

Weiterentwicklung Screening- und RE-Methodik

Version 1.2 | 13. Juli 2017

Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von leicht brennbaren Flüssigkeiten (LS Benzin)

Bundesamt für Verkehr BAV / Bundesamt für Umwelt BAFU



Änderungsjournal

Datum	Version	Änderungen
03. Feb. 2017	Version 0.1	Erstellt durch Dr. Peter Gerber, Dr. Renato Spahni, Dr. Kathrin Keller
07. April 2017	Version 1.0	Geändert durch Dr. Peter Gerber, Dr. Renato Spahni, Dr. Kathrin Keller
30. Juni 2017	Version 1.1	Geändert durch Dr. Kathrin Keller
13. Juli 2017	Version 1.2	Geändert durch Dr. Kathrin Keller

Impressum

Auftragsnummer BE.N.16187
Auftraggeber Bundesamt für Verkehr BAV / Bundesamt für Umwelt BAFU
Datum 13. Juli 2017
Version 1.2
Autor(en) Dr. Peter Gerber, Dr. Renato Spahni, Dr. Kathrin Keller
Freigabe Dr. Peter Gerber
Datei J:\F_rm\BE.N.16187.100\4_plan\Bericht\20170713_FAW_brennbare_Flüssigkeiten_V_1.2.docx
Seitenanzahl 98
Copyright © Emch+Berger AG Bern

Inhalt

Inhalt	i
Zusammenfassung	1
Summary	3
1 Einleitung	5
2 Vorgehensweise	6
3 Grundlagen	9
4 Glossar	13
5 Recherche und Beschreibung Stand der Technik	16
5.1 Modul 1: Freisetzung	16
5.1.1 Grosses Leck/Bruch/Bersten Behältnis (instantane Freisetzung)	17
5.1.2 Leck Kessel/Tank (kontinuierliche Freisetzung).....	18
5.1.3 Leck/Ausfluss Rohr (kontinuierliche Freisetzung)	19
5.1.4 Zerstäubung durch kleines Leck	20
5.1.5 BLEVE Kessel/Tank	20
5.1.6 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen	22
5.2 Modul 2: Lachenbildung, Verdampfung	22
5.2.1 Fläche Lache	22
5.2.2 Tiefe einer Lache auf ebener Oberfläche	22
5.2.3 Tiefe einer Lache auf unebener Oberfläche	23
5.2.4 Ausbreitung Lache auf Wasserkörper	23
5.2.5 Ausbreitung Lache in freiem Gelände, ebener Untergrund	23
5.2.6 Lachenausbreitung verdämmt	24
5.2.7 Verdampfung	24
5.2.8 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen	25
5.3 Modul 3: Ausbreitung und Verdünnung der Gaswolke (Benzindämpfe)	25
5.3.1 Modellierung	25
5.3.2 Neutrale Gaswolke unverdämmt	26
5.3.3 Schwere Gaswolke unverdämmt	28
5.3.4 CFD-Modelle	28
5.3.5 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen	28
5.4 Modul 4: Zündung	29
5.4.1 Sofortige Zündung	30
5.4.2 Verzögerte Zündung	32
5.4.3 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen	33
5.5 Modul 5: Wirkung auf den Menschen	33
5.5.1 Wirkung des Ereignisses	33
5.5.1.1 Lachenbrand	33
5.5.1.2 Verpuffung (kurz nach Benzinaustritt oder unverdämmt Gaswolke)	34
5.5.1.3 Feuerball	35
5.5.1.4 Stichflamme	35
5.5.1.5 Explosion	35

5.5.2	Wirkung auf den Menschen.....	37
5.5.2.1	Feuer	37
5.5.2.2	Explosion.....	38
5.5.2.3	Rauch	40
5.5.2.4	Probit-Funktionen zur Abschätzung	41
5.5.3	Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	43
5.6	Resultate der Literaturrecherche	50
6	Anforderungsprofil an EDV-Applikationen.....	51
6.1	Spezifische Fragen	51
6.2	Relevante Szenarien.....	52
6.3	Übersicht Anforderungsprofil an EDV-Applikationen	54
7	Vergleich und Beurteilung von EDV-Anwendungen	57
7.1	EFFECTS.....	57
7.1.1	Spezifische Parameter und Einstellungen	58
7.1.2	Beurteilung Stand der Technik.....	59
7.1.3	Dokumentation der Methodik	61
7.1.4	Methodische Aktualisierung.....	61
7.2	PHAST	61
7.2.1	Spezifische Parameter und Einstellungen	62
7.2.2	Beurteilung Stand der Technik.....	63
7.2.3	Dokumentation der Methodik	64
7.2.4	Methodische Aktualisierung.....	64
7.3	Gesamtbeurteilung des Modellvergleichs	64
7.3.1	Stand der Technik.....	64
7.3.2	Dokumentation der Methodik	65
7.3.3	Methodische Aktualisierung.....	65
7.3.4	„no go“-Kriterien	65
8	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	67

Zusammenfassung

Der Umgang mit leicht brennbaren Flüssigkeiten (zusammengefasst im Leitstoff Benzin) ist mit Risiken behaftet. Zur Abschätzung der Risiken von Gefahrguttransporten mit der Bahn gemäss Störfallverordnung (StFV) werden einerseits netzweite Risikoscreenings (Stufe Kurzbericht), andererseits lokale Risikoermittlungen durchgeführt. Die methodische Basis für die Ermittlung der Risiken soll weiterentwickelt werden, das Ziel des vorliegenden Projektes ist die Aktualisierung der verwendeten Rechenmodelle für die Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung auf den Menschen von leicht brennbaren Flüssigkeiten.

In einem ersten Teil wird mit einer gründlichen Literaturrecherche der Stand der Technik der Modellierung der letalen Wirkung auf Personen durch die Freisetzung von leicht brennbaren Flüssigkeiten ermittelt, die Resultate sind im Folgenden zusammengefasst. Eine wichtige Referenz und Grundlage für die Einordnung neuerer Modellansätze ist das "Yellow Book" von TNO, in erster Auflage erschienen im Jahre 1996 und anschliessend weiterentwickelt. Im Anschluss an die Literaturrecherche werden in einem zweiten Teil zwei bestehende EDV-Applikationen (EFFECTS und PHAST) mit dem in Teil 1 eruierten Stand der Technik im Detail verglichen.

Stand der Technik

Bei der **Freisetzung** von leicht brennbaren Flüssigkeiten hat sich der Stand der Technik wenig verändert – für grundlegende Vorgänge wie die instantane Freisetzung durch Bruch des Behältnisses oder die kontinuierliche Freisetzung durch ein Leck sind die Modelle im "Yellow Book" noch aktuell. Eine spezielle Form der kontinuierlichen Freisetzung ist die Überfüllung eines Tanks, wie geschehen in Buncefield, UK, im Jahr 2005. Für die Modellierung eines solchen komplexen Ereignisses und seiner Folgen ist jedoch die Berücksichtigung von Topographie/Bebauung und des 3D Windfelds notwendig, z.B. mittels eines CFD-Modells. Bei der **Lachenbildung** sind noch die empirischen Modelle des "Yellow Book" aktuell. Im freien Gelände beinhaltet dies allerdings einige potentiell problematische Punkte wie die Nicht-Berücksichtigung von Abfluss auf geneigter Fläche sowie Versickerung. Die empirischen Modelle der "Yellow Book" -Generation für **Verdampfung** zeigen gute Leistungen in offenem, homogenen Gelände. Für komplexe, bebaute Umgebungen sind jedoch mittlerweile CFD-Modelle Mittel der Wahl. Ähnlich verhält es sich bei den Modellen für die **Ausbreitung** und Verdünnung von Gaswolken. In flachem, offenem Gelände liegen die empirischen Modelle in etwa gleichauf mit den komplexeren Modellen. Bei der Ausbreitung in komplexem, bebauten Gelände wären gegebenenfalls CFD-Modelle anzuwenden. Bei der Eintretenswahrscheinlichkeit einer **Zündung** ist die Art der Freisetzung von Bedeutung: Handelt es sich um eine stationäre Installation oder um ein Transportfahrzeug, und verläuft die Freisetzung spontan oder kontinuierlich? Die vorgestellten empirischen Modelle für Lachenbrand, Feuerball, Bersten eines Behälters/BLEVE sowie Gaswolkenexplosion liefern gute Resultate, ein gewisses Expertenwissen vorausgesetzt. In komplexem Gelände werden mittlerweile ebenfalls CFD-Modelle verwendet, ein Beispiel ist die Abschätzung von Gaswolkenexplosionen auf Offshore-Plattformen. Zur Abschätzung der direkten **Wirkung auf den Menschen**, beispielsweise in Form von Letalität, können Probit-Funktionen herangezogen werden.

Die Wahl des besten Modells ist abhängig von Ort und Fragestellung. Für Risikoabschätzungen im offenen Gelände sind empirische Modelle wie jene des "Yellow Book" eine gute Grundlage. Empirische Modelle sind jedoch nicht in der Lage, Verdämmung adäquat zu berücksichtigen. Somit sind sie für eine robuste, quantitative Risikoabschätzung für komplexe Fragestellungen mit Einflüssen von Topographie, Bebauung etc. nicht oder nur bedingt geeignet. Zur Analyse der entsprechenden Ereignisse und Szenarien wird auf CFD-Modelle verwiesen.

Evaluation EDV-Applikationen

Zwei gängige EDV-Applikationen, EFFECTS und PHAST, wurden anhand des zuvor erhobenen Standes der Technik bewertet und miteinander verglichen. Hierbei liegt der Fokus auf Szenarien mit Personenrisiken. Dies ist in erster Linie Lachenbrand, die entsprechende Wirkung Hitzestrahlung

und zusätzlich Rauch, je nach Situation. Ein weiteres relevantes Szenario ist verdämmte Gaswolkenexplosion (VCE) infolge Ablauf von Benzin in die Kanalisation oder eine Unterführung. Wie bereits angesprochen sind empirische Modelle jedoch limitiert bei der adäquaten Darstellung von verdämmten Strukturen. Deshalb wird das Szenario verdämmte Gaswolkenexplosion, obwohl relevant, beim Vergleich der beiden EDV-Anwendungen nicht berücksichtigt. Beide Modelle weisen in diesem Bereich ein Defizit aus.

Bezüglich der zugrundeliegenden physikalischen Modelle gibt es zwischen EFFECTS und PHAST grosse Ähnlichkeiten und teilweise Überschneidungen. Limitiert sind beide Tools bei Versickerung/Abfluss während der Lachenbildung (Versickerung/Abfluss werden nicht berücksichtigt) sowie generell bei der Berücksichtigung von verdämmten Strukturen. Zündungswahrscheinlichkeiten sind jeweils überhaupt nicht implementiert. EFFECTS hat Vorteile durch zusätzliche relevante Auswahlparameter sowie bei Lachenbrand. Bei letzterem ist PHAST limitiert auf saubere und russige Verbrennung, Zwischenstufen wie bei EFFECTS sind nicht möglich.

Bezüglich der methodischen Aktualisierung sind die Tools vergleichbar – beide werden fortlaufend weiterentwickelt. Die theoretische Dokumentation der physikalischen Modelle ist für beide Tools grundsätzlich sehr gut, bei der Beschreibung der technischen Implementierung hat PHAST Vorteile. So werden bei PHAST beispielsweise sämtliche Input- und Outputparameter sowie ihre Implementierung im Modell detailliert aufgeführt. Die Ansätze zur Abschätzung von Auswirkungen auf den Menschen sind für EFFECTS sehr gut, für PHAST jedoch nur unzureichend beschrieben.

Empfehlung

Theoretischer Hintergrund, Anwendungsbereich sowie Limitierungen der zwei Tools sind sehr ähnlich. PHAST besitzt zusätzliche Funktionen wie das gleichzeitige Berechnen mehrerer Meteoszenarien, jedoch rechtfertigt dies allein nicht den substantiell höheren Preis. EFFECTS erlaubt zudem eine differenziertere Analyse von Lachenbränden, einem im Kontext LS Benzin sehr relevanten Szenarios, und ist deshalb vorzuziehen. Beide sind ungeeignet für das Szenario verdämmte Gaswolkenexplosion, hier sind gegebenenfalls CFD-Modelle einzusetzen.

Summary

The handling of highly flammable liquids (summarized in the lead substance gasoline) is associated with risks. To assess the risks of the transport of dangerous goods by rail according to the Major Accidents Ordinance (StFV), network-wide risk screenings (stage brief report) as well as local risk assessments are carried out. The methodological basis for the identification of risks is to be refined, the aim of this project is the updating of the calculation models used for the release, spread and effect on humans of highly flammable liquids.

In a first step, a thorough literature research is conducted to determine the state of the art of the modeling of lethal effects on persons associated with the release of highly flammable liquids. An important work of reference and basis for the classification of more recent model approaches is the "Yellow Book" of TNO, first published in 1996 and then periodically improved. Following the literature research, two existing IT applications (EFFECTS and PHAST) are compared in detail with the state of the art.

State of the art

For the **release** of highly flammable liquids, the state of the art has little changed. The models in the "Yellow Book" are still up-to-date for basic processes such as the instantaneous release due to breakage of the container or the continuous release through a leak. A peculiar form of continuous release is the overfilling of a vertical tank, as occurred in Buncefield, UK, in 2005. However, the modeling of such a complex event and its consequences requires the consideration of topography/development and the 3D wind field, e.g. by using a Computational fluid dynamics (CFD) model. The empirical models of the "Yellow Book" are still up-to-date for **pool formation**. In open terrain, however, this involves some potentially problematic points such as the non-consideration of run-off on inclined surfaces as well as seepage. The empirical models of the "Yellow Book"-generation for **evaporation** show good performance in open, homogeneous terrain. For complex, built-up environments, however, CFD models are now the means of choice. The same holds for the modeling of the **dispersion** and dilution of gas clouds. Over flat, open terrain, empirical models are roughly of equal skill than more complex models. Over complex, developed terrain, CFD models could be an option. The type of a release is of importance for the **ignition** probability: does it affect a stationary installation or a transport vehicle, and is it spontaneous or continuous? The presented empirical models for pool fire, fireball, vessel rupture/BLEVE and vapor cloud explosion (VCE) provide good results, assuming a certain expert knowledge. For complex terrain, CFD models are now also being used. An example is the assessment of VCEs on offshore platforms. To estimate the **direct effects on humans**, for example lethality, probit functions can be used.

