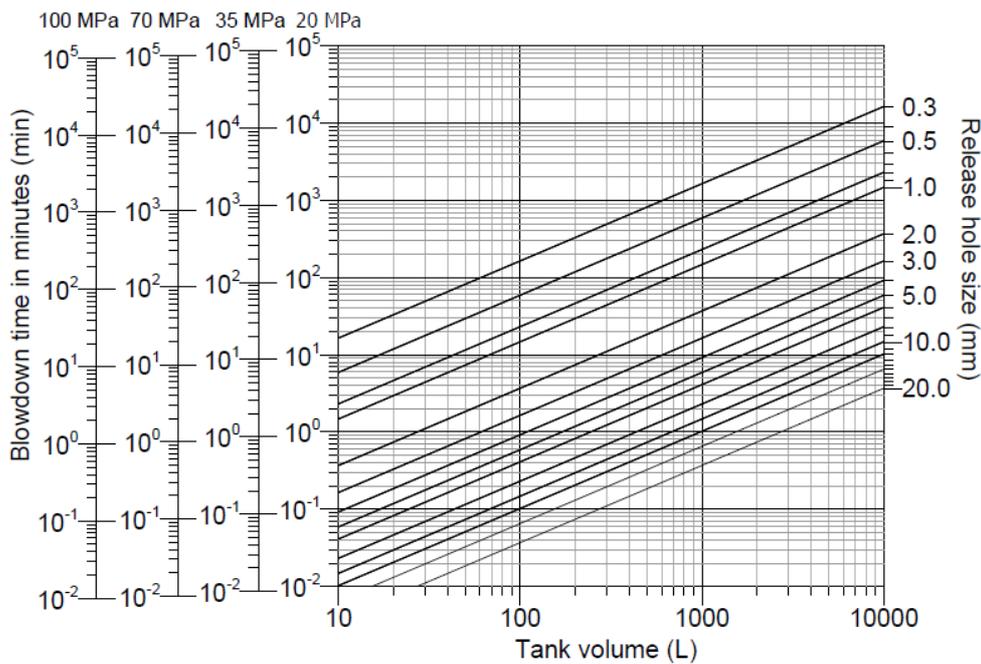
Mit dem Zweck der Validierung der Simulationsergebnisse, wurde darüber hinaus auch reale Versuche mit eingebautem H<sub>2</sub>-Speichersystem in einem Fahrzeug durchgeführt, siehe Abbildung 7. Des Weiteren wurden im Zuge des Projekts sogenannte Nomogramme (Diagramm, an dem Werte einer mathematischen Funktion näherungsweise abgelesen werden können) für Gefahrenabstände für Personen und Gebäude bei Bruch bzw. Explosion des H<sub>2</sub>-Behälters für unterschiedliche Volumina und Druckniveaus entwickelt, siehe Abbildung 9.



**Abbildung 7: PKW mit gasförmigem H<sub>2</sub>-Speichersystem in Brand [9]**



**Abbildung 8: Nomogramme für die Bestimmung der Gefahrenabstände bei Behälterbruch unter Fahrzeugen: Abstände zu Menschen (links) und Abstände zu Gebäuden (rechts)**



**Abbildung 9: Nomogramm eines H<sub>2</sub>-Behälters für die Auslasszeit auf 2 bar bei aktiviertem TPRD [9]**

Mittels eines Feuerwehrsimmers wurden für Trainingszwecke realistische Szenarien von FCEV-Bränden nachgestellt und das Einsatztaktische Verhalten trainiert, siehe Abbildung 10. Der Auszug aus den entwickelten Leitfäden für Notfallmaßnahmen und Interventionsstrategien und -taktiken ist in Tabelle 2 dargestellt.

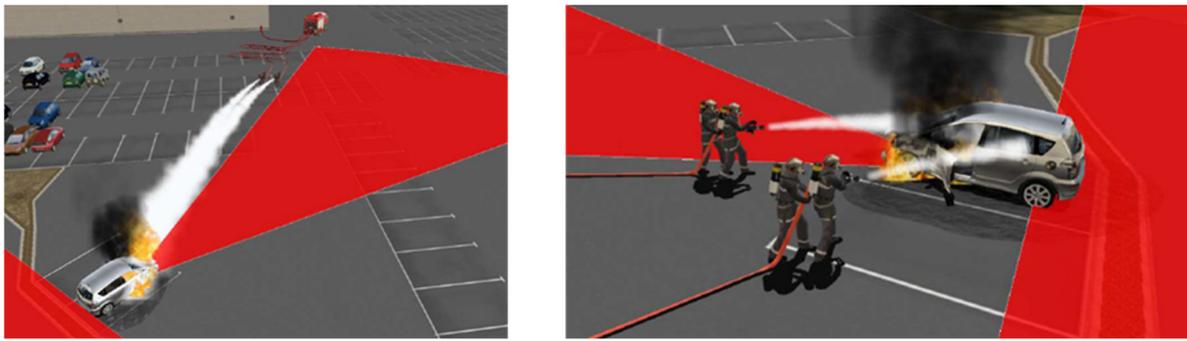


Abbildung 10: FCEV-Brand in einem Feuerwehrsimulator [9]

Steps	Actions	Goals
RECOGNITION	Identify	- Contact the safety manager of the installation for the details of the incident; - Take into account the dispersion of H <sub>2</sub> in premises before the ignition (possibility of UVCE unconfined vapour cloud explosion).
	Prohibit	- Prohibit downwind progression and imperatively establish an exclusion zone of 50 m; - Prohibit the use of non ATEX electrical or electronic devices in the exclusion zone (cell phones, radios, etc.). - Prohibit the extinguishment of the hydrogen flames. - Prohibit the actions on the electrical system of the facility in case of hydrogen leak.
	Inspect	- Operate the external power cuts of the building; - Confirm the presence of an ignited leak and its length using thermal camera (hardly visible flame in its entirety, in the day light); - Pay attention to the significantly loud sound of an ignite gas leak.
RESCUE		- <b>In case of hydrogen in confined spaces:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Wear a breathing apparatus;</li> <li>Remove the affected person(s) outside the exclusion zone.</li> </ul> - <b>If risk of electrified or electrocuted victim:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Use the electro-rescue equipment to remove the victim;</li> <li>Avoid contact with electrical stakeholder bodies.</li> </ul>
PREPAREDNESS/ INCIDENT SETTLEMENT	Act  Isolate	- Refine the exclusion area (explosimeter measurements, information on the nature of the incident ...); - Set up water curtains to prevent a fire spread; - If necessary, provide preventive cooling on hydrogen storage and facilities nearby.
PROTECTION		- Close hydrogen supply valves; - Ventilate premises facilitating natural drawing (opening existing outlets).
CLEAR OUT  OVERHAUL		- Look for high temperature points on hydrogen storage using thermal imaging device on hydrogen storage; - Conduct surveys of explosimeter in confined spaces prioritizing high points; - Press the emergency stop button of the installation (delay of 20 minutes with the presence of a residual current).

Tabelle 2: Notfallmaßnahmen und Interventionsstrategie bei einem H<sub>2</sub>-Leck mit gezündeter Flamme [9]

### 2.1.3. HyTunnel CS 2023

Das Ziel des HyTunnel-CS-Projekts [10] war die pränormative Forschung zur Sicherheit von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen in Tunnelbauwerken und ähnlichen beengten Räumen. Das Hauptanliegen bestand darin, Wasserstofffahrzeuge derart sicher zu gestalten, dass deren Betrieb in unterirdischen Verkehrssystemen zu keiner Risikoerhöhung im Vergleich zu herkömmlichen Fahrzeugen, angetrieben mit fossilen Brennstoffen, führt.

Die konkreten Ziele können wie folgt zusammengefasst werden:

- kritische Analyse der Wirksamkeit konventioneller Sicherheitsmaßnahmen bei Wasserstoffvorfällen;
- Generierung experimenteller Daten;
- Erläuterung relevanter physikalischer Eigenschaften bezüglich der Wasserstoffsicherheitstechnik;
- Entwicklung innovativer Strategien zur Vermeidung und Minderung von Explosionen und Bränden;
- Entwicklung neuer validierter CFD (computer fluid dynamics) - und FE-Modelle (finite elemente) zur Folgenanalyse;
- Neuartige Ingenieurmethoden zur quantitativen Risikobewertung, speziell auf Tunnel und Tiefgaragen zugeschnitten;
- Empfehlungen für Interventionsstrategien und -taktiken für Ersthelfer;
- Empfehlungen für eine inhärent sicherere Nutzung von Wasserstofffahrzeugen in unterirdischen Transportsystemen;
- Empfehlungen für RCS (regulation codes / best practices standards).

Die Ziele wurden durch die Durchführung interdisziplinärer und branchenübergreifender Forschung mit Hilfe eines Konsortiums aus Hochschulen, Rettungsdiensten, Forschungs- und Standardentwicklungsorganisationen verfolgt. Die für das HyTRA Projekt relevanten Ergebnisse aus den bereits veröffentlichten Endberichten des HyTunnel CS Projekts, werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

## Bericht über die Bewertung der Wirksamkeit herkömmlicher Sicherheitsmaßnahmen in unterirdischen Transportsystemen und ähnlichen begrenzten Räumen:

- Die Wirksamkeiten von bereits vorhandenen Sicherheitseinrichtungen, allen voran Tunnellüftung, ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen und Einrichtungen des baulichen Brandschutzes in Bezug auf Wasserstoffereignisse, wurden qualitativ diskutiert.
- Basierend auf den Ergebnissen experimenteller bzw. theoretischer Studien wird bezüglich der kritischen Lüftungsgeschwindigkeit in längsgelüfteten Tunnelanlagen ein Wert von 3,5 m/s empfohlen. Letztere ist ausreichend um brandbedingte Schadstoffe und toxische Gase aus der Tunnelanlage abzuführen, jedoch nicht zu stark, um flüchtende Personen sowie Fremdrettungspersonal zu behindern. Allerdings sollte im Zuge der Festlegung der kritischen Geschwindigkeit, auch die Verteilung von Wasserstoff mit berücksichtigt werden.
- In vielen Tunnelanlagen ist eine ortsfeste Brandbekämpfungsanlage verbaut. Kommt es zu einem Zwischenfall in Verbindung mit Wasserstoff, kann sich der Effekt des Wassernebels einerseits positiv auswirken, da die Wasserstoffschichtung zerstört und somit die Bildung eines zündfähigen Wasserstoff-Luft Gemisch erschwert wird, andererseits können die induzierten Verwirbelungen an manchen Stellen wiederum zu zündfähigen und entsprechend gefährlichen Wasserstoff-Luft Gemischen führen. Die Installation einer solchen Anlage sollte individuell für jeden Tunnel, unter Berücksichtigung des Verkehrsmix und weiterer spezifischer Eigenheiten, untersucht und bewertet werden.
- Tunnelanlagen werden derzeit unter großem Aufwand bezüglich des baulichen Brandschutzes geprüft und getestet. Dabei muss die Betonverkleidung definierten Temperaturen über eine entsprechende Einwirkungsdauer standhalten. Die Auswirkungen der, im Zuge experimenteller Studien des HyTunnel Projekts gewonnenen Temperatur-Zeitverläufe von Wasserstoff-Szenarien, können mit den oben genannten Grenzwerten für den baulichen Brandschutzes verglichen und dahingehend diskutiert werden.

## Bericht über Wasserstoffgefahren und -risiken in Tunneln und ähnlichen beengten Räumen:

- Ausarbeitung der relevanten Gefahren durch Wasserstoff in Straßentunneln.
- Unterscheidung in nicht-gezündete Freisetzung (Sauerstoffverdrängung, Hautverletzung durch Druckstrahl, Kälteverbrennungen), Freistrahbrand, Wasserstoffexplosion und Tank- inklusive Wasserstoffexplosion.
- Tunnellüftung hat grundsätzlich positive Auswirkungen auf die Dispersion von Wasserstoff. Übliche Lüftungsgeschwindigkeiten sind insbesondere dazu geeignet, Konzentrationen bis unter der Zündgrenze zu verdünnen. Es können aber auch negative Effekte, wie etwa die Verteilung der Wasserstoffwolke über einen größeren Bereich, auftreten. Es wurde daher ein zusätzlicher Forschungsbedarf in Bezug auf die Auswirkungen der Tunnellüftung auf die Wasserstoffkonzentration im Tunnel identifiziert.

#### Bericht über Auswahl und Priorisierung von Szenarien:

Im Zuge des HyTunnel-CS Projekts wurde eine Auswahl an maßgeblichen, möglichen Schadensszenarien im Zusammenhang mit Wasserstoff in Tunneln und ähnlichen beengten Räumen getroffen. Mit Hilfe dieser Szenarien, sollte der Unterschied bezüglich der Folgen zwischen Wasserstoffunfällen in Tunneln bzw. tunnelähnlichen Bauwerken und ähnlichen Unfällen im Freien aufgezeigt werden. Im Folgenden werden die zehn definierten Unfallszenarien aufgelistet:

- Wasserstoffaustritt – keine Entzündung – Ausbreitung in beengtem Raum mit mechanischer Lüftung
- Wasserstoffaustritt – keine Entzündung – beengter Raum mit beschränkter Lüftung
- Wasserstoffaustritt – keine Entzündung – Tunnel mit natürlicher / mechanischer Lüftung
- Wasserstoff-Freistrahbrand – beengter Raum mit beschränkter Lüftung
- Wasserstoff-Freistrahbrand – Fahrzeugbrand – beengter Raum mit mechanischer Lüftung (Werkstätte, Tiefgarage)
- Wasserstoff-Freistrahbrand – Einwirkung auf Tunnel
- Wasserstoff-Freistrahbrand – Fahrzeugbrand im Tunnel
- Brandausbreitung in Tiefgarage
- Wasserstofftankexplosion im Tunnel
- Wasserstofffreisetzung – im Tunnel – verzögerte Entzündung

Des Weiteren wurden ausführliche theoretische und experimentelle Studien durchgeführt, die in Forschungsprogrammen zu den Themenbereichen „nicht entzündete Lecks“, „Wasserstoffbrände“ sowie „Explosionen in unterirdischen Transportsystemen“ zusammengefasst sind:

#### Nicht entzündete Lecks

- Simulationen bezüglich Wasserstoffaustritt und Verteilung im Tunnel:
- CFD Modelle und experimentelle Untersuchungen in realen HSE Tunnelanlagen
- Wasserstoffaustrittverhalten und dessen Ausbreitung im Tunnel:
- Experimentelle Untersuchungen, um das Profil zündfähiger Wasserstoff-Luft Gemische zu bestimmen
- Wirkungsweise bzw. Einfluss der mechanischen Lüftung in Bezug auf die Wasserstoffverteilung

#### Wasserstoffbrände

- Gekoppelte CFD und FEM Modellierungen zur Bestimmung der Auswirkung von Bränden auf die Bauwerkstruktur
- CFD Modelle zur Analyse des Zusammenhangs von Wasserstofffreisetzung und Brandausbreitung in unterirdischen Transportsystemen
- Experimentelle Studien zum Einfluss von Wasserstoff-Freistahlbränden auf die Bauwerksintegrität, im Speziellen zu Betonabplatzungen
- Experimentelle Studien zum Einfluss von Wasserstoff-Freistahlbränden auf die Tunnelfahrbahn bzw. die Tunnelverkleidung
- Experimentelle Studien zum Wasserstoffbrandverhalten

#### Explosionen in unterirdischen Transportsystemen

- Ingenieursmethoden zur Auswirkungsabschätzung von Druckwelle und Feuerball infolge einer Wasserstofftankexplosion
- Realtunnelversuche bezüglich Fahrzeugbrand mit Wasserstofftankversagen: Auswirkungen von Druckwelle und Feuerball
- Experimentelle Studie zur Deflagration einer nicht gleichmäßig ausgedehnten Wasserstoff-Luftgemisch Wolke

- Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss einer Wassersprüh bzw. Wassernebelanlage auf den Verbrennungsvorgang und insbesondere auf den Deflagration – Detonationsübergang
- Wasserstofftankexplosionen: Literaturstudie bezüglich der Wassernebel bzw. Wassersprühanlagen und deren Effektivität im Zusammenhang mit der Abschwächung von Druckwellen
- Wasserstofftankexplosionen: Experimentelle Studie bezüglich der Wassernebel bzw. Wassersprühanlagen und deren Effektivität im Zusammenhang mit der Abschwächung von Druckwellen
- Sicherheitseinrichtung zur Vermeidung von Tankexplosionen: Entwicklung und Erzeugung von vier derart modifizierten Tanks bei welchen im Zuge eines Brandtest Wasserstoff austritt es aber zu keiner Explosion kommen kann.

Die wesentlichen Ergebnisse dieser Studien können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es wurden Modelle und Modellansätze zur Berechnung der Wasserstofffreisetzung, Druckwellenabschwächung entlang eines Tunnels, Widerstandsfähigkeit von Wasserstoff-Tanks gegenüber der Exposition eines Feuers, Zusammenhänge bezogen auf den Übergang von einer Deflagration zu einer Detonation in homogenen und inhomogenen Wasserstoffwolken, die Interaktion einer Druckwelle mit Wassernebel, die Interaktion zwischen absorbierenden Baumaterialien und einer dynamischen Druckbelastung, das Verhalten des Tunnelbauwerks bei Einwirkung einer Wasserstoff Flamme, etc. entwickelt.
- Der Bruch eines Tanks verursacht eine Druckwelle, welche sich entlang des Tunnels ausbreitet. Während der entstehende Überdruck für Personen über weite Tunnelbereiche fatale Konsequenzen hat respektive schwere Verletzungen verursacht (max. Überdruck größer 0,2 bar), wird davon ausgegangen, dass die Schäden am Bauwerk lokal begrenzt sind. In den durchgeführten Experimenten konnten unter anderem Rissbildung in nahe dem Tank positionierten Platten beobachtet werden.
- Die Ausbildung eines Feuerballs bei einem Tankbruch ist von mehreren Parametern abhängig. Unter anderem hängt die Größe des Feuerballs von der Größe des Wasserstoff-Tanks und dem Speicherdruck ab. Zudem konnte eine Interaktion mit reflektierten Druckwellen beobachtet werden.

- Es wurden Untersuchungen mit Tanksystemen durchgeführt, die Maßnahmen zur Vermeidung eines Tankbruchs beinhalteten. So konnte unter anderem nachgewiesen werden, dass ein TPRD Durchmesser von 0,5 mm ausreicht, um das Bersten eines Tanks zu vermeiden und gleichzeitig die Flammenlänge des Wasserstoff-Freistrahls zu minimieren. Um Maßnahmen gegen eine lokale Brandeinwirkung (TPRD löst nicht aus) zu testen, wurde ein self-venting Tankkonzept entwickelt. Hierbei verliert der Tank bei Einwirkung von hohen Temperaturen dessen Isolationsfähigkeit, sodass Wasserstoff Diffusion durch die Wandungen des Tanks eintritt und der Druck im Tank reguliert werden kann.
- Mechanische Lüftung ist ein probates Mittel zur Reduzierung des Risikos einer Wasserstoffwolkenexplosion. Ab einer Lüftungsgeschwindigkeit von 3 m/s konnte beobachtet werden, dass Wasserstoff sich nur mehr in Fahrtrichtung ausbreitet, wodurch die Konsequenzen stromaufwärts der Freisetzungsstelle stark reduziert werden können. Die Ausbildung einer Wasserstoffwolke ist bei rechteckigen Tunnel wahrscheinlicher als bei Tunnel mit Hufeisenprofilen, wodurch sich ein theoretisch höheres Risiko für Tunnel mit Rechteckprofil ableiten lässt.
- Der maximale aufgezeichnete Überdruck bei der Explosion einer Wasserstoffwolke mit 20Vol% Wasserstoff, betrug etwa 0,3 bar und trat in einer Entfernung von 8 m vom Ort der Zündung auf. Die Höhe des Überdrucks hängt dabei stark von Hindernissen in der unmittelbaren Umgebung zum Ort der Zündung ab.
- Der Einsatz einer Wassernebelanlage erhöht das Sicherheitsniveau, da die Brandleistung klein gehalten werden kann. Zugleich konnte nachgewiesen werden, dass durch die Wassertröpfchen, ebenfalls ein Einfluss bezogen auf die Ausbreitung einer Druckwelle ausgeübt wird.

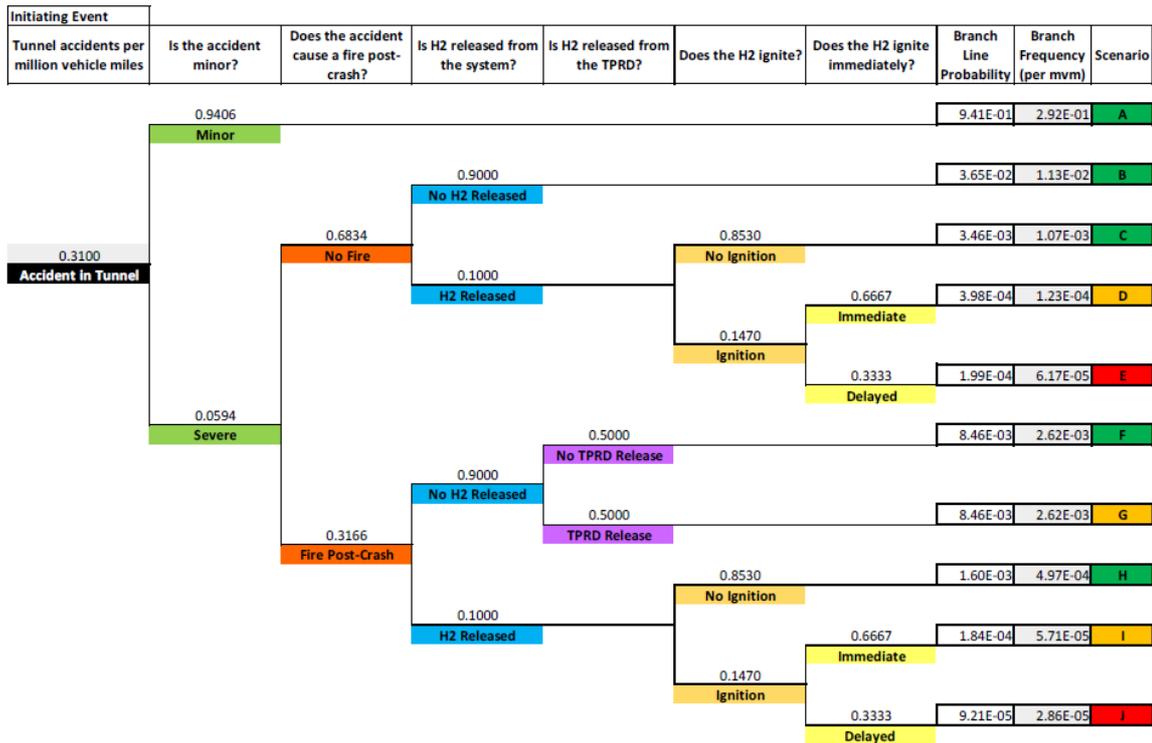
Die Anwendung einiger Modelle aus HyTunnel-CS erfolgte im Zuge der Berechnungen zur Schadensauswirkung in Kapitel 4 sowie im Zuge der Konsequenzenanalyse (siehe Kapitel 5). Die Modellinhalte werden an den entsprechenden Stellen im Bericht näher erläutert.

## 2.1.4. SANDIA Report 2017

Die SANDIA National Laboratories haben bereits im Jahr 2017 Untersuchungen zu den Auswirkungen von FCEVs in Tunneln durchgeführt [11]. Diese Untersuchungen inkludierten

eine Risikoanalyse, um die Wahrscheinlichkeit von möglichen Ereignisszenarien festzulegen. Hierbei wurde hervorgehoben, dass bei den meisten Ereignissen, keine zusätzliche Gefahr durch den Wasserstoff zu erwarten, jedoch die bisherige Datenlage äußerst gering ist, sodass weitere Validierungsarbeiten erforderlich sind, um die Schlussfolgerungen zu bestätigen. Dies betrifft primär Ereignisse einer Wasserstofffreisetzung ohne Entzündung. Für den Fall, dass Wasserstoff entzündet, ist das wahrscheinlichste Szenario, dass dies unmittelbar beim Austritt aus dem Tank respektive TPRD erfolgt und eine Wasserstoffflamme entsteht. Dieses Szenario wurde für unterschiedliche Tunnelkonfigurationen näher untersucht. Diese Untersuchungen ergaben, dass mit Abplatzungen des Betons respektive Schäden der Fahrbahn im Bereich der Kontaktzone der Wasserstoffflamme mit der Tunnelinfrastruktur zu rechnen ist. Eine Aktivierung der Lüftung verringert die Auswirkungen und das Schadensmaß bei einem solchen Szenario deutlich. Unabhängig von der Aktivierung der Lüftung ist nicht davon auszugehen, dass die Stahlkonstruktion (Bewährung) in Mitleidenschaft gezogen wird.

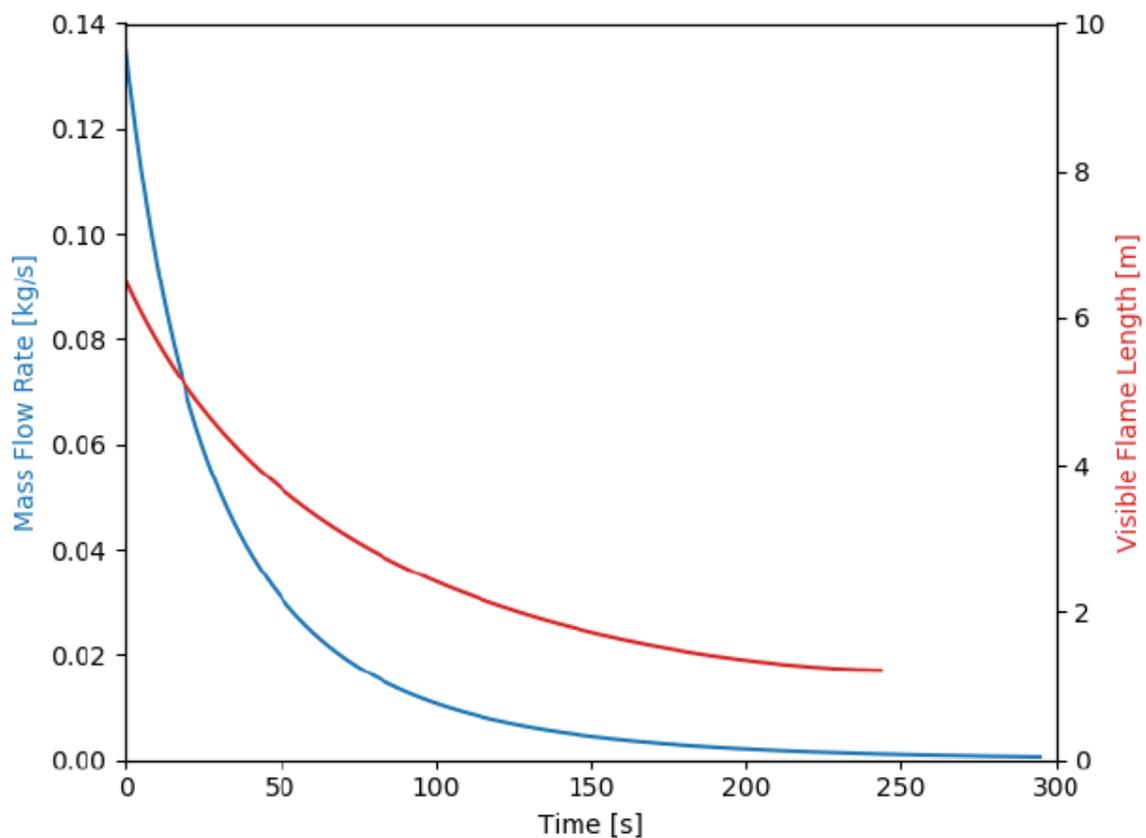
Abbildung 11 zeigt den im SANDIA Projekt abgeleiteten Ereignisbaum inklusive der angenommenen Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten der betrachteten Ereignisse.



**Abbildung 11: Abgeleiteter Ereignisbaum aus den Untersuchungen der SANDIA National Laboratories [11]**

Die angeführten Wahrscheinlichkeiten wurden aus diversen Statistiken aus Ländern wie Italien, Schweiz und Norwegen abgeleitet. Das initiale Ereignis wurde mit einem Unfall im Tunnel beschrieben. Mit hoher Wahrscheinlichkeit (ca. 94%) ergeben sich daraus keine ernstesten Konsequenzen auf Grund der Beteiligung eines FCEVs. Für den unwahrscheinlichen Fall (ca. 6%), dass es zu einem schweren Unfall kommt, ist zu gut zwei Drittel dieser Fälle mit keinem Feuer zu rechnen und selbst die Freisetzung von Wasserstoff wird als unwahrscheinlich erachtet. Lediglich für ca. 0,19% der Unfälle wird von einer H<sub>2</sub> Freisetzung ausgegangen. Eine Freisetzung von H<sub>2</sub> mit verspäteter Entzündung (Gas Cloud Explosion) gilt als äußerst unwahrscheinlicher Fall (0,029% - Summe Szenarios E und J). In Relation zu einer sofortigen Entzündung des Wasserstoffs wird davon ausgegangen, dass eine verspätete Entzündung nur in jedem dritten Fall auftritt. Die in der Risikoanalyse abgeleiteten Szenarien, welche durch ein hohes Schadensausmaß charakterisiert werden können, wurden in weiterer Folge näher untersucht. Diese Untersuchungen umfassten Grundlagenuntersuchungen zu einzelnen Komponenten wie auch numerische Simulationen der Szenarien.

Abbildung 12 zeigt die Freisetzungsraten von Wasserstoff und die zu erwartende Flammenlänge beim Entleeren eines 125 l Tanks über das TPRD. Die maximale Freisetzungsrate betrug ca. 0,13 kg/s und die maximale Flammenlänge wurde mit 6 m ermittelt. Die Gesamtdauer zur vollständigen Entleerung des Tanks betrug 300 s. An dieser Stelle ist anzuführen, dass die gezeigten Ergebnisse spezifisch für eine definierte Konfiguration von Tank (Tankdruck) und TPRD (Strömungsquerschnitt) sind. Dennoch liefern diese Ergebnisse erste Erkenntnisse über die zu erwartenden Größenordnungen.



**Abbildung 12: H<sub>2</sub>-Freisetzungsrate über TPRD und zu erwartende Flammenlänge beim Abblasen eines H<sub>2</sub> Tanks mit 125 Liter Tankvolumen [11]**

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei einem Fahrzeugbrand ist die dabei auftretende Wärmefreisetzungsrate (HRR). Für konventionell angetriebene Fahrzeuge wird hierbei von 2-5 MW ausgegangen. Der Vergleich mit Wasserstofffahrzeugen (siehe Abbildung 13) zeigt, dass während des Abblasens des Wasserstoffs, mit einer höheren HRR zu rechnen ist. Die maximale HRR liegt jedoch unter jener von konventionell angetriebenen Bussen.

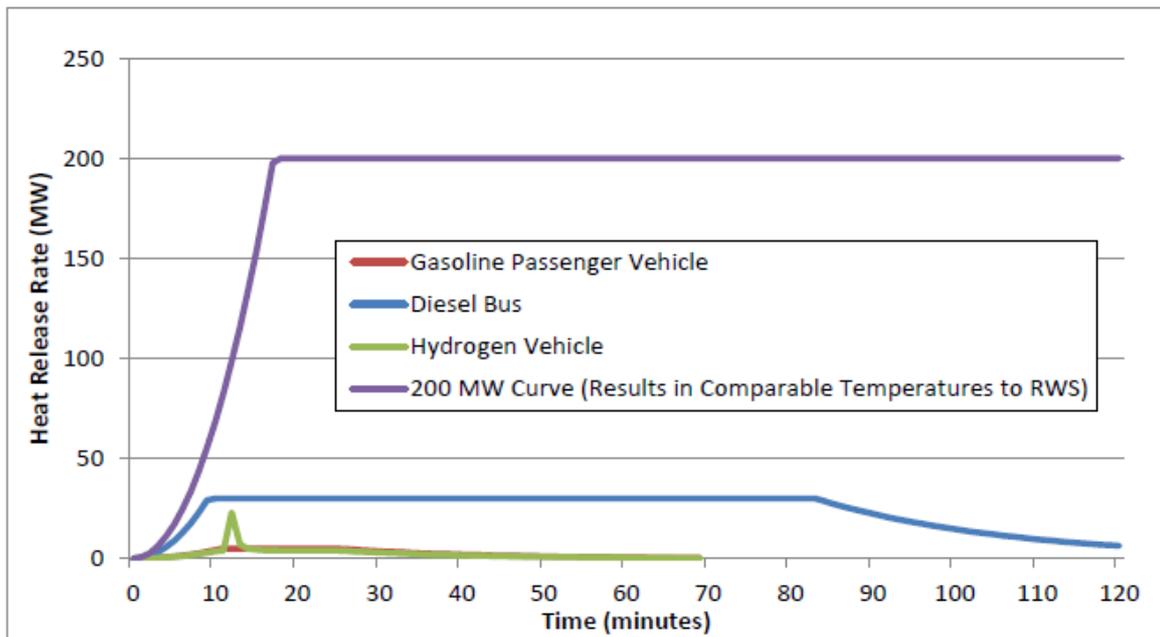


Abbildung 13: Vergleich der Wärmefreisetzungsraten von konventionell angetriebenen Fahrzeugen und Wasserstoff-Fahrzeugen [11]

### 2.1.5. SANDIA Report 2020

Im Jahr 2020 wurde wiederum von den SANDIA National Laboratories ein Bericht [12] veröffentlicht, der die Ergebnisse einer Literaturstudie bezogen auf Ereignisse von Wasserstoff-angetriebenen leichten und schweren Nutzfahrzeuge sowie Bussen zusammenfasst und speziell auf die Auswirkungen auf Tunnelnutzer abzielt.

Hierzu wurden die relevanten Gefahren durch einen Unfall mit Wasserstoff-angetriebenen Fahrzeugen betrachtet und die Untersuchungsergebnisse mit Verletzungskriterien bezogen auf die Einwirkung durch die Druckwelle (overpressure), des Wärmeflusses (heat flux) und der Temperatur verglichen. Die dafür verwendeten Kriterien sind in Tabelle 3, Tabelle 4 und Tabelle 5 angeführt.

Radiant Heat Flux		Effects or Injuries
kW/m <sup>2</sup>	Btu/hr-ft <sup>2</sup>	
2.5	793	Common thermal radiation exposure while firefighting. This energy level may cause burn injuries with prolonged exposure.
		Human skin experiences pain with a 33-second exposure and blisters in 79 seconds with second-degree burn injury.
5	1,586	Human skin experiences pain with a 13-second exposure and blisters in 29 seconds with second-degree burn injury.
10	3,172	Human skin experiences pain with a 5-second exposure and blisters in 10 seconds with second-degree burn injury.
15	4,758	Human skin experiences pain with a 3-second exposure and blisters in 6 seconds with second-degree burn injury.
20	6,344	Human skin experiences pain with a 2-second exposure and blisters in 4 seconds with second-degree burn injury.
80	25,377	Heat flux for protective clothing Thermal Protective Performance (TPP) Test.
100	31,720	Steel structure collapse (>30 min exposure) (from [12])

**Tabelle 3: Verletzungskriterien für Menschen durch Wärmeeinwirkung [12]**

Overpressure			Effects or Injuries
psi	kPa	bar	
0.60	4.14	0.04	Threshold for injury from flying glass
1.00-2.00	6.90-13.80	0.070-0.140	Threshold for skin laceration from flying glass
2.40-2.80	16.50-19.30	0.170-0.19	Threshold for eardrum rupture/10% probability of eardrum rupture
2.00-3.00	13.80-20.70	0.140-0.21	Threshold for serious wounds from flying glass
3.00	20.70	0.21	Overpressure will hurl a person to the ground
3.40	23.4	0.23	1% eardrum rupture
4.00-5.00	27.60-34.500	0.28-0.35	Serious wounds from flying glass near 50% probability
5.80	40.00	0.40	Threshold for body-wall penetration from flying glass (bare skin)
6.30	43.40	0.43	50% Probability of eardrum rupture
7.00-8.00	48.30-55.20	0.48-0.55	Serious wounds from flying glass near 100% probability
10.00	68.95	0.69	Threshold for lung hemorrhage
14.50	99.97	1.00	Fatality threshold for direct blast effects
16.00	110.30	1.10	50% eardrum rupture
17.50	120.70	1.21	10% probability of fatality from direct blast effects
20.50	141.30	1.41	50% probability of fatality from direct blast effects
25.50	175.80	1.76	90% Probability of fatality from direct blast effects
27.00	186.20	1.86	1% mortality
29	199.9	2.00	99% Probability of fatality from direct blast effects

**Tabelle 4: Verletzungskriterien für Menschen durch mechanische Einwirkung (Druckwelle) [12]**

Temperature		Effects or Injuries
Celsius (°C)	Fahrenheit (°F)	
37.0	98.6	Average normal human oral/body temperature
38	101	Typical body core temperature for a working fire fighter
43	109	Human body core temperature that may cause death
44	111	Human skin temperature when pain is felt
48	118	Human skin temperature causing a first-degree burn injury
54	130	Hot water causes a scald burn injury with 30 second exposure
55	121	Human skin temperature with blistering and second degree burn injury
62	140	Temperature when burned human tissue becomes numb
72	162	Human skin temperature at which tissue is instantly destroyed
100	212	Temperature when water boils and produces steam
250	482	Temperature when charring of natural cotton begins
>300	>572	Modern synthetic protective clothing fabrics begin to char
≥400	≥752	Temperature of gases at the beginning of room flashover
≈1000	≈1832	Temperature inside a room undergoing flashover

**Tabelle 5: Verletzungskriterien für Menschen durch Temperatureinwirkung [12]**

Die zusammengefassten Untersuchungen inkludierten Experimente, numerische und analytische Berechnungen wie auch Risikoanalysen.

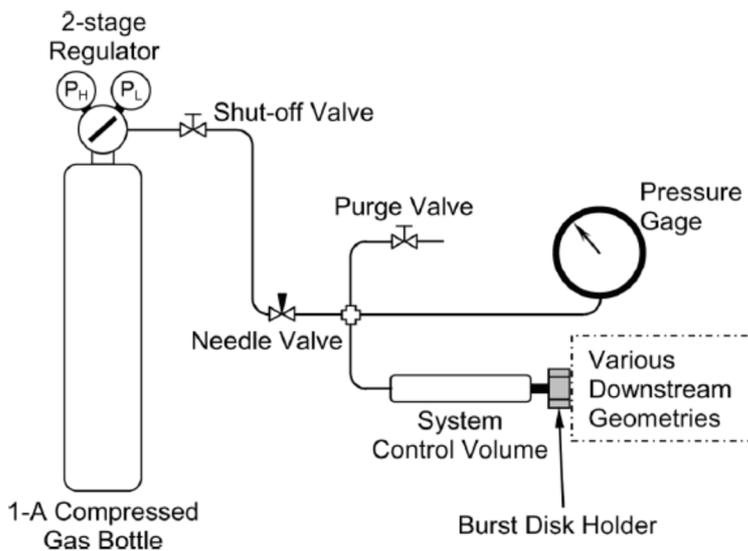
#### Experimente:

Die angeführten Experimente umfassen die spontane Entzündung bei der Freisetzung von druckgespeichertem Wasserstoff in die Umgebung, Deflagrations- und Detonationsversuche, H<sub>2</sub>-Freisetzung in Tunnelanlagen, skalierte Tests sowie in-situ Versuche in Tunnelanlagen zu Brand- und Explosionsszenarien. Zudem wurden weitere Experimente zu Gas Cloud Explosions durchgeführt. Bei diesen wurde jedoch Methan anstelle von Wasserstoff eingesetzt.

Generell ist an dieser Stelle anzumerken, dass die durchgeführten Untersuchungen vielmehr Grundlagenuntersuchungen darstellen, die vielmehr darauf abzielten, allgemeine Zusammenhänge zu erkennen, als reale Ereignisszenarien im Tunnel abzubilden. So wurden in einigen Fällen Wasserstoffmengen eingesetzt, die deutlich über den in einem üblichen Tank vorhandenen Mengen lagen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen lassen somit keine direkte Übertragung auf reale Tunnelverhältnisse zu.

#### Entzündung bei der Freisetzung von druckgespeichertem Wasserstoff in die Umgebung

In Summe wurden über 200 Versuche zur Entzündung bei der Freisetzung von druckgespeichertem Wasserstoff in die Umgebung durchgeführt. Hierbei wurden unter anderem das H<sub>2</sub>-Druckniveau im Bereich von 11,2 bis 113,25 atm (11,35 – 114,7 bar) sowie die Geometrie der Freisetzungsöffnung variiert. Die Experimente zeigten, dass eine Freisetzung bei relevanten Druckbereichen zuverlässig zu einer Entzündung des freigesetzten Wasserstoffs und zur Entstehung einer H<sub>2</sub>-Jetflame führen. Abbildung 14 zeigt den schematischen Aufbau der Experimentreihe.



**Abbildung 14: Setup der Experimente zur Untersuchung der Entzündung von druckgespeichertem H<sub>2</sub> bei Freisetzung an die Umgebung [12]**

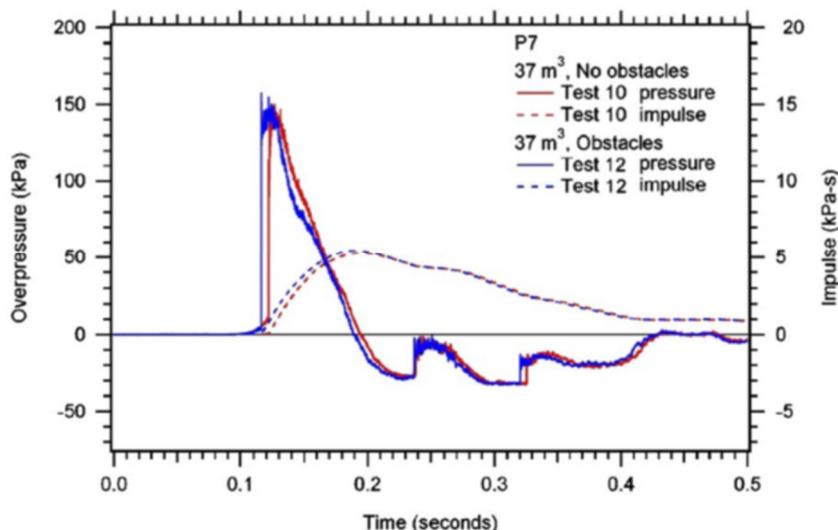
Neben solchen Komponententests, wurden auch Deflagrations- und Detonationsversuche in einem skalierten (Maßstab 1:5) Tunnel durchgeführt [13]. Bei diesen Experimenten wurden unterschiedliche Mengen an H<sub>2</sub> freigesetzt und der Einfluss einer Verdünnung des H<sub>2</sub> mit Hilfe einer Lüftung untersucht. Um die Freisetzung aus einem H<sub>2</sub> Tank respektive eines Transportbehälters zu simulieren, wurde ein Wasserstoff-Luftgemisch mit einem H<sub>2</sub> Volumenanteil von 9,5 – 30% (0,32 kg – 1 kg), in einem durch Barrieren vom restlichen Tunnel separierten Bereich, erzeugt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass diese H<sub>2</sub> Mengen bei einer Hochskalierung in einen 1:1 Maßstab, höher sind als sie bei einer Freisetzung aus einem H<sub>2</sub> Tank eines PKW zu erwarten sind. Zudem liegt die künstlich erzeugte Zusammensetzung mit H<sub>2</sub> Anteil bis zu 30Vol% deutlich über dem in einem realen Tunnel zu erwartenden Wert. Abbildung 15 zeigt den 78,5 m langen Testtunnel, der im Maßstab 1:5 aufgebaut wurde.. Bei diesen Experimenten wurden unterschiedliche Mengen

an H<sub>2</sub> freigesetzt und der Einfluss einer Verdünnung des H<sub>2</sub> mit Hilfe einer Lüftung untersucht. Um die Freisetzung aus einem H<sub>2</sub> Tank respektive eines Transportbehälters zu simulieren, wurde ein Wasserstoff-Luftgemisch mit einem H<sub>2</sub> Volumenanteil von 9,5 – 30% (0,32 kg – 1 kg), in einem durch Barrieren vom restlichen Tunnel separierten Bereich, erzeugt. An dieser Stelle ist anzumerken, dass diese H<sub>2</sub> Mengen bei einer Hochskalierung in einen 1:1 Maßstab, höher sind als sie bei einer Freisetzung aus einem H<sub>2</sub> Tank eines PKW zu erwarten sind. Zudem liegt die künstlich erzeugte Zusammensetzung mit H<sub>2</sub> Anteil bis zu 30Vol% deutlich über dem in einem realen Tunnel zu erwartenden Wert. Abbildung 15 zeigt den 78,5 m langen Testtunnel, der im Maßstab 1:5 aufgebaut wurde. Die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihe zeigten, dass die bei einem Volumenanteil von 9,5Vol% Wasserstoff erzeugten Druckwellen als nicht relevant eingestuft werden konnten. Dies wird dadurch bekräftigt, dass mit der verbauten Sensorik keine nennenswerten Druckauschläge aufgezeichnet werden konnten. Ab einem H<sub>2</sub> Volumenanteil von 20Vol% konnten für die menschliche Gesundheit relevante Druckwerte gemessen werden. Diese betragen 35 kPa (bei 20Vol%) bis 150 kPa (bei 30Vol%). Bei einem Abgleich mit den Kriterien aus Tabelle 4 kann davon ausgegangen werden, dass es zu Verletzungen durch zersplittertes Glas, Schädigungen des Trommelfells bis hin zu einer 50% Wahrscheinlichkeit für Todesfolgen (150 kPa) kommt. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die gemessenen Druckspitzen die Folgen der freigesetzten H<sub>2</sub> Mengen sind. Da diese als unverhältnismäßig hoch eingestuft werden können, ist auch bei den auftretenden Druckwerten davon auszugehen, dass diese in einem realen Tunnel-Ereignis niedriger ausfallen dürften. Die Autoren bestätigen diese Aussage mit dem Hinweis, dass weitere Versuche notwendig sind, um Aussagen über die Verhältnisse in Tunnelanlagen im realen (1:1) Maßstab tätigen zu können.



**Abbildung 15: Versuchstunnel im Maßstab 1:5 zur Durchführung von Deflagrations- und Detonationsversuchen [13]**

Abbildung 16 zeigt den gemessenen Druckverlauf bei einer Detonation ausgehend von einem Wasserstoff Volumenanteil von 30Vol%. Der mit blauer Linie dargestellte Verlauf entspricht den gemessenen Druckwerten bei freiem Tunnelquerschnitt. Im Vergleich dazu zeigt die rot eingezeichnete Linie die Ergebnisse eines mit selben Randbedingungen durchgeführten Experiments bei dem zusätzlich Hindernisse (Holzkisten) im Tunnel platziert wurden, die im Tunnel stehende Fahrzeuge nachbildeten.



**Abbildung 16: Verlauf des Überdrucks während eines Explosionsversuchs im Testtunnel [13]**

H<sub>2</sub> Ausbreitung und Deflagration

Neben experimentellen Untersuchungen gab es ebenfalls schon Bemühungen Wasserstoff-Ereignisse im Tunnel, mit Hilfe von numerischen Simulationen näher zu untersuchen. Ein großes Problem hierbei stellt die Validität der Modelle und somit der Ergebnisse dar. Aus diesem Grund führten [14] Experimente zum Ausbreitungs- und Deflagrationsverhalten von Wasserstoff in skalierten Modell-Tunnelanlagen durch. Hierbei wurde die  $H_2$  Masse, die Freisetzungsrate, der Tankdruck sowie der TPRD Durchmesser ebenfalls skaliert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in einem Vergleich zwischen Experiment und Simulation in Abbildung 17 dargestellt. Auf der linken Seite von Abbildung 17 sind die gemessenen und berechneten  $H_2$  Konzentrationen für ausgewählte Monitorpunkte im Tunnel dargestellt. Die Autoren zeigen sich zufrieden mit den Ergebnissen der Simulation, da das allgemeine Konzentrationsniveau mit den gewählten Modellen gut approximiert wurde. Ähnliche Schlüsse wurden für den Vergleich der gemessenen und berechneten Druckspitzen (rechts in Abbildung 17) gezogen. Hierbei sei jedoch erwähnt, dass die gemessenen Werte einer gewissen Streuung unterliegen. Allgemein muss auch erwähnt werden, dass die erzielten Wasserstoff-Konzentrationen nochmals deutlich über jenen von [13] liegen und somit keine direkten Rückschlüsse auf Ereignisse im realen Tunnel gemacht werden können.

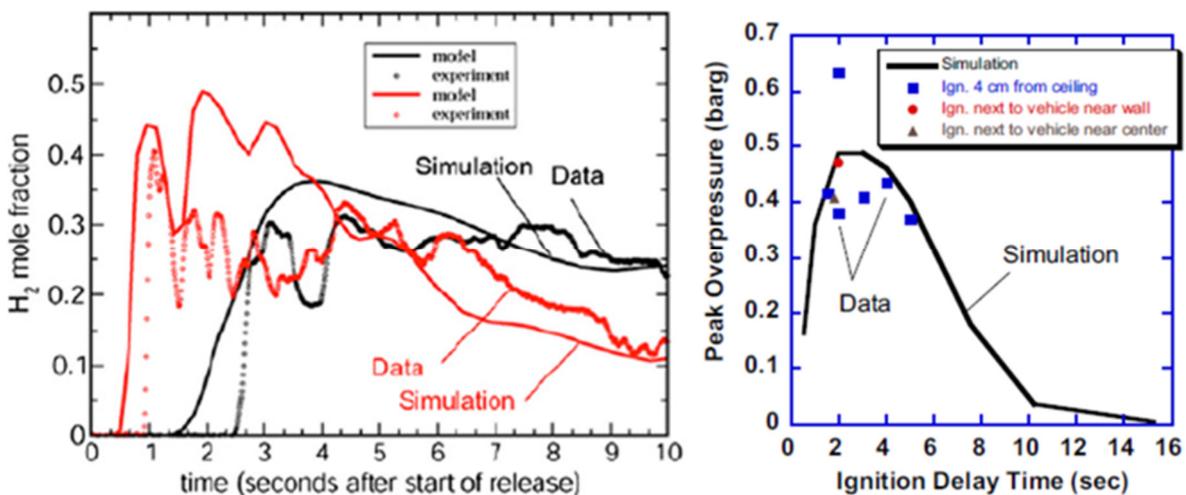
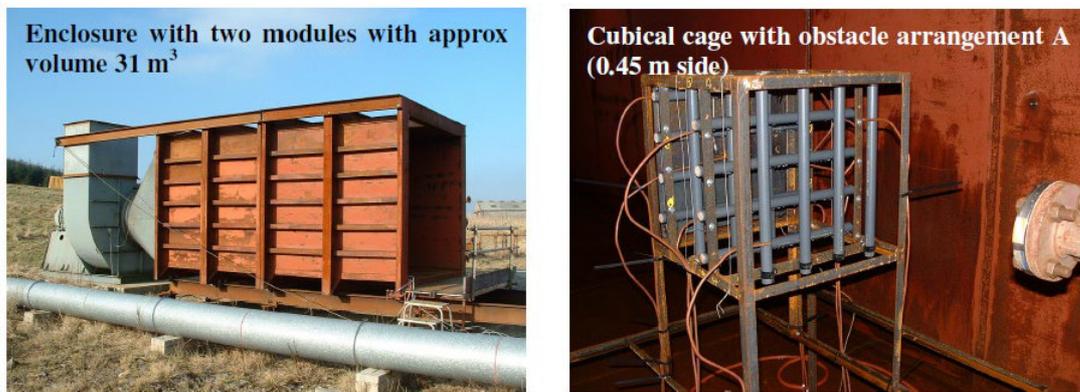


Abbildung 17: Vergleich der Ergebnisse von Experimenten und Simulation aus Validierungsversuchen [14]; links -  $H_2$  Volumenanteile, rechts – Druckverläufe

## Flammenausbreitung, Druckwellen

Im HyTunnel Projekt von [15] (nicht zu verwechseln mit HyTunnel-CS) wurden umfangreiche Grundlagenuntersuchungen zum Brand- und Explosionsverhalten von Wasserstoff durchgeführt.

Teile dieser Untersuchungen wurden in einem Versuchscontainer, der mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgestattet ist, durchgeführt. Der prinzipielle Aufbau dieses Containers sowie die Versuchsanordnung im Inneren sind in Abbildung 18 dargestellt. Diese Versuchsanordnung bestand aus einer Wasserstoff-Regelstrecke, über die der Wasserstoff für die Versuchsdurchführung bereitgestellt wurde. Die Regelung erlaubte eine Variation der Freisetzungsrates im Bereich von 1,5 bis 4 g/s. Der Wasserstoff wurde in ein Rohrbündel freigesetzt, welches in zwei unterschiedlichen Konfigurationen (Konfiguration A und B) aufgebaut wurde. Konfiguration A war durch eine Anordnung von 4 Röhren in drei hintereinander aufgebauten Ebenen definiert. Im Vergleich dazu wurde Konfiguration B durch das zusätzliche Anbringen einer weiteren Röhre in jeder dieser Ebenen erreicht. Mit diesen beiden Anordnungen, konnte der Einfluss von beengten Verhältnissen auf die auftretenden Druckspitzen untersucht werden.



**Abbildung 18: Versuchsaufbau für Grundlagenuntersuchungen zum Brand- und Explosionsverhalten von Wasserstoff [15]**

Hydrogen Release Rate	Air Velocity	Congestion Configuration	Overpressure from Transducer (mbar)		
			Enclosure Left-Hand Wall	Congested Volume Cage Wall Center	Enclosure Right-Hand Wall
1.5 g/s	1 m/s	A	28.2	124.2	63.5
		B	16.2	63.4	19.6
	2 m/s	A	13.6	66.6	12.6
		B	8.8	20.6	7.5
	4 m/s	A	12.1	39.5	10.5
		B	6	13.1	5
2.0 g/s	1 m/s	A	32.4	123.3	55.4
		B	27.5	106	46.6
	2 m/s	A	23.2	117.7	39.6
		B	25.7	66.3	46.6
	4 m/s	A	14.1	53.6	14.7
		B	39.4	25.4	28.9
4.0 g/s	1 m/s	A	48.9	255.8	71.2
		B	48.5	136.9	91.7
	2 m/s	A	37.3	222.5	66
		B	48.1	196.4	85.8
	4 m/s	A	26	160.4	39.2
		B	28.9	126.2	51.2

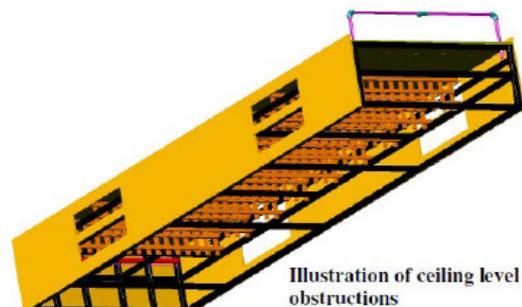
**Tabelle 6: Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen im Versuchscontainer [15]**

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 6 gezeigt. Diese Ergebnisse umfassen die gemessenen Druckwerte zentral im Rohrbündel sowie am Rande der Rohrbündel für 18 unterschiedliche Versuche, die sich durch die Variation der Frischluftströmung, die H<sub>2</sub> Freisetzungsrates sowie durch die Wahl der Konfiguration des Rohrbündels ergeben. Hierbei zeigte sich, dass eine Erhöhung der H<sub>2</sub>-Freisetzungsrates sowie eine Reduzierung der Frischluftströmung natürlich zu höheren H<sub>2</sub> Volumenanteilen und somit zu höheren Explosionsdrücken führten. Zudem zeigt der Vergleich der Ergebnisse für die beiden Konfigurationen des Rohrbündels, dass eine engere Anordnung zu um bis zu 100% höheren Druckspitzen führte.

### Gas Cloud Explosions

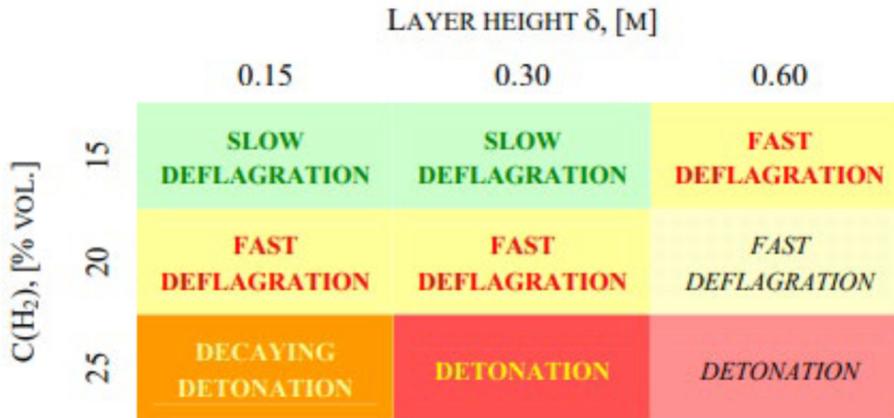
[16] untersuchten die Explosion einer Wasserstoffwolke sowie den Einfluss der maßgebenden Parameter in einer tunnelähnlichen Umgebung. Hierfür wurde ein geeigneter Aufbau erstellt, der die Ausbildung von Wasserstoffwolken mit unterschiedlichen

Schichtdicken zulässt. Abbildung 19 zeigt diesen Aufbau im Versuchsstollen in Karlsruhe. Neben einer Abschirmung gegenüber dem restlichen Tunnelvolumen, wurden zusätzliche Hindernisse verbaut. Die bei den Experimenten erzeugten Wasserstoff-Konzentrationen reichten von 15 bis 25Vol%. Die Versuche ohne zusätzliche Hindernisse führten zu langsameren Flammgeschwindigkeiten (Deflagrationen). Im Vergleich dazu bewirkten die Hindernisse eine zusätzliche Verwirbelung, wodurch die entstehenden Explosionen durch deutlich höhere Flammgeschwindigkeiten und Druckstöße (Detonationen) begünstigt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gestaltung der Tunneldecken einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbildung einer Wasserstoffwolke und damit einhergehend, auf das Explosionsszenario hat.



**Abbildung 19: Versuchsanordnung zur Untersuchung von Gas Cloud Explosions [16]**

Die in Abbildung 20 dargestellte qualitative Ergebnismatrix zeigt die Abhängigkeit des Explosionsszenarios von der Wasserstoff-Konzentration respektive der Schichtdicke der Wasserstoffwolke. Generell kann davon ausgegangen werden, dass höhere Schichtdicken sowie eine höhere Wasserstoffkonzentration zu einer höheren Wahrscheinlichkeit einer Detonation führen.

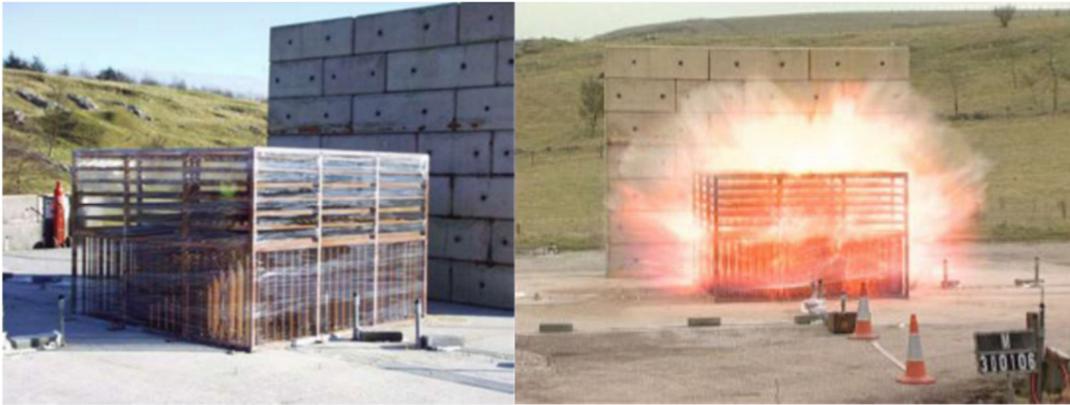


**Abbildung 20: Ergebnismatrix zu den Gas Cloud Explosion Szenarien [16]**

Gas Cloud Explosions im Freien

Vergleichbare Experimente zu Gas Cloud Explosions wurden von [17] durchgeführt. Diese fanden jedoch nicht in einer Tunnelumgebung statt, sondern wurden auf einem Versuchsareal im Freien durchgeführt. Um dennoch den Einfluss einer Barriere untersuchen zu können, wurde auf einer Seite des Versuchsträgers eine Wand errichtet. Abbildung 21 zeigt den Versuchsaufbau, der aus einer Art mit Folie umwickeltem Käfig bestand, welcher die mit Wasserstoff befüllt werden konnte und die Diffusion desselben verhinderte.

Tabelle 7 zeigt repräsentativ die wichtigsten Versuchs- und Umgebungsparameter für die Durchführung der Untersuchung zur Gas Cloud Explosion für den Versuch NatHy\_01. Speziell sei darauf hingewiesen, dass der Inhalt des Versuchsträgers reiner Wasserstoff (100Vol%) war. Die weiteren Versuche unterschieden sich primär durch die Befüllung des Versuchsträgers mit reiner Luft (0Vol% H<sub>2</sub>) oder einem Wasserstoff-Luft Gemisch (25, 51 und 75Vol% H<sub>2</sub>).



**Abbildung 21: Versuchsaufbau zur Untersuchung von Gas Cloud Explosions im Freien [17]**

Measurement	Test Conditions: NatHy_01
Hydrogen (vol. %)	100
Number of Layers	9
Free Volume	17.207
Gas mixture temperature (°C)	11.0
Relative Humidity (%)	30.7
Atmospheric Pressure (kPa)	97.72
Mean Oxygen Concentration (%)	13.59
Partial Oxygen Pressure (kPa)	0.1359
Partial Nitrogen Pressure (kPa)	0.5127
Partial Water Vapor Pressure (kPa)	0.0041
Partial Fuel Gas Pressure (kPa)	0.3474
Mass of Hydrogen (kg)	0.498

**Tabelle 7: Testbedingungen bei der Untersuchung der Gas Cloud Explosion [17]**

Abbildung 21 zeigt die Anordnung der Drucksensoren innerhalb und außerhalb des Versuchsträgers. Hierbei wurden Sensoren in zwei Ausrichtungen appliziert. Einerseits wurde der Druck mit zunehmendem Abstand vom Zentrum des Versuchsträgers sowie der dahinter positionierten Wand gemessen. Andererseits erfolgte die zweite Ausrichtung parallel zur Wand jedoch wiederum mit zunehmendem Abstand zum Zentrum des Käfigs. Ergänzt wurden die Messungen mit Drucksensoren, die direkt auf der Wand angeordnet waren. Die Ergebnisse des Versuchs als gemessene Druckspitzen in Abhängigkeit des

Abstands zum Käfigzentrum sind in Abbildung 22 sowie Abbildung 23 dargestellt. Die Druckverläufe parallel zur Wand zeigen Spitzenwerte von 450 kPa bei einer Explosion von reinem Wasserstoff. Im Vergleich dazu lagen diese lediglich bei 130 kPa für eine steigende Entfernung von der Wand. Dies zeigt, dass die relative Position der Explosionsquelle, von Hindernissen und jene von Personen maßgebende Bedeutung bezogen auf die mechanische Einwirkung auf die Personen hat.

Zudem kann festgehalten werden, dass eine Reduzierung der Wasserstoff-Konzentration deutliche Auswirkung auf die gemessenen Drücke hatte. So lagen die gemessenen Druckspitzen bei einer H<sub>2</sub>-Konzentration von 75Vol% unter 100 kPa und ab einer Konzentration unter 51Vol% im Bereich, für den von keinen gravierenden Verletzungen ausgegangen werden kann. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Experimente im Freien durchgeführt wurden und keine quantitativen Rückschlüsse für ein Explosionsszenario im Tunnel zulässig sind.

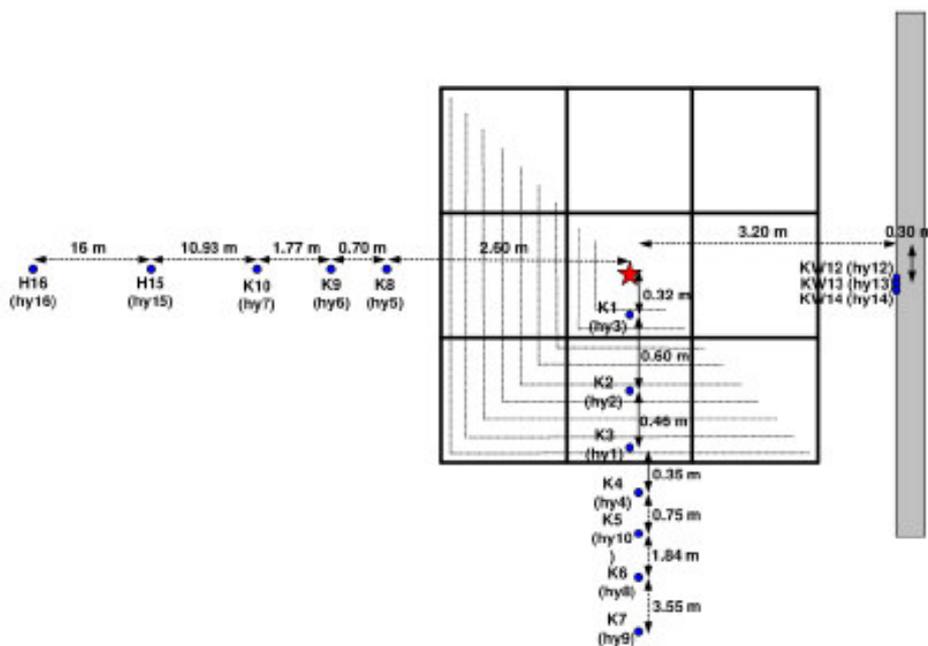


Tabelle 8: Anordnung der Drucksensoren in Relation zum Zentrum des Versuchsträgers (Käfig) [17]

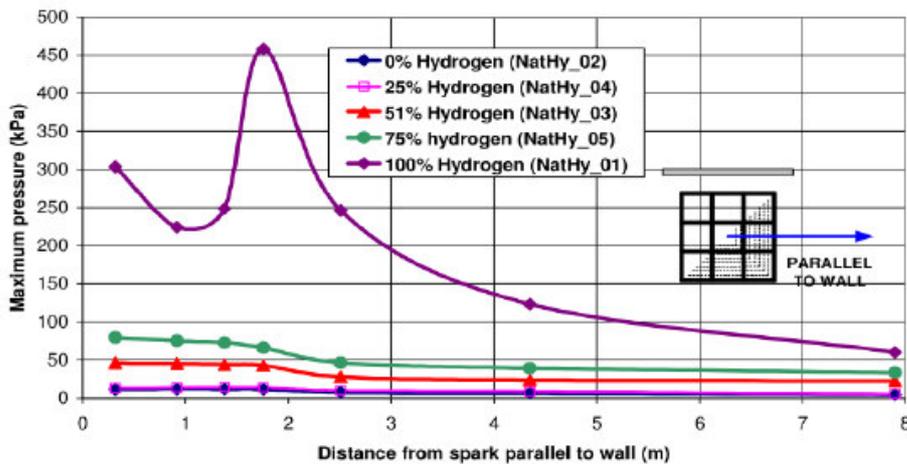


Abbildung 22: Gemessene Druckspitzen mit zunehmendem Abstand zum Versuchsträger und paralleler Ausrichtung zur Wand [17]

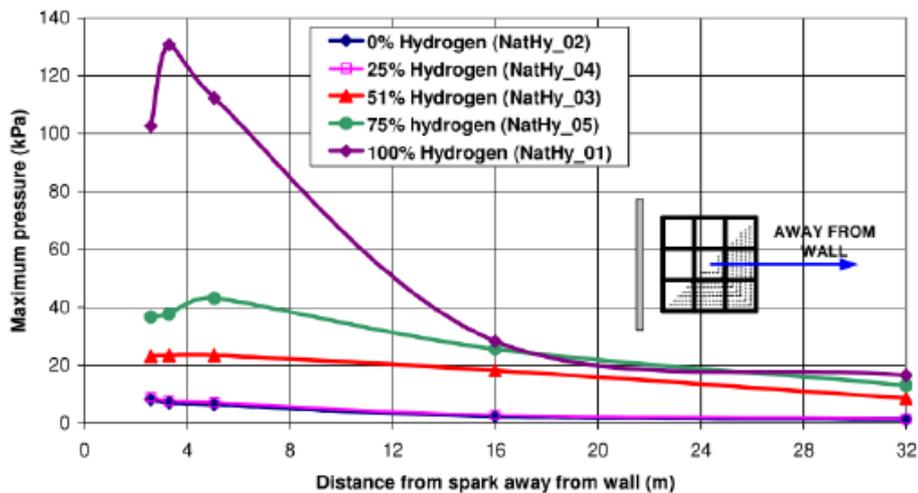
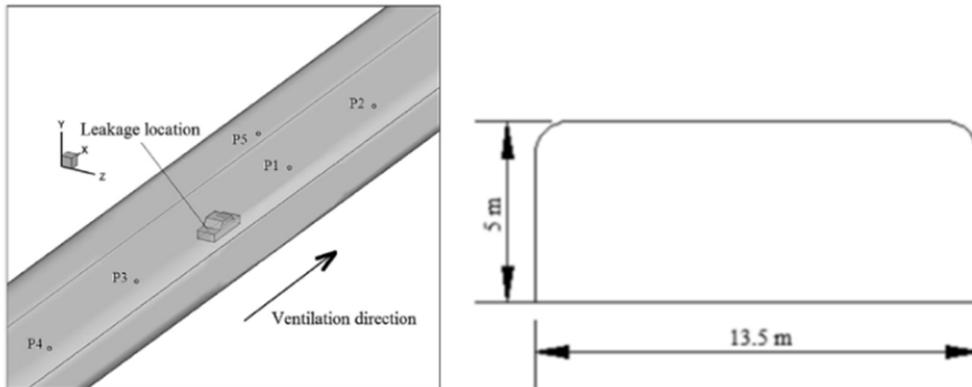


Abbildung 23: Gemessene Druckspitzen mit zunehmendem Abstand zum Versuchsträger und zur Wand [17]

### Numerische und analytische Berechnung

Abschließend sei erwähnt, dass neben den experimentellen Untersuchungen auch numerische Simulationen zu diversen Wasserstoff-Ereignissen im Tunnel durchgeführt wurden. Diese stammen zum überwiegenden Teil aus dem asiatischen Raum und behandeln unterschiedlichste Szenarien (im Freien, in Garagen, etc.). Die meisten der Untersuchungen respektive die darin eingesetzten Modelle wurden nicht validiert, sodass nur sehr schwer eine Aussage über deren Anwendbarkeit getroffen werden kann.

