

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE Energiemarkt- und Rohrleitungsrecht

Bericht vom 19. Dezember 2023

Transport von Wasserstoff durch Rohrleitungen

Analyse der Risiken



Datum: 19.12.2023

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE CH-3003 Bern www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

CSD INGÉNIEURS Chemin de Montelly 78, 1000 Lausanne lausanne@csd.ch

Autor/in:

Matilde Ribolzi, CSD Ingénieurs Aline Guillaume-Gentil, CSD Ingénieurs

BFE-Programmleitung: Patrick Cudré-Mauroux, patrick.cudre-mauroux@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/200429-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen; Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

CSD INGÉNIEURS SA Chemin de Montelly 78 Case postale 302 CH-1000 Lausanne 16 +41 21 620 70 00 lausanne@csd.ch www.csd.ch

4



Bundesamt für Energie BFE

Transport von Wasserstoff durch Rohrleitungen Analyse der Risiken V1.0

Schweizerische Eidgenossens Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra

> Bundesamt für Energie BFE Office fédéral de l'énergie OFEN

Lausanne, 19.12.2023 / FCH12007



Inhaltsverzeichnis

1	Ei	inlei	itung	1
	1.1	Aus	sgangslage	1
	1.2	Ziel	Isetzungen der Studie	1
2	1.	. Eta	appe: Literaturrecherche	2
	2.1	Trar	nsport von Wasserstoff in Europa	2
	2.1.	.1 I	Hauptnetz für den Transport von Wasserstoff in Europa	2
	2.1.	.2 I	Umrüstung des bestehenden Erdgasnetzes und Einspeisung von Wasserstoff	4
	2.2	Тес	chnische Einschränkungen des Netzes	5
	2.3	Risi Net	ikoentwicklung infolge der Einspeisung eines Wasserstoff-Erdgas-Gemischs in das bestehend z	e 6
3	2.	. Eta	appe: Risikoanalysen von CH_4 - H_2 -Gemischen in der Literatur	7
	3.1	Phy	ysikalische Kenngrössen von Wasserstoff und Erdgas (CH ₄)	7
	3.2	Stu	idie von K. Stolecka	8
	3.3	Stu	idie Froeling, Dröge, Nane, Van Wijk 1	0
	3.4	Gef Risi	fährliche Eigenschaften von Wasserstoff-Erdgas-Gemischen und mögliche Auswirkungen auf di iken (INERIS)	ie 3
	3.4.	.1 I	Explosion der Gaswolke	4
	3.4.	.2 I	Fackelbrand1	4
	3.5	Met	thode zur Risikoberechnung: Beispiele aus Frankreich, Belgien und den Niederlanden	4
	3.5.	.1 I	Frankreich 1	5
	3.5.	.2 [Belgien1	5
	3.5.	.3 1	Niederlande 1	7
4	3.	. Eta	appe: Modellierungen der Schäden1	8
	4.1	Trar	nsportleitungen	8
	4.1.	.1 [Modellierung der Freisetzung von CH_4 und H_2 1	9
	4.1.	2 1	Modellierung der Auswirkungen 2	0
	4.1.	.3 .5	Sofortige Zündung: Fackelbrand	1
	4.1.	.4 \	Verzögerte Zündung: Feuerball, Flash Fire oder VCE	5
	4.1.	.5 I I	Erwägungen zu den Auswirkungen der Einspeisung von Wasserstoff in das bestehend Erdgasnetz	e 8
	4.2	Ver	teilleitungen / Mikronetze	8
	4.2.	.1 I \	Leitungen mit einem maximalen Durchmesser von 10 cm und einem Druck-Durchmesser-Produ von 200 bar*cm	kt 0
	4.2.	.2 I	Leitungen mit einem maximalen Durchmesser von 12 cm und einem Druck-Durchmesser-Produ von 300 bar*cm	kt 2
5	S	chlu	ussfolgerungen: Überlegungen zu RLG, RLV und RLSV	5
6	Li	itera	aturverzeichnis3	7



7	Impressum	39
8	Disclaimer	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1	European Hydrogen Backbone, geplantes Netz bis 2040 [5]	. 3
Abbildung 2.2	Übersicht über die Anpassungskosten bei verschiedenen Wasserstoffanteilen [6]	. 5
Abbildung 2.3	Geltungsbereich der SVGW-Empfehlung H1000 [20]	. 6
Abbildung 3.1	Von K. Stolecka untersuchte Szenarien	. 8
Abbildung 3.2	Szenario 1: 100 % CH4 (D = 10 cm, p = 16 bar, L = 10 km)	. 8
Abbildung 3.3	Szenario 2: 80 % CH ₄ und 20 % H ₂ (D = 10 cm, p = 16 bar, L = 10 km)	. 9
Abbildung 3.4	Leckraten und Wärmefluss für verschiedene Szenarien	10
Abbildung 3.5 Trar	Kennwerte der modellierten Flamme für eine 16"- und eine 36"-Leitung bei 66 bar für den <code>sport</code> von H_2 oder CH_4	11
Abbildung 3.6 Win	Darstellung der Flammen für Erdgas und Wasserstoff unter Berücksichtigung einer dgeschwindigkeit von 1,5 m/s und 9 m/s	12
Abbildung 3.7 66 b	Wärmefluss bei einem Fackelbrand von Erdgas und Wasserstoff für eine 36''-Leitung, bar und Distanzd	12
Abbildung 3.8	Letalitäten bei einer Leitung mit 36' und 66 bar	13
Abbildung 3.9	Berechnetes Individualrisiko für alle Szenarien	13
Abbildung 3.10	Französische Methodik: Ereignisbaum für entzündbare Gase (GESIP [27])	15
Abbildung 3.11	Belgische Methodik: Ereignisbaum für entzündbare Gase [28]	16
Abbildung 3.12 [24]	Standard-Ereignisse bei Totalversagen oder Leck in einer Hochdruckleitung (RIVM) 17	
Abbildung 3.13	Zündwahrscheinlichkeitbei Totalversagen oder Leck (RIVM) [24]	17
Abbildung 4.1 Rah	Parameter der Modellierung «Gas release from long pipeline» und Vergleich mit dem menbericht	19
Abbildung 4.2	Vergleich der Ergebnisse von EFFECTS mit jenen im Rahmenbericht	19
Abbildung 4.3 ode	Leckrate und freigesetzte Menge bei einem Totalversagen einer Transportleitung für CH_4 rr H_2	19
Abbildung 4.4	Ereignisbaum für die Freisetzung von Gas [31]	21
Abbildung 4.5	Ereignisbaum für ein Totalversagen einer Erdgashochdruckleitung [25]	21
Abbildung 4.6 Rah wird	Zylinderförmiges Modell zur Berechnung der Auswirkungen eines Fackelbrandes im imenbericht und kegelförmiges Modell, das von der EFFECTS-Software berücksichtigt 122	
Abbildung 4.7	Flammenform für Erdgas und verschiedene Wasserstoff-Erdgas-Gemische (EFFECTS).	23
Abbildung 4.8 vers	Beziehungen zwischen Wärmestrahlungsdosis und Abstand zur Quelle für die schiedenen analysierten H2-CH4-Gemische und für das Fackelbrandszenario (EFFECTS)	24
Abbildung 4.9 (EF	Form des Feuerballs für Erdgas und verschiedene Wasserstoff-Erdgas-Gemische FECTS)	26
Abbildung 4.10 vers	Beziehungen zwischen Wärmestrahlungsdosis und Distanz zur Quelle für die schiedenen analysierten H2-CH4-Gemische und das Feuerballszenario (EFFECTS)	27
Abbildung 4.11 (500	Ergebnisse der Modellierung eines CH ₄ -Lecks (5 bar / 6 cm) und eines H ₂ -Lecks) bar / 6 cm)	29
Abbildung 4.12 und	Flammenform bei einem Fackelbrand von CH_4 (5 bar / 6 cm) und H_2 (500 bar / 6 cm) Strahlungsdosis	30
Abbildung 4.13 200	Flammenform für verschiedene Leitungen mit einem Druck-Durchmesser-Produkt von bar*cm	31



Abbildung 4.14	Wärmestrahlungsdosis für die verschiedenen modellierten Leitungen (200 bar*cm) 32
Abbildung 4.15	Flammenform für verschiedene Leitungen mit einem Druck-Durchmesser-Produkt von
300 ba	ar*cm
Abbildung 4.16	Wärmestrahlungsdosis für die verschiedenen modellierten Leitungen (300 bar*cm) 33
Abbildung 4.17	Vergleich der Flammenhöhe bei den Schwellenwerten 200 bar*cm und 300 bar*cm 34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1	Physikalische Kenngrössen von Wasserstoff und Methan (Erdgas)	. 7
Tabelle 3.2	Explosionsgrenzen und Grenzwerte für die Sauerstoffkonzentration aus Tests unter	
	atmosphärischen Bedingungen von INERIS und BAM	14
Tabelle 3.3	Belgische Methode: Zündwahrscheinlichk eit von entzündbaren Gasen [28]	16
Tabelle 4.1	Vergleich der Ergebnisse der Modellierung des Totalversagens der Hochdruckleitung	20
Tabelle 4.2	Basisparameter zur Modellierung eines Fackelbrandes mit EFFECTS	22
Tabelle 4.3	Wärmestrahlungsdosen der entsprechenden Letalitäten (Rahmenbericht [25])	24
Tabelle 4.4	Ergebnisse der Modellierung des Fackelbrandes und Vergleich mit den Daten des	
	Rahmenberichts	25
Tabelle 4.5	Basisparameter für die Modellierung eines Fackelbrandes mit EFFECTS	26
Tabelle 4.6	Ergebnisse der Feuerballmodellierung und Vergleich mit den Daten des Rahmenberichts	27
Tabelle 4.7	Basisparameter für die EFFECTS-Modellierung von Mikronetzen	29
Tabelle 4.8	Modellierter Druck und Durchmesser der Leitungen bei 200 bar*cm	30
Tabelle 4.9	Modellierter Druck und Durchmesser der Leitungen bei 300 bar*cm	32

Anhangsverzeichnis

Annexe AErgebnisse der EFFECTS-Modellierungen für CH4-H2-GemischeAnnexe BErgebnisse der EFFECTS-Modellierungen für Mikronetze für reinen Wasserstoff



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Wasserstoff ist ein stark an Bedeutung gewinnender Energieträger. Die Frage, wie er transportiert werden kann, stellt sich in der Schweiz und in Europa immer häufiger. Wasserstoff ist Teil der Schweizer Strategie zur Dekarbonisierung der Gesellschaft im Hinblick auf das Ziel von netto null Treibhausgasemissionen bis 2050. Derzeit wird dieser Energieträger in sehr geringen Mengen von einigen Industrien direkt vor Ort produziert und über sehr kurze Strecken transportiert. In Zukunft könnte allerdings ein nationales Transportnetz für in grösserem Massstab produzierten Wasserstoff, vor allem aber für den Import von Wasserstoff aus dem Ausland entstehen.

Es wird davon ausgegangen, dass Wasserstoff in der näheren Zukunft die Industrie versorgen und Kohlenwasserstoffe wie Heizöl und Erdgas nach und nach ersetzen wird. Längerfristig könnte dieser Energieträger zur wichtigsten Treibstoffoption für schwere Nutzfahrzeuge werden und später auch den Markt für leichte Fahrzeuge erobern. Die Logistik ist somit ein entscheidender Punkt, da der Wasserstoff vom Produzenten zu den Verbraucherinnen und Verbrauchern transportiert werden muss: Industriebetriebe und Tankstellen müssen per Rohrleitung oder Lastwagen beliefert werden.

Gemäss den Energieperspektiven 2050+ dürfte Wasserstoff im Jahr 2050 zwar nur rund 3 Prozent des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen.¹ Um aber nicht Gefahr zu laufen, von dem sich derzeit in Europa entwickelnden Netzwerk ausgeschlossen zu werden, muss die Schweiz gesetzgeberisch vorbereitet sein, damit der Transport von Wasserstoff durch Rohrleitungen in einem angemessenen Rechtsrahmen erfolgen kann.

Vor diesem Hintergrund hat das Bundesamt für Energie (BFE), genauer gesagt die Sektion Energiemarkt- und Rohrleitungsrecht, eine Arbeitsgruppe mit mehreren Branchenakteuren eingesetzt, die sich im Laufe des Jahres 2023 regelmässig getroffen hat und an der seit April 2023 auch die CSD Ingénieurs SA beteiligt ist.

1.2 Zielsetzungen der Studie

Die Zielsetzungen der Studie sind in dem vom BFE ausgearbeiteten Projektauftrag vom 28. Februar 2023 festgelegt. CSD Ingénieurs hatte folgende Leistungen zu erbringen:

- 1. Erstellung eines Berichts mit:
 - a) einer Situationsanalyse zu den technischen Einschränkungen und Risiken des Wasserstofftransports in Rohrleitungsanlagen und den in den EU-Ländern eingeführten Lösungen;
 - b) einer Analyse der Konformität (einschliesslich etwaiger Änderungen oder Ergänzungen) der derzeit in der Schweiz geltenden Gesetze und Verordnungen in Bezug auf den Wasserstofftransport in Rohrleitungsanlagen, insbesondere betreffend:
 - das Bundesgesetz über Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brenn- oder Treibstoffe (RLG, SR 746.1);
 - die Verordnung über Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brennoder Treibstoffe (RLV, SR 746.11);
 - die Verordnung über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen (RLSV, SR 746.12);
 - c) einer Analyse der Besonderheiten von Wasserstoff in Bezug auf Störfallrisiken gemäss der Verordnung über den Schutz vor Störfällen (StFV, SR *814.012*);
 - 2. Teilnahme an vom Auftraggeber organisierten Treffen.

¹ Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 20.4709 Candinas, 18. Dezember 2020, Wasserstoff. Auslegeordnung und Handlungsoptionen für die Schweiz, Bern, 15. November 2023



Im Laufe des Mandats rückte die Überprüfung der Störfallrisiken beim Transport von Wasserstoff gegenüber dem Transport von Erdgas stärker in den Fokus, um die Entscheidungen darüber, ab wann Rohrleitungen dem RLG und den zugehörigen Verordnungen zu unterstellen sind, zu unterstützen.

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse zusammen, die der Arbeitsgruppe während der Arbeitssitzungen in Form von PowerPoint-Präsentationen vorgestellt wurden.

2 1. Etappe: Literaturrecherche

Das Thema Wasserstoff nimmt bei der Suche nach Lösungen für die Dekarbonisierung der Energie und im Kampf gegen die Klimaerwärmung einen wichtigen Platz ein. Es gibt deshalb zahlreiche wissenschaftliche Publikationen zu diesem Thema und der Wissensstand entwickelt sich sehr rasch weiter. Folglich musste eine breite Auswahl an Artikeln getroffen werden, was unter anderem durch den Austausch mit der Arbeitsgruppe ermöglicht wurde.

Die Literaturrecherche konzentrierte sich im Wesentlichen auf drei Hauptthemen:

- 1. Transport von Wasserstoff in Europa: aktueller Stand, Perspektiven, Zustand der Infrastruktur, Netzwerkplanung usw.;
- 2. technische Einschränkungen des bestehenden Netzes im Hinblick auf die Einspeisung von Wasserstoffin das Erdgashochdrucknetz: Problemstellungen im Zusammenhang mit Rohrmaterialien, Druckverlust, Transportdruck usw.;
- 3. Risikoentwicklung infolge der Einspeisung eines Wasserstoff-Erdgas-Gemischs in das bestehende Netz.

Die nachfolgenden Kapitel enthalten eine Zusammenfassung der bibliografischen Grundlagen für jedes behandelte Thema.

2.1 Transport von Wasserstoff in Europa

2.1.1 Hauptnetz für den Transport von Wasserstoff in Europa

Die Strategie zur Entwicklung des Wasserstoff-Transportnetzes in Europa wird im Dokument *European Hydrogen Backbone, A european hydrogen infrastructure vision covering 28 countries, April 2022* [5] beschrieben. Die Initiative European Hydrogen Backbone (EHB) umfasst 31 Energie-Infrastrukturbetreiber aus 28 Ländern, die sich zum Ziel gesetzt haben, bis 2040 ein Wasserstoffnetz mit einer Länge von rund 50 000 km zu schaffen, indem teilweise bestehende Erdgasleitungen umgenutzt werden.

Das Unternehmen FluxSwiss, Minderheitsaktionär der Transitgas AG (46 %)² – der Eigentümerin der Gashochdruckleitung, die durch die Schweiz verläuft und Italien mit Deutschland und Frankreich verbindet –, ist Teil der EHB-Initiative und aktiv an der Entwicklung dieses Netzes beteiligt.

Das Netz würde aus fünf gross angelegten Versorgungskorridoren bestehen (Nordsee, nordische und baltische Regionen, Ost- und Südosteuropa, Nordafrika und Südeuropa sowie Südwesteuropa und Nordafrika) und bis 2040 so aussehen, wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Durch die Schweiz würde dann ein Wasserstoffnetz verlaufen, das die umgerüstete Transitgas-Leitung nutzen würde, über die heute Erdgas befördert wird.

² Transitgas AG, Annual Report 2022





Abbildung 2.1 European Hydrogen Backbone, geplantes Netz bis 2040 [5]

Rund um das Thema Wasserstoff entwickeln sich zahlreiche öffentliche und private Initiativen, die sich mit einer Vielzahl von Themen beschäftigen, wie zum Beispiel (ökologische und wirtschaftliche) Nachhaltigkeit der Branche, gesellschaftliche Akzeptanz von Wasserstoff als Ersatz für herkömmliche fossile Brennstoffe, Endnutzungsmöglichkeiten, Produktionsarten, Sicherheit usw.

Ein wichtiges Thema der vorliegenden Studie ist die Einspeisung von Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz und die Umrüstung dieses Netzes unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit.

2.1.2 Umrüstung des bestehenden Erdgasnetzes und Einspeisung von Wasserstoff

Zahlreiche Studien beschäftigen sich aus verschiedenen Blickwinkeln mit dem H₂-CH₄-Gemisch im bestehenden Erdgasnetz.

Aktuell ist die Einspeisung kleiner Mengen Wasserstoff in das Erdgasnetz bereits bis zu einer Grenze erlaubt, die keine Auswirkungen auf die Qualität des an die Endkundschaft gelieferten Produkts sowie auf die Transport- und Verteilinfrastruktur hat. Deutschland erlaubt bis zu 10 Prozent H₂ (DVGW), während es in Frankreich bis zu 6 Prozent sind (GRT Gaz). In der Schweiz liegt der derzeit zulässige H₂-Anteil bei 2 Prozent (Gazenergie).