The choice of the best model depends on the location and the question. Empirical models are a good basis for risk assessments in open areas. However, they are not capable of adequately taking confinement into account. Thus, they are not, or only conditionally, suitable for a robust, quantitative risk assessment for complex questions with influences from topography, building development, etc. For the analysis of such scenarios, reference is made to CFD models.

Evaluation IT applications

Two established IT applications, EFFECTS and PHAST, have been compared and evaluated against the previously determined state of the art. The focus is on scenarios with personal risks. This is primarily pool fire, the corresponding effect being heat radiation (further smoke, depending on the situation). Another relevant scenario is confined VCE resulting from gasoline entering the sewer or an undercrossing. Yet, as mentioned before, empirical models are limited in the representation of confining structures. This is the reason why the scenario confined VCE, although relevant, is not further considered in the comparison of the two IT applications.

Regarding the underlying physical models, EFFECTS and PHAST show great similarities and partial

overlaps. Both tools are limited in the case of runoff/seepage during pool formation (runoff/seepage are not considered) as well in the representation of confining structures. Ignition probabilities are not implemented at all. EFFECTS has advantages through additional relevant selection parameters as well as for pool fire. For the latter, PHAST is limited to clean and smoky combustion, intermediate stages as for EFFECTS are not possible.

Regarding methodical updates, the tools are comparable - both are continuously developed. The theoretical documentation of the physical models is good for both tools, PHAST has advantages for the description of the technical implementation. For example, all input and output parameters as well as their implementation in the model are listed in detail in PHAST. The documentation of the approaches for estimating impacts on human beings is very good for EFFECTS but inadequate for PHAST.

Recommendation

Theoretical background, scope and limitations of the two tools are very similar. PHAST provides additional functions such as the simultaneous calculation of several meteorological scenarios, but this alone does not justify the substantially higher price. EFFECTS allows a more comprehensive analysis of pool fires, a scenario very relevant in the context of highly flammable liquids, and is therefore preferable. Both tools are unsuitable for scenarios involving confined VCEs, here CFD models could be an option.

1 Einleitung

Der Umgang mit leicht brennbaren Flüssigkeiten (zusammengefasst im LS Benzin) und deren Transport ist mit Risiken behaftet. Mögliche Szenarien beinhalten die instantane Freisetzung durch Bruch des Behältnisses (Bersten Stehtank, Aufbrechen Tankwagen in Folge Unfall) oder kontinuierliche Freisetzung durch Leckage, jeweils gefolgt von einer möglichen Ausbreitung der Substanz und Wirkung auf den Menschen. Diese Risiken sind gemäss den Vorgaben der Störfallverordnung (StFV) [1] zu bewerten.

Für die Beurteilung der Risiken aus dem Gefahrguttransport mit der Bahn werden einerseits netzweite Risikoscreenings (Stufe Kurzbericht), andererseits lokale Risikoermittlungen durchgeführt. Die methodische Basis für die Ermittlung der Risiken geht auf den Methodikbericht Screening Personenrisiken [2] und die „Pilotrisikoanalyse Bahn“ [3] zurück und soll nun weiterentwickelt werden.

Im vorliegenden Projekt geht es insbesondere um die Aktualisierung der verwendeten Rechenmodelle für die Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von leicht brennbaren Flüssigkeiten auf den Menschen (Modellsubstanz Benzin).

Bei diesen Modellen werden neben ortsspezifischen Einflussgrössen zahlreiche Modellparameter verwendet, welche oft auf Expertenschätzung beruhen und das Ergebnis der Risikoberechnung teilweise stark beeinflussen. Zudem müssen für eine komplette Risikoanalyse meistens einzelne Modellkomponenten kombiniert werden. Es ist daher zu eruieren, welche Modelle oder Modellkomponenten dem aktuellen Wissenstand entsprechen und zweckmässig für die Risikoanalyse eingesetzt werden können.

Das Ziel des vorliegenden Projekts besteht darin, den Stand der Technik bezüglich der Modellierung der Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung von leicht brennbaren Flüssigkeiten (LS Benzin) zu ermitteln und entsprechende EDV-Applikationen zu vergleichen und zu beurteilen. Die Analyse ist in die folgenden zwei Teile gegliedert:

Teil 1: Recherche und Beschreibung des Standes der Technik

In einem ersten Teil wird mit einer gründlichen Literaturrecherche der Stand der Technik bei der Modellierung der letalen Wirkung auf Personen durch die Freisetzung von leicht brennbaren Flüssigkeiten ermittelt. Alle in der Modellierung berücksichtigten Einzelabläufe von der Freisetzung bis zur Wirkung auf den Menschen werden in geeigneten Schritten (Modulen) betrachtet. Hierbei wird die Freisetzung von flammbaren Flüssigkeiten generell zugrunde gelegt, die Szenarien sind nicht auf Eisenbahntransporte beschränkt.

Teil 2: Vergleich und Beurteilung von EDV-Applikationen

Im Anschluss werden in einem zweiten Teil die EDV-Applikationen EFFECTS und PHAST analysiert und bewertet. Hierbei werden die in den EDV-Applikationen verwendeten Berechnungsmodelle mit dem in Teil 1 eruierten Stand der Technik im Detail verglichen. In Teil 2 werden nicht mehr alle möglichen Szenarien verfolgt, es erfolgt eine Fokussierung auf den Transport von leicht brennbaren Flüssigkeiten mit der Bahn.

2 Vorgehensweise

Für den ersten Teil, die Recherche und Beschreibung des Standes der Technik, wurden in einem ersten Schritt Grundlagen analysiert und die möglichen Szenarien für den LS Benzin festgelegt (Abbildung 2-1). Dann wurde im Rahmen einer gründlichen Literaturrecherche der Stand der Technik zur Modellierung der einzelnen Vorgänge festgestellt und schriftlich dokumentiert. Der Ausgangspunkt hierfür waren die TNO Coloured Books - Yellow [4], Green [5] und Purple [6]. Anhand neuerer und neuster Literatur wurde untersucht, ob die Coloured Books noch dem Stand der Technik entsprechen. Falls nicht, wurden entsprechend neuere Modelle und Ansätze dokumentiert. Zudem wurden weitere Ereignisse aufgegriffen, die in den Szenarien identifiziert, jedoch in den Coloured Books nicht berücksichtigt wurden. Falls Modelle als gleichwertig erachtet werden, ist dies so anzugeben.

Für den zweiten Teil, den Vergleich und die Beurteilung der EDV-Applikationen, wurden zunächst die für den Transport des LS Benzin mit der Bahn relevanten Szenarien definiert (Abbildung 2-2). Dann wurden die zwei EDV-Applikationen EFFECTS und PHAST detailliert charakterisiert (Kapitel 7; siehe auch Anhang). Grundlage hierfür sind jeweils die methodische Dokumentation sowie das Nutzerhandbuch der EDV-Applikation, Artikel zu Teilsystemen der EDV-Applikation aus der Literatursuche sowie die Prüfung des Tools selbst. Zum Abschluss wurden die in den EDV-Applikationen verwendeten Berechnungsmodelle anhand der relevanten Szenarien mit dem in Teil 1 eruierten Stand der Technik im Detail verglichen und bewertet, zusätzlich wurden die Dokumentation der Methodik (Ausführlichkeit und fachliche Qualität der Literaturquelle, Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Modells) und die methodische Aktualisierung der Applikationen analysiert und verglichen.

Folgende Dinge sind zu beachten:

- Heizöl und Diesel, obwohl Teil des LS Benzin, werden nicht berücksichtigt. Grund ist der bedeutend höhere Flammpunkt dieser beiden Substanzen. Ebenfalls werden Pipelines nicht berücksichtigt – die zwei in der Schweiz vorhandenen transportieren Öl.
- Teil 1, die Recherche und Beschreibung des Standes der Technik, ist generell gehalten (Szenarien: Abbildung 2-1). Für Teil 2, Vergleich und Beurteilung der EDV-Applikationen, wird der Schwerpunkt auf den Transport des LS Benzin mit der Bahn gelegt. Dementsprechend werden im zweiten Teil nur für die Bahn relevante Szenarien im Detail untersucht (Abbildung 2-2).

Der vorliegende Bericht ist folgendermassen aufgebaut: Für den ersten Teil, den Stand der Technik, sind die jeweiligen Modelle in einer Tabelle gesammelt, detailliertere Erklärungen und weiterführende Informationen finden sich in den zugehörigen Abschnitten. Im Anschluss werden aus den Ergebnissen der Feststellungen und Analysen die Schlussfolgerungen für die Beantwortung der gestellten Fragen gezogen sowie das genaue Anforderungsprofil an die EDV-Applikationen definiert. Hierbei erfolgt eine Fokussierung auf die im Kontext LS Benzin/Bahn relevanten Szenarien.

Für den zweiten Teil, den Vergleich und die Beurteilung der EDV-Applikationen, werden die beiden Tools zunächst in Kapitel 7 detailliert charakterisiert. Weiterführende Informationen, beispielsweise Listen der Inputparameter der einzelnen Module, finden sich in einer Tabelle im Anhang. Der Vergleich der EDV-Applikationen mit dem Stand der Technik ist in einer Tabelle zusammengefasst.

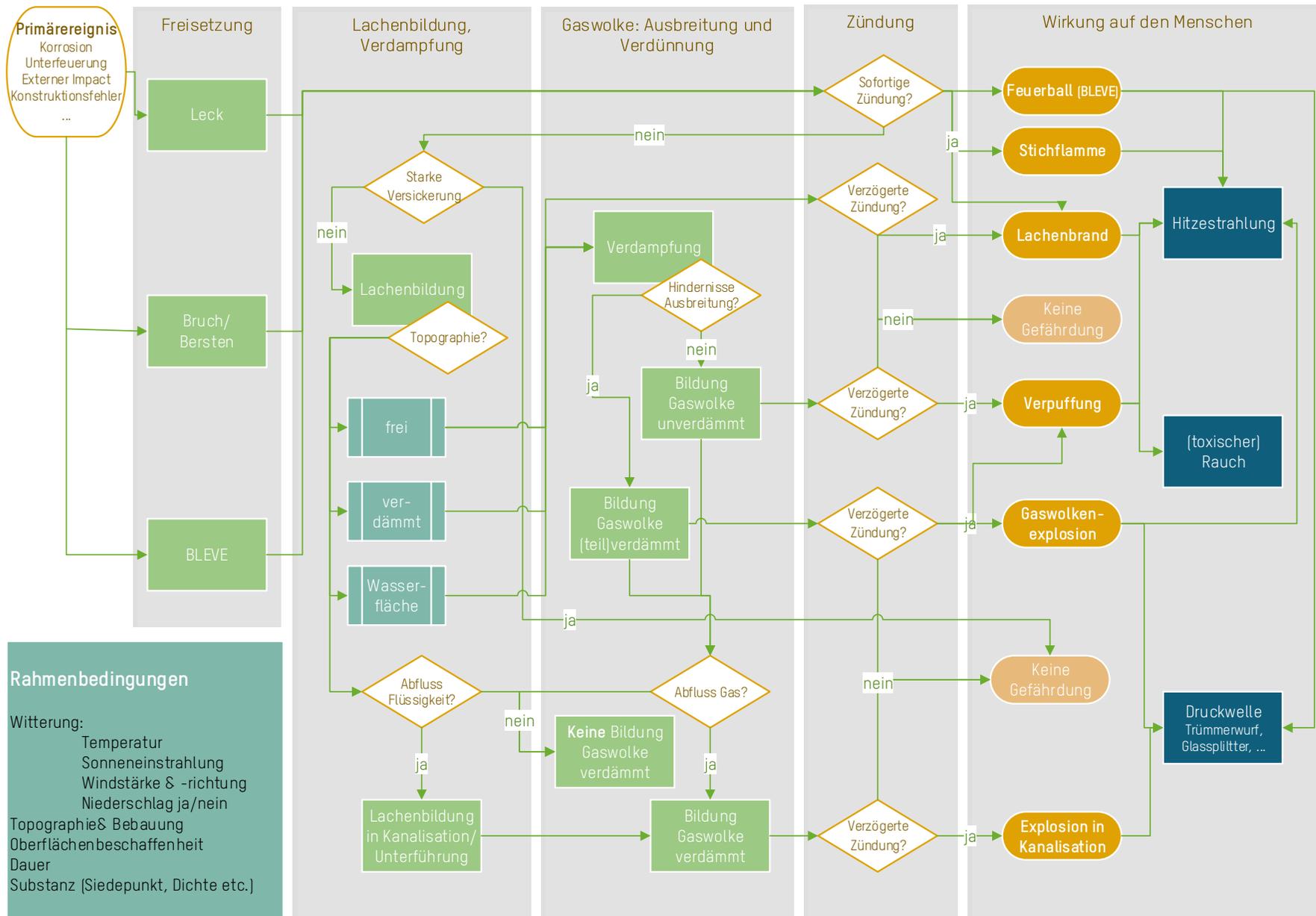


Abbildung 2-1: Übersicht Szenarien generell. Das Personenrisiko ist zusätzlich abhängig von Faktoren wie Interventionsmassnahmen und Selbstrettung.