Aus diesem Grund sei an dieser Stelle lediglich eine repräsentative Studie [18] näher erläutert. Diese zielte auf die Untersuchung von Wasserstoff-Freisetzungen sowie die darauf folgende Explosion im Tunnel ab. Die für die numerische Versuchsreihe verwendete Geometrie respektive der berücksichtigte Tunnelquerschnitt sind in Abbildung 24 dargestellt. Hierbei handelte es sich um einen Rechteckquerschnitt mit einer Deckenhöhe von 5 m und einer Breite von 13,5 m.

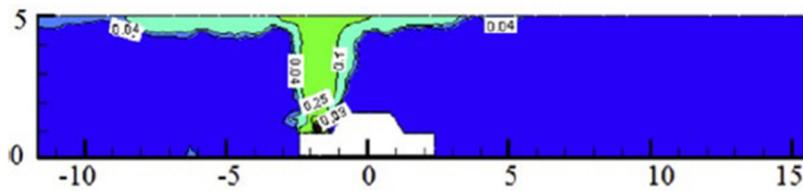


**Abbildung 24: Tunnelgeometrie der numerischen Versuchsreihe zu Wasserstoff-Freisetzungen im Tunnel [18]**

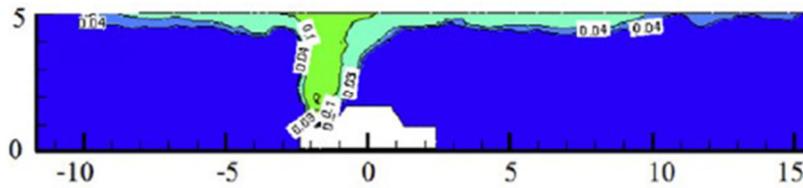
Die bei der Freisetzung von Wasserstoff aus einem PKW Tank auftretenden  $H_2$ -Konzentrationen im Tunnel sind für vier unterschiedliche Luftwechsel (Längsgeschwindigkeiten der Frischluft) in Abbildung 25 dargestellt. Die Konzentrationen lagen in unmittelbarer Nähe zum Ort der Freisetzung (TPRD) bei ca. 25Vol%. Die Konzentrations-Isolinien in Abbildung 25 kennzeichnen den Bereich in dem ein zündfähiges Gemisch ( $>4\text{Vol}\% H_2$ ) mit der Tunnelluft vorliegt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die auftretenden Konzentration mit zunehmendem Luftwechsel reduziert werden können. Eine Verdünnung unter die Zündgrenze ist jedoch bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 6 m/s kaum möglich. Dennoch kann mit einer aktiven Lüftung der Gefahrenbereich verkleinert werden bzw. ab einer Längsströmungsgeschwindigkeit von 6 m/s gänzlich auf die stromab-gelegene Seite der Freisetzung verdrängt werden.

Die bei der Freisetzung von Wasserstoff aus einem PKW Tank auftretenden  $H_2$ -Konzentrationen im Tunnel sind für vier unterschiedliche Luftwechsel (Längsgeschwindigkeiten der Frischluft) in Abbildung 25 dargestellt. Die Konzentrationen lagen in unmittelbarer Nähe zum Ort der Freisetzung (TPRD) bei ca. 25Vol%. Die Konzentrations-Isolinien in Abbildung 25 kennzeichnen den Bereich in dem ein zündfähiges

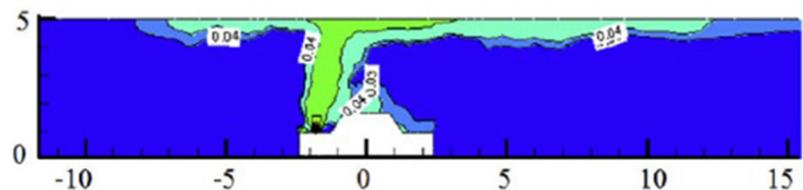
Gemisch ( $>4\text{Vol}\% \text{H}_2$ ) mit der Tunnelluft vorliegt. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die auftretenden Konzentration mit zunehmendem Luftwechsel reduziert werden können. Eine Verdünnung unter die Zündgrenze ist jedoch bis zu einer Strömungsgeschwindigkeit von 6 m/s kaum möglich. Dennoch kann mit einer aktiven Lüftung der Gefahrenbereich verkleinert werden bzw. ab einer Längsströmungsgeschwindigkeit von 6 m/s gänzlich auf die stromab-gelegene Seite der Freisetzung verdrängt werden.



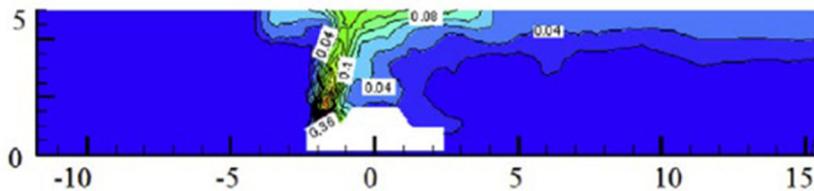
(a) 0 m/s



(b) 1 m/s



(c) 3 m/s



(d) 6m/s

Abbildung 25: Ergebnisse aus numerischen Simulationen einer Wasserstoff-Freisetzung [18]

Die bei einem anschließenden Explosionsszenario im Tunnel entstehenden Druckspitzen sind in Abbildung 26 dargestellt. Hier ist der Vergleich der Druckspitzen bei einer Explosion bei unterschiedlicher Grundströmung zu sehen. An den Positionen P1 und P2, die sich stromabwärts vom Ort der Freisetzung befinden, kann kein nennenswerter Einfluss der Grundströmung festgestellt werden. Das allgemeine Niveau der Druckspitzen liegt im Bereich von 12-14 kPa und damit deutlich unter den Werten aus den Experimenten im Modell-Tunnel. Der Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit der Frischluft, wird bei der Betrachtung der auftretenden Druckspitzen stromaufwärts (Position P3 und P4) zum Ort der Freisetzung ersichtlich. Hier kommt es zu einer signifikanten Reduzierung der Druckspitzen von ca. 25%.

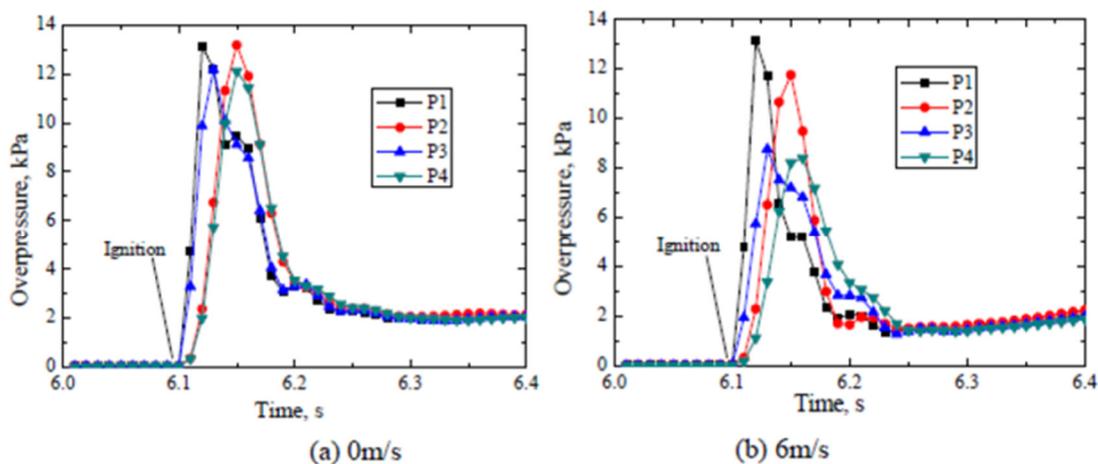


Abbildung 26: Ergebnisse aus numerischen Simulationen zu Explosionsereignissen im Tunnel [18] Grundströmung: links – 0 m/s, rechts – 6 m/s

## 2.1.6. RISE 2021

In Schweden wurden Untersuchungen zur Brandbekämpfung und den Auswirkungen von Ereignisszenarien mit alternativ angetriebenen Fahrzeugen durchgeführt [19]. Diese Untersuchungen umfassten ebenfalls Ereignisse mit Wasserstoff. Auf Grund dessen, dass die Untersuchungen sich auf den Einsatz und die Brandbekämpfung auf Schiffsfähren (Ro-Ro – Roll on roll off) konzentrierte, lassen sich Vergleiche zu Tunnelszenarien nur bedingt herstellen. Daher werden an dieser Stelle nur die wesentlichsten Eckdaten der Untersuchungen beschrieben.

Die Hauptgründe für Brände in RoRo-Räumen sind Kurzschlüsse und defekte Kühleinheiten der PKW respektive LKW. Die Brandentwicklung auf Fähren hängt davon ab wo das Feuer ausbricht, und welche brennbaren Stoffe in der unmittelbaren Umgebung vorhanden sind und durch das Feuer entzündet werden. Einen weiteren wesentlichen Parameter stellt die Lüftungssituation dar, die auf Fähren oftmals durch die Anordnung und die Auslastung der verfügbaren Abstellplätze beeinflusst wird.

RoRo-Räume sind Schiffsräume, auf denen in horizontaler Richtung, beladen/entladen werden kann. Die Fahrzeuge werden dicht aneinander geordnet und die Höhe des Raums unterscheidet sich je nachdem ob sie für PKWs, LKWs oder Busse ausgelegt sind. Die Länge zieht sich meist über die gesamte Länge des Schiffs. In RoRo-Räumen entwickeln sich Brände ähnlich wie in Parkgaragen.

Die Höhe der Räume beeinflusst die Zeit bis zur Erkennung des Brandes. Die Erkennungsmöglichkeiten variieren auch zwischen Schiffen und zwischen verschiedenen Räumen auf demselben Schiff. Der Zeitpunkt der Erkennung bis zu Beginn des Löschvorganges dauert zirka 15 Minuten.

Die Studie aus Schweden fasst die Ergebnisse aus diversen anderen Studien zusammen, um einen Vergleich der Interventionszeit mit den Zeiten bis es zur Aktivierung des TPRDs respektive bis es zu einer Explosion des H<sub>2</sub>-Tanks kommt, anzustellen. Die in [20] angeführten und bei einem Übertritt eines Feuers auf ein Wasserstoff angetriebenes Fahrzeug zu berücksichtigenden kritischen Zeiträume, sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Demnach ist in den beengten Räumen einer Fähre damit zu rechnen, dass binnen 15- bis 120 Minuten das TPRD aktiviert wird. Eine Tankexplosion kann in einem Zeitraum von 15 bis 20 Minuten erfolgen.

Time to tPRD activation (tank tests)	Time to tPRD activation (vehicle fire tests)	Time to tank rupture (tank tests, no tPRD installed)	Time from fire detection to tank rupture (real fire events)
1-15 min	15-120 min	3-20 min	10-20 min

**Tabelle 9: Kritische Zeiträume bis zur Aktivierung des TPRDs respektive bis zur Explosion eines Tanks [20]**

## 2.1.7. INERIS – DRIVE project 2012

Die Ergebnisse aus experimentellen Untersuchungen in Frankreich wurden in [21] veröffentlicht. Hierbei wurden drei wesentliche Gründe für eine Freisetzung von Wasserstoff identifiziert. Diese sind:

- Permeation
- Chronisch durch Fehlfunktion/Montagefehler
- Unfälle – mechanische Einwirkung

Die fehlerbedingte Freisetzung von Wasserstoff wurde hierbei als die kritischste angesehen, da sie als die wahrscheinlichste gilt und zu einer signifikanten Freisetzungsrates führen kann. Brandversuche die sowohl unter realen als auch nachgestellten Bedingungen durchgeführt wurden, zeigten, dass bis zu einem Volumenanteil von 10Vol% Wasserstoff, die Druckauswirkungen einer Explosion moderat bleiben. Diese Konzentrationswerte wurden bei einer Freisetzungsrates von 10 NI/min (Normliter pro Minute) erreicht. Diese beiden Werte wurden vom Projektteam vorgeschlagen, um als Detektionslimits berücksichtigt zu werden.

Zusätzlich wurden im Zuge von DRIVE auch Wasserstoff-Freisetzungsszenarien unter Ausbildung von Jetflames durchgeführt. Hierbei wurde von den Autoren darauf hingewiesen, dass trotz Aktivierung eines TPRDs ein Explosionsszenario nicht ausgeschlossen werden kann. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Studien bereits im Jahr 2012 veröffentlicht wurden, sodass die getesteten Systeme nicht mehr dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

## 2.1.8. Weitere Veröffentlichungen

Hydrogen Jet Fire from a Thermally Activated Pressure Relief Device (TPRD) from Onboard Storage in a Naturally Ventilated Covered Car Park

Wasserstoffstrahlbrände aus einer thermisch aktivierten Druckentlastungsvorrichtung (TPRD) an Bord eines Fahrzeugs in einem natürlich belüfteten überdachten Parkhaus wurden untersucht. Mit Hilfe der numerischen Strömungsmechanik wurde das Verhalten gezündeter Freisetzungen aus einem 700 bar Behälter in einem natürlich belüfteten

überdachten Parkplatz simuliert. Freisetzungen durch TPRD-Durchmesser von 3, 34, 2 und 0,5 mm wurden untersucht, um die Auswirkungen auf die Gefahrenabstände vom Fahrzeug zu verstehen. Es wurden eine vertikale und nach unten gerichtete Freisetzung bei 0°, 30° und 45° für TPRD-Durchmesser von 2 und 0,5 mm betrachtet, wobei das Abblasen des Tanks berücksichtigt wurde. Während die Decke bei einer Freisetzung durch einen TPRD von 2 mm bei einer Neigung von 0°, 30° oder 45° von einem Strahl mit einer Temperatur von über 300°C erreicht wird, führte eine gezündete Freisetzung durch einen TPRD von 0,5 mm und einem Winkel von 45° beim Abblasen nicht zu einer Wolke mit einer Temperatur von über 300°C an der Decke. Die Forschungsergebnisse, insbesondere in Bezug auf das Ausmaß der Heißgaswolke, haben Auswirkungen auf die Auslegung mechanischer Lüftungssysteme. In Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 sind einige Ergebnisse der angeführten Studie grafisch dargestellt [22]. Es wurde festgestellt, dass die abwärts gerichtete Freisetzung in einem Winkel von 30° und 45° zur vertikalen Achse für TPRD = 0,5 mm im Vergleich zu TPRD = 2 mm inhärent sicherer ist. Daher kann vorgeschlagen werden, dass innovative TPRD-Designs mit kleinerem Durchmesser experimentell weiter untersucht werden sollten, um die durch die rechnerische Wasserstoffsicherheitstechnik ermittelte Verringerung der Gefahrenabstände zu bestätigen, und ein inhärent sichereres Parken von Wasserstofffahrzeugen in überdachten und unterirdischen Strukturen zu ermöglichen, ohne neue Gefahren und damit verbundene Risiken einzuführen. Auf der Grundlage dieser Studie wird empfohlen, den TPRD-Durchmesser auf einen Bruchteil eines Millimeters zu reduzieren und die Freisetzungen in einem Winkel senkrecht nach unten vorzunehmen, wenn Wasserstofffahrzeuge in überdachten und unterirdischen Parkhäusern eingesetzt werden [22].

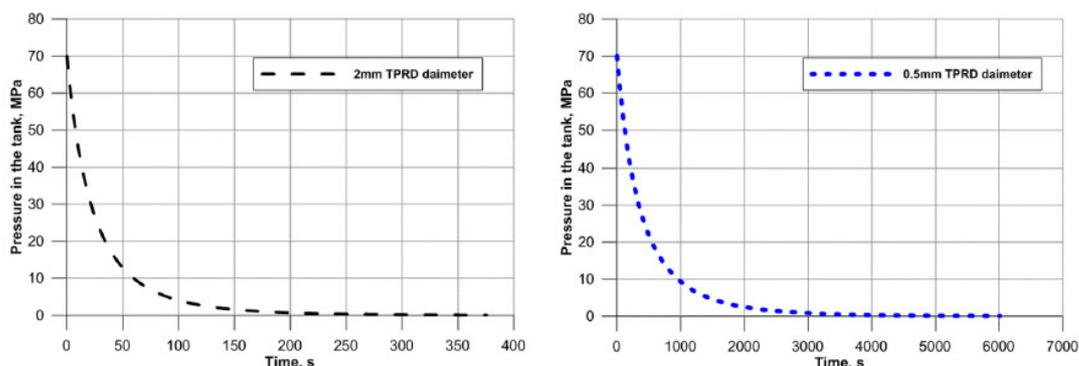


Abbildung 27: Druckdynamik beim adiabatischen Abblasen aus einem 117-Liter-Tank mit 70 MPa für TPRD mit 2 mm (links) und 0,5 mm Durchmesser [22]

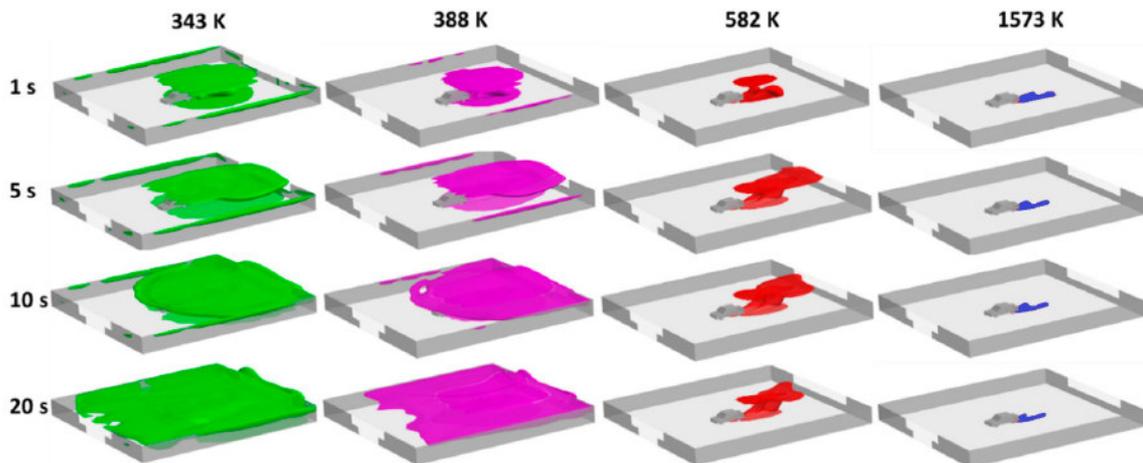


Abbildung 28: Temperatur-Isoflächen mit den Grenzwerten für Unschädlichkeit (343 K), Schmerz (388 K), Tod (582 K) und Temperatur der sichtbaren Flamme (1573 K) für die gezündete Wasserstofffreisetzung in Fall 6 (TPRD = 2 mm, 45°-Winkel nach hinten unten) [22]

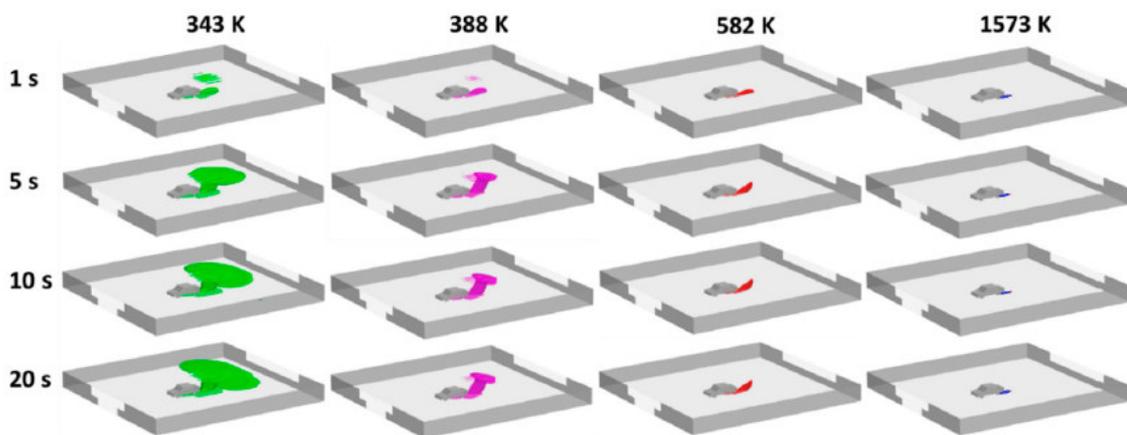


Abbildung 29: Temperatur-Isoflächen mit den Grenzwerten für Unschädlichkeit (343 K), Schmerz (388 K), Tod (582 K) und Temperatur der sichtbaren Flamme (1573 K) für die gezündete Wasserstofffreisetzung in Fall 11 (TPRD = 0,5 mm, 45°-Winkel nach hinten unten) [22]

### Sonstige Untersuchungen

An dieser Stelle sei erwähnt, dass eine Vielzahl an Publikationen zu sicherheitsrelevanten Themen in Bezug auf die Wasserstoff-Technologie existiert. Unter Berücksichtigung einer beengten Umgebung (Tunnel) reduziert sich diese Anzahl jedoch bereits drastisch. Der

Großteil der verfügbaren Publikationen, die auch dieses Kriterium erfüllen, basiert auf numerischen Simulationen über deren Validierung keine Informationen vorliegen, sodass die Aussagekraft der Ergebnisse nicht beurteilt werden kann. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf eine Erläuterung der entsprechenden Untersuchungen verzichtet.

## 2.2. Stand der Technik – Wasserstoff Fahrzeuge

In der Fahrzeugtechnik können zwei Antriebsarten bzw. Hybride daraus unterschieden werden: Verbrennungskraft-Antrieb und Elektroantrieb.

In einer Verbrennungskraftmaschine (VKM) wird chemische Energie in mechanische Energie umgewandelt. Eine Vielzahl an gasförmigen und flüssigen Kraftstoffen können eingesetzt werden. Konventionelle VKMs können durch Änderungen am Gemischbildungssystem, Brennverfahren etc. für ausschließlichen oder bivalenten Betrieb mit Wasserstoff oder wasserstoffreichen Gasen oder Flüssigkeiten adaptiert werden.

In Brennstoffzellen wird die im Brennstoff gespeicherte Energie durch Reaktion mit Sauerstoff in elektrische Energie umgewandelt. Die Reaktionskomponenten werden im Gegensatz zu Batterien kontinuierlich von außen zugeführt. In Abhängigkeit des Brennstoffzellentyps kommen verschiedene Brennstoffe, z. B. Wasserstoff, Methanol oder Erdgas zur Anwendung. Der Brennstoff dient als Reduktionsmittel der Redoxreaktion. Das Oxidationsmittel ist meist Sauerstoff aus der Umgebungsluft. Aufgrund der hohen Anforderungen in Fahrzügen hinsichtlich Dynamik, Leistungsdichte und Wirkungsgrad wird überwiegend die PEM-Brennstoffzelle (Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle) mit reinem Wasserstoff als Brennstoff eingesetzt.

### 2.2.1. Wasserstoff

Wasserstoff ist mit einer Häufigkeit von über 90% das mit Abstand am häufigsten im Universum vorkommende Element. Da Wasserstoff auf der Erde in seiner reinen Form nicht vorkommt, muss er unter Einsatz von Energie hergestellt werden. Dazu sind verschiedene Verfahren im Einsatz, die unterschiedliche Primärenergieträger und Wasserstoffverbindungen nutzen, wobei der Wirkungsgrad und die Emission von Kohlendioxid wichtige Beurteilungskriterien darstellen [22].

Die Wasserstoffgewinnung aus fossilen Energieträgern ist derzeit wirtschaftlicher als die Herstellung von Wasserstoff mittels Wasserelektrolyse. Wasserstoff wird weltweit zu 99 % aus fossilen Energieträgern, z.B. mittels Dampfreformierung aus Erdgas, hergestellt, dabei entstehen erhebliche CO<sub>2</sub> Emissionen [23]. Er kann aber auch mittels Wasserelektrolyse (Zerlegung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff mit Hilfe von elektrischem Strom)

hergestellt werden. Wird der verwendete Strom aus erneuerbaren Quellen bezogen, so wird der Wasserstoff als grün bezeichnet.

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff stellen bei der Speicherung eine Herausforderung dar. Die gängigsten Formen der Wasserstoffspeicherung für mobile Anwendungen sind komprimierter gasförmiger Wasserstoff in Druckbehältern und flüssiger Wasserstoff in kryogenen Tanks. Andere Möglichkeiten sind hybride Speichermethoden oder Wasserstoff in physikalischen oder chemischen Bindungen, die noch einen niedrigen technologischen Reifegrad aufweisen.

## 2.2.2. FCEV – Antriebsstrang

Der Antriebsstrang von FCEVs besteht aus Wasserstofftank (Energiespeicher), Batterie (Energiespeicher und -wandler), Brennstoffzelle (Energiewandler), mehreren Spannungswandlern, Elektromotor, Getriebe und mechanischem Antrieb der Räder, siehe Abbildung 30. Damit stellen FCEVs Elektro-Wasserstoff-Hybride dar. Die Ausführungen des Antriebsstrangs werden nach der hauptsächlichen Bereitstellung der Antriebsenergie meist in den dominanten Brennstoffzellenantrieb und den Range Extender Antrieb unterteilt.

Beim dominanten Brennstoffzellenantrieb wird der Fahrleistungsbedarf mit der Brennstoffzelle gedeckt, die Batterie dient ausschließlich der Rekuperation von Bremsenergie beim Verzögern und der Leistungsunterstützung beim Beschleunigen. Bei PKW ist die Brennstoffzelle daher sehr leistungsstark (100 bis 150 kW), die Batterie üblicherweise mit hoher Leistungsdichte und geringer Kapazität (1 bis 2 kWh) und der Wasserstoffbehälter als Hochdrucktank mit mehreren Kilogramm H<sub>2</sub> (5 bis 6 kg) zur Erzielung von Reichweiten bis zu 600 km ausgeführt. Die Energiezufuhr erfolgt durch die Betankung von Wasserstoff.

Beim Range Extender Antrieb wird der Fahrleistungsbedarf mit der Batterie gedeckt, die Brennstoffzelle dient der Ladung der Batterie während des Fahrbetriebs und verlängert somit die Reichweite des Fahrzeugs. Range Extender PKWs weisen gewöhnlich eine Batterie mit geringerer Leistungsdichte und hoher Kapazität, eine Brennstoffzelle mit geringer Leistung (20 bis 30 kW) und einen kleinvolumigen Wasserstoffbehälter auf. Bei Range Extender Antrieben bietet sich auf Grund der größeren Batterie die Ausführung als

Plug-In an, das heißt, dass die Energiezufuhr des Fahrzeugs zusätzlich zur Wasserstoffbetankung mittels Ladung der Batterie über das Stromnetz erfolgt. Mischformen der beiden Varianten sind möglich, diese werden auch als „mid-size fuel cell“ Konzept bezeichnet [22].

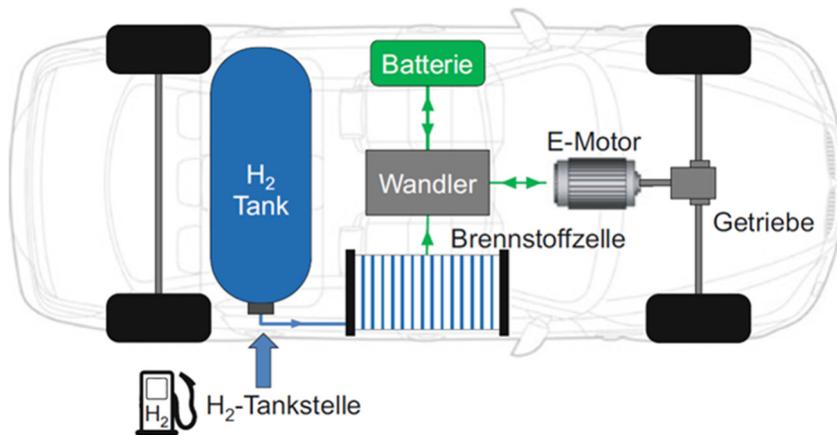


Abbildung 30: Antriebsstrang eines FCEV [22]

Ausgeführte Fahrzeuge der Hersteller Hyundai, Toyota, Honda und Mercedes sind in der folgenden Abbildung 31 dargestellt.



Hyundai Nexo



Toyota Mirai II



Honda Clarity FC



Mercedes GLC F-Cell



Hyundai Xcient Fuel Cell

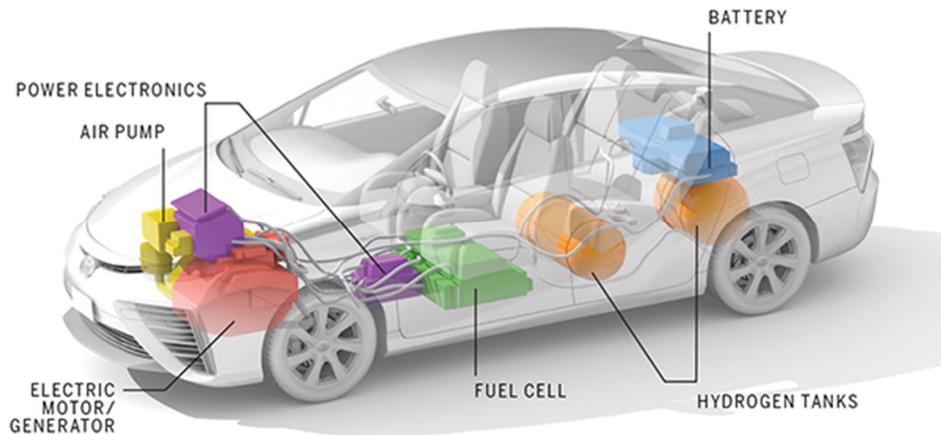


Mercedes Citaro FuelCell

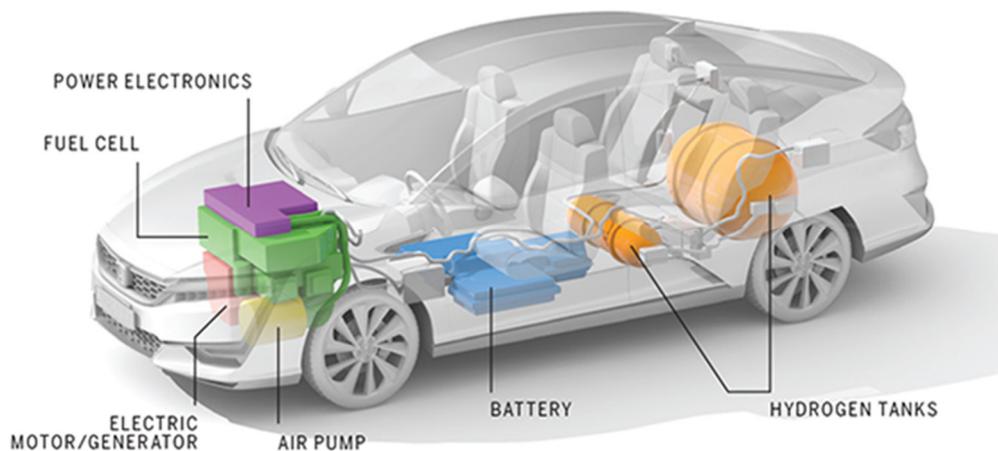
Abbildung 31: Übersicht von FCEV Serienfahrzeugen

PKW – Personenkraftwagen

Abbildung 32 und Abbildung 33 geben einen Überblick der Komponenten eines FCEV Antriebsstrangs. Beim Toyota Mirai ist die BZ im Unterboden und die Batterie im Heck positioniert, beim Honda Clarity ist das gesamte BZS im Motorraum und die Batterie im Unterboden integriert. Bei den meisten FCEV-Modellen befinden sich die Wasserstoffbehälter im hinteren Teil des Fahrzeugs über der Hinterradachse.



**Abbildung 32: Antriebsstrang und H2-Speichersystem des Honda Clarity FCEV [24]**



**Abbildung 33: Antriebsstrang und H2-Speichersystem des Toyota Mirai [24]**

In der Brennstoffzelle reagiert der mitgeführte H<sub>2</sub> zusammen mit Sauerstoff aus der Umgebungsluft zu elektrischer Energie und Wasser. Sie arbeitet bei einer Betriebstemperatur von etwa 80 °C, einziges Abgas ist feuchte Luft mit reinem Wasser. Eine kleine Batterie (1-2 kWh) dient bei brennstoffzellendominanten Antriebssträngen zur Unterstützung bei Beschleunigung und zur Rekuperation von Bremsenergie. Der

Energieträger H<sub>2</sub> wird üblicherweise bei hohem Druck (350 bzw. 700 bar) in einem Tank gasförmig gespeichert. Bei PKWs können mit rund 6,5 kg Wasserstoff Reichweiten bis zu 750 km erreicht werden. Auch bei niedrigen Temperaturen bleiben Leistung und Reichweite annähernd konstant.

Die repräsentativsten BZ-Fahrzeuge sind in der folgenden Tabelle 10 aufgeführt.

FC fuel	-	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Hydrogen	Ethanol	Methanol
FC type	-	PEM	PEM	PEM	PEM	PEM	PEM	PEM	PEM	PEM	SOFC	HT-PEM
OEM	Unit	Toyota	Honda	Hyundai	Mercedes	Mercedes	Audi	BMW	Riversimple	Renault	Nissan	Gumpert
Model	-	Mirai (JPD20)	Clarity	Nexo	B-Class F-Cell	GLC F-Cell	H-Tron Quattro	i Hydrogen NEXT SUV	Rasa	Kangoo ZE 33 H2	e-NV200 e-Bio FC	Nathalie
Maturity	-	Comm. avail.	Comm. avail.	Comm. avail.	Discontinued	Demo fleet	Concept	Testing	Demo fleet	Comm. avail.	Demo fleet	Comm. avail.
First delivered	Year	2020	2016	2018	2010	2018	On hold	2022 (Demo)	2014	2015	2017	2020
Length	m	4.975	4.895	4.670	3.840	4.656	4.880	4.922	3.673	4.282	4.400	4.310
Mass	kg	1,950	1,875	1,873	1,809	2,050	n/A	n/A	580	1,736	n/A	1,800
H2/Fuel Storage	kg	5.6	5.5	6.3	3.7	4.4	6.0	6.0	1.5	1.78	30 liters	65 liters
Number of tanks	#	3	2	3	3	2	3	2	1	1	1	1
Tank pressure	bar	700	700	700	700	700	700	700	350	350	1	1
Range	km	650* (EPA) 710 (WLTP)	580* (EPA) 650 (NEDC) 750 (JC08)	610* (EPA) 750 (NEDC) 660 (WLTP)	400 (NEDC)	437km H2 + 50km Electric (NEDC)	600 (NEDC)	n/A	480 (NEDC)	370 (WLTP)	600 (WLTP)	820 (NEDC)
Consumption	kg/100km	0.86* (EPA) -- (NEDC) 0.79 (WLTP)	0.94* (EPA) -- (NEDC) 0.85 (WLTP)	1.04* (EPA) 0.84 (NEDC) 0.95 (WLTP)	0.97 (NEDC)	0.91 (NEDC)	1.0 (NEDC)	n/A	0.3 (NEDC)	0.9 (WLTP)	n/A	n/A
FC power	kWe	128	103	95	80	75	110	125	8.5	5.0	5.0	15
FC efficiency	%	n/A	n/A	60.3	n/A	n/A	60	n/A	50	n/A	60	45
Battery capacity	kWh	1.24	1.70	1.56	1.40	9.30	8.8 (est.)	n/A	0.53	22	24	60
Battery power	kW	31.5	>27	40	35	105	100	150	>50	n/A	n/A	400
Battery weight	kg	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	60	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A
Battery type	-	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion	Li-Ion
Voltage level	V	650	500	400	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A
Lifetime	h	n/A	n/A	n/A	>2000	n/A	n/A	n/A	>10000	n/A	n/A	n/A
Coldstart Temp.	°C	-30	-30	-30	-25	-30	-28	n/A	-10	n/A	n/A	n/A
E-Motor power	kW	134	130	120	100	147	90+140	275	56	44	80	400
E-Motor torque	Nm	300	300	395	320	350	550	n/A	240	220	254	n/A
FC supplier	-	Toyota	Honda	Hyundai	AFCC	NuCellSys	Ballard	Toyota	Hydrogenics	Symbio	Ceres	Blue World Technology
E-Motor-Supplier	-	n/A	n/A	n/A	n/A	Accumotive	n/A	n/A	n/A	Printed M. W.	n/A	n/A
Battery supplier	-	Toyota	Honda	LG Chem	n/A	n/A	n/A	BMW	n/A	JM Energy	LG Chem	n/A
FC packaging	-	Engine bay	Engine bay	Engine bay	Floor	Engine bay	Engine bay	Engine bay	Floor	Floor	Floor	Floor

Tabelle 10: Die meisten repräsentativen FCH-Anwendungen auf dem Automobilmarkt. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit

## NFZ – Nutzfahrzeuge

Der Straßengüterverkehrssektor umfasst Nutzfahrzeuge, die von Kleintransportern bis hin zu Langstreckensattelzügen und australischen Lastzügen reichen.

Nutzfahrzeuge legen längere Strecken bei konstanter mittlerer Last zurück. Dieses Fahrprofil stellt den idealen Anwendungsfall dar, in dem die meisten technischen Stärken der FCEVs zur Geltung kommen und sie im Vergleich zu BEVs besonders wettbewerbsfähig machen. Eine erfolgreiche Kommerzialisierung hängt jedoch von der Senkung der Gesamtbetriebskosten (TCO) für diese Fahrzeuge ab.

Nutzfahrzeuge haben das gleiche technische Layout wie in der Automobilbranche. Lastwagen haben auch das gleiche elektrische Schema mit parallel geschalteter Batterie und BZ. Ihr Rohrrahmen mit dem Fahrerhaus auf dem Dach lässt jedoch die Wahl zwischen verschiedenen Komponentenlayouts offen.

In vielen Forschungsprojekten und bei der Nachrüstung alter Diesel-Lkw mit BZ bietet der Raum hinter der Kabine die einfachste Möglichkeit zur Umsetzung: einige oder sogar alle BZ-Komponenten werden in einem Gestellrahmen montiert und dann mit dem Elektromotor verbunden, der das Drehmoment über ein herkömmliches Automatikgetriebe auf die Räder überträgt. Selbst bei einem höheren Integrationsgrad wird der Platz hinter dem Fahrerhaus in der Regel für die Unterbringung der Wasserstofftanks genutzt, um die Länge des Anhängers auf ein Minimum zu reduzieren.

Auch die Wasserstoffspeicherung hat noch nicht den allgemeinen Standard erreicht, da alle CGH2 mit 350 und 700 bar sowie LH2-Kryobehälter im aktuellen Anwendungsbereich zu finden sind. In den folgenden Abbildungen sind Beispiele von FCEV Trucks dargestellt.

Einige Fahrzeugkonzepte von unterschiedlichen Herstellern sind in Abbildung 34 bis Abbildung 37 dargestellt.

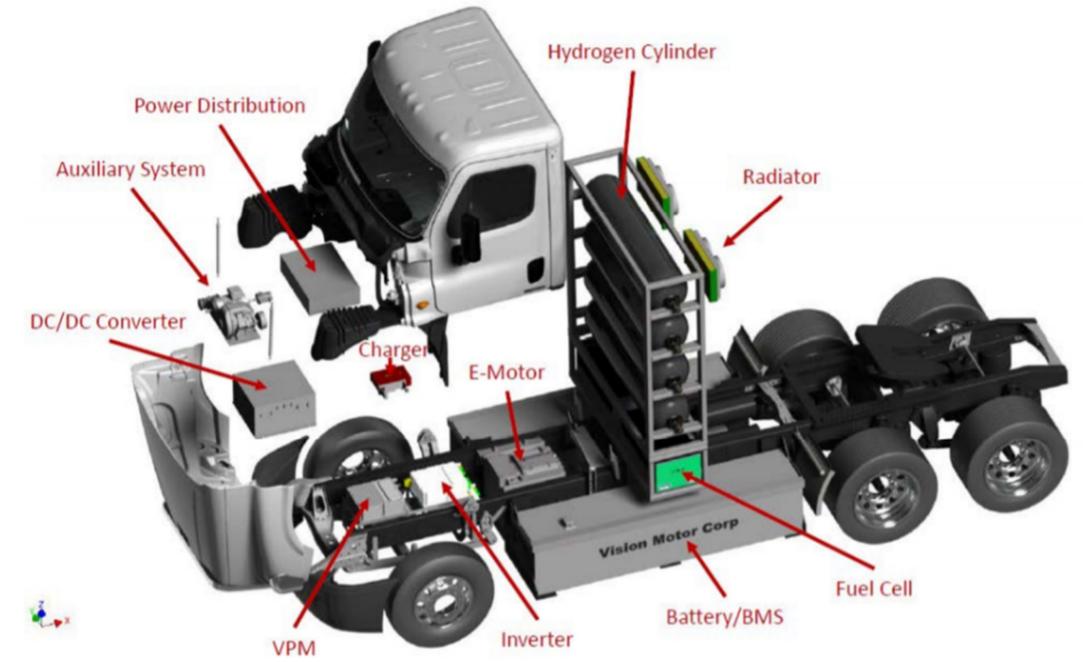


Abbildung 34: FCE Truck, Vision Industries Corporation 2014 [25]

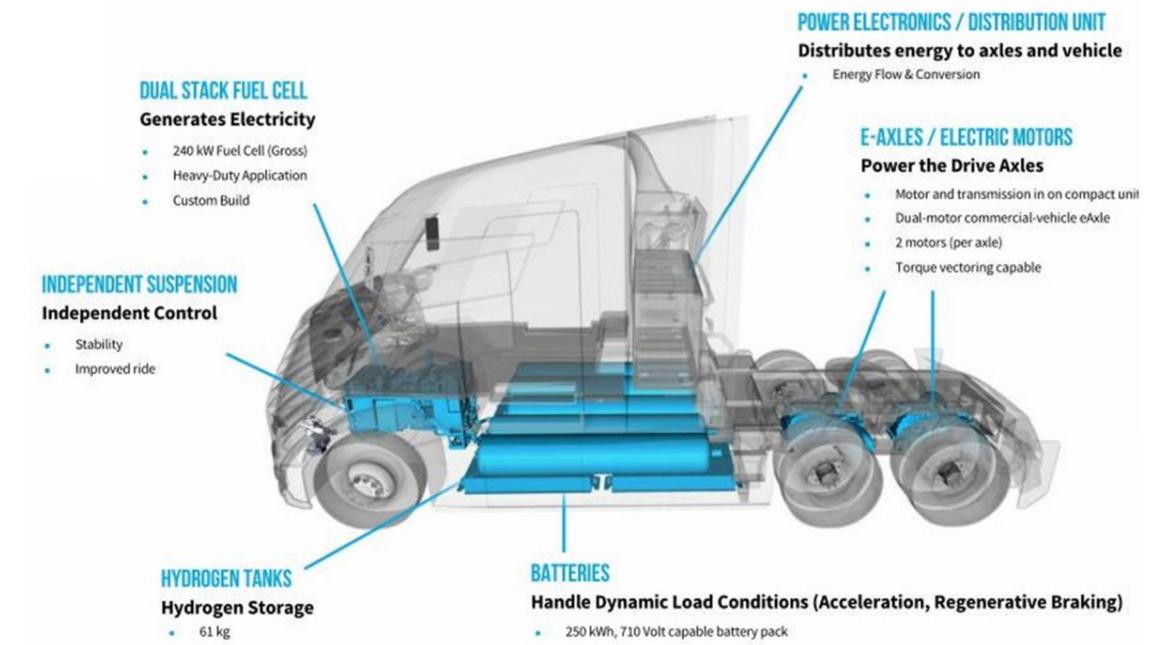


Abbildung 35: Schematische Darstellung des Nikola One [26]

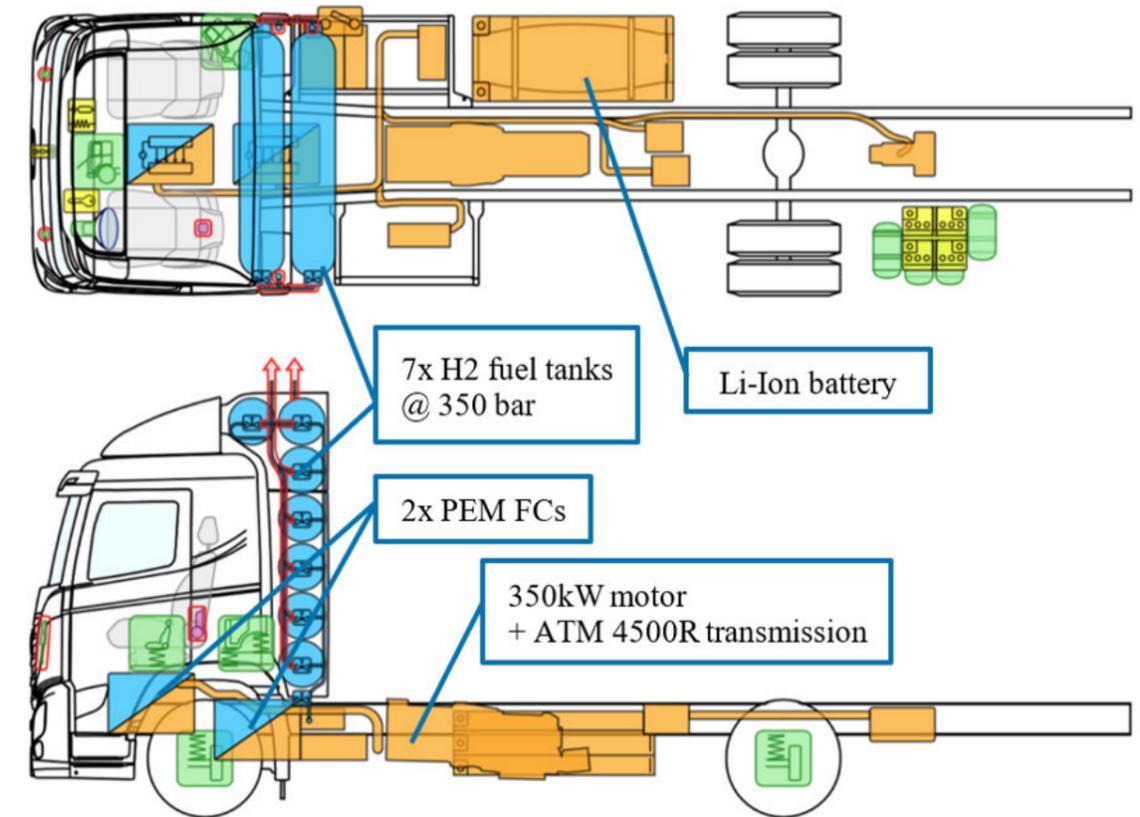


Abbildung 36: Schematische Darstellung des Hyundai Xcient FCEV Trucks [27]



**Abbildung 37: Schematische Darstellung des Mercedes Benz GenH2 FCEV Trucks [28]**

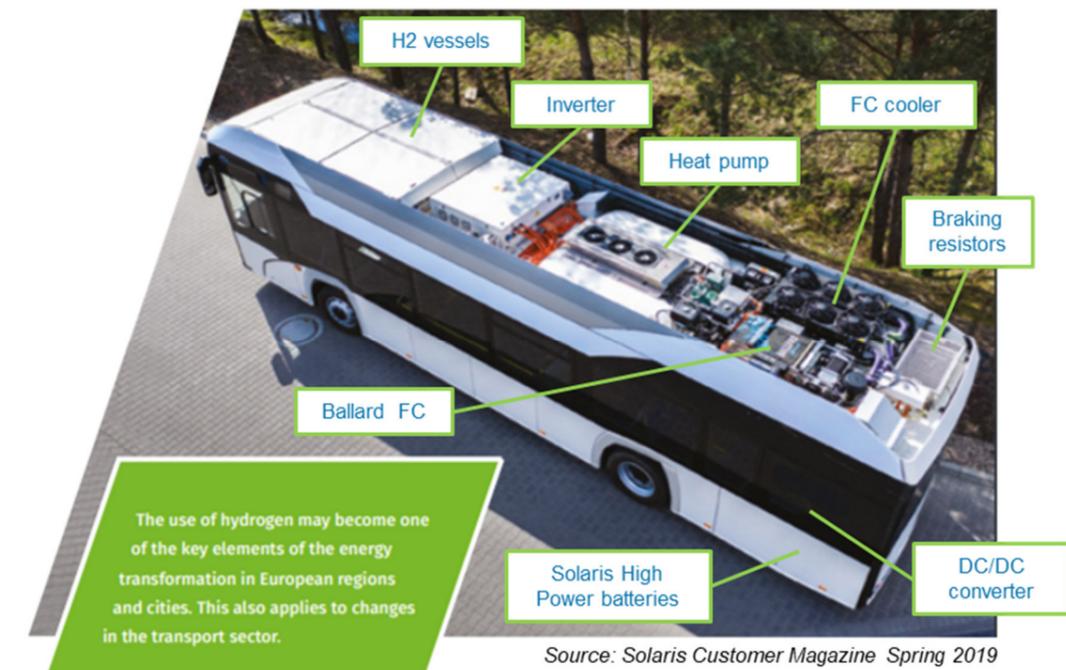
Die repräsentativsten BZ-LKWs sind in der folgenden Tabelle 11 aufgeführt.

OEM	Unit	Renault	Stellantis	Quantron	Hyundai	Kenworth	Nikola	Scania	Quantron	Navistar/ GM	Navistar/ Cummins	IVECO	Mercedes Benz	ESORO
Model	-	Master	Opel Vivaro	Q-LIH2	XCIENT FCEV	T680 FCET	Two	G350	Iveco Strator	RH tractor	RH demo	IVECO, VDL	GenH2 Truck	MAN TGS
Project	-	-	-	-	H2 Energy	ZANZEFF	-	ASKO	-	-	-	H2Share	-	Coop
Max GCW	t	3.5	3.5	4.2	18	36	36	27	44	36	36	28	40	35
Maturity	-	Announced	Testing	Design	Demo fleet	Demo fleet	Prototype	Demo fleet	Prototype	Feas. study	Prototype	Feas. study	Design phase	Discontinued
First delivered	year	2022 (Series)	2022 (Series)	n/A	2020	2020	2024 (est.)	2019	2022 (Series)	2022 (Demo) 2024 (Series)	-	-	2024 (Series)	2016
H2 Storage	kg	4.18	4.4	8.4	32.1	60	61	33	35	n/A	23.5	30	80 (2x40)	31
Number of tanks	#	2	3	4	7	6	9	4	n/A	n/A	5	n/A	n/A	7
Tank pressure	bar	700	700	700	350	700	700	350	350	n/A	350	350	Liquid	350
Range	km	350 (WLTP)	400 (WLTP)	500 (WLTP)	400 (cruise)	480	800	500	700	800	400	400	1000	400
FC efficiency (max)	%	55	55	n/A	60	n/A	n/A	53	n/A	n/A	53	n/A	n/A	52
FC power (net)	kWe	5	45	15	190	230	200	90	130	160	90	88	300 (2x150)	100
Battery capacity	kWh	33	10.5	29	73.2	12	250	56	110	n/A	100	82	70	120
Battery power	kW	60	90	n/A	450	n/A	n/A	75	n/A	n/A	n/A	n/A	400	n/A
Battery weight	kg	255	n/A	n/A	759 (est.)	n/A	n/A	500 (est.)	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A
Battery type	-	Li-Ion	Li-Ion	n/A	Li-Ion NMC	Li-Ion	n/A	Li-Ion NMC	LiFePo4	n/A	n/A	n/A	n/A	LiFePo4
Consumption	kg/100km	0.093 g/s	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	6-8	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	7.5-8.0
Voltage level	V	n/A	n/A	400	n/A	n/A	800	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	800	n/A
Lifetime	h	5000	7000	n/A	n/A	n/A	n/A	10000	n/A	n/A	10000	n/A	n/A	n/A
Coldstart temperature	°C	-20	-20	n/A	-30	n/A	n/A	-10	n/A	n/A	-10	n/A	n/A	n/A
E-Motor power (cont)	kW	n/A	60	n/A	n/A	n/A	n/A	210	n/A	n/A	n/A	n/A	2x 230	n/A
E-Motor power (peak)	kW	57	100	100	350	345	1000	290	340	n/A	n/A	210	2x 330	250
FC supplier	-	Symbio	Symbio	AEDS	Hyundai	Toyota	Powercell	Hydrogenics	Freudenberg	GM/Honda	Hydrogenics	n/A	Cellcentric	Powercell
FC packaging	-	Engine bay	Engine bay	n/A	Engine bay	Rack	Engine bay	Rack	n/A	Lateral	n/A	Rack	Lateral	Lateral

Tabelle 11: Die repräsentativsten FC-Anwendungen für den Straßengüterverkehrsmarkt. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

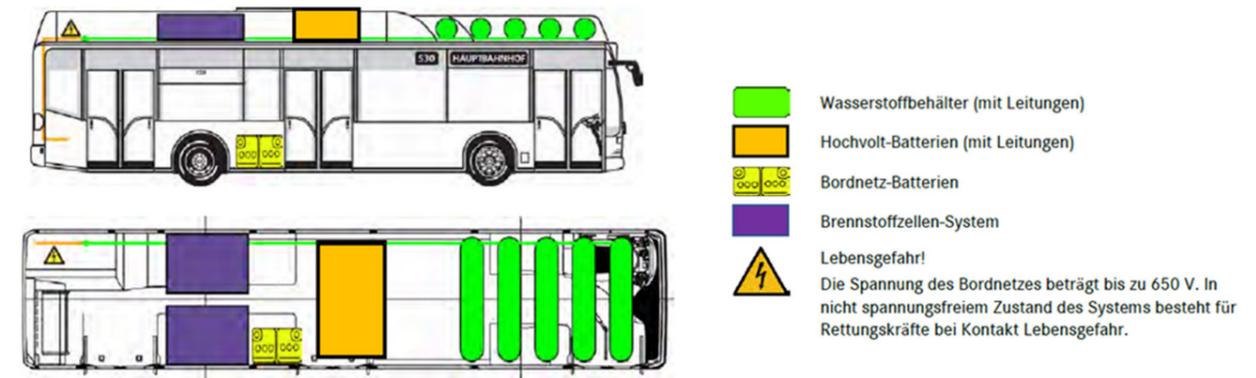
## Busse

Bei der einfachsten und gebräuchlichsten Bauweise von Niederflrbusen sind die Hauptkomponenten des Antriebsstrangs auf dem Dach untergebracht. Dort befinden sich ein oder zwei Stacks mit einer Gesamtleistung zwischen 50 und 100 kW. Abbildung 38 zeigt einen mit Wasserstoff angetriebenen Bus inklusive der erforderlichen Komponenten des Antriebssystems.



**Abbildung 38: Solaris Urbino 12 Hydrogen [29]**

Die folgende Abbildung 39 zeigt die Anordnung der Tanks am Dach des Busses.



**Abbildung 39: Schematische Darstellung des Mercedes Citaro FuelCELL-Hybrid [30]**

Die repräsentativsten BZ-Busse sind in der folgenden Tabelle 12 gelistet.

**Tabelle 12: Die repräsentativsten FCEV-Anwendungen für den Bussektor. Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.**

OEM	Unit	Van Hool	Van Hool	Solaris	Mercedes EvoBus	Mercedes EvoBus	Wrightbus	Caetano	Ursus	Safra	New Flyer	Hyundai	VDL
Model	-	A330 Fuel Cell	Exqui.City 18 FC	Urbino 12 Hydrogen	eCitaro REX	Citaro FC Hybrid	StreetDeck FCEV H2Bus	H2.CityGold	City Smile 12H	Businova Hydrogen	Xcelsior CHARGE H2	Elec City	Citea SLF-120 E H2
Maturity	-	Comm. avail.	Comm. avail.	Comm. avail.	Design phase	Discontinued	Comm. avail.	Comm. avail.	Demo fleet	Comm. avail.	Comm. avail.	Demo fleet	Demo fleet
First delivered	year	2017	2019	2020	2022	2008	2017	2020	2016	2021	2019	2020	2020
Length	m	13.2	18	12	12	12	10.9	10.7-12	12.1	12	12-18	11.0	12
Curb- /Gross weight	t	15.7/26.0	n/A	n/A	n/A	13.2/-	n/A	n/A	13.3/19.0	n/A	n/A	n/A	-
Passengers	-	75	125	85	n/A	n/A	85	n/A	75	n/A	n/A	44	72
H2 Storage	kg	38.5	43.5	37.5	20	35	30	37.5	26.6	28	37.5-60	34.5	32
Number of tanks	#	5	5	5	n/A	7	6	4	n/A	4	5-8	5	4
Tank pressure	bar	350	350	350	n/A	350	350	350	350	350	350	350	350
Range	km	350	300	350	365	250	322	400	450	300	400-560	434	350 H2 200 battery
Power FC	kW	85	100	70	30	2x60	85	60	2x30	30	85	180	72
Battery capacity	kWh	24	36	30.2	240	26.9	48	29 or 44	74	132	100-150	78.4	216
Battery power (max)	kW	80	120	n/A	1500	180	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	324
Battery weight	kg	470	710	n/A	2530	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	2600 (est.)
Battery type	-	LTO	LTO	LiFePo4	Li-NMC	Li-Ion	n/A	LTO	Li-NMC	n/A	n/A	Li-Poly	Li-Ion
Consumption	kg/100km	5.5-8.2	8.6 - 13.3	7.1 - 7.9	n/A	10-14	10	9.5	7-9	n/A	n/A	6.9	8.0
Voltage level	V	600-740	700	650	400	n/A	n/A	600-740	600	n/A	n/A	n/A	700
Lifetime	h	>30000	>30000	n/A	n/A	n/A	>30000	n/A	n/A	n/A	>30000	n/A	12000
Coldstart Temp.	°C	n/A	n/A	-25	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	n/A	-30	n/A
Refill time	min	10	10	10	12	12	7	9	15	n/A	6-20	15	n/A
Power E-Motor	kW	160	210	2x110	2x125	2x80	2x100	180	2x113	200	160-320	180	160
FC Supplier	-	Ballard	Ballard	Ballard	Cellcentric	AFCC	Ballard	Toyota	HyMove	Symbio	Ballard	Hyundai	ElringKlinger
Battery Supplier	-	Actia	Actia	Solaris	Akasol	A123	n/A	Toshiba	Samsung	n/A	n/A	n/A	Akasol
E-Motor Supplier	-	Siemens	Siemens	ZF	n/A	n/A	Siemens	Siemens	Ziehl-Abegg	n/A	Siemens	ZF	Siemens
Packaging	-	Roof	Roof	Roof	n/A	Roof	Rear	Roof	n/A	n/A	n/A	Roof/rear	Trailer

### 2.2.3. Marktsituation

Die Anzahl an weltweit zugelassener FCEVs betrug mit Ende 2020 34.804, siehe Abbildung 40. Davon sind rund 75 % PKWs, 16 % Busse, 9 % mittelgroße LKWs und weniger als 1 % leichte und schwere Nutzfahrzeuge.

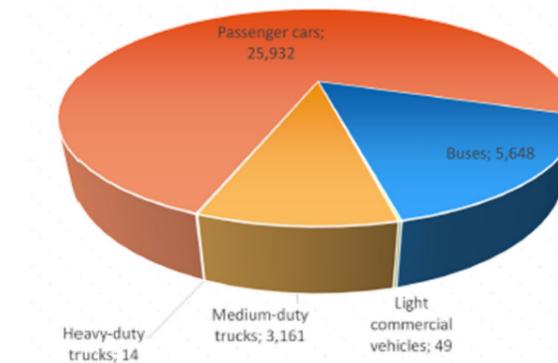


Abbildung 40: Anteil der unterschiedlichen FCEV Fahrzeugtypen weltweit 2020 [31]

Auf dem Weltmarkt verteilen sich die FCEVs mit 55% auf Asien, 36% auf Nordamerika und 9% auf Europa, siehe Abbildung 41. Innerhalb Europas sind in Deutschland mit 1.016 Fahrzeugen am meisten FCEVs zugelassen. In Österreich ist aktuell eine Flotte von 45 Fahrzeugen zugelassen.

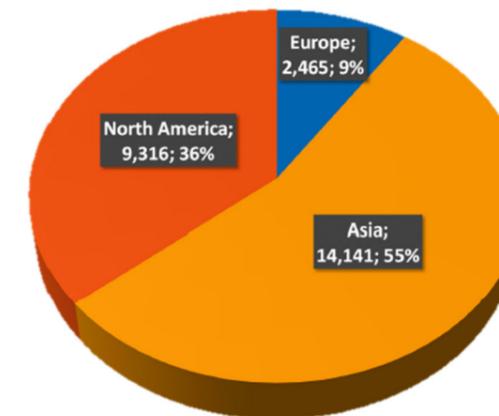


Abbildung 41: Verteilung von FCEVs auf dem Weltmarkt 2020 [31]

Die Zukunftsszenarien der globalen Fahrzeugmarktentwicklung zeigen eine stark steigende Tendenz von FCEVs im Straßenverkehr ab dem Jahr 2030, siehe Abbildung 42. Die dargestellten Marktprognosen aus dem Jahr 2020 weisen jedoch einen Marktanteil der FCEVs von bis zu 30% bis zum Jahr 2050 aus. Der Anteil der BEV wird bis dahin ebenfalls mit 30% erwartet.

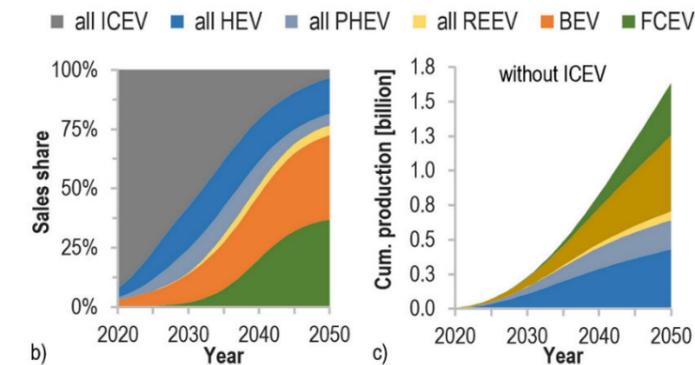


Abbildung 42: Globale Fahrzeug Marktentwicklung [32]

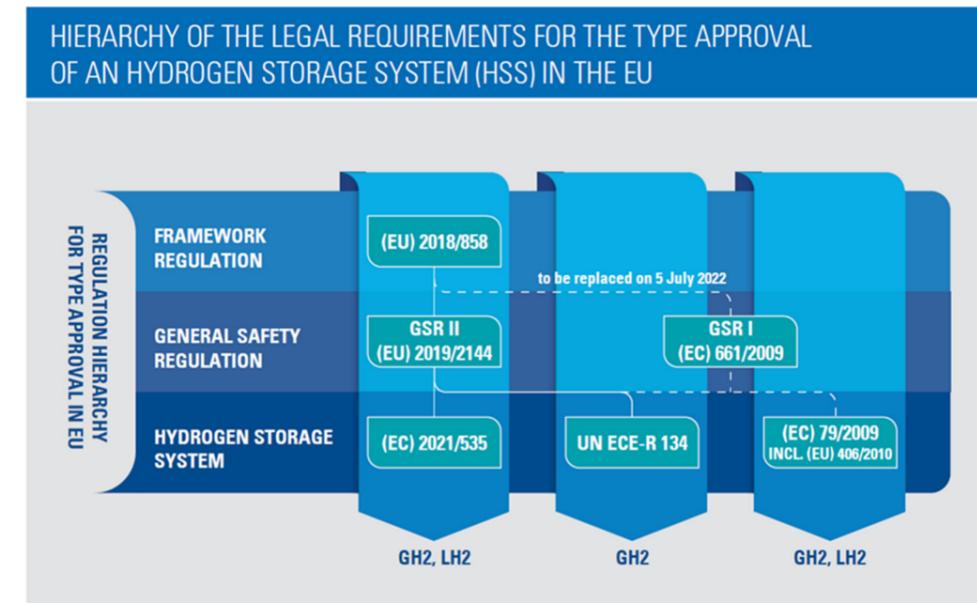
## 2.2.4. Standards und Normen

Die Zulassung von Fahrzeugen zum öffentlichen Straßenverkehr ist in allen Ländern für Fahrzeuge amtlich geregelt. Das Thema Regelwerke, Durchführungsbestimmungen & Normen (engl. Regulations, Codes & Standards – RCS) ist komplex, international ausgerichtet und unterliegt einer kontinuierlichen Weiterentwicklung. Beispielsweise unterliegen die Herstellung und Anwendung von H<sub>2</sub>/BZ-Produkten zunehmend international gültigen Regelwerken (z. B. UN, EC) und Normen (z. B. ISO, IEC).

Regelwerke sind rechtlich verpflichtend und müssen in den Nationalstaaten eingehalten bzw. umgesetzt werden. Jedoch werden zunehmend europäische und internationale Verordnungen sowie Richtlinien für Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und Brennstoffzellen (BZ) erlassen und lösen bisherige nationale Gesetze ab. Zu den zentralen Regelwerken in den Bereichen H<sub>2</sub> und BZ, die in den nächsten Jahren weiterentwickelt werden, zählt die „UN GTR13“, das „UN ADR“ und die „AFID“. Insbesondere ist hier der Verweis auf (nicht deutsche/ europäische) Normen für die H<sub>2</sub>-BZ-Akteure von zunehmender Bedeutung, da auf diese teilweise in Regelwerken direkt verwiesen wird [33].

Grundsätzlich sind veröffentlichte internationale oder europäische Normen rechtlich nicht bindend, es sei denn, auf sie wird explizit in europäischen Rechtsdokumenten, wie Verordnungen oder Richtlinien, verwiesen. Normen decken grundsätzlich die Mindestanforderungen für Sicherheit, basierend auf dem neuesten Stand der Technik zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung, ab.

Im September 2018 erließ die EU die Verordnung (EU) 2018/858 für die Typgenehmigung und Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen der Klassen M (Personenkraftwagen) und N (Fahrzeuge zur Güterbeförderung) und ihren Anhängern der Klasse O sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten. Diese Verordnung regelt die Verwaltungsvorschriften und technische Anforderungen für Typ-Zulassungen in der EU und wird geändert durch die neue Verordnung über die allgemeine Sicherheit (GSR2) – (EU) 2019/2144 – mit Schwerpunkt auf die allgemeine Verkehrssicherheit und den Schutz von Fahrzeuginsassen und ungeschützten Verkehrsteilnehmern. In der EU gelten die UNECE-Regelungen (herausgegeben von der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen Wirtschaftskommission für Europa) als Alternative oder zusätzlich zu den europäischen Verordnungen und Richtlinien, wenn die EU sie entsprechend übernommen hat. Der derzeitige Rechtsrahmen in der EU verweist auf drei gleichrangige Verordnungen für die Typgenehmigung von Wasserstoff Fahrzeugen (Kategorie N und M), Fahrzeugsysteme und Komponenten, die angewendet werden können: Verordnung (EG) 79/2009, UN-Regelung Nr. 134 und Reg. (EU) 2021/535, siehe Abbildung 43 [34].