Das HIGGS-Projekt (Hydrogen in Gas Grids) bietet mit der Publikation *D6.1 Review of the potential of H*² *injection in European grids* [10] einen umfassenden und aktuellen Überblick über das Potenzial der Einspeisung von Wasserstoff in das europäische Transportnetz, und zwar aus der Sicht sowohl des mittelund langfristigen Bedarfs für jedes Land als auch der technischen Einschränkungen.

Zunächst wird eine Bestandsaufnahme der technischen und baulichen Eigenschaften der Leitungen in den verschiedenen Erdgasnetzen vorgenommen, um deren internationale Kompatibilität zu überprüfen. Danach wird das Potenzial für die Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz analysiert und aus energiepolitischer Sicht definiert, welches Land H₂ exportieren und welches Land – wie die Schweiz – importieren wird.

Die Verbindungen zwischen Export- und Importland wurden durch die Simulation verschiedener Szenarien definiert, die von einer steigenden Wasserstoffnachfrage ausgehen. Zwei Punkte aus der HIGGS-Studie sind für die Schweiz von besonderem Interesse: Zum einen wäre die Schweiz im mittelfristigen Szenario 2030 nicht nur ein Importland, sondern auch Transitland, durch das der Wasserstoff für Italien aus Deutschland geleitet würde. Zum andern wird in der Studie betont, wie wichtig eine Harmonisierung bei der Einspeisung von Wasserstoff in das Netz ist, um die grenzüberschreitende Homogenität zu gewährleisten.

Ein weiteres zentrales Thema, das Gegenstand einer Vielzahl von Studien ist, betrifft den prozentualen Anteil an Wasserstoff, der in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden kann. Zahlreiche Studien belegen, dass die Beimischung von 20 Volumenprozent H₂ in das Erdgasnetz keine grösseren Anpassungen des Netzes und der Nebenanlagen erfordert [6]. Der Bericht *Hydrogen in the grid* [12] der Internationalen Energieagentur (IEA) vermittelt einen Überblick über die Grenzen des Wasserstoffvolumens, das in die verschiedenen nationalen Netze eingespeist werden soll.

In Bezug auf die Verteilnetze zeigen auch andere Studien, dass für bis zu 20 Prozent H₂ keine Anpassung der Infrastruktur erforderlich ist [6], [9]. Der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) kommt in seinem Bericht *Hydrogen Research Project 2022* zum Schluss, dass das deutsche Verteilnetz aktuell rein technisch betrachtet mit 10 Prozent H₂ betrieben werden kann; in Zukunft könnten bis zu 20 Prozent H₂ in das bestehende Netz eingespeist werden, um den prognostizierten Anstieg der Nachfrage im Land zu decken [13]. In der Schweiz wurde in einer Studie des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches (SVGW) [14] getestet und nachgewiesen, dass in einem Verteilnetz bis zu 20 Volumenprozent Wasserstoff eingespeist werden können. Für das Niederdrucknetz (P < 5 bar) wird der Grenzwert von 20 Prozent auch in der vom SVGW herausgegebenen Richtlinie G18 *Gasbeschaffenheit* aufgeführt.

In diesem Zusammenhang ist auch das Netzwerk HIPS-NET zu erwähnen, das aus 40 europäischen Partnem besteht und die Etablierung eines europaweit einheitlichen Verständnisses zur Konzentration von H_2 im Erdgasnetz und zur Wasserstofftoleranz der bestehenden Infrastruktur zum Ziel hat.

Die nachfolgende Abbildung, die aus [6] übernommen wurde, zeigt die Kosten für die Anpassung des Netzes bezogen auf verschiedene Anteile eingespeisten Wasserstoffs. Bei bis zu 20 Prozent eingespeistem Wasserstoff sind die Investitionen zur Anpassung des Netzes nicht sehr hoch und betreffen vor allem die Endnutzerinnen und -nutzer, die Verteilung und die Speicherung. Die Kosten für die Anpassung des Transportnetzes werden ab einem Wasserstoffanteil von etwa 20 Prozent erheblich.

Abbildung 2.2

Übersicht über die Anpassungskosten bei verschiedenen Wasserstoffanteilen [6]

2.2 Technische Einschränkungen des Netzes

Es gibt sehr viele Studien zu den technischen Einschränkungen im Zusammenhang mit der Einspeisung von Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz.

Die Versprödung von Stahl durch Wasserstoff wurde umfassend untersucht [15], [16], [17]. Das Wasserstoffatom ist klein und kann vom Stahl absorbiert werden, wodurch das Material leichter rissig und spröde wird und die Rohre korrodieren. Aktuell gibt es zwei mögliche Erklärungen für die Versprödung von Stahl durch Wasserstoff: zum einen die Wechselwirkung der Innenfläche der Leitung mit kondensierter Feuchtigkeit und zum andern die Hydrierung durch den in der Leitung transportierten gasförmigen Wasserstoff.

Eine weitere technische Einschränkung ist der Druckverlust des Gasflusses in der Leitung aufgrund der Einspeisung von Wasserstoff, dessen Molekül (H₂) deutlich kleiner und leichter ist als das von Erdgas (CH₄). Diese Problematik wirkt sich auf die Energieeffizienz des Transports aus, da die Fliessgeschwindigkeit durch den Wasserstoff erheblich verlangsamt wird [18], [19], [18].

Auch andere Themen wurden eingehend untersucht, beispielsweise die Kompatibilität von Materialien und Nebenanlagen (Pumpen, Kompressoren, Druckminderer, Zähler usw.), die Möglichkeit, Wasserstoff am Ende des Netzes vom Erdgas zu trennen, um den Wünschen der Endverbraucherinnen und Endverbraucher nachzukommen, die Beurteilung der Toleranz der nachgelagerten Anlagen gegenüber einem variablen Wasserstoffanteil, die Fähigkeit der Hersteller, neue Anlagen zu angemessenen Kosten zu entwickeln, usw.

In Übereinstimmung mit der Arbeitsgruppe und insbesondere nach dem Austausch mit den technischen Expertinnen und Experten der Branche (SVGW, Verein der H2-Produzenten) wird davon ausgegangen, dass die technischen Einschränkungen bekannt sind und die Branche diese teilweise in den Griff bekommen hat. Diese Einschränkungen sind zum Teil in die technischen Normen und Richtlinien eingeflossen, die aktuelle und zukünftige Niederdrucknetze (< 5 bar) regeln (zur Unterscheidung zwischen Nieder- und Hochdrucknetzen siehe Abschnitt 4.2). Die genannten Einschränkungen wurden in einer bilateralen Telefonsitzung mit dem SVGW diskutiert (23.6.2023). Das folgende Dokument ist eine wichtige Empfehlung für den Schweizer Wasserstoffsektor zur Regelung der technischen Aspekte von Anlagen für den Transport von Wasserstoff unter Niederdruck:

- SVGW, Regelwerk H1000, Empfehlung zu Planung, Bau und Betrieb von Rohrleitungsanlagen für den Transport von Wasserstoff, 2023.

Diese Empfehlung basiert auf nationalen, europäischen und internationalen Rechtsvorschriften und dient als Grundlage für die Festlegung von Leitlinien für die Planung, den Bau und den Betrieb von Niederdruck-Rohrleitungsanlagen für den Transport von Wasserstoff. Ihr Geltungsbereich ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 2.3 Geltungsbereich der SVGW-Empfehlung H1000[20]

Das Dokument bietet einen Überblick über die Richtlinien und Normen, die heute in anderen Ländern und insbesondere in Europa (EN-Normen) existieren, und fasst den aktuellen Wissensstand in diesem Bereich zusammen. Die Empfehlung könnte zum Teil auch für neue Leitungen gelten, die reinen Wasserstoff unter Niederdruck transportieren. Parallel zu den Arbeiten in der Europäischen Union werden derzeit weitere Richtlinien erarbeitet. Die zukünftigen Richtlinien und Normen, die in der Schweiz für den Transport von reinem Wasserstoff in Niederdrucknetzen gelten, werden auf jeden Fall vom BFE festgelegt.

Für die Erstellung einer angepassten Richtlinie für Hochdrucknetze (> 5 bar) für den Transport von Wasserstoff ist das Eidgenössische Rohrleitungsinspektorat (ERI) zuständig.

Abgesehen von der Empfehlung des SVGW für Niederdrucknetze, über die reiner Wasserstoff transportiert wird, gibt es in der Schweiz also noch keine technischen Vorschriften, die sich speziell mit dem Transport von Wasserstoff befassen. Allerdings werden für 2024 ERI-Richtlinien und neue SVGW-Richtlinien erwartet. Solange solche Richtlinien fehlen, scheint eine Änderung der Kriterien für die Unterstellung von Wasserstoffrohrleitungen unter die RLSV riskant, da dies zu einer ausschliesslichen Anwendung der Regeln der Technik (und nicht der gesamten RLSV) führen würde, obwohl diese Regeln für den Transport von reinem Wasserstoff nur sehr bedingt geeignet sind. Diese Ansicht wird sowohl vom SVGW als auch vom ERI geteilt.

Im Übrigen dienen die in diesem Kapitel kurz beschriebenen technischen Einschränkungen als Grundlage für die Definition der Wahrscheinlichkeit eines Versagens einer H₂-Leitung in den verschiedenen Risikoanalysemethoden, die bereits bestehen oder noch definiert werden müssen.

2.3 Risikoentwicklung infolge der Einspeisung eines Wasserstoff-Erdgas-Gemischs in das bestehende Netz

Sehr viele Artikel beschäftigen sich mit den technischen Möglichkeiten, den Kosten für die Anpassung des bestehenden Netzes, der Kompatibilität für die Endverbraucherinnen und Endverbraucher usw. Die Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz bringt aber auch grosse Herausforderungen im Hinblick auf die Unfallrisiken mit sich.

Dieses Thema wird in zahlreichen Artikeln in der Literatur behandelt; allerdings nicht abschliessend, da einige Aspekte auch heute noch untersucht werden.

Im Rahmen dieser Analyse wurden die Auswirkungen der Einspeisung von unterschiedlichen Anteilen von Wasserstoff in das Erdgasnetz ausgehend von den in den europäischen Ländern entwickelten Methoden erfasst. Diesem Thema ist angesichts seiner Bedeutung in dieser Studie ein eigenes Kapitel 3 gewidmet.

3 2. Etappe: Risikoanalysen von CH₄-H₂-Gemischen in der Literatur

In diesem Kapitel werden einige bereits durchgeführte Schadens- und Risikoanalysen zur Einspeisung eines Erdgas-Wasserstoff-Gemischs in bestehende Transportleitungen vorgestellt. Das Ziel besteht darin, die verschiedenen derzeit verwendeten Methoden, mit denen das Ausmass der Auswirkungen eines Unfalls mit einem solchen Gemisch mit unterschiedlichem Wasserstoffanteil ermittelt wird, miteinander zu vergleichen.

3.1 Physikalische Kenngrössen von Wasserstoff und Erdgas (CH₄)

Zunächst ist es wichtig, die unterschiedlichen Eigenschaften und vor allem die physikalischen Kenngrössen der beiden Gase zu verstehen. Diese sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt, die aus dem H1000-Standard übernommen wurde.

Kenngrösse	Einheit	Wasserstoff	Methan					
Chemische Summenformel		H ₂	CH ₄					
Molare Masse	kg/kmol	2.0159	16.043					
Dichte ¹	kg/m³	0.08989	0.7175					
Relative Dichte ¹	-	0.0695	0.555					
Siedepunkt	°C	-252	-161					
Schmelzpunkt	°C	-259	-183					
Brennwert ² , H _{S,n}	MJ/m ³	12.745	39.831					
	kWh/m³	3.540	11.064					
	kWh/kg	39.41	15.42					
Heizwert ² , H _{I,n}	MJ/m ³	10.782	35.894					
	kWh/m ³	2.995	9.971					
	kWh/kg	33.33	13.90					
Oberer Wobbe-Index ² , W _{S,n}	MJ/m ³	48.336	53.369					
	kWh/m³	13.427	14.853					
Unterer Wobbe-Index ² , W _{I,n}	MJ/m ³	40.892	48.184					
	kWh/m ³	11.359	13.384					
Dynamische Viskosität (20°C)	kg/ms	8.8*10 ⁻⁶	11.0*10 ⁻⁶					
Kinematische Viskosität ²	m²/s	106*10 ⁻⁶	16.7*10 ⁻⁶					
Zündtemperatur in Luft	°C	530	645					
Mindestzündenergie (MZE)	mJ	0.02	0.29					
Untere Explosionsgrenze (UEG) in Luft ³	vol-%	4.0	4.4					
Obere Explosionsgrenze (OEG) in Luft ³	vol-%	77.0	16.5					
Max. Flammgeschwindigkeit (laminar, Luft)	cm/s	346	43					
Sauerstoffgrenzkonzentration (SGK)	vol-%	4.3	9.9					
Maximaler Explosionsdruck	bar	8.3	8.1					
Normierter zeitlicher Druckanstieg, Kg-Wert	bar/ms	800	52					
Gerätegruppe	-	IIC	IIA					
¹ : im Normzustand (bei 0°C, p=1.01325 bar) ² : Referenzbedingungen im Normzustand 25°C / 0°C bei p=1.01325 bar ³ : bei 20°C, p=1.01325 bar								
Daten aus [1, 2], ISO/TR 15916:2015-12, HYPOS	S-Leitfaden Wa	sserstoff-Sicherh	eit					

 Tabelle 3.1
 Physikalische Kenngrössen von Wasserstoff und Methan (Erdgas)

H₂ ist die molekulare Form von Wasserstoff. Unter normalen Temperatur- und Druckbedingungen existiert molekularer Wasserstoff in gasförmigem Zustand als geruch- und farbloses Gas.

Molekularer Wasserstoff hat eine molare Masse und eine Dichte, die etwa achtmal kleiner sind als jene von Erdgas. Wasserstoff ist ein entzündliches Gas, das aufgrund seines besonders grossen Explosionsbereichs eine hohe Reaktionsfähigkeit aufweist. Die untere Explosionsgrenze (UEG in Tabelle 3.1) liegt bei 4 Volumenprozent H₂ in der Luft und die obere Explosionsgrenze (OEG) bei 77 Prozent. Erdgas hat demgegenüber einen Explosionsbereich von 4,4 bis 16,5 Volumenprozent CH₄ in der Luft.

3.2 Studie von K. Stolecka

In seiner Studie *Hazards of hydrogen transport in the existing natural gas pipeline network* [21] untersucht K. Stolecka die Auswirkungen eines Fackelbrandes für drei verschiedene Szenarien: 100 Prozent CH₄, 80 Prozent CH₄ und 20 Prozent H₂ sowie 50 Prozent CH₄ und 50 Prozent H₂.

Der Fackelbrand wird hier als das wahrscheinlichste Szenario betrachtet, insbesondere aufgrund der hohen Zündwahrscheinlichkeit von Wasserstoff. Die Mindestzündenergie von H₂ ist etwa 14-mal geringer als die von CH₄ (0,02 mJ bzw. 0,29 mJ). Ein Wasserstoffleck kann sich also durch die Reibung des Gases mit dem Metall der Leitung oder durch statische Elektrizität leicht entzünden.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Gas composition:			
methane, %	100	80	50
hydrogen, %	_	20	50
Initial parameters:			
pressure, bar	16/70	16/70	16/70
temperature, °C	15	15	15
Atmospheric conditions:			
wind speed, m/s	1.5	1.5	1.5
air temperature, ℃	20	20	20
humidity, %	88	88	88

Die untersuchten Szenarien sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Abbildung 3.1 Von K. Stolecka untersuchte Szenarien

Die Modellierungen des Fackelbrandes wurden mit dem Programm PHAST v6.7 durchgeführt und beruhen auf dem Chamberlain-Modell.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Letalitätsradien für die Szenarien 1 und 2. Grün entspricht dem Grenzwert von 4 kW/m² (Wärmefluss), der erste Verletzungen bei exponierten Personen erzeugt, blau dem Grenzwert von 12,5 kW/m² für eine Letalität von 1 Prozent nach einer Exposition von 1 Minute und rot dem Grenzwert von 37,5 kW/m² für eine Letalität von 1 Prozent nach einer Exposition von 10 Sekunden.

Szenario 1 (100 % CH₄): Letalitätsradien bei einem Totalversagen einer 10 km langen Leitung mit einem Durchmesser von 10 cm und einem Druck von 16 bar.

Abbildung 3.2 Szenario 1: 100 % CH4 (D =10 cm, p = 16 bar, L = 10 km)

Szenario 2 (80 % CH₄ und 20 % H₂): Letalitätsradien bei einem Totalversagen einer 10 km langen Leitung mit einem Durchmesser von 10 cm und einem Druck von 16 bar.

Abbildung 3.3 Szenario 2: 80 % CH_4 und 20 % H_2 (D = 10 cm, p = 16 bar, L = 10 km)

Die Ergebnisse für die Szenarien 1 und 2 zeigen, dass die Radien bei einer Beimischung von 20 Prozent Wasserstoff zum Erdgas kleiner werden.

Die Personenschäden hängen von der Art des Versagens (kleines Leck oder Totalversagen) und damit vom freigesetzten Volumen ab, wie die nachfolgenden Abbildungen zeigen.

(d = 15 cm, p = 70 bar, L = 20 km)

(d = 15 cm, p = 70 bar, L = 20 km)

Abbildung 3.4 Leckraten und Wärmefluss für verschiedene Szenarien

Das Ausmass des Schadens (Wärmefluss) verhält sich direkt proportional zur Leckrate. Die Beimischung von Wasserstoffführt zu einer Verringerung der Leckrate und damit zu einer Verkleinerung des Perimeters, in dem Auswirkungen spürbar sind.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Einspeisung von Wasserstoff in das Erdgasnetz dazu beiträgt, das Ausmass der Schäden aufgrund eines Gaslecks in einer Hochdruckleitung, das zu einem Fackelbrand führt, zu verringern. Die Auswirkungen vermindern sich mit steigendem Wasserstoffanteil im Gemisch; dies gilt für ein Verhältnis von 80 Prozent CH₄ und 20 Prozent H₂ sowie von 50 Prozent CH₄ und 50 Prozent H₂.

3.3 Studie Froeling, Dröge, Nane, Van Wijk

Die Studie Quantitative risk analysis of a hazardous jet fire event for hydrogen transport in natural gas transmission pipelines [22] untersucht die Auswirkungen eines Totalversagens einer Hochdruckleitung unter der Annahme, dass dies das einzige relevante Szenario aus Sicht der Grossrisiken ist. Die Studie stellt die Ergebnisse für einen Transport von 100 Prozent Erdgas und 100 Prozent Wasserstoff vor.