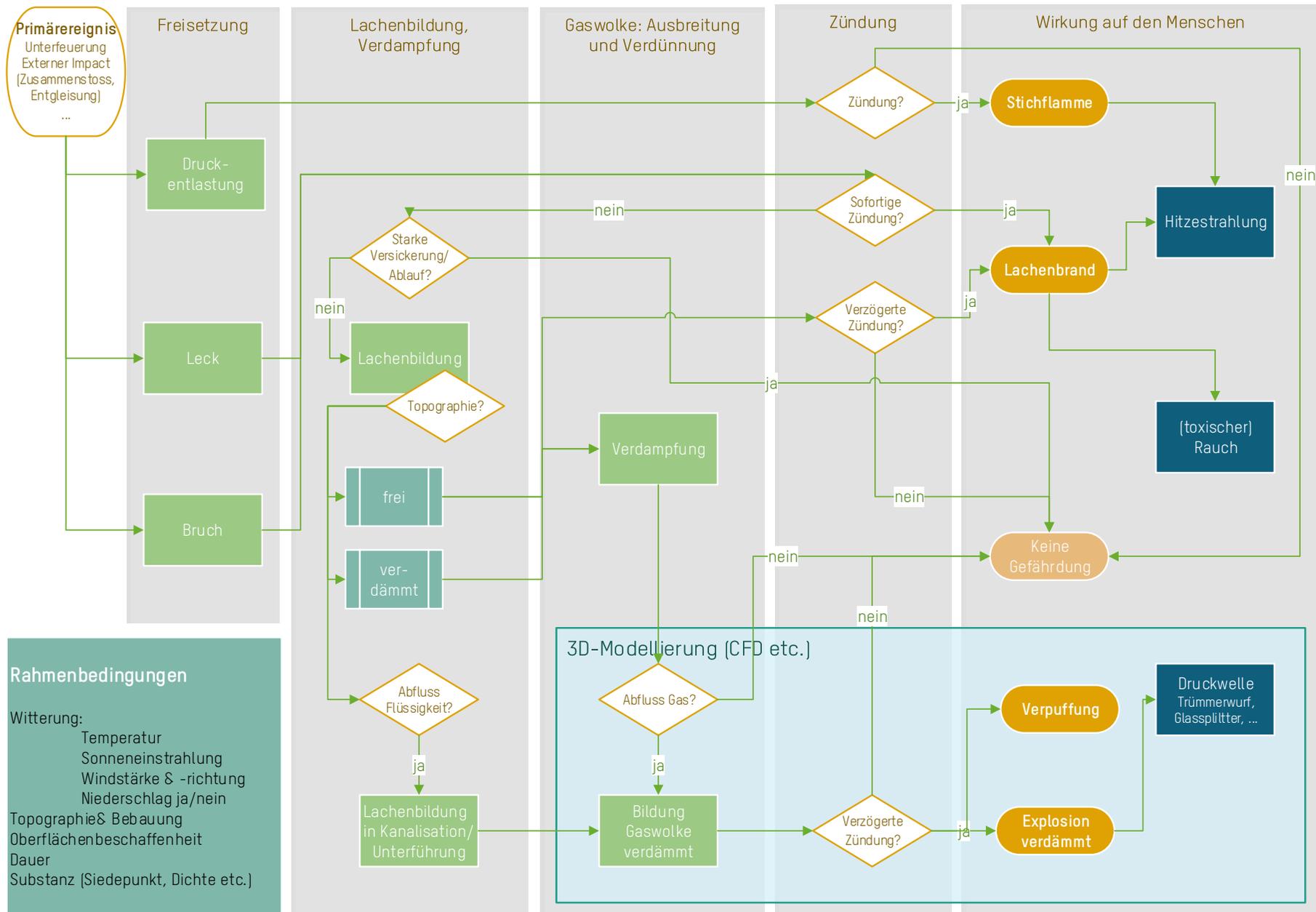


Abbildung 2-2: Übersicht der im Kontext LS Benzin/Bahn relevanten Szenarien. Das Personenrisiko ist zusätzlich abhängig von Faktoren wie Interventionsmassnahmen und Selbstrettung.

3 Grundlagen

- [1] SR 814.012, Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV) vom 27. Februar 1991.
- [2] Ernst Basler und Partner: Methodikbericht Screening Personenrisiken Bahn 2014 (Februar 2015).
- [3] Ernst Basler und Partner: Pilotrisikoanalyse PRA Bahn 1998 (inkl. Fallbeispiele und Anhang)
- [4] Ministerie van VROM: Methods for the calculation of Physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases), Publication Series on Dangerous Substances (PGS 2), Third edition Second revised print 2005, „*yellow book*“
- [5] Ministerie van VROM: Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from release of hazardous materials, Publication Series on Dangerous Substances (PGS 1), First edition 1992 (2003 erfolgte ein Update, dieses ist jedoch nur auf Niederländisch erhältlich¹), „*green book*“
- [6] Ministerie van VROM: Guidelines for quantitative risk assessment. Publication Series on Dangerous Substances (PGS 3), December 2005, „*purple book*“
- [7] Statuspapier „Quelltermberechnung bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie - Methodenübersicht und industrielle Anwendung“, DECHEMA, 2. Aktualisierte Auflage, 2014
- [8] Rhyne W. R., Hazardous Materials Transportation Risk Analysis: Quantitative Approaches for Truck and Train, 1995
- [9] Evaluation of the Dutch QRA directives for storage and transportation of flammable liquids, RIVM (Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu), RIVM report 620550001/2010, RIVM, 2010
- [10] HSC [1991]. Major Hazard Aspects of the Transportation of Dangerous Substances, Advisory Committee on Dangerous Substances, Her Majesty's Stationary Office, London, 1991.
- [11] Handleiding Risicoberekeningen Bevi, versie 3.3, RIVM, 1.7.2015 (Handbuch auf Niederländisch, die Version von 2009 ist auch auf Englisch erhältlich)
- [12] Konersmann R., Würsig A.: Leckgrößen bei Unfällen mit Eisenbahnkesselwagen, Technische Sicherheit, Bd. 3 Nr. 5, Mai 2013
- [13] Weltschev M., Schwarzer S., Otremba F. [2013]. "Comparison of the Operating Life of Tank Containers, Tank Vehicles and Rail Tank Cars for the Carriage of Dangerous Goods in Practice, Analysis of Causes of Damage", Chemical Engineering Transactions vol. 31, doi: 10.3303/CET1331094
- [14] OTIF [2014]. "Cost/benefit analysis for proposal on crash buffers for tank-wagons intended for the carriage of dangerous goods". 3rd Session of the RID Committee of Experts' standing working group. 6 May 2014
- [15] OTIF, Ordnung für die internationale Eisenbahnbeförderung gefährlicher Güter (RID), Anhang C zum Übereinkommen über den internationalen Eisenbahnverkehr und seine Anlage, Januar 2015
- [16] HSE [2012]. Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments [28/06/2012]
- [17] Fauske, H.K.: Modeling Liquid Rainout from Superheated Jet Releases, FAI Process Safety News, Fall/Winter 1997
- [18] SKS Ingenieure AG: Rahmenbericht über die Sicherheit von Stehtankanlagen für flüssige Treib- und Brennstoffe. Zürich, Schweizerische Zentralstelle für die Einfuhr flüssiger Treib- und Brennstoffe, 2005

¹ Update TNO Green Book: <http://www.publicatiereeksgevaarlijkstoffen.nl/publicaties/PGS1.html>

- [19] Fingas, M. F. (2002): "Modeling and understanding BLEVES", in: The handbook of hazardous materials spills technology, New York, McGraw-Hill
- [20] Hemmatian, B.: Contribution to the study of Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions and their mechanical effects, Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2016
- [21] Handleiding Risicoanalyse Transport (HART) + Bijlagen, versie 1.2, RIVM, 11.1.2017
- [22] Atkinson, G., S. Coldrick, et al. (2015). "Flammable vapor cloud generation from overfilling tanks: Learning the lessons from Buncefield." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 35: 329-338.
- [23] TNO Safety software EFFECTS Version 10 - User and reference manual (2016)
- [24] TNO Safety software EFFECTS - Version information (2016)
- [25] Ernst Basler und Partner AG (2015). Risiken beim Transport gefährlicher Güter mit der Bahn - Methodik zum netzweiten Screening der Umweltrisiken 2014: 56.
- [26] Trijssenaar-Buhre, I. J. M., R. P. Sterkenburg, et al. (2009). "An advanced model for spreading and evaporation of accidentally released hazardous liquids on land." *Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications - Proceedings of the Joint ESREL and SRA-Europe Conference*.
- [27] Habib, A.: Instationäre Berechnung der Lachenverdunstung mittels eines Grenzschichtverfahrens, Dissertation, TU Berlin, 2012
- [28] NOAA (2013). "ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4." NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43.
- [29] Temam, R. (1984). Navier-Stokes equations: theory and numerical analysis. Providence, Rhode Island, AMS CHELSEA PUBLISHING American Mathematical Society.
- [30] SAPHEDRA (2015). "WP1: Identification of existing tools for the modelling of hazardous phenomena". <https://projects.safera.eu/project/14>
- [31] COST Action ES1006 (2015). "Model Evaluation Case Studies." <http://www.elizas.eu/>
- [32] Siddiqui, M., S. Jayanti, et al. (2012). "CFD analysis of dense gas dispersion in indoor environment for risk assessment and risk mitigation." *Journal of Hazardous Materials* 209-210: 177-185.
- [33] Tauseef, S. M., D. Rashtchian, et al. (2011). "CFD-based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24(4): 371-376.
- [34] Emch+Berger AG (2015). Abschnitt Gotthard-Basistunnel, Sicherheitskonzept inkl. Risikoeermittlung nach StfV, QRA GBT Teil 3. LZ01-344303.
- [35] Emch+Berger AG (2007). Quantitative Risikoanalyse Lötschberg-Basistunnel - QRA LBT Teil 3: Anhang Bern.
- [36] Zhu, C., J. Jiang, et al. (2012). "Study on Ignition Probability of Flammable Materials after Leakage Accidents." *Procedia Engineering* 45: 435-441.
- [37] Rew, P. J., W. G. Hulbert, et al. (1997). "Modelling of Thermal Radiation from External Hydrocarbon Pool Fires." *Process Safety and Environmental Protection* 75(2): 81-89.
- [38] Chamberlain, G.A. (1987). "Developments in design methods for predicting thermal radiation from flares." *Chemical Engineering Research and Design* 65(4): 299-309.
- [39] HSE (2002). A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modelling. HSL/2002/02.
- [40] Mercx, W P M et al. (1998). Application of correlations to quantify the source strength of vapour cloud explosions in realistic situations. Final report for the project: 'GAMES', HSE and TNO, http://www.hse.gov.uk/research/crr_pdf/2001/crr01318.pdf.
- [41] OGP (2010). Vulnerability of humans, International Association of Oil and Gas Producers. Report No. 434 -14.

- [42] HSE (2010). Indicative human vulnerability to the hazardous agents present offshore for application in risk assessment of major accidents, SPC/Tech/OSD/30²
- [43] Chemical Industries Association (CIA), 2003. Guidance for the location and design of occupied buildings on chemical manufacturing sites, 2nd. ed., London: Chemical Industries Association, ISBN 1 85897 114 4.
- [44] SWISSGAS/Suisseplan Ingenieure AG (2010). Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen, Letalitäten bei Brandszenarien, Erläuterungen zum "Rahmenbericht zur standardisierten Ausmasseseinschätzung und Risikoermittlung".
- [45] ABSG Consulting Inc.: Consequence Assessment Methods for Incidents Involving Releases from Liquefied Natural Gas Carriers, for the FERC (Federal Energy Regulatory Commission) under contract number FERC04C40196, 2004
- [46] Brambilla, S. and D. Manca: Accidents involving liquids: A step ahead in modeling pool spreading, evaporation and burning, Journal of Hazardous Materials 161(2-3): 1265-1280, 2009
- [47] van der Voort, M. M. & Weerheijm, J., 2013: A statistical description of explosion produced debris dispersion, International Journal of Impact Engineering, 59, S. 29-37.
- [48] CCPS (2014). Guidelines for Determining the Probability of Ignition of a Released Flammable Mass. ISBN: 978-1-118-87034-1
- [49] CCPS (1994). Basic Principles of Vapor Cloud Explosions. In: Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs, John Wiley & Sons, Inc.: 69-145.
- [50] Hanna, S. R. and R. E. Britter (2002). Wind Flow and Vapor Cloud Dispersion at Industrial and Urban Sites.
- [51] OGP (2010). Consequence modelling, International Association of Oil and Gas Producers. Report No. 434 –7.
- [52] DVN-GL: "PHAST and PHAST LITE", Tutorial Manual
- [53] DVN-GL: "Release Notes PHAST", Januar 2017
- [54] DVN-GL: "Theory Discharge Scenarios (DISC)", Technical Reference PHAST, August 2014
- [55] DVN-GL: "Theory Pool Vaporisation (PVAP)", Technical Reference PHAST, August 2014
- [56] DVN-GL: "Theory Unified Dispersion Model (UDM)", Technical Reference PHAST, August 2014
- [57] DVN-GL: "Theory Indoor Dispersion", Technical Reference PHAST, August 2014
- [58] DVN-GL: "Theory Pool Fire Model (POLF)", Technical Reference PHAST, August 2014
- [59] DVN-GL: "Theory Jet Fire Model (JFSH)", Technical Reference PHAST, August 2015
- [60] DVN-GL: "Theory BLEVE Blast (BLBL)", Technical Reference PHAST, August 2014
- [61] DVN-GL: "Theory BLEV (Fireball)", Technical Reference PHAST, August 2014
- [62] DVN-GL: "Theory Exposure Model (EXPS)", Technical Reference PHAST, August 2014
- [63] DVN-GL: "Theory Obstructed Region Explosion Model (OREM)", Technical Reference PHAST, August 2015
- [64] DVN-GL: "Theory VULN Model", Technical Reference PHAST, August 2014
- [65] DVN-GL: "Theory MPACT Model", Technical Reference PHAST, August 2016
- [66] DVN-GL: "Theory Toxics Calculations (TXCS)", Technical Reference PHAST, August 2014
- [67] DVN-GL: "PHAST 3D EXPLOSIONS", Tutorial Manual
- [68] Witlox, H.W.M., and Holt, A. (1999). A unified model for jet, heavy and passive dispersion including droplet rainout and re-evaporation, International Conference and Workshop on Modelling the Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, CCPS, San Francisco, California, September 28–October 1 1999, pp. 315–344.

² http://www.hse.gov.uk/foi/internalops/hid_circs/technical_osd/spc_tech_osd_30/

- [69] Tang, M. J. and Q. A. Baker (1999). "A new set of blast curves from vapor cloud explosion." Process Safety Progress 18(4): 235-240.
- [70] Pierorazio, A. J., J. K. Thomas, et al. (2005). "An update to the Baker-Strehlow-Tang vapor cloud explosion prediction methodology flame speed table." Process Safety Progress 24(1): 59-65.