**Abbildung 43: Hierarchische Struktur der Regelwerke von H<sub>2</sub>/BZ-Produkten [34]**

Die Verordnung (EG) Nr. 79/2009 ist eine sicherheitsrelevante Verordnung über wasserstoffbetriebene Fahrzeuge der Klassen M und N (siehe (EU) 2018/858) und Wasserstoffsysteme und -bauteile. Der Anwendungsbereich umfasst sowohl flüssigen als auch komprimierten, gasförmigen Wasserstoff. Detaillierte Verfahren für zulassungsrelevante Prüfanforderungen wurden in der Verordnung (EU) 406/2010 ein Jahr später veröffentlicht [34].

Die UN-Regelung Nr. 134 ist eine globale technische Regelung der Vereinten Nationen, die von der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen Wirtschaftskommission für Europa, auf der Grundlage der UN GTR 13, im Rahmen der UN-Vereinbarung von 1998, entwickelt wurde. Die UN-Regelung Nr. 134 ist relevant für die europäische Typgenehmigung. Der Inhalt und die Prüfverfahren beider Regelungen sind eng miteinander verbunden: Die UN-Regelung Nr. 134 enthält Regeln für die Genehmigung von Wasserstofffahrzeugen und ihrer Bauteile auf der Grundlage der „sicherheitsrelevanten Funktionen“.

Die Durchführungsverordnung der Kommission Verordnung (EU) 2021/535, veröffentlicht im März 2021, legt die Regeln für die Anwendung der GSR2 fest. In Bezug auf wasserstoffbetriebene Fahrzeuge hebt sie die Verordnungen (EG) 79/2009 und (EU) 406/2010 mit Wirkung vom 6. Juli 2022 auf. Seit diesem Datum basieren die europäischen

Typgenehmigungen für Wasserstoffsysteme und jedes eingebaute Bauteil ausschließlich auf der UN-Regelung Nr. 134 und Teilen der Verordnung (EU) 2021/535 und Typgenehmigungen nach der Verordnung (EU) 2021/535 sind nicht mehr möglich [34].

Folgend sind die wichtigsten Regelwerke im Bereich H<sub>2</sub>/BZ gelistet:

- UN: GTR 13 / ECE R134 – Genehmigung von wasserstoffbetriebenen Kraftfahrzeugen
- UN: ADR – Gefahrguttransport von Wasserstoff
- EU: AFID – Alternative Fuels Infrastructure Directive Europäischen Richtlinie zum Aufbau einer Infrastruktur für alternative Kraftstoffe, einschließlich Wasserstoff
- Europäische Verordnung EC/79/2009 bzw. EU/406/2010 (Typgenehmigung von H<sub>2</sub>-KFZ)
- ATEX (Explosionsschutz)
- ED (Druckgeräterichtlinie)
- TPED (Richtlinie über ortsbewegliche Druckgeräte)

Folgend sind die wichtigsten Normen im Bereich H<sub>2</sub>/BZ gelistet:

ISO 188	ISO 6506-1	ISO 11114-1	ASTM D2794
ISO 306	ISO 6957	ISO 11114-4	ASTM D3170
ISO 527-2	ISO 7225	ISO 14687	ASTM D2794
ISO 1431-1	ISO 7866	ASTM B117	ASTM D3170
ISO 2768-1	ISO 8491	ASTM D522	ASTM D3359
ISO 2808	ISO 9227	ASTM D572	ASTM D3418
ISO 3864-1	ISO 9809-1	ASTM D1308	ASTM G154
ISO 4624	ISO 9809-2	ASTM D2344	...

Neben den Regelwerken und Normen werden üblicherweise seitens der Fahrzeughersteller Fehler-Analyse-Methoden wie z.B. FMEA-Methoden (Failure Mode and Effects Analysis) oder FT-Analysen (Fault-Tree-Analysis) im Rahmen der ISO26262 (Road vehicles – Functional

safety) eingesetzt, um potentielle Gefahren und Fehlerquellen bereits in der Entwicklungsphase zu identifizieren und daraus geeigneten Gegenmaßnahmen abzuleiten.

## 2.2.5. Gefahren und Risikovermeidung

FCEVs sind elektrische Fahrzeuge und es können ihnen somit folgende Gefahren und Risiken zugeordnet werden, siehe Abbildung 44. Elektrische Gefahren entstehen durch Hochspannung in Komponenten und Verbindungen von BZ, Batterie und Leistungselektronik. Die Batterie verursacht Brand-, Explosions- und chemische Gefahren. Der gespeicherte Wasserstoff hat Brand- und Explosionsgefahren sowie Gefahren durch hohen Druck.

Die Unfallgefahr besteht wie für jedes andere Straßenfahrzeug durch menschliches oder technisches Versagen.

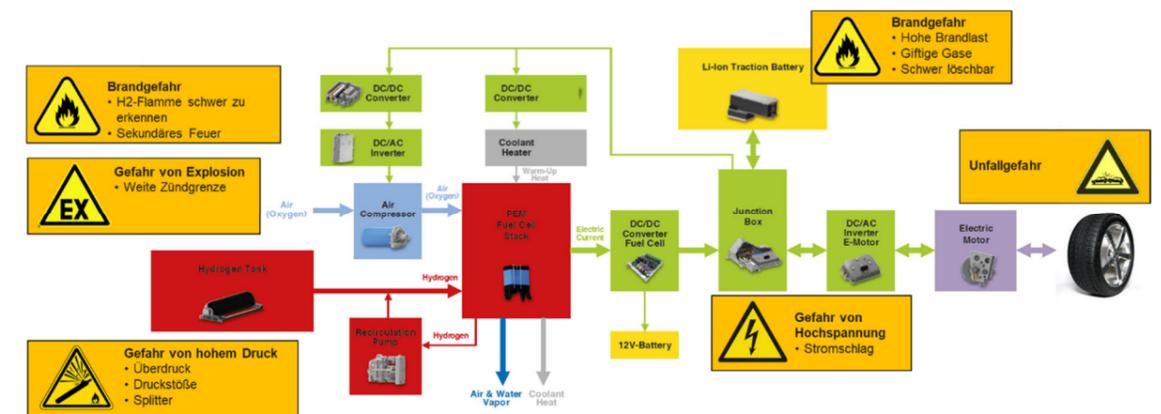


Abbildung 44: Gefahren von FCEVs

Für die nationale Typgenehmigung von Fahrzeugen ist der Nachweis von Crashtest nach definierten Anforderungen obligatorisch. Ziel ist es Erkenntnisse über das Verhalten eines Fahrzeuges, seiner Insassen oder der Ladung bei unterschiedlichen Crashkonfigurationen zu gewinnen. Das Ergebnis ist entweder die Bestätigung der gewünschten Fahrzeugsicherheit oder die Aufdeckung von Schwachstellen, die noch behoben werden müssen. Die folgende Abbildung zeigt die Crashtests des Hyundai Nexo im Rahmen des NCAP (European New Car Assessment Programme). Nach allen Crash-Szenarien wurde keine externe Leckage detektiert, keine schwere Beschädigung am Tanksystem und dessen Komponenten und auch kein Kontakt mit dem Chassis festgestellt. Darüber hinaus erfolgte der Spannungsabbau unter 60 V innerhalb von 4 Sekunden, siehe Abbildung 45.



Abbildung 45: Crashtest und Behälter Tests des Hyundai Nexu [35]

Basierend auf Unfallstatistiken wurden im Zuge des geförderten EU-Projekts StorHy sichere Bereiche mit geringer Deformation für die optimale Positionierung des Wasserstoffspeichersystems (HSS) in einem Fahrzeug errechnet: in der Längsmittlebene und um die Hinterachse, siehe Abbildung 46.

Durch weitere Rahmenverstärkungen (längs und quer) und Integration von Schutzblechen- und -käfigen kann im Falle von seitlichen Crashes das HSS bestmöglich geschützt werden, siehe Abbildung 47.

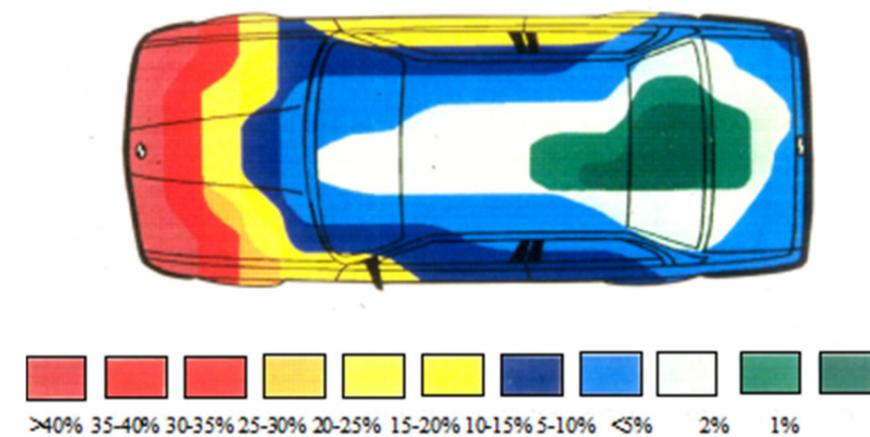


Abbildung 46: Verformungswahrscheinlichkeiten des Fahrzeuges bei einem Unfall als Basis für die sichere Platzierung des HSS [36]



Abbildung 47: Strukturelle Verstärkungen des Chassis für erhöhte Sicherheit gegen Verformung für das HSS [24]

## 2.2.6. H<sub>2</sub>-Speichersysteme

Für dieses Projekt relevant sind die Gefahren, die vom mitgeführten Wasserstoff, im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen, zusätzlich ausgehen und für Tunnelanlagen kritisch sein können.

Wasserstoff hat eine sehr hohe gravimetrische Energiedichte von 120 MJ/kg (33,33 kWh/kg). Er befindet sich bei Standardbedingungen im gasförmigen Zustand und hat eine Dichte von nur 0,09 kg/m<sup>3</sup>. Aufgrund der geringen Dichte hat er eine sehr niedrige volumetrische Energiedichte von 0,0108 kJ/m<sup>3</sup>. Die Speichermöglichkeiten werden in physikalische und chemische Speichersysteme eingeteilt. In physikalischen Speichern verbleibt der Wasserstoff in seiner molekularen Form, während in chemischen Speichern der Wasserstoff mit dem Speichermedium reagiert und Bindungen eingeht. Der derzeitige Standard für mobile Wasserstoffspeicher ist gasförmige, komprimierte Speicherung (CGH<sub>2</sub>) bei 350 oder 700 bar. Abbildung 48 zeigt eine schematische Übersicht über mögliche Varianten zur Speicherung von Wasserstoff.

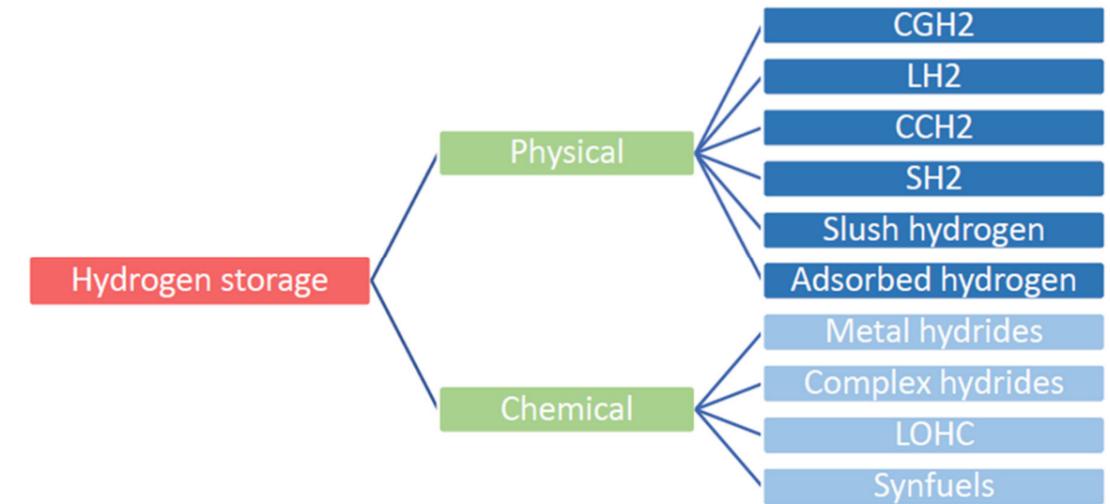


Abbildung 48: Möglichkeiten zur Wasserstoffspeicherung

#### Gasförmige Speicherung

Die Druckgasspeicherung von H<sub>2</sub> ist Stand der Technik und wird derzeit in allen Serienfahrzeugen verwendet. Hierzu wird Wasserstoff auf Drücke bis zu 700 bar verdichtet. Die gasförmige Speicherung von Wasserstoff bildet ein geschlossenes System, d. h. gasförmiger Wasserstoff kann auch über längere Zeiträume verlustfrei gespeichert werden, vorausgesetzt die eingesetzten Materialien verhindern die Diffusion des Wasserstoffs. Als Tankformen von Druckbehältern werden wegen der günstigen Spannungsverteilung Zylinder oder Kugeln bevorzugt. Nachteilig bei Kugeltanks ist die aufwändige Herstellung, weswegen in der Praxis Zylindertanks eingesetzt werden. Außer dem Behälter an sich, werden Ventile, Rohrleitungen, Kupplungen, Verschraubungen sowie Sensoren zur Überwachung von Druck, Temperatur und Dichtheit eingesetzt [22]. Im mobilen Bereich, werden heutzutage Typ 3 (Aluminiumliner mit Kohlefaser umwickelt) und Typ 4 (Kunststoffliner mit Kohlefaser umwickelt) eingesetzt, siehe Abbildung 49.

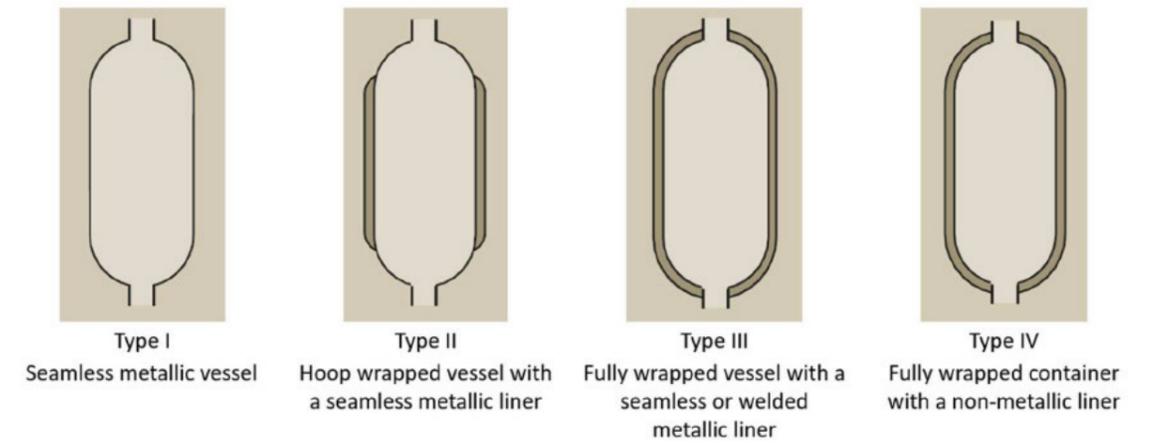


Abbildung 49: Behälter Typen [37]

Das H<sub>2</sub>-Speichersystem in einem FCEV besteht aus einem oder mehreren Hochdruckzylindern, die miteinander verbunden sind, um die BZ mit H<sub>2</sub> zu versorgen, siehe Abbildung 50.

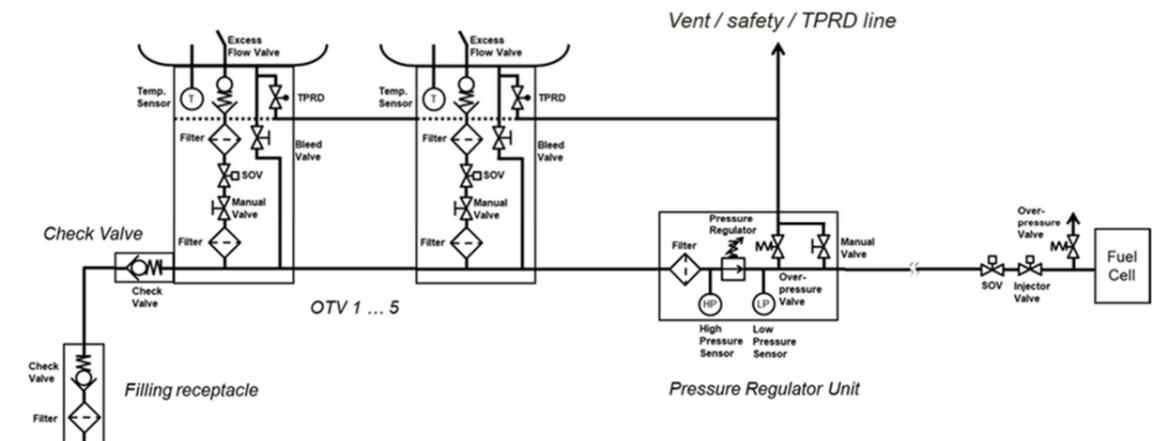
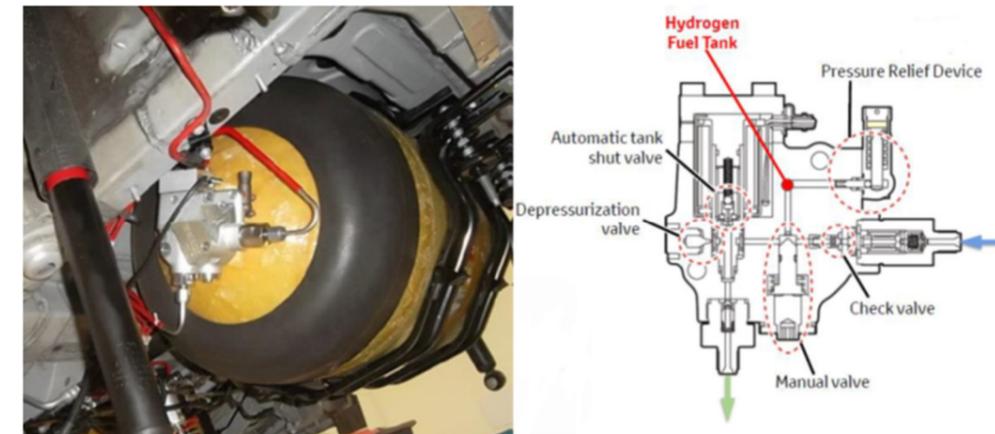


Abbildung 50: Schematisches Fließbild eines H<sub>2</sub>-Tanksystems

Beim Betankungsvorgang wird H<sub>2</sub> von der Tankstelle über den Einfüllstutzen und damit den Behältern parallel zugeführt. Der Druck wird dabei stetig gesteigert, ein H<sub>2</sub>-Massenstrom stellt sich dabei ein und die Behälter werden parallel befüllt. Die Betankung wird automatisch beendet, sobald der gewünschte Zieldruck erreicht wird. Rückschlagventile und automatische Absperrventile sorgen dafür, dass nach dem Entkoppeln des Betankungsschlauches kein Wasserstoff austreten kann. Im Fahrzeug- bzw. Brennstoffzellenbetrieb wird das Gas in zwei Druckstufen von Speicherdruck auf 1-3 bar reduziert, um die BZ für den jeweiligen

Betriebspunkt mit dem notwendigen Druck zu versorgen. Externe H<sub>2</sub>-Leckagen können über Drucksensoren im Leitungssystem und Gassensoren, die an kritischen Positionen (z.B. Fahrgastraum oder Speicherbehälter) angebracht sind, detektiert werden. Bei Überschreiten von H<sub>2</sub>Konzentrationslimits wird der Fahrer gewarnt und in weiterer Folge eine Notabschaltung des BZS durchgeführt. Abbildung 51 zeigt einen H<sub>2</sub>-Speicherbehälter im Fahrgestell eines Fahrzeugs mit dem integrierten Behälterventil am



**Abbildung 51: Speicherbehälter und montiertes Behälterventil in einem Fahrzeug (links), Schematisches Bild eines Behälterventils (rechts) [38]**

Ende des Zylinders und eine schematische Darstellung der internen Komponenten des Ventils. Das integrierte Ventil besteht aus folgenden Komponenten:

- Ein Rückschlagventil, das einen Rückfluss während der Befüllung verhindert;
- Ein manuelles Absperrventil, das den Behälterinhalt von allen Leitungen (mit Ausnahme des thermischen Druckentlastungsventils des Behälters) trennt;
- Eine thermische Druckentlastungsvorrichtung (TPRD), die den Behälter im Falle eines Brandes vor Überdruck schützt;
- Ein Druckentlastungsventil zur Erleichterung des manuellen Ablassens des Behälters;
- Eine automatische Absperrventil (stromlos geschlossen), um den Behälter bei Fahrzeug-Außerbetrieb oder im Falle eines Lecks abzusperren und damit den Gasfluss zu unterbrechen.
- Ein Durchflussmengenbegrenzer, begrenzt den maximalen Durchfluss über das Ventil, z.B. bei Leitungsbruch oder schwere Leckage

In den meisten Fahrzeugen sind mehrere Behälter mit jeweils einem eigenen integrierten Ventil verbaut. Kritische Komponente ist hierbei zweifelsfrei das TPRD, eine thermische nicht

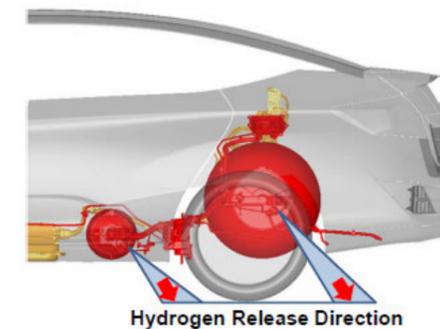
wiederverschließbare Überdrucksicherung. Wird im Falle eines Brandes eine Temperatur zwischen 108-110 °C am TPRD erreicht, so wird ein definierter Öffnungsquerschnitt freigegeben, um den Druck im Behälter zu reduzieren. Wasserstoff strömt dann über eine Entlüftungsleitung kontrolliert in die Umgebung. Um sicherzustellen, dass es nicht zu einer H<sub>2</sub>-Ansammlung innerhalb des Fahrzeugs kommt und Fahrer/Passagiere das Fahrzeug sicher verlassen können, ist der Ort und die Richtung der Freisetzung vorgegeben. In Tabelle 13 sind die Anforderungen an das TPRD aus der EU-Verordnung EU406/2010 gelistet.

**Tabelle 13: TPRD-Anforderungen aus der EU406/2010**

Absatz	Text
5.1	Bei Behältern für komprimierten (gasförmigen) Wasserstoff muss es sich bei der Druckentlastungsvorrichtung um eine thermisch aktivierte, nicht wieder schließende Vorrichtung zum Schutz eines Behälters vor dem Bersten aufgrund der Auswirkungen eines Feuers handeln.
5.2	Eine Druckentlastungsvorrichtung muss direkt in die Öffnung des Behälters oder mindestens eines Behälters in einer Behälterbaugruppe installiert werden, oder aber in eine Öffnung eines in einen Behälter eingebauten Ventils, und zwar in einer solchen Weise, dass der Wasserstoff in eine atmosphärische Auslassleitung abgeführt und aus dem Fahrzeug herausgeleitet wird.
5.3	Es darf nicht möglich sein, die Druckentlastungsvorrichtung von dem durch sie geschützten Behälter zu trennen, weder durch den normalen Betrieb noch durch eine Störung eines anderen Bauteils.
5.4	Das aus der Druckentlastungsvorrichtung ausströmende Wasserstoffgas darf nicht auf Folgendes gerichtet sein: a) ungeschützte elektrische Anschlüsse oder Schalter oder sonstige Zündquellen; b) in Richtung des Fahrgastraums oder Gepäckraums oder in diese hinein; c) in Richtung eines Radkastens des Fahrzeugs oder in einen solchen hinein; d) in Richtung eines Bauteils der Klasse 0; e) vom Fahrzeug aus nach vorn, oder waagrecht zum Heck oder den Seiten des Fahrzeugs.
5.5	Die Innenabmessungen der Druckentlastungsleitung dürfen die Funktion der Druckentlastungsvorrichtung nicht beeinträchtigen.

5.6	Die Druckentlastungsleitung der Druckentlastungsvorrichtung muss vor Blockierung, z.B. durch Schmutz, Eis und eindringendes Wasser, soweit dies mit vertretbarem Aufwand möglich ist, geschützt werden.
5.7	Die Druckentlastungsöffnung der Druckentlastungsvorrichtung muss so ausgerichtet sein, dass im Falle des Ablösens der Druckentlastungsleitung von der Druckentlastungsvorrichtung, der daraus resultierende Gasfluss nicht unmittelbar negativ auf andere Behälter oder Behältergruppen einwirkt, es sei denn, diese sind geschützt.

Bei PKWs ist die Auslassrichtung des TPRDs meistens unter dem Fahrzeug in Richtung des Bodens (siehe Abbildung 52), bei Bussen, LKWs und Zügen über dem Dach vertikal nach oben positioniert.



**Abbildung 52: Richtung der Wasserstofffreisetzung bei Aktivierung des TPRDs am Beispiel des Honda FCX Clarity [24]**

Die TPRD-Durchflussmenge wird durch die Anforderung der Brandprüfung des Speichersystems vorgegeben, siehe Abbildung 53. Der Durchmesser soll so gewählt werden, dass der Speicherdruck vor dem Versagen des Behälters aufgrund der Feuereinwirkung auf unter 10 bar sinkt. Es darf keine zusätzliche Freisetzung durch Leckage auftreten (Freisetzung durch das TPRD nicht inbegriffen), die zu einer Flamme mit einer Länge von mehr als 0,5 m über den Umfang der angewandten Flamme hinaus führt. (UN-Regelung Nr. 134).

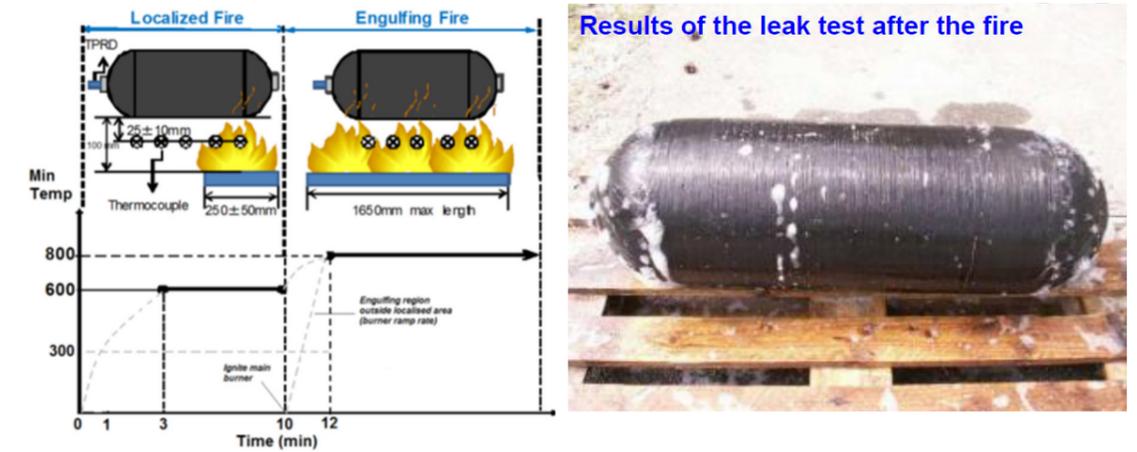
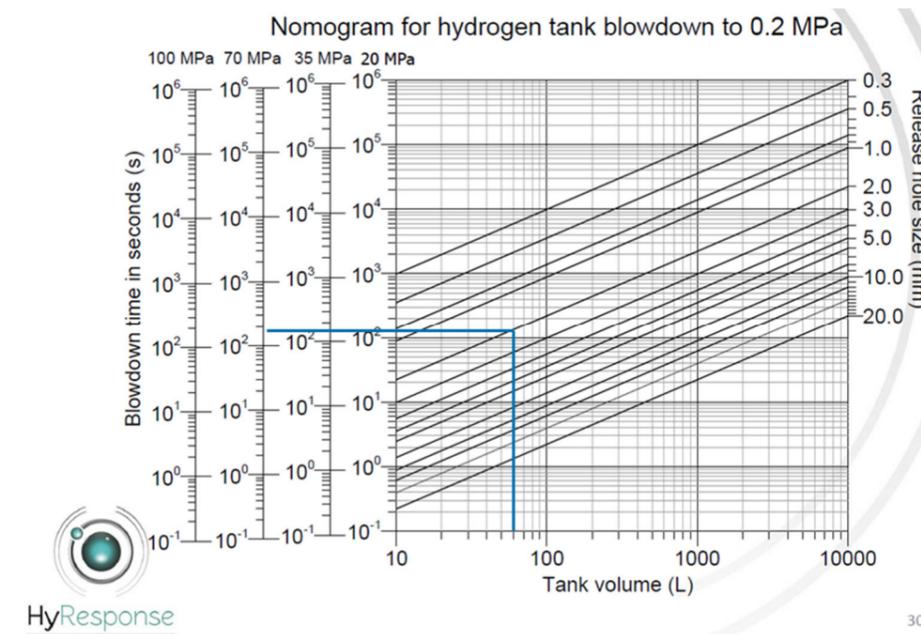


Abbildung 53: Brandversuch von Behälter und Ventil gemäß UN ECE R134 (links), Behälter nach dem Versuch (rechts) [39]

Abbildung 54 zeigt die Abhängigkeit zwischen TPRD Durchmesser, Tankvolumen, Druckniveau und benötigte Ausströmungszeit. Derzeit am europäischen Markt erhältliche Behälterventile mit integriertem TPRD weisen einen Durchmesser von 2 mm auf. Tendenziell sollte jedoch ein Öffnungsquerschnitt des TPRDs kleiner 1 mm angestrebt werden, dass sowohl der Druckstoß bei Auslösung in begrenzten Räumen und die Wärmefreisetzung möglichst geringgehalten werden kann und die Flammenlänge kleiner 0,5 m beträgt (vgl. [22]). Hierfür ist es jedoch notwendig, dass der Behälter eine höhere Feuerwiderstandsfähigkeit (Fire Resistance Rate - FRR) aufweist. In Versuchen wurde gezeigt, dass ein wärmedämmender Anstrich auf Epoxidbasis in der Lage ist, die FRR von Kohlefaserkunststoffbehältern von derzeit 6-12 Minuten auf über 2 Stunden zu erhöhen. Diese technische Lösung hat das Potential, die Sicherheitsfunktion von Behältern zu verbessern und die Gefahren bei einem Unfallszenario wie einem Autobrand zu verringern [40].



**Abbildung 54: Abhängigkeit von TPRD Durchmesser, Tankvolumen, Druckniveau und benötigte Ausströmungszeit [39]**

Ein Versagen oder Nichtauslösen des TPRDs z.B. durch Verstopfen (Schmutz, Steine, Eis), Blockieren durch andere Fahrzeugteile bei einem Unfall, technischem Fehler oder einem örtlich begrenzten Brand kann zur Explosion des Behälters führen, da keine Back-Up Funktion vorgesehen ist. Aus diesem Grund wird an alternativen Möglichkeiten für den schnellen Druckabbau durch Wärmeentwicklung geforscht. Ein vielversprechender Ansatz ist ein Liner, der ab der Temperatur von 110 °C zu schmelzen beginnt und dadurch durchlässig für H<sub>2</sub> wird, siehe Abbildung 55. In einem Brandversuch konnte gezeigt werden, dass der Wasserstoff diffundiert und gleichmäßig über der Oberfläche des Tanks austritt. Der Tank wird ohne Bersten, H<sub>2</sub>-Stichflamme und Druckstößen entleert.

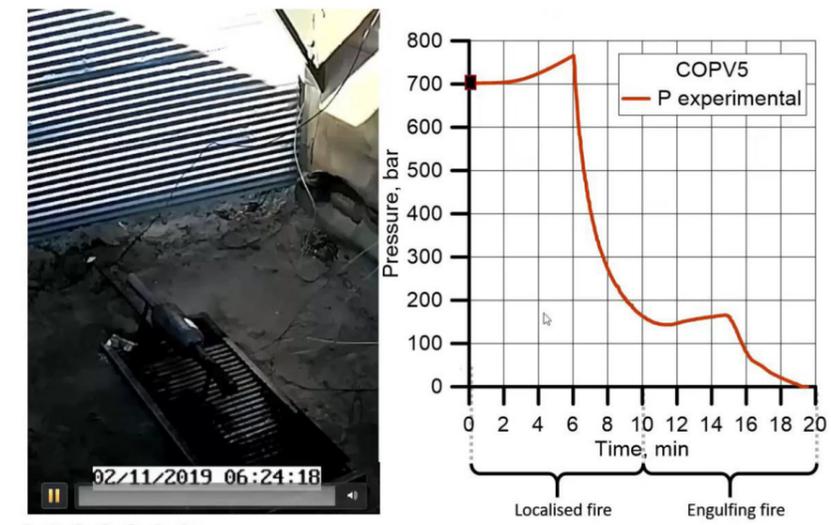


Abbildung 55: TPRD-loser Behälter mit schmelzfähigem Liner [41]

Tabelle 14 fasst die wichtigsten Spezifikationen ausgewählter H<sub>2</sub>-Speichersysteme von FCEVs (PKW, Bus und LKW) zusammen.

**Tabelle 14: FCEV Tanksystem-Spezifikationen**

Kategorie	Modell	Jahr	Tank Nr.	Nenn- druck	Masse H2/Tank	Masse H2 Total	Volumen H2/Tank	Volumen H2 Total	TPRD Ø	Richtung 0° = vertikal nach oben
-	-	-	-	bar	kg	kg	dm <sup>3</sup>	dm <sup>3</sup>	mm	°
PKW	Toyota Mirai 2	2020	3	700	1 2,09 2,57	5,66	25 52 64	141		
PKW	Mercedes -Benz GLC F- CELL	2018	2	700	2,2 2,2	4,4	57,5 57,5	115	2	
PKW	Hyundai NEXO Fuel Cell	2018	3	700	2 2 2	6	52 52 52	156		
PKW	Honda Clarity Fuel Cell	2016	2	700	? 5,46					135
PKW	Toyota Mirai	2015	2	700	2,3 2,3	4,6	61 61	122	2	135
PKW	Hyundai Tucson/ix 35 FCEV	2013	2	700	? ?	5,6	? ?	133		
Bus	Mercedes Citaro FuelCELL -Hybrid	2011	7	350	5	35	205	1435		
Bus	Toyota SORA	2018	10	700	2,41	24,1	60	600		
Bus	New Flyer Xcelsior XHE40 Fuel Cell Bus	2017	8	350	4,7	37,5	200	1600	5	0
Bus	Solaris Urbino 12	2010	5	350	7,5	37,5	312	1560	5	0
Bus	Van Hool A330 Fuel Cell	2005	8	350	5	40	220	1750	5	0
LKW	XCIENT Fuel Cell	2020	7	350	4,58	32,1	191	1338		

Flüssige H<sub>2</sub> Speicherung

Eine weitere praktikable Möglichkeit zur Erhöhung der Energiedichte von Wasserstoff ist die Verflüssigung und Speicherung von H<sub>2</sub> in flüssiger Form, was zu einer Dichte von bis zu 70,9 kg/m<sup>3</sup> bei 1 bar führt. Um den flüssigen Wasserstoff auf 20 K (-253 °C) zu halten, muss ein Kühl- und Isoliersystem vorhanden sein. Die hochmodernen Speicherbehälter bestehen aus

einer inneren und einer äußeren Hülle mit einem Vakuum dazwischen. Die Behältermaterialien sind Aluminiumlegierungen, Verbundwerkstoffe und faserverstärkte Polymere, während die derzeitigen Isoliermaterialien Schäume, Pulver, feste Fasern (z.B. Glasfaserfolien und -matten), Siliziumdioxid und Aerogele sind [42]. Wärmeverluste entstehen insbesondere durch Wärmeleitung an Verbindungsrohren, Kabeln und Halterungen, durch ortho-para-Umwandlung des Wasserstoffs während der Verflüssigung oder einfach durch externe Wärmestrahlung und natürliche Konvektion in der Dampfphase über der flüssigen Phase. Die Rückhaltung eines Teils des gespeicherten flüssigen Wasserstoffs im Speicher ist ebenfalls eine praktikable Option, um die hohen Verluste zu vermeiden, die mit der Rückkühlung eines leeren Tanksystems beim Wiederbefüllen einhergehen. Die Betankungszeit ist ähnlich wie bei herkömmlichen Dieselfahrzeugen.

Eine weitere Herausforderung ist der begrenzte Bauraum in mobilen Anwendungen. Große superisolierte Kugeltanks sind aufgrund des größeren Volumen-Oberfläche Verhältnisses ebenfalls überlegen, doch aufgrund der einfacheren Herstellung und der besseren Packungsdichte werden für mobile Anwendungen wiederum Zylindertanks bevorzugt. Es muss ein angemessener Kompromiss zwischen Isolierung und Verdampfungsrate gefunden werden. Akzeptable Verdampfungsraten für mobile Anwendungen liegen im Bereich von 0,3 – 3 Prozent pro Tag bezogen auf die gespeicherte H<sub>2</sub>-Menge. Hohe Abdampfraten stellen ein Sicherheitsrisiko dar, insbesondere in engen Räumen wie Garagen und Tiefgaragen [43]. Daher sind ein offenes Containment und eine regelmäßige Entlüftung notwendig, um den Druckaufbau durch die ständige Verdampfung des gespeicherten Wasserstoffs zu begrenzen, da Wasserstoff eine geringe Phasenwechselenthalpie von nur 0,45 MJ/kg hat [44]. Eine teure mehrschichtige Isolierung in Kombination mit einem Hochvakuum und/oder einem aktiv gekühlten Strahlungsschild stellt jedoch eine vielversprechende Lösung zur Verringerung der Boil-off-Rate dar [42].

Prototyp-Autos mit Flüssig- H<sub>2</sub>-Tanks an Bord wurden von BMW und GM im Jahr 2006 entwickelt, siehe Abbildung 56. Nach dieser Kleinserie wurde die weitere Entwicklung der Technologie jedoch für einige Jahre eingestellt, da Druckgasspeicher effizienter wurden. Daimler plant derzeit eine Weiterentwicklung für wasserstoffbetriebene Lkw, die in der zweiten Hälfte des Jahrzehnts auf den Markt kommen sollen [45]. Ein großer Vorteil ist, dass die Kosten des Flüssigspeichersystems um das 2- bis 3-fache niedriger sind (~8 \$/kWh) und im Bereich von 5 – 12 \$/kWh liegen und langlebiger sind als die des Gasspeichersystems [42],

[46]. Daher ist das Flüssigspeichersystem derzeit die wirtschaftlichste Speicherlösung bei großen Stückzahlen und für größere Fahrzeuge.

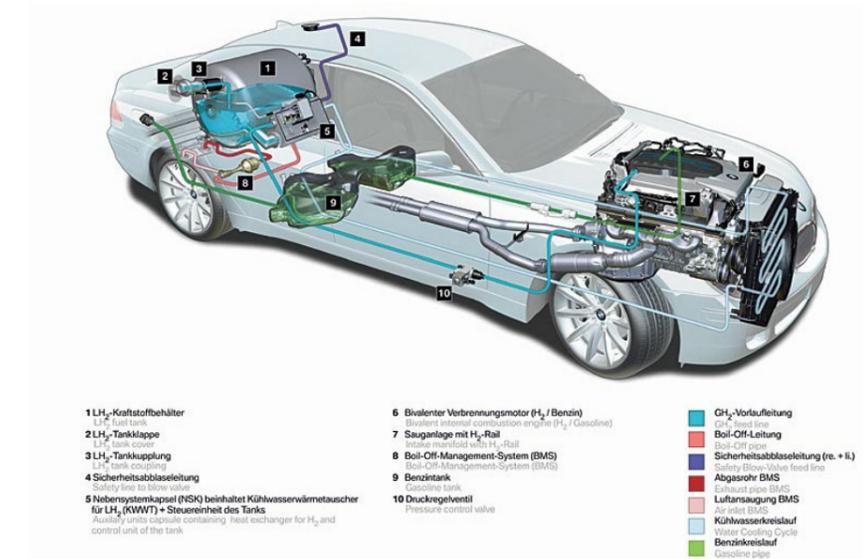


Abbildung 56: BMW Hydrogen 7 [47]

### H<sub>2</sub> Speicherung in chemischen Verbindungen

Der Wasserstoff kann in festen, flüssigen und gasförmigen Trägern gebunden und gespeichert werden. Einige Metalle und Legierungen können molekularen oder atomaren Wasserstoff absorbieren und elementare oder komplexe Hydride bilden. Der Wasserstoff erreicht die Oberfläche des Absorptionsmittels, dissoziiert, diffundiert weiter in das Metallgitter und reagiert mit dem Metall unter Bildung von Metallhydriden. Die Hydrierung erfolgt bei Raumtemperatur, die Dehydrierung aufgrund der endothermen Reaktion bei höheren Temperaturen. Die praktikabelste feste Option sind Metallhydride, wobei Materialkosten, Haltbarkeit und Wärmemanagement eine große Herausforderung darstellen. Ein wesentliches logistisches Problem für den mobilen Einsatz besteht darin, dass die Regeneration der meisten Hydridmaterialien an Bord kaum möglich ist und die ausgetauschten Tanks in einer Anlage aufbereitet werden müssen. Die vollständige Erhaltung der Wasserstoffspeicherkapazität während mehrerer Lade- und Entladevorgänge ist aufgrund von Materialveränderungen wie Krustenbildung und der damit verbundenen Vergrößerung der unzugänglichen Bereiche schwer zu erreichen und zu kontrollieren. Flüssige Träger stellen heute keinen leicht

realisierbaren Einsatz in mobilen Anwendungen dar. Die gasförmige Speicherung in Form von Synfuels gilt derzeit als äußerst energie- und kostenintensiv, ebenso wie die Weiterverarbeitung zu flüssigen Synfuels.

Die volumetrische Speicherdichte reicht von 30 – 150 kg/m<sup>3</sup> (Energiedichte: 3,6 – 18,0 MJ/L), während die nutzbare gravimetrische Speicherdichte zwischen 2 – 20 Gew.-% schwankt (Energiedichte: 0,24 – 0,80 MJ/kg) [48]. Die Kosten für die Speicherung von chemischem Wasserstoff schwanken erheblich zwischen 4,8 und mindestens 15 \$/kWh für feste Hydride, je nach Speichermethode und erreichter technischer Reife [49]. Interstitielle Hydride sind mit bis zu 400 \$/kWh für eine gebrauchsfertige Tanksystemlösung noch teurer.

Zurzeit befindet sich diese Technologie noch auf einem geringen technischen Reifegrad und ist daher für mobile Anwendungen zu vernachlässigen.

## 2.3. Stand der Technik Infrastruktur

Das Sicherheitsniveau in österreichischen Straßentunnel kann im Allgemeinen als hoch bezeichnet werden. Dies ist unter anderem auf eine Standardisierung der Sicherheitsanforderungen für Tunnelanlagen auf Autobahnen und Schnellstraßen zurückzuführen. Diese minimalen Sicherheitsanforderungen wurden auf Ebene der Europäischen Union definiert und mündeten in der EU Direktive 2004/54/EG. Die darin formulierten Anforderungen an die Sicherheit in Straßentunnel beziehen sich sowohl auf die bauliche als auch auf die elektro-maschinelle Ausstattung.

### 2.3.1. EU Richtlinie Minimale Sicherheitsbedingungen /Straßentunnelsicherheits-gesetz

Mit 29. April 2004 wurde Seitens des EU Parlaments sowie des Rates die Richtlinie 2004/54/EG über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz veröffentlicht [50]. Diese Richtlinie bezieht sich auf Straßen des transeuropäischen Verkehrsnetzes mit einer Länge von > 500 m.

Gemäß Punkt 2.9 Lüftung dieser Richtlinie, ist für Tunnel von einer Länge von mehr als 1000 m und einem Verkehrsaufkommen von > 2000 Fahrzeugen im jahresdurchschnittlichen Verkehr eine mechanische Lüftung notwendig.

In Österreich erfolgte die Umsetzung dieser Richtlinie im Straßentunnelsicherheitsgesetz STSG idgF. [51]. Diese Umsetzung erfolgte für den Bereich Lüftung wortgleich zur EU Richtlinie. D.h. bei Tunnel ab einer Länge von 1000 m und einer Verkehrsstärke > 2000 KFZ/d (JDTV) ist eine mechanische Lüftung notwendig.

### 2.3.2. RVS 09.01.45 – Baulicher Brandschutz

Die RVS 09.01.45 definiert die Anforderungen des baulichen Brandschutzes für Tunnelanlagen in Österreich. Diese Anforderungen drücken sich unter anderem in vier klar formulierten Schutzziele aus. So müssen bis zu einem definierten Zeitpunkt:

- Unter Brandeinwirkung mit einer definierten Temperatur-Zeitkurve, die Tragfähigkeit der baulichen Struktur mit festgelegter Sicherheit erhalten bleiben.

- Die Standsicherheit einer Oberflächenbebauung erhalten bleiben und der Schutz Dritter an der Oberfläche gegeben sein.
- Ggf. die Dichtigkeit gegenüber einem massiven Eintritt von Wasser erhalten bleiben
- Ggf. Schäden begrenzt und auf einem technisch-wirtschaftlichen Ausmaß gehalten werden.

Die österreichischen Tunnelanlagen werden auf Basis definierter Umfeldkriterien fünf verschiedenen Schutzniveauebenen (Abbildung 57) zugeordnet.

Umfeldkriterien					
	Direkte Überbauung	Auswirkung auf Nachbarobjekte	Wasser	Verkehrswege / Oberfläche	
				Straße	
				Infrastruktur	
	1	2	3	4	
	1	2	3	4	
<b>A</b>	nicht überbaut	ohne	ohne Maßnahmen beherrschbar		Das erforderliche Schutzniveau ist mit dem Betreiber der Infrastruktur festzulegen (z.B. Bahn, Strom, Gas)
<b>B</b>		geringfügig (Gebrauchsfähigkeit bleibt erhalten)	mit Maßnahmen beherrschbar	untergeordnete Strassen Kategorie V und VI	
<b>C</b>	überbaut	wesentlich (Tragfähigkeit ist beeinträchtigt)		wichtig Kategorie III und IV	
<b>D</b>	überbaut, wichtige Objekte	wesentlich (Auswirkung auf wichtige Nachbarobjekte)	nicht beherrschbar Flutungsfahrer	sehr wichtig Kategorie I und II	
<b>E</b>	Räum- und Absperrzeiten > 120 Minuten Objekte mit hohem kulturellen Wert nicht zu A bis D zuordenbar				

Legende:

	SN 0	30 Minuten auf Basis ETK
	SN 1	30 Minuten Brandeinwirkungsdauer
	SN 2	90 Minuten Brandeinwirkungsdauer
	SN 3	120 Minuten Brandeinwirkungsdauer
	SN S	Brandeinwirkungsdauer > 120 Minuten, projektspezifisch festzulegen

Abbildung 57: Schutzniveauebenen gemäß RVS 09.01.45

Es ist sicherzustellen, dass die Bauteiloberflächentemperatur bei Beton 350°C und die Temperatur an der Bewehrung von 250°C während der durch die Schutzniveaus definierten Nachweiszeit nicht überschritten wird. Bei Bedarf sind gesonderte Schutzmaßnahmen wie

- Verwendung von plattenförmigen Bekleidungen oder Schutzschichten aus Mörtel
- Ausführung von Vorsatzschalen aus Faserbeton oder Faserspritzbeton
- Einsatz von gering wärmeleitfähigen Materialien (z.B. Leichtbeton).

zu treffen.

Des Weiteren können zum Erreichen der Schutzziele sogenannte ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen gemäß RVS 09.02.51 vorgesehen werden.

### 2.3.3. RVS 09.02.22 – Tunnelausrüstung

Die RVS 09.02.22 definiert die Anforderungen an die technische Ausrüstung der Tunnelanlagen. Hierzu zählen unter anderem die Ausführung der Energieversorgungs-, Energieverteilungs-, Erdungsanlage sowie die Überwachung der Luftqualität, Branderkennungsanlage für den Tunnelfahrraum und Löscheinrichtungen.

Speziell die in Tunnel verbaute Sensorik zur Detektion lüftungsrelevanter Größen, ist im Kontext eines Fahrzeugbrandes sowie einer H<sub>2</sub> Freisetzung von Bedeutung. Im Allgemeinen verfügen gemäß RVS 09.02.22 alle Tunnel mit mechanischer Belüftung über eine permanente Überwachung der Strömungsgeschwindigkeit, der Sichttrübung sowie der Schadstoffkonzentrationen. Hierbei bezieht sich die Schadstoffkonzentration primär auf die Konzentration von Kohlenstoffmonoxid CO. Wenn erforderlich, wird zusätzlich die Konzentration der Stickoxide NO<sub>x</sub> mit überwacht.

Die Branderkennung im Fahrraum erfolgt grundsätzlich über eine automatische Branddetektion. Dies erfolgt im Regelfall mit einem sogenannten Linearbrandmeldesystem (Brandmeldekabel). Dieses detektiert einerseits die Lufttemperatur im Fahrraum wie auch deren zeitliche Entwicklung (Gradienten). Anhand dieser Parameter, wird per Auswertalgorithmus bei Überschreitung der zulässigen Werte, ein Brand detektiert. Die maximal zulässige Dauer bis zur Branddetektion ist ebenfalls in der RVS 09.02.22 definiert (siehe Tabelle 15).

**Tabelle 15: Anforderungen an automatische Branddetektion gemäß RVS 09.02.22**

LUFTLÄNGS- GESCHWINDIGKEIT [m/s]	BRANDETEKTION [s]		BRANDLAST
	VOR- ALARM	ALARM	
< 3	60	90	2 x 1 m <sup>2</sup> mit je 10 l Spirituspool-Feuer (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH) Nominelle Brandleistung: ca. 1,5 MW
≥ 3	120	150	2 x 1 m <sup>2</sup> Dieselpool-Feuer mit je 10 l Diesel- und je 5 Liter Benzin-Kraftstoff Nominelle Brandleistung: ca. 3,5 MW

### 2.3.4. RVS 09.02.31 – Tunnel Grundlagen (Belüftung)

Die genannte RVS 09.02.31 beinhaltet u.a. die Vorgaben zur Systemwahl und Dimensionierung mechanischer Lüftungsanlagen in Straßentunnel.

Maßgeblich für die Wahl eines Lüftungssystems sind die Wirtschaftlichkeit und die sicherheitstechnische Analyse im Betriebs- und im Brandfall. Entscheidungskriterien sind Verkehrsart, Anlageverhältnisse und die Umfeldsituation. Basierend auf Risikountersuchungen von Referenztunneln erfolgte eine Festlegung von Einsatzbereichen von Lüftungssystemen.

Hierbei wird grundsätzlich zwischen einem Betrieb im Richtungsverkehr sowie im Gegenverkehr unterschieden. Aufgrund der Vorgaben der EU-RL 2004/54/EG bzw. des STSG sind die Tunnel im Bundesstraßennetz A+S >500 m zumeist als zweiröhrige Tunnel ausgeführt und werden im Richtungsverkehr betrieben. Bis zu einer Länge von 700 m ist im Fall ohne erhöhtes Verkehrsaufkommen eine natürliche Belüftung ausreichend. Bei einer Länge von 700 m bis 5.000 m kann die Belüftung als klassische Längslüftung mit Strahlventilatoren im Fahrraum erfolgen. Ab einer Länge von 5.000 m ist eine Rauchgasabsaugung in regelmäßigen Abständen oder eine Punktabsaugung vorzusehen. Tabelle 16 fasst die beschriebenen Auswahlkriterien für mechanische Belüftungssysteme tabellarisch zusammen.

**Tabelle 16: Kriterien zu Systemwahl für mechanische Belüftungsanlagen**

RV			
	NL	LL	RiA od. PA
ohne Verkehrsüberlastung <sup>3)</sup>	≤ 700 m	> 700 m bis ≤ 5.000 m <sup>1)</sup>	> 5.000 m <sup>4)</sup>
mit Verkehrsüberlastung	≤ 500 m	> 500 m bis ≤ 1.500 m <sup>2)</sup>	> 1.500 m <sup>4)</sup>

GV			
JDTV [Kfz/24 h]	NL	LL	RiA od. PA
< 5.000	≤ 700 m	> 700 m bis ≤ 3.000 m <sup>1)</sup>	> 3.000 m <sup>4)</sup>
< 10.000	≤ 500 m	> 500 m bis ≤ 2.000 m <sup>2)</sup>	> 2.000 m <sup>4)</sup>
≥ 10.000	≤ 500 m	> 500 m bis ≤ 1.500 m <sup>2)</sup>	> 1.500 m <sup>4)</sup>

NL: Natürliche Lüftung

LL: Längslüftung

RiA: Rauchabsaugung in regelmäßigen Abständen

P: Punktabsaugung

### Längslüftung:

Bei einer Längslüftung wird eine Luftströmung im Fahrtunnel in Längsrichtung generiert. Die Dimensionierung der Lüftungsanlage hat so zu erfolgen, dass eine Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 2 m/s respektive ein Frischluftvolumenstrom von mindestens 120 m<sup>3</sup>/s erreicht werden kann. Bei einer Längsneigung größer 3% erhöht sich die Dimensionierungsgeschwindigkeit auf 3 m/s.

Sind Ventilatoren, deren Zusatzeinrichtungen und Verkabelungen für den Betrieb im Rauchgas (Brandfall) vorgesehen, ist bei einer Temperatur von 400 °C über einen Zeitraum von 120 min ihre Funktionsfähigkeit sicherzustellen (z.B. mit Hilfe einer temperaturgesteuerten Fremdkühlung). Bei Ausfall eines Ventilators dürfen andere Ventilatoren in ihrer Funktionsfähigkeit nicht beeinträchtigt werden. Für Strahlventilatoren einschließlich der Verkabelungen in Tunneln mit Längslüftung und der Gefährdungsklasse I bis III und einem Strahlventilatorabstand von mindestens 200 m genügt eine Temperaturbeständigkeit von 250 °C über einen Zeitraum von 60 min.

Die Regelung der Lüftung im Brandfall erfolgt nach den gemessenen Längsströmungsgeschwindigkeiten im Tunnel. Im Gegenverkehrsbetrieb ist hierbei eine Längsströmungsgeschwindigkeit von 1,0 – 1,5 m/s und im Richtungsverkehrsbetrieb von 1,5 – 2,0 m/s zu erzielen.

### Halb- und Vollquerlüftung

Bei einer **Halbquer- respektive Vollquerlüftung** wird mit Hilfe von Axialventilatoren ein Luftvolumenstrom von mindestens 120 m<sup>3</sup>/s über Abluftjalousieklappen aus dem Fahrraum abgesaugt. Die dafür erforderlichen Absaugöffnungen sind hierfür in Abständen von maximal 110 m vorzusehen. Da die Abluftklappen im Falle eines Brandes sehr hohen Rauchgastemperaturen ausgesetzt sind, ist in der RVS eine entsprechende Temperaturanforderung (400°C über 120 min) definiert, bis zu deren Erreichung die volle Funktionsfähigkeit der Klappen erhalten bleiben muss. Die Konstruktion selbst, darf bis zu einer Temperatur von 750°C über eine Dauer von 60 min mechanisch nicht zerstört werden.

### 2.3.5. RVS 09.02.51 – Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen

Ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen dienen dazu, die Brandentwicklung zu hemmen und die Brandleistung zu begrenzen. Das zu Grunde liegende Prinzip, um dies zu erreichen ist die Verdunstungskühlung. Beim Phasenübergang von flüssigem Wasser zu Wasserdampf wird eine große Wärmemenge (Verdampfungswärme) im Dampf gespeichert, sodass sich bei einem Tunnelbrand eine Kühlwirkung ergibt. Generell werden unterschiedliche Systeme als ortsfeste Brandbekämpfungsanlagen verbaut. Dies sind einerseits Wassernebelanlagen, die in Abhängigkeit des Systemdrucks als Hochdruckwassernebelanlagen (>60 bar) oder als Niederdruckanlagen aufgebaut sein können. Von diesen Anlagen zu unterscheiden sind die Sprinkleranlagen, die in Österreichischen Tunnelanlagen bisher keine Anwendung fanden.

Die Rahmenbedingungen zur Systemkonfiguration für eine ortsfeste Brandbekämpfungsanlage sind in der RVS 09.03.51 festgehalten. Diese definiert wiederum Schutzziele, die mit Hilfe von ortsfesten Brandbekämpfungsanlagen erreicht werden sollen:

- Verbesserung der Flucht- und Rettungsbedingungen
- Verbesserung der Möglichkeit zur Brandbekämpfung durch Einsatzkräfte
- Verhinderung des Feuersprunges auf andere Fahrzeuge und Verminderung der Hitzeschäden an Anlagen und Bauwerk
- Verminderung der Kontamination von Anlagen und Bauwerk mit Brandprodukten
- Verminderung der Umweltauswirkung

Die Auslösung der Brandbekämpfungsanlage hat durch eine Branderkennungsanlage und/oder durch eine Videoüberwachung gemäß RVS 09.02.22 zu erfolgen.

Der Dimensionierung der Anlage ist zumindest eine Brandleistung von 30 MW und eine maximale Längs-Strömungsgeschwindigkeit der Tunnelluft von 10 m/s zu Grunde zu legen. Die Wirkung der Brandbekämpfung hat so zu erfolgen, dass in einem Abstand von 30 m vom Brandherd in einer Höhe von 2 m über der Fahrbahn, nach zweiminütiger Aktivierungszeit der Anlage bis zum Ende der Betriebszeit, eine Temperatur von 50°C nicht überschritten wird. Die Dauer dieser Wirkung hat, so keine abweichenden Nachweise erbracht werden, über eine Dauer von 90 Minuten zu erfolgen und den Anforderungen gemäß der Einheitstemperaturkurve (ETK) zu genügen. Wurde der Tunnel in die Schutzniveauebene

3 oder S eingestuft und die Brandbekämpfungsanlage eine Anforderung aus dem baulichen Brandschutz sein, hat die Dimensionierung auf eine Einsatzdauer von 120 Minuten zu erfolgen.

Generell ist zu erwähnen, dass eine ortsfeste Brandbekämpfungsanlage nur in wenigen Tunnelanlagen in Österreich verbaut ist. Als Beispiele können der Arlbergtunnel, der Mona-Lisa-Tunnel in Linz, der Citytunnel in Bregenz und der Tunnel Lieferung genannt werden.

Bei Betrachtung eines Tunnelbrandes mit Beteiligung eines FCEVs, ist davon auszugehen, dass die kühlende Wirkung einer Brandbekämpfungsanlage, das Risiko einer H<sub>2</sub>-Explosion verringert. Dies wird unter anderem dadurch ersichtlich, dass bei den bisher bekannten Ereignissen mit H<sub>2</sub>-Trailern, die Einsatzkräfte jeweils die Kühlung der Tanks als effektives Mittel zur Gefahrenabwehr eingesetzt haben.

### **2.3.6. Explosionsschutz**

Eine Explosion ist durch das spontane Freiwerden einer großen Energiemenge in Form von Temperatur, Druck oder kinetischer Energie charakterisiert, die unter anderem durch chemische Reaktionen bedingt sein kann. Zündfähige Substanzen, speziell jene die gasförmig unter hohen Drücken gespeichert werden, können bei einer Mischung mit Sauerstoff respektive Luft ein explosionsfähiges Gemisch bilden. Hierbei treten oftmals Stoßwellen (Druckwellen) auf, die durch die plötzliche Volumenausdehnung der Gase verursacht wird und durch die mechanische Einwirkung zu großen Schäden an Gebäuden und zu schweren Verletzungen von Personen führen kann.

Aus diesem Grund existiert der sogenannte Explosionsschutz, der grundsätzlich in drei Kategorien eingeteilt werden kann. Hierbei ist jedoch hervorzuheben, dass dieser vor allem auf Betriebsstätten an denen sich Personen aufhalten abzielt.

#### Primärer Explosionsschutz:

Das Ziel des primären Explosionsschutzes ist, die Entstehung von explosionsfähigen Atmosphären zu verhindern. Dementsprechend sind Systeme, die entzündliche Medien enthalten, dicht und aus geeigneten Materialien auszuführen. Rohrleitungen und Anschlüsse

sollten verschweißt oder hartgelötet werden [52], lösbare Verbindungen möglichst vermieden werden [53]. Ebenso sollten brandgefährliche Arbeitsstoffe auf das notwendige Minimum reduziert werden. Sollten entzündliche Stoffe zum Einsatz kommen und die Bildung einer explosionsfähigen Atmosphäre möglich sein, so sind betroffene Bereiche mit natürlichen oder mechanischen Belüftungssystemen auszustatten. Weiter sind Mess- und Alarmanrichtungen vorzusehen, die spätestens bei Erreichen von 20 % der unteren Explosionsgrenzen akustische und eventuell auch optische Warnsignale aussenden. Um diesen Grenzwert nicht zu erreichen, müssen bei vorhandener mechanischer Absaugung oder Lüftung diese entsprechend frühzeitig aktiviert werden.

#### Sekundärer Explosionsschutz:

Beim sekundären Explosionsschutz versucht man, durch die Vermeidung von Zündquellen potentielle Gasexplosionen zu vermeiden. Mögliche Zündquellen können heiße Oberflächen, offene Flammen, offenes Licht, Funken, elektrische Anlagen, statische Elektrizität, Ultraschall und Strahlungen darstellen. Auch die Reibungswärme, die bei Betätigen eines Ventils erzeugt wird, mitgerissene Teilchen im Stoffstrom oder die Erwärmung eines Gases, können ausreichen, um ein Gas zu entzünden. Abhängig von den gegebenen Umständen, müssen geeignete Gegenstände sowie Arbeitsmittel eingesetzt werden. Elektrische Anlagen müssen entsprechend der Explosionsschutzverordnung [54] [55] sowie der Verordnung explosionsfähige Atmosphären - VEXAT [56] ausgeführt sein.

Schadensminimierung: Können Zündquellen nicht ausgeschlossen werden, so gibt es weitere Sicherheitsmaßnahmen, um Schäden infolge einer Zündung zu reduzieren [57]. Einige davon sind dem konstruktiven (manchmal auch tertiären) Explosionsschutz zuzuordnen [58]. Zu den Sicherheitseinrichtungen zählen automatische und manuelle Notfallschalter, die ein fortlaufendes Austreten von Wasserstoff stoppen können und elektrische Geräte vom Stromnetz trennen. Um den Aufbau von Druckwellen entgegenzuwirken, werden Explosionsschutzkappen eingesetzt. Die Ausbreitung der Flammen in Rohren kann durch Flammendurchschlagssicherungen gewährleistet werden.

Neben diesen Maßnahmen zum Explosionsschutz, stellen eine regelmäßige Überprüfung gefährdeter Bereiche und hinreichend geschulte Mitarbeiter wichtige Punkte bezüglich der Sicherheit im Umgang mit Wasserstoff dar [52].

Aktuell besteht für die Installationen (z.B. Lüftungselemente) in den Fahrtunneln keine Anforderung, die eine explosionsgeschützte Ausführung gemäß der Explosionsschutzverordnung [54] verlangt. Die Notwendigkeit der explosionsgeschützten Ausführung von Anlagen respektive Anlagenteilen sind in VEXAT Dokumenten [56] festzuhalten.

### 2.3.7. Stand der Technik – Risikoanalyse

Die grundlegenden Vorgaben bezüglich der Anwendung bzw. der Anwendungsbereiche von Tunnelrisikoanalysen sind in der EU Direktive EC/2004/54/EC [50] definiert. Diese Vorgaben zur Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln wurden in weiterer Folge in den EU Mitgliedstaaten in nationalen Gesetzen umgesetzt. Eine Auflistung der einzelnen länderspezifischen Verfahren ist etwa im PIARC C3.3 Bericht: „Risk analysis for road tunnels“ aus dem Jahre 2008 zu finden [59]. Jenes Verfahren, welches in Österreich angewandt wird, wurde mit der Veröffentlichung der RVS 09.03.11 – TuRisMo 2.0 in das nationale Regelwerk übergeführt, siehe Abschnitt 2.4.1. Als weitere länderspezifische Methoden, sind etwa die Risikoanalyseverfahren in Deutschland und Frankreich zu nennen. Das in Deutschland angewendete Tunnelrisikoanalyseverfahren ist im „Leitfaden für Sicherheitsbewertungen von Straßentunneln gemäß RABT 2006“ definiert [60]. Die Methodik zur Durchführung quantitativer Risikoanalysen ist im Heft B66 „Sicherheitsbewertung von Straßentunneln“ beschrieben [61]. Das Regelwerk das in Frankreich als Grundlage für die Durchführung von Risikoanalysen dient wurde 2003 in „Specific Hazard Investigation – Guide to Road Tunnel Safety Documentation Booklet 4“ veröffentlicht.

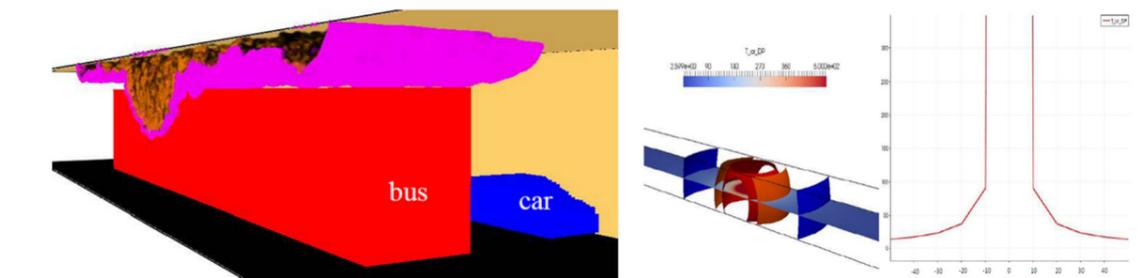
Die drei genannten nationalen Verfahren sind für das gegenständliche Forschungsprojekt insofern von Interesse, als in allen drei erwähnten Verfahren die Mitberücksichtigung alternativ angetriebener Fahrzeuge und deren Gefahren in Tunnelanlagen in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht wurden.

Österreich – BRAFA: Die Bewertung von Bränden batteriebetriebener Fahrzeuge wurde im Zuge des Forschungsvorhabens BRAFA [62] im Detail untersucht. Auf Basis von Ergebnissen aus experimentellen Untersuchungen wurden Modellbrandkurven entwickelt, welche einerseits die zusätzlich entstehenden Schadstoffe und andererseits die höheren Brandlasten, mitberücksichtigen. Diese Modellbrandkurven können explizit in das österreichische Tunnel Risiko Analysemodell (TuRisMo) mit aufgenommen werden, wodurch nun die Risikobewertung batteriebetriebener Fahrzeuge im Verkehrsmix ermöglicht wird.

Deutschland – BAST: Im BAST Forschungsprojekt [63] wurde eine Verkehrsstudie entsprechend aller, für das Jahr 2040 relevanten alternativ angetriebenen Fahrzeuge, durchgeführt. Für jede relevante Antriebsart wurde das Ausmaß möglicher Schadensszenarien mit Hilfe analytischer Modelle und unter Einsatz von CFD Modellen, in der

Konsequenzanalyse berücksichtigt. Die Risiken die speziell für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge bewertet wurden, sind die Gefahr der Flammenfront und des Überdrucks infolge einer VCE, und die Gefahr des Wasserstoff-Freistrahlandes. Das resultierende Risiko wurde dann anhand der Vorgaben des überarbeiteten Verfahrens zur Durchführung von Risikoanalysen [63] ermittelt.

Frankreich – INERIS/CETU: In diesem Forschungsvorhaben [64] wurden alle relevanten alternativen Energieträger betrachtet. Erste Häufigkeiten wurden anhand einer Fehlerbaum bzw. Ereignisbaumanalyse ermittelt. Zur detaillierten Bewertung des Ausmaßes von definierten Szenarien wurden CFD Modelle verwendet (siehe Abbildung 58).