Nach dem spontanen Versagen einer erdverlegten Hochdruckleitung bildet sich bei verzögert er Zündung eine Gaswolke, die einen Feuerball erzeugt. Darauf folgt ein Fackelbrand, der mit abnehmender Leckrate aufgrund der Druckentlastung der Leitung immer kleiner wird.

In Übereinstimmung mit der niederländischen Verordnung über die externe Sicherheit von Pipelines (Besluit Externe Veiligheid Buisleidingen, Bevb) werden von den Autorinnen und Autoren nur die Folgen des Fackelbrandes untersucht. Nicht analysiert werden zudem die Auswirkungen von Überdruck, da im vorliegenden Fall nur die Auswirkungen in Verbindung mit der Wärmestrahlung als relevant betrachtet werden.

Die Ursachen für ein Rohrversagen wurden aus den Daten der European Gas Pipeline Incident Data Group (EGIG) übernommen.³ Die Autorinnen und Autoren gehen nämlich davon aus, dass die meisten Ursachen für ein Rohrversagen unabhängig von der Substanz sind, die im Inneren der Leitung transportiert wird.

³ Die gleichen Werte werden im Rahmenbericht der schweizerischen Erdgaswirtschaft zur Berechnung der Versagensrate von Erdgasleitungen verwendet [25].

Die Problematik der durch H₂ verursachten Versprödung von Stahl wurde im Rahmen des NaturalHy-Projekts (www.gerg.eu) umfassend untersucht. Die einzige beobachtete Form der Versprödung ist die Zunahme von Rissen im Stahl, die aber durch eine Regulierung der Druckschwankungen im Inneren der Rohrleitung kontrolliert werden kann. Da die Problematik der zunehmenden Rissbildung bekannt ist und Druckschwankungen in den Leitungen in der Regel selten und geringfügig sind, wird in der Studie davon ausgegangen, dass die Einspeisung von H₂ in bestehende Leitungen nicht als zusätzliche Ursache für ein Versagen zu betrachten ist. Der Fehlerbaum für Gasleitungen und die damit verbundenen Eintrittswahrscheinlichkeiten gelten somit auch für den Transport von H₂.

Angesichts der sehr geringen Zündenergie von Wasserstoff und in Übereinstimmung mit dem niederländischen National Institute for Public Health and the Environment (RIVM) [24] wird eine Zündwahrscheinlichkeit von 100 Prozent angenommen.

Die Modellierungen werden mit dem Programm SAFETI-NL v8.21 durchgeführt und zur Berechnung des Wärmeflusses wird das Chamberlain-Modell verwendet. Die Ergebnisse der Modellierungen sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Table 2 – The flame characteristics calculated with SAFETI-NL v8.21, specified for hydrogen and natural gas (H_2/NG), released from a 16'' and 36'' pipeline with an initial pressure of 66 bar. Also, the flame characteristics are influenced by the wind forces and, therefore, specified for four additional scenarios where the wind velocity is defined in m/s. Based on the flame characteristics, the flame surface area (using the flame length and the two widths of the truncated cone) and the surface emissive power of the flame (using Eq. (6)) are calculated.

Scenario		1	ω	h	θ	S	Qs
16"	1.5 m/s	163.2 / 238.6	37.5 / 70.5	34.2 / 40.7	4.0 / 8.0	22.3 / 61.8	272 / 235
	3 m/s	140.3 / 208.8	34.9 / 66.4	24.9 / 25.2	8.1 / 15.9	18.1 / 51.6	336 / 281
	5 m/s	125.7 / 188.7	33.3 / 60.3	18.1 / 15.2	13.5 / 25.3	15.6 / 42.8	388 / 339
	9 m/s	118.5 / 176.6	32.2 / 50.7	11.6 / 7.3	24.5 / 35.2	14.5 / 34.2	419 / 424
36"	1.5 m/s	327.9 / 472.2	69.7 / 126.5	76.0 / 99.8	2.1 / 4.1	82.9 / 216.5	351 / 363
	3 m/s	277.9 / 405.5	63.0 / 118.3	59.8 / 73.1	4.0 / 8.3	63.8 / 175.7	456 / 447
	5 m/s	245.5 / 363.0	59.1 / 112.7	48.0 / 53.5	7.0 / 13.8	53.1 / 151.3	547 / 520
	9 m/s	228.0 / 342.1	58.3 / 109.3	37.1 / 35.1	12.6 / 24.8	49.2 / 139.8	590 / 562

where: l—flame length in m, \overline{w} —average width of the flame in m, h—flame lift-off in m, θ — flame angle (with respect to the vertical) in degrees, S—flame surface area in 10³ m², Q_s—surface emissive power of the flame in kW/m.²

Abbildung 3.5 Kennwerte der modellierten Flamme für eine 16"- und eine 36"-Leitung bei 66 bar für den Transport von H₂ oder CH₄

Die Flamme eines Erdgas-Fackelbrandes ist immer länger als die Flamme von Wasserstoff, und dies unter Berücksichtigung verschiedener Windgeschwindigkeiten. Ebenso ist die Oberfläche der Flamme bei Erdgas erheblich grösser als bei Wasserstoff. Diese Daten werden in der nachfolgenden Abbildung grafisch dargestellt.

Abbildung 3.6 Darstellung der Flammen für Erdgas und Wasserstoff unter Berücksichtigung einer Windgeschwindigkeit von 1,5 m/s und 9 m/s

Bei relativer Windstille oder einer Windgeschwindigkeit von 9 m/s ist gemäss diesen Modellierungen der Fackelbrand bei einem Wasserstoffleck weniger ausgedehnt und die Neigung ist weniger stark als bei Erdgas.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Wärmeflusses bei zunehmendem Abstand vom Ausgangspunkt der Flamme.

Der Wärmefluss bei Wasserstoff-Flammen ist bei beiden berücksichtigten Windgeschwindigkeiten geringer als derjenige bei einer Erdgas-Flamme.

Die Letalitäten sehen somit wie folgt aus:

Abbildung 3.8 Letalitäten bei einer Leitung mit 36" und 66 bar

INGÉNIEUX PAR NATURE

CSDINGENIEUR

Die Freisetzung von H₂ ist mit geringeren Letalitäten verbunden als die Freisetzung von CH₄, und die Letalität nimmt schneller ab, je weiter man sich vom Leck entfernt.

Im nachfolgenden Schema wird das Individualrisiko dargestellt.

Abbildung 3.9 Berechnetes Individualrisiko für alle Szenarien

Das Individualrisiko (Versagensrate * Zündwahrscheinlichkeit * Letalität für alle Szenarien) entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass eine Person, die sich dauerhaft in der Nähe der Leitung befindet, stirbt.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Freisetzung von H₂ bei einem Fackelbrand mit geringeren Letalitäten verbunden ist als die Freisetzung von CH₄. Das Individualrisiko in der Nähe der Leitung ist jedoch bei einer 16"-Leitung, die H₂ transportiert, höher als bei einer solchen Leitung, die CH₄ transportiert. Dies ist auf die höhere Zündwahrscheinlichkeit von H₂ zurückzuführen (100 % vs. 20 % für CH₄ bei einer 16"-Leitung). Die Letalität von H₂ nimmt allerdings mit zunehmender Distanz von der Leitung rasch ab, während das Individualrisiko eines CH₄-Lecks (16") ab einer bestimmten Distanz ansteigt.

3.4 Gefährliche Eigenschaften von Wasserstoff-Erdgas-Gemischen und mögliche Auswirkungen auf die Risiken (INERIS)

Im Jahr 2019 veröffentlichte das französische nationale Institut für Industrie- und Umweltrisiken (INERIS) das Dokument *Enjeux de sécurité liés à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de transport et distribution de gaz naturel: état des lieux et perspectives* [26].

In Kapitel 6 der Studie *Propriétés dangereuses des mélanges hydrogène / gaz naturel et impacts potentiels sur les risques* wird die Grenze für eingespeisten Wasserstoff, ab der das Gemisch bezüglich der Risiken nicht mehr als Erdgas betrachtet wird, detailliert analysiert.

Laut INERIS sind bei der Entzündung eines Erdgaslecks oder eines Wasserstoff-Erdgas-Gemischs zwei gefährliche Phänomene zu erwarten: Explosion der Gaswolke und Fackelbrand.

3.4.1 Explosion der Gaswolke

Die Beimischung von Wasserstoff hat einen Einfluss auf die Entzündbarkeit und Explosivität von Erdgas. Dieser Einfluss ist im Hinblick auf die untere Explosionsgrenze, den maximalen Explosionsdruck und die Selbstentzündungstemperatur vernachlässigbar. Die obere Explosionsgrenze und die maximale Druckanstiegsgeschwindigkeit steigen jedoch mit dem Wasserstoffgehalt an. Die nachfolgende Tabelle zeigt die experimentellen Ergebnisse, die von INERIS und der deutschen Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung (BAM) erzielt wurden.

Teneur d'hydrogène dans le méthane	LIE	I SE	CL O
(%vol)	%vol	%vol	%vol
Décult	ate ovnórimo	ntaux INEDIS (6)	/000
Result	ats experime		
0	4,8	17,2	10,0
4	4,8	18,0	9,5
8	5,0	19,0	9,4
12	5,0	19,4	9,1
16	4,8	20,2	9,0
20	4,6	21,0	8,8
Résult	tats expérime	ntaux BAM [12]	
0	4,2	16,6	10,1
5	4,2	17,4	9,8
10	4,2	18,2	9,6
25	4,2	21,2	9,1
50	4,0	29,0	7,9
100	4,1	75,6	4,3

Tabelle 3.2 Explosionsgrenzen und Grenzwerte für die Sauerstoffkonzentration aus Tests unter atmosphärischen Bedingungen von INERIS und BAM

Im Allgemeinen hängt der durch eine Explosion verursachte Überdruck mit der Geschwindigkeit zusammen, mit der sich die Flamme im entzündbaren Gemisch ausbreitet. Die Beimischung von Wasserstoff wirkt sich auf die Geschwindigkeit der Flammenausbreitung aus; mit steigenden H₂-Konzentrationen nimmt sie zu.

Die von INERIS durchgeführten Evaluationen zeigen allerdings, dass im Zusammenhang mit Transportleitungen die Einspeisung von bis zu 20 Prozent Wasserstoff nur zu einer begrenzten Zunahme der Auswirkungen führen würde.

Gemäss der ATEX-Richtlinie ist die Klassifizierung entsprechend der Norm ISO/IEC 80079-20-1:2017 für ein Gemisch, das bis maximal 25 Volumenprozent Wasserstoff enthält, gleich wie für reines Erdgas.

3.4.2 Fackelbrand

Ein Fackelbrand hängt im Wesentlichen vom Druck, von der Temperatur und von der Beschaffenheit des Produkts im Inneren der Leitung sowie von der Grösse des Lecks ab.

Aufgrund der geringen Dichte von Wasserstoff führt sein Anteil im Gemisch dazu, dass der Freisetzungsmassenstrom begrenzt und die Druckentlastung der Leitung beschleunigt wird. Dadurch hat die Flamme ein geringeres Ausmass, und die Wärmestrahlung, die ein Objekt erreicht, wird reduziert.

Nach den von INERIS durchgeführten Modellierungen vermindern sich die mit einem Fackelbrand verbundenen Auswirkungen, wenn das CH₄-H₂-Gemisch einen Wasserstoffanteil von bis zu 80 Prozent aufweist.

3.5 Methode zur Risikoberechnung: Beispiele aus Frankreich, Belgien und den Niederlanden

Mehrere europäische Länder haben eine Methode zur Risikoberechnung festgelegt, die die Problematik des leitungsgebundenen Transports von Wasserstoff einbezieht.

3.5.1 Frankreich

Im französischen Leitfaden *Guide méthodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport* [27] wird ein gemeinsamer Ereignisbaum für alle entzündbaren Gase definiert:

Abbildung 3.10 Französische Methodik: Ereignisbaum für entzündbare Gase (GESIP [27])

Trotz der Besonderheiten der transportierten Produkte weisen Rohrleitungen viele Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Planungsregeln, der Baumethoden und der Betriebsweisen auf. Diese Tatsache rechtfertigt gemäss dem Leitfaden die Anwendung derselben Methode zur Gefahrenbeurteilung, sodass sichergestellt werden kann, dass die Anlagen ein kontrolliertes Risikoniveau aufweisen.

Das für eine Wasserstoffleitung angenommene Unfallszenario ist eine vertikale Freisetzung infolge eines Verlusts des Einschlusses in der Mitte einer 30 km langen Rohrleitung (Totalversagen).

Gemäss Leitfaden ist die Möglichkeit einer Unconfined Vapour Cloud Explosion (UVCE) von Fall zu Fall je nach den Eigenschaften des Gases zu bestimmen.

Nach der im Dokument dargestellten Schadensskala sind die schwersten Auswirkungen bei H₂ auf einen Überdruck zurückzuführen, während bei CH₄ die Wärmestrahlung die grössten Auswirkungen verursacht. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die Grenzwerte für die Auswirkungen von Überdruck, die im französischen Leitfaden betrachtet werden, strenger sind als diejenigen im Rahmenbericht der schweizerischen Erdgaswirtschaft (50 mbar bzw. 400 mbar).

In Bezug auf die Zündwahrscheinlichkeit geht der Leitfaden von 59 Prozent für ein weniger als 12 mm grosses Leck und 100 Prozent für ein grösseres Leck aus.

INERIS [26] befasst sich auch mit der Zündwahrscheinlichkeit eines Wasserstoff-Erdgas-Gemischs und stützt sich bei seinen Überlegungen auf Erfahrungsberichte. Die Zündwahrscheinlichkeit von Erdgas beträgt je nach Durchmesser der Leitung 10 Prozent oder 33 Prozent. Für Wasserstoff wird eine Wahrscheinlichkeit von 100 Prozent angenommen: ein Wert, der in den meisten bis anhin durchgeführten Studien berücksichtigt wurde. Bei Gemischen mit weniger als 20 Prozent Wasserstoff bleiben die Werte für die Mindestzündenergie in der Nähe der Werte für Erdgas. **INERIS geht somit davon aus, dass bei einem Gemisch mit einem Anteil von bis zu 20 Prozent Wasserstoff die Wahrscheinlichkeit einer Zündung genauso hoch ist wie bei Erdgas.**

3.5.2 Belgien

In Belgien wird im technischen Regelwerk *Code technique relatif à l'analyse de risque pour les installations de transport de produits inflammables et oxydants* [28] ebenfalls ein gemeinsamer Ereignisbaum für alle als entzündbar eingestuften Gase vorgeschlagen.

*: la rupture d'une conduite s'accompagne d'une explosion physique et d'effets de surpression.

Abbildung 3.11 Belgische Methodik: Ereignisbaum für entzündbare Gase [28]

Ähnlich wie die französische Methode berücksichtigt der belgische Ansatz die Auswirkungen sowohl der Wärmestrahlung (Fackelbrand und Flash Fire) als auch eines Überdrucks bei einer Explosion (Vapour Cloud Explosion, VCE).

Die Zündwahrscheinlichkeiten, die bestimmen, wie häufig ein Szenario eintritt und somit Auswirkungen zu erwarten sind, sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Terme source			Probabilité					
Continu	ntinu Instantané	né Grou	p <mark>e</mark> O	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3		
[kg/s]	[kg]		Réactivité moyenne/haute	Réactivité basse				
< 10	< 1.000	PD	0.2	0.02	0.065	0.02	0.006	
		Pv	0.06	0.02	0.07	-	-	
		PE	0.2	0.2	0.2	-	-	
10-100	1.000-10.000	PD	0.5	0.04	0.065	0.02	0.006	
		Pv	0.2	0.04	0.07	-	-	
		PE	0.3	0.3	0.2	-	-	
>100	> 10.000	PD	0.7	0.09	0.065	0.02	0.006	
		Pv	0.7	0.1	0.07	-	-	
		PE	0.4	0.4	0.2	-	-	
	Tableau	5: P	obabilités d'ignitio	r directe, retar	dée ou d'explos	ion [5]		

Tabelle 3.3 Belgische Methode: Zündwahrscheinlichkeit von entzündbaren Gasen [28]

Bei einem grossen Wasserstoffleck (dritter Fall) beträgt die Wahrscheinlichkeit einer direkten Zündung (Fackelbrand)0,7, jene einer verzögerten Zündung mit Explosion (VCE und Fackelbrand)0,084 und jene einer verzögerten Zündung ohne Explosion (Flash Fire oder Feuerball und Fackelbrand)0,126, während die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Leck nicht entzündet, bei 0,09 liegt.

Die belgische Methode geht davon aus, dass bei einem Versagen einer Hochdruckleitung, die Wasserstoff transportiert, die häufigste Folge ein Fackelbrand ist, wobei auch die Möglichkeit einer verzögerten Zündung berücksichtigt wird, die eine Explosion oder einen Feuerball erzeugt.

3.5.3 Niederlande

Das niederländische *Reference Manual for Bevb Risk Assessments* [24] geht bei Wasserstoff aufgrund der geringen Zündenergie von einer sehr hohen Zündwahrscheinlichkeit aus. Die Beziehung zwischen Zündwahrscheinlichkeit und Zündung (sofort oder verzögert) ist in der Literatur nicht klar definiert. So wird in der Bevb angenommen, dass der Fluss im Falle eines Totalversagens einer Wasserstoffleitung oder eines Lecks so turbulent wäre, dass die Zündung innerhalb der ersten 20 Sekunden nach Beginn des Ereignisses eintreten würde.

Wasserstoff wird hier in die Kategorie der entzündbaren Gase eingeordnet. Die mit einem Wasserstoffleck verbundenen Folgen werden in den nachfolgenden Tabellen dargestellt.

Hazard classi- fication	Immediate ignition	Delayed ignition	No ignition
Flammable			
Gas	Jet fire	N/A	N/A
Liquid	Pool fire	Flash fire + pool fire	N/A
Pressurised liquefied gas	Jet fire	N/A	No effect
Тохіс			
Gas	N/A	N/A	Toxic effects
Liquid	N/A	N/A	Toxic effects

Abbildung 3.12 Standard-Ereignisse bei Totalversagen oder Leck in einer Hochdruckleitung (RIVM) [24]

	Pimmediate	Pdelayed
Gases		
- rupture and leak	1*	0
Pressurised liquefied		
gases	0.3	0
- rupture - leak	0.14	0
Liquids (K ₀)		
 rupture and leak 	0.065	0.935

* Only relates to hydrogen; given the low ignition energy a rupture is expected to always lead to ignition.