4 Glossar

A	Lachenfläche	m ²
A _f	gesamte sichtbare Oberfläche der Flamme	m ²
A _h	Leckfläche	m ²
A _{IT}	Autozündungstemperatur des Stoffes	F
A _{pipe}	Querschnittsfläche Rohr	m ²
A _{sb}	Faktor für reflektierenden Untergrund	-
b _x , b _y	Halbe Breite Wolke in Ab- und Seitenwindrichtung	m
b _z	Wolkenhöhe (Breite Wolke vertikal)	m
C _(...)	Konzentration Gaswolke	kg/m ³
C _d	Ausflusskoeffizient	-
c _{p,Luft}	spezifische Wärmekapazität Luft	J/(kg·K)
c _{pl}	spezifische Wärmekapazität Flüssigkeit	J/(kg·K)
C _y	Shape parameter (siehe [4], 4.105)	m
d	Distanz zwischen Flamme und Empfänger	m
D	Durchmesser Feuer	m
d ₀	Durchmesser der Düse	m
dA ₁	Fläche Flammenoberfläche	m ²
d _L	Durchmesser Lache	m
d _p	Rohrdurchmesser	m
E	gesamte freigesetzte Energie	J
e _{av}	Spezifische freigesetzte Energie	J/kg
E _{ex}	gesamte Energie Druckwelle	J
F	Sichtfaktor zwischen Flamme und Empfänger	-
f _D	Darcy Reibungsfaktor	-
F _s	Anteil entstandene Wärme an Flammenoberfläche	-
F _{U/L}	Sichtfaktor zwischen oberer/unterer Flammenzone und Empfänger	-
F _x , F _y , F _z	Ausdruck für Ausbreitung in Ab- und Seitenwind sowie vertikaler Richtung	m ⁻¹
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
h	Mittlere Lachentiefe	m
H/H _(...)	Wärmefluss in/aus Lache	W/m ²
h _c	Höhe Gaswolke	m
H _{comb}	Verbrennungswärme des Kraftstoffgemisches	kJ/kg
h _e	Mittlere Tiefe "dynamischer" Teil Lache	m
h _p	Mittlere Tiefe Unebenheiten am Lachenboden	m
h _{vl}	Verdampfungsenthalpie	J/kg
k _f	Extinktionskoeffizient Brennstoff	m ⁻¹
k _m	Stoffübergangskoeffizient	m/s
L	Länge des Trümmerstücks	m
L _{av}	Durchschnittliche Länge Trümmerstück	m
L _{MO}	Monin-Obukhov Länge	m
l _p	Rohrlänge	m
L _{v(T)}	Verdampfungswärme bei Temperatur T	J/kg
m	Massenanteil Konzentration	kg/kg
m _{comb}	Verbrennungsrate eines Brennstoffs	kg/s
M _{Dauer}	Einflussfaktor für Zündungsquellen	-
m _{fl}	Masse flammbares Material	kg
M _{fl}	Masse Phase von freigesetzter Flüssigkeit	kg
MIE	Minimale Zündungsenergie	mJ

MW	molekulares Gewicht	kg/mol
N	Totale Anzahl Trümmerstücke	-
$n_{1,2}$	Raumdichten	
P	(absoluter) Druck	N/m ²
P_a	Atmosphärischer Umgebungsdruck	N/m ²
P_{KZ}	Wahrscheinlichkeit für keine Zündung	-
P_r	Prandtl Nummer	-
P_{sz}	Wahrscheinlichkeit für spontane Zündung	-
P_v	Dampfdruck	Pa
P_{vz}	Wahrscheinlichkeit für verzögerte Zündung	-
q''_v	Verdunstungsmassenstrom lokal	kg/m ² s
q''	Strahlungsleistung in Distanz zur Flamme	kW/m ²
Q_L	Flüssigkeitsmenge	kg
q_s	Mengendurchfluss	kg/s
q_v	Verdunstungsmassenstrom	kg/s
r	Radius Lache	m
R	Universelle Gaskonstante	J/mol K
Re	Reynolds-Zahl	-
r_{fb}	Radius Feuerball	m
s	Stärke der Zündungen pro Minute	-
Sc	Schmidt-Zahl	-
SEP _{act}	tatsächlicher Emissionsgrad Flamme	kW/m ²
SEP _L	tatsächlicher Emissionsgrad untere Flammenzone	kW/m ²
SEP _{max}	Maximale Wärmefreisetzungsrate	kW/m ²
SEP _s	Emissionsgrad Rauch, Wert: etwa 20	kW/m ²
SEP _u	tatsächlicher Emissionsgrad obere Flammenzone	kW/m ²
sx	Dispersionsparameter (atmosphärische Stabilitätsklassen)	
t	Zeit nach Beginn Freisetzung/Verdampfung/etc	s
T_b	Siedepunkt Flüssigkeit	K
T_{KG}	Kühlgrenztemperatur	K
T_L	Temperatur Lache	K
T_o	Temperatur im Ausgangszustand	K
t_r	Dauer Freisetzung	s
T_s	Temperatur Untergrund	K
T_u	Temperatur der Umgebungsluft	K
u	Radialgeschwindigkeit Flüssigkeit am Lachenrand	m/s
u_L	Fliessgeschwindigkeit Flüssigkeit	m/s
U_R	sichtbarer Anteil der Flamme der oberen Zone (Flamme hat eine untere Zone mit hoher Emission und sauberer Verbrennung, darüber eine russige, verdunkelte Zone.)	-
u_w	Windgeschwindigkeit	m/s
$u_{w,10}$	Windgeschwindigkeit in 10m Höhe	m/s
$u_{w,friction}$	Reibungswindgeschwindigkeit	m/s
V	Volumen	m ³
V_{cloud}	Volumen Dampf Wolke verdämmt	m ³
x	Horizontale Koordinate Abwind	m
X	Distanz von Oberfläche Flamme zu Objekt	m
X_F	Verdampfungsanteil bei adiabater Sättigungstemperatur	kg/kg
X_v	Verdunstungsanteil	kg/kg
y_b	Shape parameter (siehe [4], 4.105)	m
Z	Strahllänge	m
z	Höhe über Boden	m
z_0	Oberflächenrauigkeit	m

β_1/β_2	Winkel, um welche Flächen gegen gemeinsame Verbindungslinie geneigt sind	
ΔH	Netto vorhandene Wärme	J/kg
$\Delta H_v(T_b)$	Verdampfungswärme bei Lachentemperatur T_b	J/kg
ΔP	Drück über dem Rohr	N/m ²
ε	Rohrwandrauigkeit	m
λ_a	Wärmeleitfähigkeit Luft	m ² /s
λ_s	Wärmeleitfähigkeit Untergrund	m ² /s
μ_a	Molare Masse trockene Luft	kg/mol
μ_s	Molare Masse sich ausbreitende Substanz	kg/mol
ρ_L	Flüssigkeitsdichte	kg/m ³
ρ_{Luft}	Dichte der Umgebungsluft	kg/m ³
$\sigma_x/\sigma_y/\sigma_z$	Empirische Ausbreitungsparameter (siehe [28], 4.3.1)	-
τ_a	Atmosphärische Transmissivität	-
τ_L	Atmosphärische Transmissivität untere Flammenzone	-
τ_U	Atmosphärische Transmissivität obere Flammenzone	-
ϕ	Füllgrad	m ³ /m ³
$\phi_2(\varepsilon)$	Funktion (siehe [4], 3.58)	-
α_s	Thermale Diffusivität des Untergrundes	m ² /s
ζ	nichtdimensionale Höhe	
η	Dynamische Viskosität	N s/m ²
χ	Gauß'sche Verteilung aus einer kontinuierlichen stationären Punktquelle	

5 Recherche und Beschreibung Stand der Technik

Die Gleichungen der Modelle sind am Ende des Kapitels in Tabelle 5-29 zusammengefasst. Detaillierte Erklärungen und weiterführende Informationen werden nachfolgend gegeben.

5.1 Modul 1: Freisetzung

Die Freisetzung eines Gefahrguts aus einem Behältnis kann verschiedentlich verursacht werden. Zum einen kann das Behältnis selbst die Ursache sein, beispielsweise durch Schädigung durch Korrosion oder einen Konstruktionsfehler. Neben menschlichem Versagen spielt auch die Schädigung durch externe Einflüsse eine Rolle, Beispiele im Falle der Bahn sind Entgleisungen und Kollisionen sowie Unterfeuerung. Eine Übersicht zu Freisetzungsf lächen generell, Einflussfaktoren und Methoden zur Ermittlung ihrer Grösse sowie weitere Faktoren (Leck-vor-Bruch-Kriterium, Risswachstum etc.) sind in [7] gegeben.

Nach [8] entspricht der mittlere Verlust eines betroffenen Wagens rund 35% des Inhalts.

Wahrscheinlichkeiten

In den niederländischen QRA-Richtlinien [9] wird angenommen, dass es sich bei der Freisetzung von brennbaren Flüssigkeiten während des Transports mit der Bahn in 40% der Fälle um den Bruch des Behältnisses und in 60% der Fälle um ein Leck handelt. Jedoch wird hierbei nur zwischen zwei repräsentativen Fällen unterschieden: Instantane Freisetzung durch Bruch/Bersten und einer resultierenden Lache von 600m², sowie kontinuierliche Freisetzung durch ein Leck mit einem Durchmesser von 3" (7,62cm) und einer resultierenden Lache von 300m². Zum Vergleich – im HSC-Bericht von 1991 [10] wurde eine Freisetzungverteilung von 10% instantan und 90% kontinuierlich (Leckdurchmesser: 100mm) angenommen.

Wahrscheinlichkeiten pro Jahr für die Freisetzung des Inhalts eines Kesselwagens unter atmosphärischem Druck bei Be- und Entladungsvorgängen sind in [11] und [6] gegeben. Für die instantane Freisetzung des gesamten Inhalts eines Wagens wird ein Wert von $1 \cdot 10^{-5}$ angegeben, für die kontinuierliche Freisetzung von $4 \cdot 10^{-5}$ bis $5 \cdot 10^{-7}$. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass Be- und Entladevorgängen, aber keine Szenarien für eine externe Schädigung eines Kesselwagens berücksichtigt werden.

Ursachen im Bahn-Kontext

Für das Schweizer Normalspurnetz werden im aktuellen Methodikbericht Personenrisiken [2] für den Zeitraum 1976 bis 2011 insgesamt 6 Unfälle mit einer Freisetzung von gefährlichen Flüssigkeiten in Mengen über 1 000 l aufgeführt, was in einer mittleren jährlichen Freisetzungshäufigkeit $H_{Fr,Mittel}$ von 0.17 pro Jahr resultiert. Unter Berücksichtigung der generell sinkenden Unfallrate wird für das Jahr 2010 ein Wert von $H_{Fr,2010} = 0.048$ pro Jahr angegeben, was einer grösseren Freisetzung von Gefahrgut (ohne Ereignisse beim Rangieren) durchschnittlich einmal in 21 Jahren entspricht. Freisetzungshäufigkeiten pro Jahr sowie Kesselwagenkilometer für das Schweizer Netz aufgeschlüsselt nach Ereignisart (u. A. Entgleisung, Zusammenstoss, nicht unfallbedingte Freisetzung) sind in der Pilotrisikoanalyse gegeben [3].

Ort der Freisetzung

Der Ort einer Freisetzung ist abhängig von der Ursache. Bei der Leckage eines nicht entgleisten Kesselwagens sowie bei Linearentgleisung (Abbildung 3) kommt es zur Freisetzung im Gleisbereich. Bei der Linearentgleisung ist die seitliche Auslenkung so gering, dass in den meisten Fällen das Schienentrassée nicht verlassen wird, die Freisetzung geschieht durch das sogenannte Aufklettern, bei dem die Böden der Kesselwagen durch die Kupplungen oder Puffer der benachbarten Wagen eingedrückt oder durchstochen werden können [12]. Bei der Zollstock- und Akkordeonentgleisung (letztere tritt bei hohen Geschwindigkeiten auf) ist auch eine Freisetzung neben dem Gleisbereich möglich [12].

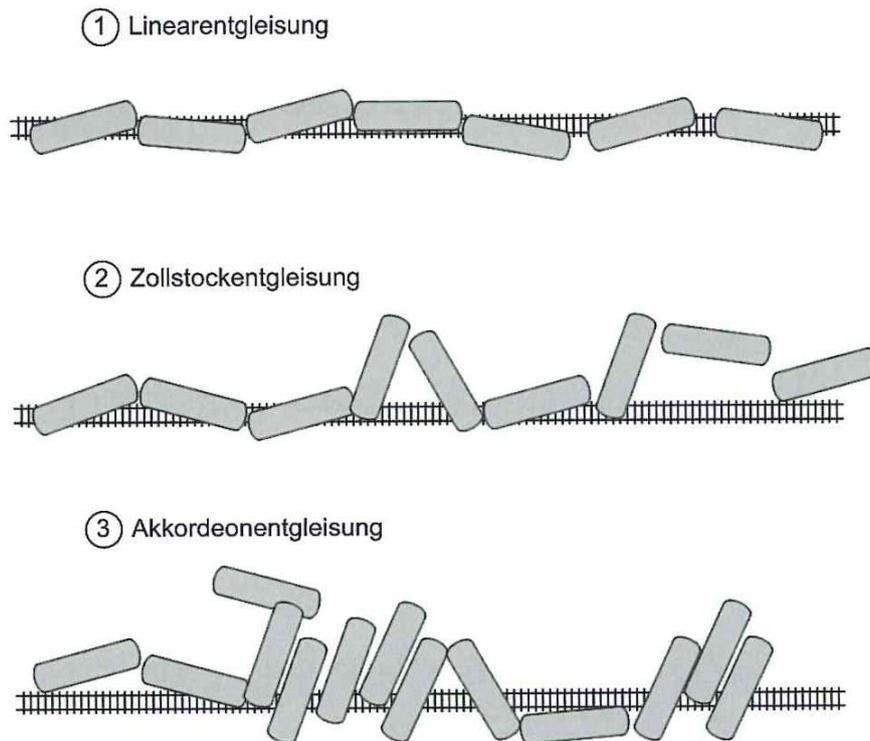


Abbildung 3: Typische Entgleisungstopographien. Quelle: [12]

Betreffend Wahrscheinlichkeiten für eine Freisetzung im oder neben dem Gleisbereich basieren die Annahmen in der Pilotrisikoanalyse [3] auf dem HSC-Bericht von 1991 [10]: Bei spontaner Freisetzung wird von einer 50/50 Verteilung ausgegangen, bei kontinuierlicher Freisetzung von 90/10 (%; im/neben Gleisbereich). Neuere Angaben wurden nicht gefunden.