**Abbildung 58: Auswahl an Ergebnissen der numerischen Untersuchungen aus [64]**

#### RVS 09.03.11 - Risikoanalyse

Die RVS 09.03.11 beschreibt das in Österreich eingesetzte Tunnel-Risikomodell, welches entwickelt wurde, um mögliche Gefahren quantitativ bewerten zu können. Hierzu werden Risikoszenarien hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens sowie ihres Schadensausmaßes analysiert. Die zu betrachtenden Szenarien sind dabei in einem Ereignisbaum, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Ereignisabläufe (Freier Verkehr / Stau, Unfall / Panne, PKW / LKW / BUS, Brand / kein Brand, etc.), organisiert. Die Methodik umfasst eine Standard- sowie eine detaillierte Risikoanalysemethodik. In die Standard-Risikoanalyse werden Schadensausmaßwerte (im Speziellen für Tunnelbrände) für den untersuchten Tunnel, auf Basis von vorberechneten Schadensausmaßwerten für spezielle Tunnelparameterwerte, durch Interpolation, bestimmt. Für die detaillierte Risikoanalyse, werden die Schadensausmaßwerte durch eigene computergestützte Lüftungs- sowie Rauchausbreitungssimulationen, in Verbindung mit Evakuierungsmodellen, neu berechnet.

Diese detaillierte Methodik wurde auch zur Berechnung der in der Standardmethode verwendeten Schadensausmaßwerte eingesetzt.

Die Häufigkeiten werden, sowohl für Standard- als auch detaillierte Risikoanalysemethodik anhand eines definierten Formelwerkes sowie unter Berücksichtigung der speziellen Tunnelparameter (z.B. Verkehr und Länge) berechnet. Die Summe der Einzelrisiken der jeweiligen Szenarien, bildet das Gesamtrisiko. Dieses wird einerseits in einem relativen Ansatz, durch Vergleich mit dem Risiko eines richtlinienkonformen Referenztunnels, zur Bewertung des Sicherheitsniveaus des betrachteten Tunnel verwendet. Andererseits wird der Tunnel anhand des Absolutwertes des Gesamtrisikos sogenannten Gefährdungsklassen (siehe Tabelle 17) zugeordnet. Der Vergleich des Gesamtrisikos mit dem Gesamtrisikos des Referenztunnels ist für die allgemeine Zulässigkeit des Tunnels hinsichtlich der Personensicherheit relevant. Überschreitet das Gesamtrisiko jenes des Referenztunnels, sind zusätzliche risikomindernde Maßnahmen zu treffen (siehe Abbildung 59). Die Einteilung in Gefährdungsklassen dient zur Vorauswahl der benötigten sicherheitstechnischen Ausrüstung.

**Tabelle 17: Gefährdungsklassen gemäß RVS 09.03.11**

Risikoerwartungswert		Gefährdungsklasse
untere Grenze	obere Grenze	
	0,02	<i>I</i>
0,02	0,1	<i>II</i>
0,1	0,5	<i>III</i>
0,5		<i>IV</i>

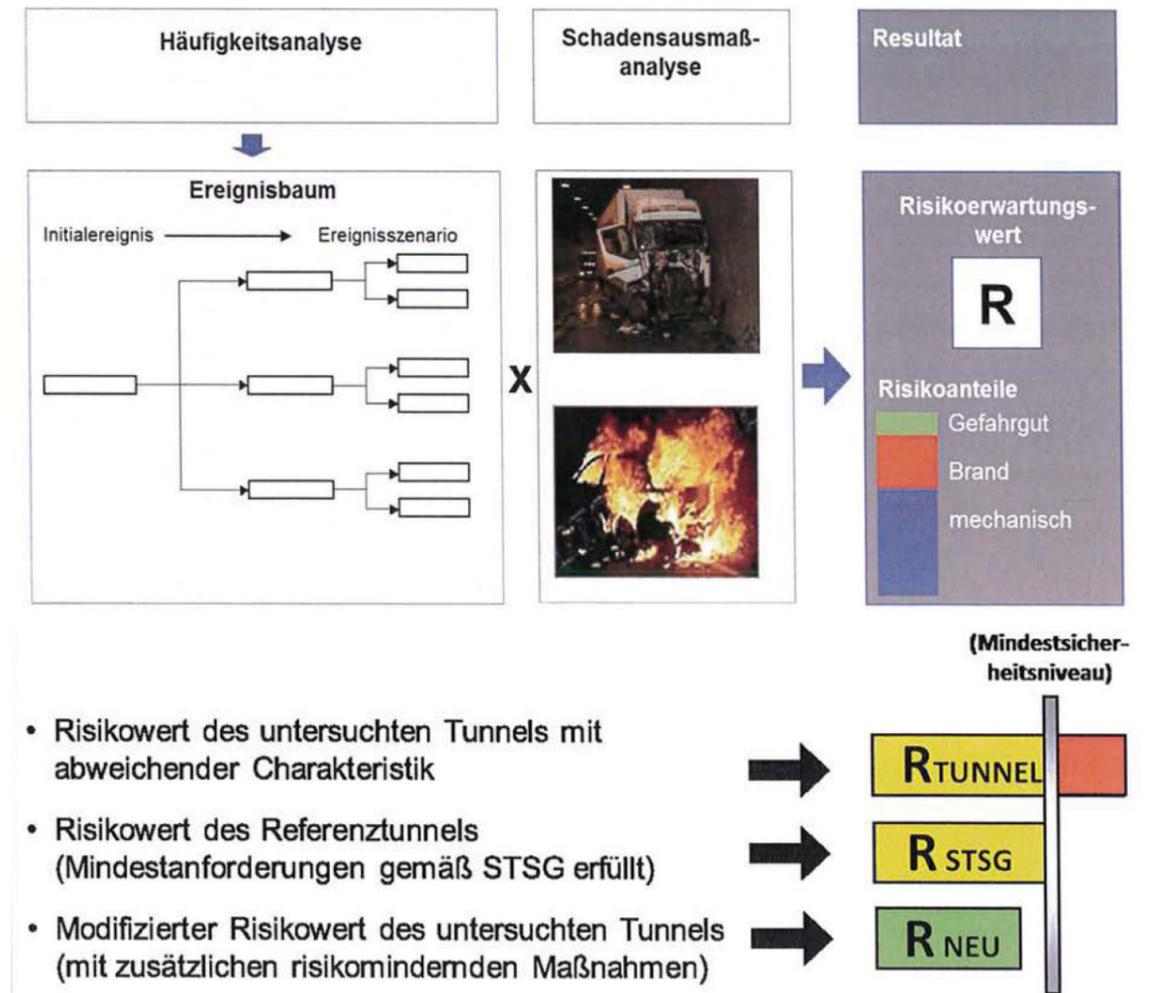


Abbildung 59: Methodik der Risikoanalyse gemäß RVS 09.03.11

## 2.4. Defizitanalyse

### 2.4.1. Defizite bezogen auf Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge und e-fuels

#### Standards und Normen

Weltweit gibt es keine einheitlichen Richtlinien für die Zulassung von FCEVs. Die zentralen Marktregionen EU, USA, China, Korea und Japan haben derzeit unterschiedliche Regulatorien. Dies erschwert die Marktdurchdringung dieser Fahrzeuge und führt zu unklaren Sicherheitsstandards aufgrund unterschiedlicher gesetzlicher Anforderungen. Ein erster Schritt in die richtige Richtung wurde mit der Übernahme der UN-Regelung Nr. 134 seitens der EU getätigt. Diese ersetzt die bisherige Verordnung EC 79/2009 seit dem 05.07.2022.

Der Anwendungsbereich der UN-Regelung Nr. 134 ist jedoch viel kleiner als der der Verordnung (EG) Nr. 79/2009, da die UN-Regelung Nr. 134 sich nur auf die sogenannten „Speicher für komprimierten Wasserstoff System (CHSS)“ bezieht. Gemäß der Definition besteht ein typisches CHSS aus den Komponenten „Tank/Lagerbehälter Behälter“, „Behälter-Absperrventil Ventil“, „Rückschlagventil“ und „TPRD“. Wie aus Abbildung 60 ersichtlich, fallen viele Komponenten aus der Verordnung (EG) Nr. 79/2009 nicht in den Anwendungsbereich der UN-Regelung Nr. 134, was zeigt, dass die Regelungen nicht vollständig deckungsgleich sind. Darüber hinaus konzentriert sich die UN-Regelung Nr. 134 auf gasförmigen Wasserstoff und es gibt keine vergleichbare UN- oder UN/ECE-Regelung für „Flüssigwasserstoff-Speichersysteme (LHSS)“. Für flüssigen Wasserstoff, war die Verordnung (EG) Nr. 79/2009 für lang Zeit die einzige Verordnung für die EU-Typgenehmigung und Typenzulassung. Die UN-Regelung Nr. 134 stellt auch keine Anforderungen an die Sicherheit des elektrischen Antriebsstrangs, die Integrität des Kraftstoffsystems nach einem Aufprall, und Materialverträglichkeit. Unter der Verordnung ist festgelegt, dass die maximale Nutzungsdauer der Wasserstoffbehälter 15 Jahre nicht überschreiten darf, während sie in der Verordnung (EG) Nr. 79/2009 20 Jahre betrug [34].

COMPONENTS CONSIDERED IN REG. (EC) 79/2009, UN REGULATION NO 134 AND REG. (EU) 2021/535			
	Reg. (EC) 79/2009	UN Regulation No 134	Reg. (EU) 2021/535
<b>Compressed gaseous hydrogen (CGH2)</b>			
Hydrogen container	x	x	x
PRD	x	x	x
Automatic shut-off valves	x	x	x
Check valves	x	x	x
Pressure relief valves	x		
Heat exchangers	x		
Refueling connections	x	(x)	(x)
Receptacles	x	(x)	(x)
Pressure regulators	x		
Sensors for hydrogen systems	x	(x)	
Flexible fuel lines	x		
Fittings	x		
Hydrogen filters	x		
Removable storage system connectors	x		

**Abbildung 60: Berücksichtigte Komponenten in den verschiedenen Regelwerken [34]**

Seit dem genannten Datum sind Typgenehmigungen nach der Verordnung (EG) Nr. 79/2009 nicht mehr möglich, so dass hier erhebliche Lücken bestehen bleiben. Für Komponenten wie Druckregler, Sensoren und Armaturen wird es keinen anwendbaren Rahmen der Typgenehmigung geben.

#### Feuersicherheit von H<sub>2</sub>-Tanksystemen (CGH2)

Die Feuersicherheit von Hochdruck-Wasserstoffbehältern bei wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen ist eine kritische Eigenschaft. Mithilfe des TPRDs kann der Druck im Tank durch Ablassen von H<sub>2</sub> so schnell reduziert werden, dass es nicht zum Bersten des Behälters kommt. Im Umkehrschluss bedeutet dies jedoch, dass ein Versagen des TPRDs zum Bersten des H<sub>2</sub>-Behälters führen kann, da keine andere Back-Up Funktion vorgesehen ist. Zusätzlich können beim Auslösen des TPRDs Gefahren wie Druckwellen, Feuerbälle, lange Flammen und Druckspitzenphänomene in geschlossenen Räumen auftreten, und zu erheblichen Verletzungen von Menschen führen.

Der max. TPRD-Durchmesser, der maßgeblich die erwähnten Gefahren beeinflusst, wurde bisher in der Verordnung (EG) Nr. 79/2009 nicht reglementiert. In der UN-Regelung Nr. 134 wurde im Zuge der Feuersicherheitsprüfung eine max. Flammenlänge von 0,5 m festgesetzt. Dies führt zu einer deutlichen Verbesserung der Sicherheitseigenschaften, da dadurch

einerseits ein TPRD-Durchmesser kleiner 1 mm und andererseits eine höhere FRR des Behälters notwendig ist.

Die Fail-Safe Funktion des TPRDs bleibt jedoch weiterhin bestehen. Daher sind weitere Entwicklungen hinsichtlich neuer Sicherheitstechnologien für den H<sub>2</sub>-Behälter im Falle eines Brandes notwendig. Innovative Ansätze, wie die Entwicklung eines TPRD-losen Behälters mit einem schmelzfähigen Liner, gehen in die richtige Richtung.

Marktsituation

Aufgrund der niedrigen Anzahl an Fahrzeugen auf den Straßen gibt es daher auch wenig Erfahrungswerte hinsichtlich des Verhaltens dieser Fahrzeuge in realen Unfallsituationen. Umso wichtiger ist die Erforschung dieser Szenarien mittels virtueller und praktischer Simulationen, um für zukünftige Ereignisse auf Seiten der Infrastruktur und Einsatzorganisationen vorbereitet zu sein.

**2.4.2. Defizite bezogen auf Tunnel Infrastruktur**

Das zu erwartete Schadensausmaß bezogen auf die Tunnelinfrastruktur ist stark vom Gefahrenszenario abhängig. Die Bandbreite an Konsequenzen von Unfällen mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeugen reicht von Unfällen ohne Freisetzung von H<sub>2</sub> bis hin zu Explosionsszenarien durch Versagen des Tanks respektive Entzündung einer Wasserstoffwolke (Gas Cloud Explosion).

Im Allgemeinen kann innerhalb dieser Bandbreite von folgenden Gefahren ausgegangen werden:

**Tabelle 18: Mögliche Gefahren durch Ereignisse mit Wasserstofffahrzeugen**

G1	Keine Freisetzung von Wasserstoff	Keine Gefahr
G2	Freisetzung von Wasserstoff ohne Entzündung	Keine Gefahr (geringe Wasserstoff Menge bei Freisetzung aus Leckage) Explosionsgefahr (bei relevanter

		Wasserstoffmenge – Freisetzung durch Abbruch eines Ventils)
G3	Freisetzung mit Entzündung	Thermische Gefahr durch Wasserstoff-Freistrahbrand
G4	Explosion des Tanks	Thermische und mechanische Gefahr durch Ausbildung eines Feuerballs und einer Druckwelle
G5	Unverbrannte Freisetzung von Wasserstoff in relevanten Mengen	Explosion einer Wasserstoffwolke

Während ein Ereignis gemäß G1 ohne Konsequenzen bezogen auf die Gefahren durch Wasserstoff bleibt, stellt G2 eine besondere Gefahrensituation dar. Dies ist primär dadurch bedingt, dass mit den derzeit in österreichischen Straßentunnel verbauten Sicherheitseinrichtungen eine Detektion des freigesetzten Wasserstoffs nicht möglich ist. In Abhängigkeit der verbauten Sensorik könnte hier Kohlenstoffmonoxid CO als Indikatormittel fungieren. Der Nachweis der Umsetzbarkeit und Zuverlässigkeit dieser Erfahrungen aus Industrieanlagen ist jedoch noch zu erbringen.

Auf Grund der stoffspezifischen Eigenschaften von Wasserstoff (geruch- und farblos), kann eine Detektion auch nicht durch visuelle Beobachtung (Kameras) erfolgen. Unter Berücksichtigung der Betätigungstemperatur der TPRDs von 110°C kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei der Freisetzung einer relevanten Menge an Wasserstoff, bereits ein Primäreignis aufgetreten ist, welches mit der üblichen Sensorik erfasst wurde und zu einer Aktivierung der Lüftung geführt hat.

Bei kleinen ausgetretenen Wasserstoffmengen (z.B. bei Bruch einer Wasserstoffleitung) ist auf Grund der Verdünnung mit Frischluft von keinen nennenswerten Konsequenzen auszugehen. Bei größeren Mengen an ausgetretenem Wasserstoff, kann aus der Gefahr G2 jedoch in weiterer Folge in eine Gefahr G5 münden. Dieses tritt auf, wenn die entstandene Wasserstoffwolke mit einer Zündquelle in Kontakt gerät. Eine solche Zündquelle kann unter anderem eine Oberfläche mit hoher Temperatur oder ein elektrischer Impuls sein. Kommt es zu einer solchen Gas Cloud Explosion, ist von großen Schäden an der Tunnelinfrastruktur sowie schwerwiegenden Folgen für die Gesundheit und das Leben der im Tunnel befindlichen Personen auszugehen. Hierbei ist zu erwähnen, dass die elektro-maschinellen Anlagen in den Tunnelanlagen aktuell nicht explosionsgeschützt ausgeführt sind, da die Tunnelatmosphäre keine explosionsfähige Atmosphäre im Sinne des Arbeitnehmerschutzgesetzes (ASchG) [65] ist. Die bestehenden Vorgaben bezogen auf den Explosionsschutz sind in sogenannten VEXAT Dokumenten festgehalten und zielen auf explosionsfähige Atmosphären gemäß dem ASchG ab. Somit beziehen sich diese primär auf Betriebsgebäude (z.B. Batterieräume) und beinhalten somit keinerlei Vorgaben bezogen auf die Einbauten im Fahrtunnel.

Auch in Szenario 3 kann eine Detektion des Ereignisses nicht mit absoluter Sicherheit erfolgen. Die Positionierung des TPRDs bei PKWs sowie die vorgesehene Ausblasrichtung zur Fahrbahn, führt nicht zwangsläufig zu einem detektierbaren Temperaturanstieg im Bereich der Branderkennungsanlage. Hierbei spielt die Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel respektive der daraus resultierende Frischluftmassenstrom und dessen Kühlwirkung eine wesentliche Rolle.

Ausgehend von einer Wasserstofffreisetzung mit Entzündung bei einem PKW, führt die dabei auftretende Wasserstoffflamme (Jet-flame bzw. Freistrahlfamme) zu einer lokal begrenzten aber erheblichen thermischen Einwirkung auf die Fahrbahn, sodass von Schäden an dieser auszugehen ist. Bei LKWs und Bussen ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Einbauposition der Tanks sowie TPRDs sowie die Ausblasrichtung des Wasserstoffs unterscheiden sich jedoch von jener bei PKWs. Die thermische Einwirkung der Wasserstoffflamme kann somit ebenso die Tunnelwände respektive die Tunneldecke betreffen.

Im Vergleich zu den bereits erläuterten Szenarien ist bei Szenario 4 davon auszugehen, dass dieses kein Primärereignis darstellt. Dies ist dadurch begründet, dass die Explosion eines Tanks die Folge eines erheblichen Anstiegs des Tankdrucks ist, welcher durch eine massive thermische Einwirkung (z.B. Brand des Fahrzeugs) auftritt. Hierbei ist davon auszugehen,

dass das Primärereignis bereits detektiert wurde. Die Herausforderung hingegen ist, das Risiko des Versagens eines Tanks bewerten zu können. Ein essentieller Faktor in einem solchen Szenario ist, das Erkennen des Fahrzeugtyps durch die Feuerwehr, um eine Kühlung der Wasserstoff Tanks zu ermöglichen. Sollte eine Explosion des Tanks nicht verhindert werden können, ist zufolge der thermischen (Feuerball) und mechanischen (Druckwelle) Einwirkung von massiven Schäden an der Tunnelinfrastruktur auszugehen.

Ein wesentlicher Punkt bei der Gefahrenabwehr ist das Erkennen und die Bewertung des Risikos. Der aktuelle Fahrzeugmix auf österreichischen Straßen beinhaltet konventionell betriebene Fahrzeuge, BEVs, FCEVs sowie CNG und LPG Fahrzeuge.

Die Kennzeichnung eines FCEVs erfolgt derzeit nicht eindeutig, da es gleich wie BEVs als zero-emission Fahrzeug eingestuft ist und somit über eine grüne Nummerntafel verfügen kann. Beim Einsatz von H<sub>2</sub> in einem Verbrennungsmotor, fällt diese Kennzeichnung weg, da auf Grund der bei einer heißen Verbrennung entstehenden Stickoxide, das Fahrzeug nicht mehr als zero-Emission Fahrzeug eingestuft wird. Im Realfall hat die Erkennung eines H<sub>2</sub>-Fahrzeuges bzw. FCEVs durch die Einsatzkräfte respektive den Tunnelbetreiber zu erfolgen. Analog dazu ist die Bewertung, des von einem solchen Fahrzeug ausgehendem Risikos, ebenfalls den Einsatzkräften überlassen. Bei einem Ereignis mit mehreren Fahrzeugen wie zum Beispiel bei einer Karambolage, ist dies jedoch kaum möglich.

Eine Möglichkeit das Risiko zu minimieren, ist eine Voraktivierung der Lüftung bei einem relevanten Ereignis (z.B. Unfall, Staubbildung, etc.) im Tunnel, um bei einer etwaigen H<sub>2</sub> Freisetzung eine Verdünnung des freigesetzten Wasserstoffs und somit eine Reduktion der auftretenden H<sub>2</sub>-Konzentration zu bewirken. Aktuell ist eine solche Lüftungssteuerung jedoch in Österreich nicht umgesetzt.

Um qualitativ hochwertige Schlüsse für alle Szenarien ziehen zu können, ist ein vertieftes Verständnis über das Verhalten von Wasserstoff, sowie die Interaktion des Wasserstoffs mit den aktuell in Tunnel verbauten Sicherheitseinrichtung (z.B. Belüftung, Wassernebelanlagen, etc.) erforderlich. Dieses Zusammenwirken wurde bisher nur unzureichend untersucht, sodass definitiv weiterer Forschungsbedarf besteht. Dieser bezieht sich einerseits auf die notwendigen Anforderungen auf die elektro-maschinelle Ausrüstung, wie z.B. die Lüftungsstrategie, aber auch an den baulichen Brandschutz und die Anforderungen an die Tunnelstruktur.

Tabelle 19: Übersicht über mögliche Unfallereignisse, deren Gefahrenpotentiale und die Gefahrenabwehr fasst die wesentlichen Schlussfolgerungen in der auf die Tunnelinfrastruktur bezogenen Defizitanalyse, anhand der relevanten Ereignisszenarien, deren Gefahrenpotenzial und die mit der aktuellen Tunnelinfrastruktur durchführbare Gefahrenabwehr, nochmals kompakt zusammen.

	Beschreibung	Gefahrenpotenzial	Gefahrenabwehr	Anmerkung
S1	Keine H2 Freisetzung	keines	Keine Abwehr notwendig	-
S2	Freisetzung von H2 ohne Entzündung	mittel	nicht detektierbar	Geringe H2 Menge, kein Primärereignis
S3	Freisetzung mit unmittelbarer Entzündung	gering/mittel	mitunter nicht detektierbar	Wahrscheinlich kein Primärereignis
S4	Explosion des Tanks	hoch	Primärereignis wurde bereits erfasst, Aktivierung der Lüftung	Risiko muss durch Feuerwehr erkannt und bewertet werden
S5	Explosion einer H2-Wolke	hoch	Wolke nicht detektierbar, Lüftung aktiv	Wahrscheinlich kein Primärereignis

**Tabelle 19: Übersicht über mögliche Unfallereignisse, deren Gefahrenpotentiale und die Gefahrenabwehr**

### 2.4.3. Defizite bezogen auf Risikoanalyse

Das Hauptaugenmerk der meisten bisher durchgeführten Risikoanalysen unter Berücksichtigung alternativer Antriebsarten lag auf der Mitberücksichtigung von Bränden batteriebetriebener Fahrzeuge im Tunnel [62]. Wurden zusätzliche alternative Antriebe wie etwa Wasserstoff oder CNG mitbetrachtet, basierten die Konsequenzmodelle meist auf Ergebnissen aus Kleinversuchen, oder auf älteren experimentellen Studien, welche oftmals nicht in einer realistischen Tunnelumgebung durchgeführt wurden [63]. Aufgrund der steigenden Bedeutung des Wasserstoffs als alternativer Energieträger und dessen möglicher Einsatz im Transportsektor, werden aktuell intensive experimentelle Untersuchungen zu Wasserstoffvorfällen in Tunneln durchgeführt. Hier ist insbesondere das HyTunnel-CS Projekt zu nennen. Es ist daher notwendig, diese neugewonnen Forschungsergebnisse zu berücksichtigen und die Methoden zur risikoanalytischen Betrachtung von Wasserstoffbränden und Explosionen in Tunnelanlagen zu erweitern bzw. anzupassen. Besondere Bedeutung kommt dabei der Validierung von CFD Analysen und analytischen Schadensausmaßmodellen zu, die wichtige Bestandteile der bis dato entwickelten Risikoanalysemethoden hinsichtlich Wasserstoffereignissen sind.

Zusätzlich zur Konsequenzbetrachtung ist auch die Häufigkeitsanalyse ein wichtiger Teil einer Tunnelrisikobewertung. Häufigkeitsaussagen z.B. hinsichtlich Tunnelbränden, werden üblicherweise aus statistischen Analysen abgeleitet. Aufgrund des bisher verschwindend geringen Marktanteils von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen und des damit verbundenen Fehlens statistisch belastbarer Daten, ist auch das Abschätzen der Ereignishäufigkeiten mit sehr hohen Unsicherheiten behaftet. Die bisher bzw. in naher Zukunft durchgeführten Betrachtungen der Wahrscheinlichkeit von Wasserstoffereignissen in Straßentunneln, müssen daher den in Zukunft vorhandenen Unfallstatistiken (bei höheren Marktanteilen von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen) gegenüber gestellt und validiert bzw. wenn notwendig adaptiert werden.

Aufgrund der fehlenden Datengrundlage und des gänzlich unterschiedlichen Szenarien Ablaufs von Wasserstoffereignissen im Vergleich zu konventionellen (und BEV) Bränden, ist die Ableitung von belastbaren Ereignishäufigkeiten und damit eine vollumfängliche Integration von Wasserstoffereignissen in den TuRisMo Ereignisbaum gemäß RVS 09.11.03 zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll möglich. Um eine aussagekräftige und belastbare Analyse der Risiken

von Ereignissen mit Beteiligung von Wasserstofffahrzeugen in Tunnelanlagen zu ermöglichen, wird daher für diese Studie ein alternativer risikoanalytischer Zugang, in Form einer qualitativen Häufigkeitsbewertung, mittels Ereignis- und Fehlerbaumanalyse, in Kombination mit einer quantitativen Schadensausmaßbewertung, gewählt (siehe Kapitel 3.4 bzw. Kapitel 5).

### 3. ERMITTLUNG DER GEFAHRENQUELLEN UND DES GEFAHRENPOTENTIALS

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Erarbeitung von Ereignisszenarien in Tunnelanlagen auf Basis der spezifischen Gefahrenquellen und des Gefahrenpotentials von FCEVs. Hierzu werden die sicherheitsrelevanten Eigenschaften von Wasserstoff zusammengefasst und die Unterschiede zu konventionellen Brennstoffen hervorgehoben. Die Gefahren, mit unter Druck stehendem Wasserstoff einhergehen, werden detailliert erarbeitet. Wie es zu einem Schadensereignis kommt, wird durch sogenannte Unfallfaktoren beeinflusst. Durch geeignete Kategorisierung und Analyse realer Ereignisabläufe (siehe: PIARC Report 2019R03, „Prevention and Mitigation of Tunnel-related Collisions“, PIARC TC D.5) können realitätsnahe Unfall- bzw. Ereignisszenarien gebildet werden. Diese werden in weiterer Folge für die Simulationen der Schadensauswirkungen in AP4 als Ausgangsbasis herangezogen.

#### 3.1. Sicherheitsrelevante Eigenschaften des Wasserstoffs

In diesem Abschnitt werden die Eigenschaften von Wasserstoff beschrieben, die für die Gefahren und Sicherheitsvorkehrungen in Tunneln relevant sind.

##### 3.1.1. Physikalische und chemische Eigenschaften

Wasserstoff ist das leichteste bekannte Element mit einer Atommasse von 1,008 g/mol. Die Atomkonfiguration des in der Natur am meisten verbreiteten Isotops (Protium) umfasst ein Proton im Kern und ein Elektron in der Atomhülle. Im Wasserstoffgas verbinden sich die Atome unter normalen Bedingungen durch kovalente Bindungen zu zweiatomigen Molekülen. Jedes der beiden Atome ist durch einen relativen Spin des Kerns gekennzeichnet. Wenn die Spins die gleiche Richtung haben, wird das Molekül als ortho-Wasserstoff definiert. Im Falle einer antiparallelen Konfiguration mit gegenläufigen Spins wird das Molekül als Para-Wasserstoff bezeichnet und hat etwas andere physikalische Eigenschaften als ein ortho-Wasserstoffmolekül. Unter normalen und Gleichgewichtsbedingungen besteht Wasserstoff zu 75 % aus ortho-Wasserstoff und zu 25 % aus para-Wasserstoff. Mit sinkender Temperatur nimmt der Anteil des para-Wasserstoffs im Gleichgewichts-Wasserstoffgas zu und erreicht bei 20 K 99,8 % für flüssigen Wasserstoff [36].

Die Dichte von Wasserstoff unter normalen Bedingungen (NTP) beträgt nur 0,0838 kg/m<sup>3</sup> (weit weniger als die Dichte von Luft mit 1,205 kg/m<sup>3</sup> unter denselben Bedingungen). Um höhere Kapazitäten zu erreichen, wird Wasserstoff in gasförmigem Zustand unter hohem Druck oder als kryokomprimierter oder flüssiger Wasserstoff gespeichert. Die kritische Temperatur und der kritische Druck von Wasserstoff liegen bei 33,15 K bzw. 12,96 bar, was einer Dichte von 31,26 kg/m<sup>3</sup> entspricht. Der Tripelpunkt ist für eine Temperatur von 13,8 K und einen Druck von 0,072 bar angegeben. Die Temperatur am normalen Siedepunkt (NBP) beträgt 20,37 K (P=1 bar) und die Dichte 70,90 kg/m<sup>3</sup>. Ein Phasenwechsel von Flüssigkeit zu Gas würde eine Expansion des Gases mit einer Volumenvergrößerung um das etwa 850-fache bewirken. Das Expansionsverhältnis ist auch bei Wasserstoff, der unter hohem Druck gespeichert wird, hoch, z.B. ergibt Wasserstoff bei 25 MPa ein Expansionsverhältnis von 240. Im Falle einer Freisetzung von Wasserstoff in einem Gehäuse, entweder als Flüssigkeit oder als Hochdruckgas, kann der Überdruck so hoch werden, dass die Struktur zerstört wird [36].

Wasserstoffgas ist farblos, geruchlos und geschmacksneutral. Aufgrund dieser Eigenschaften ist ein Wasserstoffleck schwer zu erkennen. Hochdruck-Wasserstofflecks können in einigen Fällen durch ein spezifisches Zischgeräusch erkannt werden. Der hohe Reinheitsgrad, der für die Verwendung von Wasserstoff in Brennstoffzellen erforderlich ist, verhindert die Zugabe von chemischen Verbindungen zur Beduftung des Gases, wie dies bei Mercaptanen zur Beduftung von Erdgas der Fall ist. Trotz dieser Eigenschaften ist Wasserstoff ungiftig, und gesundheitsgefährdende Auswirkungen einer hohen Wasserstoffkonzentration sind hauptsächlich auf Sauerstoffmangel zurückzuführen. Obwohl Wasserstoff in hohen Konzentrationen ungiftig ist, kann er in geschlossenen Räumen zur Erstickung führen [36].

Die geringe Größe der Wasserstoffmoleküle führt zu einer hohen Diffusionsfähigkeit des Gases, wobei die Werte der Wasserstoffdiffusionsfähigkeit in Luft von  $6,1 \cdot 10^{-5}$  bis  $6,8 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s reichen. Dieser Wert ist höher als bei allen anderen Stoffen. So beträgt die Diffusionsfähigkeit von Wasserstoff in Luft etwa das Dreifache des Koeffizienten für Methan [36].

Die Wärmekapazität von Wasserstoff ist trotz seiner geringen Molekülmasse ähnlich wie jene anderer zweiatomiger Gase. Die spezifische Wärme von GH<sub>2</sub> bei konstantem Druck  $c_p$  beträgt (in kJ/kg/K): 14,85 (NTP), 14,304 (STP), 12,15 (NBP). Die spezifische Wärme von LH<sub>2</sub> am Siedepunkt beträgt 9,66 kJ/kg/K. Die spezifische Wärme von flüssigem Para-Wasserstoff bei konstantem Druck beträgt  $c_p = 9,688$  kJ/kg/K. Die Gaskonstante von Wasserstoff beträgt 4,1243 kJ/kg/K (d.h. die universelle Gaskonstante geteilt durch das Molekulargewicht). Das

Verhältnis der spezifischen Wärme ( $\gamma$ ) von Wasserstoff bei Normalbedingungen liegt bei 1,39 und bei Standardbedingungen bei 1,405 [36].

Die Wärmeleitfähigkeit von Wasserstoff ist deutlich höher als die Wärmeleitfähigkeit anderer Gase: für  $\text{GH}_2$  beträgt sie 0,187 W/m/K bei Normalbedingungen [36].

Die Schallgeschwindigkeit in gasförmigem Wasserstoff beträgt 1304 m/s und 1119 m/s in flüssigem Wasserstoff. Die Schallgeschwindigkeit in einem stöchiometrischen Wasserstoff-Luft-Gemisch beträgt 404 m/s [36].

Die Verbrennung von Wasserstoff in einer reinen Atmosphäre erzeugt eine weitestgehend unsichtbare (Hitzeflimmern) Flamme. Dies könnte in einem Unfallszenario die Erkennung der Flamme durch das Auge erschweren, es sei denn, Staub und andere Stoffe aus der Umgebung werden vom Strahl mitgerissen und verbrennen mit sichtbarer Strahlung. Es ist zu erwarten, dass in vielen Fällen die Flamme selbst, das hohe Turbulenzniveau und die heißen Verbrennungsprodukte Veränderungen in der Umgebung hervorrufen, die dazu genutzt werden können, das Vorhandensein der Flamme visuell und durch Detektoren zu erkennen. Die Temperatur der vorgemischten Wasserstoffflamme kann bei einem stöchiometrischen Gemisch 2403 K erreichen, was etwas höher ist als bei anderen Brennstoffen. Ein stöchiometrisches Gemisch besteht aus 29,59 Vol.-% Wasserstoff und 70,41 Vol.-% Luft. Gemische, deren Wasserstoffkonzentration unter dem stöchiometrischen Wert liegt, werden als "mager" bezeichnet, während sie bei höheren Werten als "fett" bezeichnet werden. Die Mindestmenge an Sauerstoff für eine Flammenausbreitung unter NTP-Bedingungen beträgt 5 Vol.-% [36].

Der untere Heizwert von Wasserstoff beträgt 119,93 MJ/kg, der obere Heizwert beträgt 141,86 MJ/kg und beinhaltet die Kondensationswärme des Wasserdampfes. Wie aus Tabelle 20 hervorgeht, ist die Verbrennungswärme von Wasserstoff daher viel höher als anderer Kraftstoffe, die üblicherweise im Automobilbereich verwendet werden. Daher kann bei Wasserstoffbränden in einem Unfallszenario, an dem ein FCEV beteiligt ist, vorübergehend eine höhere Wärmefreisetzungsrate durch Wasserstoff auftreten als bei einem herkömmlichen Fahrzeug, z.B. im Moment der Auslösung des TPRDs mit großem Durchmesser. Allerdings ist die Masse des in einem bordeigenen Speichersystem enthaltenen Wasserstoffs geringer als herkömmlicher Kraftstoffe, was die freigesetzte Gesamtenergie verringern könnte. Die Dauer eines Autobrandes kann bis zu 2 Stunden betragen, während die Freisetzung von Wasserstoff

in der Regel nur wenige Minuten, wenn die Druckentlastungsvorrichtung rechtzeitig aktiviert und während eines Unfalls nicht blockiert wird [36].

Der Zündbereich von Wasserstoff liegt bei 4-75 Vol% (UEG-OEG). Das bedeutet, dass ein Gemisch mit einer Wasserstoffkonzentration in der Luft, die innerhalb dieses Bereichs liegt, entzündet werden kann und die Flammenausbreitung aufrechterhalten wird. Der Zündbereich von Wasserstoff ist wesentlich breiter als für anderer Brennstoffe (siehe Tabelle 20). Es ist zu betonen, dass die Zündgrenzen von der Richtung der Flammenausbreitung abhängen. In Tabelle 20 sind die Zündgrenzen nur für die Flammenausbreitung nach oben angegeben. Bei horizontaler Flammenausbreitung verengt sich der Bereich auf 6,0-7,15 Vol% für UEG und 65,7-71,4 Vol% für OEG. UEG und OEG ändern sich auf 8,5-9,45 Vol% bzw. 68-74,5 Vol% bei einer Flammenausbreitung nach unten. Der Entflammbarkeitsbereich vergrößert sich linear mit dem Anstieg der Temperatur. So führt beispielsweise ein Temperaturanstieg von 20 °C auf 400 °C zu einer Erweiterung des Entflammbarkeitsbereichs auf 1,5-87,5 Vol% [36].

Eigenschaft	BENZIN	DIESEL	ERDGAS	WASSERSTOFF
Dichte flüssig [kg/m <sup>3</sup> ] bei T	750 – 770 15°C	820 – 845 15°C	423 -162°C	70,8 -253°C
Stöchiometrischer Luftbedarf [kg <sub>Luft</sub> /kg <sub>BSt</sub> ]	14	14,7	17,2	34,3
Unterer Heizwert [MJ/kg]	41,4	42,9	50	120
Energiedichte [MJ/dm <sup>3</sup> ] flüssig/gasförmig (bei 350 bar/280 K)	31,7 / -	35,8 / -	21 / 12,6	8,5 / 3
Gemischheizwert [MJ/m <sup>3</sup> ] gemischansaugend/ luftansaugend (bei λ = 1, 0°C, 1,013 bar)	3,76 / 3,83	- / 3,77	3,4 / 3,76	3,19 / 4,52
Zündgrenzen [Vol%] [λ-Bereich]	1 – 7,6 1,4 – 0,4	0,6 – 5,5 1,35 – 0,48	4,4 – 15 2 – 0,6	4 - 76 10 – 0,13
Selbstzündungstemperatur [°C]	230 – 450	250	595	585
Minimale Zündenergie [mJ]	0,24	0,24	0,29	0,017
Laminare Flammgeschwindigkeit [cm/s] (in Luft bei λ = 1, 25°C, 1,013 bar)	~40	~40	~42	~230

**Tabelle 20: Verbrennungseigenschaften von Wasserstoff und anderen gängigen Kraftstoffen unter normalen Bedingungen**

Die Mindesttemperatur, die erforderlich ist, um eine Verbrennungsreaktion für ein Brennstoff-Oxidationsmittel-Gemisch in Abwesenheit einer externen Zündquelle einzuleiten, wird durch die Standard-Selbstentzündungstemperatur definiert. Bei atmosphärischem Druck beträgt die Selbstentzündungstemperatur von Wasserstoff in Luft 510 °C. Daher kann der Kontakt eines

Wasserstoff-Luft-Gemischs mit einem Gegenstand bei dieser Temperatur zur Entzündung des Gemischs führen [36].

Die Mindestzündenergie (MZE) eines Wasserstoff-Luft-Gemisches hängt von seiner Zusammensetzung ab. Die absolute MZE wird für ein stöchiometrisches Gemisch angegeben und liegt bei 17  $\mu\text{J}$ . Dieser Wert ist 16-mal niedriger als bei Methan und 56-mal niedriger als bei Benzin. Die MZE steigt bei anderen als stöchiometrischen Zusammensetzungen um bis zu 3 Größenordnungen an, wenn die Wasserstoffkonzentration nahe der UEG und OEG liegt [36].

Aufgrund des breiten Entflammbarkeitsbereichs und der niedrigen Zündenergie ist Wasserstoff sehr leicht zu entzünden. Zu den Zündquellen können Funken von mechanischen oder elektrischen Geräten, Heizgeräte, statische Elektrizität usw. gehören.

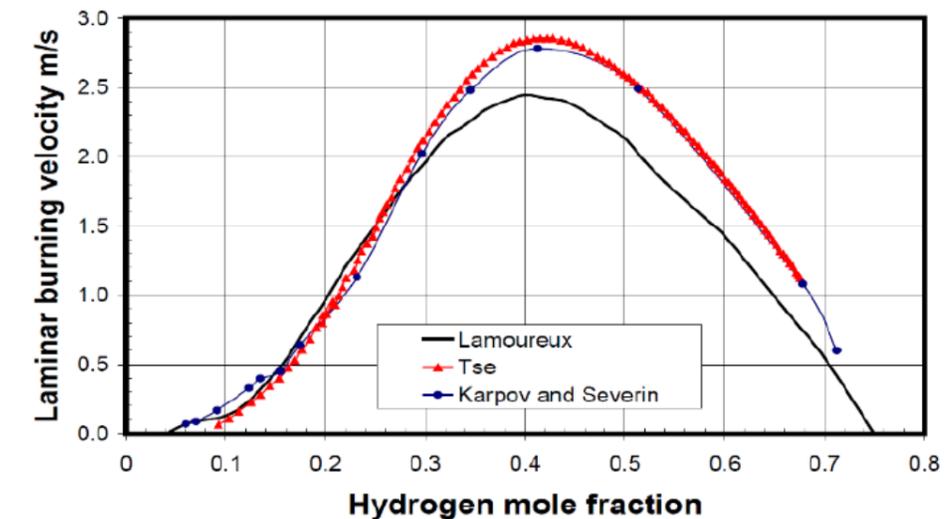


Abbildung 61: Laminare Verbrennungsgeschwindigkeit eines Wasserstoff-Luft-Gemisches [36]

Abbildung 61 zeigt die laminare Brenngeschwindigkeit  $S_u$  als Funktion der Wasserstoffkonzentration in der Luft. Die maximale Brenngeschwindigkeit wird nicht für ein stöchiometrisches Gemisch, sondern für ein Gemisch mit 40,1 % Wasserstoff in Luft erreicht. Dies ist auf die hohe molekulare Diffusionsfähigkeit von Wasserstoff in Luft zurückzuführen [36].

Die Flammenausbreitungsgeschwindigkeit für ein Wasserstoff-Luft-Gemisch beinhaltet neben der Brenngeschwindigkeit auch die Auswirkung der Ausdehnung der Verbrennungsprodukte. Sie kann für eine eindimensionale Flammenausbreitung, z.B. in einem Rohr von dessen

geschlossenem Ende aus unter der Annahme eines konstanten Drucks, berechnet werden als  $S = S_u E_i$ , wobei  $E_i$  der Ausdehnungskoeffizient ist, der das Verhältnis der Dichte des frischen Gemischs zu der des verbrannten Gemischs darstellt. Das Verhältnis kann bei einem stöchiometrischen Gemisch bis zu 7,2 betragen [36].

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flamme kann ein Maximum erreichen, das durch die Schallgeschwindigkeit der Verbrennungsprodukte gegeben ist, die für ein stöchiometrisches Gemisch 975 m/s beträgt. Liegt die Wasserstoffkonzentration im Bereich von 18,3-59,0 Vol.-%, kann das Gemisch detonieren, was zu einem Worst-Case-Unfallszenario führt, bei dem sich die Verbrennungszone mit einer Geschwindigkeit, die höher als die Schallgeschwindigkeit ist, in die unverbrannte Zone bewegt. Die Grenzwerte hängen stark von den Abmessungen und Eigenschaften des Versuchsaufbaus ab. Der Bereich der Detonationsfähigkeit von Wasserstoff ist größer als bei anderen Brennstoffen (siehe Tabelle 20) [36]. Wasserstoff beeinflusst die Eigenschaften von Werkstoffen, was je nach Anwendung bei der Auswahl des richtigen Werkstoffs zu berücksichtigen ist [48].

### 3.1.2. Wasserstoffdiffusion

Kommt Wasserstoff mit Werkstoffen in Kontakt, so kann er in das Materialinnere eindringen und dort die Werkstoffeigenschaften wesentlich verändern. Der molekulare Wasserstoff dissoziiert an der Materialoberfläche und dringt in atomarer Form in das Werkstoffgefüge ein. Einerseits kann der Wasserstoff so durch das Material hindurch diffundieren, andererseits führt er im Material selbst zu Verzerrungen, die lokale Spannungen und eine Materialversprödung verursachen [48].

### 3.1.3. Wasserstoffversprödung

Einschlüsse und Fehlstellen im Gefüge führen besonders bei metallischen Werkstoffen aufgrund von Kerbwirkung zu lokalen Spannungsüberhöhungen, wodurch bereits Belastungen, die noch unter der Festigkeitsgrenze des Materials liegen, zum Bauteilversagen führen können. Denselben Effekt bewirkt atomarer Wasserstoff, der das Gefüge lokal verzerrt. An Leerstellen und Versetzungen sowie an Korngrenzen, kann sich überdies atomarer Wasserstoff wieder zu molekularem Wasserstoff zusammensetzen. Aufgrund der großen Volumenzunahme bei dieser Wiedervereinigung, können im Gefüge lokal hohe Drücke

entstehen, die zu Materialschädigungen führen. Wasserstoff beeinflusst Streckgrenze, Zugfestigkeit, Brucheinschnürung, Bruchzähigkeit und Dauerhaltbarkeit von Stählen. Für das Ausmaß der Wasserstoffversprödung sind mehrere Faktoren von Bedeutung, wie z.B. Werkstoffeigenschaften, äußere Spannungen, Partialdruck des umgebenden Wasserstoffs und Temperatur. Bei kryogenen Anwendungen verstärkt die Tieftemperaturversprödung den Effekt. Anfällig für Wasserstoffversprödung sind harte hochfeste Stähle, nicht anfällig sind weiche kohlenstoffarme Stähle, austenitische Stähle, bestimmte Legierungen etwa mit Aluminium sowie eine Reihe von Kunststoffen [48].

### **3.1.4. Schmierfähigkeit**

Wasserstoff hat verglichen mit anderen Gasen eine sehr geringe Schmierfähigkeit. Daher müssen für Bauteile, die relativ zueinander in Bewegung stehen, geeignete Werkstoffe verwendet werden. Untersuchungen von Injektoren für Verbrennungskraftmaschinen haben gezeigt, dass Injektoren aus Stählen, wie sie z.B. für Erdgas verwendet werden, in Wasserstoffumgebung nur eine sehr geringe Standzeit aufweisen [48].

## 3.2. Gefahren durch Wasserstoff

Aus den allgemeinen sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Wasserstoffs, in Verbindung mit den physikalischen Eigenschaften der üblichen Speicherformen, wurden die Gefahren für Tunnelumgebung abgeleitet. Grundsätzlich lassen sich diese Gefahren in drei Gruppen unterteilen.

### 3.2.1. Ungezündete Freisetzung von Wasserstoff

#### Sauerstoffmangel und Erstickung

Wasserstoff ist kein giftiges Gas. Seine Freisetzung und Ansammlung in einem geschlossenen Raum kann jedoch eine Atmosphäre mit Sauerstoffmangel schaffen. Dies kann zur Erstickung von Menschen führen. Die Auswirkungen auf den Menschen sind bei einer Sauerstoffkonzentration von unter 19 % spürbar. Die Reaktion des Menschen auf verschiedene Sauerstoffdefizite ist in Tabelle 21 angegeben, zusammen mit der entsprechenden Wasserstoffkonzentration unter normalen Bedingungen [36].

H <sub>2</sub> conc. by vol %	O <sub>2</sub> conc. by vol %	Physiological effect
0-9	19-21	No specific symptoms
9-28	15-19	Decreased ability to perform tasks, possible early symptoms in persons with heart, lung or blood circulation problems
28-42	12-15	Deeper respiration, faster pulse, poor coordination
42-52	10-12	Dizziness, poor judgement, slightly-blue lips. Risk of death below 11%, tolerance time 30 min
52-62	8-10	Nausea, vomiting, unconsciousness, ashen face, fainting, mental failure, with a tolerance of 5 min
62-71	6-8	Unconsciousness in 3 min, death in 8 min. 50% death and 50% recovery with treatment in 6 min, 100% recovery with treatment in 4-5 min
71-86	3-6	Coma in 40 s, convulsions, respiration ceases, death or permanent brain damage
86-100	0-3	Death within 45 s

**Tabelle 21: Reaktion des Menschen auf Sauerstoffmangel und entsprechende Wasserstoffkonzentration unter normalen Bedingungen [36]**

#### Schnittverletzungen der Haut und Schutzkleidung

Ein Hochdruck-Wasserstoffstrahl kann nackte Haut oder anderes Gewebe zerschneiden. Die Freisetzung von Druckwasserstoff kann selbst bei einem kleinen Leck die Haut einer Person

durchdringen. Gas mit einem Druck von 200 bar kann leicht Arbeitshandschuhe und Kleidung durchdringen. In wenigen Zentimetern Entfernung vom Leck reicht ein Druck von 70 bar aus, um die Haut zu durchdringen. Ein Druck von 44 bar reicht aus, um einen Einschnitt in die Haut zu verursachen [36].

#### Druckspitzenphänomen

Das sogenannte „Pressure-Peaking-Phenomenon“, führt bei geschlossenen und ungelüfteten Räumen zu einem rasanten Druckanstieg infolge des Wasserstoffauslasses aus Druckbehältern. Da eine Tunnelanlage kein geschlossener Raum ist, ist dieses Phänomen nicht relevant.

#### Bildung einer entflammaren Wolke

Eine nicht gezündete Wasserstofffreisetzung verursacht die Bildung einer entflammaren Wolke in einem nach oben hin geschlossenen Raum. Die Größe und die Dauer der entflammaren Wolke hängen von mehreren Faktoren ab, wie z.B. dem Freisetzungsdurchmesser, Druck und Dauer der Freisetzung, Vorhandensein oder Fehlen von Hindernissen, Windstärke usw. Die Risiken und Gefahren können im Falle einer Freisetzung in geschlossenen Räumen, wie z.B. Tunneln, erhöht sein, wenn in einem Tunnel keine Ventilation vorgesehen ist [36].

### **3.2.2. Gezündete Freisetzung von Wasserstoff**

Bei einem Austritt von Wasserstoff mit sofortiger Entzündung – z.B. ein Brand in der Nähe eines H<sub>2</sub> Behälters bei einem Unfall führt zum Austritt von Wasserstoff durch das TPRD mit unmittelbarer Zündung –kommt es zu einem sogenannten Freistrahbrand oder Jet-Fire. Dabei entstehen im Nahbereich der Flamme hohe Temperaturen, die zu starken Verbrennungen und Schäden an der Infrastruktur führen können. Auch ein Übergreifen auf andere Fahrzeuge kann dadurch stattfinden [36].

Die Wasserstoffflamme aus dem TPRD kann Entfernungen von bis zu zehn Metern zurücklegen und durch die Flamme selbst und die Wärmestrahlung lebensbedrohliche Zustände verursachen. Es ist erwähnenswert, dass die Flammenlänge des TPRD proportional zum Durchmesser der TPRD-Blende ist. Diese Erkenntnis hat bereits dazu beigetragen, den TPRD-Durchmesser von anfänglich 6 mm auf derzeit 2-3 mm zu verringern [36].

Wenn zwischen dem Öffnen des TPRD und der Zündung des hochturbulenten brennbaren Strahls eine Verzögerung auftritt, müssen neben den oben erwähnten thermischen Gefahren auch Druckbelastungen berücksichtigt werden. Der Überdruck bei der turbulenten deflagrativen Verbrennung des Strahls kann in 4 m Entfernung vom Zündpunkt bei einer Freisetzung von 40 MPa durch eine 10 mm große Öffnung bis zu 0,2 bar betragen. Dieser erzeugte Überdruck reicht aus, um schwere Verletzungen mit Trommelfellriss zu verursachen [36].

Stichflammen, die durch Freisetzungen von Druckwasserstoff entstehen, können in ihrer Umgebung lebensbedrohliche Zustände hervorrufen, d.h. Verletzungen oder Tod der exponierten Person. Die Exposition gegenüber dem strahlenden Wärmestrom der Flamme kann Verbrennungen ersten, zweiten oder dritten Grades zur Folge haben kann [36].

### **3.2.3. Wasserstoffexplosion**

Die Freisetzung von Wasserstoff nach einem Unfall in einem Tunnel oder einem anderen geschlossenen Raum kann zur Bildung eines brennbaren Gemischs führen. Die Entzündung einer solchen brennbaren Wasserstoff-Luft-Wolke kann zu einer Verbrennungsexplosion führen, die entweder eine Deflagration oder eine Detonation sein kann und Druckwirkungen erzeugt, die eine Gefahr für Leben und Eigentum darstellen. Eine Deflagration breitet sich mit einer Geschwindigkeit unterhalb der Schallgeschwindigkeit (Unterschall) im unverbrannten Gemisch aus, während sich eine Detonation mit einer Geschwindigkeit oberhalb der Schallgeschwindigkeit (Überschall) ausbreitet. Im letzteren Fall sind die Stoß- und Flammenfronten gekoppelt. Die Geschwindigkeit der Detonationswelle hängt von der Zusammensetzung des Wasserstoff-Luft-Gemisches ab. In einem stöchiometrischen Gemisch kann sie bis zu 2000 m/s betragen [36].

### 3.3. Identifizierung von relevanten Unfalltypen

Im Zuge dieses Arbeitspaketes (AP 3 Ermittlung der Gefahrenquellen und des Gefahrenpotentials) wurden mögliche Unfall- bzw. Schadensszenarien durch Ereignisse mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen abgeleitet, und diese hinsichtlich ihrer Relevanz in Bezug auf die allgemeine Tunnelsicherheit bewertet. Um systematisch mögliche Unfall- bzw. Schadensszenarien auszuarbeiten, wurden Einflussfaktoren (Unfallfaktoren) und Variablen definiert und miteinander im Sinne eines Fehlerbaum-Ereignisbaum Modells kombiniert. Die ausgearbeiteten Unfallfaktoren und Variablen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

#### Ereignis Initiatoren:

Ursächliche Ereignisse, die ein Szenario mit Beteiligung des mitgeführten Wasserstoffs auslösen können. Folgende relevante Ereignisinitiatoren für Wasserstoffszenarien in Straßentunneln wurden identifiziert:

- Unfall (Kollision)
- Brand (Ausgehend vom FCEV / ausgehend von einem anderem Fahrzeug)
- Komponentenfehler

#### Konsequenz Faktoren:

Faktoren, welche den Ereignisablauf beschreiben und maßgeblichen Einfluss auf die Art des Schadensszenarios und damit der zu erwartenden Konsequenzen haben. Als relevante Konsequenz Faktoren in Verbindung mit Wasserstofffreisetzung in Tunneln wurden identifiziert:

- Art der Freisetzung - sofortige Freisetzung (Bersten) / verzögerte Freisetzung (Leckage)
- Zeitpunkt der Entzündung – sofortige Entzündung / verzögerte Entzündung / keine Entzündung

#### Tunnel Faktoren:

Die Beschaffenheit des Straßentunnels, in dem das Wasserstoffereignis stattfindet, beeinflusst zum einen den möglichen Szenarienablauf, etwa weil gewisse Szenarienabläufe (z.B. Detonation) aufgrund der Eigenschaften des Tunnels unwahrscheinlicher sind (großer

Querschnitt, hohe Längsströmungsgeschwindigkeiten), und zum anderen die möglichen Konsequenzen (Schadensausmaß) im Falle eines Ereignisses. Ausgewählte Tunnel Faktoren werden in AP 4 – Ermittlung der Schadensauswirkungen in Tunnelanlagen berücksichtigt. Als relevante Tunnel Faktoren in Bezug auf Ereignisabläufe und mögliche Konsequenzen wurden identifiziert:

- Betriebsführung – Gegenverkehr / Richtungsverkehr
- Geometrie – Tunnellänge / Querschnitt / Längsprofil
- Lüftung – natürliche Lüftung / Längslüftung / Querlüftung
- Verkehr – geringer Verkehr / starker Verkehr / Verkehrsstau

Fahrzeug Faktoren:

Bestimmte Fahrzeugfaktoren, insbesondere der Typ des involvierten wasserstoffbetriebenen Fahrzeuges (PKW, LKW, BUS), haben einen Einfluss auf den möglichen Szenarienablauf. Diese Faktoren werden daher direkt in der Fehlerbaum / Ereignisbaum Analyse berücksichtigt. Andere Fahrzeugfaktoren, wie etwa der Tankfüllzustand, der TPRD Durchmesser oder die TPRD Orientierung, beeinflussen die potenziellen Konsequenzen eines Szenarios, und werden daher in AP 4 – Ermittlung der Schadensauswirkungen in Tunnelanlagen behandelt. Folgende relevante Fahrzeug Faktoren für Wasserstoffsznarien in Straßentunneln wurden identifiziert:

- Fahrzeugtyp – PKW / LKW / BUS
- Involvierte Menge an Wasserstoff
- Druckniveau im Tank
- TPRD Durchmesser
- TPRD Orientierung

Ereignis Initiatoren, Konsequenz Faktoren und ausgewählte Fahrzeugfaktoren (Fahrzeugtyp) wurden in weiterer Folge in einer Fehler- und Ereignisbaumanalyse berücksichtigt, auf Basis derer eine qualitative Szenarienbewertung durchgeführt wurde. Die übrigen Einflussfaktoren (Tunnel Faktoren, Fahrzeugfaktoren) werden im Zuge der Bearbeitung von AP 4 - Ermittlung der Schadensauswirkungen in Tunnelanlagen festgelegt

### 3.4. Definition relevanter Ereignisszenarien und Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit

In einem internen Workshop, wurden im Zuge einer qualitativen Fehler- und Ereignisbaumanalyse mögliche Unfall – und Schadensszenarien in Tunnelanlagen abgeleitet. Dabei wurden plausible Szenarienabläufe in Abhängigkeit der Unfallursachen (Unfall Initiatoren) und der Konsequenz-Faktoren (siehe Abschnitt 3.3) diskutiert. Dieser Prozess ist schematisch in Abbildung 62 dargestellt. Die dabei festgelegten Szenarien wurden anschließend qualitativ bewertet. Diese Bewertung fand sowohl hinsichtlich möglicher Konsequenzen (Schadensausmaß), wie auch hinsichtlich der zu erwartenden Eintrittswahrscheinlichkeit statt. Für die Bewertung wurde, wie in qualitativen Risikoanalysen üblich, eine grobe Bewertungsmatrix verwendet, und verschiedene Prioritätsbereiche für die Szenarienauswahl definiert, siehe Abbildung 63. Die Bewertungskategorien, sowohl für das Schadensausmaß als auch für die Eintrittswahrscheinlichkeit, reichen dabei von sehr gering (1) bis sehr hoch (4).

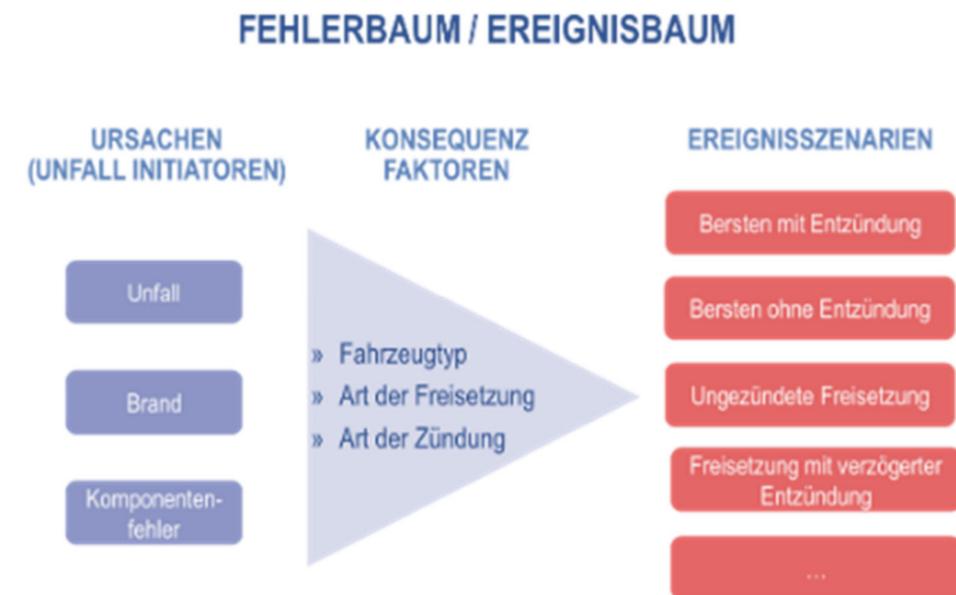
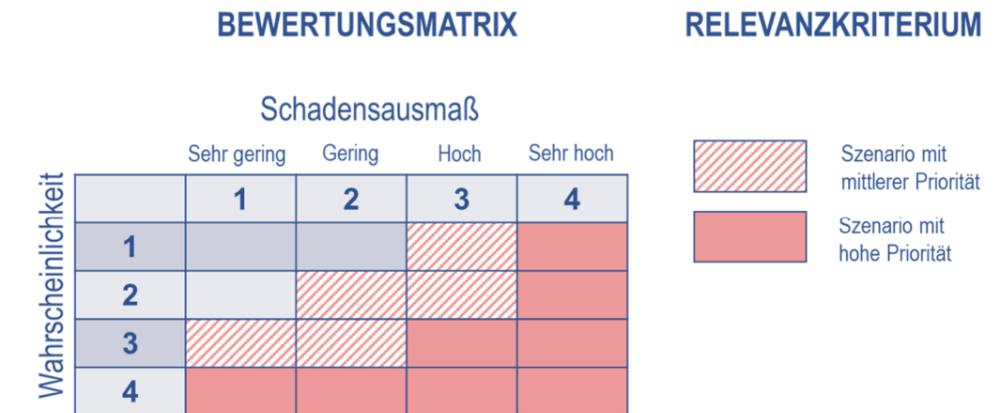


Abbildung 62: Schematische Darstellung der Fehlerbaum/Ereignisbaum Analyse von Wasserstoffereignissen



**Abbildung 63: Bewertungsmatrix zur qualitativen Szenarienauswahl**

Szenarien mit sehr hohem Schadensausmaß oder sehr hoher Eintrittswahrscheinlichkeit, sowie Szenarien mit hohem Schadensausmaß und hoher Eintrittswahrscheinlichkeit, werden in weiterer Folge in den detaillierten Untersuchungen in AP 4 – Ermittlung der Schadensauswirkungen in Tunnelanlagen bzw. AP 5 – Vertiefte Konsequenz-Analyse, hinsichtlich Personengefährdung, berücksichtigt. Szenarien mit hohem Schadensausmaß (3) und zumindest geringer Wahrscheinlichkeit (2-3) bzw. mit hoher Wahrscheinlichkeit (3) und zumindest geringem Schadensausmaß (2-3), wurden in einer weiterführenden qualitativen Diskussion betrachtet. Aus den Unfallinitiatoren und den Konsequenzfaktoren, wurden in Summe 23 verschiedene Tunnelszenarien (siehe Abbildung 64) entwickelt, von denen fünf Szenarien mit hoher Priorität und sieben Szenarien mit mittlerer Priorität bewertet wurden. Die verbleibenden 11 Szenarien wurden als nicht relevant (niedrige Priorität) eingestuft. Der Fehlerbaum/Ereignisbaum mit allen resultierenden Szenarien ist in Abbildung 64 dargestellt. Aus den zwölf identifizierten Szenarien mit mittlerer/ hoher Priorität wurden durch weiterführende Überlegungen, bzw. durch Zusammenfassung ähnlicher Szenarientypen, fünf wesentliche Grundszenarien ausgewählt und deren Ablauf des Weiteren näher definiert. Diese fünf Grundszenarien sind in Tabelle 22 zusammengefasst und wurden im Weiteren im Detail analysiert.

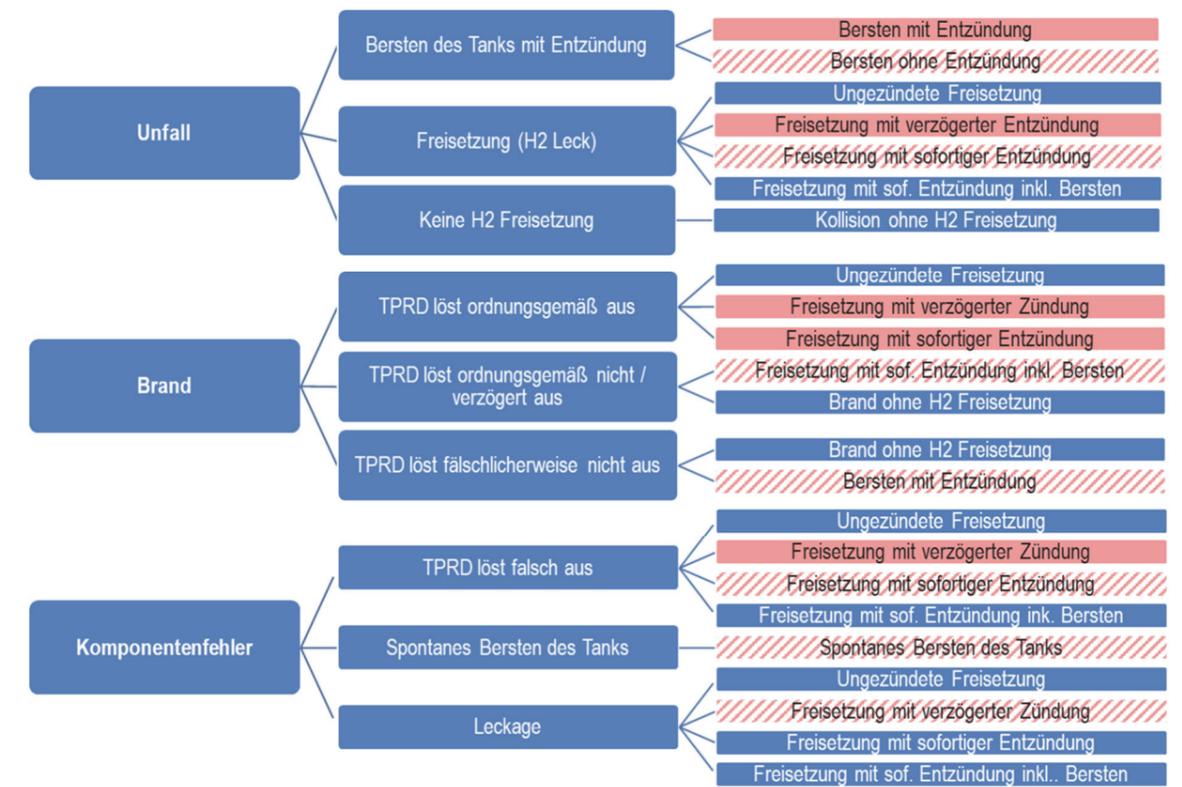


Abbildung 64: Darstellung des Fehlerbaums/Ereignisbaums inklusive getroffener Priorisierung auf Basis der qualitativen Bewertung

#	Szenarienbeschreibung	Szenariotyp
S1	Kollision eines H <sub>2</sub> Fahrzeuges mit unmittelbarem Bersten des Tanks und Entzündung des H <sub>2</sub>	Explosion
S2	H <sub>2</sub> Freisetzung über eine Tank-Leckage (Kollision, Komponentenfehler) mit verzögerter Entzündung	Explosion
S3	Karosseriebrand eines H <sub>2</sub> Fahrzeuges mit anschließender H <sub>2</sub> Freisetzung über TPRD und verzögerter Entzündung	Karosseriebrand + Explosion bzw. H <sub>2</sub> Freistrahbrand
S4	Karosseriebrand eines H <sub>2</sub> Fahrzeuges mit anschließender H <sub>2</sub> Freisetzung über TPRD und sofortiger Entzündung	Karosseriebrand + H <sub>2</sub> Freistrahbrand
S5	Karosseriebrand eines H <sub>2</sub> Fahrzeuges mit Fehlfunktion des TPRD und Bersten des Tanks	Karosseriebrand + Explosion

**Tabelle 22: Grundszenarien für die weitere Betrachtung in AP 4 und AP 5**

## 4. ERMITTLUNG DER SCHADENSWIRKUNGEN IN TUNNELANLAGEN

Aus dem im Zuge von Arbeitspaket 3 durchgeführten Workshop, wurden fünf maßgebende Szenarien extrahiert, welchen auf Grund einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit respektive eines hohen Schadensausmaßes eine besondere Bedeutung zukommt. Das 4. Arbeitspakete hat zum Inhalt die Konsequenzen für Personen und Infrastruktur, die sich aus diesen Ereignisszenarien ergeben, näher zu untersuchen. Dies wurde einerseits anhand einer intensiven Literaturstudie und den aktuellsten verfügbaren Informationen über die Konsequenzen eines  $H_2$  Feuers bzw. einer  $H_2$  Explosion durchgeführt. Andererseits wurden CFD Simulationen von Szenarien durchgeführt, die bisher nicht oder nur unzureichend untersucht wurden.

Die in Kapitel 3 extrahierten Ereignisszenarien, basieren auf vier voneinander zu unterscheidenden Gefahren, die durch den Einsatz von Wasserstoff im Straßenverkehr entstehen können:

- Pressure Peaking Phänomen
- Wasserstoff-Freistrahbrand
- Tankbruch
- Gaswolkenexplosion

Im Folgenden sollen diese Gefahren separat behandelt werden und die Ergebnisse aus diversen Forschungsprojekten sowie aus den durchgeführten CFD Simulationen näher beschrieben werden.