Abbildung 3.13 Zündwahrscheinlichkeit bei Totalversagen oder Leck (RIVM) [24]

Die niederländische Risikoberechnungsmethode geht davon aus, dass bei einem Wasserstoffleck aus einer Hochdruckleitung die wahrscheinlichste Auswirkung mit schweren Schäden ein Fackelbrand ist, weil sich das Gas sofort entzündet.

Die in diesem Kapitel ausführlich beschriebenen Methoden der Risikoanalyse zeigen Unterschiede, insbesondere bei der Untersuchung der Auswirkungen eines Wasserstofflecks aus einer Hochdruckleitung. Die niederländische Methode betrachtet ausschliesslich die Auswirkungen eines Fackelbrandes, während die französische und die belgische Methode auch die Auswirkungen des Überdrucks bei einer Gaswolkenexplosion berücksichtigen. Aufgrund der vielen Bedingungen, die für eine Explosion erfüllt sein müssen (verzögerte Zündung, Einschluss usw.), bleibt die Wahrscheinlichkeit einer verzögerten Zündung mit Explosion jedoch gering (0,084 nach der belgischen Methode und gemäss der französischen Methode von Fall zu Fall zu definieren).

Es ist darauf hinzuweisen, dass die im Rahmenbericht der schweizerischen Erdgaswirtschaft vorgestellte Methode zur Berechnung des Risikos [25] bis anhin noch nicht für den Transport von Wasserstoff über Rohrleitungen aktualisiert wurde.

4 3. Etappe: Modellierungen der Schäden

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Modellierungen mit der Software EFFECTS, Version 12.0.1, der niederländischen Firma Gexcon vorgestellt. EFFECTS ist die Referenzsoftware für die Modellierung des Störfallrisikos in der Schweiz.⁴

In einem ersten Schritt wurden die Modellierungen für einen Verlust des Einschlusses bei einer bestehenden Hochdruckleitung durchgeführt, die verschiedene Wasserstoff-Erdgas-Gemische transportiert. In einem zweiten Schritt wurden Leitungen für den Transport von reinem Wasserstoff bewertet.

Die EFFECTS-Software wurde mehrfach angepasst, um die Aussagekraft der Wasserstoff-Modellierungen zu erhöhen. So legte Gexcon den Wert der mittleren Oberflächenabstrahlung des Brandes (Surface Emissive Power, SEP) auf 70 kW/m² fest, nachdem das Verhalten einer Wasserstoff-Flamme untersucht und festgestellt wurde, dass der von den Auswirkungen betroffene Perimeter rund um die Flamme erheblich kleiner ist als bei einer Erdgas-Flamme. Das Chamberlain-Modell, das bis anhin für die Modellierung der Auswirkungen eines Fackelbrandes verwendet wurde, hatte laut Gexcon zu hohe Ergebnisse für Wasserstoff ergeben.

Ausserdem wurde das Modell der Ausbreitung einer entzündbaren Wolke in EFFECTS angepasst. Das Programm berücksichtigt die hohen Drücke, unter denen Wasserstoff potenziell transportiert werden kann (200–900 bar), und simuliert die Turbulenzen innerhalb des Jet-Austritts sowie die rasche Auflösung der Wolke.

Die Version 12 der EFFECTS-Software, die für die hier gezeigten Modellierungen verwendet wurde, enthält alle oben beschriebenen Aktualisierungen bezüglich H₂.

Gexcon arbeitet derzeit an neuen Anpassungen, die sich explizit auf den Transport von Gasen durch Leitungen beziehen, darunter auch Wasserstoff. Im Laufe des Jahres 2024 wird voraussichtlich ein neues Leckagemodell verfügbar sein, das Gaslecks aus einer erdverlegten Leitung modelliert. Gemäss den ersten Informationen zu diesem Thema⁵ beziehen sich die Anpassungen auf eine eingehendere Untersuchung der Folgen eines Totalversagens einer Wasserstoffhochdruckleitung, das bei einer erdverlegten Leitung aufgrund der Kraterbildung und der Wechselwirkungen des Gases mit den Kraterwänden nicht zwingend zu einem Fackelbrand, sondern eher zur Zündung einer Wolke führen würde. Diese Überlegung wäre ausschliesslich für erdverlegte Leitungen relevant. Bei einem Rohrversagen aufgrund von Arbeiten in der Nähe (äuss ere Einwirkungen) oder gar aufgrund einer Bodenbewegung würde die Leitung im Freien liegen, wodurch es zu einem Fackelbrand käme. Dieser Ansatz wird bei Gexcon aber noch erforscht und wurde deshalb in dieser Studie nicht berücksichtigt.

4.1 Transportleitungen

Unter einer Transportleitung versteht man das Hochdrucknetz, das Gas über weite Strecken transportiert.

In Übereinstimmung mit der Arbeitsgruppe wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Beispielen aus dem Rahmenbericht [25] der Fall einer Erdgasleitung mit einem Durchmesser von 12'' (323,9 mm) und einem Druck von 70 bar analysiert, weil das Ziel darin bestand, die EFFECTS-Simulationen den Daten des Rahmenberichts für Erdgas anzugleichen.

⁴ Effects wurde zur Herausgabe des Leitfadens Störfallvorsorge bei Kälteanlagen, BAFU, 2015 verwendet.

⁵ Informationen von Gexcon anlässlich einer vom Bundesamt für Verkehr organisierten Schulung zur EFFECTS-Software am 22. und 23. November 2023.

4.1.1 Modellierung der Freisetzung von CH₄ und H₂

Die Modellierung eines Totalversagens erfolgt in zwei Schritten: Die durchgeführte Modellierung beruht zunächst auf einem Modell für das Austreten aus einer Rohrleitung (Gas release from long pipeline), das eine Leckrate (kg/s) und eine Gasmasse bezogen auf einen Zeitwert liefert. Die folgenden Parameter werden betrachtet:

	Rahmenbericht	EFFECTS-Modellierung
Länge der Leitung	10 km (5 km auf beiden Seiten des Lecks)	10 km (5 km auf beiden Seiten des Lecks)
Double side flow	Ja	Ja
Rauhigkeit der Leitung	0,045 mm	0,045 mm
Durchmesser des Lecks	456 mm	458 mm

Abbildung 4.1 Parameter der Modellierung «Gas release from long pipeline» und Vergleich mit dem Rahmenbericht

Die Ergebnisse der Modellierung eines Gaslecks aus einer 12"- und 70-bar-Leitung werden nachfolgend dargestellt. Die Details sind in Annexe A zu finden.

In einem ersten Schritt wurden die Ergebnisse, die EFFECTS (Version 12.0) für die Modellierung einer Erdgasleitung geliefert hat, mit den Ergebnissen im Rahmenbericht verglichen.

Abbildung 4.2 Vergleich der Ergebnisse von EFFECTS mit jenen im Rahmenbericht

Die Modellierung des Erdgaslecks mit EFFECTS stimmt gut mit den Daten im Rahmenbericht überein: EFFECTS modelliert einen Verlust von 12 725 kg CH₄ nach 20 Sekunden, während im Rahmenbericht 11 200 kg genannt werden.

In einem zweiten Schritt wurden die Berechnungen für eine Leitung mit denselben Kennwerten durchgeführt, in der aber reiner Wasserstoff transportiert wird.

Abbildung 4.3 Leckrate und freigesetzte Menge bei einem Totalversagen einer Transportleitung für CH_4 oder H_2

Die Leckrate für Wasserstoff ist viel geringer als diejenige für Erdgas und nimmt nach wenigen Sekunden rasch ab (ca. 10 Sekunden für CH₄ und 4 Sekunden für H₂). In 20 Sekunden entweichen nur 2260 kg Wasserstoff aus der Leitung, gegenüber 12 725 kg bei Erdgas.

Results	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline H2		
Source Definition		•		
Initial mass in pipeline (kg)	46274	4753.2		
Mass flow rate at time t (kg/s)	120.91	5.9743		
Model valid until time (s)	11.423	3.9054		
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	262.49	37.806		
Based upon duration until (s)	120	120		
Maximum mass flow rate (kg/s)	2186.2	718.55		
Calculated corresponding Hole Diameter (mm)	458.06	458.06		
Representative release rate (kg/s)	2186.2	718.55		
Representative outflow duration (s)	21	7		
Representative pressure (bar)	70	70		
Representative temperature (°C)	9	9		
Representative density (kg/m3)	1.1626	0.91098		
Process Dimensions				
Pipeline volume (m3)	823.97	823.97		

 Tabelle 4.1
 Vergleich der Ergebnisse der Modellierung des Totalversagens der Hochdruckleitung

Der in Abbildung 4.3 dargestellte Unterschied zwischen den Leckraten ist in erster Linie auf die geringe Dichte von Wasserstoff zurückzuführen, die eine schnelle Druckentlastung der Leitung bewirkt.

4.1.2 Modellierung der Auswirkungen

Mit der Modellierung der Auswirkungen soll ermittelt werden, wie gefährlich eine Einspeisung von Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz im Vergleich zur aktuellen Situation (nur Erdgas) ist, um die Kompatibilität der mit der EFFECTS-Software ermittelten Ergebnisse und der Ergebnisse der zuvor beschriebenen Studien zu überprüfen.

Vor allem müssen für beide Fälle die relevanten Folgen definiert werden. Diesbezüglich sind sich die oben vorgestellten Studien einig: Sie gehen von einem Fackelbrand aus, der durch eine sofortige Zündung des Gases verursacht und durch einen kontinuierlichen Fluss gespeist wird, der mehrere Sekunden oder gar Minuten anhält.

Gemäss der Methode des Rahmenberichts führt bei einer verzögerten Zündung des austretenden Gases bei einem Totalversagen einer Erdgas transportierenden Hochdruckleitung das Szenario eines Feuerballs (verzögerte Zündung der austretenden Gasmasse nach 20 Sekunden) zu den grössten Schäden. Das Gas entzündet sich und verursacht eine sehr hohe Wärmestrahlung, allerdings nur für kurze Zeit (wenige Sekunden).

Bisher gingen die meisten Studien, die sich mit dem Risiko des Wasserstofftransports befassen, von einer 100-prozentigen Zündwahrscheinlichkeit aus. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Zündung verzögert wird, wurde als gering eingeschätzt; aus diesem Grund wurde das Szenario eines Fackelbrandes eingehender untersucht. Die Firma Gexcon vertieft dieses Thema derzeit, und aufgrund von Vorfällen insbesondere im Zusammenhang mit Ladestationen für wasserstoffbetriebene Fahrzeuge könnte die Wahrscheinlichkeit einer verzögerten Zündung nach oben korrigiert werden. Die verzögerte Zündung von Wasserstoff würde dann zwei Szenarien beinhalten: den Gaswolkenbrand (Flash Fire) oder die Explosion einer Gaswolke (VCE), je nachdem, wie stark die Wolke eingeschlossen ist.

Gemäss dem von Gexcon verfassten Artikel *Why a Hydrogen fireball should not be modelled as a BLEVE event* [31] kann ein Feuerball aus reinem Wasserstoff nur im Falle einer sofortigen Freisetzung von komprimiertem Wasserstoff auftreten. Die Freisetzung von Gas bei einem Total- oder einem partiellen Versagen einer Hochdruckleitung wird jedoch als kontinuierliche Freisetzung betrachtet. Ein Ereignisbaum für die Freisetzung von Gas ist in [31] angegeben und wird nachfolgend dargestellt. Er unterscheidet zwischen sofortiger und kontinuierlicher Freisetzung sowie zwischen sofortiger und verzögerter Zündung. Die Folgen im Zusammenhang mit der Toxizität sind für reinen Wasserstoff nicht relevant.

Abbildung 4.4 Ereignisbaum für die Freisetzung von Gas [31]

Im Rahmenbericht der schweizerischen Erdgaswirtschaft sieht der Ereignisbaum für ein Versagen einer Erdgashochdruckleitung wie folgt aus:

Abbildung 4.5 Ereignisbaum für ein Totalversagen einer Erdgashochdruckleitung⁶[25]

In der vorliegenden Studie wurden analog zur im Rahmenbericht angewendeten Methode die Auswirkungen eines Fackelbrandes und eines Feuerballs für H₂-CH₄-Gemische modelliert. Für das Szenario «Transport von reinem Wasserstoff in bestehenden Leitungen» wurde in Übereinstimmung mit [31] nur der Fackelbrand modelliert. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

4.1.3 Sofortige Zündung: Fackelbrand

Ein Fackelbrand ist ein Phänomen, das bei einer kontinuierlichen Freisetzung auftritt, bei der sich das Gas sofort oder wenige Sekunden nach Beginn des Verlusts des Einschlusses entzündet. Dabei wird eine Flamme

⁶ Im Szenario «Sofortige Zündung» geht die Methodik des Rahmenberichts von einem Feuerball gefolgt von einem Fackelbrand aus. Da die Auswirkungen eines Feuerballs überwiegen, ist der resultierende Fackelbrand im Ereignisbaum implizit enthalten.

erzeugt, die mehrere Dutzend Meter in die Höhe schiessen kann und so lang brennt, wie sie mit Gas aus der Leitung versorgt wird.

Die Berechnung der Auswirkungen eines Fackelbrandes für Erdgas im Rahmenbericht basiert auf einem vereinfachten Modell aus dem Yellow Book [29]. Die Modellierungen in EFFECTS sind ebenfalls auf das Yellow Book gestützt, allerdings auf eine neuere Version; die Berechnungen der Auswirkungen für Erdgas im Rahmenbericht und jene, die mit EFFECTS angestellt wurden, sind deshalb nicht unbedingt vergleichbar.

Abbildung 4.6 Zylinderförmiges Modell zur Berechnung der Auswirkungen eines Fackelbrandes im Rahmenbericht und kegelförmiges Modell, das von der EFFECTS-Software berücksichtigt wird

Bei gasförmigen Substanzen verwendet die EFFECTS-Software das Chamberlain-Modell, um die Form der Flamme zu definieren. Die Einstrahlzahl (view factor)⁷ – ein wichtiger Parameter bei der Berechnung des Wärmeflusses – wird mithilfe einer Methode zur Diskretisierung der Strahlung berechnet, bei der die Flammenoberfläche in kleine Flächen unterteilt wird, die alle durch eine spezifische Ausrichtung und Oberfläche gekennzeichnet sind. Die Grundflamme hat eine Kegelform.

Für die Modellierung mit EFFECTS wurden die folgenden Basisparameter berücksichtigt:

Input-Parameter	CH₄	H ₂
Max. Dauer der Exposition gegenüber dem Fackelbrand ⁸	30 s	30 s
Max. Leckrate (in der vorherigen Phase mit EFFECTS berechnet)	2186 kg/s	718 kg/s
Klimatische Bedingungen ⁹	20 °C / 70 % Feuchtigkeit / 1,0151 bar	20 °C / 70 % Feuchtigkeit/ 1,0151 bar
Pasquill-Klasse	D (neutral) und Wind mit 5 m/s	D (neutral) und Wind mit 5 m/s
Höhe des Lecks	0 m	0 m

Tabelle 4.2 Basisparameter zur Modellierung eines Fackelbrandes mit EFFECTS

Wenn eine Leckhöhe von 0 m (Leitung am Boden) eingefügt wird, geht die Software davon aus, dass die Leitung zum Zeitpunkt des Versagens nicht im Boden verlegt ist. So kann der Jet-Austritt direkt in die Atmosphäre gelangen und die Flamme steigt in die Höhe, womit die Auswirkungen auf der Oberfläche geringer sind. Dies ist auf den sogenannten Lift-off des Fackelbrandes zurückzuführen, d. h. auf den Raum zwischen dem Leck und dem unteren Teil der Flamme, in dem das Gas-Luft-Gemisch vor allem aufgrund der

⁷ Gibt an, welcher Anteil der von der Oberfläche des Feuerballs oder Fackelbrandes ausgehenden Strahlung bei verlustfreier Transmission auf ein entferntes Objekt trifft.

⁸ Im Rahmenbericht der schweizerischen Erdgaswirtschaft wird die gleiche Expositionszeit angenommen. Dieser Wert entspricht der Zeit, der ein Objekt der Einwirkung ausgesetzt ist, und ist für die Berechnung der letalen Auswirkungen massgebend.

⁹ Klimatische Bedingungen aus dem Bericht über Kälteanlagen übernommen [30].

Strömungsgeschwindigkeit keine Bedingungen für eine Zündung aufweist. Deshalb sind die Auswirkungen des Fackelbrandes an der Oberfläche weniger intensiv als für ein Objekt, das sich in der Höhe befindet.

Die folgende Abbildung zeigt die Form der Flamme für verschiedene H₂-CH₄-Mischungen: 100 Prozent CH₄, 20 Prozent H₂ und 80 Prozent CH₄, 50 Prozent H₂ und 50 Prozent CH₄, 80 Prozent H₂ und 20 Prozent CH₄ sowie 100 Prozent H₂.

Abbildung 4.7 Flammenform für Erdgas und verschiedene Wasserstoff-Erdgas-Gemische (EFFECTS)

Wie erwartet ist die Flamme eines Fackelbrandes bei 100 Prozent CH_4 am weitesten und die Flamme bei 100 Prozent H_2 am wenigsten weit ausgedehnt. Bei den Gemischen nimmt die Grösse der Flamme mit steigendem Wasserstoffanteil proportional ab. Aufgrund der sehr hohen Geschwindigkeit, mit der H_2 aus der Leitung austritt (ca. 2,7-mal schneller als Erdgas, siehe Modellberichte in Annexe A), wird die Wasserstoff-Flamme zudem weniger vom Wind beeinflusst, was zu einem weniger steilen Winkel zwischen dem Versagen und der Flammenachse führt.

Die Grösse der Wasserstoff-Flamme ist auch durch das Phänomen des statischen Auftriebs (buoyancy) beeinflusst, das die Tendenz eines Gases, in der Atmosphäre aufzusteigen, bestimmt [22] und von seiner Dichte abhängt.

Zu beachten ist ausserdem, dass die in Abbildung 4.7 dargestellten Fackelbrände auf der Grundlage von maximalen Leckraten modelliert wurden, die eine begrenzte Dauer von einigen Sekunden haben und danach abnehmen (siehe Abbildung 4.3). Der Fackelbrand geht folglich nach einigen Sekunden ebenfalls zurück.