Eisenbahnkesselwagen vs. Tankcontainer

Neben Eisenbahnkesselwagen werden die Substanzen des LS Benzin auf der Schiene auch in Tankcontainern transportiert. Es wurden keine spezifischen Freisetzungswahrscheinlichkeiten für diese Art Behälter gefunden, und auch keine Hinweise darauf, dass es substantielle Unterschiede zwischen Eisenbahnkesselwagen und Tankcontainern gibt. Für beide Arten von Behältern ist von Bedeutung, dass raffinierte Erdölprodukte selbst nicht korrosiv sind. Korrosionsschäden treten somit in erster Linie dort auf, wo sich regelmässig Wasser ansammelt - im unteren Teil eines Tanks [13]. Berichte über Unfälle zeigen, dass auch bei Kollisionen mit nur geringen Geschwindigkeiten Behälter beider Arten beschädigt werden können³. Ein potentiell wichtiger Faktor im Falle des Ineinanderschiebens von Wagen/Containern in Folge von Auffahren auf Puffer oder Heckkollision ist das Vorhandensein von Puffern zwischen den Einheiten [14].

5.1.1 Grosses Leck/Bruch/Bersten Behälter (instantane Freisetzung)

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #1)

Die anfänglich vorhandene Flüssigkeitsmenge im Behälter (kg), das Äquivalent zur maximalen Freisetzungsmenge, ist abhängig von Behältervolumen, Füllgrad, und Flüssigkeitsdichte bei Lagertemperatur. Die Freisetzung geschieht beispielsweise durch den Bruch des Behälters durch mechanische Einwirkung oder Bersten durch Überdruck. Wenn nicht der gesamte Inhalt freigesetzt wird (Leck/Bruchstelle nicht am tiefsten Punkt des Behälters) muss dies entsprechend berücksichtigt werden.

³ Beispiel: www.otif.org/fileadmin/user_upload/otif_verlinkte_files/05_gef_guet/07_rid_verweis/Belgien_05-04-2004_E.pdf

Bei einer Temperatur von 50°C weist Benzin einen Dampfdruck von 0.9 bar auf, Chlor und Propan von 14 und 17 bar [10]. Dies schlägt sich in den Zulassungsvoraussetzungen für die jeweiligen Behältnisse wieder: Für den Transport von Benzin muss das Transportbehältnis (Kesselwagen oder Tankcontainer) für einen Druck ausgelegt sein, der mindestens zwei Mal dem hydrostatischen Druck der Substanz entspricht (mindestens zwei Mal dem hydrostatischen Druck von Wasser)[15]. Im Vergleich dazu unterliegen Kesselwagen und Tankcontainer für den Transport der Gase Chlor und Propan bedeutend höheren Mindestprüfdrücken von 17/19 und 21/23 bar (mit/ohne Wärmeisolierung)[15]. Durch die geringere Stärke der Behältnisse für flammable Flüssigkeiten brechen diese viel schneller auf als jene für Gas, mit entsprechend geringeren Druckfreisetzungen und Auswirkungen auf die Umgebung.

Tabelle 5-1: Ausfallraten von Tankcontainern [16]

Vorgang/Ereignis	Ausfallrate	Bemerkungen
50 mm Durchmesser Leck	6×10^{-7} pro Hebung	Ausfall durch Sturz des Tanks <5 Meter.
Bruch/Bersten	3×10^{-8} pro Hebung	Ausfall durch Sturz des Tanks >5 Meter.

Aktuelle Ausfallraten von Tankcontainern [16] sind in Tabelle 5-1 gegeben. Für Kesselwagen wird im selben Bericht auf die HSC-Publikation von 1991 [10] verwiesen – siehe Tabelle 5-2.

Tabelle 5-2: Freisetzungsraten beim Transport auf der Schiene von Benzin [10]

Vorgang/Ereignis	Freisetzungsraten
Punktion Kessel – 10%: Freisetzung instantan – 90%: kontinuierlich (100 mm Durchmesser Leck)	6.3×10^{-8} pro Zug km (inkl. Folgen von Entgleisungen und Kollisionen)
Kleines Leck durch Ausfall Equipment	Nicht evaluiert, Konsequenzen als gering beurteilt

5.1.2 Leck Kessel/Tank (kontinuierliche Freisetzung)

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #2)

Der Mengendurchfluss (kg/s) durch ein Leck in einem Kessel oder Tank ist abhängig von Leckgrösse und -form, dem Druck im Behältnis über der Flüssigkeit sowie dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule (Höhe Leckage bis Füllhöhe). Da sich der hydrostatische Druck der Flüssigkeitssäule während der Freisetzung verringert nimmt die Freisetzungsraten mit der Zeit ab, entsprechend muss der Mengendurchfluss iteriert berechnet werden. Bei kleinen Lecks wird der Mengendurchfluss durch die Form des Lecks beeinflusst, es wird zwischen vier verschiedenen Leckformen unterschieden (Tabelle 5-3).

Die wichtigen Parameter zur Bestimmung von Ausflussmenge und -rate sind Lochgrösse und Lage des Lecks. Bei relevanten Störfällen dürfte die Leckage so gross sein, dass die Leckform keine Rolle mehr spielt (Ausflusskoeffizient = 1).

Tabelle 5-3: Ausflusskoeffizient C_d für unterschiedliche Leckformen [4]

Leckform	Wert Ausflusskoeffizient (C_d)
scharfe Öffnung	0.62
gerade Öffnung	0.82
abgerundete Öffnung	0.96
kompletter Rohrbruch	1.0

Wahrscheinlichkeiten und Leckgrössen

Wahrscheinlichkeitswerte für die kontinuierliche Freisetzung eines Kesselwagens sind zu Beginn von 5.1 gegeben.

Bei Leckagen wird zwischen definierten (z.B. Schlauchabriss, Brechen Berstscheibe) und undefinierten Leckgrössen (z.B. Versagen einer Schweissnaht, Korrosion, Penetration Tankwand durch Zusammenstoss oder Trümmerflug) unterschieden. Basierend auf einer Analyse des deutschen Störfallgeschehens wird für transportable Flüssigkeitsbehältnisse eine repräsentative definierte Leckgrösse von 490 mm² angenommen, was einem Durchmesser von 25 mm entspricht [12]. Entsprechende Ausflussraten sind in Tabelle 5-4 gegeben.

Undefinierte Leckgrössen von Kesselwagen werden in [12] anhand von Unfallberichten aus Deutschland, Kanada und den USA untersucht. Da Leckgrössen meist nur qualitativ aufgenommen werden erlaubt die Datengrundlage keine generellen Aussagen zu "Standartleckgrössen." Für Nordamerika wird jedoch deutlich, dass Lecks an den Kesselböden mit den Massen der dort gebräuchlichen Mittelpufferkupplungen korrespondieren – die Ursache der Freisetzung ist entsprechend Aufklettern der Wagen. In Europa sind an den Stirnseiten der Wagen zudem oft paarweise Puffer angebracht, in Deutschland haben die gewölbten Pufferteller einen Mindestdurchmesser von 37 cm. Dementsprechend wird empfohlen, bei Risikoabschätzungen auch eine entsprechende Leckgrösse von ca. 1 100 cm² zu berücksichtigen [12].

Tabelle 5-4: Definierte und undefinierte Leckgrössen für Kesselwagen und Tankcontainer [12] sowie Ausflussraten für Benzin. Letztere wurden mit EFFECTS berechnet, für das kleinere Leck zudem mit unterschiedlichen Ausflusskoeffizienten [vgl. Tabelle 5-3].

Leckdurchmesser	Leckgrösse	Ausflusskoeffizient	Ausflussrate
Definiert: 25 mm	490 mm ²	1.0	2.67 kg/s
		0.62	1.66 kg/s
Undefiniert: 37 cm	ca. 1 100 cm ²	1.0	545.59 kg/s

5.1.3 Leck/Ausfluss Rohr (kontinuierliche Freisetzung)

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #3)

Mengendurchfluss (kg/s) durch ein Leck in einem Rohr bzw. Ausfluss aus einem Rohr. Abhängigkeiten wie bei 5.1.2, zusätzlich wird Friktion durch das Rohr berücksichtigt (abhängig von Länge, Durchmesser und Rohrwandrauigkeit - Werte für verschiedene Materialien sind in Tabelle 5-5 gegeben). Die Formel ist gültig für ein Rohr verbunden mit einem Kessel oder Tank. Falls dem Leck vorgelagert eine Pumpe installiert ist muss der Mengendurchfluss der Pumpleistung entsprechend skaliert werden.

In Anbetracht der kurzen Be-/Entfüllungsrohre sowie der verwendeten Materialien ist diese Art Freisetzung im Bahn-Kontext im Vergleich zu einem Leck des Kessels von untergeordneter Bedeutung. Stattdessen kann direkt die "definierte Leckgrösse" (siehe 5.1.2) verwendet werden.

Tabelle 5-5: Rauigkeitswerte ϵ [mm] für verschiedene Materialien [7]

Material		Rohrwandrauigkeit ϵ (mm)
Glas-, Blei-, Kupfer, Messingrohr gezogen		0 - 0,0015
Stahlrohr gezogen	neu	0,04 (0,02 - 0,1)
	nach längerem Gebrauch gereinigt	0,15 - 0,2
	mässig verrostet oder leichte Verkrustungen	bis 0,4

Material		Rohrwandrauigkeit ε (mm)
	starke Verkrustungen	bis 3
Stahlrohr verzinkt	normal galvanisiert	0,15
Stahlrohr geschweisst	neu	0,05 - 0,1
	neu, bitumiert	0,05
	gebraucht, gereinigt	0,15 - 0,2
	gleichmässig verrostet	bis 0,4
	leichte Verkrustung	1 - 1,5
	starke Verkrustung	2 - 4
Gussrohr	neu	0,26 (bis 1)
	neu, bitumiert	0,1 bis 0,15
	angerostet	1 - 1,5
	verkrustet	1,5 - 4
Betonrohr	Glattstrich	0,3 (bis 0,8)
	rau	1,2 (bis 3)
Asbest-Zement-Rohr		0,05 - 0,1

5.1.4 Zerstäubung durch kleines Leck

Modell: Fauske [17] (Tabelle 5-29, Formel #4)

Verdampfungsanteil bei adiabater Sättigungstemperatur X_F und Verdunstungsanteil X_V (je kg/kg) bei Freisetzung in Form von Zerstäubung, abhängig von der spezifischen Wärmekapazität der Flüssigkeit, Ruhe-, Kühlgrenz- und Umgebungstemperatur sowie Verdampfungsenthalpie.

Für die Bildung einer Dampfwolke im Vergleich zur Lachenverdampfung von untergeordneter Bedeutung [18].

5.1.5 BLEVE Kessel/Tank

Modellierung analog Freisetzung instantan, siehe 5.1.1. Ursache einer BLEVE («boiling liquid expanding vapor explosion») ist oftmals die Exposition des Behältnisses zu offenem Feuer [19]. In diesem Fall kommt es während der BLEVE durch die bereits vor Ort vorhandene Zündungsquelle neben Druckwelle und Trümmerwurf oft zu einem Feuerball und der instantanen Abbrennung des freigesetzten Materials.

Für eine genaue Abschätzung der relativen Auftrittswahrscheinlichkeiten eines BLEVE-Ereignisses müssten die vorhandenen Datensätze statistisch ausgewertet werden. Eine Untersuchung von 167 BLEVE-Ereignissen in den Jahren zwischen 1960 und 2013 [20] auf Basis verschiedener internationaler Datenbanken⁴ zeigt, dass die Hauptursachen der untersuchten BLEVEs Unfälle auf Schiene und Strasse sowie Exposition zu Feuer bzw. Überhitzung sind (Tabelle 5-6).

⁴Major Hazard Incident Data Service (MHIDAS; Version November 2007), Health and Safety Executive, UK. Analysis, Research and Information on Accidents (ARIA; Version 2012), Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement, Frankreich. Major Accident Reporting System (MARS; Version 2012), Major Accidents hazards Bureau of the EU Joint Research Centre. Failure and Accidents Technical information System (FACTS; Version 2010), TNO Industrial and External Safety. Weitere Informationen: U.S. Chemical Safety Board, U. S. National Transport Safety Board und National Fire Protection Association.

Tabelle 5-6: Ursachen von BLEVEs, insgesamt 167 Ereignisse (Auszug) [20]

Generelle Ursache	Spezifische Ursache	# Ereignisse	Prozent (%)
Störfall (47.1%)	Unfall auf Schiene	40	26
	Unfall auf Strasse	16	10
Faktor Mensch (30.7%)	Generelle Wartung	8	8
	Genereller Betrieb	5	5
Externe Einflüsse (29.3%)	Feuer	33	21
	Überhitzung	20	11

Im Kontext des LS Benzin sind BLEVEs verhältnismässig selten: Von 167 Ereignissen können 8 (= 5%) den Substanzen Benzin/Diesel/Kerosin zugeordnet werden (Tabelle 5-7). Ein Grund ist der vergleichbar tiefe Dampfdruck von Benzin (0.9 bar bei 50°C, Chlor und Propan: 14 und 17 bar [10]). Je höher der Dampfdruck einer Substanz, desto höher die Wahrscheinlichkeit einer BLEVE [10]. Ein weiterer Grund ist, dass die für Flüssigkeiten ausgelegten Tanks nur verhältnismässig geringe Drücke verkraften (im Vergleich zu den Tanks für (verflüssigte) Gase) und aufplatzen und auslaufen bevor sich ein entsprechender Überdruck aufbauen kann (siehe 5.1.1). In diesem Fall kommt es bei einer Zündung zu einem Lachenbrand, und nicht zu einem BLEVE-typischen Feuerball.