Übergeordnet können jedoch bereits Schadenskriterien [66] angeführt werden, die eine Beurteilung des Schadensausmaßes zufolge der angeführten Gefahren ermöglichen.

Verletzungskriterien für Personen die hohen Temperaturen ausgesetzt sind:

- 70°C – kein Schaden zu erwarten
- 149°C – Grenzwert bezogen auf Fluchtfähigkeit
- 182°C – Irreparable Verletzungen nach 30 Sekunden
- 309°C – Verbrennungen 3. Grades nach 20 Sekunden, Verlust der Fluchtfähigkeit nach wenigen Minuten

Analog dazu können die auf den Wärmefluss bezogenen Verletzungskriterien wie folgt angeführt werden:

- 1,5 kW/m<sup>2</sup> – keine Verletzungen zu erwarten
- 2,5 kW/m<sup>2</sup> – tolerierbar für 5 min, starke Schmerzen
- 6 kW/m<sup>2</sup> – tolerierbare Intensität für geschützte Einsatzkräfte
- 12,5 - 15 kW/m<sup>2</sup> – Verbrennungen 1. Grades nach 10 Sekunden, 1% Wahrscheinlichkeit von Todesfolgen nach einer Minute
- 35 – 37,5 kW/m<sup>2</sup> - 1% Wahrscheinlichkeit von Todesfolgen nach 10 Sekunden

Neben der thermischen Einwirkung kann vor allem bei Explosionsszenarien die mechanische Einwirkung auf Menschen mit ernststen Konsequenzen einhergehen. Demnach sind die Verletzungskriterien durch die Einwirkung von Druck wie folgt definiert:

- 8 kPa – keine Verletzungen
- 13,8 kPa – Platzen des Trommelfells
- 82,7 – 103,4 kPa – Grenzwert für Lungenblutungen
- 206,8 - 241,3 kPa – 90% Wahrscheinlichkeit von Todesfolgen durch Lungenblutungen
- 482,6 - 1379 kPa – Unmittelbare Todesfolgen durch Explosion

Zusätzlich können Verletzungen auch durch indirekte Effekte wie z.B. berstendes Glas entstehen. Generell wird davon ausgegangen, dass ein Überdruck von 48,3 bis 68,9 kPa bereits ausreicht, um tödliche Verletzungen durch diese Effekte zu bewirken.

## 4.1. Pressure Peaking Phänomen

### 4.1.1. Literaturrecherche

Das Pressure Peaking Phänomen (PPP) tritt bei Gasen auf, deren Dichte bei Umgebungszustand geringer ist als jene von Luft und die von hohem Druckniveau auf Umgebungsdruck entspannt werden. Dies trifft unter anderem bei der Freisetzung von Wasserstoff über ein TPRD auf. Das PPP ist vor allem in geschlossenen Räumen stark ausgeprägt und kann zu einer erheblichen mechanischen Einwirkung führen. Im Allgemeinen besteht für den entstehenden Überdruck eine Abhängigkeit vom Speicherdruck und der Freisetzungsrate. Diese Abhängigkeiten wurden unter anderem von [67] untersucht. Basierend auf experimentellen Daten, wurde dabei ein numerisches Modell entwickelt, welches eine Vorhersage des Überdrucks unter gegebenen Randbedingungen ermöglicht. Das experimentelle Setup zur Validierung des Modells bestand aus einer 15 m<sup>3</sup> großen Testkammer und einem System zur Wasserstoffversorgung (Regelstrecke inkl. Düse zur Freisetzung mit dem die Wasserstoff-Freisetzungsrate geregelt werden kann). Um den Einfluss von Lüftungsöffnungen und deren Größe zu untersuchen, wurden drei zusätzliche Öffnungen á 8 cm Durchmesser in der Kammer vorgesehen. Diese konnten wahlweise geöffnet oder geschlossen werden. Bei der durchgeführten Testserie von gezündeten Wasserstoff Freisetzungen wurde ein maximaler Überdruck von 48 kPa bei einem Speicherdruck von 8,93 MPa (89,3 bar), einer Freisetzungsrate von 8,62 g/s und einer geöffneten Lüftungsklappe gemessen.

[68] führten eine Serie an experimentellen Untersuchungen zur ungezündeten Freisetzung von Wasserstoff durch. Diese wurden wiederum in einer 15 m<sup>3</sup> Testkammer durchgeführt und beinhalteten Tests mit einer Freisetzungsrate im Bereich von 1,8 bis 10,1 g/s. Der maximale Überdruck wurde mit 8,05 kPa bei einer Freisetzungsrate von 4,75 g/s und minimaler Lüftungsöffnung (1 geöffnete Lüftungsklappe) gemessen. Somit kann gesagt werden, dass eine gezündete Freisetzung von Wasserstoff zu einer stärkeren Ausprägung des PPP führt.

Die bisher angeführten Untersuchungsergebnisse beziehen sich ausschließlich auf kleinere Räume, die einer privaten Garage ähneln. Ein Tunnel unterscheidet sich auf Grund seines großen Volumens sowie der großen Lüftungsöffnung doch signifikant von den gewählten Testsetups. Um diese Unterschiede zu berücksichtigen, können die von [66] im Zuge des EU

geförderten HyResponse Projekts entwickelten Nomogramme verwendet werden. Ausgehend von einer Querschnittsfläche von 60 m<sup>2</sup> (6 Höhe und 10 m Breite) könnte die Wasserstofffreisetzungsrate 10 kg/s überschreiten, ohne ernstzunehmende Auswirkungen auf die Gesundheit von Menschen zu bewirken. Mit dieser Freisetzungsrate wäre ein herkömmlicher Wasserstofftank eines PKWs in weniger als einer Sekunde vollständig geleert.

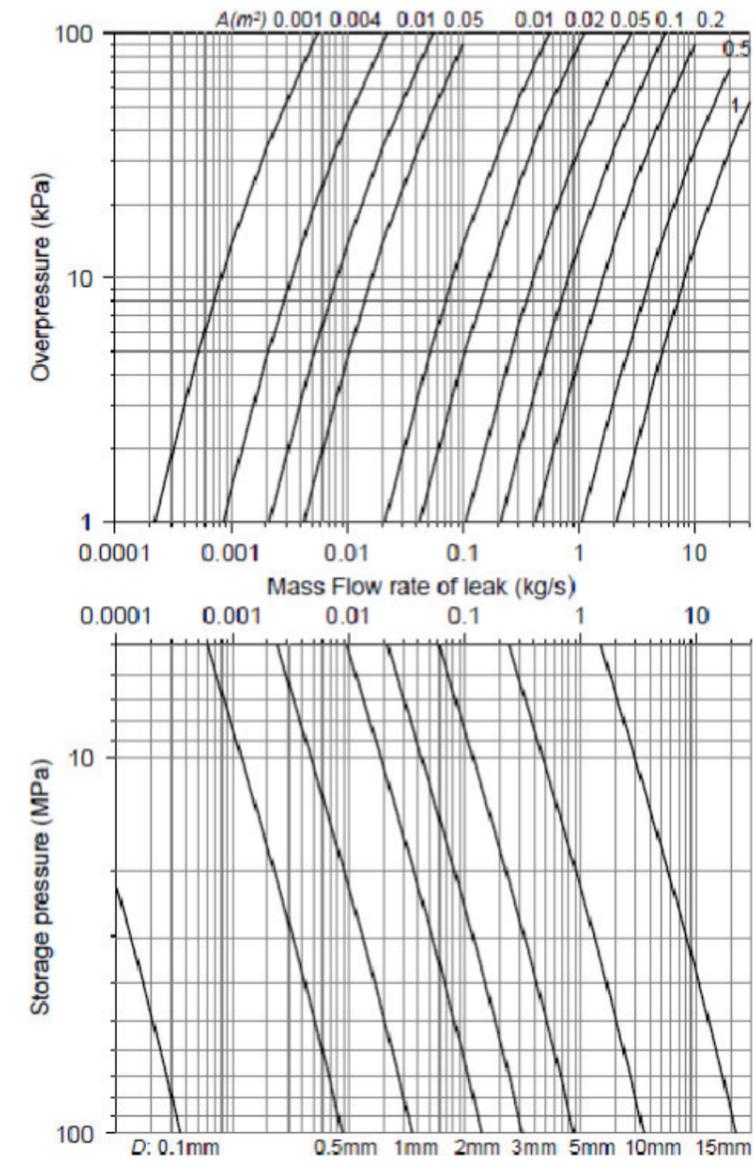


Abbildung 65: Pressure Peaking Nomogramme zur Bestimmung des entstehenden Überdrucks [66]

### 4.1.2. Analytische Berechnungen

Um die möglichen Freisetzungsraten aus einem Wasserstoff Tank mit diesem risikobehafteten Wert (10 kg/s) vergleichen zu können wurde mit Hilfe des Berechnungstools HyRAM [69] die vollständige Entleerung eines Wasserstofftanks (Blowdown) durch das Öffnen des TPRDs berechnet. Hierfür musste einerseits der Speicherdruck sowie die Größe des Tanks und andererseits der TPRD Durchmesser definiert werden. Bezogen auf den Wasserstofftank wurde generell zwischen einem PKW und einem Bus Tank unterschieden. Die Kenndaten der Tanks wurden wie folgt gewählt:

- Bus – 350 bar und 205 l (Solaris Urbina Hydrogen)
- PKW – 700 bar und 69 l (Toyota Mirai)

Der TPRD Durchmesser wurde in Anlehnung zu den von [70] verwendeten sowie von [71] empfohlenen Durchmesser gewählt. Somit wurden Durchmesser von 0,5 mm, 2,25 mm, 5 mm und 10 mm berücksichtigt.

Die Ergebnisse der Blowdown-Berechnung sind in Tabelle 23 zusammengefasst. Die maximale Wasserstoff-Freisetzungsrate wurde bei einem Speicherdruck von 700 bar und einem TPRD Durchmesser von 10 mm mit bis zu 3 kg/s bestimmt. Die Freisetzungsrate bei 350 bar und 0,5 m TPRD Durchmesser betrug 0,004 kg/s. Die Dauer eines Blowdowns beträgt demnach zwischen 8 s und 8000 s (ca. 2,2 h). Ein Vergleich des Blowdowns bei selbem TPRD Durchmesser (z.B. 2,25 mm), jedoch unterschiedlicher Tankkonfiguration zeigt, dass die maximale Freisetzungsrate bei einem Bustank ca. der Hälfte (0,075 kg/s) der Freisetzungsrate bei einem PKW Tank (0,15 kg/s) entspricht. Auf Grund der unterschiedlichen Tankvolumina, endet der Blowdown bei einem PKW Tank jedoch bereits nach ca. 150 s, wohingegen die Dauer eines Blowdowns bei einem Bus ca. 400 s beträgt.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche sowie der analytischen Berechnung der Freisetzungsraten entsprechend PKW und Bus Tanks zeigen, dass davon ausgegangen werden kann, dass das Pressure Peaking Phänomen in einem Tunnel keine ernstzunehmenden Konsequenzen verursacht. In Abhängigkeit des Speicherdrucks sowie des TPRD Durchmessers ergeben sich jedoch markante Unterschiede bezogen auf die Freisetzungsrate und somit auf die Dauer eines Blowdowns, was für andere Szenarientypen relevant sein kann.

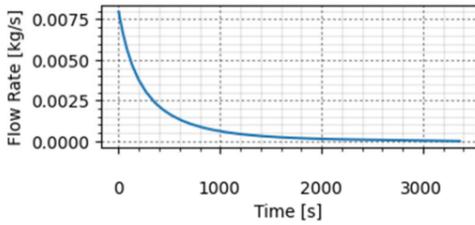
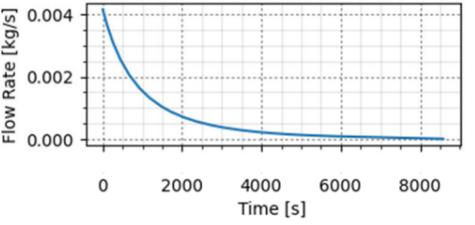
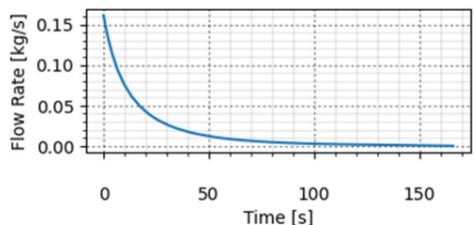
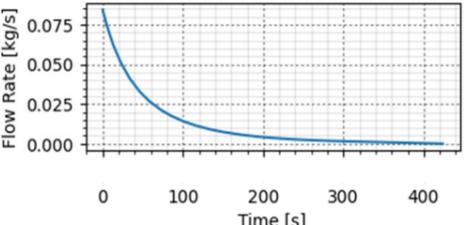
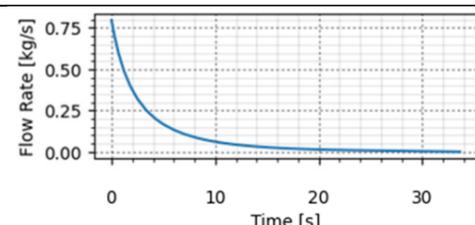
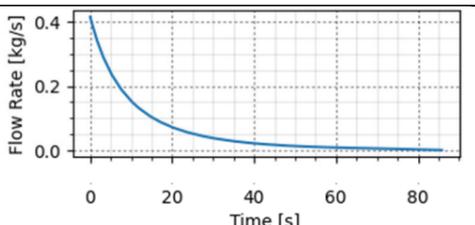
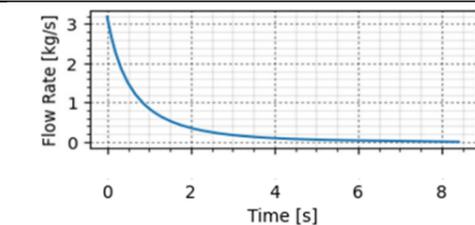
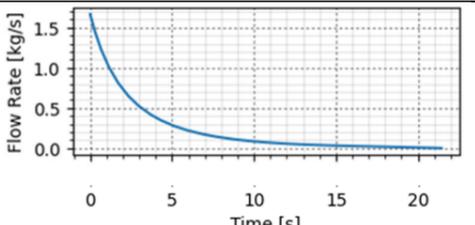
TPRD	PKW Tank (700 bar, 69.9 l)	Bus Tank (350 bar, 205 l)
0,5 mm		
2,25 m		
5,0 mm		
10,0 m		

Tabelle 23: Wasserstoff Freisetzungsrates als Funktion der Zeit und in Abhängigkeit des Speicherdrucks sowie des TPRD Durchmessers.

## 4.2. Wasserstoff-Freistrahbrand

Bei einer gezündeten Wasserstofffreisetzung über ein TPRD oder eine anderweitige Leckage (Szenario S4), stellt mitunter die thermische Einwirkung auf Menschen eine Gefahr dar. Dies wird durch die adiabate Verbrennungstemperatur von Wasserstoff ( $\sim 2173^\circ\text{C}$ ) offensichtlich. Demnach ist bei einem direkten Kontakt zur Wasserstoffflamme mit schweren Verletzungen zu rechnen. Aus diesem Grund wurden Wasserstoff-Freistrahbrände bereits in vorangegangenen Studien im Detail untersucht. Dabei wurden einerseits die maximale Flammenlänge zur Definition von Gefahrenbereichen und der Wärmestrom durch Wärmestrahlung als maßgebende Kriterien für die Beurteilung der Gefahr herangezogen.

### 4.2.1. Literaturrecherche

[70] führte analytische Berechnungen zur Bildung von Stichflammen durch und bestimmte die zu erwartende Flammenlänge sowie die Strahlungswärmestromdichte für unterschiedliche TPRD Durchmesser. Basierend auf der maximalen Wasserstofffreisetzungsrate in Bezug auf den jeweiligen TPRD Durchmesser, wurde zunächst die Wärmefreisetzungsrate (HRR) durch die Verbrennung des Wasserstoffs als Produkt des  $H_2$  Massenstroms und des unteren Heizwerts (119,96 kJ/kg) berechnet. Der Strahlungsanteil einer Wasserstoffflamme kann gemäß [72] im Bereich von 0,17 bis 0,2 angenommen werden. Basierend auf dieser Annahme und unter Verwendung eines Punktquellenmodells nach [73], kann die Wärmestromdichte in ein paar Metern Entfernung berechnet werden. Die Länge der Stichflamme wurde von Li mit drei unterschiedlichen analytischen Ansätzen [74] [75] [76] berechnet. Tabelle 24 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse aus Li's Studie. Diese inkludieren Flammenlängen und Wärmestromdichten bei Speicherdrücken von Nutzfahrzeugtanks (35 MPa) wie auch jene von PKWs (70 MPa) sowie für die TPRD Durchmesser 2,5 mm, 5 mm und 10 mm. Erwartungsgemäß ergibt sich bei hohen Speicherdrücken und großen TPRD Durchmessern die höchste  $H_2$  Freisetzungsrate und somit die größte Flammenlänge (bis 45,4 m). Die Wärmestromdichte ergibt sich in diesem Fall zu  $45 \text{ kW/m}^2$ . Die tolerierbare Wärmestromdichte kann lediglich mit einem TPRD Durchmesser von 2,5 mm, und nur im Für einen Speicherdruck von 35 MPa, eingehalten werden. Bei diesem Durchmesser ergibt sich nach dem Modell von Li ein Gefahrenbereich (Flammenlänge) von maximal 11,4 m.

Speicherdruck [MPa]	TPRD Durchmesser [mm]	Max. HRR [MW]	Flammenlänge [m]	Wärmestromdichte [kW/m <sup>2</sup> ]
35	2,5	14	7,0 – 8,0	1
	5	54	12,8 – 16,1	6
	10	217	21,5 – 32,1	22
70	2,5	27	9,8 – 11,4	3
	5	108	16,6 – 22,7	11
	10	434	27,8 – 45,4	45

**Tabelle 24: Charakteristiken einer Wasserstoff Stichflamme für unterschiedliche Speicherdrücke und TPRD Durchmesser [70]**

Einerseits ergibt sich der Effekt einer thermischen Einwirkung durch das Temperaturniveau respektive durch die Wärmestromdichte. Andererseits stellt die Expositionsdauer ebenfalls einen wichtigen Parameter bei der Beurteilung der Gefahr dar. [66] fanden heraus, dass ein direkter Kontakt mit einer Wasserstoffflamme schwere Verletzungen verursacht. Bei geringer Expositionsdauer, jedoch eine gute Chance besteht, um der Gefahr zu entkommen.

Neben den analytischen Betrachtungen von Li, führten [22] eine Serie von numerischen Simulationen durch, um die Wasserstoff Flammenbildung in einer natürlich belüfteten Parkgarage zu untersuchen. Dabei wurden Freisetzungen über TPRDs mit einem Durchmesser im Bereich von 0,5 bis 3,34 mm und unterschiedlichen Freisetzungsrichtung (Winkelversatz) berücksichtigt. Es zeigte sich, dass der Gefahrenbereich mit kleineren TPRD Durchmessern und einer Freisetzungsrichtung im Bereich von 30 – 45° zu den niedrigsten Temperaturen im Aufenthaltsbereich von Personen und somit zum kleinsten Gefahrenbereich führt.

Die Studie von [77] konzentrierte sich auf Wasserstoff Stichflammen in Tunnelanlagen. Die Autoren merkten an, dass die höchste Wahrscheinlichkeit einer TPRD Aktivierung durch eine externe Wärmeeinwirkung (Brand eines anderen Fahrzeugs) eintritt. Basierend auf diesem Szenario, kann davon ausgegangen werden, dass es zu einer gezündeten Wasserstofffreisetzung kommt. Im Vergleich zu einer ungezündeten Freisetzung im Tunnel, erzeugt dieses Szenario nur eine geringe Gefahr, da das auslösende Ereignis (Fahrzeugbrand) bereits zur Einleitung der Ereignisbewältigung geführt hat.

Der Einfluss einer mechanischen Längslüftung im Tunnel, auf die Auswirkungen einer Wasserstoffflamme, wurde von [78] untersucht. Diese Untersuchungen basierten auf numerischen Simulationen in denen eine Wasserstofffreisetzungsrate von 0,01 bis 0,25 kg/s berücksichtigt wurden. Es stellte sich heraus, dass eine Längsgeschwindigkeit von mehr als 2,85 m/s ausreicht, um ein ausgeprägtes Backlayering zu vermeiden (kritische Geschwindigkeit). Da in den durchgeführten Simulationen die Wasserstoffflamme als Einzelszenario betrachtet wurde, haben die Autoren explizit hervorgehoben, dass die Kombination aus Wasserstoffflamme und konventionellem Fahrzeugbrand noch näher zu untersuchen sei.

Wasserstoff-Stichflammen wurden ebenfalls in diversen Risikoanalysen behandelt und deren Konsequenzen für Menschen und Tunnelbauwerk näher betrachtet. Eine dieser Risikoanalysen wurde von [11] durchgeführt. Dafür wurde eine Ereignisbaumanalyse, die mit einer quantitativen Eintrittswahrscheinlichkeit hinterlegt war durchgeführt. Demnach ist das wahrscheinlichste Szenario bei einem Unfall mit einem Wasserstofffahrzeug jenes, bei dem kein Wasserstoff freigesetzt wird. Für den Fall einer Wasserstofffreisetzung wiederum ist das Auftreten einer Wasserstoff Stichflamme (Freisetzung über TPRD) am wahrscheinlichsten (Eintrittswahrscheinlichkeit 0,85%). Aus diesem Grund wurden zusätzliche numerische Simulationen durchgeführt, die die Einwirkung einer solchen Flamme auf das Tunnelbauwerk beinhalteten. Hierbei muss erwähnt werden, dass bei diesen Simulationen von einer vertikal, nach oben gerichteten Wasserstoff Freisetzung durch ein 2,25 mm TPRD ausgegangen wurde. Aus diesem Grund sind die höchsten Temperaturen an der Tunneldecke zu erwarten. Während die maximale Wärmefreisetzungsrate mit 19 MW ermittelt wurde, erreichten die maximalen Gastemperaturen an der Tunneldecke ein Niveau von 1.900°C. Die Einwirkdauer ist auf Grund der rapiden Abnahme der  $H_2$  Freigesetzungsrate jedoch auf 45 Sekunden beschränkt.

Eine weitere Risikoanalyse wurde von [64] durchgeführt. Diese basierte sowohl auf Ergebnissen experimenteller Untersuchungen, als auch auf numerischen Simulationen. Dabei zeigte sich, dass eine Wasserstoffflamme im Tunnel im Wesentlichen nur dann ein Risiko darstellt, wenn diese aus einem Bustank in horizontaler Richtung ausgeht und der Bus auf der rechten Fahrspur, nahe der Tunnelwand stehen geblieben ist. In diesem Fall kann das Auftreffen der Flamme an der Tunnelwand dazu führen, dass diese umgelenkt wird und die Fluchtwege über die Türen des Busses blockiert sind. Im Vergleich zu einem konventionellen

Brand, wird die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Szenarios um das 68-fache geringer eingeschätzt. Jedoch kann die Anzahl der tödlich verletzten Personen im Bereich von 0 bis 50 liegen.

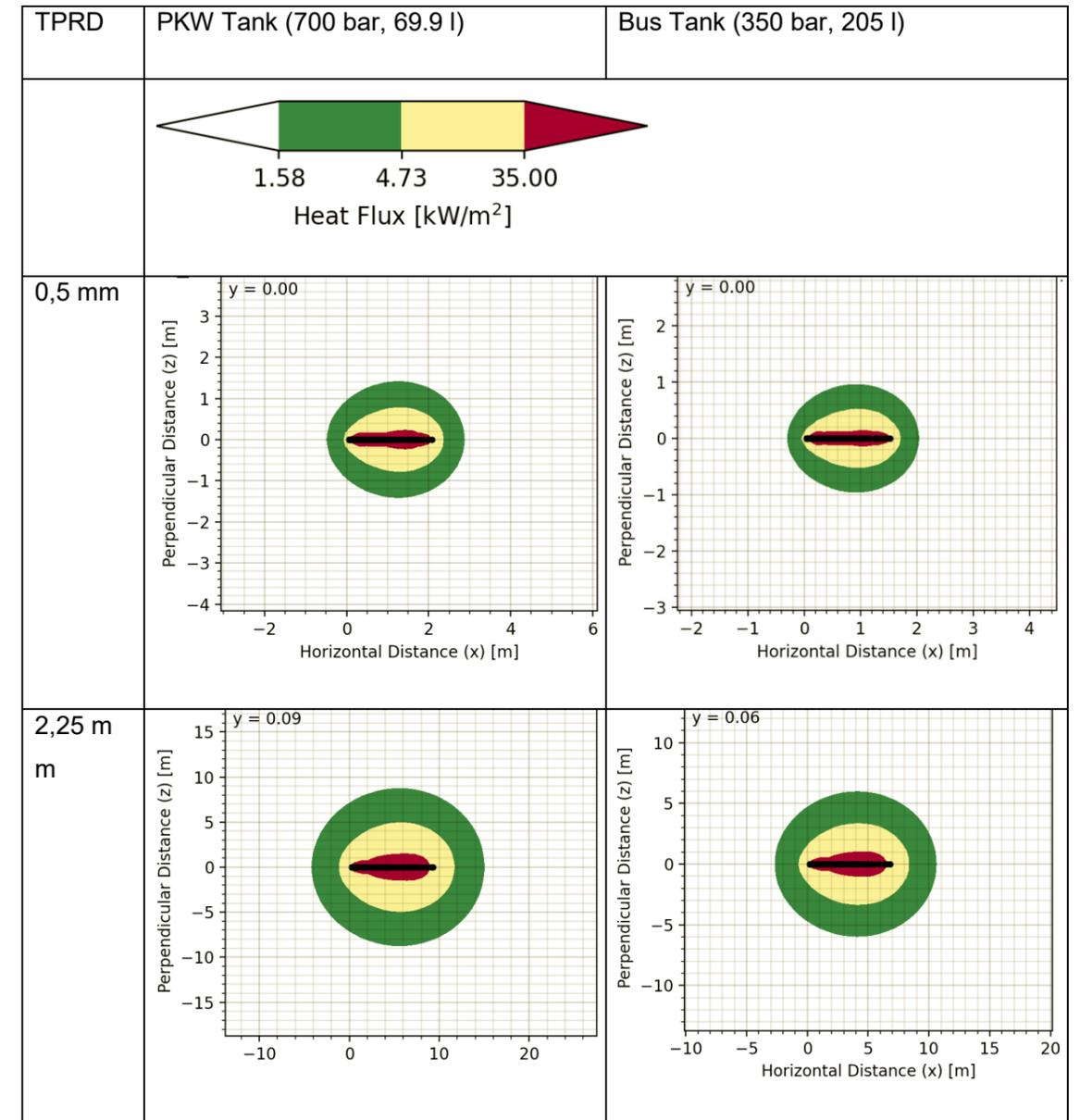
#### 4.2.2. Analytische Berechnungen

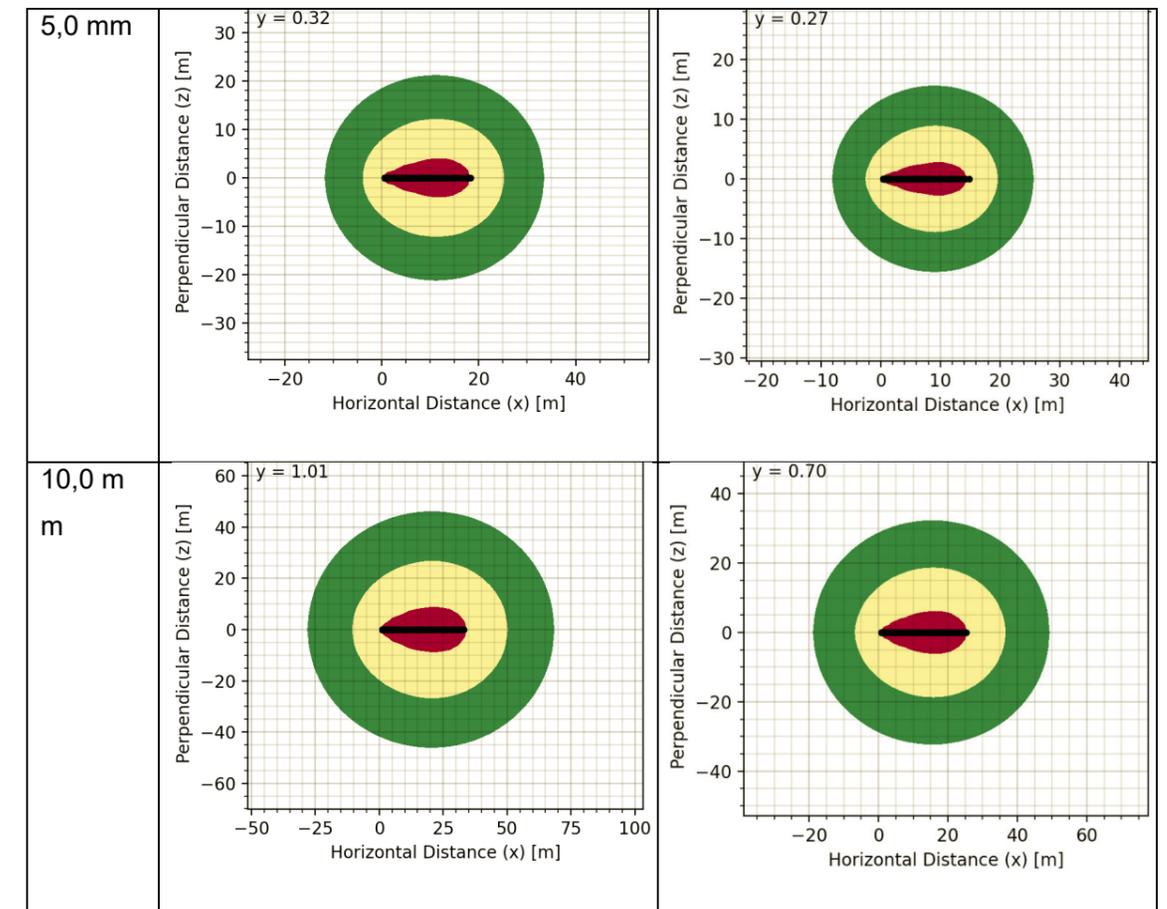
Da aus der Literatur zwar einige allgemeine Aussagen zum Effekt von Wasserstoffstichflammen extrahiert werden konnten, jedoch nur wenige auf konkreten Zahlen basierende Ergebnisse vorliegen, wurden zusätzliche analytische Berechnungen zu Wasserstoff-Stichflammen durchgeführt. Diese wurden mit dem Softwaretool HyRAM [69] durchgeführt und beinhalteten die Berechnung der auftretenden Wärmestromdichten und Flammenlängen in Abhängigkeit des Speicherdrucks sowie des TPRD Durchmessers.

Die Basis der Berechnung bildeten wiederum die bereits in Kapitel 4.1 angeführten Tanks eines PKWs (700 bar, 69 l) sowie eines Busses (350 bar, 205 l). Zudem wurde für den TPRD Durchmesser wieder Stützstellen (0,5 mm, 2,25 mm, 5 mm und 10 mm) festgelegt. Generell wird von einer horizontalen Freisetzung über das TPRD ohne Verlust von Strömungsenergie durch das Auftreffen der Flamme auf einer Oberfläche (Fahrbahn oder Tunnelwand) ausgegangen. Durch diese worst-case Betrachtung, lässt sich die maximale Ausdehnung der Gefahrenzonen ableiten. Zudem ist eine Variation des Austrittswinkels bzw. die Betrachtung eines Aufpralls der Wasserstoffflamme auf ein Objekt (Fahrbahn, Tunnelwand, Tunneldecke, Fahrzeug), mit den momentan vorhandenen analytischen Modellen, nicht möglich.

Die Gefahr, die von einer Wasserstoffflamme ausgeht ergibt sich durch die hohe Temperatur der Verbrennungsgase und durch die freiwerdende Strahlungswärme. Zunächst sei der Fokus auf das Wärmestrom-Kriterium gelegt. Tabelle 25 zeigt eine Übersicht der Ergebnisse, nämlich die zu erwartenden Wärmestromdichten in unterschiedlichen Distanzen (längs – x Achse und quer – y-Achse), für die untersuchten Fallbeispiele. Die Gefahrenbereiche werden gemäß den in HYRAM hinterlegten Grenzwerten, bezogen auf die Schwere der zu erwartenden Verletzungen, in drei Zonen untergliedert. Demnach wird die Todeszone (rote Zone) durch Werte größer als 25,24 kW/m<sup>2</sup> definiert. Im Bereich von 4,73 bis 25,24 kW/m<sup>2</sup> (gelbe Zone) ist mit schweren Verletzungen zu rechnen. Bei Wärmestromdichten von zwischen 1,58 und 4,75 kW/m<sup>2</sup> kann von leichten Verletzungen ausgegangen werden. Bei einer Wärmestromdichte von unter 1,58 kW/m<sup>2</sup> wird davon ausgegangen, dass keine ernst

Verletzungen hervorgerufen werden. Vergleicht man die Ergebnisse aus Tabelle 25, kann von einer maximalen Länge (Längenkoordinate  $x$ ) des Gefahrenbereichs von ca. 88 m (bei 700 bar und 100 mm) ausgegangen werden. Quer (Breitenkoordinate  $y$ ) zur Freisetzungsrichtung ergibt sich ein Gefahrenbereich von 84 m (Vernachlässigung der Tunnelwände). Eine Reduktion des TPRD Durchmessers auf 2,25 mm bei gleichem Speicherdruck verringert die Längsausdehnung des Gefahrenbereichs auf ca. 20 m und die Quer-Ausdehnung auf 17 m. Der Bereich in dem mit schweren Verletzungen zu rechnen ist erstreckt sich über ca. 13 m (längs) bzw. 10 m (quer). Die Todeszone hat eine Größe von 8 m Länge und 4 m Breite.





**Tabelle 25: Gefahrenbereiche durch den Strahlungswärmefluss zufolge einer Wasserstoff-Stichflamme in Abhängigkeit des Speicherdrucks sowie des TPRD Durchmessers.**

Ein weiteres Verletzungskriterium bezieht sich auf die Einwirkung von hohen Temperaturen. Aus diesem Grund wurde analog zur Berechnung der Wärmestromdichte, die Flammenlänge für unterschiedliche Speicherdrücke und TPRD Durchmesser berechnet. Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnung, die mit einem aus dem HyTunnel-CS Projekt entwickelten analytischen Modell durchgeführt wurde. Die angeführten Werte beziehen sich auf jene Länge, die zwischen der Austrittsstelle und jenem Ort zurückgelegt wird, an dem keine Verletzung zu erwarten ist (70°C) respektive mit Todesfolgen zu rechnen ist (309°C).

Der größte Gefahrenbereich ergibt sich wiederum für die Kombination aus hohem Speicherdruck (700 bar) und großem TPRD Durchmesser (10 mm) und erstreckt sich über eine Länge von 65,9 m. Bei aktuell üblichen TPRD Durchmessern (ca. 2,25 mm) reduziert sich der Gefahrenbereich auf 14,8 m (PKW) respektive 11,7 m (Busse).

TPRD	Bus Tank (350 bar, 205 l)		Bus Tank (700 bar, 69 l)	
	70°C	309°C	70°C	309°C
0,5 mm	4,5 m	2,6 m	5.8 m	3.3 m
2,25 mm	20,4 m	11,7 m	26.0 m	14.8 m
5,0 mm	45,4 m	25,9 m	57.7 m	32.9 m
10,0 mm	90,8 m	51,9 m	115.3 m	65.9 m

**Tabelle 26: Gefahrenbereiche (Flammenlängen) durch hohe Temperaturen zufolge einer Wasserstoff-Stichflamme in Abhängigkeit des Speicherdrucks sowie des TPRD Durchmessers.**

Vergleicht man die Größe der Gefahrenbereiche zufolge der Wärmestromdichte sowie der auftretenden Temperaturen, so zeigt sich, dass das Temperatur-Kriterium entscheidend ist.

## 4.3. Tankbruch

### 4.3.1. Literaturrecherche

Im Falle eines Versagens des TPRD bei thermischer Einwirkung (Szenario S5) oder einer massiven mechanischen Einwirkung (Szenario S1) und einer damit einhergehenden Schwächung des Tanks, kann es zu einem Tankbruch kommen, welcher zu einem raschen Abbau der mechanischen Energie (hohe Speicherdrücke) führt. Die im Wasserstoff chemisch gebundene Energie (unterer Heizwert) führt bei Entzündung zu einer zusätzlichen Verstärkung der bei einem Tankbruch entstehenden und sich durch den Tunnel ausbreitenden Druckwelle. Diese Druckwelle kann je nach involvierter Wasserstoffmasse, zerstörerisches Ausmaß annehmen. Aus diesem Grund wurde das Szenario Tankbruch bereits in einer Vielzahl von Studien genau analysiert. Speziell hervorzuheben ist hierbei das EU geförderte HyTunnel CS Projekt [79], in dem Detailbetrachtungen zum Verhalten von Wasserstofftanks (Versagensmodell) sowie zur Ausbreitung der Druckwelle beim Versagen eines Tanks und der Größe des Feuerballs gemacht wurden.

Die Ergebnisse dieses Projekts liegen mittlerweile in Berichtsform sowie in zahlreichen Publikationen vor. Unter anderem haben [80] den bei einem Tankbruch zu erwartenden Feuerball untersucht, um Gefahrenbereiche durch die thermische Einwirkung zu definieren. Die durchgeführten Untersuchungen beinhalteten sowohl analytische als auch numerische Methoden. In der Literatur existieren zahlreiche Ansätze zur Berechnung der Größe eines Feuerballs. Jedoch beziehen sich diese meist auf eine ungestörte Ausbreitung in offener Umgebung, da von einer Halbkugelförmigen Form des Feuerballs ausgegangen wird. Makarov merkte an, dass diese Modelle für einen Tunnel ungeeignet scheinen, da diese ungestörte Ausbreitung auf Grund der Beschränkungen durch die Tunnelwände nicht angenommen werden kann. Bei einem Tankbruch unter einem Auto, stellt zudem das Fahrzeug selbst ein Hindernis dar, welches zur Zerstörung der Halbkugelform führen würde. Die notwendige mechanische Energie, die notwendig ist, um den Tank selbst zum Bersten zu bringen, hat ebenfalls Einfluss auf die Form des Feuerballs. Um diesen physischen Einflüssen gerecht zu werden, muss ein Höhen zu Längen Verhältnis berücksichtigt werden. Ausgehend von einem Verhältnis im Bereich von 3 bis 30 und einer Wasserstoffmasse von 6 kg (druckförmige Speicherung in einem PKW Tank), haben die Autoren eine Feuerballgröße von 8,5 bis 18 m abgeleitet. Bei flüssiger Speicherung, führt dieselbe Wasserstoffmasse zu einem Feuerball mit

8 m Ausdehnung. Die thermische Einwirkung (Wärmestromdichte) überschreitet die Grenzwerte für Verbrennungen ersten Grades in einem Bereich von bis zu 5 m.

Neben der thermischen Einwirkung kommt es bei einem Tankbruch jedoch vor allem zu einer mechanischen Einwirkung. Diese wurden unter anderem von [81] im Zuge von Experimenten im Vollmaßstab untersucht. Diese inkludierten zwei Messkampagnen in einem Versuchstunnel, welche auf den mechanischen und den chemischen Anteil an einer Druckwelle fokussierten. Aus diesem Grund wurden in der ersten Messkampagne Tankbruchszenarien mit Wasserstoff unter einem Speicherdruck von 47 – 610 bar durchgeführt. In der zweiten Messkampagne wurde Helium eingesetzt, da dieses vergleichbare physikalische Eigenschaften hat und als inertes Gas zu keiner chemischen Reaktion führt, sodass lediglich der mechanische Anteil einer Druckwelle zufolge eines Tankbruchs beobachtet werden kann. Der gemessene Überdruck bei den Tests mit Helium lagen abhängig vom Speicherdruck im Bereich von 2 kPa bis 14 kPa. Bei den Tests mit Wasserstoff erreichte der Überdruck Werte bis zu 20 kPa. Somit haben die Experimente gezeigt, dass die Stärke der Druckwelle bei einem Tankbruch nicht ausschließlich vom aktuellen Druck im Tank abhängt, sondern ebenfalls eine Funktion der Wasserstoffmasse, die an einer chemischen Reaktion (Verbrennung) teilnimmt, ist.

Aufbauend auf diese Ergebnisse haben [82] eine allgemein gültige Korrelation zum Abbau des Überdrucks bei der Ausbreitung der Druckwelle im Tunnel abgeleitet. Diese Korrelation wurde anhand der Ergebnisse von zahlreichen numerischen Simulationen bestimmt. Die Validierung des Rechenmodells wurde auf Basis der experimentellen Untersuchungen sowie weiteren verfügbaren Daten aus der Literatur durchgeführt. Gemäß den Autoren kann die Korrelation für den in Tabelle 27 angeführten Anwendungsbereich verwendet werden.

Parameter	Limits
Tunnelquerschnitt	24 – 149 m <sup>2</sup>
Breiten zu Höhen Verhältnis	1,2 bis 2,7
Tunnellänge	150 – 1500 m
Tankvolumen	15 – 176 l
Tankdruck	Max. 950 bar

**Tabelle 27: Anwendungsbereich des Berechnungsmodells zum Abbau des Überdrucks nach Bersten eines H<sub>2</sub> Tanks nach [82]**

Geht man von einem zweisepurigen Tunnel mit einer Länge von 1.500 m und einem 176 l Wasserstofftank bei einem Tankdruck von 950 bar aus, ergibt sich in Abhängigkeit der Distanz zum Ereignis ein Überdruck von 300 bar (30MPa) in unmittelbarer Umgebung zum Fahrzeug, 50 kPa bei 100 m, 30 kPa bei 300 m und 20 kPa in 1.200 m. Der Grenzwert für keine Verletzungen wird innerhalb des Tunnels nicht unterschritten. Abbildung 66 zeigt die Abklingkurven in einem zweisepurigen Tunnel für unterschiedliche Tankvolumina und Tankdrücke. Hierbei ist speziell auf die logarithmische Skalierung der Ordinate (Druckachse) zu achten.

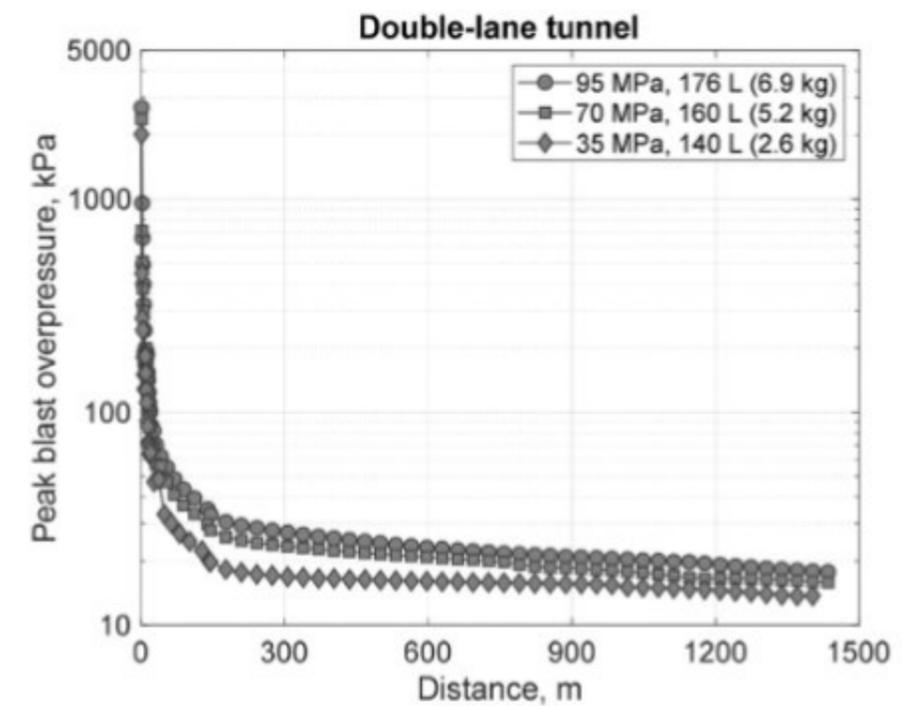


Abbildung 66: Abklingkurve des Überdrucks nach einem Tankbruch im Tunnel für unterschiedliche Tanksysteme [82]

Vergleicht man die Ergebnisse mit den Verletzungskriterium gemäß [66] (Todesfolgen durch Lungenblutungen ab ca. 1 bar = 100 kPa) respektive [83], ergeben sich die in Tabelle 28 angeführten Gefahrenbereiche. Demnach ist innerhalb eines Bereichs von 35 m mit Todesfolgen zu rechnen. Schwere Verletzungen treten bis zu einer Distanz von über einen Kilometer auf. Mit leichten Verletzungen ist im gesamten Tunnel zu rechnen.

Gefahrenzone	Tank 99% SoC (70 MPa)	Tank 59% SoC (35.5 MPa)
Todesfolgen	0 – 35 m	0 – 70 m
Schwere Verletzungen	35 – 1150 m	70 – 900 m
Leichte Verletzungen	1150 – 4600 m (Tunnelportal)	900 – 4600 m (Tunnelportal)
Keine Verletzungen	-	-

**Tabelle 28: Gefahrenbereiche zufolge der Druckwelle bei Tankbruch eines FCEVs gemäß HyTunnel-CS Projekt**

Neben den Untersuchungen im Zuge des HyTunnel CS Projekts, haben sich noch weitere Forschungsgruppen mit diesem Thema beschäftigt. So hat [70] ebenfalls analytische Betrachtungen zu diesem Thema durchgeführt und dabei den entstehenden Überdruck als Funktion des Abstands zum Ereignis berechnet.

Das Tankbruchszenario wurde zudem auch schon in Risikoanalysen näher betrachtet. Beispielsweise haben [64] [63] die Eintrittswahrscheinlichkeit des Bruchs eines PKW-Wasserstofftanks als 6.700 – 330.000-Fach geringer als den Brand eines konventionellen Fahrzeugs eingestuft. Der Bruch des Tanks eines Busses wird als noch unwahrscheinlicher erachtet. Das Schadensausmaß hingegen ist enorm. So kann von 15-20 tödlich verletzten Personen ausgegangen werden. Die Autoren haben jedoch die Tatsache deutlich hervorgehoben, dass eine massive äußere Wärmeeinwirkung vorhanden sein muss, um das Bersten eines Tanks zu verursachen. Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass es einige Zeit dauert bis diese äußere Wärmequelle (brennendes Fahrzeug) ausreichend Wärme freisetzt. Demzufolge wird davon ausgegangen, dass ausreichend Zeit zur Flucht vorhanden ist, bevor es zu einem Tankbruch kommt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein Tankbruch die Folge einer massiven thermischen Einwirkung auf den Wasserstoff Tank in Kombination mit dem Versagen eines TPRDs ist. Bis zum Eintreten eines solchen Szenarios vergeht in den meisten Fällen ausreichend Zeit, um in sichere Bereiche (ins Freie oder in die zweite Tunnelröhre) flüchten

zu können. Sollten sich während des Bruchs eines Tanks jedoch Personen im Tunnel befinden, ist jedenfalls mit leichten bis tödlichen Verletzungen zu rechnen.

## 4.4. Gaswolkenexplosion

Eine Wasserstoffwolke im Tunnel entsteht nach einer ungezündeten Freisetzung von Wasserstoff (Szenario S2 und S3). Diese kann grundsätzlich thermisch bedingt sein. Auf Grund der geringen benötigten Aktivierungsenergie von Wasserstoff, wird im Allgemeinen jedoch davon ausgegangen, dass eine äußere Wärmequelle ausreicht, um den freigesetzten Wasserstoff zu zünden und somit eine Wasserstoff Stichflamme zu verursachen. Dennoch kann dieses Szenario nicht ausgeschlossen werden. Im Vergleich dazu ist eine ungezündete Freisetzung von Wasserstoff durch eine mechanische Einwirkung (Unfall) wahrscheinlicher. Auf Grund der hohen Sicherheitsstandards ist die Eintrittswahrscheinlichkeit aber ebenfalls gering. Eine genaue Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeiten ist auf Grund der fehlenden Datenbasis bzw. fehlender Erfahrungswerte aus realen Ereignissen nicht möglich.

Sieht man von der Eintrittswahrscheinlichkeit ab und beschäftigt sich nur mit dem Schadensausmaß, kann von einer zerstörerischen Druckwelle ausgegangen werden, die sich durch den Tunnel ausbreitet. Auf Grund der Tatsache, dass sich eine Wasserstoffwolke mit der Tunnelströmung ausbreitet, muss der Ort der Zündung nicht der Ort der Freisetzung sein. Dies resultiert in äußerst großen Gefahrenbereichen in denen sowohl die mechanische Einwirkung oder aber auch die thermische Einwirkung zu tödlichen oder schweren Verletzungen führen kann.

### 4.4.1. Literaturrecherche

Auf Grund des großen Schadenspotenzials wurde die Explosion einer Wasserstoffwolke im Tunnel bereits in einigen Forschungsprojekten genauer untersucht. Dies wurde wiederum sowohl mit analytischen und numerischen Ansätzen als auch Anhand von Experimenten durchgeführt.

[70] hat mit analytischen Ansätzen die auftretenden Überdrücke bei einer Explosion einer Wasserstoffwolke im Tunnel berechnet. Hierbei ist von einem zweispurigen Tunnel und einer Wasserstoffmasse im Bereich von 2 bis 6 kg (gesamter Tankinhalt) ausgegangen worden. In der Zündungsphase tritt eine lokale Verbrennung von Wasserstoff auf. Mit zunehmender Ausbreitung kommt es zur Beschleunigung der Flammenfront, welche durch Objekte im Fahrtunnel (z.B. Fahrzeuge) zusätzlich verstärkt wird. Schlussendlich führt dies zu einer Deflagration. Bei einer hohen Wasserstoffkonzentration kann mitunter auch eine Detonation

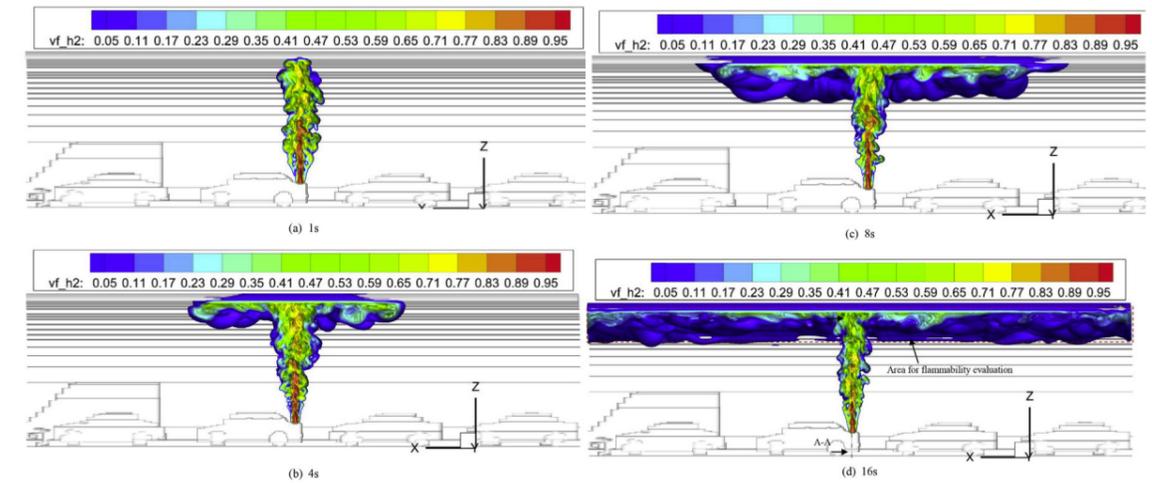
erfolgen. Ausgehend von einer Detonation, hat Li einen Überdruck von knapp über 50 kPa (bei 2-4 kg  $H_2$ ) respektive 60 kPa (bei 6 kg  $H_2$ ) berechnet. In einer Entfernung von 100 m vom Zündort, liegt der Überdruck noch immer bei 20 – 40 kPa.

Neben dieser analytischen Betrachtung wurden auch einige experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Diese wurden jedoch nur zum Teil in Tunnelanlagen durchgeführt. Eine der Untersuchungen die in anderer Umgebung durchgeführt wurde, soll jedoch an dieser Stelle kurz beschrieben werden, da diese den Einfluss der Durchlüftung in einem halb abgeschlossenen Testvolumen beinhaltete. [68] führten diese Experimente durch und haben Lüftungsraten von 6 – 10 Luftwechsel pro Stunde (gemäß britischem Standard) generiert. Hierbei zeigte sich, dass diese Luftwechselraten ausreichten, um die Wasserstoffkonzentration unter 9 Vol% zu halten. Somit kann davon ausgegangen werden, dass Deflagrationen und Detonation verhindert werden können.

Weitere experimentelle Untersuchung in einem Testtunnel wurden von [16] durchgeführt. Diese wurden bereits in Kapitel 2.1.4 näher beschrieben. An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Konzentration des Wasserstoffs, die Schichthöhen sowie die Ausdehnung der Wolke, maßgebenden Einfluss auf die entstehenden Überdrücke haben.

Im Zuge des HyTunnel-CS Projekts wurden zudem numerische Untersuchungen zur Berechnung der Ausbildung einer Wasserstoffwolke, der auftretenden Wasserstoffkonzentration, sowie zu den auftretenden Überdrücken bei der Explosion einer Wasserstoffwolke durchgeführt [83] [77].

Das in den Simulationen verwendete Blowdown Modell basierte auf einem Speicherdruck von 700 bar und einem TPRD Durchmesser von 2,25 mm. Letzterer wurde in den Simulationen jedoch auf 0,1 m vergrößert, um die numerischen Anforderungen zu reduzieren und annehmbare Rechenzeiten zu erzielen. Die Freisetzung des Wasserstoffs erfolgte vertikal bzw. nach oben gerichtet (Abweichung zur gängigen Orientierung des TPRDs). Abbildung 67 zeigt wie der Wasserstoffstrahl sich zunächst frei ausbreitet, anschließend die Tunneldecke erreicht und sich nach und nach eine Wasserstoffwolke ausbildet. Das Konzentrationsniveau erreicht Werte innerhalb der Zündgrenzen und unmittelbar über dem Ort der Freisetzung auch Werte die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Detonation führen.



**Abbildung 67: Ausformung der Wasserstoffwolke bei ungezündeter Freisetzung in einem Tunnel [77]. (a) eine Sekunde, (b) 4 Sekunden, (c) 8 Sekunden und (d) 16 Sekunden nach Öffnung des TPRDs**

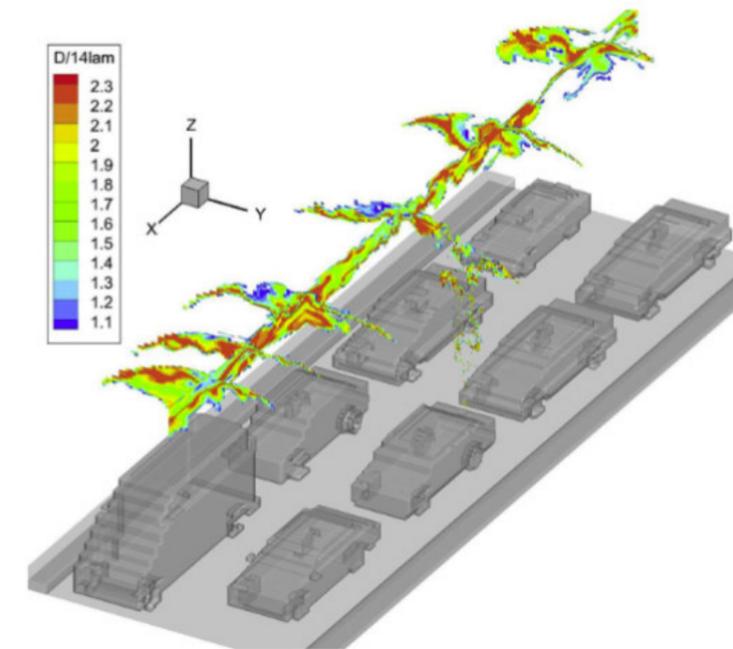
In [84] wird unter anderem ein Kriterium abgeleitet anhand welchem die Wahrscheinlichkeit einer Deflagration-Detonation Transition (DDT) beurteilt werden kann. Dieses sogenannte  $\lambda$ -Kriterium besagt, dass ab einer Schichtdicke der Wasserstoffwolke, die 13-14 mal so groß wie die Detonations-Zellgröße  $\lambda$  ist, das Auftreten einer Detonation (Ausbreitung der Druckwelle mit einer Geschwindigkeit größer der Schallgeschwindigkeit) wahrscheinlich ist.

Die Detonations-Zellgröße kann gemäß [85] mit den Gleichungen (1) und (2) berechnet werden. Diese Gleichungen berücksichtigen die Abhängigkeit der Detonations-Zellgröße von den thermischen Eigenschaften des Wasserstoff-Luft Gemischs.

$$\log_{10} \lambda = (P - a) \left[ \frac{1}{0.1 - a} + b(P - 0.1) \right] \left( c - d + \frac{e}{T} \beta \right) + d - 2 \quad (1)$$

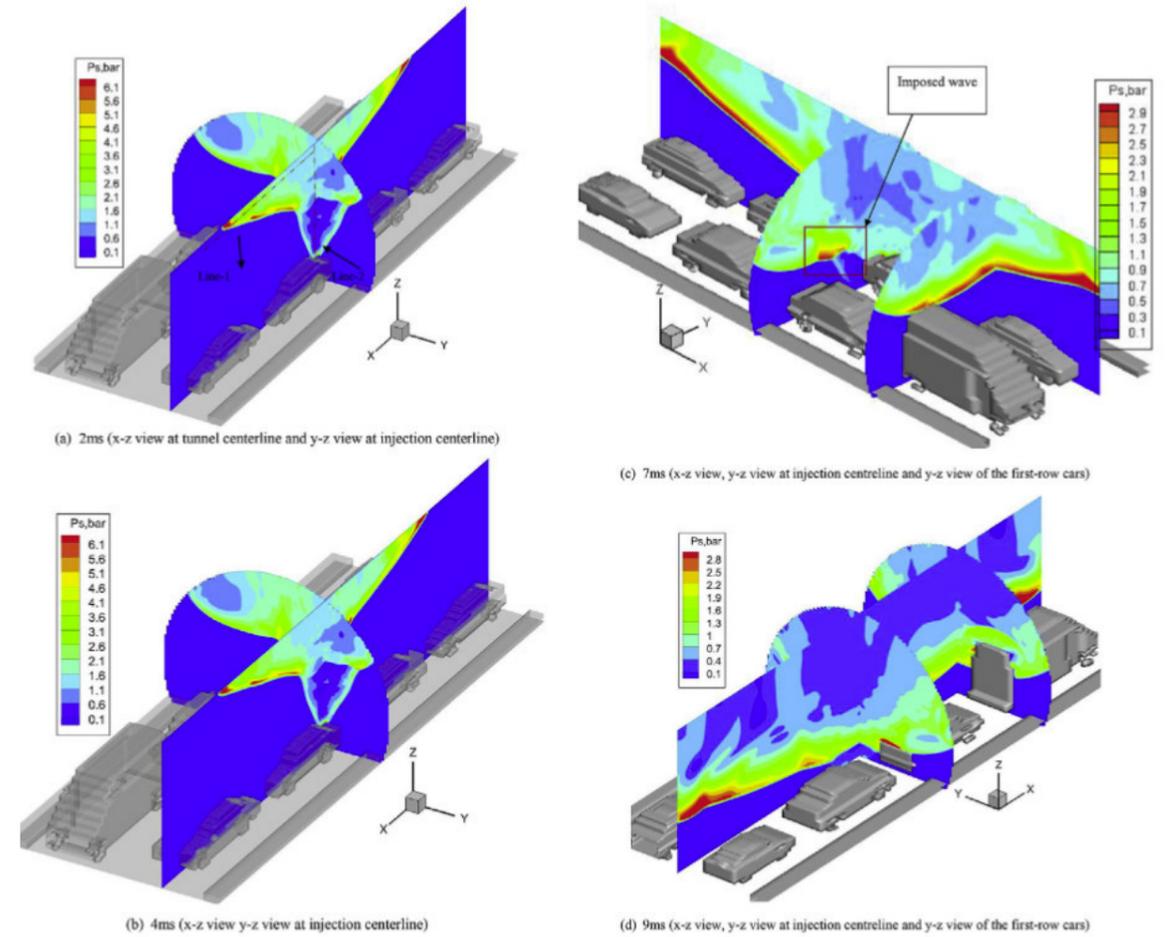
$$\beta = \frac{f}{(x_{h2} - g/T)^h} + i(x_{h2} - jT)^2 + k(x_{h2} - jT) \quad (2)$$

Mit dem in [77] generierten numerischen Modell, wurden die Bereiche in denen das  $\lambda$ -Kriterium ( $D/(14 * \lambda) > 1$ ) erreicht wurde, bestimmt und grafisch dargestellt (siehe Abbildung 68: Visualisierung der Bereiche, in denen das DDT Kriterium erreicht wird [77]). Diese Bereiche erstrecken sich einerseits über eine beachtliche Länge und füllen den Querschnitt im Bereich der Tunnelfirste.



**Abbildung 68: Visualisierung der Bereiche, in denen das DDT Kriterium erreicht wird [77]**

Hinsichtlich der Einwirkung auf Personen, stellt eine Detonation das worst case Szenario dar. Aus diesem Grund wurden von [77] die auftretenden Überdrücke bei einer Detonation in einem Tunnel unter Berücksichtigung von Fahrzeugen, die den freien Tunnelquerschnitt verringern, berechnet. Abbildung 69: Auftretende Überdrücke bei der Detonation in einem Tunnel zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Zündung einer Wasserstoffwolke [77]. (a) nach 2 ms, (b) nach 4 ms, (c) nach 7 ms und (d) nach 9 ms. zeigt die auftretenden Überdrücke bei der Ausbildung einer Detonation nach Zündung einer Wasserstoffwolke im Tunnel zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Zündung. Anhand der zu Beginn des Kapitels definierten Verletzungskriterien, stellen jene Bereiche, die gelb, orange oder rot markiert sind, Zonen dar, an denen Todesfolgen durch die mechanische Einwirkung auftreten können.



**Abbildung 69: Auftretende Überdrücke bei der Detonation in einem Tunnel zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Zündung einer Wasserstoffwolke [77]. (a) nach 2 ms, (b) nach 4 ms, (c) nach 7 ms und (d) nach 9 ms.**

#### 4.4.2. Numerische Simulationen

Ein entscheidender Aspekt bei der Gefahr einer Wasserstoffwolkenexplosion ist der Ort der Zündung. Dieser liegt innerhalb der Wolke, die ein zündfähiges Gemisch beinhaltet. Innerhalb dieser Wolke stellen elektrische Funken, heiße Oberflächen (Glühkerze, Lichter, etc.), offene Flammen, lokale Explosionen oder eine Druckwelle eine mögliche Zündquelle dar. Bisher wurden in der Literatur primär die Auswirkungen der Explosion einer Wasserstoffwolke betrachtet. Die räumliche Ausbreitung der Wasserstoffwolke wurde bisher nur rudimentär untersucht. So wurde die Ausbreitung, unter den in österreichischen Tunnelanlagen eingesetzten Lüftungsregimen, bisher noch gar nicht betrachtet. Die Lüftungsstrategien

inklusive den Zielwerten bezogen auf die Strömungsgeschwindigkeiten im Tunnel sind in der RVS definiert.

Um den Gefahrenbereich in österreichischen Tunnelanlagen zu ermitteln, und um die Größe der Wasserstoffwolke sowie die Konzentration des Wasserstoffs, unter Berücksichtigung der bei einem Ereignisfall in Österreich zu erzielenden Strömungsgeschwindigkeiten im Tunnel zu berechnen, wurden zusätzliche numerische Simulationen durchgeführt.

Da keinerlei Messdaten zur Validierung der numerischen Simulationen vorliegen, wurden diese mit zwei unterschiedlichen Softwarepaketen durchgeführt. So wurde einerseits das weitverbreitete CFD-Tool Ansys Fluent und andererseits das Softwarepaket Convergent CFD eingesetzt. In Summe wurden fünf Rechenszenarien betrachtet. Vier dieser Szenarien (Freisetzung aus PKW Tank) ergaben sich durch die Variation der Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel bei unterschiedlichem Grund der TPRD Auslösung auftreten können. In diesem Zusammenhang können folgende beiden (PKW) Ereignisszenarien unterschieden werden:

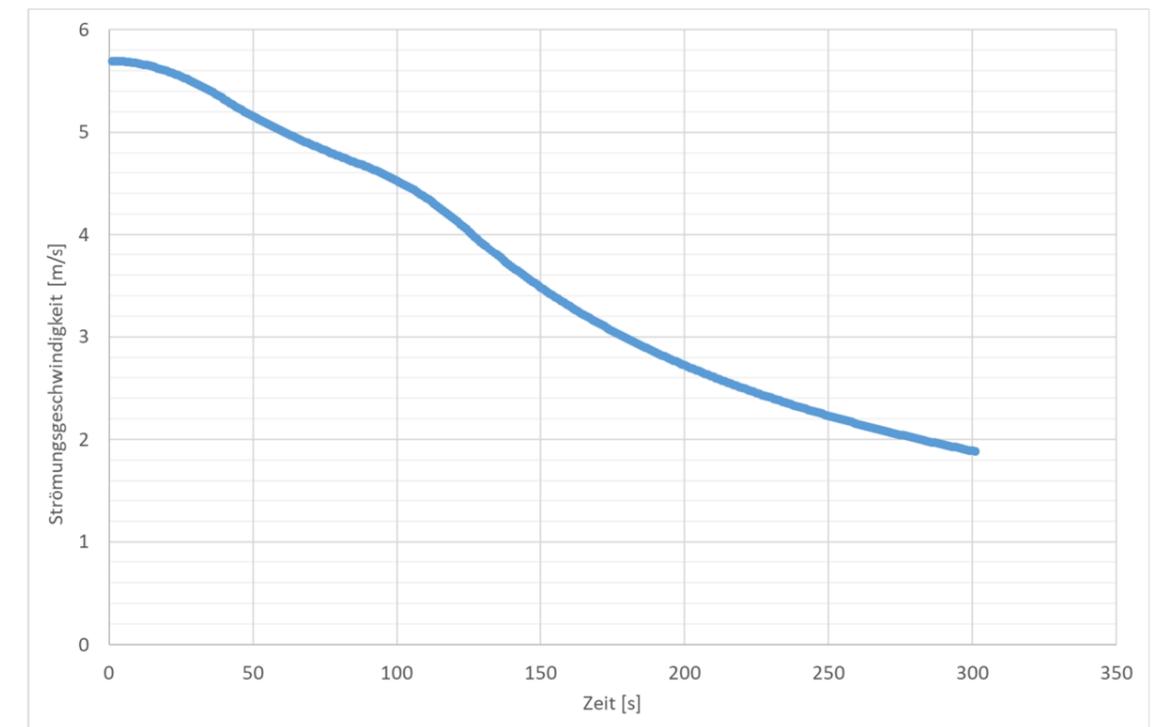
- Freisetzung von Wasserstoff durch mechanische Auslösung des TPRDs (Ereignisszenario S2)
- Freisetzung von Wasserstoff durch thermische Auslösung des TPRDs (Ereignisszenario S3)
- 
- Ein weiteres Szenario berücksichtigte die Freisetzung aus einem Bus bei einer transienten Tunnelströmung (mechanische Einwirkung).

Um den Einfluss der Strömungsbedingungen im Tunnel auf die Ausbildung der Wasserstoffwolke zu untersuchen, wurden für die beiden obgenannten PKW Rechenszenarien unterschiedliche Strömungsverhältnisse berücksichtigt. Zum einen wurde bei einer mechanischen Ursache (S2) davon ausgegangen, dass bis zum Eintreten der Wasserstofffreisetzung fließender Verkehr im Tunnel vorherrschte. Zum anderen wurde bei einer thermischen Auslösung davon ausgegangen, dass der Brand im Tunnel detektiert und die mechanische Lüftungsanlage bereits aktiviert wurde. In Summe wurden fünf Rechenfälle betrachtet, die sich aus der Freisetzung aus einem PKW durch die obgenannten Einflüsse, sowie der Freisetzung aus einem Bus zusammensetzen. Tabelle 29 zeigt diese Szenarien nochmals in einer Übersicht.