Die nachfolgende Abbildung 4.8 zeigt die Wärmestrahlungsdosis (Grundlage zur Berechnung der Letalität) in Abhängigkeit von der Entfernung zur Quelle für jedes untersuchte Gasgemisch. Die Strahlungsdosis wird unter Berücksichtigung des maximalen Fackelbrandes berechnet.

Die Wärmestrahlungsdosis wird nach der folgenden Formel berechnet:

 $V = t Q^{4/3}$

wobei V = Strahlungsdosis in TDU ($s(W/m^2)^{4/3}$)

- t = Expositionszeit
- Q = Wärmefluss

Der Wärmefluss wird nach der folgenden Formel berechnet:

Q = E*F*T

wobei Q = Wärmefluss (W/m²)

E = Mittlere Oberflächenabstrahlung des Brandes (W/m^2) = Surface Emissive Power (SEP): hängt von den Eigenschaften des Gases ab

F = Einstrahlzahl (view factor): hängt von der Art des Szenarios (Feuerball oder Fackelbrand), dem betrachteten Modell und der Entfernung des Objekts ab

τ = Atmosphärische Transmission¹⁰: hängt vom Wetter und der Entfernung vom Objekt ab

Im Rahmenbericht wird eine Schadensskala für Szenarien, bei denen der Schaden durch den Wärmefluss verursacht wird, präsentiert. Diese schlägt Letalitätsgrenzen vor, die an eine Strahlungsdosis geknüpft sind.

Létalité	Dose de rayonnement thermique V à l'air libre
100%	à partir d'env. 3'415 s(Wm ⁻²) ^{4/3}
75%	dès env. 2'745 s(Wm ⁻²) ^{4/3}
50%	dès env. 2'075 s(Wm ⁻²) ^{4/3}
25%	dès env. 1'405 s(Wm ⁻²) ^{4/3}
0%	jusqu'à env. 735 s(Wm-²) ^{4/3}

Abbildung 4.8 Beziehungen zwischen Wärmestrahlungsdosis und Abstand zur Quelle für die verschiedenen analysierten H₂-CH₄-Gemische und für das Fackelbrandszenario (EFFECTS)

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Intensität des Wärmeflusses mit zunehmendem Wasserstoffanteil in der Leitung abnimmt. Anders als bei der Form der Flamme ist dieser Rückgang nicht linear. Der Hauptgrund

¹⁰ Ermöglicht die Berücksichtigung des Strahlungsverlusts aufgrund der atmosphärischen Absorption.

dafür ist, dass die Software bei Mischungen einen Wert für die SEP annimmt, der demjenigen von Erdgas entspricht. So nimmt die Intensität des Wärmeflusses bei Gemischen mit bis zu 80 Prozent Wasserstoff aufgrund der kleineren Flammengrösse ab. Beim 100-Prozent-H₂-Szenario wird die Intensität des Wärmeflusses durch den SEP-Wert der H₂-Flamme beeinflusst, der deutlich niedriger ist als derjenige von Erdgas.

Der SEP-Wert beträgt 312 kW/m² für Erdgas (unter Berücksichtigung eines mit Russ bedeckten Teils der Flamme) und 70 kW/m² für Wasserstoff (entsprechend dem von Gexcon festgelegten Wert).

Die Ergebnisse sowie Angaben zur Letalität sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Ergebnisse	Rahmenbericht 100 % Erdgas	EFFECTS
Länge des Fackelbrandes ¹¹	142 m	100 % CH4: 164 m 20 % H ₂ und 80 % CH ₄ : 155 m 50 % H ₂ und 50 % CH4: 142 m 80 % H ₂ und 20 % CH4: 128 m 100 % H ₂ : 123 m
SEP	210 kW/m ²	CH ₄ und Gemische: 312 kW/m 2 H ₂ : 70 kW/m 2
Letalitätsradius 0 % (735 s(W/m ²) ^{4/3})	100 m	100 % CH ₄ : 140 m 20 % H ₂ und 80 % CH ₄ : 130 m 50 % H ₂ und 50 % CH ₄ : 110 m 80 % H ₂ und 20 % CH ₄ : 85 m 100 % H ₂ : -

Tabelle 4.4 Ergebnisse der Modellierung des Fackelbrandes und Vergleich mit den Daten des Rahmenberichts

Die Auswirkungen eines Fackelbrandes, die mit EFFECTS modelliert wurden, sind im Vergleich zu den im Rahmenbericht berechneten Auswirkungen auf einer grösseren Fläche spürbar. Wie in Abbildung 4.8 dargestellt, wird aber die Strahlendosis, die einer Letalität von 100 Prozent entspricht, d. h. 3415 s(W/m²)⁴³, nicht erreicht, während gemäss Rahmenbericht der Radius einer Letalität von 100 Prozent bei einem Totalversagen einer 12"- und 70-bar-Leitung 35 Meter beträgt.

Ein Fackelbrand von 100 Prozent H₂ hat keine schwerwiegenden Auswirkungen auf ein Objekt am Boden.

Diese Unterschiede sind zum einen auf das betrachtete Modell (Zylinder oder Kegel) und zum anderen auf den SEP-Wert der Flamme zurückzuführen.

4.1.4 Verzögerte Zündung: Feuerball, Flash Fire oder VCE

Das Feuerballszenario wurde gemäss den Empfehlungen von [31] nur für Erdgas und für Wasserstoff-Erdgas-Gemische modelliert. Laut dem Rahmenbericht der schweizerischen Erdgaswirtschaft werden nur Schäden durch Wärmestrahlung betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass Schäden durch Überdruck weniger schwerwiegend sind.

¹¹ Die Länge der Flamme gemäss Rahmenbericht wird vom Boden aus gemessen. EFFECTS hingegen berücksichtigt den Lift-off, der in diesem Fall etwa 30 m beträgt.

Die Basisparameter sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Input-Parameter	CH4 H2
Durchmesser und Druck	12" (323,9 mm) / 70 bar
In den ersten 20 Sekunden freigesetztes Gas ¹²	100 % CH ₄ : 12 750 kg 20 % H ₂ und 80 % CH ₄ : 10 460 kg 50 % H ₂ und 50 % CH ₄ : 7213 kg 80 % H ₂ und 20 % CH ₄ : 4275 kg
Maximale Exposition	20 Sekunden
Klimatische Bedingungen	20 °C / 70 % Feuchtigkeit / 1,0151 bar
Höhe des Lecks	0 m

Tabelle 4.5 Basisparameter für die Modellierung eines Fackelbrandes mit EFFECTS

Die Ergebnisse der Modellierung eines Feuerballs für Erdgas und für verschiedene Wasserstoff-Erdgas-Gemische sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

Die Ausdehnung des Feuerballs nimmt mit steigendem Wasserstoffanteil im Gemisch ab, da die Gesamtmenge des Gases, das in den ersten 20 Sekunden ausströmt und sich später entzündet, aufgrund der geringeren Dichte des Wasserstoffs abnimmt (Verflüchtigung von H₂ vor der verzögerten Zündung, die den Feuerball auslöst).

¹² Laut Rahmenbericht entsteht der Feuerball durch die Menge an Gas, die in den ersten 20 Sekunden ausfliesst.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Wärmestrahlungsdosis in Bezug auf die Distanz zum Leck.

Abbildung 4.10 Beziehungen zwischen Wärmestrahlungsdosis und Distanz zur Quelle für die verschiedenen analysierten H₂-CH₄-Gemische und das Feuerballszenario (EFFECTS)

Die Auswirkungen eines Feuerballs nehmen mit steigendem Wasserstoffanteil im Gemisch ab. Diese Verminderung der Gefahr ist direkt abhängig von der Grösse und der Dauer des Feuerballs. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Ergebnisse	Rahmenbericht 100 % Erdgas	EFFECTS
Dauer des Feuerballs	9 s	100 % CH ₄ : 10,5 s 20 % H ₂ und 80 % CH ₄ : 9,8 s 50 % H ₂ und 50 % CH ₄ : 8,7 s 80 % H ₂ und 20 % CH ₄ : 7,3 s
Radius des Feuerballs	61 m	100 % CH4: 67 m 20 % H2 und 80 % CH4: 63 m 50 % H2 und 50 % CH4: 56 m 80 % H2 und 20 % CH4: 47 m
SEP	210 kW/m ²	265 kW/m ²
Letalitätsradius 0 % (735 s(W/m ²) ^{4/3})	130 m	100 % CH ₄ : 115 m 20 % H ₂ und 80 % CH ₄ : 105 m 50 % H ₂ und 50 % CH ₄ : 95 m 80 % H ₂ und 20 % CH ₄ : 80 m

Tabelle 4.6 Ergebnisse der Feuerballmodellierung und Vergleich mit den Daten des Rahmenberichts

Sowohl die nach der Methode des Rahmenberichts berechneten Auswirkungen als auch jene, die mit EFFECTS modelliert wurden, bewegen sich in der gleichen Grössenordnung.

Im Falle einer Freisetzung von reinem Wasserstoff und einer verzögerten Zündung sind zwei Phänomene möglich: Flash Fire, wenn sich die Wolke in unverdämmter Umgebung entwickelt, und VCE bei einer Wolke in verdämmter Umgebung.

Flash Fire ist ein Gaswolkenbrand, der Auswirkungen im Zusammenhang mit der Wärmestrahlung erzeugt. VCE ist die Explosion einer Gaswolke bei ihrer Zündung, die durch die sehr hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit der Flamme hervorgerufen wird und einen grossen Überdruck erzeugt. Auch die Verdämmung und die Blockierung der Umgebung spielen eine wichtige Rolle bei der Charakterisierung des Phänomens.

Diese Phänomene sind jedoch noch wenig erforscht, da bislang hauptsächlich die sofortige Zündung von Wasserstoff betrachtet wurde. Der Artikel *The critical mass for the unconfined vapour cloud explosion of compressed and liquid hydrogen* von E. Salzano [32] befasst sich mit den möglichen Folgen einer VCE unter verschiedenen Verdämmungsbedingungen. Der Artikel kommt zum Schluss, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Wasserstoff-VCE durch das für H₂-Leckagen typische Phänomen des statischen Auftriebs (buoyancy) und durch die hohe Wahrscheinlichkeit einer sofortigen Zündung stark reduziert wird. Aufgrund der hohen Reaktivität von Wasserstoff könnten aber selbst kleine Wolken hohe Drücke erzeugen.

Gexcon führt ebenfalls Untersuchungen des Flash-Fire- und des VCE-Phänomens im Zusammenhang mit Wasserstoff durch, aber diese Studien sind bis anhin noch nicht abgeschlossen.

4.1.5 Erwägungen zu den Auswirkungen der Einspeisung von Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz

Die Ergebnisse aus der Literaturrecherche sowie jene aus der Modellierung der Auswirkungen einer Beimischung von Wasserstoff in Gasleitungen haben gezeigt, dass bei den Szenarien Fackelbrand und Feuerball die Auswirkungen mit der Einspeisung von Wasserstoff in die Leitungen abnehmen.

Aufgrund dieser Ergebnisse dürften das Rohrleitungsgesetz (RLG), die Rohrleitungsverordnung (RLV) und die Verordnung über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen (RLSV) für den Transport von Wasserstoff durch Rohrleitungen weiterhin gültig sein.

Gashochdruckleitungen unterliegen gemäss Artikel 3 Absatz 1 RLV unabhängig von der Art des beförderten Gases dem RLG. Die Auswirkungen eines Fackelbrandes und eines Feuerballs nehmen mit der Einspeisung von Wasserstoff in die Leitung ab, weshalb die Sicherheitsvorschriften der RLSV auch für H₂-CH₄-Gemische in bestehenden Leitungen als anwendbar betrachtet werden können.

Die Auswirkungen und die Wahrscheinlichkeit einer Explosion bei einer Freisetzung von reinem Wasserstoff sind heute noch nicht bekannt, allerdings sind mehrere Studien im Gang, um mehr über dieses Phänomen zu erfahren.

4.2 Verteilleitungen/Mikronetze

In diesem Kapitel geht es um das Netz für die Verteilung oder den Kurzstreckentransport von reinem Wasserstoff. Derzeit handelt es sich dabei hauptsächlich um Leitungen, die reinen Wasserstoff von einem Hydrolyseur zur Endverbraucherin oder zum Endverbraucher transportieren. Zahlreiche Modellrechnungen wurden durchgeführt, wobei aber nur die bedeutendsten Ergebnisse in dieses technische Dokument aufgenommen wurden.

Im Bericht werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt, die sich einerseits aus den bereits bestehenden oder im Bau befindlichen Leitungen und andererseits aus den Fortschritten der Arbeitsgruppe bei der Suche nach der Grenze für die Unterstellung von Mikronetzen unter das RLG und die diesbezüglichen Verordnungen ergeben.

Nach dem jetzigen Stand ist der Bund für Rohrleitungsanlagen zuständig, bei denen der maximal zulässige Betriebsdruck grösser als 5 bar und der Aussendurchmesser grösser als 6 cm ist (Art. 3 Abs. 1 RLV). Die RLSV gilt sowohl für Leitungen, die in den Zuständigkeitsbereich des Bundes fallen, als auch für solche im Zuständigkeitsbereich der Kantone. Für Rohrleitungen mit einem Druck von mehr als 5 bar ist die gesamte RLSV anwendbar (einschliesslich der Regeln der Technik), während für Rohrleitungen mit einem Druck von bis zu 5 bar nur bestimmte Regeln der Technik gelten.

Für Wasserstoff scheinen diese Grenzen wenig relevant zu sein, da aufgrund seiner geringen Dichte höhere Drücke erforderlich sind, um H₂ effizient zu transportieren.

In den nachfolgenden Modellrechnungen wurden die Auswirkungen bei einem Verlust des Einschlusses einer Erdgasleitung bei 5 bar und 6 cm mit den Auswirkungen verglichen, die für mehrere Leitungstypen abgeschätzt wurden, die reinen Wasserstoff in einem industriellen Netz transportieren (Mikronetz).

Eine erste Modellierung wurde für ein Rohr mit einem Durchmesser von 6 cm und einem Druck von 500 bar durchgeführt, um die Auswirkungen von sehr hohem Druck aufzuzeigen.

Anmerkung: Das Feuerballszenario wird für eine Leitung zur Verteilung von reinem Wasserstoff nicht dargestellt, da diese Auswirkung im Ereignisbaum in [31] als nicht relevant betrachtet wird.

Die Basisparameter für die Modellierungen sind in der nachfolgenden Tabelle angegeben.

Input-Parameter	CH4	H2
Durchmesser ¹³ und Druck	60 mm / 5 bar	60 mm / 500 bar
Max. Leckrate (berechnet mit EFFECTS)	4,9 kg/s	283 kg/s
Maximale Exposition	30 Sekunden	30 Sekunden
Klimatische Bedingungen Pasquill	20 °C / 70 % Feuchtigkeit / 1,0151 bar Neutral D / 5 m/s	20 °C / 70 % Feuchtigkeit / 1,0151 bar Neutral D / 5 m/s
Höhe des Lecks	0 m	0 m
Länge der Leitung	5 km	5 km

Tabelle 4.7 Basisparameter für die EFFECTS-Modellierung von Mikronetzen

Die Ergebnisse der Modellierung sind in den nachfolgenden Abbildungen und die Details in Annexe B dargestellt.

Abbildung 4.11Ergebnisse der Modellierung eines CH₄-Lecks (5 bar / 6 cm) und eines H₂-Lecks (500 bar / 6 cm)Die maximale Leckrate ist bei Wasserstoff aufgrund des grossen Druckunterschieds viel höher als bei Erdgas.

¹³ EFFECTS berücksichtigt den Innendurchmesser des Rohrs, während im RLG und in den zugehörigen Verordnungen der Aussendurchmesser massgebend ist.

Auch die Form der Flamme ist in den beiden betrachteten Szenarien sehr verschieden. Die bodennahen Auswirkungen eines Wasserstoff-Fackelbrandes sind jedoch weniger gravierend als die Auswirkungen eines Erdgas-Fackelbrandes.

Abbildung 4.12 Flammenform bei einem Fackelbrand von CH₄ (5 bar / 6 cm) und H₂ (500 bar / 6 cm) und Strahlungsdosis

Nach der EFFECTS-Modellierung entzündet sich die Wasserstoff-Flamme etwa 15 m über dem Leck, das sich an der Oberfläche befindet. Das betrachtete Objekt befindet sich 1,5 m über dem Boden (Mannshöhe).

Der Emissionsgrad der Wasserstoff-Flamme von 70 kW/m² und ihre Höhe erklären, weshalb die Auswirkungen eines Fackelbrandes von Erdgas bei einem 100-mal geringeren Druck am Boden schwerwiegender bleiben. Die Letalitätsgrenze von 0 Prozent liegt für Erdgas etwa 11 m vom Leck entfernt.

Die Grenze für die Unterstellung von Leitungen für reinen Wasserstoff unter das RLG und die RLSV kann sich aber nicht allein auf diese Ergebnisse stützen. Zudem wird die Problematik der Explosion gegenwärtig noch untersucht; sie könnte sich als relevanter erweisen als die Wärmestrahlung, insbesondere aufgrund der eng bebauten und überfüllten Räume in Industriegebieten, den Hauptversorgungsgebieten des Verteilnetzes.

Das BFE schlug deshalb vor, die Begriffe «Niederdruck» und «Hochdruck» beizubehalten, um den Anwendungsbereich des Gesetzes und der Verordnungen festzulegen.

4.2.1 Leitungen mit einem maximalen Durchmesser von 10 cm und einem Druck-Durchmesser-Produkt von 200 bar*cm

Vom BFE wurde ein Grenzwert von 200 000 Pa*m (200 bar*cm) für eine Leitung mit einem Aussendurchmesser von 10 cm vorgeschlagen. Die nachfolgenden Modellierungen sollen die Auswirkungen verschiedener Druck-Durchmesser-Kombinationen überprüfen, mit denen 200 bar*cm erreicht werden können.

Kennwerte der Leitung (D und p)	Produkt
10 cm / 20 bar	
6 cm / 33 bar	200 bar*cm
4 cm / 50 bar	
2 cm / 100 bar	

Tabelle 4.8 Modellierter Druck und Durchmesser der Leitungen bei 200 bar*cm

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Form der Flamme für verschiedene Leitungen, bei denen das Druck-Durchmesser-Produkt 200 bar*cm ergibt. Die rosa Linie entspricht der Flamme eines Fackelbrandes für eine Erdgasleitung mit 5 bar und 6 cm. Die detaillierten Ergebnisse der Modellierung sind in Annexe B aufgeführt.