In den aktuellen Richtlinien für den Gefahrguttransport in den Niederlanden [21] werden BLEVEs dementsprechend ausschliesslich in den Szenarienbäumen für brennbare Gase berücksichtigt, nicht jedoch für brennbare Flüssigkeiten. Im Rahmenbericht über die Sicherheit von Stehtankanlagen für flüssige Treib- und Brennstoffe werden BLEVEs ebenfalls nicht behandelt [18].

Tabelle 5-7: Substanzen involviert in BLEVEs, insgesamt 167 Ereignisse [20]. Berücksichtigt werden Störfälle in Prozessanlagen, Lagerbereichen sowie beim Transport von Gefahrgut (Strasse, Schiene und Schiff), bei den Ursachen sind auch natürlichen Ereignisse (z.B. Erdbeben oder Überschwemmungen) eingeschlossen.

Substanzen	Anzahl Ereignisse	Prozent (%)
LPG (Flüssiggas)	111	66
Vinylchlorid	10	6
Öl	10	6
Benzin/Diesel/Kerosin	8	5
Ethylenoxid	7	4
Kohlendioxid	6	4
Wasser	5	3
LNG (Flüssigerdgas)	5	3
Propylen	4	2
Ammoniak	3	2
Chlor	3	2

Stichflamme: Ein Spezialfall der spontanen Freisetzung für Tankwaggons, welche unterfeuert werden, ist die Bildung einer Stichflamme (siehe 5.5.1.4). Durch den Überdruck im Tank wird dabei der Domdeckel des Waggons weggeschleudert und das entweichende Gasgemisch entzündet sich in eine bevorzugte Richtung. Im Beispiel vom Grossbrand von Affoltern (1994) entstand während mehreren Minuten eine Stichflamme von grosser Höhe⁵.

⁵ <http://www.berufsfeuerwehr.ch/einsatz/einsatzberichte/affoltern/affoltern1994.pdf>
https://de.wikipedia.org/wiki/Eisenbahnunfall_von_Z%C3%BCrich-Affoltern

5.1.6 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ergebnisse

Im Kontext des LS Benzin sind die instantane Freisetzung durch Bruch des Behältnisses (5.1.1) sowie die kontinuierliche Freisetzung durch ein Leck (5.1.2, 5.1.3) relevant. Beides sind logische, relativ einfach zu beschreibende physikalische Vorgänge. Im Rahmen der Literaturrecherche wurden keine neueren Ansätze gefunden, die Modelle im Yellow Book [4] entsprechen immer noch dem Stand der Technik.

Nicht relevant sind die folgenden Ereignisse: Zerstäubung durch ein kleines Leck (5.1.4) ist durch die geringe Freisetzungsrates nur von untergeordneter Bedeutung. Freisetzung durch Kesselbersten infolge BLEVE (5.1.5) beispielsweise durch Unterfeuerung ist grundsätzlich möglich, tritt jedoch im Kontext der im LS Benzin zusammengefassten Substanzen verhältnismässig selten auf. Ein Grund ist, dass die für Flüssigkeiten ausgelegten Behältnisse aufbrechen bevor sich ein entsprechend hoher Überdruck aufbauen kann. Freisetzung durch Überfüllung eines Tanks ist relevant für stationäre Anlagen (Beispiel: Buncefield, 2005 [22]) sowie den Transport von Gasen. Im Benzin-Bahn-Kontext handelt es sich eher um ein Umwelt-, weniger um ein Personenrisiko.

In der untersuchten Literatur fanden sich keine Hinweise auf störfallrelevante, signifikante Unterschiede zwischen Kesselwagen und Tankcontainern.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Relevant sind die instantane Freisetzung sowie die kontinuierliche Freisetzung durch ein Leck. Anhand der Literatur werden für die kontinuierliche Freisetzung Leckgrössen zwischen 25 ("Leck definiert") und 100mm Durchmesser empfohlen, zudem sollten auch 37 cm ("Leck undefiniert") berücksichtigt werden.

Die getrennte Betrachtung von Kesselwagen und Tankcontainern ist nicht notwendig (Ausnahme: das Fassungsvermögen und entsprechend potentielle Unterschieden bei den max. Freisetzungsmengen).

5.2 Modul 2: Lachenbildung, Verdampfung

5.2.1 Fläche Lache

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #6)

Fläche (m²) einer unverdämmten Lache auf glatter Ober- oder Wasserfläche, abhängig vom Radius. Ohne Hindernisse ist die Ausbreitung von Flüssigkeit auf ebener Fläche oder ruhiger Wasserfläche achsensymmetrisch. Bei Verdämmung entspricht die maximale Lachenfläche der verdämmten Fläche.

Berechnungen mit EFFECTS zeigen, dass die Oberflächenrauigkeit (und somit die minimale Lachentiefe – siehe 5.2.3) einen grossen Einfluss auf die Lachenfläche hat. Zwischen den zwei Extremen, «very rough overgrown sandy soil with holes» und «flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard», variiert der Lachendurchmesser von 51.5 bis 105.2 m und somit um über 100% (Beispielrechnung: instantane Freisetzung von 60 m³ Benzin).

5.2.2 Tiefe einer Lache auf ebener Oberfläche

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #7)

Tiefe (m) einer Lache auf glatter Ober- oder Wasserfläche. Zur Berechnung der Tiefe ist in [4] ein Ansatz gegeben.

5.2.3 Tiefe einer Lache auf unebener Oberfläche

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #8)

Tiefe (m) einer Lache auf unebener Oberfläche. Hierbei wird die Lache in zwei Schichten aufgeteilt: Schicht 1 repräsentiert die mittlere Tiefe der Unebenheiten des Untergrundes, Schicht 2 die «dynamische» Schicht darüber.

Ein alternativer Ansatz ist die Annahme, dass die minimale Lachentiefe (= nach vollständiger Ausbreitung, Verdampfung ist nicht berücksichtigt) der Oberflächenrauigkeit entspricht. (Dies ist beispielsweise im Tool EFFECTS der Fall [23].) Entsprechende Werte für verschiedene Untergründe sind in Tabelle 5-8 gegeben.

Tabelle 5-8: Minimale Lachentiefe h_{min} je nach Untergrund [7]

Untergrund	h_{min} [mm]
ruhiges Wasser	1.8
Beton, Stein	5
ebener Sand, Kies	10
Farm-, Weideland	20
unebener, sandiger Boden	25

5.2.4 Ausbreitung Lache auf Wasserkörper

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #9)

Unverdämmte Ausbreitung Lache (m/s) auf einem Wasserkörper, abhängig von der Radialgeschwindigkeit der Flüssigkeit am Rand der Lache. Eine Limitierung des Ansatzes ist die Nichtberücksichtigung von Wellenschlag und Gezeitenströmen [4], allerdings spielt das nur auf dem offenen Ozean eine Rolle und ist dementsprechend im Kontext für die Schweiz nicht relevant.

5.2.5 Ausbreitung Lache in freiem Gelände, ebener Untergrund

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #10)

Unverdämmte Ausbreitung Lache (m/s) in freiem Gelände, abhängig von der Radialgeschwindigkeit der Flüssigkeit am Rand der Lache sowie der Oberflächenrauigkeit. Versickerung und Abfluss werden angesprochen, aber nicht explizit berücksichtigt [4].

Die Ausbreitung einer Lache ist abhängig zum einen von der Freisetzungsrate, zum anderen von Verdampfungs- sowie Versickerungs- und gegebenenfalls Abflussrate (beispielsweise auf geneigter Fläche oder in die Kanalisation). Bei starker Versickerung beispielsweise im Gleisbett kommt es dementsprechend nicht notwendigerweise zur Ausbildung einer Lache. Im Falle von Abfluss auf geneigter Fläche oder in die Kanalisation ist zudem der Ort der Freisetzung nicht notwendigerweise der Ort der Lachenbildung.

Eine Formel zur Berechnung der Versickerung ist in [25] gegeben:

$$m_{s,ijk} = S_{jk} \times \cos^2 \alpha_i \times D \times t_{Fr} \times l_{ij} \times \rho$$

mit

$m_{s,ijk}$:	versickerte Flüssigkeitsmenge pro Abschnitt l_{ij} des Abflusspfades	[kg]
S_{jk} :	Sickerleistung	[l/s/m ²]
α_i :	Steigung des Geländes	[°]
D :	Lachendurchmesser, entspricht der Breite der Fliessfläche	[m]
t_{Fr} :	Freisetzungsdauer	[s]
l_{ij} :	Länge eines Abschnitts des Abflusswegs	[m]
ρ :	Dichte des Schadstoffs	[kg/l]
i :	Index zur Charakterisierung der Steigungsklasse	[-]
j :	Index zur Charakterisierung des Bodentyps	[-]

k: Index zur Charakterisierung der Wassersättigung des Bodens [-]

Werte für die Sickerleistung in Abhängigkeit von Bodentyp und Wassersättigung des Untergrundes sind in Tabelle 5-9 gegeben. Diese Werte sind wiederum abhängig von der Steigung: Unterhalb des Grenzwertes für Fließen versickert das gesamte Flüssigkeitsvolumen im Boden, bei zunehmender Steigung nimmt die Sickerleistung hingegen ab. Es wird angenommen, dass der Einfluss der zunehmenden Fließgeschwindigkeit mit zunehmender Steigung vergleichbar ist mit dem Einfluss der abnehmenden Schwerkraftkomponente. Letzterer beträgt $\cos\alpha$, entsprechend wird ein Korrekturfaktor von $\cos^2\alpha$ angewendet.

Tabelle 5-9: Sickerleistung S_{jk} in Abhängigkeit von Bodentyp j und Untergrundsättigung k

Bodentyp j	Sickerleistung S_{jk} [l/s/m ²]	
	Boden bei Feldkapazität	hohe Sättigung mit Wasser
Karst	1.0	1.0
Kies/Sand	0.5	0.01
Sand/Silt	0.1	0.002
Tone/Fels	0.01	0.0002

5.2.6 Lachenausbreitung verdammt

Ausbreitung Flüssigkeit zu Beginn wie 5.2.5, vorausgesetzt Ausbreitung in alle Richtungen möglich. Sobald die Fläche der Lache der Verdämmung entspricht bleibt die Fläche konstant.

5.2.7 Verdampfung

Bei der Verdunstung von Lachen gibt es zwei Regimes. Bei einer siedenden Lache wird die Verdampfungsrate durch die in den Pool eintretende Wärmemenge gesteuert, die die notwendige Energie für den Phasenübergang liefert. Bei Temperaturen unter dem Siedepunkt ist der Abtransport des Dampfes durch den Wind der limitierende Faktor – wenn die gesättigte Luft über der Lache nicht abtransportiert wird findet keine weitere Verdunstung statt. Der Übergang zwischen diesen beiden Regimes wird von den gängigen empirischen Modellen nicht berücksichtigt (eine Übersicht über solche empirischen Modelle ist in [7] gegeben). Der hier vorgestellte Ansatz kombiniert beide Regimes.

Trijsenaar-Buhre et al. [26] [Tabelle 5-29, Formel #12]

Verdampfungsrate (kg/s), es werden sowohl siedende als auch nicht siedende Lachen berücksichtigt. Für nicht siedende Lachen ist die Verdampfungsrate abhängig von Dampfdruck, Lachentemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Oberflächenrauigkeit, bei siedenden Lachen sowie von der Energiebilanz der Lache (Energiezufuhr von Untergrund, Umgebungsluft, kurz- und langwellige Strahlung sowie, bei kontinuierlicher Freisetzung, Zufluss. Die Lachentemperatur wird fortlaufend berechnet und mit der Siedetemperatur der Substanz abgeglichen (diese muss bekannt sein), je nachdem kommt es zu einem Wechsel zwischen den Ansätzen für siedend und nicht-siedend.

Evaluation und Alternativen

Die bisher eingesetzten empirischen Modelle bieten den Vorteil einer einfachen Handhabung und eines geringen Rechenaufwandes. Heutzutage erlaubt die gestiegene Rechnerleistung den Einsatz von Computational fluid dynamics (CFD) Tools zur Lösung der vollständigen, dreidimensionalen Navier-Stokes Gleichungen. Hiermit kann die Verdampfung und Ausbreitung in Raum und Zeit in hoher Auflösung modelliert werden. Eine weitere Alternative zu empirischen Modellen sind Grenzschichtverfahren, ein Beispiel ist in [27] gegeben. Dieses ermöglicht die zeitabhängige Betrachtung von Lachentemperatur, Massenstrom sowie Konzentrationsverteilung in der Umgebung, muss jedoch ebenfalls numerisch gelöst werden.

5.2.8 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ergebnisse

Auf einer ebenen, versiegelten Fläche oder einem ruhigen Wasserkörper (5.2.4) lässt sich die Ausbreitung von Lachen als relativ einfacher physikalischer Vorgang umsetzen, ebenso bei verdämmten Strukturen wie Auffang- und Rückhaltebecken. Im freien Gelände (5.2.5) sind einige Punkte jedoch potentiell problematisch. So wird eine ebene Fläche vorausgesetzt, Abfluss sowie Versickerung werden in den gängigen Modellen nicht berücksichtigt. Dies ist kritisch, da es die Massenbilanz der Lache (Zufluss vs. Abfluss/Versickerung) beeinflusst und somit gegebenenfalls die Ausbildung einer Lache an der Oberfläche komplett verhindert (z.B. durch starke Versickerung im Gleisbett).

Die empirischen Modelle für Verdampfung liefern trotz einiger problematischer Annahmen (z.B. konstante Lachentemperatur – bei dem Ansatz von Trijssenaar-Buhre et al. [26] ist dies behoben) gute Ergebnisse in offenem, homogenen Gelände. Für komplexere, bebaute Umgebungen sind jedoch mittlerweile CFD-Modelle Mittel der Wahl.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die empirischen Modelle für Lachenbildung sind angemessen für ebenes Gelände mit versiegeltem oder wassergesättigtem Untergrund. Bei Situationen mit Versickerung und/oder Abtransport wird die Lachenbildung dementsprechend überschätzt. Ein Beispiel ist die kontinuierliche Freisetzung direkt im Gleisbett, bei der es je nach Freisetzungsrate zur kompletten Versickerung im Schotter und somit zu überhaupt keiner Lachenbildung kommen kann. Bei grösseren Freisetzungsmengen und speziell der Freisetzung neben dem Gleisbett ist, je nach Untergrund, die Ausbildung einer grösseren Lache durchaus möglich. Folglich sind die empirischen Modelle für Lachenbildung für eine konservative Risikoabschätzung geeignet.