Szenario	Beschreibung	Strömung
CFD 1	Freisetzung aus PKW Tank zufolge mechanischer Einwirkung	Transient
CFD 2	Freisetzung aus PKW Tank zufolge thermischer Einwirkung	0,01 m/s
CFD 3	Freisetzung aus PKW Tank zufolge thermischer Einwirkung	1 m/s
CFD 4	Freisetzung aus PKW Tank zufolge thermischer Einwirkung	2 m/s
CFD 5	Freisetzung aus Bus Tank zufolge mechanischer Einwirkung	Transient

**Tabelle 29: Beschreibung der betrachteten CFD Rechenfälle inklusive zu Grunde gelegter Strömungssituation im Tunnel**

Die transiente Strömungsrandbedingung, die für die Szenarien einer Wasserstoff-Freisetzung zufolge mechanischer Einwirkung verwendet wurde, wurde anhand einer eindimensionalen transienten Vorsimulation, ermittelt. In dieser Vorsimulation wurde der fließende Verkehr in einem zweispurigen Tunnel mit anschließendem abrupten Stopp der Fahrzeuge berücksichtigt. Der sich daraus ergebende Verlauf der Tunnelströmung (Transient) ist in Abbildung 70 dargestellt. Bei fließendem Verkehr liegt eine Geschwindigkeit von ca. 5,7 m/s vor, welche sich nach dem unfallbedingten Anhalten der Fahrzeuge sukzessive auf 1,9 m/s (nach 300 s) reduziert.



**Abbildung 70: Verlauf der Längsströmungsgeschwindigkeit im Tunnel nach abruptem Anhalten des Fließverkehrs**

Die Freisetzung des Wasserstoffs aus einem PKW Tank (700 bar, 2,25 mm TPRD) respektive Bus Tank (350 bar, 5 mm TPRD) erfolgte gemäß den Blowdown-Modellen aus Tabelle 23.

### 4.4.3. Wasserstoff Freisetzung – PKW

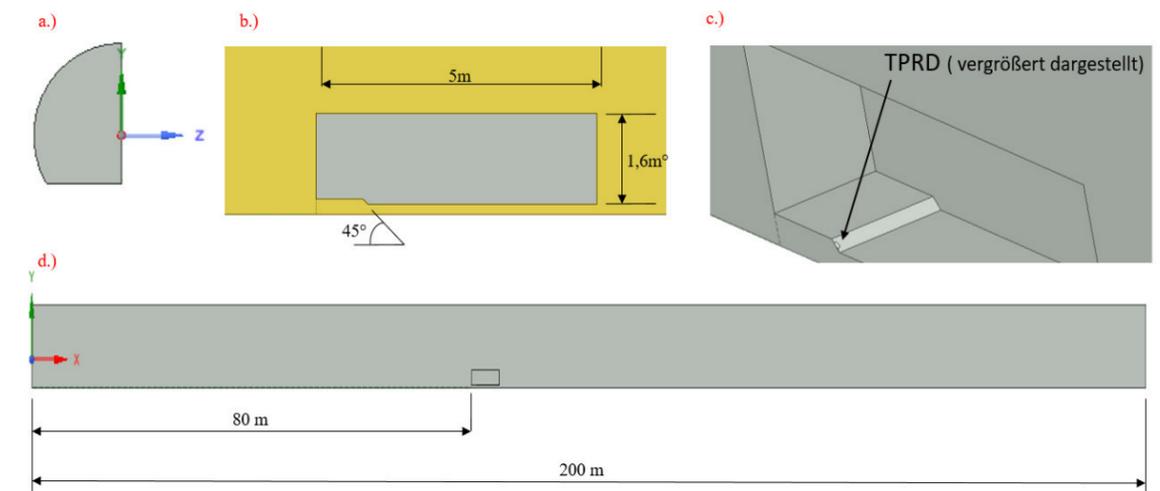
#### Netzgenerierung und Solversetup

Das Rechengebiet umfasste in beiden CFD Paketen jeweils einen Tunnel mit einer Länge von 200 m und einem Querschnitt von 60 m<sup>2</sup>. Auf eine Längsneigung des Tunnels wurde in den Simulationen verzichtet. Dies hat zwar definitiv Auswirkungen auf die Ausbreitung des Wasserstoffs, jedoch wird davon ausgegangen, dass auch ohne Längsneigung des Tunnels, allgemein gültige Aussagen generiert werden können.

In diesem Tunnel wurde eine Fahrzeugatruppe mit den Abmaßen 5 m x 1,8 m x 1,6 m in einem Abstand von 80 m zum Einfahrtportal und in einer Höhe von 0,165 m über der Fahrbahn positioniert. Die Orientierung des TPRDs wurde unter 45° zur Fahrbahn und entgegen der Tunnellängsströmung vorgesehen. Gemäß den in HyTunnel-CS formulierten Empfehlungen

[77] für die Simulation eines TPRDs wurde der Durchmesser des TPRDs um den Faktor 10 auf 2,25 cm vergrößert. Um den numerischen Aufwand zu reduzieren wurde das Fahrzeug zentral im Tunnelquerschnitt platziert, sodass ein Symmetrisches Strömungsgebiet erzeugt wurde. Unter Ausnutzung der Symmetrie konnte so die Anzahl der Rechenzellen halbiert werden.

Abbildung 71 beinhaltet einige Detailansichten des Berechnungsgebiets. So zeigt Grafik a.) den halbierten Querschnitt des Tunnels, Grafik b.) eine Detailansicht des Fahrzeugs, Grafik c.) die Positionierung des TPRDs und Grafik d.) einen Längsschnitt durch den Tunnel.



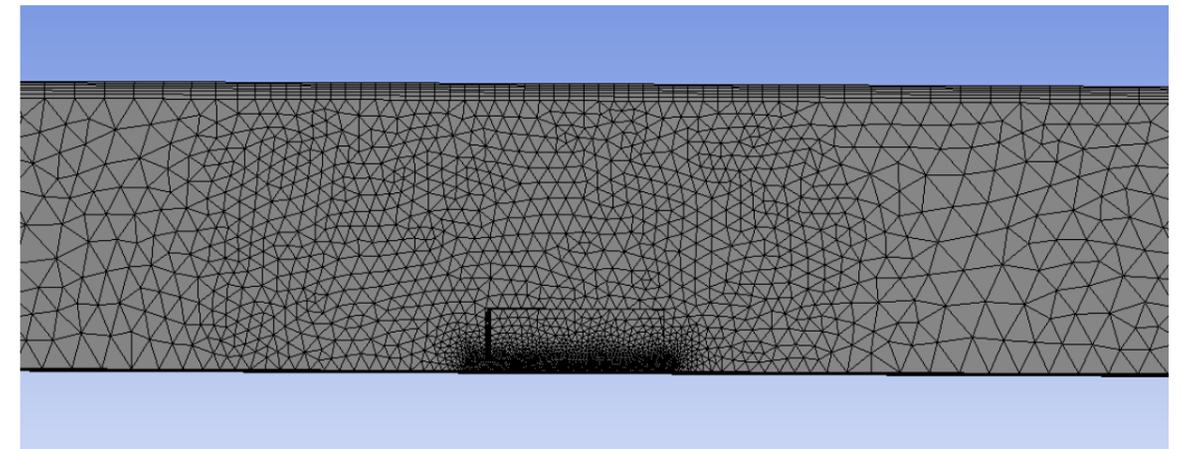
**Abbildung 71: Detailansichten des Rechengebiets. a.) Tunnelquerschnitt, b.) Detailansicht des Fahrzeugs, c.) Fahrzeugattrappe d.) Tunnellängsschnitt**

Um ansprechende Simulationsergebnisse zu erhalten, ist es notwendig das Rechengebiet so zu vernetzen, dass in Bereichen mit hohen Gradienten der Fluideigenschaften (z.B. Dichte, etc.) respektive der physikalischen Größen (Druck, Temperatur, Geschwindigkeit, etc.) eine ausreichend hohe örtliche Auflösung des Rechengebiets vorliegt. Dies gilt im konkreten Fall besonders für jenen Bereich unter dem Fahrzeug, in dem der Wasserstoff mit sehr hohen Strömungsgeschwindigkeiten in den Tunnel einströmt.

Die beiden Softwarepakete Ansys Fluent und Convergent CFD verfolgen unterschiedliche Ansätze bezogen auf die Netzgenerierung. Aus diesem Grund sei diese im Folgenden für beide Fälle separat beschrieben.

### Rechengitter - ANSYS Fluent:

ANSYS Fluent bietet eine große Auswahl an Optionen zur Erzeugung eines Rechengitters. Für die Simulation der Wasserstofffreisetzung im Tunnel wurde ein aus Tetraedern bestehendes Netz mit lokalen Verfeinerungen generiert. Abbildung 72 zeigt einen Ausschnitt des Rechengitters für den Bereich rund um das Fahrzeug. Global wurde die maximale Zellgröße für das Basisgitter mit 0,8 m festgelegt. Dieses Basisgitter wurde schrittweise in 3 Stufen verfeinert. In einem ersten Schritt wurde die Zellgröße in einem 15 m langen Tunnelabschnitt rund um das Fahrzeug auf 0,2 m verringert. Der zweite Schritt diente der Verfeinerung der Zellgröße im Strömungsvolumen unter dem Fahrzeug. Hier wurde die maximale Zellgröße mit 0,05 m festgelegt. Abschließend wurde auf der Fahrzeugunterseite (Fahrzeugboden) eine maximale Zellgröße von 0,0025 m aufgeprägt. Die Wachstumsrate der Zellen in den verfeinerten Bereichen wurde mit 2% (unter dem Fahrzeug) sowie 10% (Tunnelsektionen) festgelegt. Zusätzlich wurden im Bereich der Tunnelwände prismatische Zellen in 6 Schichten eingefügt, um das Strömungsprofil im Tunnel akkurat abbilden zu können.

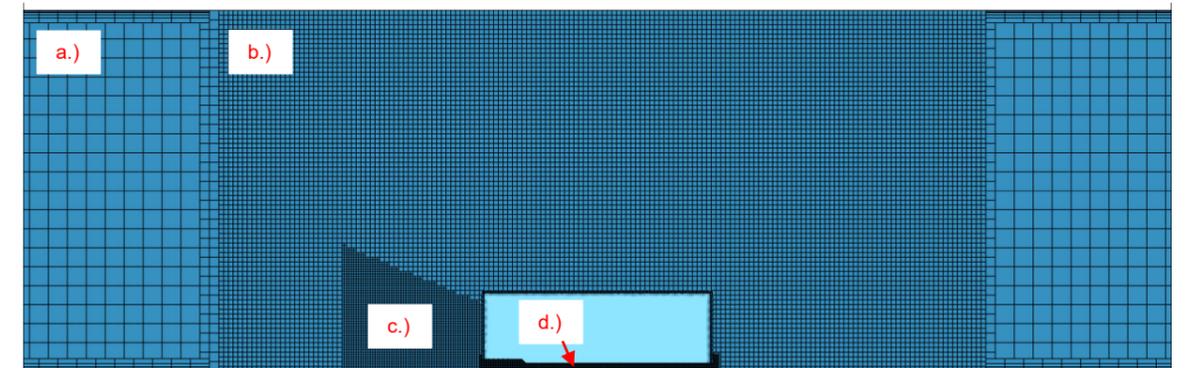


**Abbildung 72: Vernetzung des Rechengebiets um die Fahrzeugattrappe in Ansys Fluent**

### Rechengitter - Convergent CFD:

Die Netzgenerierung in Convergent CFD unterscheidet sich eklatant von jener in Ansys Fluent. Dies ist primär durch die Verwendung eines kartesischen Rechengitters bedingt. Zudem bietet Convergent CFD die Möglichkeit eines „Adaptive Mesh Refinements“, sodass bei Erreichen von benutzerdefinierten Kriterien (z.B. Gradient der Wasserstoffkonzentration) eine Verfeinerung des Rechengitters während der Simulation möglich wird. Die tatsächliche

Netzgenerierung erfolgte mit einem Basisgitter mit einer Zellgröße von 0,4 m. Im Bereich des Fahrzeugs wurde dieses Gitter schrittweise verfeinert, um die hohen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit und Wasserstoffkonzentration in diesem Bereich mit ausreichender Genauigkeit auflösen zu können. In Summe wurde in vier Schritten jeweils um den Faktor zwei verfeinert, sodass direkt unter dem Fahrzeug (Freisetzung von Wasserstoff) eine Zellgröße von 0,025 m verwendet wurde. Zur besseren Veranschaulichung ist eine Detailansicht des Rechengitters in Abbildung 73 dargestellt.



**Abbildung 73: Vernetzung des Rechengebiets um die Fahrzeugatrappe in Convergent CFD. a.) Basisgitter 0,4 m, b.) 0,1 m, c.) 0,05 m und d.) 0,025 m**

#### Solver setup:

Sowohl in Ansys Fluent als auch in Convergent CFD wurde ein Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS) Ansatz gewählt, um die Impuls-Erhaltungsgleichungen zu lösen. Die turbulente Strömung wurde jeweils mit einem k-epsilon Modell in Kombination mit dem „enhanced wall-treatment“ modelliert. Die Verknüpfung von Druck- und Geschwindigkeitsfeld erfolgte in beiden Fällen mit dem PISO Algorithmus.

Ein wesentlicher Aspekt bei der Modellierung einer Freisetzung von Wasserstoff im Tunnel ist das Verhalten des Gases. Während das Verhalten der Umgebungsluft respektive die Tunnelluft bei Umgebungszustand (Druck und Temperatur) im Wesentlichen als „ideales Gasverhalten“ modelliert werden kann, weicht das Verhalten von Wasserstoff bei hohen Drücken deutlich ab. Aus diesem Grund wurde in beiden Softwarepaketen reales Gasverhalten sowohl für den Wasserstoff als auch das Wasserstoff-Luft Gemisch angenommen.

Das Ausbreitungsverhalten von Wasserstoff im Tunnel ist primär durch die Tunnelströmung beeinflusst. Die Ausbildung einer Wasserstoffwolke ist jedoch ein Resultat der Auftriebsströmung von Wasserstoff, dessen geringe Dichte dazu führt, dass sich Wasserstoff unter der Tunneldecke akkumuliert. Um diesen Effekt in den CFD Simulationen zu berücksichtigen, wurde einerseits die Gravitation berücksichtigt und andererseits die Energiegleichung aktiviert, welche die Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Dichte der Gase ermöglicht.

#### Ergebnisse:

Die Längsausdehnung der bei der Freisetzung von Wasserstoff im Tunnel entstehenden Wasserstoffwolke ist maßgebend für die Gefahr die von ihr ausgeht. Diese ergibt sich durch den Kontakt der Wasserstoffwolke mit einer Zündquelle, welche die chemische Reaktion zwischen Wasserstoff und Sauerstoff auslöst. Die Stärke (Reaktionsgeschwindigkeit) dieser Reaktion ergibt sich wiederum durch die involvierte Wasserstoffmasse, die lokale Wasserstoffkonzentration sowie der Schichthöhe der Wasserstoffwolke (siehe [16]). Aus diesem Grund erfolgte die Auswertung der Simulationsergebnisse auf Basis dieser drei Größen:

- Länge der Wasserstoffwolke
- Konzentrationsniveau von Wasserstoff
- Schichthöhe der Wasserstoffwolke

Die thermische Auslösung des TPRDs und die damit verbundene Freisetzung von Wasserstoff ist im Allgemeinen die Folge einer äußeren Wärmeinwirkung wie z.B. einem Brand eines Fahrzeugs. In diesem Fall wird davon ausgegangen, dass der Brand bereits detektiert und das Lüftungssystem aktiviert wurde.

Abbildung 74 zeigt die Ergebnisse der Ansys Fluent Simulation in einem Vergleich der Ausbreitung der Wasserstoffwolke in den ersten 100 s nach Beginn der Freisetzung und bei Strömungsgeschwindigkeiten von 0,01 m/s, 1 m/s und 2 m/s.

Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,01 m/s zeigt sich von Beginn an eine nahezu symmetrische Ausbreitung des Wasserstoffs. Mit Fortschreitender Freisetzung von Wasserstoff wächst die Wasserstoffwolke bis zu einer Länge von ca. 150 m (nach 100 s). Während die maximale Konzentration unter dem Fahrzeug über der oberen Zündgrenze (ca.

76Vol%) liegt, erreicht die Konzentration an der Tunneldecke Werte innerhalb der Zündgrenzen (4 – 76Vol%). Dies ist speziell im Bereich über dem Fahrzeug der Fall. Die Schichtdicke des zündfähigen Gemischs erstreckt sich im Bereich des Fahrzeugs über die gesamte Tunnelhöhe. In den weiteren Tunnelsektionen reduziert sich die Schichthöhe auf ca. 0,1 m. Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf 1 m/s bzw. 2 m/s reduziert die Länge der zündfähigen Wasserstoffwolke signifikant. Das Konzentrationsniveau überschreitet in beiden Fällen die untere Zündgrenze nicht, sodass keine Gefahr zur Wasserstoffwolken Explosion besteht.

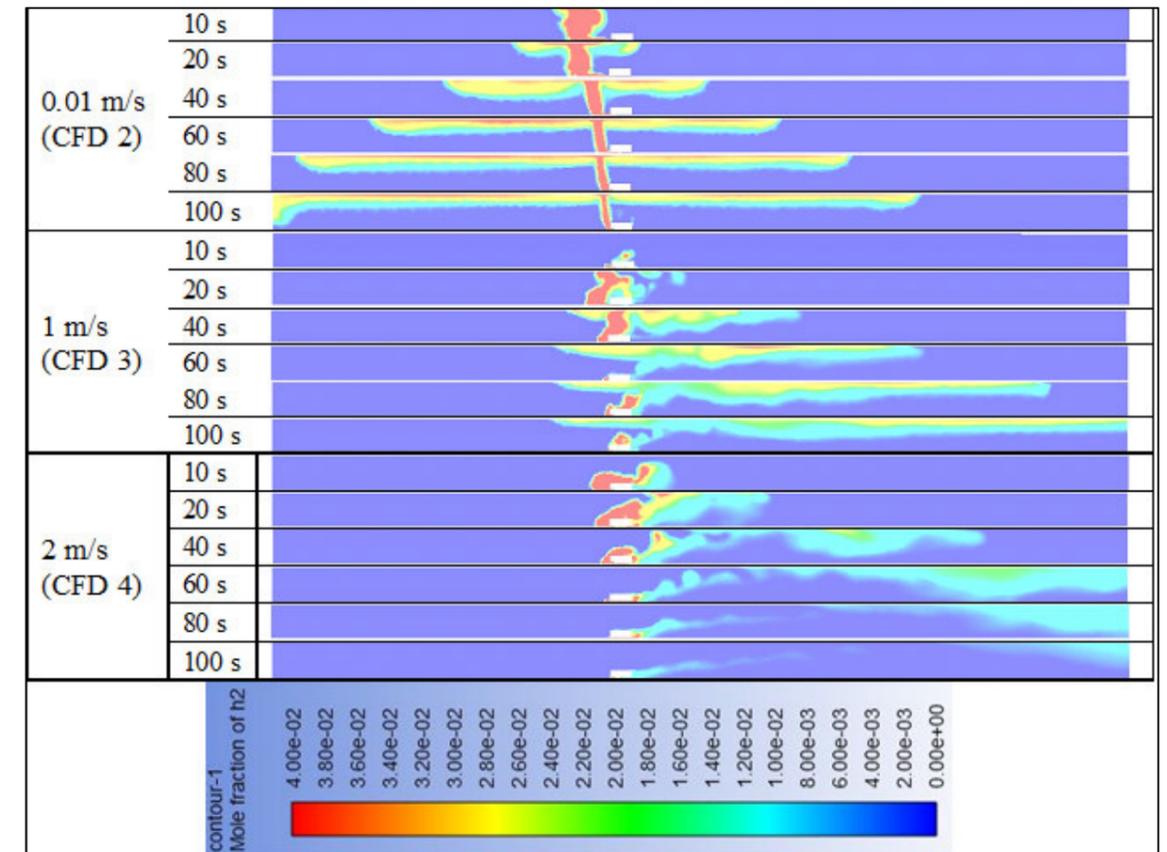


Abbildung 74: Ergebnisse der Berechnung mit Ansys Fluent. (rote Bereiche markieren zündfähiges Gemisch)

Um die Validität dieser Ergebnisse zu prüfen, sind die Simulationsergebnisse der Convergent CFD Simulation in Abbildung 75 zum Vergleich dargestellt. Diese inkludieren wiederum die Ausformung der Wasserstoffwolke innerhalb der ersten 100 s nach Beginn der Wasserstoff-Freisetzung und für Längsströmungsgeschwindigkeiten von 0,01 m/s, 1 m/s und 2 m/s. Zudem

wurde die Freisetzung des Wasserstoffs zufolge eines Unfalls (Freisetzung durch mechanische Einwirkung – CFD1) simuliert.

Analog zu den Ergebnissen aus Ansys Fluent zeigt sich bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,01 m/s eine nahezu symmetrische Ausbreitung des Wasserstoffs. Nach 100 s erreicht die Wasserstoffwolke eine Längserstreckung von ca. 160 m. Das Konzentrationsniveau liegt hierbei knapp über der unteren Zündgrenze. Die Schichtdicke variiert zwischen einigen Metern (zu Beginn der Freisetzung) und ca. 0,3 m nach 100 s.

Bei einer Erhöhung der Längsströmungsgeschwindigkeit auf 1 m/s zeigt sich eine deutliche Reduktion des zündfähigen Volumens. Dieses konzentriert sich primär stromabwärts vom Ort der Freisetzung. Die maximale Längserstreckung einer zündfähigen Wolke liegt bei ca. 80 m (nach 40 s). Die Schichthöhe zu diesem Zeitpunkt wurde mit 0,8 m – 1 m ermittelt.

Eine weitere Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit auf 2 m/s führt dazu, dass keine zündfähige Wasserstoffwolke entsteht.

Ein ähnliches Bild zeigt sich für das Szenario CFD 1, in welchem ein transienter Verlauf der Tunnelströmung (siehe Abbildung 70) nach dem Stopp des Fließverkehrs zufolge eines Unfalls angenommen wird. Die Ergebnisse dieser CFD Studie sind ebenfalls in Abbildung 75 zu sehen. Auf Grund der hohen Anfangsgeschwindigkeit der Luftströmung (5,7 m/s) kommt es zur sofortigen Verdünnung des freigesetzten Wasserstoffs ohne Ausbildung einer Wasserstoffwolke. Hierbei wird die untere Zündgrenze lediglich an der Stelle der Freisetzung überschritten.

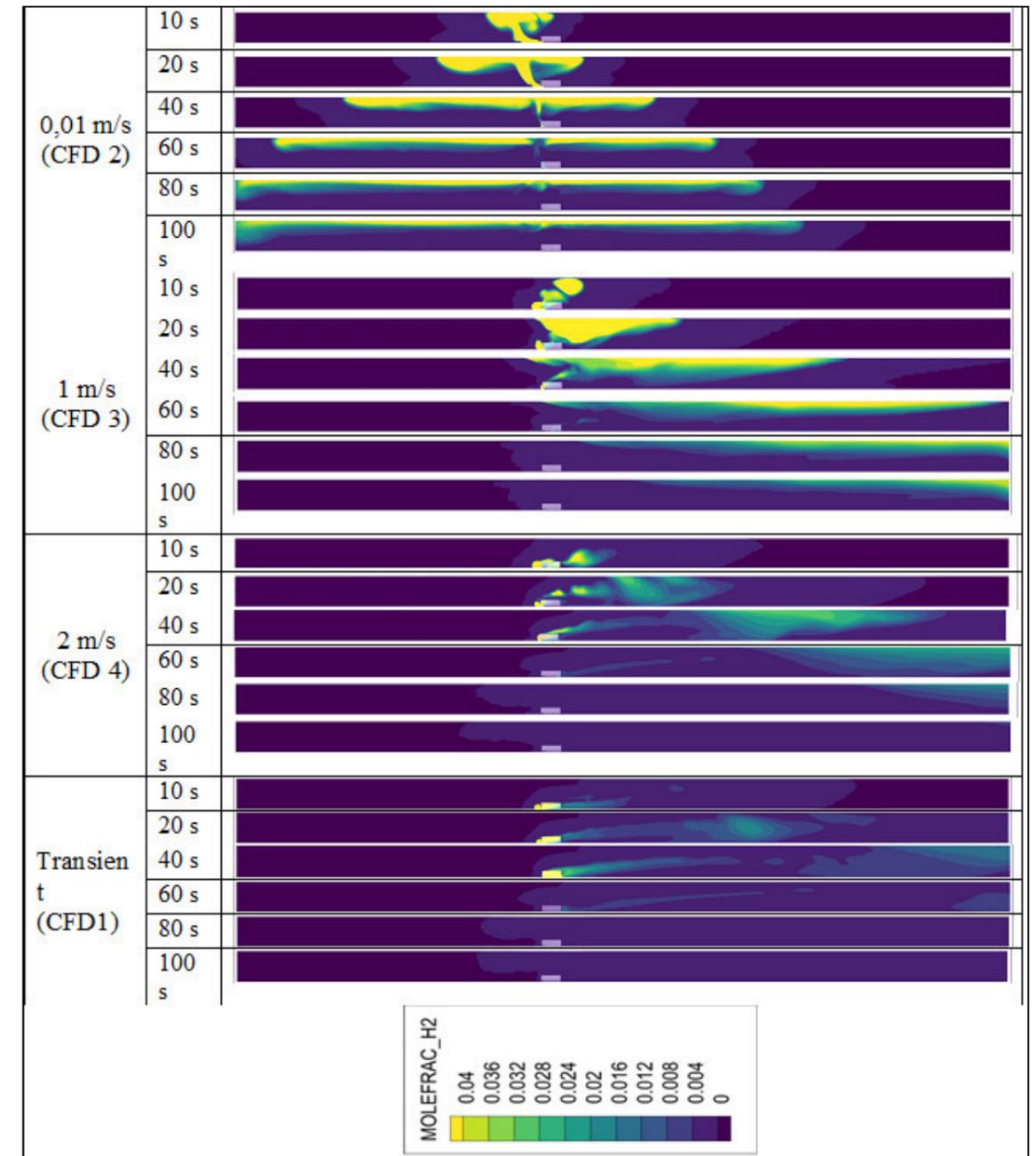


Abbildung 75: Ergebnisse der Berechnung mit Convergent CFD (gelbe Bereiche markieren zündfähiges Gemisch)

#### 4.4.4. Wasserstoff Freisetzung – Bus

Netzgenerierung, Randbedingungen und Solversetup:

##### Netzgenerierung

In weiterer Folge wurde zusätzlich ein Szenario mit Wasserstofffreisetzung aus den Tanks eines Busses simuliert. Dieses unterscheidet sich insofern von den vorangegangenen Freisetzungen aus einem PKW Tank, als der Ort der Freisetzung auf Grund der auf dem Dach angebrachten Tanks, deutlich höher über der Fahrbahn liegt als dies bei einem PKW Szenario der Fall ist. Zudem ist das Wasserstoff Inventar in aller Regel um ein Vielfach größer als jenes eines PKWs.

Abbildung 76 zeigt Detailansichten der erstellten Geometrie. Diese setzt sich wiederum aus einer 200 m langen Tunnelsektion mit einem Querschnitt von 60 m<sup>2</sup> sowie einer Fahrzeugattrappe zusammen. Die Fahrzeugattrappe wurde wiederum 75 m vom Einlass entfernt positioniert. Im Vergleich zur Position der PKW Attrappe, wurde die Bus-Attrappe jedoch exzentrisch auf der rechten Fahrspur vorgesehen. Die Abmaße des Busses wurden mit einer Länge von 12,2 m, einer Höhe von 3,15 m und einer Breite von 2,6 m an realen Busdimensionen angelehnt. Diese Attrappe befand sich in einer Höhe von 0,25 m über der Fahrbahn. Der Wasserstoff wurde horizontal aus einer Höhe von 2,95 m, aus insgesamt fünf Tanks mit 5 mm TPRD Durchmesser freigesetzt. Der TPRD Durchmesser wurde wiederum um den Faktor 10 auf 5 cm vergrößert. Zwei der TPRDs aus Abbildung 76 wurden in der Simulation nicht aktiviert.

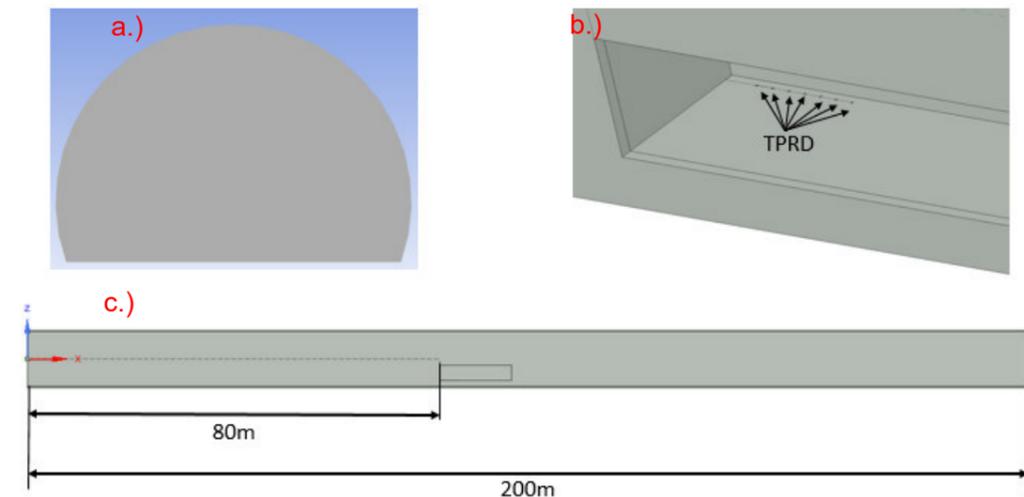


Abbildung 76: Detailsansichten zur erstellten Geometrie.  
a.) Tunnel Querschnitt, b.) Bus-Attrappe, c.) Tunnelgeometrie inklusive Bus Attrappe

#### 4.5. Auswirkungen von Ereignissen mit e-fuels

E-fuels werden als synthetische Alternative zu konventionellen Kraftstoffen wie Diesel und Benzin gesehen. Die Herstellung erfolgt mittels Fischer-Tropsch Synthese aus reinem Wasserstoff ( $H_2$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ), welche unter Einwirkung von hohem Druck und unter Beteiligung eines Katalysators zu Kohlen-Wasserstoffen reagieren und verflüssigt werden. Dieses Prinzip nennt sich Power to Liquid, da elektrische Energie in einen flüssigen Energieträger gewandelt wird. Anschließend in Raffinerien gewonnene eDiesel respektive eBenzin können in Reinform verwendet oder konventionellen Kraftstoffen beigemischt werden. Eine weitere Methode um efuels herzustellen ist die Methanol Synthese, welche Methanol als Ausgangsstoff verwendet.

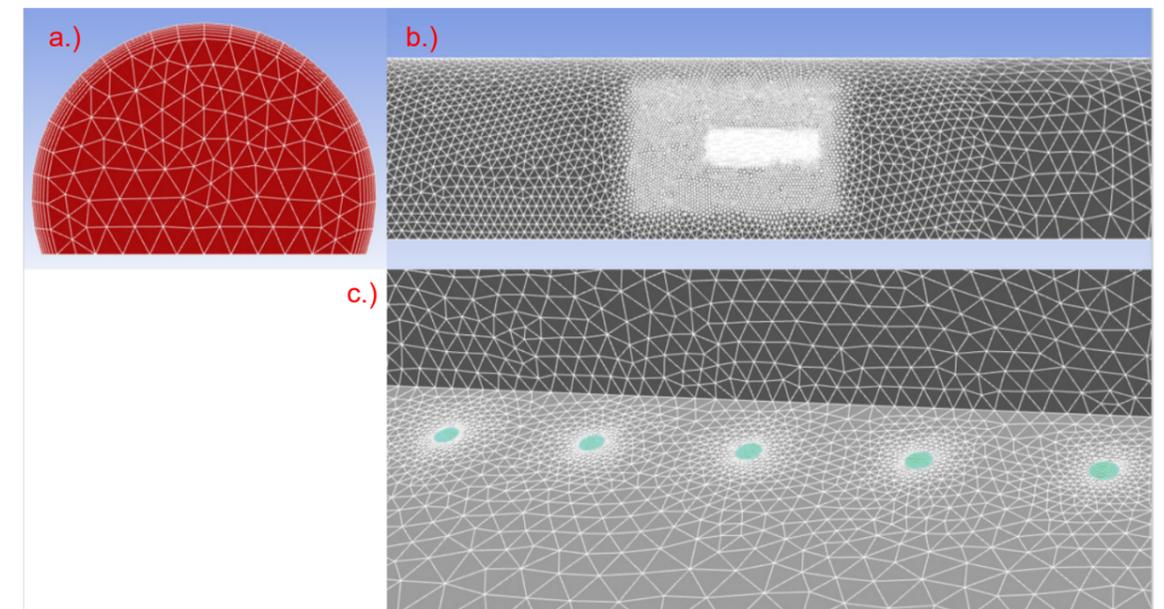
Der große Vorteil dieser synthetischen Kraftstoffe besteht in ihrer theoretisch erzielbaren Klimaneutralität sowie der Eignung der bestehenden Infrastruktur wie Tankstellen, Verteilernetze, Pipelines, etc. Zudem können die Kraftstoffe in herkömmlichen Verbrennungskraftmaschinen verwendet werden, sofern die Hersteller ihr Motoren dafür freigeben (aktuell z.B. Audi). Dies bedingt chemisch-physikalische Eigenschaften, die nahe an jenen von konventionellen Kraftstoffe liegen. Zudem erfolgt die Speicherung unter vergleichbaren Bedingungen bei Umgebungsdruck und in verflüssigtem Zustand. Die Gefahren, die von Ereignissen mit e-fuels ausgehen, sind somit mit jenen von konventionell

betriebenen Fahrzeugen vergleichbar. In der Mobilität kommen efuels bei nahezu allen Anwendungen, welche bisher mit Verbrennungskraftmaschine betrieben wurden zum Einsatz. Dies inkludiert Zweiräder, PKWs, Busse sowie Nutzfahrzeuge. Tabelle 30 zeigt einige chemische und physikalische Eigenschaften von efuels im Vergleich zu konventionellen Kraftstoffen.

**Tabelle 30: Chemisch-physikalische Eigenschaften konventioneller Kraftstoffe und ausgewählter Alternativen.**

Kraftstoff	Dichte [kg/l]	Zündpunk [°C]	Zündtemperatur [°C]	Untere Zündgrenze, [vol.%]	Siedetemperatur [°C]	Aktivierungs- energie [mJ]
Benzin	0.78	-35	220	0.6–8.0	30	0.24
Diesel	0.85	56	225	0.6–6.5	141	–
Biodiesel	0.89	172	256	–	345	–
Ethanol	0.79	12	400	3.1–27.7	78	–
Methanol	0.79	9	440	6.0–50.0	65	0.17

Analog zur Vorgehensweise bei der Vernetzung des Rechengebiets zur Simulation einer Wasserstofffreisetzung aus einem PKW, wurde wieder großer Wert auf eine ausreichend gute Auflösung jener Regionen in denen hohe Gradienten der Strömungsgeschwindigkeit und der Wasserstoff-Konzentration erwartet wurden, gelegt. Einige Detailansichten zum generierten Netz sind in Abbildung 77 dargestellt. Abbildung a.) zeigt die Auflösung des Querschnitts im Bereich des Einlasses in das Strömungsgebiet. Hervorzuheben sind die Prismenschichten an der Tunnelwand, die für eine Auflösung der hohen Gradienten der Strömungsgeschwindigkeiten an der Tunnelwand notwendig sind. Abbildung b.) zeigt die stufenweise Verfeinerung des Rechengebiets vom Basisgitter (max. Zellgröße 0,8 m) hin zum Ausströmbereich des Wasserstoffs (max. Zellgröße 5 mm). In den beiden Zwischenstufen wurden die maximale Zellgröße mit 0,4 m bzw. 0,2 m festgelegt. Die maximale Vergrößerungsrate der Zellen wurde mit 1,05 (5%) definiert. Abbildung c.) zeigt zudem das Rechengitter in unmittelbarer Umgebung der TPRDs.



**Abbildung 77: Detailansichten des generierten Rechengitters. a.) Querschnitt inklusive Prismenschichten, b.) unterschiedliche Zellgrößen, c.) Detailansicht TPRDs**

#### Randbedingungen

Die Längsströmungsgeschwindigkeit im Tunnel wurde gleich wie jene im Szenario CFD 1 als transientes Profil, welches sich durch den zum Erliegen kommenden Verkehr ergibt (siehe Abbildung 70), berücksichtigt. Demnach lag die initiale Strömungsgeschwindigkeit bei ca. 5,7 m/s.

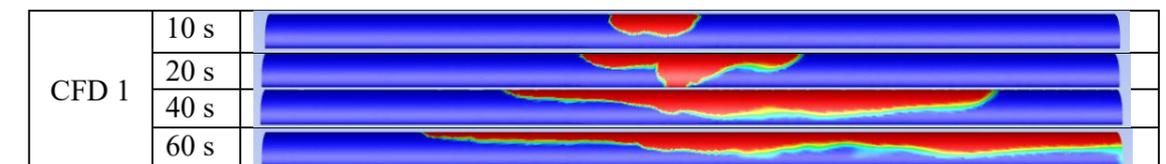
Die Freisetzung des Wasserstoffs erfolgte über fünf TPRDs mit zeitlich gestaffelter Auslösung. Der Wasserstoffmassenstrom wurde jeweils transient gemäß dem Blowdown-modell (350 bar, 205 l und 5 mm TPRD) aus Tabelle 23 angesetzt. Die zeitliche Staffelung erfolgte so, dass zu Beginn zwei der TPRDs aktiviert wurden. Mit einer Verzögerung von 10 s wurden TPRD 3 und 4 aktiviert und nach weiteren 10 s schließlich das fünfte TPRD. Dieser Ablauf entspricht einer Annahme, die sich durch das Einwirken einer massiven thermischen Last ergibt. Diese Last variiert jedoch örtlich und zeitlich, sodass von einer zeitgleichen Aktivierung aller TPRDs abgesehen wurde.

Solver Setup

Das Solver Setup blieb im Vergleich zu den Simulationen einer Freisetzung aus einem PKW unverändert. So wurde wiederum ein RANS Ansatz zur Lösung der Navier Stoke'schen Gleichungen gewählt. Als Turbulenzmodell kam wieder ein k-epsilon Modell in Kombination mit dem „enhanced wall treatment“ zum Einsatz. Die Verknüpfung von Druck- und Geschwindigkeitsfeld erfolgte wiederum mit dem PISO Algorithmus. Das Gasverhalten von Luft, Wasserstoff bzw. deren Gemisch wurde mit dem Realgas Redlich-Kwong Modell approximiert.

Ergebnisse:

Abbildung 78 zeigt die Ergebnisse CFD Simulation zur Freisetzung aus einem Bus für die ersten 60 Sekunden nach Beginn der Freisetzung. Diese zeigen, dass auf Grund der deutlich höheren, freigesetzten Wasserstoffmasse, großer Bereiche des Tunnels von einer zündfähigen Wasserstoffwolke ausgefüllt werden. So erstreckt sich die Wasserstoffwolke nach 60 Sekunden über eine Länge von 175 m. Die Schichthöhe des zündfähigen Gemischs beträgt bis zu 6,5 m, variiert jedoch stark über die Länge der Wolke.



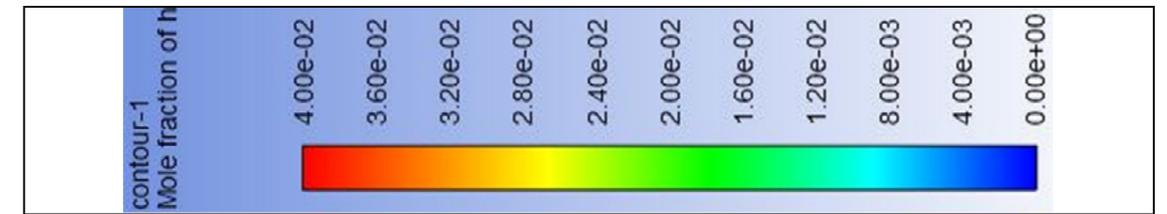


Abbildung 78: CFD 1 - Ergebnisse der Berechnung mit Ansys Fluent (rote Bereiche markieren zündfähiges Gemisch).

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 79 die Wasserstoffkonzentration zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Beginn der Freisetzung, jeweils in einer Ansicht von oben. In den rot hervorgehobenen Bereichen liegt die Konzentration über 20 Vol% (Molanteil = 0,2), sodass von einer Detonationsfähigkeit ausgegangen werden kann.

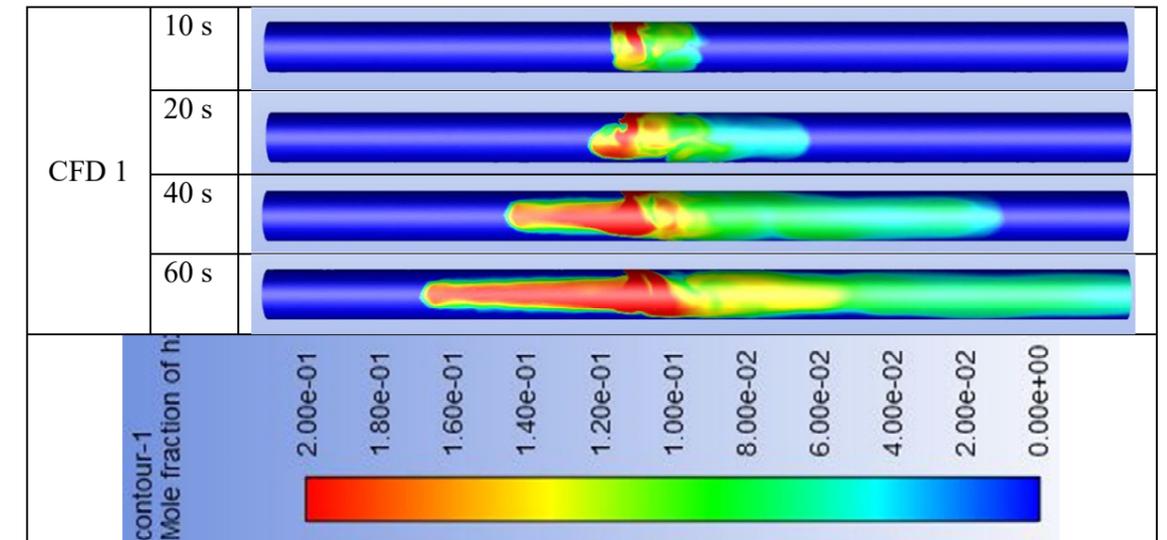


Abbildung 79: CFD 1 - Ergebnisse der Berechnung mit Ansys Fluent (rote Bereiche markieren detonationsfähiges Gemisch).

## 5. VERTIEFTE KONSEQUENZANALYSE HINSICHTLICH PERSONENGEFÄHRDUNGEN

### 5.1. Erarbeitung eines Bewertungsansatzes

In diesem Kapitel sollen die Auswirkungen von Unfallszenarien im Zusammenhang mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen auf die Personensicherheit in Tunnelbauwerken diskutiert werden. Die Diskussion für das Szenario 2 bzw. für das Szenario 3 aus Tabelle 22 (Kapitel 3.4) basiert auf den Ergebnissen aus Kapitel 4.4. Gefährdungsbereiche entsprechend der Szenarien 1, 4 und 5 aus Tabelle 22 ergeben sich aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff und werden im Folgenden diskutiert.

Um einen Vergleich mit Unfällen konventioneller Fahrzeuge herstellen zu können, wird zu Beginn die Modellierung konventioneller Fahrzeugbrände behandelt. In diesem Zusammenhang wird auch im Detail auf die Simulationen der Karosseriebrände, welche zusätzlich zu H<sub>2</sub>-Gefährdungen mitberücksichtigt werden müssen, eingegangen.

#### 5.1.1. Brände konventioneller Fahrzeuge

Wie schon in der Einleitung erwähnt ist es notwendig, auch die konventionellen Fahrzeugbrände entsprechend einer Konsequenzanalyse zu berücksichtigen. Die im Rahmen des österreichischen Tunnelrisikomodells (TuRisMo [86]) verwendeten Brandkurven, welche konventionelle Fahrzeugbrände repräsentieren, sind Abbildung 80, gezeigt (durchgezogene Linien). Darin wird die zeitliche Entwicklung eines 5 MW PKW Brandes (links) sowie eines 30 MW Bus Brands b(rechts) dargestellt. Zusätzlich zu den Hitzefreisetzungsraten sind auch die entsprechenden, für einen bestimmten Zeitrahmen freigesetzten Energien in GJ angegeben. Die Betrachtung der 5MW Brandkurve, welche über 900 Sekunden simuliert wird, lässt direkt auf die freigesetzte Energie von 4GJ schließen. Für den angesetzten 30MW Busbrand wurde der Wert für die freigesetzte Energie von 40GJ aus der Literatur übernommen, siehe [87].

Diesen Brandkurven sind normierte Freisetzungsraten der entstehenden Schadstoffe zugrunde gelegt, siehe Tabelle 31. An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass diese Brandkurven einen Karosseriebrand in Verbindung mit dem Brand des konventionellen Energieträgers (Benzin, Diesel) beschreiben.

Kommt es zum Brand eines wasserstoffbetriebenen Fahrzeugs, sollte jedoch ausschließlich die Brandlast der Fahrzeugkarosserie berücksichtigt werden, da bei zusätzlicher Wasserstoffbeteiligung differenzierte andere Gefährdungen zu berücksichtigen sind. Um die maximale Brandlast von PKW- bzw. Bus-Karosseriebränden abzuschätzen, wurde die entsprechende gesamte freigesetzte thermische Energie um den Brennwert von 50 Litern Benzin bzw. 480 Liter Diesel reduziert. Die zeitliche Brandentwicklung wurde nicht weiter adaptiert und die erhaltenen Brandkurven entsprechend PKW- bzw. Bus-Karosseriebränden sind zusätzlich in Abbildung 80 dargestellt (strichlierte Linien).

Die Schadenswirkungen bezüglich der konventionellen Fahrzeugbrände bzw. der Karosseriebrände werden mit der Fire Dynamics Simulator (FDS) Software unter Verwendung der zuvor diskutierten Brandkurven bzw. der damit verknüpften Quellraten modelliert. Für die Beurteilung der Auswirkungen des Brandrauches auf flüchtende Personen wird der FED/FIC Ansatz von Purser und McAllister [88] verwendet.

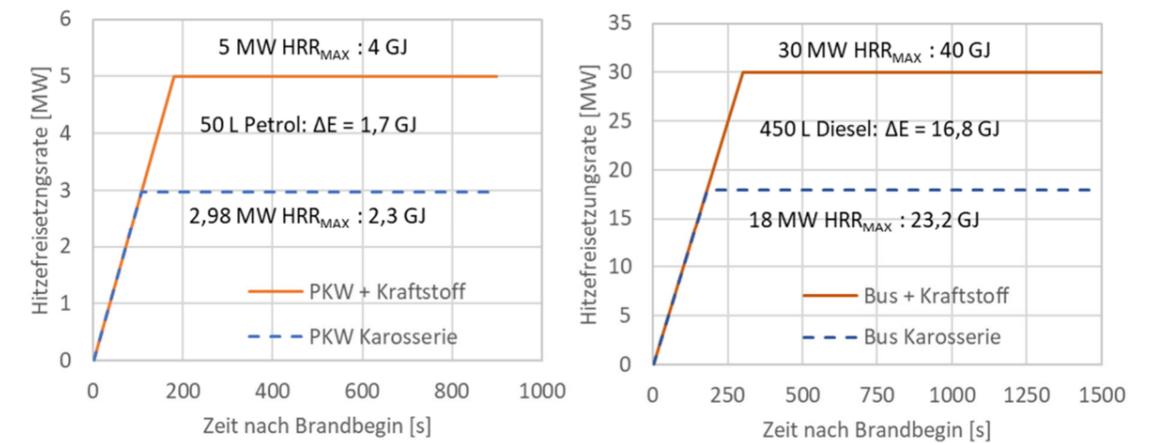


Abbildung 80: Brandkurven – konventionelle PKW und Bus Brandkurven entsprechend RVS 09.03.11 [86] – durchgezogene Linie und Brandkurven entsprechend der Karosseriebrände – strichlierte Linie

Tabelle 37: Quellraten und Zeitbedarf bis zum Erreichen der maximalen Brandlast für 5 MW, 30 MW und 100 MW-Brand (ILF 2008 bzw. Simonson et al. 2000, PIARC 1999)

Brandgröße	5 MW	30 MW	100 MW
Quellraten:			
CO <sub>2</sub> [kg/s]	0,46	2,8	9,2
CO [kg/s]	0,018	0,108	0,36
HCN [kg/s]	0,0045	0,027	0,09
Rußanteil [kg/kg*])	0,1	0,1	0,1
Zeitdauer [s]	180	300	420

\*) Abbrandrate berechnet für 40 MJ/kg

Tabelle 31: Quellraten konventioneller Fahrzeugbrände, Tabelle 37 aus Ref. [86]

### 5.1.2. Kollision eines H<sub>2</sub> Fahrzeuges mit unmittelbarem Bersten des Tanks und Entzündung des H<sub>2</sub> – S1

Kommt es zu einer schweren Kollision eines wasserstoffbetriebenen Fahrzeugs mit der Tunnelwand oder mit einem anderen Fahrzeug und die mechanische Schadenswirkung ist von derart großem Ausmaß, dass der Wasserstofftank der mechanischen Einwirkung nicht mehr standhalten kann und aufreißt, kommt es augenblicklich zu einer Tankexplosion. Dabei tritt der druckgespeicherte Wasserstoff beim Leck aus und aufgrund der physikalischen Eigenschaften, d.h. der geringen benötigten Zündenergie bzw. den breiten Explosionsgrenzen, kann von einer sofortigen Entzündung der entstandenen Wasserstoffwolke ausgegangen werden.

Diesbezüglich sind die Gefahren welche sich daraus für Tunnelnutzer ableiten lassen jene des Feuerballs und des Überdrucks.

#### Feuerball:

Bislang wurde zur Ausmaßmodellierung des Feuerballs im Tunnel auf vereinfachte, in freier Umgebung experimentell verifizierte [89], Zusammenhänge zwischen der beteiligten Masse an Treibstoff und dem Feuerballdurchmesser zurückgegriffen –  $d_{\text{Feuerball}} = 7,93 \times m_{\text{Treibstoff}}$  wobei der Durchmesser,  $d_{\text{Feuerball}}$  in Metern gegeben ist und die Masse des Treibstoffs,  $m_{\text{Treibstoff}}$  in kg. Mit der genannten Formel wurde das kugelförmige Volumen des Feuerballs im Freien berechnet. Um die entsprechenden Gefährdungsbereiche links und rechts vom

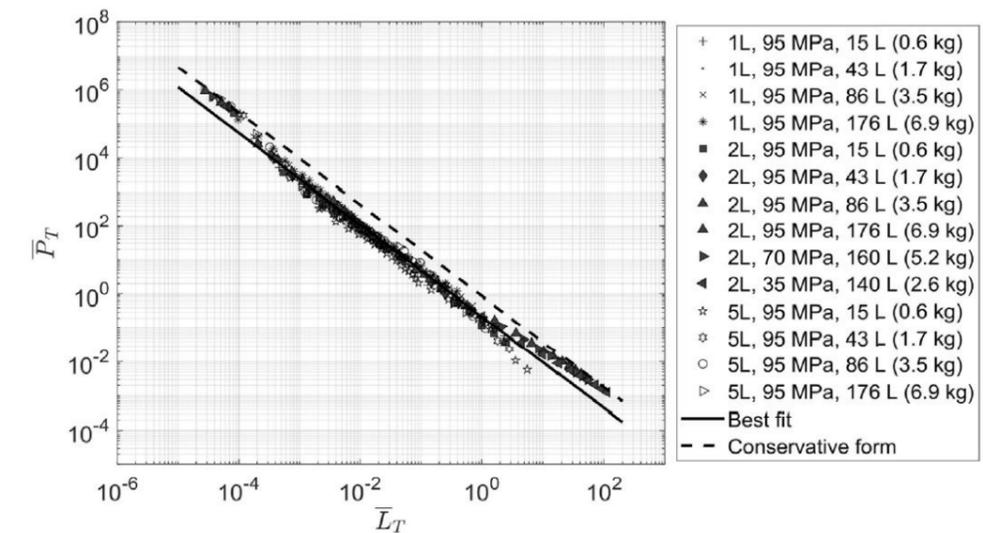
Unfallort bzw. vom Detonationsursprung abschätzen zu können, musste das entsprechende Feuerballvolumen auf das vorhandene Tunnelvolumen angewendet werden.

Aktuellere Studien zu Wasserstofftankexplosionen [80], speziell in Tunnelbauwerken [81], lassen allerdings auf eine halbkugelförmige Ausbreitung des Feuerballs schließen. Die entsprechend adaptierte Form der Ausbreitung ist vor allem auch auf die Berücksichtigung des über dem Tank befindlichen Fahrzeugs zurückzuführen. Die in [81] präsentierten Ergebnisse und die diskutierte Form des Feuerballs sind jedoch bislang nicht für die Abschätzung der Gefahrenzone im aktuellen Forschungsprojekt zu verwenden, da nur die transversale Ausbreitung, also jene normal auf die Fahrtrichtung, genau untersucht wurde. Es wurden noch keinerlei Aussagen bezüglich des Ausmaßes der longitudinalen Ausbreitung gemacht. Zusätzlich wäre auf diese Art und Weise nur die Ausmaßmodellierung eines aufgrund einer PKW Explosion resultierenden Feuerballs sinnvoll, da sich die Wasserstofftanks bei Bussen bzw. LKWs an anderen Positionen befinden. Diesbezüglich gibt es jedoch bisher noch keine experimentell verifizierten Ausmaßabschätzungen.

In den betrachteten Szenarien kann aber ohnehin davon ausgegangen werden, dass das Ausmaß des aus der Explosion resultierenden Überdrucks, jenes Ausmaß des Feuerballs in einem Maß übersteigt, welches eine zusätzliche Simulation der Feuerballgefährdungzone obsolet machen. Die Auswirkungen des Feuerballs wurden daher in den im Folgenden dargestellten Untersuchung nicht weiter betrachtet.

#### Überdruck

Durch die schlagartige Freisetzung von druckgespeichertem Wasserstoff (350 bar bzw. 700 bar) kommt es zu einer, sich in longitudinale Richtung entlang des Tunnels ausbreitenden, Druckwelle. Die Gefährdung bzw. das Ausmaß dieser Druckwelle kann mit Hilfe des Zusammenhangs zwischen Überdruck und Abstand zum Detonationsursprung, entsprechend der Tankgröße bzw. der involvierten Wasserstoffmenge, abgeschätzt werden. Um diesen, für Tunnelbauwerke allgemein gültigen Zusammenhang definieren zu können, wurden Explosionsszenarien unterschiedlicher Wasserstofftankgrößen experimentell wie auch numerisch untersucht. Resultat dieser Studie war der in Abbildung 81 dargestellte Zusammenhang zwischen dimensionslosem Spitzenüberdruck ( $\bar{P}_T$ ) und dem dimensionslosen Abstand vom Detonationsursprung ( $\bar{L}_T$ ). Jegliche Informationen zum Modell können in folgender Referenz gefunden und nachgelesen werden [82].



**Abbildung 81: Zusammenhang zwischen dimensionslosem Überdruck und dimensionslosem Abstand vom Detonationsursprung [82]**

Unter Anwendung aller benötigten Tunnelspezifischen Parameter wie, z.B. dem hydraulischen Durchmesser und dem Tunnelquerschnitt, konnten Gefährdungsbereiche, für PKW-, LKW- bzw. Bus-Wasserstofftanks, in welchen der Überdruck die herangezogenen Fatalitätsgrenzen übersteigt, berechnet werden. Die angesetzte Fatalitätsgrenze von 1,034 bar (obere Grenze für den Eintritt von Lungenblutungen), bzw. 0,483 bar (unterer Grenzwert für das Eintreten tödlicher Verletzungen durch indirekte Effekte wie z. B. berstendes Glas), wurde entsprechend der Auflistung aus Kapitel übernommen.

In der Ausmaßanalyse wird nun die Anzahl der Personen, die sich in dem erhaltene Gefährdungsbereich, entsprechend dem Evakuierungsmodell befindet, ermittelt, siehe dazu auch Kapitel 5.2.4 mit den Erläuterungen zu den Gefährdungsbereichen.

### 5.1.3. H<sub>2</sub> Freisetzung über eine Tank-Leckage (Kollision, Komponentenfehler) mit verzögerter Entzündung – S2

Dieses Szenario kann im Wesentlichen auf zwei möglich Ursachen zurückgeführt werden:

Einerseits kann angenommen werden, dass es zu einem Unfall eines wasserstoffbetriebenen Fahrzeugs und zu einer derartigen Verformung des Tanks kommt, dass Wasserstoff austritt,

sich dieser beim Austritt jedoch nicht entzündet. Andererseits kann Wasserstoff aufgrund eines Komponentenfehlers – also einer Fehlfunktion des TPRD – freigesetzt werden. Beide Ursachen, welche der Freisetzung von Wasserstoff vorausgehen, werden mit hoher Wahrscheinlichkeit, aufgrund der physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff, zur Entzündung des Wasserstoffes, und damit zu einem Freistrahbrand, führen. Das Wasserstofffreistrahbrandsszenario wird in Kapitel 5.1.5 diskutiert. Im Falle der hier beschriebenen verzögerten Entzündung, verteilt sich der freigesetzte Wasserstoff jedoch vor der Entzündung über einen unbestimmten Teil des Tunnelraumes. Die Entzündung findet dann an einer geeigneten Zündquelle – z.B. an einer heißen Oberfläche oder durch einen Funkenschlag in einem Teil der Tunnelelektrik, und nicht unbedingt am Ort der Freisetzung, statt. Durch die gegebenenfalls weitläufige Ausdehnung der Wasserstoffwolke und die möglicherweise schwerwiegenden Konsequenzen in Folge einer Explosion der Wasserstoffwolke, wurde dieses Szenario aber dennoch eingehend betrachtet.

Im Unterschied zu den übrigen in Tabelle 22 aufgelisteten Grundszenarien für die vertiefte Betrachtung, wurden die Szenarien mit Freisetzung und verspäteter Entzündung (S2 und S3) nicht mithilfe von quantitativen Konsequenz Modellen analysiert. Dies hat zwei Gründe. Erstens fehlt für diesen Szenario Typ – Explosion einer ausgedehnten Wasserstoffwolke – ein geeignetes analytisches Modell, das die Berechnung des Überdrucks und der Feuerballausdehnung ermöglichen würde. Zweitens sind Zündort und Zündzeitpunkt völlig beliebig. Beide Parameter sind aber für die Abschätzung der zu erwartenden Konsequenzen essenziell. Die Auswirkungen einer verzögerten Entzündung einer sich ausbreitenden Wasserstoffwolke auf Tunnelnutzer, werden daher im Folgenden, qualitativ, anhand der erhaltenen Ergebnisse aus Kapitel 4.4, und nicht quantitativ anhand von Konsequenz Modellen, diskutiert.

### PKW

Die Auswertungen der Wasserstoffkonzentrationsverteilungen für PKW deuten darauf hin, dass bei realistischen Längsgeschwindigkeiten, als bei Längsgeschwindigkeiten über 1.0 m/s bzw. deutlich darüber, der Bereich der Wasserstoffwolke mit einer zündfähigen Konzentration auf den Nahbereich um das Fahrzeug beschränkt ist. Wenige Meter bis 10 Meter stromab bzw. stromauf des Brandes, liegen die Konzentrationsniveaus in den CFD Simulationen bereits unterhalb der Zündfähigkeitsgrenze. Da, mit der Beschränkung der räumlichen Ausdehnung des zündfähigen Bereiches, auch die zündfähige Wasserstoffmasse entsprechend begrenzt

ist, kann davon ausgegangen werden, dass für die betrachteten PKW Ausströmszenarien, die sich im Falle einer Entzündung ergebenden Gefahrenbereiche durch den Überdruck/Feuerball, deutlich kleiner als beim Tankbruchszenario sein werden.

### Bus

Für das betrachtete Bus Ausströmszenario, stellt sich die Konzentrationsverteilung jedoch anders dar. Hier ergaben sich über weite Teile der Wasserstoffwolke zündfähige Konzentrationen, was auf eine deutlich größere, an einer möglichen Explosion beteiligten, Wasserstoffmasse schließen lässt. Die insgesamt höheren Konzentrationen ergaben sich hauptsächlich aus dem höheren Massenstrom, der wiederum auf die Annahme eines fast gleichzeitigen Auslösens aller fünf TPRDs – alle fünf TPRDs lösen zeitversetzt innerhalb von 30 Sekunden aus – zurückzuführen ist. Diese Annahme ist, insbesondere für das hier betrachtete Szenario einer TPRD Auslösung durch Komponentenfehler oder durch Kollision, sicherlich als sehr konservativ einzustufen. Eine fehlerhafte (ohne Brand) TPRD Auslösung eines einzelnen TPRDs ist bereits als sehr unwahrscheinlich einzustufen. Eine mehr oder weniger gleichzeitige Auslösung aller fünf, umso mehr.

Zusammenfassend kann folgendes festgehalten werden:

- Die CFD Simulationen deuten darauf hin, dass eine hinreichende Längsströmungsgeschwindigkeit, die sich anfangs aus dem Kolben effekt der Fahrzeuge während des Normalbetriebs, und im späteren Verlauf des Ereignisses aus einer eventuell aktivierten Ereignislüftung ergibt, jedenfalls dazu geeignet ist, um die Menge des zündfähigen Wasserstoffs im Falle einer verzögerten Entzündung, und damit die auftretenden Konsequenzen, zu begrenzen.
- Dies gilt jedenfalls für PKW Szenarien, und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch für Bus/LKW Szenarien, bei denen es nicht zu einer gleichzeitigen Aktivierung mehrerer TPRDs kommt.
- Bei sehr hohen Wasserstofffreisetzungsraten, z.B. im Falle des gleichzeitigen Auslösens mehrerer TPRDs oder im Falle sehr großer Leckagen direkt am Tank, kommt es auch bei hohen Längsströmungsgeschwindigkeiten zu großen zündfähigen Wasserstoffwolken.
- Um diese Szenarien, auch wenn sie als äußerst unwahrscheinlich einzustufen sind, zu entschärfen, wären alternative Tankdesigns, z.B. kleinere TPRD Durchmesser mit

folglich geringerem Massenstrom, oder Tankdesigns ohne TPRD („Self-Venting Tanks“), eine mögliche vielversprechende Maßnahme.

#### **5.1.4. Karosseriebrand eines H<sub>2</sub> Fahrzeuges mit anschließender H<sub>2</sub> Freisetzung über TPRD und verzögerter Entzündung – S3**

Das Szenario, in dem das verunfallte Fahrzeug zu brennen beginnt, das Sicherheitsventil am Tank ordnungsgemäß auslöst, (bei Erreichen einer Temperatur von 110°C am TPRD) der Wasserstoff beim Austritt jedoch nicht entzündet, ist als äußerst unwahrscheinlich anzusehen, da der Brand selbst aller Wahrscheinlichkeit nach als Zündquelle dient. Nichtsdestoweniger wird dieses Ereignis aufgrund des hohen möglichen Schadensausmaß, dass sich durch eine eventuell verzögerte Entzündung und folgende Explosion der Wasserstoffwolke ergibt, diskutiert.

Generell ist das gegenständliche Szenario, dem Szenario aus Kapitel 5.1.3, in dem der Wasserstoff aus einer Leckage bzw. durch eine Fehlfunktion aus dem TPRD austritt, sehr ähnlich. Der Grundlegende Unterschied besteht darin, dass im hier diskutierten Fall zusätzlich ein Karosseriebrand vorliegt, der zur ordnungsgemäßen Öffnung der TPRDs führt. Wie in Kapitel 5.2.4 verdeutlicht wird, sind die zu erwartenden Konsequenzen durch einen Karosseriebrand im Tunnel, im Allgemeinen deutlich geringer als bei einem Explosionsszenario in selbiger Umgebung. Es ist daher davon auszugehen, dass der zusätzliche Brand, die Konsequenzen im Vergleich zu Szenario 2 (Wasserstoffaustritt durch Tankleckage / infolge Fehlfunktion des TPRD mit verzögerter Entzündung) nicht bzw. nur unwesentlich erhöht. Vielmehr erlaubt die Detektion des Karosseriebrandes durch die standardmäßig vorhandenen Einrichtungen zur Branddetektion, eine Aktivierung der Brandlüftung sowie die Einleitung der Personenevakuierung. Außerdem ist aufgrund des Karosseriebrandes ein früher Entzündungszeitpunkt der Wasserstoffwolke, und damit eine Reduktion der an der Explosion teilnehmenden Wasserstoffmasse, wahrscheinlich. Im Wesentlichen gelten für das gegenständliche Szenario S3, dieselben Schlussfolgerungen wie für Szenario S2. Zusätzlich kann jedoch folgendes zusammenfassend festgehalten werden:

- Der vorhandene Karosseriebrand erhöht die Wahrscheinlichkeit einer direkten Entzündung des austretenden Wasserstoffs und reduziert daher die Wahrscheinlichkeit einer verzögerten Entzündung.
- Selbst bei verzögerter Entzündung wird die Entzündung der entstehenden Wasserstoffwolke eher früher stattfinden, wodurch die explodierende Wasserstoffmasse reduziert, und damit die resultierenden Gefahrenbereiche verkleinert werden.
- Der vorhandene Karosseriebrand ermöglicht eine Detektion des Ereignisses auch mit bereits vorhandener Sicherheitseinrichtung.
- Die standardmäßigen Maßnahmen zur Schadensausmaßminimierung bei Fahrzeugbränden im Tunnel – Aktivierung der Brandlüftung mit einer angestrebten Längsgeschwindigkeit > 1,0 m/s, Einleitung der Personenevakuierung – sind auch geeignet, um das Schadensausmaß einer möglichen Wasserstoffwolkenexplosion zu verringern

### 5.1.5. Karosseriebrand eines H<sub>2</sub> Fahrzeuges mit anschließender H<sub>2</sub> Freisetzung über TPRD und sofortiger Entzündung – S4

Bei der Ausmaßmodellierung dieses Szenarios wird angenommen, dass das verunfallte Fahrzeug zu brennen beginnt, sich die Temperatur am TPRD bis zur Auslösetemperatur von 110°C erhöht und Wasserstoff gezielt abgeblasen wird. Weiters wird davon ausgegangen, dass sich der austretende Wasserstoff durch den vorhandenen Brand, bzw. eine andere in unmittelbarer Umgebung zum Austrittsort befindliche Zündquelle, sofort entzündet und somit im Schadensausmaßmodell die Risiken eines Freistrahbrandes zu bewerten sind. Die Gefahren eines Freistrahbrandes sind in Kapitel 3.2.2 ausführlich erläutert, doch die entsprechende Wirkung auf Personen im Tunnel muss bezüglich Art des verunfallten Fahrzeugs bzw. bezüglich des Auslösezeitpunkts genauer spezifiziert werden.

#### Lage und Orientierung des TPRDs:

Wie schon in Kapitel 2.2 zum FCEV-Antriebsstrang diskutiert, sind die Wasserstofftanks bei PKWs im hinteren Teil des Fahrzeugs möglichst sicher verbaut. Im Gegensatz dazu sind bei Bussen die Wasserstofftanks auf dem Dach untergebracht. Entsprechend der unterschiedlichen Lage der Tanks ist auch die Ausblasrichtung der TPRDs grundsätzlich unterschiedlich orientiert.

Das TPRD bei einem wasserstoffbetriebenen PKW ist typischer Weise am Fahrzeugheck verbaut und mit einem Winkel von 45° nach hinten unten ausgerichtet. Bei Bussen, bei denen die Wasserstofftanks meistens auf dem Dach angeordnet sind und sich demnach auch das TPRD im Bereich des Fahrzeugdachs befindet, ist das TPRD nach oben, bzw. nach oben hinten, oder zur Seite und nach oben gerichtet. Da sich die Tanks grundsätzlich auf dem gesamten Dach befinden können, ist die Lage des TPRDs entlang der Längsachse des Buses beliebig und wird daher im Folgenden in der Mitte des Busses angenommen. Auch bei LKW ist das TPRD ähnlich orientiert. Der Unterschied zu Bussen besteht aber darin, dass sich die Tanks, und damit auch die TPRDs, wahrscheinlich weiter vorne, nämlich am ehesten zwischen Tank und Fahrerhaus, befinden.