Abbildung 4.13 Flammenform für verschiedene Leitungen mit einem Druck-Durchmesser-Produkt von 200 bar*cm

Die Länge der Flamme verhält sich direkt proportional zur Masse des ursprünglich in der Leitung vorhandenen Wasserstoffs und damit zur maximalen Leckrate. So entspricht die längste Flamme der Leitung 10 cm / 20 bar und die kleinste Flamme der Leitung 2 cm / 100 bar. Der Unterschied zwischen der höchsten und der niedrigsten Flamme beträgt etwa 13 m. Die höchste Flamme misst rund 32 m.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Beziehung zwischen der Strahlendosis und dem Abstand zum Leck für die zuvor dargestellten Fackelbrände.

🔽 — Jet Fire H2 100 bar/2cm 🔽 — Jet Fire H2 20 bar/10 cm 🔽 — Jet Fire H2 50 bar/4cm 🔽 — Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm 🔽 — Jet Fire H2 33 bar/6 cm

Abbildung 4.14 Wärmestrahlungsdosis für die verschiedenen modellierten Leitungen (200 bar*cm)

Die Flammen eines reinen Wasserstofflecks sind zwar näher am Boden, haben aber bei Leitungen, die das Verhältnis 200 bar*cm nicht überschreiten, keine letalen Auswirkungen (Werte unter 735 s(Wm⁻²)^{4/3} und damit eine Dosis, unterhalb derer keine letalen Auswirkungen zu erwarten sind).

4.2.2 Leitungen mit einem maximalen Durchmesser von 12 cm und einem Druck-Durchmesser-Produkt von 300 bar*cm

Unter dem Gesichtspunkt der Risiken wurde eine zweite Grenze analysiert: 300 000 Pa*cm (300 bar*cm) bei einem maximalen Durchmesser von 12 cm. Die modellierten Druck-Durchmesser-Kombinationen sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt.

Kennwerte der Leitung (D und p)	Produkt
12 cm / 25 bar	
6 cm / 50 bar	300 bar*am
4 cm / 75 bar	
2 cm / 150 bar	

Tabelle 4.9 Modellierter Druck und Durchmesser der Leitungen bei 300 bar*cm

Die modellierten Flammen für die verschiedenen Druck-Durchmesser-Kombinationen sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

🔽 — Jet Fire H2 150 bar/2cm 🔽 — Jet Fire H2 25 bar/12 cm 🔽 — Jet Fire H2 75 bar/4 cm 🔽 — Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm 🔽 — Jet Fire H2 50 bar/6 cm

Abbildung 4.15 Flammenform für verschiedene Leitungen mit einem Druck-Durchmesser-Produkt von 300 bar*cm

Ähnlich wie im vorherigen Fall (200 bar*cm) wird die höchste Flamme durch die Leitung mit dem grössten Durchmesser, d. h. 12 cm bei 25 bar, verursacht und steigt bis auf etwa 42 m. Der Höhenunterschied zwischen der kleinsten Flamme (2 cm und 150 bar) und der höchsten Flamme beträgt rund 19 m.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Beziehung zwischen Strahlendosis und Distanz zum Leck für die verschiedenen modellierten Leitungen.

Abbildung 4.16 Wärmestrahlungsdosis für die verschiedenen modellierten Leitungen (300 bar*cm)

Ähnlich wie beim Grenzwert von 200 bar*cm führen Flammen, die aufgrund der Freisetzung von reinem Wasserstoff entstehen, bei Leitungen, die das Verhältnis 300 bar*cm nicht überschreiten, zu keinen letalen Auswirkungen (Werte unter 735 s(Wm⁻²)^{4/3} und damit eine Dosis, unterhalb derer keine letalen Auswirkungen zu erwarten sind).

Die nachfolgende Abbildung ermöglicht einen Vergleich der modellierten Flammenhöhen für die verschiedenen Druck-Durchmesser-Kombinationen. Ähnlich wie bei Hochdruckleitungen (siehe Abb. 4.7) ergibt sich der modellierte Fackelbrand aus der maximalen Leckrate, die nur wenige Sekunden anhält (bei Leitungen von Mikronetzen weniger als 3 Sekunden). Danach stabilisiert sich die Leckrate, und der Fackelbrand wird kleiner.

Abbildung 4.17 Vergleich der Flammenhöhe bei den Schwellenwerten 200 bar*cm und 300 bar*cm

Abbildung 4.17 zeigt, dass bei einem Schwellenwert von 300 bar*cm und einem maximalen Durchmesser von 12 cm die Flamme etwa 10 Meter höher ist als bei einer Leitung mit einem Durchmesser von maximal 10 cm und einem Druck-Durchmesser-Produkt von 200 bar*cm. Dies ist auf das grössere Wasserstoffvolumen zurückzuf ühren, das sich im Inneren der Leitung mit einem Durchmesser von 12 cm befindet. Alle modellierten Flammen bleiben aber in der gleichen Grössenordnung.

Schliesslich ist noch anzumerken, dass der Fackelbrand, der für verschiedene Druck-Durchmesser-Kombinationen bis zu einem Schwellenwert von 300 bar*cm modelliert wurde, keine letalen Auswirkungen auf ein bodennahes Objekt (1,5 m) hat.

5 Schlussfolgerungen: Überlegungen zu RLG, RLV und RLSV

Nach jetzigem Stand ist der Bund für Rohrleitungsanlagen zuständig, bei denen der maximal zulässige Betriebsdruck grösser als 5 bar und der Aussendurchmesser grösser als 6 cm ist (Art. 3 Abs. 1 RLV). Die RLSV gilt sowohl für Leitungen, die in den Zuständigkeitsbereich des Bundes fallen, als auch für solche im Zuständigkeitsbereich der Kantone. Für Rohrleitungen mit einem Druck von mehr als 5 bar ist die gesamte RLSV anwendbar (einschliesslich der Regeln der Technik), während für Rohrleitungen mit einem Druck von bis zu 5 bar nur bestimmte Regeln der Technik gelten.

Der erste Teil der Studie konzentrierte sich daher auf die Entwicklung des Risikos, das durch die Beimischung von Wasserstoff in Erdgasleitungen entsteht.

Die Informationen aus der Literatur und unsere eigenen Modellierungen mit der Software EFFECTS haben gezeigt, dass die Beimischung von Wasserstoff zu einem Wasserstoff-Erdgas-Gemisch die Auswirkungen von Fackel- und Feuerballszenarien verringert.

Allerdings werden derzeit mehrere Studien durchgeführt, um die Auswirkungen im Zusammenhang mit der Explosion einer Wasserstoffwolke zu evaluieren, die bei einer verzögerten Zündung des Gases auftreten würde. Dieser Fall wurde bis anhin kaum untersucht, da die meisten Studien von einer sofortigen Zündung von Wasserstoff ausgehen. Die Firma Gexcon, Herausgeberin der EFFECTS-Software, evaluiert gegenwärtig ein Modell für die Ausbreitung einer Wasserstoffwolke, die explodieren oder Feuer fangen könnte (VCE oder Flash Fire). Zudem werden Studien durchgeführt, um die Wahrscheinlichkeit einer Explosion bei einer Freisetzung von reinem Wasserstoff im Vergleich zu anderen Unfallszenarien zu ermitteln. Die zitierten Studien sind noch nicht abgeschlossen. Es ist deshalb wichtig, die laufenden Forschungsarbeiten zu verfolgen und zukünftige Ergebnisse bei weiteren Evaluationen zu berücksichtigen.

Nach dem derzeitigen Wissensstand können nachfolgend ausgeführte Überlegungen angestellt werden.

Im 3. Abschnitt der RLSV werden Sicherheitsabstände definiert.

Artikel 9 Absatz 1 RLSV legt fest: «*Zwischen einer Rohrleitungsanlage und anderen Anlagen sind die für den sicheren Bau und Betrieb der Rohrleitungsanlage und den Schutz der anderen Anlagen nötigen Sicherheitsabstände einzuhalten.*» Dieser Artikel umfasst zwei Teile. Der erste Teil bezieht sich auf die Sicherheit beim Bau und Betrieb von Rohrleitungsanlagen. Es wird ein Sicherheitsabstand festgelegt, der einen hindernisfreien Zugang zur Anlage gewährleistet, wodurch das Risiko eines Versagens durch Einwirkung Dritter (z. B. Arbeiten in der Nähe der Leitung) kontrolliert werden kann. Die Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen auf die Leitung hängt nicht von der beförderten Substanz ab; daher bleiben die in den Artikeln 10, 11, 15 und 17 angegebenen Sicherheitsabstände für eine Leitung, die Wasserstoff transportiert, gültig.

Der zweite Teil von Artikel 9 RLSV führt den Begriff «Schutz der anderen Anlagen» ein, in oder an denen sich potenziell Personen aufhalten (Gebäude, Strassen, Eisenbahnlinien). Die Sicherheitsabstände dienen dann dazu, die Anlagen und die Menschen darin vor Schäden zu bewahren, die durch einen Unfall im Zusammenhang mit der Gasanlage verursacht werden könnten.

Artikel 12 «Sicherheitsabstände zu Gebäuden und Orten mit häufigen Menschenansammlungen» legt eine Grenze von 25 bar fest, ab der die einzuhaltenden Sicherheitsabstände strenger sind (z. B. 10 m Abstand zu Gebäuden mit Menschenbelegung und zu Orten mit häufigen Menschenansammlungen). Versagt eine 12"und 70-bar-Erdgasleitung, dann misst der Radius, innerhalb dessen die Letalität 100 Prozent beträgt, bei einem Feuerball etwa 55 m und bei einem Fackelbrand etwa 35 m [25]. Aufgrund dieser Ergebnisse sind die in Artikel 12 RLSV festgelegten Sicherheitsabstände nicht geeignet, um die Auswirkungen einzuschränken, die ein Unfall auf Personen und Anlagen haben würde. Die Artikel 12, 13, 14 und 16 ermöglichen lediglich, die Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen zu vermindern, und legen Mindestabstände fest, die beim Bau von Rohrleitungen eingehalten werden müssen.

Die im 3. Abschnitt der RLSV angegebenen Sicherheitsabstände können somit als relevant für Leitungen betrachtet werden, die ein Wasserstoff-Erdgas-Gemisch transportieren werden, zumal nach heutigem Stand des Wissens die Schwere der Schäden mit der Einspeisung von Wasserstoff in die Leitungen abnimmt. Bei reinem Wasserstoff zeigen die Modellierungen, dass ein Fackelbrand im Vergleich zu einem Erdgasleck weniger schwerwiegende Auswirkungen hat, wobei die Auswirkungen und die Wahrscheinlichkeit einer Explosion derzeit noch nicht bekannt sind. Da die in der RLSV definierten Sicherheitsabstände im

Wesentlichen dazu dienen, die Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen zu verringern, sind diese auch für den Transport von reinem Wasserstoff relevant.

Weitere Sicherheitsvorschriften, die in der RLSV festgelegt sind, betreffen die Werkstoffe der Anlagen, die Dimensionierung sowie leitungsspezifische Sicherheitsmassnahmen (Korrosionsschutz, Schutz vor mechanischer Einwirkung, Schutz von Nebenanlagen, Überwachung usw.). Das ERI spielt insbesondere bei der Kontrolle der Einhaltung der technischen Vorschriften und der Sicherheitsmassnahmen eine grundlegende Rolle, und dies wird sich auch durch die Einspeisung von Wasserstoff in Hochdruckleitungen nicht ändern.

Schliesslich verlangt Artikel 3 RLSV: «Die Rohrleitungsanlagen sind nach den Regeln der Technik von fachkundigen Personen zu projektieren, zu erstellen, zu betreiben und zu unterhalten.» Anhang 1 RLSV enthält eine Liste von Richtlinien, die als Regeln der Technik gelten. Gemäss den Diskussionen in der Arbeitsgruppe soll Anhang 1 durch die Aufnahme von Regeln der Technik für den Transport von Wasserstoff aktualisiert werden. Abgesehen von einer Empfehlung des SVGW vom April 2023 gibt es nämlich in der Schweiz bis anhin keine technischen Vorschriften, die sich speziell mit dem Transport von Wasserstoff befassen. Für 2024 werden jedoch Richtlinien des ERI und des SVGW erwartet. Solange solche Richtlinien fehlen, scheint eine Änderung der Kriterien für die Unterstellung von Wasserstoffrohrleitungen unter die RLSV riskant, da dies zu einer ausschliesslichen Anwendung der Regeln der Technik (und nicht der gesamten RLSV) führen würde, obwohl diese Regeln für den Transport von ERI geteilt.

Die unterschiedlichen physikalischen Kenngrössen von Erdgas und Wasserstoff machen es besonders komplex, im Rahmen der Anwendung des RLG und der zugehörigen Verordnungen auf Mikronetze eine Unterstellungsgrenze für Wasserstoffleitungen zu finden, die vergleichbar ist mit der Grenze, die heute den Geltungsbereich für Erdgasleitungen definiert.

Die mit EFFECTS durchgeführten Modellierungen haben gezeigt, dass ein Fackelbrand selbst bei hohen Drücken keine letalen Auswirkungen auf ein am Boden befindliches Objekt hat. Dennoch hat das BFE in Anbetracht der technischen Schwierigkeit, mit so hohen Drücken umzugehen (z. B. P > 500 bar), und in Übereinstimmung mit den Expertinnen und Experten der Branche (SVGW, Verein der H₂-Produzenten) beschlossen, eine Grenze beizubehalten, die auf dem Konzept des Hoch- und Niederdrucks basiert, damit die RLSV auf diese Art von Leitungen voll anwendbar bleibt. So wurden vom BFE zwei Schwellenwerte für die Unterstellung von Wasserstoffleitungen unter die RLSV vorgeschlagen und aus Risikosicht bewertet: ein Schwellenwert von 200 000 Pa*m (200 bar*cm) für Leitungen mit einem Aussendurchmesser von 10 cm oder weniger und ein Schwellenwert von 300 000 Pa*m (300 bar*cm) für Leitungen mit einem Durchmesser von 12 cm oder weniger. Es wurden verschiedene Modellierungen durchgeführt. **Die Ergebnisse zeigen, dass ein Fackelbrand bei Leitungen, die die Grenzwerte von 200 bar*cm und 300 bar*cm einhalten, keine letalen Auswirkungen erzeugt.** Die Möglichkeit einer Wasserstoffwolkenexplosion muss auch für Mikronetze evaluiert werden, sobald ausgereiftere Kenntnisse über dieses Szenario vorliegen.

Die Grenze für die Unterstellung von Rohrleitungen, die reinen Wasserstoff transportieren, unter die RLSV wird gegenwärtig in der Arbeitsgruppe diskutiert. Der endgültige Grenzwert sollte auch die technischen Parameter der Leitungen berücksichtigen, die heute für diese Art von Mikronetzen verwendet werden, wobei das Ziel insbesondere darin besteht, einen Wert vorzuschlagen, der nach dem Stand der Technik angemessen ist.

Anzumerken ist jedoch, dass alle Wasserstoffleitungen, die nicht in den Geltungsbereich des RLG oder der RLSV fallen, in jedem Fall Artikel 2, Artikel 3 Absätze 1 und 2, Artikel 39*a* und Anhang 1 RLSV entsprechen müssen; aus diesem Grund ist es auch wichtig, Anhang 1 mit den Regeln der Technik für den Transport von Wasserstoff zu aktualisieren.

Rohrleitungsanlagen im Sinne der RLV unterliegen ebenfalls der Verordnung über den Schutz vor Störfällen (StFV), wenn sie die Kriterien nach Anhang 1.3 dieser Verordnung erfüllen. Für Wasserstoffleitungen, die in den Geltungsbereich der StFV fallen werden, sind ein Kurzbericht und gegebenenfalls eine Risikoermittlung gemäss den Artikeln 5 und 6 StFV zu erstellen. Ähnlich wie bei den Gasleitungen muss die Industrie zu gegebener Zeit auch für Wasserstoffrohrleitungen einen Rahmenbericht zur standardisierten Risikoermittlung für Störfälle erarbeiten. Die Methodik wird eine Harmonisierung der Risikoermittlung in der gesamten Schweiz ermöglichen und ein wichtiges Instrument zur Störfallvorsorge sein.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesgesetz vom 4. Oktober 1963 über Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brenn- oder Treibstoffe (Rohrleitungsgesetz, RLG), Stand am 1. September 2023, SR 746.1
- [2] Verordnung vom 26. Juni 2019 über Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brenn- oder Treibstoffe (Rohrleitungsverordnung, RLV, Stand am 1. Juli 2023, SR 746.11
- [3] Verordnung vom 4. Juni 2021 über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen (Rohrleitungssicherheitsverordnung, RLSV), Stand am 1. Juli 2023, SR 746.12
- [4] Candinas
- [5] European Hydrogen Backbone
- [6] GRT et autres distributeurs de gaz, Conditions techniques et économiques d'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel, Schlussbericht, Juni 2019
- [7] P. E. Dodds, S. Demoullin, Conversion of the UK gas system to transport hydrogen, International journal of hydrogen energy 38, 2013
- [8] M. Scheepers, Conversion of natural gas distribution network to hydrogen, HyDelta 2, 2022
- [9] T. Isaac, HyDeploy: The UK's first hydrogen blending deployment project, Clean energy, vol. 3, n° 2, 2019
- [10] HIGGS, D6.1 Considerations on H2 injection potential to EU decarbonization goals, A systematic validation approach at various admixture levels in to high-pressure grids, 2023 (Pending for approval)
- [11] Suriya Evans-Pritchard Jayanti, Repurposing pipeline for hydrogen: Legal and policy considerations, 7th International Conference on Advanced on Clean Energy Research, ICACEER, 2022
- [12] U. R. Fritsche, Renewable Gases Hydrogen in the grid, Activity funded by the European Commission, Germany and Sweden with contribution from the Netherlands, Synthesis Report, IEA Bioenergy, 2022
- [13] DVGW, Hydrogen Research Projects, 2020
- [14] B. Bordenet, M. Hafner, Erhöhter H2-Gehalt im Verteilnetz, 2021
- [15] Nykyforchyn, Unigovskyi, Zvirko, Tsyrulnyk, Krechovska, Pipeline durability and integrity issues at hydrogen transport via natural gas distribution network, Elsevier, 2021
- [16] Nykyforchyn, Unigovskyi, Zvirko, Hredil, Krechovska, Student, Tsyrulnyk, Susceptibility of carbon pipeline steels operated in natural gas distribution network to hydrogen-induced cracking, Elsevier, 2022
- [17] R.M. Andrews, N. Gallon, O. J. C. Huising, Assessing damaged pipelines transporting hydrogen, Journal of Pipeline Science and Engineering, 2022
- [18] Jibrin Abbas, Hassani, Burby, Job John, An Investigation into the Volumetric Flow Rate Requirement of Hydrogen Transportation in Existing Natural Gas Pipelines and Its Safety Implications, MDPI, 2021