Verdampfung ist nur im Kontext von Szenarien mit Personenrisiken relevant. Die entsprechenden Szenarien, verdämmte Gaswolkenexplosionen, können jedoch durch empirische Modelle durch deren Defizite bei der Darstellung von verdämmten Strukturen nicht robust quantitativ abgeschätzt werden. In solchen Fällen sind CFD-Modelle das Tool der Wahl, die entsprechenden Szenarien werden hier nicht weiterverfolgt (siehe auch 5.3.5 und 6.2).

5.3 Modul 3: Ausbreitung und Verdünnung der Gaswolke (Benzindämpfe)

Die atmosphärische Ausbreitung einer Gaswolke ist abhängig von den Freisetzungsbedingungen (z. B. Art der Substanz, Verdampfungsrate), den meteorologischen Bedingungen (z. B. Windfeld, Temperatur) und der Umgebung (z. B. Gegenwart von Hindernissen, Topographie). Ein wichtiger Faktor für die Ausbreitung ist die Dichte der Substanz in der Gasphase. Bei neutralem Gas sind die Dichteunterschiede zur Umgebungsluft vernachlässigbar, die Gaswolke wird durch den Wind verfrachtet (neutrale oder passive Dispersion). Schweres Gas hingegen hat eine grössere Dichte als die Umgebungsluft wodurch die Gaswolke durch die Schwerkraft absinkt und sich radial ausbreitet. Schwere Gase breiten sich somit tendenziell eher wie Flüssigkeiten aus, folglich spielen Hindernisse sowie Topographie für die Konzentrationsverteilung eine wesentlich grössere Rolle als bei den leichten Gasen.

Benzin selbst bildet eine schwere Gaswolke. Da jedoch andere Substanzen des LS Benzin in die neutrale Gasphase übergehen (z.B. Ethanol, Methanol, Ethylacetat) sind sowohl die neutrale/passive als auch die schwere Gasausbreitung relevant.

5.3.1 Modellierung

Es gibt unterschiedliche Arten von Dispersionsmodellen: Integrale (oder empirische) Modelle, Gauß'sche Modelle, Euler'sche Modelle, Lagrange-Modelle sowie, Computational Fluid Dynamics

(CFD) Modelle. Wie bei der Verdampfung werden bislang mehrheitlich numerisch vereinfachte Modelle verwendet, Gauß- und Integral-Modelle gehören zu dieser Kategorie.

Ein grosser Nachteil dieser Modelle ist, dass sie nur über flachem, homogenen Gelände benutzt werden können und nicht in der Lage sind, Änderungen in der atmosphärischen Strömung durch Einflüsse wie Hindernisse (Grossanlagen/Gebäude) oder lokale Topographie zu modellieren. In empirischen Modellen werden Hindernissen grundsätzlich vereinfacht durch den Faktor "Oberflächenrauigkeit" berücksichtigt, was zu mehr Turbulenz und somit niedrigeren mittleren Konzentrationen führt. Ebenfalls nicht ausgelegt sind die Modelle für Ausbreitung bei sehr ruhigen Bedingungen oder gar Windstille, wie beispielsweise der Fall bei der Dampfwolkenexplosion im englischen Buncefield [22].

In einem gross angelegten Vergleich⁶ wurden die verschiedenen Arten von Modellen anhand von Fallstudien im urbaner Raum evaluiert. In relativ offenem Gelände wird die erste Phase der Verbreitung von allen Modellklassen realistisch simuliert. Aus diesem Grund werden zunächst zwei numerisch vereinfachte Modelle für die Ausbreitung im freien Gelände vorgestellt (5.3.2, 5.3.3). In komplexerem Gelände, beispielsweise bei der Freisetzung in einer Häuserschlucht, ist jedoch eine akkurate Berücksichtigung der Geometrie fundamental. Die besten Ergebnisse wurden mit CFD-Modellen erreicht, diese werden im Anschluss angesprochen [5.3.4].

5.3.2 Neutrale Gaswolke unverdämmt

Modell: ALOHA's Gaussian dispersion model [28] [Tabelle 5-29, Formel #13]

Konzentration einer neutralen, unverdämmten Gaswolke (kg/m^3) abhängig von einem vertikalen Windgeschwindigkeitsprofil, welches auf Basis von Windgeschwindigkeit und Referenzhöhe, atmosphärischer Stabilität (Pasquill-Gifford-Turner) und Bodenrauigkeit berechnet wird. Das Windprofil basiert auf der Annahme, dass Windgeschwindigkeit und -richtung sowie alle anderen atmosphärischen Bedingungen horizontal homogen sind und sich während der Dauer der Freisetzung nicht ändern.

Die Bodenrauigkeit kann frei gewählt werden, zudem stehen mehrere Geländebedingungen zur Wahl (Tabelle 5-10).

Tabelle 5-10: Rauigkeitsparameter z_0 [m] des Aloha Modells [28]

Geländetyp	Rauigkeitsparameter z_0 [m]
Open Country	0,3
Urban / Forest	1
Open Water	$0.00000026(u_{w,10})^{2.5}$

Die Turbulenz und vertikale Durchmischung der Atmosphäre werden in diesem Modell [28] durch einen Wert für die Stabilität der Atmosphäre berücksichtigt (6 Kategorien A-F; Tabelle 5-11), neben der Windgeschwindigkeit spielt hier die solare Strahlung eine wichtige Rolle [28]. Die Stabilitätsklasse D repräsentiert neutrale Stabilitätsbedingung. Unstabile Zustände sind mit den Klassen A, B und C assoziiert, wobei A extrem instabil, B mässig instabil und C leicht instabil ist. Die Klassen E und F repräsentieren zunehmend stabile atmosphärische Bedingungen. Anhand der Stabilitätsklasse werden die Koeffizienten zur Schätzung der Dispersionsparameter bestimmt (Tabelle 5-12).

⁶COST Action ES1006: Evaluation, improvement and guidance for the use of local-scale emergency prediction and response tools for airborne hazards in built environments. Link: <http://www.elizas.eu/>

Tabelle 5-11: Atmosphärische Stabilitätsklassen des Aloha Modells [28]

Windgeschwindigkeit	Tag			Nacht	
In 10 m	Solare Einstrahlung			Wolkenbedeckung	
(m/s)	Stark	Moderat	Schwach	>50%	<50%
<2	A	A – B	B	E	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Es gibt drei Möglichkeiten die atmosphärische Stabilitätsklasse zu bestimmen/definieren: Manuelle Eingabe von Wetterinformationen (Windgeschwindigkeit und solare Einstrahlung, letztere wird anhand Datum, Zeit, Standort und Wolkenbedeckung berechnet), direktes senden der Informationen von einer Wetterstation, manuelles überschreiben und direkte Eingabe der Stabilitätsklasse.

Tabelle 5-12: Werte für die Koeffizienten zur Schätzung der Dispersionsparameter anhand der Stabilitätsklasse [28]

Rauigkeit	Koeffizient	A	B	C	D	E	F
Beides	sx1	0.02	0.02	0.02	0.04	0.17	0.17
	sx2	1.22	1.22	1.22	1.14	0.97	0.97
	sy1	0.22	0.16	0.11	0.08	0.06	0.04
	sy2	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Geringe Oberflächenrauigkeit	sz1	0.2	0.12	0.08	0.06	0.03	0.016
	sz2	0	0	0.0002	0.0015	0.0003	0.0003
	sz3	0	0	-0.5	-0.5	-1	-1
Grosse Oberflächenrauigkeit	sz1	0.24	0.24	0.2	0.14	0.08	0.08
	sz2	0.001	0.001	0	0.0003	0.0015	0.0015
	sz3	0.5	0.5	0	-0.5	-0.5	-0.5

Das vorgestellte ALOHA Dispersionsmodell ist vergleichbar mit dem *Gaussian Plume Model* für passive Ausbreitung im Yellow Book [4]. Parameter wie Stabilitätsklassen und Rauigkeit finden in beiden Modellen Anwendung.

Sensitivitätsanalysen mit EFFECTS (in welchem das *Gaussian Plume Model* implementiert ist) zeigen zweierlei Dinge.

1. Vergleichsrechnungen mit dem Modell für schwere Gasausbreitung (Substanz mit neutraler Gasausbreitung: Methanol; Substanz mit schwerer Gasausbreitung: Benzin. Ansonsten identisches Setup – Tankvolumen, Freisetzungsrate etc.) zeigen, dass die Bildung einer flammbaren Gaswolke bei schweren Gasen um ein vielfaches wahrscheinlicher ist. Während sich bei einer Freisetzung von mind. 65 m³ Benzin (etwas mehr als ein Kesselwagen) eine flammbare Gaswolke bildet, braucht es bei Methanol unter den gleichen Bedingungen mind. 700 m³.
2. Die Ausbreitung und Bildung einer flammbaren Wolke (sowohl schwer als neutral) wird stark von den atmosphärischen Bedingungen (atmosphärische Stabilität und Windgeschwindigkeit) beeinflusst – eine flammbare Wolke bildet sich unverdämmt praktisch nur bei äusserst stabiler Atmosphäre (Stabilitätsklasse F) und dementsprechend sehr geringen Windgeschwindigkeiten, am besten Windstille. Die Oberflächenrauigkeit spielt für die räumlichen Ausmasse einer Gaswolke ebenfalls eine grosse Rolle – je höher die Rauigkeit, desto kleiner die Ausbreitung und

Verdünnung der Gaswolke. Für eine Druckwelle mit potentiell letaler Wirkung ist jedoch grundsätzlich eine Verdämmung der Gaswolke von Nöten – dies gilt auch für Szenarien wie die angesprochene Freisetzung von 700 m³.

Aufgrund dieser Sachverhalte und Resultate wird angenommen, dass die unverdämmte, neutrale Gasausbreitung für den LS Benzin keine Rolle spielt.

5.3.3 Schwere Gaswolke unverdämmt

Modell: SLAB model, TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #14)

Konzentration einer schweren, unverdämmten Gaswolke (kg/m³), abhängig von Windgeschwindigkeit, atmosphärischer Stabilität (Berechnung wie bei 5.3.2) und Bodenrauigkeit. Annahme ist erneut, dass Windgeschwindigkeit und -richtung sowie alle anderen atmosphärischen Bedingungen horizontal homogen sind und sich während der Dauer der Freisetzung nicht ändern. Es kann unterschieden werden zwischen kontinuierlicher, halbkontinuierlicher oder sofortiger Freisetzungen.

Wie für die neutrale Gasausbreitung zeigen Sensitivitätsanalysen mit EFFECTS (in welchem SLAB implementiert ist), dass für eine Druckwelle mit potentiell letaler Wirkung eine Verdämmung der Gaswolke notwendig ist.

5.3.4 CFD-Modelle

Der heutige State-of-the-art im Bereich Ausbreitungsmodellierung sind komplexe Modelle auf Basis der numerischen Strömungsmechanik (englisch: computational fluid dynamics, CFD). Die numerische Strömungsmechanik löst strömungsmechanische Probleme approximativ mit numerischen Methoden. Oft Verwendung finden die Navier-Stokes-Gleichungen [29], ein System nichtlinearer partieller Differentialgleichungen 2. Ordnung.

CFD-Modelle simulieren die Gasdispersion in 3D und Zeit unter Berücksichtigung von Hindernissen und Topographie. Im Vergleich zu den einfacheren (z.B. empirischen oder Gaußschen) Modellen sind sie damit speziell in inhomogenem, bebauten Gelände überlegen [30][31] – aktuelle Anwendungsbeispiele im Kontext der Ausbreitung von schwerem Gas sind in [22], [32] und [33] gegeben.

Durch ihre Komplexität sind CFD-Modelle jedoch sehr rechenintensiv, zudem sind für eine realistische Simulation viele Informationen zu den Randbedingungen (u. A. Topographie/Geometrie) sowie weiteren Einstellungen und Annahmen notwendig, die tiefes Expertenwissen voraussetzen [30].

5.3.5 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ergebnisse

Empirische Modelle für die Gasausbreitung (5.3.2, 5.3.3) liefern in flachem, offenem Gelände gute Ergebnisse. Allerdings unterliegen sie diversen Annahmen und Limitierungen (siehe 5.3.2), beispielsweise können Änderungen des Windfeldes durch Hindernisse oder lokale Topographie nicht berücksichtigt werden. Dadurch kann die Ausbreitung in komplexerem, bebauten Gelände nicht robust modelliert werden. In solchen Fällen sind mittlerweile, wie auch bei der Verdampfung, CFD-Modelle das Tool der Wahl. Jedoch sind diese Modelle sehr rechenintensiv; eine weitere potentielle Schwierigkeit ist die Bereitstellung belastbarer Annahmen und Randbedingungen (siehe 5.3.4).

Damit eine flammable Wolke aufgrund der Freisetzung leicht brennbarer Flüssigkeiten (LS Benzin) eine potentiell letale Wirkung entwickeln kann sind sowohl eine äusserst stabile Atmosphäre als auch Verdämmung notwendig. Damit ist die Gasausbreitung im freien Feld hinsichtlich Personenrisiken vernachlässigbar. Wenn sich eine Gaswolke jedoch in einem verdämmten Raum ausbilden kann, Beispiele im Kontext Bahn sind Unterführungen oder die Kanalisation, ist dies von Relevanz. Dies kann sowohl durch Gasbildung vor Ort (z.B. Lachenverdampfung nach Ablauf von Flüssigkeit in Kanalisation) als auch durch Gasverfrachtung (z.B. Abfluss und Ansammlung eines schweren Gases in einer Unterführung) geschehen.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Durch ihre Defizite bei der Darstellung von verdämmten Strukturen sind empirischen Modelle für eine robuste, quantitative Risikoabschätzung der im Kontext Personenrisiko relevanten Szenarien (verdämmte Gaswolkenexplosion) nicht geeignet. In solchen Fällen sind CFD-Modelle das Tool der Wahl, das Risiko könnte anhand einiger repräsentativer Fälle abgeschätzt werden. Beispiele:

- Ablauf Flüssigkeit in Kanalisation/Entwässerungssystem, Lachenbildung- & Verdampfung, Bildung flammable Gaswolke, Explosion mit (letaler) Wirkung
- Ablauf und Sammlung schweres Gas in Unterführung, Bildung flammable Gaswolke, Explosion mit (letaler) Wirkung

In unverdämmten Bereichen können sich in der Regel keine flammbaren Gaswolken mit grösserer Ausdehnung und potentiell letaler Wirkung ausbilden. Somit ist die Modellierung der Ausbreitung der Gaswolke nicht relevant.