Auf Basis dieser Argumentation werden TPRD Position und Orientierung für die weitere Betrachtung wie folgt angenommen:

PKW:

- Positionierung am Heck des Fahrzeuges;
- Orientierung schräg nach hinten unten

BUS:

- Positionierung am Dach in der Mitte des Fahrzeuges;
- Orientierung schräg nach hinten oben

LKW:

- Positionierung oben am Fahrzeug zwischen Führerhaus und Anhänger;
- Orientierung schräg nach hinten oben

#### Länge des Gefahrenbereiches

Durch die Orientierung schräg nach unten bzw. oben trifft der Freistrahbrand nach wenigen Metern auf eine feste Oberfläche (Fahrbahn, Tunneldecke). Dies führt zu starker Verwirbelung und einer Reduktion des verbleibenden Austrittsimpulses. Aufgrund der Verwirbelung kann angenommen werden, dass sich der Gefahrenbereich, im Vergleich zum sich frei ausbreitenden Freistrah, verbreitert. Eine genaue Modellierung der Verbreiterung (durch Verwirbelung) aber auch der Verkürzung (durch Reduktion des verbleibenden Impulses) lässt sich mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht sinnvoll durchführen. Daher werden konservativer Weise folgende zusätzlichen Annahmen getroffen:

- Die Verbreiterung führt dazu, dass der gesamte Tunnelquerschnitt von der Wasserstoffflamme ausgefüllt wird
- Die Länge der Wasserstoffflamme bzw. das Temperaturprofil in Längsrichtung entsprechen jenen Werten eines sich frei ausbreitenden Freistrahls

Die sich dadurch ergebenden Gefahrenbereiche eines Freistrahbrandes können unter diesen Annahmen anhand der analytischen Ergebnisse aus Kapitel 4.2 abgeleitet werden. Je nach

Fahrzeugtyp (Speicherdruck), TPRD Durchmesser, ergeben sich demnach folgende Distanzen in Abhängigkeit des angenommenen Temperaturgrenzwertes:

Parameter	Temperaturgrenzwert 149°C	Temperaturgrenzwert 309°C
700 bar; 2,25 mm TPRD	28,3 m	14,8 m
700 bar; 5,0 mm TPRD	43,9 m	32,9 m
350 bar; 2,25 mm TPRD	20,2 m	11,7 m
350 bar; 5,0 mm TPRD	43,3 m	26,0 m

**Tabelle 32: Länge der Gefahrenbereiche entsprechend Tabelle 26**

Auslösezeitpunkt:

Die Sicherheitseinrichtung am Tank, welche das Bersten des Tanks bei großer Hitzeeinwirkung verhindern soll, ist das TPRD. Dabei handelt es sich um eine Schmelzsicherung (**T**emperature activated **P**ressure **R**elief **D**evice) die beim Erreichen einer Temperatur von 110°C am Ventil öffnet und Wasserstoff gezielt ausbläst um den Druck im Tank zu regulieren.

In der Modellierung dieses Szenarios muss der Temperaturanstieg am bzw. im Ventil aufgrund des konvektiven Wärmeübertrags der heißen Luft, der Wärmestrahlung der Flamme, wie auch aufgrund von Wärmeleitung über zusätzliche Fahrzeugteile, berücksichtigt werden. Dabei kann aber davon ausgegangen werden, dass das TPRD, aufgrund der Lage der Tanks im Fahrzeug, keiner direkten Flammeneinwirkung ausgesetzt ist und somit der Anteil der Wärmestrahlung vernachlässigt werden kann. Des Weiteren kann der Einfluss der Wärmeleitung, aufgrund der eher kurzen, für die Personensicherheit relevanten Zeitschiene, ebenso vernachlässigt werden. Es verbleibt somit der konvektive Wärmeübergang als wesentlicher Faktor.

Aufgrund der ähnlichen Funktionsweisen von TPRDs und Sprinkleranlagen wird im Folgenden ein vereinfachtes Modell bezüglich dem thermischen Ansprechverhalten automatischer Sprinkleranlagen zur Bestimmung des Auslösezeitpunkts der TPRDs herangezogen, [90].

Um den brandbedingten Temperaturanstieg am bzw. im TPRD möglichst realitätsnah abzubilden, wurde die in FDS gemessene bzw. simulierte Gastemperatur (auf 1,6 m Höhe) ausgelesen. Die Temperatur des TPRD zu Beginn des Szenarios wurde äquivalent zur Umgebungstemperatur angenommen. Der Zusammenhang zwischen infinitesimaler Temperaturerhöhung des TPRD (Schmelzsicherung) und der vorherrschenden Gastemperatur am Ort des TPRD, wurde mit folgender Formel abgeschätzt:  $\frac{dT_{TPRD}(t)}{dt} =$

$$\frac{u^{0,5}(t)}{RTI} (T_{gas}(t) - T_{TPRD}(t)).$$

Dabei beschreibt  $T_{TPRD}(t)$  die zum Zeitpunkt  $t$  vorherrschende Temperatur am TPRD und  $T_{gas}(t)$  die in FDS ausgelesene Gastemperatur zum Zeitpunkt  $t$ . Zusätzlich zur Gastemperatur wird auch die longitudinale Längsgeschwindigkeit am Ort des TPRDs zum Zeitpunkt  $t$  in FDS simuliert. Sie wird in obiger Formel mit  $u(t)$  bezeichnet. Der Faktor  $RTI [m^{0,5}s^{0,5}]$  (**R**esponse **T**ime **I**ndex) beschreibt die thermische Sensitivität des Sprinklerventils und wird für TPRDs, aufgrund des ähnlichen Auslösemechanismus, und weil für TPRDs keine entsprechenden Werte verfügbar sind, übernommen. In der genannten Referenz wird für Sprinkleranlagen eine Bandbreite entsprechend der anzusetzenden  $RTI$  Faktoren angegeben. Dabei handelt es sich um einen  $RTI = 200 [m^{0,5}s^{0,5}]$  für langsame und einem  $RTI = 25 [m^{0,5}s^{0,5}]$  für schnelle Reaktion. Entsprechend den hohen Anforderungen an Wasserstofftanks bzw. an deren Sicherheitseinrichtung wurde der  $RTI = 25 [m^{0,5}s^{0,5}]$  für schnelle Reaktion des TPRD angesetzt.

In Abbildung 82 und Abbildung 83 ist die zeitliche Temperaturentwicklung am TPRD (blaue Linie) in Abhängigkeit zur Gastemperatur (graue strichlierte Linie) am Ort des TPRDs entsprechend einem PKW-, LKW- bzw. Bus-Brand (Karosseriebrand aus Abbildung 80) gezeigt. Die Fluktuationen in der Gastemperatur ergeben sich aufgrund der auftretenden Turbulenzen in der Rauchschicht

Wie schon zu Beginn angemerkt, löst das TPRD bei einer Temperatur von 110°C am Ventil aus, dies ist mit der horizontalen grünen Linie gekennzeichnet. Der Zeitpunkt bei dem dieser Grenzwert am TPRD erreicht wird ist in den Abbildungen mit der schwarzen strichlierten

vertikalen Linie markiert wobei das TPRD 206 Sekunden nach Brandbeginn eines PKW-Karosseriebrandes (2,98 MW) und 134 Sekunden nach Brandbeginn eines Bus- bzw. LKW Karosseriebrandes (18 MW) auslöst.

Einen wesentlich konservativeren Ansatz, stellt die Annahme der TPRD Auslösung zum Zeitpunkt des Erreichens einer Gastemperatur von 110°C dar (strichliert-gepunkteten Linie). Dieser Ansatz bezüglich der Modellierung des Auslösezeitpunkts vernachlässigt den konvektiven Wärmeübertrag auf das TPRD und passiert dementsprechend signifikant früher. In bisher durchgeführten Risikobetrachtungen, i.e. [91] und [63], wurde letztgenannter Ansatz verwendet. Der tatsächliche Auslösezeitpunkt ist von veränderlichen und nicht bekannten Szenario Parametern, wie etwa dem genauen Brandverlauf oder der Lage des Brandes / der Flamme relativ zum TPRD abhängig und lässt sich nicht exakt vorhersagen. Um dieser Unsicherheit Rechnung zu tragen, werden in weiterer Folge beide Auslösezeitpunkte (Gastemperatur am TPRD erreicht 110°C, TPRD erwärmt sich auf 110°C durch konvektiven Wärmeübergang) berücksichtigt.

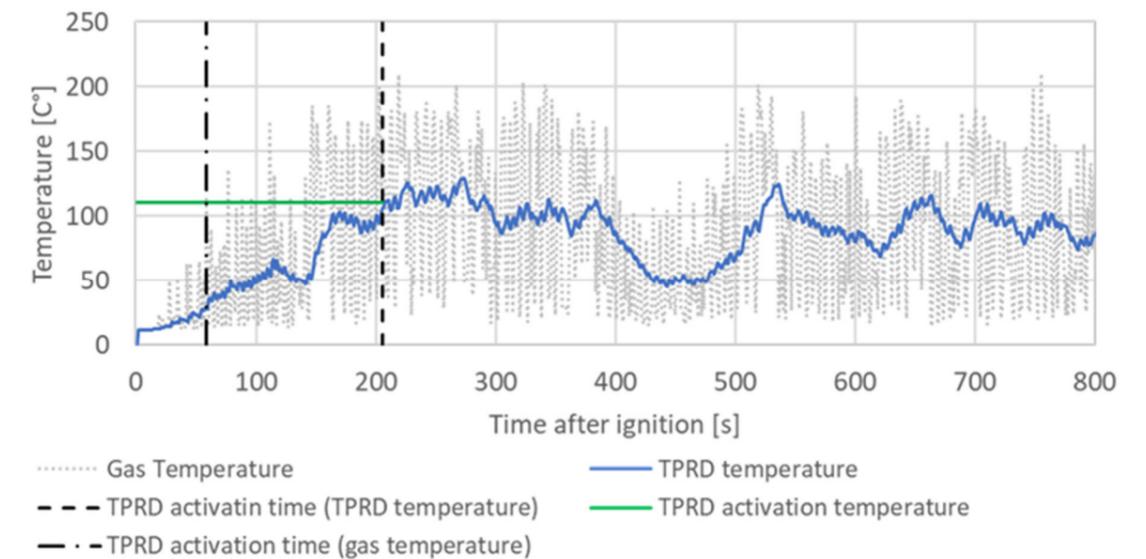
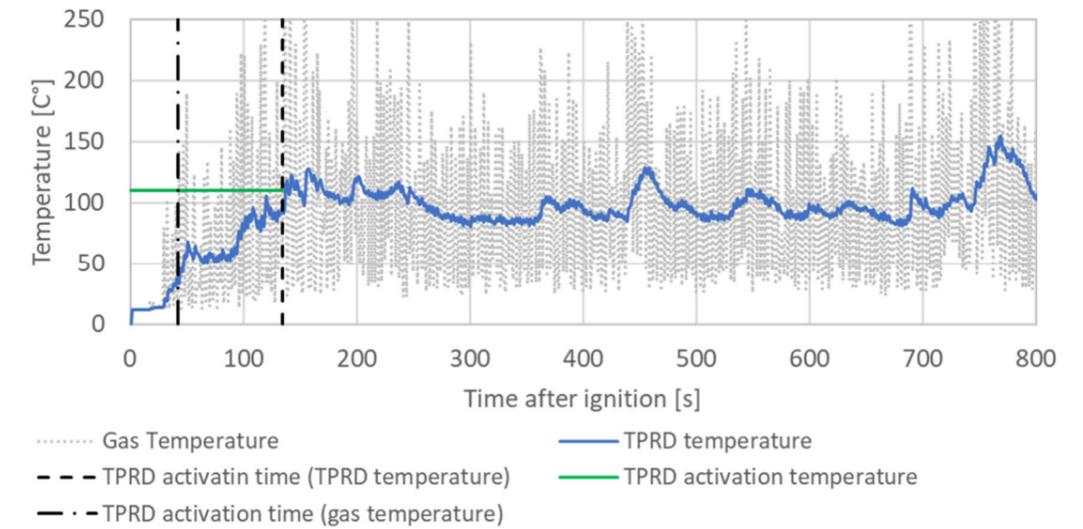


Abbildung 82: Temperatur am TPRD, Gastemperatur und entsprechender TPRD Auslösezeitpunkt für einen zugrundeliegenden PKW-Karosseriebrand



**Abbildung 83: Temperatur am TPRD, Gastemperatur und entsprechender TPRD Auslösezeitpunkt für einen zugrundeliegenden Bus- bzw.. LKW Karosseriebrand**

Szenarien Dauer:

Wie lange das Szenario Freistrahbrand ab Szenario Beginn eine Gefahr für Tunnelnutzer aber auch für das Fremdrettungspersonal darstellt, muss für jeden betrachteten Fahrzeugtyp bzw. jedes Tanksystem separat analysiert werden. Dabei müssen an dieser Stelle zuerst die angenommenen Parameter bezüglich der Anzahl der beim Szenario involvierten Wasserstofftanks bzw. deren Füllmenge definiert werden, siehe Tabelle 33. Die Dauer des Freistrahbrandszenarios ist für einzelne beteiligte Tanks mit 200 Sekunden bzw. 600 Sekunden für PKWs bzw. Busse und LKW anzusetzen, wobei ein TPRD Öffnungsdurchmesser von 2 Millimetern angenommen wurde, [92]. Sollte das gesamte Tanksystem involviert sein, ist mit einer entsprechenden Dauer von 300 Sekunden bzw. 2000 Sekunden zu rechnen bis das gesamte Tanksystem leer ist.

Fahrzeugtyp	Details	Einzeltank	Gesamtes Tanksystem
PKW	3 Tanks bei 700 bar	52 Liter und 2,1 kg	157 Liter und 6,3 kg
LKW	7 Tanks bei 350 bar	192 Liter und 4,6 kg	1342 Liter und 32,6 kg
Bus	5 Tanks bei 350 bar	313 Liter und 7,5 kg	1563 Liter und 37,5 kg

**Tabelle 33: In der Schadensausmaßanalyse betrachtete Fahrzeugtypen und Tankparameter**

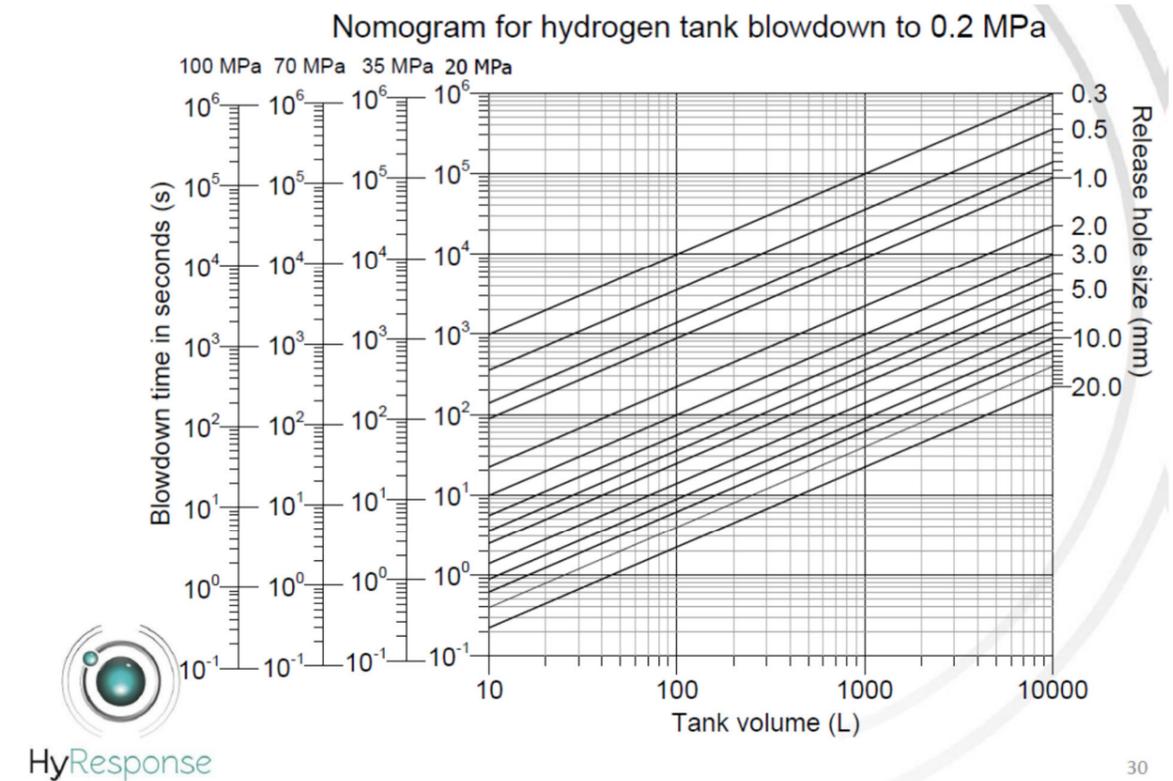


Abbildung 84: Unterschiedliche Ausblaszeiten je nach TPRD Durchmesser und Wasserstofftankvolumen und Speicherdruck [66]

Karosseriebrand eines H<sub>2</sub> Fahrzeuges mit Fehlfunktion des TPRD und Bersten des Tanks – S5

Bei diesem Szenario wird angenommen, dass es zum Brand eines wasserstoffbetriebenen Fahrzeuges kommt. Des Weiteren wird angenommen, dass der Druck im Tank aufgrund der Hitzeeinwirkung immer weiter ansteigt, die Sicherheitseinrichtung in Form des TPRDs jedoch nicht funktionstüchtig ist oder der Druck im Tank schneller ansteigt als er über TPRD reguliert werden kann. In diesen Fällen sind die Auswirkungen eines berstenden Tanks bzw. eines berstenden Tanksystems zu bewerten. Wie schon in Kapitel 5.1.2 diskutiert, sind die Gefahren welche für den Evakuierungsvorgang zu berücksichtigen sind, jene des sich schnell ausbreitenden Feuerballs bzw. dem explosionsbedingten Überdrucks.

Im Gegensatz Szenario 1 (Kapitel 5.1.2) treten die genannten Gefahren beim aktuell diskutierten Szenario zeitverzögert auf. Tankexplosionen durch brandinduzierten Druckanstieg werden in einer Veröffentlichung von Molkov et al. [71] intensiv diskutiert. Darin sind für unterschiedliche Hitzefreisetzungsraten entsprechende Feuerwiderstandsklassen für

Tanks angegeben, siehe dazu Abbildung 85. In Rot ist der Zusammenhang zwischen der angesetzten Hitzefreisetzungsratendichte für den 2,98 MW Karosseriebrand (entspricht einer Hitzefreisetzungsratendichte von 0,74 MW pro Quadratmeter) und dem Zeitpunkt bei welchem der Tank birst, dargestellt. Dementsprechend wird in der Schadensausmaßmodellierung der Zeitpunkt bei dem die Gefahren Feuerball bzw. Überdruck zu berücksichtigen sind auf 8 Minuten (480 Sekunden) festgesetzt. Entsprechend der angesetzten Brandkurve eines PKW Karosseriebrandes, beträgt die freigesetzte Energie in den ersten 480 Sekunden ungefähr 1,27 GJ, siehe Abbildung 80. Für das angesetzte Busbrandszenario aus Abbildung 80 beträgt die benötigte Zeit bis die selbe Wärmemenge von 1,27 GJ frei wird nur 159 Sekunden. Diese Zeit wird nun für die zeitliche Verzögerung, bis die evakuierenden Personen den Gefahren von Feuerball bzw. Überdruck ausgesetzt sind, angewandt. Die angegebenen Zeitverzögerungen bis zur Tankexplosion sind abgeschätzte Größen, welche auf derzeitigem Wissen bezüglich Wasserstofftankexplosionen beruhen und daher mit Unsicherheiten behaftet sind.

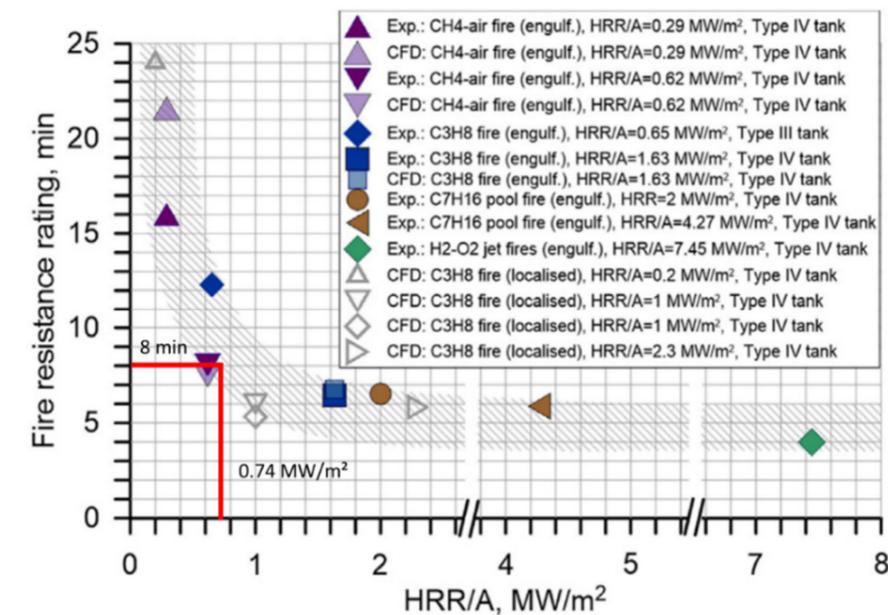


Abbildung 85: Feuerwiderstandsklassen als Funktion der HRR pro Fläche [71]

## 5.2. Konsequenzbewertung von Personenschäden

### 5.2.1. Österreichischer Vergleichstunnel

Die in Kapitel 5.1 diskutierten Schadensausmaßmodelle können nun in ein quantitatives Risikomodell eingepflegt werden, womit die quantitative Bewertung von Gefahren durch zusätzlich im Tunnel vorhandener wasserstoffbetriebener Fahrzeuge möglich ist. Da das HyTRA Projekt im speziellen auf die Auswirkungen von verunfallten H<sub>2</sub> betriebenen Fahrzeugen in österreichischen Tunnelanlagen fokussiert, entspricht der Vergleichstunnel für welchen das quantitative Risikomodell angewandt wird einem, in Hinsicht auf Länge, Steigung und anderer Parameterwerte, typischen österreichischen Straßentunnel. Die Parameter sind in Tabelle 34 zu finden.

Tunnel Parameter	Parameterwerte
Tunnel	2,0 km langer Richtungsverkehrstunnel ohne Steigung; Gewölbequerschnitt mit einer Querschnittsfläche von 63 m <sup>2</sup>
Notausgangsabstand	500 m
Verkehr	20.000 Fahrzeuge pro Tag pro Röhre; 85% PKW, 14,5 % LKW und 0,5 % Busse
Lüftung	Längslüftungssystem mit Strahlventilatoren; Zielgeschwindigkeit im Brandfall: 2,0 m/s
Sicherheitseinrichtungen	Lüftungsaktivierung 120 Sekunden nach Brandbeginn; Aufforderung zum Evakuierungsvorgang 150 nach Brandbeginn

**Tabelle 34: Österreichischer Vergleichstunnel – Parameter für die Konsequenzanalyse**

## 5.2.2. Evakuierungssimulation

Die in Kapitel 5.1 erläuterten Gefährdungsbereiche werden nun auf die im Tunnel befindlichen Personen anhand eines agentenbasierten mikroskopischen Evakuierungsmodells angewendet. Dementsprechend wurde angenommen, dass sich, an jeder Position im Tunnel, eine, je nach Verkehrsstärke, Fahrzeugkonfiguration und Verkehrssituation andere, bestimmte Anzahl an Personen befindet. Des Weiteren wurde angenommen, dass sich eine Person aus 18 verschiedenen Agents zusammensetzt (3 unterschiedliche Altersgruppen, zwei Geschlechter, drei unterschiedliche Fluchtgeschwindigkeiten). Zusätzlich zu den 18 genannten Agents werden auch noch 3% „Sitzenbleiber“, also Personen welche nicht flüchten, im Evakuierungsmodell berücksichtigt. Dieser Typ von Agent steht für Personen welche sich in der Gefahrensituation falsch verhalten oder für jene Personen welche nicht in der Lage sind selbstständig zu flüchten. Der beschriebene Ansatz ist gleichbedeutend mit der Mittelung einer großen Anzahl an gerechneten Evakuierungssimulationen mit unterschiedlicher Agenten Konfiguration –  $Tunnellänge^{\#agents}$  und ist beispielhaft in Abbildung 86 gezeigt.

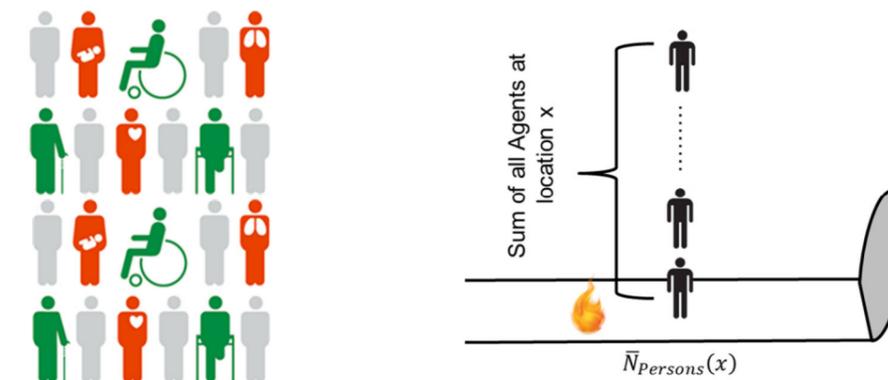


Abbildung 86: Evakuierungsmodell: Agenten Konfiguration

Dabei werden an jeder Position im Tunnel, für jeden der 18 Agents, fünf unterschiedliche Fluchtstartzeitpunkte angenommen. Diese Fluchtzeitpunkte hängen einerseits von der Art des Fahrzeugs ab in welchem der Agent sitzt, also PKW bzw. LKW (sofortige Flucht möglich) oder Bus (40 Personen werden in 4 Gruppen mit jeweiliger Verzögerung von 10 Sekunden geteilt). Des Weiteren hängt der Fluchtzeitpunkt vom Abstand zum Ereignisort bzw. der entsprechenden Rauchdichte und dem Zeitpunkt der Alarmierung ab.

Jeder Agent beginnt seinen Fluchtvorgang an seiner jeweiligen Position in Richtung des nächsten Notausgang bzw. Portals. Es wird jedoch angenommen, dass die Agents niemals in Richtung Brand zum Notausgang flüchten, sondern eher den längeren Weg in entgegengesetzte Richtung, weg vom Brand, antreten. In der Evakuierungssimulation flüchten an jedem Ort  $x$ , an dem sich im Tunnel Personen befinden, alle Agents und es wird überprüft ob sie zum Notausgang bzw. zum Portal gelangen oder nicht.

- Sollte sich ein Agent in einem der oben definierten, siehe Kapitel 5.1, Gefahrenbereiche befinden oder zu vielen Schadstoffen bzw. zu hohen Temperaturen ausgesetzt sein, wird eben dieser Agent als getötet gezählt.
- Sollte der Agent am Notausgang bzw. dem Portal ankommen, wird dieser als geflüchtet gezählt.
- Sollte der Agent innerhalb der ersten 900 Sekunden Simulationszeit weder den Notausgang bzw. das Portal erreichen, noch als getötet gezählt worden sein, wird angenommen, dass dieser Agent im Folgenden durch Fremdrettungskräfte gerettet wird

### 5.2.3. Erläuterungen zu den Gefährdungsbereichen

Zum besseren Verständnis werden nun die unterschiedlichen Gefahrenzonen, anhand von Abbildung 87 exemplarisch für PKW Ereignisse erläutert. Gemäß Szenarien Definition (Unmittelbare Wasserstoffexplosion bzw. verzögerte Wasserstofffreistrahlflamme / Wasserstoffexplosion) wird von zwei unterschiedlichen Verkehrszuständen bei Eintritt des Ereignisses mit Wasserstoffbeteiligung ausgegangen. Einmal wird von frei fließendem Verkehr (Unmittelbare Wasserstoffexplosion) und einmal von einer sich hinter dem verunfallten Fahrzeug aufstauenden Fahrzeugkolonne ausgegangen (verzögerte Wasserstofffreistrahlflamme bzw. verzögerte Wasserstoffexplosion).

- Erstgenannter Verkehrszustand ist in der obersten Figur der Abbildung 87 durch die durchgängige schwarze Linie gekennzeichnet. In diesem Fall herrscht im gesamten Tunnel, außer direkt an der Unfallstelle eine konstante gleichverteilte Verkehrsdichte.
- Der Verkehrszustand der Fahrzeugkolonne hinter dem Unfallfahrzeug, ist in der mittleren und unteren Figur in Abbildung 87, wiederum durch die durchgezogene schwarze Linie dargestellt. Dieser finale Verkehrszustand kommt folgendermaßen zustande. Es

kommt zu einem Unfall und zum Brand des Verunfallten Fahrzeugs. Fahrzeuge welche sich im Tunnel hinter dem Unfallort befinden werden sich entsprechend aufstauen. Jene Fahrzeuge welche den Unfallort Zum Zeitpunkt des Unfalls bereits passiert haben, können den Tunnel ungehindert verlassen. Unter Berücksichtigung einer Tunnelspezifischen Zeitverzögerung werden nachfolgende Fahrzeuge am Einfahren in den Tunnel durch Ampeln bzw. Schranken gehindert. Jene Fahrzeuge welche vor Schließung des Portals noch in den Tunnel eingefahren sind, fahren schließen zum Stauende auf und bilden zusammen mit jenen Fahrzeugen, welche sich schon zum Unfallszeitpunkt im Tunnel befunden haben und den Unfallort nicht passieren können, die finale Staukonfiguration, dargestellt durch eine Verkehrsdichte von 0,30 Fahrzeuge pro Kilometer.

Die rot strichlierten bzw. die rot gepunkteten Linien beschreiben die entsprechenden Gefährdungsbereiche (minimaler bzw. maximaler Gefährdungsbereich in Abhängigkeit der involvierten Wasserstoffmasse, des TPRD Durchmessers und des gewählten Fatalitätskriteriums). Im mittleren Bild ist der Gefahrenbereich entsprechend dem Szenario S4, also dem Freistrahlsbrandzenario, dargestellt. Die Gefahrenbereiche der beiden übrigen Grafiken entsprechen den Bereichen in denen der gewählte Grenzwert des Überdrucks als Folge einer Tankexplosion überschritten wird. Im Zentrum dieser Gefahrenbereiche ist der Unfallort gelegen da sich der Druck in alle Richtungen gleichermaßen ausbreitet. Gefahrenbereiche sind in beiden Grafiken dieselben, der zeitliche Verlauf, welcher den beiden Auswertungen zugrunde liegt, ist allerdings ein anderer. So wird bei der untersten Figur von einem Wasserstoffereignis ausgegangen, bei welchem die meisten der im Gefährdungsbereich befindlichen Personen bereits geflüchtet sind, wenn es brandbedingt schlussendlich zur Explosion kommt.

Im Gegensatz dazu wird in der obersten Figur von einer sofortigen Explosion aufgrund eines mechanischen Unfalls ausgegangen. Dies macht das Flüchten unmöglich und alle im Gefahrenbereich befindlichen Personen müssen als getötet gezählt werden.

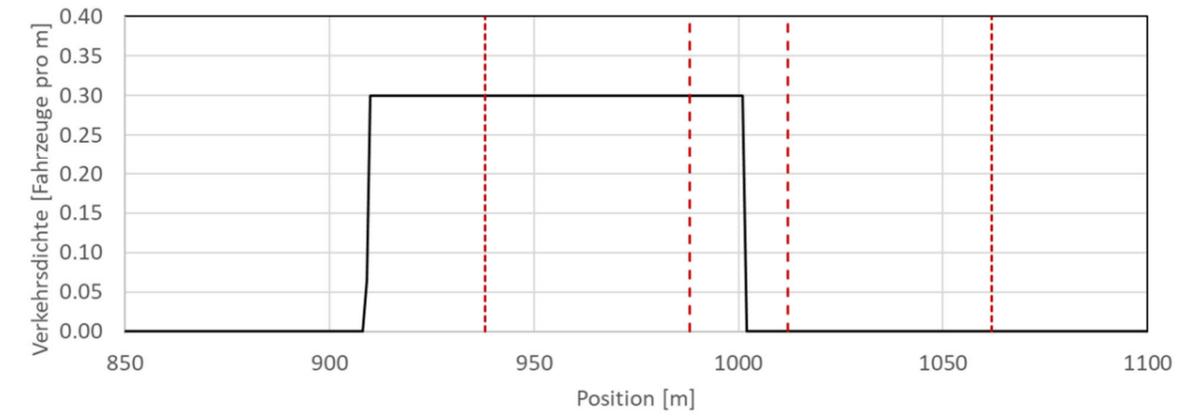
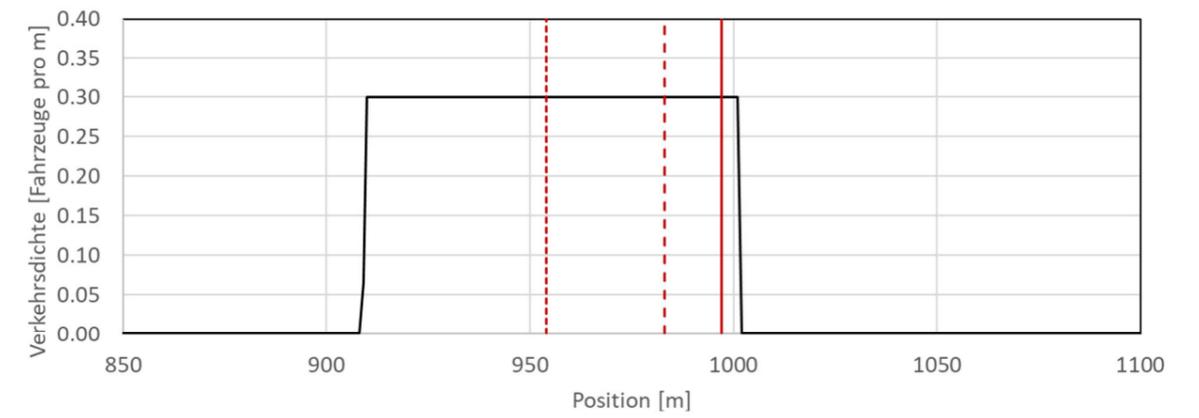
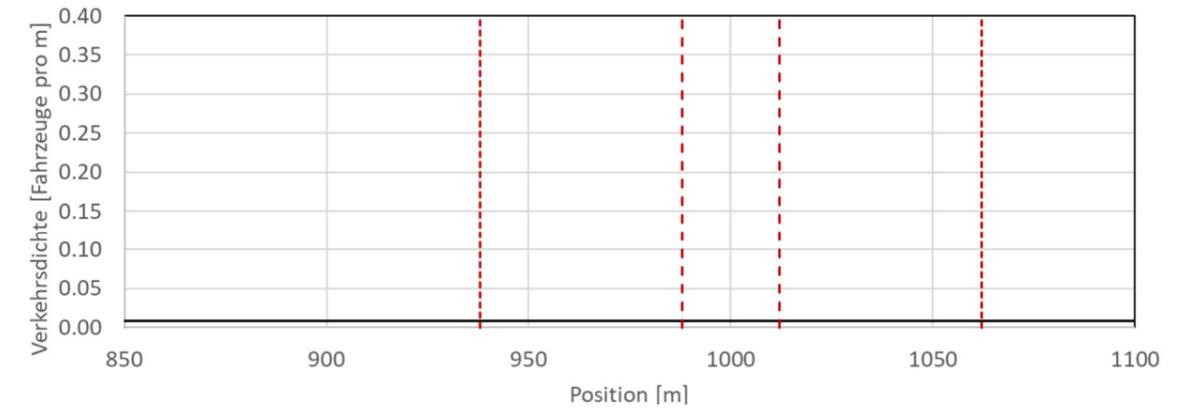


Abbildung 87: Verkehrsdichte (schwarze Linien) und entsprechende Gefahrenzonen bezüglich Freistrahbrand (mittleres Bild) und Tankexplosion (oberstes bzw. unterstes Bild für sofortige bzw. verzögerte Tankexplosion) eines PKW – gestrichelte bzw. gepunktete Linie.

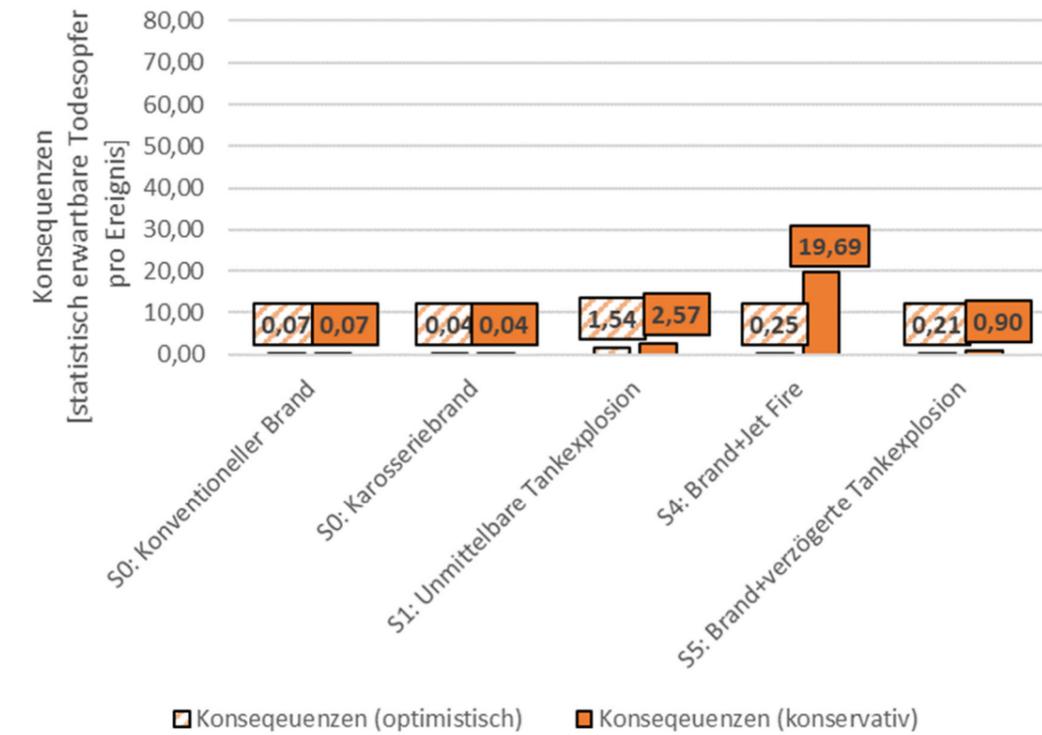
## 5.2.4. Ergebnisse aus der Risikoanalyse

Die Ergebnisse der Risikoanalyse werden im Folgenden für die unterschiedlichen Fahrzeugklassen analysiert. Zu erwähnen ist, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit der betrachteten Unfallszenarien in diesem Bericht aufgrund unzureichender statistischer Verkehrsdaten nicht untersucht und daher nicht berücksichtigt wurden. Für weiterführende Literatur und zur besseren Einschätzung sei hier auf Kapitel 2.4.3 verwiesen. Daher erfolgt der Vergleich der Schadensausmaße mit konventionellen Unfallszenarien ohne Betrachtung der Eintrittshäufigkeit.

### PKW Ereignisse

Szenario	Tank	Grenzwert	TPRD	Aktivierungszeitpunkt /Zeitpunkt Bersten des Tanks	Konsequenzen
S0 a	-	-	-	-	<b>0,07</b>
S0 b	-	-	-	-	<b>0,04</b>
S1	Einzeltank	0,483 bar	-	1 s	<b>1,95</b>
	Einzeltank	1,034 bar	-	1 s	<b>1,54</b>
	Tanksystem	0,483 bar	-	1 s	<b>2,57</b>
	Tanksystem	1,034 bar	-	1 s	<b>1,65</b>
S4	-	149°C	2,25mm	206 s	<b>0,45</b>
	-	149°C	5,0 mm	206 s	<b>0,98</b>
	-	309°C	2,25mm	206 s	<b>0,25</b>
	-	309 °C	5,0 mm	206 s	<b>0,57</b>
	-	149°C	2,25mm	74 s	<b>12,23</b>
	-	149°C	5,0 mm	74 s	<b>19,69</b>
	-	309°C	2,25mm	74 s	<b>6,56</b>
	-	309 °C	5,0 mm	74 s	<b>14,52</b>
S5	Einzeltank	0,483 bar	-	480 s	<b>0,54</b>
	Einzeltank	1,034 bar	-	480 s	<b>0,21</b>
	Tanksystem	0,483 bar	-	480 s	<b>0,90</b>
	Tanksystem	1,034 bar	-	480 s	<b>0,33</b>

**Tabelle 35: Detailergebnisse der quantitativen Konsequenz Analyse: Konsequenzen in statistisch erwartbaren Todesopfern pro Ereignis – PKW**



**Abbildung 88: Schadensausmaßwerte bei Involvierung eines wasserstoffbetriebenen PKW**

Schadensausmaßwerte für einen, in einen Unfall involvierten, wasserstoffbetriebenen PKW, sind in Abbildung 88 gezeigt. Die ersten beiden Säulenpaare beschreiben die Schadensausmaßwerte entsprechend konventionellen PKW Bränden bzw. PKW Karosseriebränden. Die weiteren drei Säulenpaare beschreiben die Schadensausmaßwerte entsprechend dem Wasserstoff-Freistrahlsbrandzenario, dem PKW-Karosseriebrand mit verzögerter Wasserstofftankexplosion sowie der sofortigen Wasserstofftankexplosion infolge schwerer mechanischer Schadenswirkung. Jedes Säulenpaar besteht aus einem niedrigeren Schadensausmaßwert und einem höheren Schadensausmaßwert. Die beiden Werte korrespondieren jeweils zu jener Parametervariation (TPRD Durchmesser, Fatalitätsgrenzwert, Tankbeteiligung), die unter allen Parametervariationen des betrachteten Szenarios, zum geringsten bzw. zum höchsten Schadensausmaß führt. Zusätzlich sind die Ergebnisse bzgl. aller Parametervariationen in Tabelle 35 dargestellt.

Für die beiden Brandszenarien S0 und S1 ist das Sicherheitskonzept (insbesondere das Lüftungskonzept) in österreichischen Straßentunneln ausreichend, um Personenschäden größtenteils zu verhindern. Der Fluchtbereich jener Fahrzeuge, die innerhalb des sich

bildenden Staus hinter dem verunfallten Fahrzeug zu stehen kommen, wird durch die Ereignislüftung zum überwiegenden Teil rauchfrei gehalten, während Fahrzeuge stromab des Brandes den Tunnel ungehindert verlassen können, siehe dazu Abbildung 87 (schwarze Linie im rechten bzw. mittleren Bild). Demzufolge sind die resultierenden Schadensausmaßwerte absolut gesehen sehr klein - insbesondere unter 1,0 Toten pro Schadensereignis<sup>1</sup>. Der kleine verbleibende Schadensausmaßwert kann auf nicht flüchtende Personen (3% der „Agents“) zurückgeführt werden, siehe dazu die Erläuterung zum Evakuierungsmodell in Kapitel 5.2.2.

Die Schadensausmaßwerte der Szenarien mit Beteiligung des Wasserstoffs sind vergleichsweise deutlich höher. Für Tankexplosionsszenarien verbleiben die Schadensausmaßwerte zumindest noch im Bereich einzelner Todesopfer – 1,5 bis 2,6 Todesopfer pro Ereignis bei unmittelbarer Tankexplosion bzw. 0,2 bis 0,9 Todesopfer bei verzögerter Tankexplosion. Auch die Schwankungsbreite der Konsequenzen ist, im Vergleich zu Szenario S4, gering. Für letzteres ergeben sich Schadensausmaßwerte zwischen 0,3 und 19,7 Todesopfer. Diese zum Teil deutlich höheren Schadensausmaßwerte bei einem Freistrahbrand, aber auch die große Schwankungsbreite, lassen sich auf den Zeitpunkt der TPRD Auslösung zurückführen. Bei einer TPRD Auslösung nach 59 Sekunden befindet sich der Großteil der Fahrzeuginsassen hinter dem Fahrzeug noch im Gefahrenbereich. Für einen angenommenen kritischen Temperaturgrenzwert von 149°C erstreckt sich der Gefahrenbereich über fast 44 m. Bei einer TPRD Auslösung nach 206 Sekunden, ist der maximale Gefahrenbereich zwar ebenso lang, aber ein Großteil der Personen wird diesen, infolge der Einleitung zur Personenevakuierung nach 150 s, bereits verlassen haben.

Das Ergebnis für Szenario S4 ist insofern besonders kritisch zu sehen, als es sich dabei um den angestrebten Ablauf – also das Designszenario – im Falle eines Wasserstofffahrzeugbrandes handelt, und dieses damit die höchste Eintrittswahrscheinlichkeit aller Wasserstoff-Unterszenarien besitzt. Grundsätzlich ist es wichtig festzuhalten, dass die Konsequenzen speziell bei diesem Szenario stark schwanken und sich hohe Schadensausmaße nur bei einem Zusammentreffen konservativer Annahmen – niedriger Temperaturgrenzwert, frühe TPRD Aktivierung, Vernachlässigung des Impulsabbaus und damit der Längenreduktion infolge schräger TPRD Orientierung, ergeben. Die angeführten

---

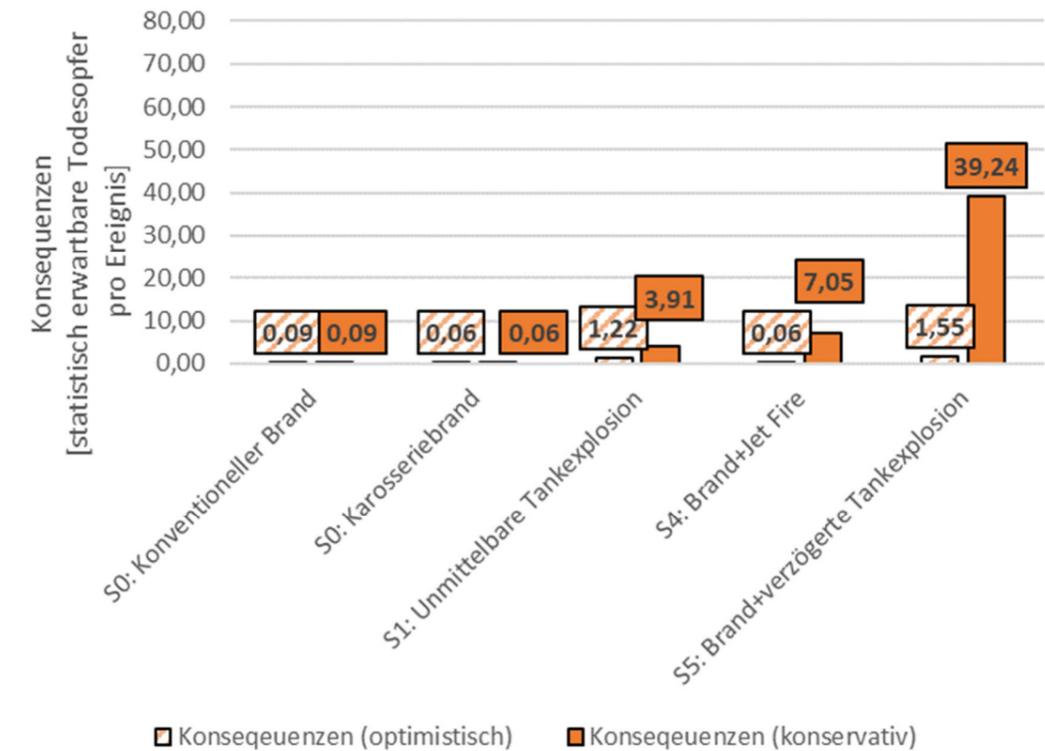
<sup>1</sup> Der Wert des Schadensausmaßes ist aufgrund des in Kapitel 5.2.2 erläuterten mikroskopischen Evakuierungsmodells ein nicht ganzzahliger Wert

Ergebnisse sind daher nicht als absolute Tatsachen zu verstehen, sondern zeigen vielmehr auf, dass auch der gewünschte Szenarienablauf – Freistrahbrand durch TPRD Auslösung – zu einem signifikanten Anstieg des Schadensausmaßes führen könnte. Dieser signifikante Anstieg ist zum einen dadurch bedingt, dass bei konventionellen Bränden, der Bereich mit Personen, frei von Gefahren (Brandrauch) gehalten werden kann, was im Falle einer nach hinten orientierten Freistrahflamme nicht mehr der Fall ist, und zum Anderen, dass je nach TPRD Auslösezeitpunkt ein große Anzahl von Personen betroffen sein kann.

Ereignis	Zeit
Brandbeginn	0 s
Tankexplosion aufgrund mechanischer Schadenswirkung	0 s
Beginn der Evakuierung	150 s
TPRD Auslösezeitpunkt – PKW Karosseriebrand	74 s / 206 s
Tankexplosion aufgrund PKW Karosseriebrand	480 s

**Tabelle 36: Zeitschiene – Schadensszenarien PKW**

LKW Ereignisse



**Abbildung 89: Schadensausmaßwerte bei Involvierung eines wasserstoffbetriebenen LKW**

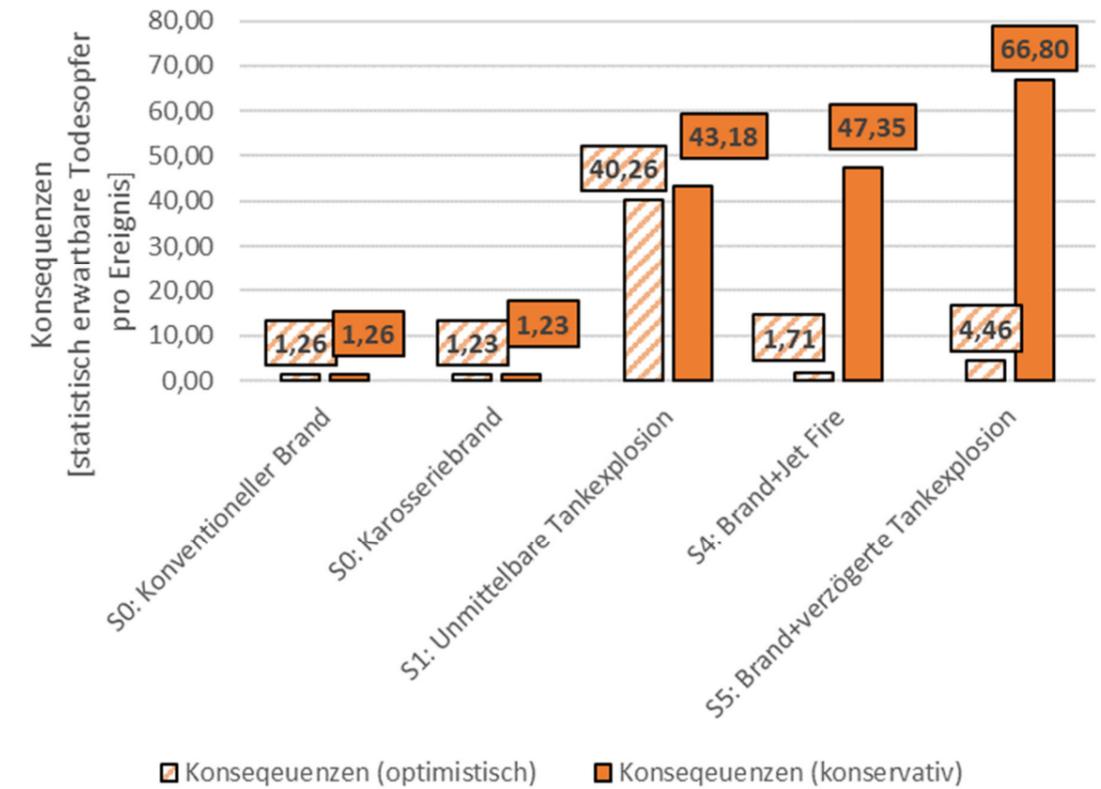
Abbildung 89 fasst die zu resultierenden Konsequenzen für wasserstoffbetriebene LKW zusammen. Die vollständigen Detailergebnisse sind in Tabelle 37 dargestellt. Die Resultate für Szenarien S0, S1 und S4 sind grundsätzlich ähnlich zu den zuvor diskutierten PKW Konsequenzen. Das maximale Schadensausmaß Für Szenario S4 – Brand + Jet Fire – ist für LKW geringer als für PKW, was auf den geringeren Speicherdruck und die Positionierung des TPRD weiter vorne am Fahrzeug zurückzuführen ist. Deutlich unterschiedlich zum Ergebnis für PKW ist jedoch das maximale Schadensausmaß bei verzögerter Tankexplosion, Szenario S5. War für dieses Szenario im Falle eines beteiligten PKW das Schadensausmaß noch auf 0,9 Todesopfer pro Ereignis beschränkt, steigt der maximal Wert nun auf fast 40 (39,2) Todesopfer pro Ereignis. Grund dafür ist vor allem der frühere Explosionszeitpunkt. Gemäß den Abschätzungen in Kapitel 5.1.5 wurde die Explosion des PKW Tanks nach 480 s angenommen. Bei einem LKW (und auch Bus) Brand wird dieselbe Wärmemenge aber schon deutlich früher erreicht, weshalb die Explosion bereits nach 159,s, also nur 9 Sekunden nach Beginn der Personenevakuierung, angenommen wurde. Dadurch bleibt den Personen nur

sehr wenig Zeit, um den Gefahrenbereich, der aufgrund des größeren Tankvolumens auch weitreichender ist, zu verlassen.

Szenario	Tank	Grenzwert	TPRD	Aktivierungszeitpunkt / Zeitpunkt Bersten des Tanks	Konsequenzen
S0 a	-	-	-	-	<b>0,09</b>
S0 b	-	-	-	-	<b>0,06</b>
S1	Einzeltank	0,483 bar	-	1 s	<b>1,91</b>
	Einzeltank	1,034 bar	-	1 s	<b>1,22</b>
	Tanksystem	0,483 bar	-	1 s	<b>3,91</b>
	Tanksystem	1,034 bar	-	1 s	<b>1,79</b>
S4	-	149°C	2,25mm	134 s	<b>1,41</b>
	-	149°C	5,0 mm	134 s	<b>4,45</b>
	-	309°C	2,25mm	134 s	<b>0,06</b>
	-	309 °C	5,0 mm	134 s	<b>2,71</b>
	-	149°C	2,25mm	32 s	<b>4,03</b>
	-	149°C	5,0 mm	32 s	<b>7,05</b>
	-	309°C	2,25mm	32 s	<b>1,44</b>
	-	309 °C	5,0 mm	32 s	<b>5,32</b>
S5	Einzeltank	0,483 bar	-	159 s	<b>16,47</b>
	Einzeltank	1,034 bar	-	159 s	<b>1,55</b>
	Tanksystem	0,483 bar	-	159 s	<b>39,24</b>
	Tanksystem	1,034 bar	-	159 s	<b>14,21</b>

**Tabelle 37: Detailergebnisse der quantitativen Konsequenz Analyse: Konsequenzen in statistisch erwartbaren Todesopfern pro Ereignis - LKW**

Bus Ereignisse



**Abbildung 90: Schadensausmaßwerte bei Involvierung eines wasserstoffbetriebenen Bus**

Die schwerwiegendsten Konsequenzen resultieren eindeutig aus Bus Ereignissen (Abbildung 90 bzw. Tabelle 38). Die Schadensausmaße aller betrachteten Szenarien, auch jener von konventionellen Bränden bzw. Karosseriebränden, liegen deutlich über jenen von PKW und LKW Ereignissen. Im Grunde sind die Ergebnisse für Busereignisse jenen von LKW Ereignissen sehr ähnlich, und unterscheiden sich, zumindest bei den Wasserstoffszenerarien, nur durch die höhere Anzahl an Personen im Bus (40) im Vergleich zum einzelnen LKW Lenker. Lediglich bei der verzögerten Explosion – S5 – gelingt auch einem Teil der Businsassen, aufgrund der Fluchteinleitung im Ereignisfahrzeug unmittelbar nach Brandbeginn, die Flucht aus dem Gefährdungsbereich vor dem Eintreten der Explosion.

Szenario	Tank	Grenzwert	TPRD	Aktivierungszeitpunkt / Zeitpunkt Bersten des Tanks	Konsequenzen
S0 a	-	-	-	-	<b>1,26</b>
S0 b	-	-	-	-	<b>1,23</b>
S1	Einzeltank	0,483 bar	-	1 s	<b>41,27</b>
	Einzeltank	1,034 bar	-	1 s	<b>40,26</b>
	Tanksystem	0,483 bar	-	1 s	<b>43,18</b>
	Tanksystem	1,034 bar	-	1 s	<b>40,88</b>
S4	-	149°C	2,25mm	134 s	<b>3,88</b>
	-	149°C	5,0 mm	134 s	<b>6,93</b>
	-	309°C	2,25mm	134 s	<b>1,71</b>
	-	309 °C	5,0 mm	134 s	<b>5,19</b>
	-	149°C	2,25mm	32 s	<b>44,32</b>
	-	149°C	5,0 mm	32 s	<b>47,35</b>
	-	309°C	2,25mm	32 s	<b>42,16</b>
	-	309 °C	5,0 mm	32 s	<b>45,62</b>
S5	Einzeltank	0,483 bar	-	159 s	<b>24,38</b>
	Einzeltank	1,034 bar	-	159 s	<b>4,46</b>
	Tanksystem	0,483 bar	-	159 s	<b>66,80</b>
	Tanksystem	1,034 bar	-	159 s	<b>17,18</b>

**Tabelle 38: Detailergebnisse der quantitativen Konsequenz Analyse: Konsequenzen in statistisch erwartbaren Todesopfern pro Ereignis – Bus**



## 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

### 6.1. Schlussfolgerungen

Auf Basis der Ergebnisse aus der Literaturrecherche, der Erhebung des Stands der Technik, der analytischen und numerischen Simulationen sowie einer vertieften Konsequenzanalyse, wurden Schlussfolgerungen bezogen auf die Gefährdung von Personen, die Auswirkungen auf die Infrastruktur sowie die Ereignisbewältigung gezogen. An dieser Stelle werden die getroffenen Schlussfolgerungen für die folgenden Gefahren im Detail diskutiert:

- Wasserstoff-Stichflamme
- Explosion einer Wasserstoffwolke
- Tankbruch

Zu erwähnen ist, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit der f Unfallereignisse in diesem Bericht aufgrund unzureichender statistischen Unfalldaten nicht untersucht und daher nicht berücksichtigt wurden. Lediglich qualitative Aussagen auf Basis von Literaturangaben werden zur besseren Einschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeiten angegeben. Für weiterführende Literatur wird auf Kapitel 2.1.4 verwiesen.

Bei Ereignissen mit Wasserstoff-Fahrzeugen im Tunnel existiert auf Grund der möglichen thermischen und mechanischen Einwirkung auf Personen ein potentiell erhöhtes Risiko. Dieses variiert jedoch stark zwischen den drei zuvor genannten Ereignisszenarien.

Während ein Wasserstoff-Freistrahbrand primär eine thermische Einwirkung (Temperatur und Wärmestromdichte) verursacht, dominiert bei der Explosion einer Wasserstoffwolke und einem Tankbruch die mechanische Einwirkung durch die entstehende Druckwelle. Der auftretende Überdruck ist dabei abhängig von der am Ereignis beteiligten Wasserstoff-Masse (chemische Energie) sowie dem vorhandenen Tankdruck (mechanische Energie), der Zündenergie, der vorherrschenden Konzentration sowie dem Turbulenzgrad.

### Wasserstoff-Freistrahbrand:

Wasserstoff-Freistrahbrände treten infolge einer gezündeten Freisetzung aus dem Tanksystem oder den Wasserstoffleitungen auf. Die Ursache der Freisetzung kann einerseits eine mechanisch bedingte Leckage (Beschädigung einer Leitung oder eines Tanks) zufolge eines Materialfehlers einer Kollision oder andererseits eine thermisch bedingte Aktivierung des TPRD sein. Auf Grund einer Verbrennungstemperatur von  $> 2000^{\circ}\text{C}$ , ist bei Kontakt mit einer Wasserstoffflamme von schweren Verletzungen oder Todesfolgen auszugehen. Der Wirkungsbereich einer Wasserstoffflamme hängt von mehreren Parametern ab. Zum einen ist dies der Austrittsimpuls aus einer Leckage respektive dem TPRD. Dieser wiederum ist das Produkt aus dem austretenden Massenstrom und der Geschwindigkeit mit dem der Wasserstoff aus der Austrittsöffnung austritt. Beide Parameter resultieren aus dem Druck im Tank/der Leitung sowie dem Öffnungsquerschnitt. Ein gängiges Maß für die Definition der Gefahrenbereiche beim Auftreten einer Wasserstoff-Freistrahflamme ist die maximale Flammenlänge. Diese resultiert aus dem Austrittsimpuls und variiert bei ungehinderter Ausbreitung zwischen wenigen Metern und einer Länge von bis zu 50 Meter (Bus/LKW). Bei realen Ereignissen im Tunnel ist nicht davon auszugehen, dass eine solche ungehinderte Freisetzung auftritt, da Tunnelwände und andere Fahrzeuge Hindernisse darstellen. Die ermittelten Gefahrenbereiche (Flammenlängen) können daher als Obergrenze verstanden werden. Eine äußerst effektive Methode, um den Gefahrenbereich zu reduzieren ist eine vertikale oder schräg nach unten orientierte Freisetzungsrichtung, wodurch der Austrittsimpuls durch das Auftreffen der Flamme auf der Fahrbahn oder der Tunneldecke abgebaut und die Flammenlänge reduziert wird. Die meisten Fahrzeughersteller berücksichtigen dies bereits und haben entsprechende TPRD-Orientierungen vorgesehen.

Die derzeit üblichen TPRD-Orientierungen konnten näherungsweise in der Schadensausmaßmodellierung berücksichtigt werden. Beim PKW wurde eine Positionierung am Fahrzeugheck und eine Orientierung der Freistrahflamme ungehindert entgegen der Fahrtrichtung angenommen. Bei Bussen bzw. LKW wurden eine Positionierung am Fahrzeugdach in der Mitte des Fahrzeuges (Bus) bzw. zwischen Fahrerkabine und Anhänger (LKW) und eine Orientierung ebenfalls ungehindert normal zur Fahrtrichtung angenommen. Die resultierenden Flammenlängen können als konservativ angesehen werden, da Impulsabbau bzw. Reduktion des Gefahrenbereichs durch Ablenkung und Reflexion an Tunnelwand wie

auch an anderen Fahrzeugen, aufgrund fehlender analytischer Modelle bzw. zu großem numerischen Aufwand, vernachlässigt werden musste.

Ein maßgebender Einflussfaktor bezogen auf das Risiko von Personen ist der Faktor Zeit. Hierbei stellt die Auslösezeitpunkt eines TPRDs die größte Unsicherheit dar, da kaum Erfahrungen sowie Forschungsergebnisse zu diesem Aspekt vorliegen. Aktuell muss davon ausgegangen werden, dass sowohl Tunnelnutzer als auch Einsatzkräfte der Gefahr einer Wasserstoff-Freistrahlfamme ausgesetzt sein können.

#### Explosion einer Wasserstoffwolke:

Wasserstoff ist das leichteste Element des Periodensystems, wodurch starke Auftriebseffekte bei einer Freisetzung in die Umgebung auftreten. Im Falle einer ungezündeten Freisetzung von Wasserstoff im Tunnel, führen diese Auftriebskräfte dazu, dass sich der Wasserstoff an der Tunneldecke ansammelt und eine Wasserstoffwolke bildet. Diese kann sich beim Überschreiten der unteren Zündgrenze von 4Vol% und bei Kontakt mit einer Zündquelle entzünden was zu einer Explosion führt. Auf Grund der äußerst niedrigen benötigten Zündenergie, stellen bereits im Tunnel vorhandenen Leuchten (warme Oberflächen) oder elektrische Impulse durch die Aktivierung von Ventilatoren, mögliche Zündquellen dar. Das Schadensausmaß bei Explosion einer Wasserstoffwolke ergibt sich aus der beteiligten Wasserstoff-Masse sowie der vorliegenden Konzentration, welche hauptauschlaggebend für die Höhe des resultierenden Überdrucks bei der Ausbreitung der zu erwartenden Druckwelle sind.

Die Längsneigung des Tunnels hat eine starke Auswirkung auf die auftretenden Auftriebskräfte. Bei einer Entlüftung in Richtung der Steigung, wirken diese Auftriebskräfte unterstützend, sodass ein positiver Effekt bezogen auf die Verdünnung des ausgetretenen Wasserstoffs bzw. bezogen auf die Wasserstoffwolkenbildung zu erwarten ist. Bei einer Lüftungsrichtung entgegen der Steigung, ist davon auszugehen, dass die Wirkung der mechanischen Lüftung und der Auftriebskräfte entgegengesetzt erfolgt, wodurch mitunter eine reduzierte Verdünnung zu erwarten ist. Das exakte Verhalten in den beschriebenen Fällen ist tunnelspezifisch. Die Projektergebnisse zeigten jedoch, dass die Tunnellüftung (Längslüftung) einen starken Einfluss auf die auftretenden Wasserstoffkonzentrationen an der Tunneldecke hat. Für den betrachteten Fall eines Tunnels ohne Längsneigung, zeigte sich eine

Längsströmungsgeschwindigkeit von ca. 2 m/s geeignet, um über weite Tunnelbereiche die Bildung eines zündfähigen Gemischs zu vermeiden.

Die Definition von Gefahrenbereichen für das Szenario einer Explosion einer Wasserstoffwolke kann nur eingeschränkt erfolgen. Dies begründet sich dadurch, dass der Ort der Freisetzung und der Ort der Zündung der Wolke nicht zwangsläufig dieselben sind und keine geeigneten analytischen Modelle zur Abschätzung des Überdrucks infolge einer Wasserstoffwolkenexplosion existieren. Im Vergleich zum Bruch eines Wasserstofftanks, kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der auftretende Überdruck niedriger ist, da sich die mechanische Energie (hoher Speicherdruck) bereits vor der Explosion abgebaut hat. Dennoch ist auf Grund der im Wasserstoff gespeicherten chemischen Energie mit schweren Verletzungen respektive tödlichen Folgen im Bereich des Zündorts zu rechnen. Das Szenario einer Wasserstoffwolkenexplosion stellt mit großer Wahrscheinlichkeit kein Primärereignis dar, sodass zuvor Zeit zur Evakuierung des Tunnels verfügbar ist. Die Evakuierung sollte so rasch wie möglich eingeleitet werden, um die Tunnelnutzer in einen sicheren Bereich (zum Beispiel die zweite Tunnelröhre) zu bringen. Der Faktor Zeit, stellt aktuell den größten Hebel bezogen auf die Personengefährdung für dieses Ereignisszenario dar. Dieser Hebel, verliert jedoch seine Bedeutung für zu einem späteren Zeitpunkt eintreffende Einsatzkräfte.

Ein großer Unsicherheitsfaktor hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Szenarios stellt die Frage dar, ob Wasserstoff überhaupt in relevanten Mengen ungezündet freigesetzt werden kann. Die geringe Zündenergie von Wasserstoff deutet darauf hin, dass die Freisetzung mit hoher Wahrscheinlichkeit gezündet erfolgt. Belastbare Daten hierzu sind in der aktuellen Literatur aber nicht verfügbar.

#### Tankbruch:

Der Bruch eines Wasserstofftanks kann die Folge einer massiven mechanischen Einwirkung (Kollision), einer massiven thermischen Einwirkung (Großbrand als Primärereignis) oder einer Fehlfunktion des TPRDs bei thermischer Einwirkung sein. Die Auswirkung eines Tankbruchs, auf die Gesundheit von Personen, entsteht durch die auftretende Druckwelle (hoher Überdruck) welche sich entlang des gesamten Tunnels ausbreitet. Diese resultiert aus dem schlagartigen Abbau des hohen Speicherdrucks (mechanische Energie) sowie der Verbrennung des Wasserstoffs (chemische Energie). Letzteres führt zur Erzeugung einer

Druckwelle, und im Falle einer Zündung ebenso zur Ausbildung eines Feuerballs im Bereich des berstenden Tanks.