- [19] Klopcic, Stöhr, Grimmer, Sartory, Trattner, Refurbishment of Natural Gas Pipelines towards 100% Hydrogen – A Thermodynamic-Based Analysis, MDPI, 2022
- [20] SVGW, Regelwerk H1000, Empfehlung zu Planung, Bau und Betrieb von Rohrleitungsanlagen für den Transport von Wasserstoff, 2023
- [21] K. Stolecka, Hazards of hydrogen transport in the existing natural gas pipeline network, Journal of Power Technologies 98 (4), 2018
- [22] H. A. J. Froeling, M. T. Dröge, G. F. Nane, A. J. M. Van Wijk, Quantitative risk analysis of a hazardous jet fire event for hydrogen transport in natural gas transmission pipeline, 2021
- [23] INERIS, Enjeux de sécurité liés à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de transport et distribution de gaz naturel: état des lieux et perspectives, 2019
- [24] National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Reference Manual for Bevb Risk Assessments, Guideline for calculating external risk for transporting hazardous substances through pipeline, 2022
- [25] Schweizerische Erdgaswirtschaft, Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen, Rahmenbericht zur standardisierten Ausmassabschätzung und Risikoermittlung, Revision 2010
- [26] INERIS, Enjeux de sécurité liés à l'injection d'hydrogène dans les réseaux de transport et distribution de gaz naturel: état des lieux et perspectives, 2019
- [27] GESIP, Guide méthodologique pour la réalisation d'une étude de dangers concernant une canalisation de transport (hydrocarbures liquides ou liquéfiés, gaz naturel ou assimilés et produits chimiques), Rapport n° 2008/01, Auflage Juli 2019
- [28] Moniteur Belge, Code technique relatif à l'analyse de risque pour les installations de transport de produits inflammables et oxydants, 2020
- [29] VROM, Methods for the calculation of physical effects, due to releases of hazardous material (liquids and gases) «Yellow Book», 1996, revidierte Auflage 2005
- [30] BAFU, Störfallvorsorge bei Kälteanlagen, 2015
- [31] H. Boot, S. R. Perez, Why a hydrogen fireball should not be modelled as a BLEVE event, Chemical engineering transactions, 90, 49–54, 2021
- [32] Ernesto Salzano, The critical mass for the unconfined vapour cloud explosion of compressed and liquid hydrogen, The Canadian journal of chemical engineering, 2023

7 Impressum

Lausanne, den 19.12.2023

CSD INGÉNIEURS SA

Matilde RIBOLZI Projektleiterin

evillaumeent

Aline GUILLAUME-GENTIL Leiterin industrielle Risiken

8 Disclaimer

CSD bestätigt hiermit, dass bei der Abwicklung des Auftrags die Sorgfaltspflicht angewendet wurde, die Ergebnisse und Schlussfolgerungen auf dem derzeitigen und im Bericht dargestellten Kenntnisstand beruhen und diese nach den anerkannten Regeln des Fachgebiets und nach bestem Wissen ermittelt wurden.

CSD geht davon aus, dass:

- ihr seitens des Auftraggebers oder von ihm benannter Drittpersonen richtige und vollständige Informationen und Dokumente zur Auftragsabwicklung zur Verfügung gestellt wurden;
- von den Arbeitsergebnissen nicht auszugsweise Gebrauch gemacht wird;
- die Arbeitsergebnisse nicht unüberprüft für einen nicht vereinbarten Zweck oder für ein anderes Objekt verwendet oder auf geänderte Verhältnisse übertragen werden.

Andemfalls lehnt CSD gegenüber dem Auftraggeber jegliche Haftung für dadurch entstandene Schäden ausdrücklich ab.

Machen Dritte von den Arbeitsergebnissen Gebrauch oder treffen darauf basierende Entscheidungen, wird jede Haftung durch CSD für direkte und indirekte Schäden ausgeschlossen, die aus der Verwendung der Arbeitsergebnisse allenfalls entstehen.

Annexe A Ergebnisse der EFFECTS-Modellierungen für CH₄-H₂-Gemische

Comparison set

Model: Gas Release from Long Pipeline

version: v2023.11.4ac4940 (28.11.2023) Reference: Yellow Book 3rd Version 1997, Paragraph 2.5.2.5 **Parameters**

Inputs	Gas Release from Long Pipeline 20% H2 - 80% CH4	Gas Release from Long Pipeline H2	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline 20% CH4- 80%H2	Gas Release from Long Pipeline 50% CH4-H2	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4
Process Conditions						
Chemical name	20% H2 - 80% CH4 (user created)	HYDRO((DIPPR)	3venetha (DIPPR)	20% CH4- NE 80%H2 (user created)	CH4-H2 (user created)	CH4-H2 (user created)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9	9	9	9	
Initial (absolute) pressure in pipeline (bar)	70	70	70	70	70	
Calculation Method						
Use which representative rate	Maximu	nMaximur	Maximu	Maximu	Maximu	m
	rate	rate	rate	rate	rate	
Maximum release duration (s)	120	120	120	120	120	
Use double sided outflow	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	
Source Definition						
Flowrate inlet feed (kg/s)	0	0	0	0	0	
Process Dimensions						
Pipeline length (km)	10	10	10	10	10	
Pipeline diameter (mm)	323.9	323.9	323.9	323.9	323.9	
Pipeline roughness (mm)	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	
Environment						
Ambient temperature (°C) Ambient pressure (bar)	20 1.0151	20 1.0151	20 1.0151	20 1.0151	20 1.0151	20 1.0151
Results Source Definition	Gas Release from Long Pipeline 20% H2 - 80% CH4	Gas Release from Long Pipeline H2	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline 20% CH4- 80%H2	Gas Release from Long Pipeline 50% CH4-H2	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4
Initial mass in pipeline (kg)	36550	4753.2	46274	11799	23428	
Mass flow rate at time t (kg/s)	95.591	5.9743	120.91	25.415	59.404	
Model valid until time (s)	10.315	3.9054	11.423	6.0925	8.4343	
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	216.21	37.806	262.49	84.376	149.99	
Based upon duration until (s)	120	120	120	120	120	
Maximum mass flow rate (kg/s)	1951.1	718.55	2186.2	1125.3	1573	
Calculated corresponding Hole Diameter (mm)	458.06	458.06	458.06	458.06	458.06	
Representative release rate (kg/s)	1951.1	718.55	2186.2	1125.3	1573	
Representative outflow duration (s)	19	7	21	10	15	
Representative pressure (bar)	70	70	70	70	70	
Representative temperature (°C)	9	9	9	9	9	
Representative density (kg/m3)	1.1575	0.91098	1.1626	1.077	1.2072	

Process Dimensions						
Pipeline volume (m3)	823.97	823.97	823.97	823.97	823.97	
Contour maximum distances						
Heat radiation contours distance [m]	Gas Release from Long Pipeline 20% H2 - 80% CH4	Gas Release from Long Pipeline H2	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline 20% CH4- 80%H2	Gas Release from Long Pipeline 50% CH4-H2	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4
10 kW/m2 heat radiation contour						123
Lethality contours distance [m]	Gas Release from Long Pipeline 20% H2 - 80% CH4	Gas Release from Long Pipeline H2	Gas Release from Long Pipeline CH4	Gas Release from Long Pipeline 20% CH4- 80%H2	Gas Release from Long Pipeline 50% CH4-H2	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4 164
1 % lethality contour						164
Other information						

Main program Last calculation

EFFECTS 12.0.1.22111 30.11.2023 22:38:15

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 30.11.2023 22:38:15

Comparison set

Model: Gas Fireball

version: v2023.09.79c21b6 (11.09.2023)

Reference: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition, 2002, Page 3-306. CCPS Guidelines for evaluating characteristics of vapor cloud explosions, flash fires and BLEVEs, 1994, p171- 174. Fireball Diameter and duration calculated according to Roberts (1982) "Thermal radiation hazards from releases of LPG fires from pressurised storage", dynamic rising and growing behavior of pure vapour fireballsmodelled with constant velocity according to Lihou and Maund (1982) "Thermal radiation hazards from fireballs" **Parameters**

Inputs	Gas Fireball 50% H2 - 50% CH4	Gas Fireball 20% H2 - 80% CH4	Gas Fireball CH4	Gas Fireball 80% H2 - 20% CH4
Process Conditions				
Chemical name	CH4-H2 (user created)	20% H2 - 80% CH4 (user created)	METHANE (DIPPR)	20%CH4- 80%H2 (user created)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9	9	9
Initial (absolute) pressure in vessel (bar) Calculation Method	70	70	70	70
Fraction combustion heat radiated (-)	0.25	0.25		0.25
Include vessel rupture overpressure effects Process Dimensions	No	No	No	No
Vessel volume (m3)	255	235	227	298
Height of the vessel (fireball offset Z) (m) Environment	0	0	0	0
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20
Ambient relative humidity (%)	70	70	70	70
Ambient pressure (bar) Vulnerability	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151
Maximum heat exposure duration (s)	20	20	20	20
Take protective effects of clothing into account	No	No	No	No
Accuracy				
Grid resolution	Low	Low	Low	Low
Reporting				
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	500	500	500	500
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5	1.5	1.5
Results	Gas Fireball 50% H2 - 50% CH4	Gas Fireball 20% H2 - 80% CH4	Gas Fireball CH4	Gas Fireball 80% H2 - 20% CH4
Total mass released (kg)	7250 5	10424	127/18	4267 1
Fire Results	1250.5	10424	12740	4207.1
Duration of the fireball (s)	8 7097	9 8301	10 512	7 2989
Liftoff time of the fireball (s)	3,9498	4.683	5.1179	2.9854
Max. diameter of the fireball (m)	112.26	126.7	135.49	94.075
Max. height of the fireball (m)	103.73	114.82	121.69	90.173
Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)	304	274	265	350
(Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2)	2.0886	2.4077	2.6572	1.6909
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0.012453	0.015811	0.018041	0.0087772

55.684

9.4654

0

55.817

12.597

0

55.899

15.206

0

Atmospheric transmissivity at Xd (%)

Percentage first degree burns at Xd (%)

Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)

55.515

6.2243

0

Percentage second degree burns at Xd (%)	0	0	0	0
Percentage lethal burns at Xd (%)	0	0	0	0
Distance to clothing burning dose (m)	67.19	72.511	76.94	59.681
Contour maximum distances				
Heat radiation contours distance [m]	Gas Fireball 50% H2 - 50% CH4	Gas Fireball 20% H2 - 80% CH4	Gas Fireball CH4	Gas Fireball 80% H2 - 20% CH4
10 kW/m2 heat radiation contour	239	255	267	217
Lethality contours distance [m]	Gas Fireball 50% H2 - 50% CH4	Gas Fireball 20% H2 - 80% CH4	Gas Fireball CH4	Gas Fireball 80% H2 - 20% CH4
1 % lethality contour	123	136	146	106
Other information				
Main program	EFFECTS 12.0	.1.22111		

 Last calculation
 29.11.2023 13:06:55

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 29.11.2023 13:06:56

Comparison set

Model: Jet Fire

version: v2023.11.79c21b6 (29.11.2023)

Reference: Chamberlain, G.A., Development in design methods for predicting thermal radiation from flares~Chem. Eng. Res. Des. Vol.65 July 1987 pagina 299 - 309~Cook,J. et al, A comprehensive program for the calculation of flame radiation levels~Loss Prev. in Process Ind. January 1990, vol.3 ~Damage: Green Book 1st edition 1992, chapter 1 (Heat radiation); pages 11-36 **Parameters**

Inputs	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4	Jet Fire 20% H2 - 80% CH4	Jet Fire CH4	Jet Fire H2	Jet Fire 80% H2 - 20% CH4
Process Conditions					
Chemical name	CH4-H2 (user created)	20% H2 - 80% CH4 (user created)	METHANI (DIPPR)	EHYDROGE (DIPPR)	20%CH4- 190%H2 (user created)
Exit temperature (°C)	9	9	9	9	9
Exit pressure (bar)	70	70	70	70	70
Calculation Method					
Fraction of the flame covered by soot (-)	0.23	0.23	0.23		0.23
Source Definition					
(Calculated) Mass flow rate (kg/s)	1573	1951.1	2186.2	718.55	1125.3
Process Dimensions					
Hole diameter (mm)	458.06	458.06	458	458	458.06
Hole rounding	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded
	edges	edges	edges	edges	edges
Outflow angle in XZ plane (0°=horizontal; 90°=vertical) (deg)	90	90	90	90	90
Height of release (Z-coordinate) (m)	0	0	0	0	0
Meteo Definition					
Pasquill stability class	D (Neutral)D (Neutral)D (Neutral)D (Neutral)D (Neutral)
Wind speed at 10 m height (m/s)	5	5	5	5	5
Predefined wind direction	W	W	W	W	W
Environment					
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151
Ambient relative humidity (%)	70	70	70	70	70
Roughness length description	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
5 5 1	large	large	large	large	large
	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle
	coverage	coverage	coverage	coverage	coverage
	(suburb or	· (suburb or	(suburb or	(suburb or	(suburb or
	forest).	forest).	forest).	forest).	forest).
Vulnerability		,	,	,	
Maximum heat exposure duration (s)	30	30	30	30	30
Take protective effects of clothing into account	No	No	No	No	No
Accuracy					
Grid resolution	Low	Low	Low	Low	Low
Reporting					
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	100	100	100	100	100
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	1. · · ···	1 F			1 F
Results	Jet Fire 50% H2 - 50% CH4	Jet Fire 20% H2 - 80% CH4	Jet Fire CH4	Jet Fire H2	Jet Fire 80% H2 - 20% CH4

Source Definition

Type of flow of the jet	Choked	Choked	Choked	Choked	Choked
	flow	flow	flow	flow	flow
Exit velocity of expanding jet (m/s)	1154.3	965.81	884.32	2382.2	1556.9
Fire Results					
Wind speed at avg. jet height (m/s)	11.413	11.588	11.689	11.144	11.213
Angle between hole and flame axis (alpha) (deg)	13.328	15.093	15.995	7.0217	10.538
Frustum lift off height (b) (m)	28.708	30.027	30.826	27.662	27.38
Width of frustum base (W1) (m)	1.1513	1.1827	1.2058	1.1079	1.123
Width of frustum tip (W2) (m)	52.623	58.681	62.448	42.772	46.084
Length of frustum (flame) (Rl) (m)	142.54	155.79	164.02	122.91	128.44
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW	58;-1;31;5	3 69;-1;38;5	5 97 5;-1;42;6	5 2 6;-6;13;	4 3 46;-1;21;46
Surface area of frustum (m2)	14410	17603	19747	10030	11338
Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)	400	400	400	70	400
Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2)	312.6	312.6	312.6	70	312.6
(Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2)	11.833	13.308	14.15	1.9281	10.003
Atmospheric transmissivity at Xd (%)	67.771	67.773	67.771	67.759	67.769
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0.055854	0.062816	0.066793	0.04065	0.047219
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)	808.91	946.1	1026.8	71.993	646.6
Percentage first degree burns at Xd (%)	99.927	100	100	0	99.393
Percentage second degree burns at Xd (%)	44.984	63.565	72.37	0	21.125
Percentage lethal burns at Xd (%)	25.445	39.762	48.005	0	10.862
Distance to clothing burning dose (m)	0	0	0	0	0
Contour maximum distances					
	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire
Heat radiation contours distance [m]	50% H2 -	20% H2 -	CH4	H2	80% H2 -
	50% CH4	80% CH4		•	20% CH4
10 kW/m2 heat radiation contour	123	143	155	0	100
	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire	Jet Fire
Lethality contours distance [m]	50% H2 - 50% CH4	20% H2 - 80% CH4	CH4	H2	80% H2 - 20% CH4
1 % lethality contour	164	186	200	0	139
Other information					
Main program		20122111			

Main program Last calculation EFFECTS 12.0.1.22111 29.11.2023 13:07:43

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 29.11.2023 13:07:43

Annexe B Ergebnisse der EFFECTS-Modellierungen für Mikronetze für reinen Wasserstoff

Comparison set

Model: Gas Release from Long Pipeline

version: v2023.11.4ac4940 (21.11.2023) Reference: Yellow Book 3rd Version 1997, Paragraph 2.5.2.5 **Parameters**

puts Gas Release from Lo Pipeline CH4		Gas Release from Long Pipeline H2
Process Conditions		
Chemical name	METHANE (DIPPR)	HYDROGEN (DIPPR)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9
Initial (absolute) pressure in pipeline (bar)	5	500
Calculation Method		
Use which representative rate	Maximum rate	Maximum rate
Maximum release duration (s)	30	30
Use double sided outflow	Yes	Yes
Source Definition		
Flowrate inlet feed (kg/s)	0 0	
Process Dimensions		
Pipeline length (km)	5	5
Pipeline diameter (mm)	60	60
Pipeline roughness (mm)	0.045	0.045
Environment		
Ambient temperature (°C)	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151

ults Gas Release from Lon Pipeline CH4		Gas Release from Long Pipeline H2
Source Definition	·	•
Initial mass in pipeline (kg)	48.854	465.33
Mass flow rate at time t (kg/s)	0.29243	5.0489
Model valid until time (s)	5.7115	1.9527
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	0.46681	9.8716
Based upon duration until (s)	30	30
Maximum mass flow rate (kg/s)	4.9735	157.41
Calculated corresponding Hole Diameter (mm)	84.853	84.853
Representative release rate (kg/s)	4.9735	157.41
Representative outflow duration (s)	10	3
Representative pressure (bar)	5	500
Representative temperature (°C)	9	9
Representative density (kg/m3)	1.2072	1.027
Process Dimensions		
Pipeline volume (m3)	14.137	14.137

Contour maximum distances

Other information	
Main program	EFFECTS 12.0.1.22111
Last calculation	29.11.2023 22:08:55

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 29.11.2023 22:09:41

Comparison set

Model: Jet Fire

version: v2023.11.79c21b6 (29.11.2023)

Reference: Chamberlain, G.A., Development in design methods for predicting thermal radiation from flares~Chem. Eng. Res. Des. Vol.65 July 1987 pagina 299 - 309~Cook,J. et al, A comprehensive program for the calculation of flame radiation levels~Loss Prev. in Process Ind. January 1990, vol.3 ~Damage: Green Book 1st edition 1992, chapter 1 (Heat radiation); pages 11-36