Im Falle eines Tankbruchs zufolge einer Kollision, ist davon auszugehen, dass dies ein unmittelbares Ereignis darstellt (Primärereignis) und sich keine oder nur wenige Personen im Tunnel, außerhalb ihrer Fahrzeuge, befinden. Jene Personen, die sich in den Fahrzeugen befinden, sind grundsätzlich besser geschützt als freistehende Personen. Es können aktuell jedoch keine validen Aussagen darüber getroffen werden, in wie weit sich die Einwirkung der Druckwelle dadurch reduziert. Informationen aus der Literatur lassen darauf schließen, dass es auch in diesem Fall durch berstendes Glas zu schweren oder tödlichen Verletzungen kommen kann. Jene Personen, die sich während der Tankexplosion, außerhalb ihrer Fahrzeuge befinden, erfahren die direkte Einwirkung der auftretenden Druckwelle sowie des Feuerballs (im Bereich des berstenden Tanks). Dementsprechend wurde im Zuge der Schadensausmaßmodellierung angenommen, dass sich jene Personen welche sich im Gefahrenbereich von Überdrücken >1bar befinden als getötet zu zählen sind.

Im Falle eines durch eine massive thermisch Einwirkung auftretenden Tankbruchs, ist davon auszugehen, dass auf Grund des Primärereignisses (Brand des Fahrzeuges), der Evakuierungsprozess bereits abläuft oder im Idealfall bereits abgeschlossen ist. Eine Fehlfunktion des TPRDs bei kleinerer thermischer Einwirkung ist nicht auszuschließen, aber wird als unwahrscheinlich erachtet. Valide Daten hierzu liegen aktuell jedoch nicht vor. Beim Bersten eines Tanks erstreckt sich der Gefährdungsbereich mit höchst wahrscheinlich tödlichen Folgen über ca. 30 m. Schwere bzw. leichte Verletzungen sind im gesamten Tunnel zu erwarten.

Eine besondere Gefahr stellt das thermisch bedingte Bersten eines Wasserstoff-Tanks für eintreffende Einsatzkräfte dar, welche mitunter keine Information ob der Beteiligung eines Wasserstofffahrzeugs haben. Eine automatisierte Informationsweitergabe an den Tunnelbetreiber wie auch die Feuerwehr selbst reduziert die Personengefährdung für die Phase der Ereignisbewältigung deutlich.

### 6.1.1. Schlussfolgerungen bezogen auf Auswirkungen auf die Tunnelinfrastruktur

Ereignisse mit Wasserstofffahrzeugen im Tunnel stellen nicht nur eine Gefahr für Tunnelnutzer und Einsatzkräfte dar, sondern haben ebenso Auswirkungen auf die Tunnelinfrastruktur selbst. Das Ausmaß dieser Auswirkungen unterscheidet sich jedoch deutlich zwischen den Ereignisszenarien.

#### Wasserstoff-Freistrahbrand:

Der Wasserstoff-Freistrahbrand stellt ein zeitlich und örtlich begrenztes Phänomen dar. Der Blowdown eines Wasserstoff-tanks dauert je nach Tankdruck und Größe des TPRDs nur Sekunden bis hin zu wenigen Minuten. Die Intensität (Flammenlänge und verbrannter Wasserstoffmassenstrom) der Flamme ist zu Beginn der Freisetzung am höchsten und nimmt mit fortschreitender Zeit rasch ab. Auf Grund der hohen Verbrennungstemperatur von Wasserstoff, kann es im Kontaktbereich der Flamme und den Tunnelinstallationen, dem Tunnelbauwerk und der Fahrbahn dennoch zu Schäden kommen.

Tunnelinstallationen, wie Leuchten, Lüfter, Verkabelungen, etc. können bei direkter Einwirkung einer Wasserstoff-Freistrahlf Flamme starken Schaden nehmen und die Funktionsfähigkeit verlieren. Bezogen auf das Tunnelbauwerk ist auf Grund der kurzen Einwirkdauer mit keinen ernstzunehmenden Schäden zu rechnen. Lokal begrenzte, oberflächliche Abplatzungen an Betonwänden können jedoch nicht ausgeschlossen werden. Ähnliche Auswirkungen mit lokalen, oberflächlichen Schäden sind für die Fahrbahn zu erwarten.

#### Explosion einer Wasserstoffwolke:

Der entstehende Überdruck bei der Explosion einer Wasserstoffwolke erzeugt eine mechanische Belastung für Tunnelinstallationen, welche zur massiven Schädigung derselben führen kann. Speziell in Bereichen mit hohen Wasserstoffkonzentrationen ist dies zu erwarten. Auf Grund der mitunter großen Ausdehnung einer Wasserstoffwolke, stellt dieses Szenario im Vergleich zur Wasserstoff-Freistrahlf Flamme jedoch kein lokal begrenztes Phänomen dar, sodass Schäden über größere Tunnellängen möglich sind. Die Höhe des Überdrucks ist entscheidend für das Schädigungspotenzial bezogen auf die Tunnelstruktur. Auf Grund der

bereits abgebauten mechanischen Energie (Wasserstoffwolke liegt bei Umgebungsdruck vor), kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen begrenzt bleiben.

#### Tankbruch:

Im Vergleich zur Explosion einer Wasserstoffwolke, ist der zu erwartende Überdruck beim Bruch eines Tanks höher. Je nach Position der Tanks im Fahrzeug, stellt das Fahrzeug selbst jedoch ein Hindernis dar, welches zum teilweisen Abbau der mechanischen Energie beiträgt. Speziell bei Bussen und LKWs, ist auf Grund der derzeit umgesetzten Einbausituationen, jedoch nur mit einer geringen Abschwächung zu rechnen. Somit ist mit massiven Schäden der Tunnelinstallationen im Bereich einer längeren Tunnelsektion zu rechnen. Der entstehende Überdruck führt mitunter ebenfalls zur Schädigung des Tunnelbauwerks. Hierbei ist speziell die Tunnelzwischenendecke in halb-quer oder quergelüfteten Tunneln zu erwähnen. Das Versagen der Tunneldecke, kann aktuell nicht ausgeschlossen werden. Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Systemen, welche in Straßentunnel mit Zwischenendecke in Österreich verbaut sind, ist eine allgemeine Aussage zum Schädigungsmaß schwierig. Um konkrete Aussagen darüber tätigen zu können, sind jedoch weiterführende Untersuchungen notwendig.

### **6.1.2. Schlussfolgerungen bezogen auf Auswirkungen auf Ereignisbewältigung**

Ereignisszenarien mit Wasserstofffahrzeugen erhöhen in Bezug auf die Personensicherheit von Tunnelnutzern das Risikopotential. Dieses potenziell erhöhte Risiko überträgt sich auf die Ereignisbewältigung, und im speziellen auf die Sicherheit der Einsatzkräfte. Die möglichen Auswirkungen von Ereignissen mit Wasserstofffahrzeugen auf Einsatzkräfte, unterscheiden sich jedoch deutlich für unterschiedliche Ereignisszenarien.

#### Wasserstoff-Freistrahlf Flamme:

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass eine Wasserstoff-Freistrahlf Flamme einem bereits bestehendem Brand (z.B. der Karosserie) folgt. Das Auslösen des TPRDs erfolgt also durch ein thermisches Primärereignis, wodurch mit hoher Wahrscheinlichkeit der Evakuierungsprozess bereits eingeleitet wurde. Ein Schlüsselfaktor bei der Ereignisbewältigung ist somit die Früherkennung des Primärereignisses, um möglichst günstige Bedingungen für die Selbstrettung zu schaffen. Bei Vorliegen der Information ob der

Beteiligung eines Wasserstofffahrzeuges können zudem flüchtende Tunnelnutzer über die Gefahren mittels Sprechdurchsagen hingewiesen werden. Der zeitliche Ablauf der Ereignisfolge hat ebenso starken Einfluss auf die Gefahr für Einsatzkräfte. Wenn das Primärereignis noch nicht bewältigt werden konnte und das Abblasen des Wasserstoffs aus dem Tank noch nicht stattgefunden hat, besteht für die Kräfte der Feuerwehr ebenso ein Risiko, da reine Wasserstoffflammen über weite Teile unsichtbar sind und die Geräuschentwicklung auf Grund von aktivierten Lüftern nicht zwingend ausreicht, um eine akustische Wahrnehmung zu garantieren.

Aus Sicht der Intervention durch die Feuerwehr, sind somit zweierlei Aspekte hervorzuheben. Die Information über die Beteiligung oder Anwesenheit eines Wasserstofffahrzeugs bei einem Tunnelereignis ist essenziell für das Vorgehen der Feuerwehr. Viele Feuerwehren verfügen bereits über Wärmebildkameras, welche ein nützliches Tool darstellen, um Wasserstoffflammen optisch zu erkennen und somit das Risiko eines direkten Kontakts zu minimieren. Die verwendete Schutzbekleidung bietet zumindest kurzzeitig einen gewissen Schutz.

Beim Auftreten von Wasserstoffflammen als Folge von Leckagen, ist davon auszugehen, dass auf Grund des unzulässig starken Druckabfalls, der Tank automatisiert verschlossen wird und so die Wasserstoff-Freistrahlf Flamme gestoppt werden kann.

#### Explosion einer Wasserstoffwolke:

Mit der aktuellen Sensorik in Österreichischen Tunnelanlagen kann eine Wasserstoffwolke nicht detektiert werden. Aus diesem Grund liegen für Einsatzkräfte und Betreiber keine Informationen ob dem Vorhandensein dieser Gefahr vor. Ein möglicher Ansatz zur Minimierung der Gefahr ist präventives Lüften, um eine ausreichende Verdünnung des Wasserstoffs zu erreichen und die Bildung einer zündfähigen Wolke zu vermeiden. Die praktische Umsetzbarkeit dieser Maßnahme ist mit hohem Aufwand verbunden, da in die aktuell implementierte Lüftungssteuerung eingegriffen und bei jedem Ereignis die Brandlüftung aktiviert werden muss. Ein weiterer Ansatz, um die Wahrscheinlichkeit einer Zündung zu minimieren, ist die Verwendung explosionsgeschützter Installationen im Tunnel. Dies ist theoretisch umsetzbar, jedoch mit markant höheren Kosten im Vergleich zur derzeit üblichen Ausführung verbunden. Zudem stellt sich die Frage einer Sinnhaftigkeit, da Zündquellen auch von anderer Stelle (etwa Fahrzeugen) stammen können.

Hinsichtlich der Risikominimierung im Zuge der Ereignisbewältigung ist die Identifikation von Wasserstoff-Fahrzeugen das effektivste Mittel, um die potenzielle Gefahr zu erkennen. Hierfür existieren europaweit unterschiedliche Ansätze, um eine solche Identifikation zu ermöglichen. Ähnlich wie bei Batterieelektrischen Fahrzeugen, könnte unter anderem die Information durch eine farbliche Gestaltung von Nummernschildern erfolgen. In Österreich ist dies aktuell jedoch nur optional. Um eine darauf basierende automatische Videoerkennung zu ermöglichen, wäre zusätzlich die Installation / Aufrüstung von hochauflösenden Videokameras notwendig.

Allgemeine Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, reduzieren gleichzeitig die Eintrittswahrscheinlichkeit sowie das Schadensausmaß von Unfällen. Die Wirkung dieser Maßnahmen kann als präventiv kategorisiert werden und stellt bezogen auf die Umsetzbarkeit, lediglich die Intensivierung von existierenden Maßnahmen dar.

#### Tankbruch:

Ein Tankbruch ist entweder ein unmittelbares Ereignis (mechanisch ausgelöst durch Kollision) oder eine durch massive äußere Wärmeeinwirkung hervorgerufen verzögertes Ereignis. Diese beiden Fälle unterscheiden sich grundlegend in Hinblick auf die Ereignisbewältigung. Im Falle eines unmittelbaren Tankbruchs durch eine unzulässige mechanische Einwirkung, können lediglich organisatorische Maßnahmen, wie die Reduktion der gefahrenen Geschwindigkeiten im Tunnel oder technische Maßnahmen bezogen auf die Fahrzeuge (Fahrerassistenzsysteme respektive entsprechende Gestaltung und Schutz des Tanksystems) getroffen werden.

Im zweiten Fall, einer massiven externen Wärmeeinwirkung durch z.B. den Brand eines (weiteren) Fahrzeugs, ist davon auszugehen, dass einige Zeit bis zum Eintreten des Tankbruchs vergeht. Dies ermöglicht es den Tunnelnutzern, aus der Ereignisröhre zu flüchten. Um dies bewerkstelligen zu können, sind eine frühe Erkennung des Primärerbrandes sowie die rasche Einleitung der Evakuierung unumgänglich. In Tunneln mit Brandbekämpfungsanlagen ist davon auszugehen, dass der primäre Brand nicht die Größe erreicht, um das Bersten eines Wasserstofftanks auszulösen, bzw. das Bersten des Tanks deutlich verzögert wird. In Tunnelanlagen ohne Brandbekämpfungsanlage erfolgt die Intervention primär durch die Feuerwehr. Ein wesentlicher Faktor bei der Bewertung der Risikolage durch die Einsatzkräfte ist wiederum die Information über die Beteiligung eines Wasserstofffahrzeugs. Das Kühlen von Wasserstofftanks ist grundsätzlich effektiv, um das Bersten zu vermeiden, in den meisten Fällen auf Grund der Einbausituation aber nur

eingeschränkt möglich. Eine derzeit im Prototypen Stadium befindliche technische Lösung ist ein Tanksystem, welches bei thermischer Einwirkung die Isolationsschicht verliert und so permeabel für den gespeicherten Wasserstoff wird. Dieses Tanksystem reduziert nach momentaner Einschätzung die Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. die Auswirkungen aller drei maßgebenden Wasserstoffszenarien – Freistahlbrand, termisch bedingte Tankexplosion, Wasserstoffwolkenexplosion.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass das Erkennen der Gefahr bereits eine Herausforderung darstellt. Maßnahmen um Ereignisszenarien mit Wasserstofffahrzeugen zu vermeiden decken sich grundsätzlich mit jenen Maßnahmen, welche generell die Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen in Tunnelanlagen reduzieren sollen. Um die Auswirkungen von Ereignissen mit Wasserstofffahrzeugen zu mindern, existieren unterschiedliche technische und organisatorische Lösungsansätze, welche im folgenden Kapitel der Handlungsempfehlungen (Kapitel 6.2) näher erläutert werden.

## 6.2. Handlungsempfehlungen

Im Folgenden werden die Handlungsempfehlungen auf Basis der selektierten Ereignisszenarien und möglichen Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos erarbeitet. Der Fokus liegt hierbei auf der Effektivität und der Umsetzbarkeit der Maßnahmen. Beide Aspekte werden mit Noten von 1 bis 4 bewertet. Die jeweils zugrunde liegende Bedeutung der Noten kann Tabelle 39 entnommen werden. Hierbei fließen für den Bereich der Effektivität die Breitenwirksamkeit bezogen auf die Ereignisszenarien sowie die Effektivität bezogen auf Reduzierung des Schadensausmaßes oder der Eintrittswahrscheinlichkeit ein. Die Umsetzbarkeit wiederum inkludiert die Aspekte der technischen Umsetzbarkeit sowie den benötigten zeitlichen und monetären Aufwand.

**Tabelle 39: Bewertungssystem für Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos.**

Effektivität		Umsetzbarkeit	
1	Sehr effektiv	1	Geringer Aufwand
2	effektiv	2	Moderater Aufwand
3	wenig effektiv	3	Hoher Aufwand
4	Nicht effektiv	4	Extremer Aufwand

Maßnahmen die in beiden Aspekten mit 1 bewertet wurden, können als explizite Handlungsempfehlungen interpretiert werden. Maßnahmen die zumindest in einem und maximal in zwei Aspekten mit 2 bewertet wurden, werden zu Handlungsempfehlungen sobald der Anteil an Wasserstoff-betriebenen Fahrzeugen ein für das Gesamtrisiko relevantes Ausmaß annimmt. Maßnahmen mit Bewertungen von 3 oder 4 können als ergänzende oder theoretisch wirksame Maßnahmen verstanden werden.

Die angeführten Maßnahmen wurden zudem kategorisiert. Einerseits erfolgt dies allgemein bezogen auf technische und organisatorische Maßnahmen, zum anderen werden die Maßnahmen als Maßnahmen zur Erkennung der Gefahr, Maßnahme zur Vermeidung eines Ereignisses sowie Maßnahme zur Minderung des Schadensausmaßes charakterisiert. In

weitere Folge erfolgt ebenso eine Einteilung in präventive Maßnahmen und Maßnahmen im Zuge der Ereignisbewältigung.

Jeder der Maßnahmen ist zudem eine Zuständigkeit (z.B. Tunnelbetreiber) und eine zeitliche Dringlichkeit zugeordnet.

Wirkungsbereich und Priorisierung hinsichtlich Effektivität und Umsetzbarkeit (Benotungssystem).

Wer?	Typ	Wirkung	S1	S2	S3	S4	S5	Effektivität
Hersteller, Fahrzeugindustrie	Erkennung	Prävention	X	(X)	(X)	(X)	(X)	1
Hersteller	Vermeidung	Prävention		X	X			3
Hersteller	Erkennung	Prävention		X	X			3
Hersteller, Behörden & Fahrzeugindustrie	Erkennung	Ereignisbewältigung		X	X	X	X	1
Hersteller	Minderung	Ereignisbewältigung				X	X	2
Hersteller	Minderung	Ereignisbewältigung		X	X	X	X	1
Fahrzeugindustrie	Minderung	Ereignisbewältigung				X		1
Fahrzeugindustrie	Minderung	Prävention				X	X	2
Fahrzeugindustrie	Vermeidung	Prävention		X	X	X	X	1*
Fahrzeugindustrie	Vermeidung	Prävention					X	3
Hersteller, Behörde	Vermeidung	Prävention	X	X	(X)	(X)	(X)	1
Hersteller	Minderung	Ereignisbewältigung		X	X	X	X	1
Hersteller	Vermeidung	Prävention		X	X			1

treiber & Feuerwehren	Vermeidung	Prävention				X	X	1
treiber	Ausmaßmin derung	Prävention & Ereignisbewältigung				X	X	1

in Szenario S direkt zu reduzieren

Risiko in Szenario S

validen Daten vorhanden sind  
Identifizierung vorausgesetzt wird

### 6.2.1. Maßnahmen mit hoher Priorität

Zwei Maßnahmen stechen auf Grund ihrer breiten Wirksamkeit bezogen auf das Schadensausmaß der Ereignisszenarien hervor. Einerseits ist dies die Fahrzeugkennzeichnung sowie der Informationsaustausch zwischen dem Wasserstofffahrzeug und der Tunnelinfrastruktur und andererseits die rasche Einleitung der Evakuierung. Erstere zielt auf den Informationsfluss ab, der bei der Identifikation von Wasserstofffahrzeugen erfolgen soll. Das Erkennen einer Gefahr ist essenziell für das Einleiten weiterer Maßnahmen zur Vermeidung von Ereignissen respektive Minderung ihrer Auswirkungen. Aus technischer Sicht existieren unterschiedliche Möglichkeiten zur Umsetzung, wie zum Beispiel:

- Farbliche Gestaltung der Nummernschilder inklusive Videoüberwachung an den Tunnelportalen
- GO-Box für Wasserstofffahrzeuge inklusive Checkpoints vor und nach dem Tunnel (Fahrzeuge > 3,5 to höchst zulässiges Gesamtgewicht)
- Car-to-Infrastructure-Communication (C2I)

Letztgenannte Möglichkeit ist ein Konzept mit der die Kommunikation von Fahrzeugen mit Infrastrukturellen Einrichtungen ermöglicht wird. Die tatsächliche Umsetzung ist aktuell auf Grund der fehlenden rechtlichen Grundlagen jedoch nicht möglich, aus Sicht der Tunnelsicherheit aber empfehlenswert.

Ein wesentlicher Faktor bezogen auf diese Maßnahme, ist die Gestaltung der aktuell noch fehlenden rechtlichen Grundlagen, wodurch ein unmittelbares Handeln erforderlich wird.

Unter Voraussetzung einer funktionierenden Fahrzeugerkennung, ist die präventive Aktivierung der Brandfalllüftung eine geeignete Maßnahme, um unzulässige Wasserstoffkonzentrationen zu verhindern.

Die rasche Einleitung der Evakuierung bei einem Ereignis im Tunnel ist, unabhängig von der Antriebsart der beteiligten Fahrzeuge, eine wichtige Maßnahme zur Reduzierung des Schadensausmaßes. Thermisch ausgelöste Ereignisse mit Wasserstofffahrzeugen resultieren aus Primärbränden, welche eine frühe Detektion erlauben und damit

ausreichend Zeit für die Selbstrettung bieten können. Die Wirksamkeit einer raschen Evakuierung ist in vier der fünf Szenarien gegeben. Die Umsetzung jedoch stark vom Verhalten der Tunnelnutzer abhängig. Die Umsetzung dieser Maßnahme ist direkt an eine frühe Erkennung eines Primäreignisses gebunden. Diese kann unter Umständen mittels Infrarotkameras, die an wesentlichen Stellen (/z.B. In Pannenbuchten) installiert werden erfolgen. Bei Detektion von heißen Oberflächen/Fahrzeugteilen können in Pannenbuchten Personen mittels akustischer Signale auf die Gefahr aufmerksam gemacht und zur Flucht animiert werden.

Eine weitere Maßnahme, die sich lediglich auf das Szenario einer Wasserstoff-Freistrahlf Flamme auswirkt jedoch das davon ausgehende Risiko markant reduziert, ist eine geeignete Orientierung des TPRDs, um den Austrittsimpuls der Flamme bereits nahe dem Ort der Freisetzung abzubauen. Hierbei ist ein rascher Kontakt der Flamme mit der Fahrbahn respektive mit der Tunneldecke anzustreben. Viele Fahrzeughersteller berücksichtigen diese einfach umzusetzende Maßnahme bereits. Die hohe Bedeutung dieser Maßnahme ergibt sich aus der Tatsache, dass eine kontrollierte, gezündete Freisetzung von Wasserstoff (Wasserstoff-Freistrahlf Flamme) das "gewünschte" Szenario darstellt, welches zur Vermeidung aller weiteren potenziellen Gefahren dient. Um die Gefahr für Einsatzkräfte zu reduzieren, ist die Ausstattung von Feuerwehren mit Wärmebildkameras, die die Detektion von Wasserstoffflammen ermöglichen, zu empfehlen.

Allgemeine Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit (z.B. Section Control) wirken sich ebenfalls positiv auf das Risiko von Ereignissen mit Wasserstoff-angetriebenen Fahrzeugen aus. Das Szenario eines Tankbruchs zufolge einer massiven mechanischen Einwirkung (Kollision) stellt jenes Szenario dar, für welches nur bedingt wirksame, technische Maßnahmen abgeleitet werden können. Die größte Gefahr bezogen auf dieses Szenario geht von einem sich bildenden Stau im Tunnel aus. Zum einen ist in solche Situation die Eintrittswahrscheinlichkeit durch die hohe mögliche Kollisionsenergie, die beim Aufprall eines fahrenden Fahrzeuges auf das stehende Stauende frei wird, erhöht. Zum anderen befinden sich entsprechend viele Personen in unmittelbarer Nähe zum Unfallort. Aus diesem Grund ist es essentiell die Stausituation frühzeitig zu erkennen, um Maßnahmen wie die Aktivierung von Hinweisgebern (Stau!) oder das Setzen von temporären Geschwindigkeitsbeschränkungen einzuleiten. Eine Reduktion der zulässigen Geschwindigkeit inklusive Überwachung (Section Control) ist sowohl temporär als auch

dauerhaft eine wirksame Maßnahme, da geringere Geschwindigkeiten die Aufprallenergie reduzieren und so die Eintrittswahrscheinlichkeit eines unmittelbaren Tankbruchs durch eine Kollision gesenkt wird. Diese Maßnahme wirkt sich zugleich positiv auf alle Ereignisszenarien aus, da auch die Eintrittswahrscheinlichkeit anderer Ereignisse reduziert wird.

Eine daran angelehnte Maßnahme ist die Früherkennung einer Staubildung, wodurch geeignete Folgemaßnahmen eingeleitet werden können, um das allgemeine Unfallrisiko und im konkreten Fall, die bei einem Auffahrunfall zu absorbierende Energie zu reduzieren.

### **6.2.2. Maßnahmen mit mittlerer Priorität**

Das Schadensausmaß von Wasserstoff-Freistrahlfammen kann durch kleine TPRD Durchmesser reduziert werden, da diese die Flammenlänge begrenzen und dadurch den Gefahrenbereich verkleinern. Diese Maßnahme wirkt speziell in Kombination mit der richtigen Orientierung des TPRD. Die Gefahrenerkennung für Tunnelnutzer ist auf Grund der physikalischen Eigenschaften einer Wasserstoffflamme nur erschwert möglich. Für die Einsatzkräfte der Feuerwehr ist dies mit dem Einsatz von Wärmebildkameras jedoch mit geringem Aufwand möglich. Viele Feuerwehren verfügen bereits über Wärmebildkameras, welche auf einfachem Weg in die Einsatztaktik bei Tunneleinsätzen mit inkludiert sind.

### **6.2.3. Maßnahmen geringer Priorität**

Eine zukunftssträchtige technische Weiterentwicklung stellt das Konzept eines explosionsfreien, selbstentlüftenden H<sub>2</sub> Tanks (self venting tank). Diese Technologie erfordert keine thermisch aktivierten Druckentlastungsvorrichtungen (TPRD). Stattdessen wird die gasdichte Wand des Tanks bei größerer Wärmeeinwirkung permeabel, so dass H<sub>2</sub> über den Tankumfang austreten kann. Dadurch kommt es zu keinen gefährlichen Stichflammen oder sonstigen Druckspitzen. Diese neuartige Technologie kann die Sicherheit von H<sub>2</sub>-Fahrzeugen massiv erhöhen. Diese Technologie befindet sich allerdings noch im Forschungsstadium.

Kann eine ungezündete Freisetzung von Wasserstoff nicht verhindert werden, besteht die Gefahr der Explosion einer Wasserstoffwolke. Um diese Gefahr zu erkennen ist zusätzliche Sensorik in den Tunnelanlagen zu verbauen. Wasserstoffsensoren sind hierbei im Bereich

der Tunneldecke und in regelmäßigen Abständen anzubringen, um den freigesetzten Wasserstoff rasch zu detektieren. Die Verdünnung des freigesetzten Wasserstoffs durch Aktivierung der Tunnellüftung kann verhindern, dass sich eine zündfähige Wasserstoffwolke bildet. Die Kombination beider Maßnahmen lässt eine gezielte Aktivierung der Lüftung zu. Aktuell liegen keine Informationen zu Wasserstoffsensoren vor, die geeignet sind, um in einer Tunnelumgebung, mit ausreichender Lebensdauer, eingesetzt werden zu können.

Brandbekämpfungsanlagen eignen sich, um hohe thermische Lasten zu verhindern und somit thermisch ausgelöste Ereignisse zu vermeiden. Bei mechanisch verursachten Ereignissen sowie der ungezündeten Freisetzung von Wasserstoff, ist jedoch keine Wirksamkeit zu erwarten sowie mit keiner Aktivierung von Brandbekämpfungsanlagen zu rechnen.

Lokale Hitzeeinwirkung kann dazu führen, dass das TPRD nicht auslöst und somit ein unzulässig hoher Druck im Wasserstoff Tank entsteht. Aktuell werden standardgemäß thermisch aktivierte Sicherheitsventile (TPRDs) verbaut. Um die Gefahr eines lokalen Feuers zu reduzieren, können alternativ auch druck-aktivierte Ventile – PRDs verbaut werden. Diese weisen jedoch im Vergleich eine geringere Zuverlässigkeit auf.

Ist es zu einer ungezündeten Freisetzung von Wasserstoff und der Bildung einer zündfähigen Wolke gekommen, gilt es den Kontakt mit Zündquellen zu vermeiden. Dies bedingt die explosionsgeschützte Gestaltung der Installationen im Tunnel. Auf Grund der unverhältnismäßig hohen Kosten für die Umsetzung dieser Maßnahme, wurde diese wegen der aktuell geringen Anzahl an Wasserstofffahrzeugen in der Europäischen Flotte lediglich mit der Note 4 bewertet. Zudem stellen auch andere Fahrzeuge eine unter Umständen geeignete Zündquelle dar.



## 7. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Wasserstoff als Energieträger gilt speziell unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit als vielversprechende Alternative in der Energiewirtschaft und der Mobilität. Dies zeigt sich sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene in diversen Wasserstoffstrategien. Im Bereich der Mobilität gibt es bereits erste Anwendungen für Eisenbahnen wie auch für Straßenfahrzeuge. Der Anteil an der Gesamtflotte ist aktuell aber noch sehr gering. Nichts desto weniger ist es unumgänglich, frühzeitig die sicherheitsrelevanten Themen, die durch den Einsatz von Wasserstoff entstehen, näher zu untersuchen. Den chemischen und physikalischen Eigenschaften (Zündgrenzen, Verbrennungstemperatur, etc.) des Wasserstoffs, die sich deutlich von konventionellen Kraftstoffen unterscheiden, kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu.

Prinzipiell wurden bisher zwei unterschiedliche Speicherarten für H<sub>2</sub> in der Mobilität eingesetzt. Einerseits ist dies die Flüssigspeicherung, die bei Temperaturen unter -250°C erfolgt; andererseits die am weitesten verbreitete Technologie der gasförmigen Druckspeicherung (PKW: 700 bar; LKW: 350 bar).

Die Verbrennung des Wasserstoffs kann sowohl in Verbrennungskraftmaschinen (heiß) als auch in Brennstoffzellen (kalt) erfolgen. Auf Grund der jüngsten Ankündigungen des EU Parlaments, wird der Einsatz in Brennstoffzellen zukünftig forciert.

Aus den genannten Aspekten der Wasserstoff-Technologie, ergeben sich drei wesentliche Gefahren. Dies sind die thermische Gefahr (Brand eines Wasserstoff angetriebenen Fahrzeugs), die mechanische Gefahr (Explosion einer Wasserstoffwolke oder eines Tanks) sowie die elektrische Gefahr durch das bei einem FCEVs verbaute Hochvolt-Batteriesystem.

Um die Auswirkungen dieser Gefahren auf Personen und Umwelt mit speziellem Fokus auf untertägige Infrastruktur (Tunnel, Garagen, etc.) zu untersuchen, wurden bereits einige Forschungsprojekte durchgeführt. Hierbei ist jedoch zu erwähnen, dass diese sich mehrheitlich auf die Erforschung grundlegender Zusammenhänge (Brandentwicklung, Ausbreitungsverhalten, etc.) beschränkten und Realversuche im 1:1 Maßstab bisher nicht durchgeführt respektive deren Ergebnisse nicht veröffentlicht wurden. Bisher stütze man sich zumeist auf numerische Simulationen, um die auftretenden thermischen und

mechanischen Lasten zu ermitteln. Die Validierung der Ergebnisse ist auf Grund der geringen Anzahl an experimentellen Daten jedoch schwierig. Aus diesem Grund sind valide Aussagen über die Auswirkungen der Wasserstoff-Technologie auf die Tunnelsicherheit bisher zumeist qualitativ beschrieben.

Um den aktuellen Stand der Technik bezogen auf die wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge, die Tunnelinfrastruktur und die Risikoanalyse zu erfassen, wurde eine ausführliche Literatur- und Grundlagenrecherche durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass die wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge einer umfangreichen Normung und Standardisierung unterliegen, diese Standardisierung bisher jedoch weltweit nicht einheitlich erfolgte. Aktuell gibt es Bemühungen, um eine Homogenisierung der verschiedenen Regularien zu erwirken. Auf europäischer Ebene führt dies unter anderem zum Rückzug der aktuell gültigen EU Verordnung EC 79/2009. Seit 05.07.2022 wird diese durch die UN-Regelung Nr. 134 ersetzt. Die Inhalte der beiden Dokumente sind jedoch nicht deckungsgleich, sodass hierbei diverse Lücken in der Regulierung entstanden sind.

Bezogen auf die Infrastruktur und die Risikoanalyse kann gesagt werden, dass der aktuelle Stand der Technik auf Jahrzehnte langer Erfahrung mit Ereignissen konventionell betriebener Fahrzeuge basiert. Dies resultiert unter anderem darin, dass z.B. mit der aktuell verbauten Sensorik in Österreichischen Tunnelanlagen, eine Wasserstoff Freisetzung nicht detektiert werden kann. Des Weiteren sind im aktuellen Tunnelrisikomodell noch keine Unfallereignisse mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen berücksichtigt. Ob und in welchem Ausmaß eine Adaptierung der Tunnelinstallationen (Lüftungssteuerung, Ex-Schutz., etc.) sinnvoll und machbar sowie eine Adaptierung der Methodik zur Risikoanalyse (Explosionsszenarien, etc.) notwendig ist, ist aus heutiger Sicht nicht eindeutig festzulegen. Zum Thema alternativer Antriebe wurden schon erste Adaptierungen in der deutschen Tunnelrisikoanalysemethodik durchgeführt. Identifizierte zusätzliche Gefahren wurden dabei beinahe ausschließlich mit Hilfe von analytischen Modellen, welche auf Resultaten experimenteller Studien im Freiland basieren, quantifiziert. Die Rauchausbreitung wie auch die Schadstoffe von Batteriebränden wurden basierend auf Brandkurven, welche mit Realbrandversuchen in einer Tunnelumgebung bestimmt wurden [62], in einer CFD-Studie simuliert.

Ähnlich zur Adaptierung der deutschen Tunnelrisikoanalysemethodik, wurde nun, ausgehend von den Erläuterungen und Erkenntnissen aus der Literatur- und

Datenrecherche, der Defizitanalyse sowie der Berechnung der Schadenswirkung, ein Ansatz zur Bewertung von Wasserstoffunfällen in österreichischen Tunnelanlagen gefunden. Dazu wurden Ergebnisse aus Realtunnelversuchen und ausgewählten CFD Vorstudien (identifiziert in AP 2), z.B. aus dem HyTunnel-CS Projekt, genutzt um die entwickelnden CFD-Modelle zu validieren. Die Ergebnisse der CFD Simulationen, welche speziell auf österreichische Tunnelanlagen zugeschnitten sind, wurden in weiterer Folge zur Konsequenzanalyse herangezogen, um die potenziellen Auswirkungen von Unfällen mit wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen in österreichischen Tunnelanlagen zu bewerten.

Aufgrund der fehlenden Datengrundlage und des gänzlich unterschiedlichen Szenarien Ablaufs von Wasserstoffereignissen im Vergleich zu konventionellen (und BEV) Bränden, ist die Ableitung von belastbaren Ereignishäufigkeiten und damit eine vollumfängliche Integration von Wasserstoffereignissen in den TuRisMo Ereignisbaum gemäß RVS 09.11.03 zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll möglich. Um eine aussagekräftige und belastbare Analyse der Risiken von Ereignissen mit Beteiligung von Wasserstofffahrzeugen in Tunnelanlagen zu ermöglichen, wurde daher für diese Studie ein alternativer risikoanalytischer Zugang, in Form einer qualitativen Häufigkeitsbewertung, mittels Ereignis- und Fehlerbaumanalyse, in Kombination mit einer quantitativen Schadensausmaßbewertung, gewählt. Im Zuge eines Workshops wurden unter Berücksichtigung der Eintrittswahrscheinlichkeit sowie des Schadensausmaßes mögliche Ereignisszenarien mit Wasserstoff Fahrzeugen ausgewählt. Diese reichen von keinem Schadensausmaß bis hin zu fatalen Folgen bei etwaigen Explosionsszenarien. Aus dieser Betrachtung resultierten fünf Szenarien, die sich durch eine besonders ungünstige Kombination aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß als relevante Ereignisse darstellten und somit in weiterer Folge näher betrachtet wurden. Zu diesen Szenarien zählen:

- Kollision eines H<sub>2</sub> Fahrzeuges mit unmittelbarem Bersten des Tanks und Entzündung des H<sub>2</sub>.
- H<sub>2</sub> Freisetzung über eine Tank-Leckage (Kollision, Komponentenfehler) mit verzögerter Entzündung.
- Karosseriebrand eines H<sub>2</sub> Fahrzeuges mit anschließender H<sub>2</sub> Freisetzung über TPRD und verzögerter Entzündung.

- Karosseriebrand eines H<sub>2</sub> Fahrzeuges mit anschließender H<sub>2</sub> Freisetzung über TPRD und sofortiger Entzündung.
- Karosseriebrand eines H<sub>2</sub> Fahrzeuges mit Fehlfunktion des TPRD und Bersten des Tanks.

Im Zuge der Ermittlung der Schadenswirkung wurden diese Szenarien anhand der Ergebnisse aus dem EU-geförderten HyTunnel-CS Projekts sowie analytischen wie auch numerischen Simulationen näher untersucht. Es zeigt sich, dass basierend auf den fünf Ereignisszenarien drei wesentliche Gefahren bestehen:

- Wasserstoff-Freistrahbrand (Jet fire)
- Tankbruch (Tank rupture)
- Explosion einer Wasserstoffwolke (Gas Cloud Explosion)

Die Einwirkung dieser Gefahren auf Personen sowie den Tunnel können sowohl thermisch (Temperatur und Wärmestromdichte) als auch mechanisch (Druck) erfolgen und zu schweren respektive tödlichen Verletzungen führen. Aus diesem Grund macht es Sinn, Gefahrenbereiche zu definieren, welche Bereiche angeben, in denen mit leichten, schweren oder tödlichen Verletzungen zu rechnen ist.

Im Falle einer gezündeten Freisetzung von Wasserstoff (Jet-flame) definiert sich dieser Gefahrenbereich durch die thermische Einwirkung. Die Länge der Freistrahflamme sowie die einwirkende Wärmestromdichte sind hierbei die maßgebenden Parameter. Diese Parameter wurden für unterschiedliche Speicherdrücke und TPRD Durchmesser mit Hilfe analytische Berechnungen mit dem Softwarepaket HyRAM sowie den aus dem HyTunnel-CS Projekt zur Verfügung gestellten Berechnungstools ermittelt. Der Gefahrenbereich zufolge einer Wasserstoff-Freistrahflamme erstreckt sich demnach über eine Länge von ca. 2,6 – 65 m. Bei einer üblichen Kombination von Speicherdruck (700 bar) und TPRD Durchmesser (2,25 mm) liegt diese Länge bei ca. 15 m.

Bei einer massiven externen Wärmeeinwirkung oder einer starken mechanischen Einwirkung kann es zum Bruch eines Wasserstoff-Tanks kommen. Dieser geht einher mit einer zerstörerischen Druckwelle (mechanische Einwirkung), die sich entlang des Tunnels ausbreitet, und (im Falle einer Zündung) mit der Ausbildung eines Feuerballs und entsprechender thermischer Einwirkung auf Personen und Tunnel. Auf Grund der hohen

Speicherdrücke des Wasserstoffs, ist damit zu rechnen, dass die mechanische Einwirkung gegenüber der thermischen Wirkung dominiert. Die Ergebnisse aus dem HyTunnel-CS Projekt liefern detaillierte Informationen über die zu erwartenden Überdrücke in Tunnel mit unterschiedlichen Querschnitten und Längen. Demnach ergibt sich bei der Explosion eines PKW Tanks (700 bar) in einem zweisepurigen Tunnel ein Bereich von 35 m in dem mit Todesfolgen zufolge der Druckeinwirkung zu rechnen ist. Im Vergleich dazu wurden Feuerballgrößen bis zu 18 m Durchmesser ermittelt.

Die dritte und mitunter größte Gefahr geht von der Explosion einer Wasserstoffwolke aus. Dies begründet sich durch die Tatsache, dass der Ort der Freisetzung nicht zwangsläufig der Ort der Zündung sein muss und sich dadurch sehr große Gefahrenbereiche ergeben. Zudem entsteht in Abhängigkeit der involvierten Wasserstoffmasse, der lokalen Wasserstoffkonzentration sowie der Schichthöhe der Wolke ein Überdruck, der zu schweren bis tödlichen Verletzungen führen kann. Dieser baut sich im Vergleich zu jenem Überdruck bei einem Tankbruch langsamer ab, sodass mit Verletzungen über einen größeren Bereich im Tunnel zu rechnen ist.

Um die Ausbildung einer Wasserstoffwolke samt auftretender Wasserstoffkonzentrationen zu berechnen, wurden numerische Simulationen mit zwei unterschiedlichen 3D CFD Solvern durchgeführt. Diese Simulationen berücksichtigten das in Österreich implementierte Lüftungsregime und zielten darauf ab, die Länge der Wolke in der ein zündfähiges Gemisch vorliegt zu berechnen. Die Ergebnisse für die Freisetzung von Wasserstoff aus einem PKW Tank zeigen, dass eine deutliche Verbesserung mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel erreicht werden kann. Dies zeigte sich, da bei einer Strömung von 0 m/s respektive 1 m/s eine zündfähige Wolke über eine Distanz bis zu 160 m identifiziert werden konnte. Ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s erreichte die Wasserstoffkonzentration die untere Zündgrenze lediglich in unmittelbarer Umgebung zum Ort der Freisetzung.

Bei der Freisetzung von Wasserstoff aus einem Bus zeigt sich, dass bei wesentlich höherem Wasserstoffinventar mit deutlich höheren Wasserstoff Konzentrationen zu rechnen ist. Eine entsprechende CFD Simulation hat gezeigt, dass über weite Strecken und große Teile des Querschnitts ein zündfähiges Gemisch entsteht. Das Konzentrationsniveau liegt mit großer Wahrscheinlichkeit in einem Bereich, zufolge dessen auch Detonationen nicht ausgeschlossen werden können.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen und analytischen Berechnungen wurden in weiterer Folge als Eingangsdaten für eine umfangreiche Konsequenzanalyse und zur Erarbeitung von Handlungsempfehlungen verwendet. Für die Konsequenzanalyse wurden die durch physikalische Auswirkungen wie Hitze und Überdruck entstehenden Gefährdungsbereiche, bei einem Wasserstoffereignis in der Tunnelumgebung, mit Evakuierungsmodellen, wie sie in der österreichischen Tunnelrisikoanalysemethodik eingesetzt werden, kombiniert. Dadurch konnten quantitative Konsequenzen – statistisch erwartbare Todesopfer pro Ereignis – für die relevanten Wasserstoffsznarien ermittelt, und mit konventionellen Tunnelereignissen (konventionelle Brände) verglichen werden.

Der Vergleich zeigte einen signifikanten Anstieg der erwartbaren Konsequenzen für alle Wasserstoffsznarien und für alle Fahrzeugtypen. Dies rührt vor allem daher, dass sich Gefährdungsbereiche bei Wasserstoffereignissen, wie Freistrahbrand und Tankexplosion, auch entgegen der Fahrtrichtung, und somit in Bereiche mit hoher Personenbelegung, ausbreiten. Die aktuellen Sicherheitseinrichtungen, insbesondere die Tunnellüftung, sind hingegen für konventionelle Brände konzipiert, bei denen es im Regelfall sehr wohl gelingt, Personen und Gefährdungen effektiv zu trennen (etwa durch Abtrieb des Brandrauchs in Fahrtrichtung).

Die schwerwiegendsten Konsequenzen resultierten für Ereignisse mit Wasserstoffbussen. Die ist zum einen auf die große Menge an mitgeführtem Wasserstoff und zum anderen auf die große Anzahl an Personen im Fahrzeug und die damit verbundene längere Evakuierungszeit zurückzuführen. Es zeigte sich, dass insbesondere bei allen Busereignissen, aber auch bei speziellen Wasserstoffereignissen anderer Fahrzeugtypen (Freistrahbrand PKW, Tankexplosion LKW) katastrophale Auswirkungen in Form sehr hoher Opferzahlen, nicht ausgeschlossen werden können. Dies ist insofern von besonderer Bedeutung, als das Freistrahbrandszenario dem gewünschten, dem Sicherheitskonzept entsprechendem, Szenario im Fall eines Wasserstofffahrzeugbrandes entspricht und somit von der Eintrittswahrscheinlichkeit deutlich höher einzuschätzen ist, als die restlichen Wasserstoffsznarien.

Grundsätzlich ist es wichtig festzuhalten, dass die Konsequenzen der betrachteten Wasserstoffereignisse im Allgemeinen, und insbesondere der Freistrahbrandereignisse im Speziellen, einer großen Schwankungsbreite unterliegen, und sich hohe Schadensausmaße nur bei einem Zusammentreffen mehrerer konservativer Annahmen,

wie etwa niedriger Grenzwerte (Temperatur, Überdruck) bis zum Verlust der Fluchtfähigkeit, frühe TPRD Aktivierung, Vernachlässigung des Impulsabbaus und damit der Längenreduktion infolge schräger TPRD Orientierung, gleichzeitige Involvierung aller Wasserstofftanks, ergeben. Die angeführten Ergebnisse sind daher nicht als absolute Tatsachen zu verstehen, sondern zeigen vielmehr auf, dass Wasserstoffereignisse in einem Tunnel, und insbesondere auch der gewünschte Szenarienablauf – Freistrahbrand durch TPRD Auslösung – zu einem signifikanten Anstieg des Schadensausmaßes führen könnten und geeignete Maßnahmen zu ergreifen bzw. zusätzliche Forschungsbemühungen anzustreben sind.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Konsequenzanalyse bzw. der Ermittelten Schadenswirkungen von Wasserstoffereignissen in Tunnelanlagen, wurden Handlungsempfehlungen in Bezug auf die selektierten Ereignisszenarien und möglichen Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos erarbeitet. Mithilfe einer Bewertung hinsichtlich der zu erwartenden Effektivität sowie der abgeschätzten Umsetzbarkeit, wurden Maßnahmen bewertet und priorisiert. Als besonders effektiv bzw. leicht umsetzbar identifiziert und damit mit hoher Priorität als Handlungsempfehlung ausgesprochen, wurden Maßnahmen zur Identifikation des Ereignisfahrzeuges als Wasserstofffahrzeug, sowie eine möglichst rasche Einleitung und Durchführung der Personenevakuierung. Diese und weitere Maßnahmen sowie deren Priorität und Informationen zur Umsetzung, wurden außerdem in einer Maßnahmenmatrix, siehe Tabelle 40, gesammelt.

Insgesamt kann zusammengefasst werden, dass Wasserstoffereignisse in Tunnelanlagen eine spezielle und neuartige Herausforderung für Tunnelbetreiber, Einsatzkräfte und für die Gesellschaft insgesamt darstellen. Die vermutlich sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten, zumindest der Explosionsszenarien, relativieren teilweise die möglicherweise schwerwiegenden Konsequenzen. Dennoch zeigen die Ergebnisse der Studie, dass im Falle eines signifikanten Anstiegs von Wasserstofffahrzeugen in Tunnelanlagen, ein Anstieg des Personenrisikos nicht ausgeschlossen werden kann. Daher wird die frühzeitige Umsetzung geeigneter Maßnahmen sowie die Einleitung zusätzlicher Forschungsbemühungen in diesem Bereich empfohlen. Der zusätzliche Forschungsbedarf ergibt sich insbesondere aus Themen, die sich in diesem Forschungsprojekt im Laufe der Bearbeitung aufgetan, im Kontext des gegenständlichen Projekts aber nicht bearbeitet bzw. beantwortet werden konnten.

## 7.1. Weiterer Forschungsbedarf

Aktuell bestehen große Unsicherheiten bezogen auf die Eintrittswahrscheinlichkeit der als relevant identifizierten Szenarien. Dies begründet sich einerseits durch fehlende statistische Daten zu Ereignissen mit Wasserstoff-Fahrzeugen, welche erst bei höherer Marktdurchdringung zu erwarten sind. Andererseits existieren nur wenige Informationen zur Zuverlässigkeit von Fahrzeugkomponenten wie dem Thermal Pressure Relief Device. Dies inkludiert sowohl Daten zu möglichem Fehlverhalten als auch Informationen zu Szenarien, die einen unzulässigen Druck im Tank erzeugen, jedoch nicht zwangsläufig zu einer Auslösung des TPRDs führen (lokale Brandeinwirkung). Mögliche Alternativen zu den aktuell verbauten Sicherheitsventilen, welche theoretisch zu einer Verbesserung des Sicherheitsniveaus führen (z.B. Pressure Relief Device oder self-venting tank) befinden sich in der Entwicklungsphase und benötigen weitere Forschungsarbeit, um Marktreife zu erlangen. Die fehlenden, validen Daten zur Zuverlässigkeit von Komponenten können unter anderem im Zuge von experimentelle Untersuchungen / Testserien mit vertretbarem Aufwand generiert werden.

Zusätzlich besteht weiterer Forschungsbedarf bezogen auf die Ausbreitung von Wasserstoff bei unterschiedlichen Lüftungsregimen wie Querlüftung, Halb-Querlüftung oder Punktabsaugung. Wesentliche Faktoren in diesem Kontext sind die Verdünnung von Wasserstoff mit Frischluft sowie die Auftriebsströmungen auf Grund der geringen Dichte von Wasserstoff bei Umgebungsdruck.

Im Zuge von HyTRA wurde offensichtlich, dass zahlreiche Informationen zu Schadenskriterien (Druckeinwirkung sowie Einwirkung von hohen Temperaturen sowie Wärmeströmen), speziell für die menschliche Gesundheit existieren. Das vorhandene Datenmaterial weist jedoch eine Heterogenität aus, sodass die Bewertung des Schadensausmaßes einer markanten Streubreite unterliegt. Aus diesem Grund wird dringend empfohlen, die Basis der vorhandenen Daten zu prüfen, um Missverständnisse bezogen auf den Gültigkeitsbereich auszuschließen. Dies inkludiert unter anderem den Faktor Zeit, welcher essentiell für das Schadensausmaß ist, da dieses wesentlich durch die Expositionsdauer gegenüber toxischer und thermischer Einwirkung beeinflusst wird.



## 8. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „Europäische Kommission, Förderung einer klimaneutralen Wirtschaft: Kommission legt Pläne für das Energiesystem der Zukunft und sauberen Wasserstoff vor, Pressestatement,“ Brüssel, 2020.
- [2] PIARC - Technical Committee 4.4, „ WG4 report - IMPACT OF NEW PROPULSION TECHNOLOGIES ON ROAD TUNNEL OPERATIONS AND SAFETY,“ 2023.
- [3] „DWV: DWV WASSERSTOFF-SICHERHEITS-KOMPENDIUM,“ 2011. [Online]. Available: [https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/Wasserstoff\\_kompodium.pdf](https://www.dwv-info.de/wp-content/uploads/2015/06/Wasserstoff_kompodium.pdf). [Zugriff am 14 02 2022].
- [4] ResearchGate GmbH, „BOC tube trailer for transporting hydrogen,“ [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/BOC-tube-trailer-for-transporting-hydrogen\\_fig\\_329270083](https://www.researchgate.net/figure/BOC-tube-trailer-for-transporting-hydrogen_fig_329270083). [Zugriff am 14 02 2022].
- [5] „Geitmann, S.: Wasserstoff und Brennstoffzellen – Die Technik von gestern, heute und morgen. Hydrogeit Verlag, Oberkrämer, 2021“.
- [6] „Sebastian Schaal, Explosion an Wasserstoff-Tankstelle [online] <https://www.electrive.net/2019/06/11/norwegen-explosion-an-wasserstoff-tankstelle/> [Zugriff am: 14.02.2022]“.
- [7] „Michael Leitner, Wasserstoff-Tankstelle explodiert: Verkauf von Autos gestoppt [online] <https://futurezone.at/produkte/wasserstoff-tankstelle-explodiert-verkauf-von-autos-gestoppt/400521115> [Zugriff am: 14.02.2022]“.
- [8] Sébastien Bertau, Li Zhiyong, Tretsiakova-McNally Svetlan, Molkov Vladimir, Makarov Dmitriy, „European Emergency Response Guide (Final report),“ 2016.

- [9] „HyResponse - European Hydrogen Emergency Response training programme for First Responders, EU gefördertes Projekt, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), <http://www.hyresponse.eu/> [Zugriff am 10.06.2022]“.
- [1 Rattigan W., Moodie K., Molkov V., Makarov D., Cirrone D., Shentsov V., „Numerical  
0] and experimental studies on explosions, including innovative prevention and mitigation strategies; HyTunnel-CS,“ 2022.
- [1 „LaFleur C. et. al.; Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle Tunnel Safety Study, SANDIA  
1] Report, SAND2017-11157 USA, 2017“.
- [1 „LaFleur C. et. al.: Alternative Fuel Vehicles in Tunnels, SANDIA Report, SAND2020-  
2] 5466, USA, 2020“.
- [1 „Groethe, M.; et. Al.; “Large-scale Hydrogen Deflagrations and Detonations”;  
3] International Journal of Hydrogen Energy, vol. 32, no. 13, 2007“.
- [1 „Houf, G.; et. al.; “Releases from Hydrogen Fuel-cell Vehicles in Tunnels”; International  
4] Journal of Hydrogen Energy, vol. 17; 2012“.
- [1 „Kumar, S.; et.al.; HyTunnel Project to Investigate the use of Hydrogen Vehicles in  
5] Road Tunnels”; 3rd International Conference on Hydrogen Safety (ICH3); 2009“.
- [1 „Friedrich, A.; et.al; Experimental study of hydrogen air deflagrations in flat layer; 2nd  
6] ICHS International conference on hydrogen safety, San Sebastian, 2007.“.
- [1 „Royle, M.; et.al.; Vapour cloud explosions from the ignition of methane/hydrogen/air  
7] mixtures in a congested region; International Conference in Hydrogen Safety, 2007“.
- [1 „Bie, H.; Hao, Z.; Simulation Analysis on the Risk of Hydrogen Releases and  
8] Combustion in Subsea Tunnels; International Journal of Hydrogen Energy; 2016“.
- [1 Jonatan Gehandler, Anders Lönnermark, „CNG vehicle containers exposed to local  
9] fires,“ RISE Reports. Boras., 2021.

- [2 „Vylung, L.; et.al.; Fire-fighting of alternative fuel vehicles in ro-ro spaces; RISE; 0] Schweden; 2005; ISBN: 978-91-89049-21 5“.
- [2 „Getilhomme, O.; et.al.; Data for the evaluation of hydrogen risks onbiard verhciles: 1] outcomes from the French project drive; International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, 2012“.
- [2 „Hussein, H.; Brennan, S.; Molkov, V. Hydrogen Jet Fire from a Thermally Activated 2] Pressure Relief Device (TPRD) from Onboard Storage in a Naturally Ventilated Covered Car Park. Hydrogen 2021, 2, 343–361. <https://doi.org/10.3390/hydrogen2030018>“.
- [2 „Wasserstoff weltweit fast nur aus fossilen Quellen, [online], 3] <https://www.vcoe.at/publikationen/blog/detail/wasserstoff-weltweit-fast-nur-aus-fossilen-quellen> [Zugriff am 10.06.2022]“.
- [2 „Honda Motor Co., Ltd, Clarity Fuel Cell Electric Car Emergency Response Guide, 4] 10.03.2016“.
- [2 „California Environmental Protection Agency, “Draft technology assessment: medium- 5] and heavy-duty fuel cell electric vehicles,” 2015.“.
- [2 „Nikola Corporation [online] <https://nikolamotor.com/tre-bev> [Zugriff am: 09.06.2022]“.
- 6]
- [2 „Moditech, “Hyundai FC truck added,” [Online]. Available: 7] <https://www.moditech.com/news/hyundai-brings-xcient-fuel-cell-truck-to-european-truck-market/>. [Accessed 23 June 2021]“.
- [2 „Mercedes Benz GenH2 Truck [online] 8] <https://www.autoevolution.com/news/mercedes-benz-genh2-fuel-cell-truck-received-approval-for-use-on-public-roads-172646.html> [Zugriff am 09.06.2022]“.

- [2 A. Barnas, et al., „Solaris Bus & Coach S. A.“ *Customer Magazin Solaris, Solaris Bus*  
 9] & Coach S.A., 2019.
- [3 „Guide for Rescue Service3s,“ *Mercedes-Benz Buses and Coaches up to year of*  
 0] *manufacture*, 20011.
- [3 „Remzi Can Samsun, Laurent Antoni, Michael Rex, Detlef Stolten, Deployment Status  
 1] of Fuel Cells in Road Transport: 2021 Update, *Energie & Umwelt / Energy &*  
*Environment*, Band / Volume 542, ISBN 978-3-95806-556-7.“.
- [3 „Thomas Grube, Stefan Kraus, Julian Reul, Detlef Stolten, Passenger car cost  
 2] development through 2050, *Transportation Research Part D: Transport and*  
*Environment*, Volume 101, 2021, 103110, ISSN 1361-9209,  
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103110>.“.
- [3 „Die Deutsche H2-RCS-Roadmap 2025, Regelwerke, Durchführungsbestimmungen &  
 3] Normen im Bereich Wasserstoff, NOW GmbH, Berlin 2019“.
- [3 „TÜV SÜD AG, EU type approval of hydrogen-powered vehicles and their components  
 4] after repeal of Regulation (EC) 79/2009, München, 2022“.
- [3 „Hyundai Nexo Crash Test, [online]  
 5] <https://www.euroncap.com/de/results/hyundai/nexo/33731>, [Zugriff am 01.04.2020]“.
- [3 „“Hydrogen Storage Systems for Automotive Application” Integrated Project n° 502667  
 6] within the EU FP6“.
- [3 „P. Korajman, Safety concept of a H2-Fuel Cell integrated system with high pressure  
 7] storage, Master Thesis, Graz 2019“.
- [3 „HyTunnel-CS D1.3 (2019), Report on Selection and Prioritisation of Scenarios, Report  
 8] of the HyTunnel-CS project. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU),  
 Grant Agreement Number 826193.“.

- [3 „HyResponse - European Hydrogen Emergency Response training programme for  
9] First Responders, EU gefördertes Projekt, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking  
(FCH JU), <http://www.hyresponse.eu/> [Zugriff am 10.06.2022]“.
- [4 „Makarov, D., Kim, Y, Kashkarov, S, Molkov, V, Thermal Protection and Fire  
0] Resistance of High-Pressure Hydrogen Storage, Proc. of the Eighth International  
Seminar on Fire & Explosion Hazards (ISFEH8)“.
- [4 „HyTunnel-CS, Projekt aus der EU Forschungsinitiative HORIZON2020,  
1] <https://hytunnel.net/>, zuletzt aufgerufen am 12.01.2021“.
- [4 „H. Derking, L. v. d. Togt und M. Keezer, „Liquid Hydrogen Storage: Status and Future  
2] Perspectives,“ Cryoworld, Enschede (NL), 2019.“.
- [4 „J. Andersson und S. Grönkvist, „Large-scale storage of hydrogen,“ International  
3] Journal of Hydrogen Energy, pp. 11901-11919, 3 May 2019“.
- [4 „M. Höglinger, „Concept of a Hydrogen Storage System for Heavy Duty Trucks,“ IVT -  
4] TU Graz, Graz, 2020.“.
- [4 „S. Schaal, „Daimler und Linde entwickeln Tankstellen für Flüssig-Wasserstoff,“  
5] electrive.net, 12 December 2020. [Online]. Available:  
[https://www.electrive.net/2020/12/10/daimler-und-linde-entwickeln-tankstellen-fuer-  
fluessig-wasserstoff/](https://www.electrive.net/2020/12/10/daimler-und-linde-entwickeln-tankstellen-fuer-fluessig-wasserstoff/)“.
- [4 „E. Rivard, M. Trudeau und K. Zaghbi, „Hydrogen Storage for Mobility: A Review,“  
6] Materials, 19 June 2019.“.
- [4 „Technik BMW Hydrogen 7, [https://www.7-  
7\] forum.com/bild.php?bild=modelle/e65/images/hydrogen\\_7\\_grafik\\_p0031216-  
b.jpg&title=Technik%20im%20BMW%20Hydrogen%207&cpy=bmw](https://www.7-forum.com/bild.php?bild=modelle/e65/images/hydrogen_7_grafik_p0031216-b.jpg&title=Technik%20im%20BMW%20Hydrogen%207&cpy=bmw), [Zugriff am:  
03.06.2022]“.

- [4 „Klell, M.; Eichlseder, H.; Trattner, A.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Erzeugung, 8] Speicherung und Anwendung. 4. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, ISBN 978-3-658-20447-1, Graz, 2018.“.
- [4 „P. Millet, „Hydrogen storage in hydride-forming materials,“ in Advances in Hydrogen 9] Production, Storage and Distribution, Woodhead Publishing, 2014, pp. 368-409.“.
- [5 „EU, Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über 0] Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im Transeuropäischen Straßennetz, 29.4.2004“.
- [5 „STSG, Straßentunnel-Sicherheitsgesetz, BGBl. I Nr. 54/2006 (NR: GP XXII RV 1328 1] AB 1378 S. 142. BR: AB 7505 S. 733.), idgF“.
- [5 „Hydrogen Council; Vision Document 2017, [www.hydrogencouncil.com](http://www.hydrogencouncil.com)“.  
2]
- [5 „Falko Ueckerdt, Christian Bauer, Alois Dirnaichner, Jordan Everall, Romain Sacchi, 3] Gunnar Luderer: Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation. In: Nature Climate Change. Band 11, 2021, S. 384–393, doi:10.1038/s41558-021“.
- [5 „Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, 4] Explosionsschutzverordnung, Wien, 2015“.
- [5 „[https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzes nummer=20009482](https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzes 5] nummer=20009482)“, [Online].
- [5 Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, „Verordnung explosionsfähige 6] Atmosphären - VEXAT; <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzes nummer=20003475>“, 2004.

- [5] „Klell, M.; Eichlseder, H.; Trattner, A.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik, Erzeugung, 7] Speicherung und Anwendung. 4. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden, ISBN 978-3-658-20447-1, Graz, 2018.“.
- [5] „DMV WASSERSTOFF-SICHERHEIT-KOMPENDIUM, 2011, [https://www.dmv-](https://www.dmv-8] info.de/wp-content/uploads/2015/06/Wasserstoff_kompodium.pdf) [Zugriff am: 14.02.2022].“.
- [5] „World Road Association (PIARC), Technical Committee 3.3 Road Tunnel Operations, 9] Risk analysis for road tunnels, 2008“.
- [6] „Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS)/Bundesanstalt 0] für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.): Leitfaden für Sicherheitsbewertung von Straßentunneln gemäß RABT 2006, 2008“.
- [6] „Zaulauf, C., et.al., FE 03.378/2004/FRB Bewertung der Sicherheit von 1] Straßentunneln, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Heft B 66, ISBN 978-3-86509-909-9, 2009“.
- [6] „Sturm, P., et.al., BRAFA – Brandauswirkungen von Fahrzeugen mit alternativen 2] Antrieben, Graz University of Technology, 2021“.
- [6] „Kohl, B., Kammerer, H., Heger, O., Schmidt, R., Sturm, P., Fössleitner, P., Einfluss 3] von Fahrzeugen mit neuern Antriebstechnologien auf die Tunnelsicherheit – FE 15.0576/2020/ERB, Unveröffentlichter Projektbericht der ILF consulting engineers und der“.
- [6] „Willman, C., Truchot, B., New energy carriers and additional risks for users’ safety in 4] tunnels, Proceedings from the 9th international Symposium on Tunnel Safety and Security, 2020“.
- [6] „[https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzes](https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzes5] nummer=10008910) [Online].

- [6] „S. Bertau, Z. Li, S. Tretsiakova-McNally, V. Molkov und a. D. Makarov, „European  
 6] Emergency Response Guide on Hydrogen and Fuel Cell Applications: HyResponse,“  
 2016. [Online]. Available: <http://www.hyresponse.eu/>.“.
- [6] „D. Cirrone, V. Shentsov, D. Makarov und V. Molkov, “hytunnel.net,“ HyTunnel, 2021.  
 7] [Online]. Available: [https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2020/05/13-HyTunnel-CS\\_WP3\\_Cirrone\\_CFD\\_Jet\\_Fire\\_Tunnel.pdf](https://hytunnel.net/wordpress/wp-content/uploads/2020/05/13-HyTunnel-CS_WP3_Cirrone_CFD_Jet_Fire_Tunnel.pdf).“.
- [6] Lach, A; Gaathaug, A. V.; Vaagsaether, K.; Pressure peaking phenomena: Unignited  
 8] hydrogen releases in confined spaces- Large scale experiments.
- [6] U. D. o. Energy, *HyRAM Software*, 2023.  
 9]
- [7] L. Y. Zhen, „Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels,“  
 0] *Fire Safety Journal*, Nr. 110, 2019.
- [7] „V. Molkov, M. Dadashzadeh, S. Kashkarov, D. Makarov, “Performance of hydrogen  
 1] storage tank with TPRD in an engulfing fire,“ *International Journal of Hydrogen Energy*  
 46, pp. 36581-36597, 2021.“.
- [7] B. C. L., „Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires,“ in *SFPE*  
 2] *Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, NY, Springer New York, 2016,  
 pp. 2591-2663.
- [7] I. H., *Tunnel Fire Dynamics*, New York, NY: Springer New York, 2015.  
 3]
- [7] D. M.A., „Transition from momentum to buoyancy-controlled turbulent jet diffusion  
 4] flames and flame height relationships,“ *Combustion and Flame*, Nr. 3/1993, 1993.
- [7] H. Gunnar, „Turbulent jet diffusion flames: consolidation of flame height data,“  
 5] *Combustion and Flame*, Nr. 7/1999, 1999.

- [7 L. B.J., „An Overview of the Nature of Hydrocarbon Jet Fire Hazards in the Oil and Gas  
6] Industry and a Simplified Approach to Assessing the Hazards,“ *Process Safety and Environmental Protection*, Bd. 85, Nr. 3, pp. 207-220, 2007.
- [7 L. Yabing, „Numerical analysis of hydrogen release, dispersion and combustion in a  
7] tunnel with fuel cell vehicles using all-speed CFD code GASFLOW-MPI,“ *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 46, Nr. 23, pp. 12474-12486, 2021.
- [7 X. Yongliang, „Thermal and fire characteristics of hydrogen jet flames in the tunnel at  
8] longitudinal ventilation strategies,“ *Fuel*, Bd. 306, 2021.
- [7 „V. Molokov, European Hydrogen Safety Panel (EHSP), Webinar "Safety planning and  
9] management in EU hydrogen and fuel cell projects", 22 April 2022".
- [8 „D. Makarov, V. Shentsov, M. Kuznetsov and V. Molkov, "Hydrogen Tank Rupture in  
0] Fire in the Open Atmosphere: Hazard Distance Defined by Fireball", *Hydrogen* 2021,  
<https://doi.org/10.3390/hydrogen2010008>".
- [8 „Kudriakov S et al., Full-scale tunnel experiments: Blast wave and fireball evolution  
1] following hydrogen tank rupture, *International Journal of Hydrogen Energy*,  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.037>".
- [8 „V. Molkov, W. Dery, The blast wave decay for hydrogen tank rupture in a tunnel fire,  
2] *International Journal of Hydrogen Energy* 45, 2020".
- [8 „W. Rattigan, K. Moodie, HyTunnel CS Deliverable 4.3 - Final report on analytical,  
3] numerical and experimental studies on explosions, including innovative prevention and mitigation strategies, 2022".
- [8 K. M., „Hydrogen combustion in a flat semi-confined layer with respect to the  
4] Fukushima Daiichi accident,“ *Nuclear Engineering and Design*, Bd. 286, 2015.

- [8 A. i. m. f. h. d. t. d. t. p. u. s. a. i. n. p. plants, „An improved method for hydrogen  
5] deflagration to detonation transition prediction under severe accidents in nuclear power  
plants,“ *International Journal of Hydrogen Energy*, Bd. 44, Nr. 23, 2019.
- [8 „Austria Society for Research on Road, Rail and Transport, FSV, „Tunnel-  
6] Risikoanalysemodell RVS 09.03.11,“ Wien, 2015“.
- [8 „PIARC, “Fire and Smoke Control in Road Tunnels”, 1999“.  
7]
- [8 „D. A. Purser, J. L. McAllister, „Assessment of Hazard of Occupants from Smoke, Toxic  
8] Gases and Heat“, SFPE Handbook of fire Protection Engineering, 5th ed., Springer-  
Verlag, USA, 2016“.
- [8 „R. Zalosh und N. Weyandt, „Hydrogen Fuel Tank Fire Exposure Burst Test,“ SAE  
9] Paper Number 2005-01-1886, 2005“.
- [9 „G. B. R. Heskestad, “Quantification of thermal responsiveness of automatic sprinklers  
0] including conduction effects”, *Fire Safety Journal* 14, 1988“.
- [9 „W. C., „ADDITIONAL RISKS FOR USERS - CONSOLIDATED RESULTS,“ in Webinar  
1] on New Energy Carriers in - PIARC, ITA COSUF, KPT Road Tunnels, virtual, 2020.“.
- [9 „H. Hussein, S. Brennan, V. Molkov, Hydrogen Jet Fire from a Thermally Activated  
2] Pressure Relief Device (TPRD) form Onboard Storage in a Naturally Ventilated  
Covered Car Park, MDPI, 2021“.