Parameters		
Inputs	Jet Fire H2 500 bar/6 c	m Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm
Process Conditions		
Chemical name	HYDROGEN (DIPPR)	METHANE (DIPPR)
Exit temperature (°C)	9	9
Exit pressure (bar)	500	5
Source Definition		
(Calculated) Mass flow rate (kg/s)	157.41	4.9735
Process Dimensions		
Hole diameter (mm)	84.853	84.853
Hole rounding	Rounded edges	Rounded edges
Outflow angle in XZ plane (0°=horizontal; 90°=vertical) (deg)	90	90
Height of release (Z-coordinate) (m)	0	0
Meteo Definition		
Pasquill stability class	D (Neutral)	D (Neutral)
Wind speed at 10 m height (m/s)	5	5
Predefined wind direction	W	W
Environment		
Ambient temperature (°C)	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1 0151
Ambient relative humidity (%)	70	70
Roughness length description	Regular large obstacle	Regular large obstacle
	coverage (suburb or	coverage (suburb or
	forest).	forest).
Vulnerability	,	
Maximum heat exposure duration (s)	30	30
Take protective effects of clothing into account	No	No
Accuracy		
Grid resolution	Low	Low
Reporting		
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	100	100
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5
Results	Jet Fire H2 500 bar/6 c	m Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm
Source Definition		
Type of flow of the jet	Choked flow	Choked flow
Exit velocity of expanding jet (m/s)	2587.7	623.39
Fire Results		
Wind speed at avg. jet height (m/s)	9.6524	5.9852
Angle between hole and flame axis (alpha) (deg)	6.8931	18.353
Frustum lift off height (b) (m)	14.305	2.6557
Width of frustum base (W1) (m)	0.37651	0.095115
Width of frustum tip (W2) (m)	21.375	4.7853
Length of frustum (flame) (RI) (m)	62.219	13.033
Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW	18;-3;7;21	6;0;4;5

2514.8

0.88842

0.018675

67.96

70

70

Surface area of frustum (m2)

(Max) Viewfactor at Xd (-)

Surface emissive power (clear flame) (kW/m2)

(Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2)

Atmospheric transmissivity at Xd (%)

Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2)

119.51

287.41

225.91

68.31

0.16757

0.0010859

Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)	25.622	2.7715
Percentage first degree burns at Xd (%)	0	0
Percentage second degree burns at Xd (%)	0	0
Percentage lethal burns at Xd (%)	0	0
Distance to clothing burning dose (m)	0	0
Contour maximum distances		
Heat radiation contours distance [m]	Jet Fire H2 500	bar/6 cm Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm
10 kW/m2 heat radiation contour	0	13
Lethality contours distance [m]	Jet Fire H2 500	bar/6 cm Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm

0

Other information Main program Last calculation

1 % lethality contour

EFFECTS 12.0.1.22111 30.11.2023 22:36:02

16

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 30.11.2023 22:36:03

Comparison set

Model: Gas Release from Long Pipeline

version: v2023.11.4ac4940 (21.11.2023) Reference: Yellow Book 3rd Version 1997, Paragraph 2.5.2.5 **Parameters**

Inputs	Gas Release from Long Pipeline H2			
Process Conditions				
Chemical name	HYDROGEN (DIPPR)	HYDROGEN (DIPPR)	HYDROGEN (DIPPR)	HYDROGEN (DIPPR)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9	9	9
Initial (absolute) pressure in pipeline (bar)	100	20	33	50
Calculation Method				
Use which representative rate	Maximum	Maximum	Maximum	Maximum
	rate	rate	rate	rate
Maximum release duration (s)	30	30	30	30
Use double sided outflow	Yes	Yes	Yes	Yes
Source Definition				
Flowrate inlet feed (kg/s)	0	0	0	0
Process Dimensions				
Pipeline length (km)	5	5	5	5
Pipeline diameter (mm)	20	100	60	40
Pipeline roughness (mm)	0.045	0.045	0.045	0.045
Environment				
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151

Gas ReleaseGas ReleaseGas ReleaseGas Releasefrom Longfrom Longfrom Longfrom LongPipeline H2Pipeline H2Pipeline H2Pipeline H2

Source Definition	-	-	-	-
Initial mass in pipeline (kg)	12.721	66.676	39.297	26.196
Mass flow rate at time t (kg/s)	0.10134	0.73762	0.42279	0.26053
Model valid until time (s)	1.9527	1.9527	1.9527	1.9527
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	0.18564	1.5777	0.80574	0.47507
Based upon duration until (s)	30	30	30	30
Maximum mass flow rate (kg/s)	3.8798	19.862	11.752	7.8738
Calculated corresponding Hole Diameter (mm)	28.284	141.42	84.853	56.569
Representative release rate (kg/s)	3.8798	19.862	11.752	7.8738
Representative outflow duration (s)	3	3	3	3
Representative pressure (bar)	100	20	33	50
Representative temperature (°C)	9	9	9	9
Representative density (kg/m3)	1.1087	1.03	1.0603	1.0805
Process Dimensions				
Pipeline volume (m3)	1.5708	39.27	14.137	6.2832

Contour maximum distances

Results

Other information	
Main program	EFFECTS 12.0.1.22111
Last calculation	30.11.2023 22:32:55

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 30.11.2023 22:32:55

Comparison set

Model: Jet Fire

version: v2023.11.79c21b6 (29.11.2023)

Reference: Chamberlain, G.A., Development in design methods for predicting thermal radiation from flares~Chem. Eng. Res. Des. Vol.65 July 1987 pagina 299 - 309~Cook,J. et al, A comprehensive program for the calculation of flame radiation levels~Loss Prev. in Process Ind. January 1990, vol.3 ~Damage: Green Book 1st edition 1992, chapter 1 (Heat radiation); pages 11-36

Parameters

Inputs	Jet Fire H2 100 bar/2cm	Jet Fire H2 20 bar/10 cm	Jet Fire H2 50 bar/4cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 33 bar/6 cm
Process Conditions					
Chemical name	HYDROGENHYDROGENHYDROGENMETHANEHYDR				EHYDROGEN
	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)
Exit temperature (°C)	9	9	9	9	9
Exit pressure (bar)	100	20	50	5	33
	2.0700	10.000	7.0720	4.0725	44 750
(Calculated) Mass flow rate (kg/s)	3.8798	19.862	1.8738	4.9735	11.752
Hole diameter (mm)	28.284	141.42	56.569	84.853	84.853
Hole rounding	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded
	edges	edges	edges	edges	edges
Outflow angle in XZ plane (0°=norizontal; 90°=vertical) (deg)	90	90	90	90	90
Height of release (Z-coordinate) (m)	0	0	0	0	0
				_	
Pasquill stability class					D
M' and M' and M' M' M' M' M' M' M' M'	(Neutral)	(Neutral)	(Neutral)	(Neutral)	(Neutral)
Wind speed at 10 m height (m/s)	5	5	5	5	5
	VV	VV	VV	VV	VV
Environment	20	20	20	20	20
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151
Ambient relative humidity (%)	70	70	70	70	70
Roughness length description	Regular	Regular	Regular	Regular	Regular
	large	large	large	large	large
	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle
	coverage	coverage	coverage	coverage	coverage
	(suburb o	r (suburb o	r (suburb o	r (suburb o	r (suburb or
Mala and Star	forest).	forest).	torest).	torest).	torest).
	20	20	20	20	20
Maximum neat exposure duration (s)	30 Nia	30	30	30	30
Take protective effects of clothing into account	NO	NO	NO	NO	NO
Grid resolution					
Reporting	LOW	LOW	LOW	LOW	LOW
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	100	100	100	100	100
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	lot Eiro	Jet Fire	lat Eira	lat Eira	lot Eiro
Posulte		H2 20			
Results	H2 100	bar/10	nz 50	CH4 5 bor/6 cm	HZ 33
	bai/2Cm	cm	Jai/4CIN		
Source Definition					
Type of flow of the jet	Choked	Choked	Choked	Choked	Choked
	flow	flow	flow	flow	flow
Exit velocity of expanding jet (m/s) Fire Results	2430.2	2155.3	2331.1	623.39	2258.8

Wind speed at avg. jet height (m/s) Angle between hole and flame axis (alpha) (deg) Frustum lift off height (b) (m) Width of frustum base (W1) (m) Width of frustum tip (W2) (m) Length of frustum (flame) (RI) (m) Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW Surface area of frustum (m2)	6.0765 6.8216 3.0171 0.078212 4.3075 12.763 4;-1;1;4 103.7 70	7.7384 7.5499 6.0972 0.23366 9.0602 26.429 8;-1;3;9 455.68	6.7951 7.1346 4.0807 0.12466 5.916 17.423 5;-1;2;6 195.09 70	5.9852 18.353 2.6557 0.095115 4.7853 13.033 6;0;4;5 119.51 297.41	7.2035 7.3148 4.8527 0.1638 7.1062 20.846 6;-1;2;7 281.02
Surface emissive power (clear hame) (kW/m2)	70	70	70	207.41	70
(Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2)	0.043153	0.19284	0.082054	0.16757	0.11875
Atmospheric transmissivity at Xd (%)	68.1	68.136	68.133	68.31	68.143
(Max) Viewfactor at Xd (-)	0.0009052	30.004043	10.001720	50.001085 9	90.0024895
Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3)	0.45408	3.3423	1.0697	2.7715	1.7511
Percentage first degree burns at Xd (%)	0	0	0	0	0
Percentage second degree burns at Xd (%)	0	0	0	0	0
Percentage lethal burns at Xd (%)	0	0	0	0	0
Distance to clothing burning dose (m)	0	0	0	0	0
Contour maximum distances					
Heat radiation contours distance [m]	Jet Fire H2 100 bar/2cm	Jet Fire H2 20 bar/10 cm	Jet Fire H2 50 bar/4cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 33 bar/6 cm
10 kW/m2 heat radiation contour	0	0	0	13	0
Lethality contours distance [m]	Jet Fire H2 100 bar/2cm	Jet Fire H2 20 bar/10 cm	Jet Fire H2 50 bar/4cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 33 bar/6 cm
1 % lethality contour	0	0	0	16	0
Other information					

Main program Last calculation

EFFECTS 12.0.1.22111 29.11.2023 22:48:48

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 29.11.2023 22:48:48

Comparison set

Model: Gas Release from Long Pipeline

version: v2023.12.4ac4940 (11.12.2023) Reference: Yellow Book 3rd Version 1997, Paragraph 2.5.2.5 **Parameters**

	Gas Release	Gas Release	Gas Release	Gas Release	Gas Release
Inputs	from	from	from	from	from
•	Long	Long	Long	Long	Long
	H2	H2	H2	CH4	H2
Process Conditions				••••	
Chemical name	HYDROGE		NHYDROGE	METHAN	
	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)
Initial temperature in vessel (°C)	9	9	9	9	9
Initial (absolute) pressure in pipeline (bar)	150	25	75	5	50
Calculation Method					
Use which representative rate	Maximum	Maximum	Maximum	Maximum	Maximum
	rate	rate	rate	rate	rate
Maximum release duration (s)	30	30	30	30	30
Use double sided outflow	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Source Definition					
Flowrate inlet feed (kg/s)	0	0	0	0	0
Process Dimensions					_
Pipeline length (km)	5	5	5	5	5
Pipeline diameter (mm)	20	120	40	60	60
Pipeline roughness (mm)	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045
Environment					
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20	20
Ambient pressure (bar)	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151	1.0151
	Gas	Gas	Gas	Gas	Gas
	Release	Release	Release	Release	Release
Results	from	from	from	from	from
Nesuris	Long	Long	Long	Long	Long
	Pipeline	Pipeline	Pipeline	Pipeline	Pipeline
	H2	H2	H2	CH4	H2
Source Definition	10 5 10				
Initial mass in pipeline (kg)	18.548	119.66	38.721	48.854	58.942
Mass flow rate at time t (kg/s)	0.14783	1.3064	0.38524	0.29243	0.63437
Nodel Valid until time (s)	1.9527	1.9527	1.9527	5./115	1.9527
Nett mass flow to air (jet) (kg/s)	0.27214	2.96/9	0.70377	0.4008 I	1.2101
Based upon duration until (s)	5U E 7270	30 25 607	3U 11 734	3U 4 0725	30 17 716
Calculated corresponding Hele Diameter (mm)	2.1210	35.097 160 71	56 560	4.9733	0/ 952
	20.204 5 7279	25 607	30.309 11 73 <i>1</i>	04.035	04.033
Representative outflow duration (s)	2	2	2	4.9735	2
Representative procesure (bar)	5 150	5 25	5 75	5	5
Representative temperature ($^{\circ}$ C)	9	9	9	9	9
Representative density (kg/m3)	1 106	1 0144	1 0777	1 2072	1 0571
Process Dimensions					
Pipeline volume (m3)	1 5708	56.549	6,2832	14,137	14,137
		20.275	5.2052		

Contour maximum distances

Other information

Main program

EFFECTS 12.0.1.22111

Last calculation

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 11.12.2023 14:25:37

Comparison set

Model: Jet Fire

version: v2023.12.79c21b6 (11.12.2023)

Reference: Chamberlain, G.A., Development in design methods for predicting thermal radiation from flares~Chem. Eng. Res. Des. Vol.65 July 1987 pagina 299 - 309~Cook,J. et al, A comprehensive program for the calculation of flame radiation levels~Loss Prev. in Process Ind. January 1990, vol.3 ~Damage: Green Book 1st edition 1992, chapter 1 (Heat radiation); pages 11-36

Parameters

Inputs	Jet Fire H2 150 bar/2cm	Jet Fire H2 25 bar/12 cm	Jet Fire H2 75 bar/4 cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 50 bar/6 cm
Process Conditions					
Chemical name	HYDROGEINHYDROGEINHYDROGEINHETHANEHY				
	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)	(DIPPR)
Exit temperature (°C)	9 150	9	9	9	9
Exit pressure (bar)	150	25	15	5	50
Source Definition	F 7270	25 607	11 724	4 0725	17 716
(Calculated) Mass flow rate (kg/s)	5./3/8	35.697	11./24	4.9735	17.716
	20.204	100 71	56 560	04.052	04.052
Hole diameter (mm)	28.284 Decured a d	169./1 Decide d	56.569 Decisional de al	84.853	84.853
Hole rounding	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded	Rounded
Outflow angle in VZ plane (0° having the 00° watting) (dec)	eages	eages	eages	eages	eages
Unight of release (7 coordinate) (m)	90	90	90	90	90
Height of release (Z-coordinate) (m)	0	0	0	0	0
Descuill stability close					
Pasquill stability class	(Noutral)	(Noutral)	D (Noutral)	(Noutral)	D (Noutral)
Wind speed at 10 m height (m/c)	(Neutral)	(Neutral)	(ineutral)	(Neutral)	(Neutral)
Production direction	J \\/	J \\/	5 \\/	5	
	vv	vv	vv	vv	vv
Ambient temperature (°C)	20	20	20	20	20
Ambient temperature (C)	20	20	20	20	20
Ambient plessure (bai)	70	70	70	70	70
Poughness length description	Poqular	Poqular	Poqular	Poqular	Poqular
Roughness length description	largo	largo	largo	largo	largo
	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle	obstacle
	coverage	coverage	coverade	coverade	coverage
	(suburb o	burb or (suburb or (suburb or (suburb			
	forest)	forest)	forest)	forest)	forest)
Vulnerability					101000)
Maximum heat exposure duration (s)	30	30	30	30	30
Take protective effects of clothing into account	No	No	No	No	No
Accuracy	-	-	-	-	-
Grid resolution	Low	Low	Low	Low	Low
Reporting					
Reporting/receiver distance (Xd) (m)	100	100	100	100	100
Reporting/receiver height (Zd) (m)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	lat Eiro	Jet Fire	lot Eiro	lot Fire	lot Eiro
Posulte		H2 25			
Results	H2 150	bar/12	nz / j har// cm	CH4 5 bar/6 cm	har/6 cm
	uai/2Cin	cm	Jai/4 CM		
Source Definition					
Type of flow of the jet	Choked	Choked	Choked	Choked	Choked
	flow	flow	flow	flow	flow
Exit velocity of expanding jet (m/s) Fire Results	2478.1	2203.9	2392	623.39	2331.1

Wind speed at avg. jet height (m/s) Angle between hole and flame axis (alpha) (deg) Frustum lift off height (b) (m) Width of frustum base (W1) (m) Width of frustum tip (W2) (m) Length of frustum (flame) (RI) (m) Flame footprint dimensions D,-D,DMW,MW Surface area of frustum (m2) Surface emissive power (clear flame) (kW/m2) Surface emissive power (sooted flame) (kW/m2) (Max) Heat radiation level at Xd (kW/m2) Atmospheric transmissivity at Xd (%) (Max) Viewfactor at Xd (-) Heat radiation dose at Xd (s*(kW/m2)^4/3) Percentage first degree burns at Xd (%) Percentage lethal burns at Xd (%)	6.4507 6.8569 3.535 0.088624 5.0663 14.988 4;-1;2;5 143.19 70 70 0.059928 68.116 0.0012569 0.70355 0 0 0	8.2959 7.503 7.783 0.2996 11.639 33.869 10;-1;4;12 750.48 70 70 0.31389 68.103 0.0065843 6.3995 0 0 0	7.1709 7.1104 4.7992 0.14149 6.9792 20.529 26;-1;2;7 271.06 70 0.11447 68.137 30.0024 1.6674 0 0	5.9852 18.353 2.6557 0.095115 4.7853 13.033 6;0;4;5 119.51 287.41 225.91 0.16757 68.31 0.0010855 2.7715 0 0 0	7.5873 7.2513 5.7365 0.18633 8.4213 24.68 7;-1;3;8 394.04 70 70 0.16668 68.132 90.0034949 2.752 0 0 0
Distance to clothing burning dose (m)	0	0	0	0	0
Contour maximum distances					
Heat radiation contours distance [m]	Jet Fire H2 150 bar/2cm	Jet Fire H2 25 bar/12 cm	Jet Fire H2 75 bar/4 cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 50 bar/6 cm
10 kW/m2 heat radiation contour	0	0	0	13	0
Lethality contours distance [m]	Jet Fire H2 150 bar/2cm	Jet Fire H2 25 bar/12 cm	Jet Fire H2 75 bar/4 cm	Jet Fire CH4 5 bar/ 6 cm	Jet Fire H2 50 bar/6 cm
1 % lethality contour	0	0	0	16	0
Other information					

Main program Last calculation

EFFECTS 12.0.1.22111 11.12.2023 12:15:35

EFFECTS report created by VDI-P-GIS-125\tirim at 11.12.2023 12:16:27