5.4 Modul 4: Zündung

Der Zeitpunkt und die Ursache der Zündung hängt direkt vom Gefährdungsszenario ab. Dabei wird unterschieden, ob eine Zündung sofort bei oder nach der Freisetzung erfolgt oder ob die Zündung verzögert ist. In der Literatur gibt es keine klare Definition für die Zeitabstände einer sofortigen oder verzögerten Zündung. Eine sofortige Zündung erfolgt innerhalb von Sekunden (<10s). Eine verzögerte Zündung erst nach mehreren Minuten (>10min), so dass Personen Zeit haben sich in Sicherheit zu bringen. Eine Übersicht der Szenarien und möglicher Zündungen ist in Abbildung 5-4 dargestellt. In der Analyse der Literatur wird je nach Szenario unterscheiden, ob eine sofortige Zündung unmittelbar bei oder erst nach der Freisetzung gemeint ist. Der Fall einer Zündung bei der Freisetzung tritt primär bei Unterfeuerung des Behältnisses auf. Andernfalls hängt die Zündung von den sich in der Nähe befindlichen Zündquellen ab.

In einzelnen Szenarien kann ein Wert für die grundsätzliche Wahrscheinlichkeit einer Zündung einer freigesetzten brennbaren Flüssigkeit angegeben werden. Für eine Freisetzung von leicht brennbaren Flüssigkeiten aus einem Tankwaggon und Zündung eines Lachenbrandes sind die statistisch erhobenen Wahrscheinlichkeiten in Tabelle 5-13 angegeben.

Tabelle 5-13: Wahrscheinlichkeit für sofortige + verzögerte und keine Zündung ($P_{sz} + P_{vz}$, P_{kz}) von leicht brennbaren Flüssigkeiten nach Freisetzung aus einem Tankwaggon (Niederländische QRA) [9].

Behälter	Freisetzung	Land	$P_{sz} + P_{vz}$	P_{kz}	Ref.
Tankwaggon	spontan	NLD 	25%	75%	[9]
	kontinuierlich	NLD 	25%	75%	[9]

Die in der Schweiz aktuell verwendeten Werte sind in Tabelle 5-14 gegeben. Im Vergleich werden in der Schweiz ähnliche oder teilweise konservativere Zündungswahrscheinlichkeiten angewandt. Die Übersicht in Tabelle 5-14 zeigt zudem, dass die Wahrscheinlichkeit einer sofortigen Zündung je nach Literaturquelle sehr unterschiedlich ist. Es ist davon auszugehen, dass nicht alle Abschätzung dieselben zugrundeliegenden Ereignisszenarien verwenden. Generell wird festgestellt, dass die Wahrscheinlichkeit einer verzögerten Zündung kleiner oder gleich ist der Wahrscheinlichkeit einer sofortigen Zündung.

Tabelle 5-14: Zündungswahrscheinlichkeiten für sofortige, verzögerte und keine Zündung (P_{sz} , P_{vz} , P_{kz}) von leicht brennbaren Flüssigkeiten nach Freisetzung aus verschiedenen Behälter.

Behälter	Freisetzung	Land	P_{sz}	P_{vz}	P_{kz}	Ref.
stationäre Anlagen	spontan	NLD 	6.5%			[6], [36]
	kontinuierlich	NLD 	6.5%			[6], [36]
Tanklastwagen	spontan	NLD 	40%			[6]

Behälter	Freisetzung	Land	P _{Sz}	P _{Vz}	P _{Kz}	Ref.
	kontinuierlich	NLD 	10%			[6]
Tankwagon	spontan	NLD 	80%			[6]
	kontinuierlich	NLD 	10%			[6]
Tankwagon	spontan	GBR 	20%	10%	70%	[10]
	kontinuierlich	GBR 	10%	0%	90%	[10]
Tankwagon	spontan	CHE 	40-60%	10%	30-50%	[2], [3], [34], [35]
	kontinuierlich	CHE 	20-50%	10%	40-70%	[2], [3], [34], [35]

Um bei einzelnen Ereignisszenarien angepasste Zündwahrscheinlichkeiten berechnen zu können, werden nachfolgend die Modelle gemäss Formeln #16, #17 und #18 aus Tabelle 5-29 zur Abschätzung der sofortigen und der verzögerten Zündung vorgestellt und diskutiert.

5.4.1 Sofortige Zündung

Modell: [36] (Tabelle 5-29, Formel #16)

Bei der sofortigen Zündung wird bezüglich der Eintretenswahrscheinlichkeit unterscheiden, ob es sich um eine Freisetzung aus einer stationären Installation oder aus einem Transportfahrzeug handelt. Zudem spielt die freigesetzte Menge eine Rolle. Bei einer Freisetzung ohne Unterfeuerung wird unterschieden, ob die Freisetzung spontan oder kontinuierlich abläuft (Abbildung 5-4).

Für alle möglichen Pfade und Ereignisse hängen die Eintretenswahrscheinlichkeiten zudem von der Stoffart ab [6]. Dabei werden die Stoffe für die Wahrscheinlichkeit einer Zündung in 3 Kategorien unterteilt. Leicht brennbare Flüssigkeiten wie in dieser Studie werden als hoch entflammbar (Flamm- punkt unter 21°C) und damit als Kategorie 1 Flüssigkeiten (K1-F) eingestuft [36]. Bei stationären Anlagen wird die sofortige Zündungswahrscheinlichkeit für K1-F als unabhängig von der Ausfluss- rate angenommen. In der Formel #16 zur sofortigen Zündung in Tabelle 5-29 ist die Zündwahrschein- lichkeit (P_{Sz}) in den meisten Fällen nur vom zweiten Teil und daher von der minimalen Zündungsener- gie (MIE) abhängig. Bei mobilen Transportbehältern spielt die Art der Freisetzung eine Rolle (Tabelle 5-14).

Formel #16 in Tabelle 5-29 gibt die Wahrscheinlichkeit einer sofortigen Selbstentzündung des Gas- gemisches an aufgrund der Umgebungstemperatur und elektrostatischer Aufladung [36]. Für die Ta- belle 5-15 wurde die Wahrscheinlichkeit der Selbstentzündung für einige Beispiele berechnet. Bei einer Unterfeuerung ist die Umgebungstemperatur höher und entsprechend die sofortige Zündung wahrscheinlicher. Sind zusätzliche Zündquellen vorhanden kann die Wahrscheinlichkeit P_{Sz} natürlich höher sein als die Selbstentzündung.

Tabelle 5-15: Wahrscheinlichkeit sofortiger Zündung P_{Sz} aufgrund von Selbstentzündung gemäss Formel #16 [36] für verschiedene Benzinarten (Selbstentzündungstemperatur AIT) und Umgebungstemperaturen T unter Normbedingun- gen (MIE = 0.8 mJ, P_a = 0.101325 MPa).

Stoff	AIT	P _{Sz} (T=25 °C)	P _{Sz} (T=270 °C)	P _{Sz} (T=400 °C)
Rohbenzin	426 °C (699 K, 799 °F)	0.7%	0.7%	35.6%
Sommerkraftstoff	290 °C (563 K, 554 °F)	0.7%	31.6%	100%
Winterkraftstoff	279 °C (552 K, 534 °F)	0.7%	51.0%	100%

5.4.2 Verzögerte Zündung

Modell: [36] (Tabelle 5-29, Formel #17, #18)

Die verzögerte Zündung kann erfolgen, sofern keine sofortige Zündung erfolgt ist (Abbildung 5-4) und keine Intervention stattgefunden hat. Es gibt verschiedene Berechnungsarten [36]:

- Die verzögerte Zündung kann anhand der Ausflussrate und des Behälters parametrisiert werden (Formel #17).
- Zusätzlich kann eine verzögerte Zündung entstehen, wenn sich Zündungsquellen und das Gasgemisch im gleichen Gebiet und der gleichen Zeitperiode aufhalten (Formel #18).
- Eine verzögerte Zündung kann aufgrund von Arbeitsprozessen ausgelöst werden.

Daher ist es bei der verzögerten Zündung ebenfalls sehr entscheidend, welche Szenarien im jeweiligen Fall auftreten können. Für eine konservative Schätzung wird die maximale Wahrscheinlichkeit der Berechnungsarten verwendet.

Die Parametrisierung der verzögerten Zündwahrscheinlichkeit p_{vz} aufgrund der Ausflussmenge kann durch Interpolation gemäss Formel #17 und den Werten aus Tabelle 5-16 berechnet werden. Für kleinere Behälter wie Benzintanks ist die Wahrscheinlichkeit einer verzögerten Zündung bei kleineren Lecks von wenigen Zentimetern Durchmessern anhand der Freisetzungsrate zu vernachlässigen. Bei p_{vz} handelt es sich um eine bedingte Wahrscheinlichkeit für den Fall, dass keine spontane Zündung aufgetreten ist.

Tabelle 5-16: Bedingte und absolute Wahrscheinlichkeit einer verzögerten Zündung (p_{vz} und P_{vz}) leicht brennbarer Flüssigkeiten gemäss Formel #17 für verschiedene Behälter [36] und dessen Ausflussraten (Annahme: $P_{sz} = 0.5$; $P_{vz} = [1 - P_{sz}] \times p_{vz}$).

Behälter	Freisetzungsrate (kg/s)	p_{vz}	$P_{vz} = 0.5 p_{vz}$
Kleine stationäre Anlage	0.1	0.1%	0.05%
	1	0.2%	0.1%
	100	10%	5%
Grosse stationäre Anlage	0.1	0.1%	0.05%
	1	0.2%	0.1%
	110	13%	6.5%
Ölplattform	0.1	0.1%	0.05%
	100	2%	1%
Allgemeiner Benzintank	0.1	0.1%	0.05%
	1	0.1%	0.05%
	7	0.1%	0.05%
	26	0.2%	0.1%

Die verzögerte Zündung anhand von sich im Ereignisgebiet aufhaltenden Zündquellen hängt sehr stark vom Ereignisszenario ab. Sind die Umstände des Ereignisses bekannt, kann mit Formel #18 eine verzögerte Zündungswahrscheinlichkeit p_{vz} für eine Verzögerung t nach dem Ereignis berechnet werden. Dabei entscheidend ist die Zeit in der sich das Gasgemisch im Bereich der Zündquelle befindet. Bei p_{vz} handelt es sich um eine bedingte Wahrscheinlichkeit für den Fall, dass keine spontane Zündung aufgetreten ist. Beispiele für die Wahrscheinlichkeiten für verzögerte Zündungen sind in Tabelle 5-17 angegeben.

Tabelle 5-17: Bedingte und absolute Wahrscheinlichkeit einer verzögerten Zündung (p_{vz} und P_{vz}) leicht brennbarer Flüssigkeiten nach 10 Minuten im Aufenthaltsbereich der Zündquelle gemäss Formel #18 für Zündquellen [36] (Annahme: $P_{sz} = 0.5$; $P_{vz} = (1 - P_{sz}) \times p_{vz}$).

Zündquelle	Zündungsstärke (1/min)	p_{vz} (t=10min)	$P_{vz} = 0.5 p_{vz}$
Stromkabel (pro 100 m)	0.2	6.8%	3.4%
Motorfahrzeug	0.4	20.9%	10.4%
Elektrolok und Fahrleitungen unter Strom	0.8	68.0%	34.0%
Stationäre Anlage (pro Standort)	0.9	83.4%	41.7%

5.4.3 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ergebnisse

Bei der Eintretenswahrscheinlichkeit einer Zündung spielt die Art der Freisetzung in zweierlei Hinsicht eine Rolle: Zum einen, ob es sich um eine stationäre Installation oder um ein Transportfahrzeug handelt, zum anderen, ob die Freisetzung spontan oder kontinuierlich abläuft. Das Szenario und die Umgebungsbedingungen sind daher in jedem Fall zu berücksichtigen. Aufgrund des Zeitpunkts der Zündung wird unterschieden zwischen einer sofortigen (<10s) und einer verzögerten (>10min) Zündung. Bei Unterfeuerung ist mit einer hohen Wahrscheinlichkeit mit Selbstentzündung und einer sofortigen Zündung zu rechnen. Internationale Expertisen zu den Zündwahrscheinlichkeiten zeigen grosse Unterschiede, was auf Unterschiede in den Ereignisszenarien schliessen lässt. Sind die konkreten Ereignisse bekannt können die Wahrscheinlichkeiten sofortiger (Kapitel 5.4.1) und verzögerter (Kapitel 5.4.2) Zündung quantitativ bestimmt werden. Bei mehreren Berechnungsarten der Zündwahrscheinlichkeit wird ein konservativer Ansatz gewählt und die maximale Zündwahrscheinlichkeit verwendet. Für spontane Freisetzungen ist die sofortige Zündwahrscheinlichkeit grösser als für kontinuierliche Freisetzung. Die verzögerte Zündwahrscheinlichkeit ist generell kleiner als die sofortige Zündwahrscheinlichkeit und unabhängig von der Freisetzung.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Sofern kein konkretes Ereignisszenario vorliegt wird empfohlen, im Freien für Tankwaggons die konservativen Zündwahrscheinlichkeiten für spontane und kontinuierliche Freisetzung der aktuellen Screening-Methodik für Personenrisiken [2] zu verwenden. Sind die konkreten Ereignisse bekannt können die Wahrscheinlichkeiten sofortiger (Kapitel 5.4.1) und verzögerter (Kapitel 5.4.2) Zündung quantitativ genauer bestimmt werden.

5.5 Modul 5: Wirkung auf den Menschen

5.5.1 Wirkung des Ereignisses

5.5.1.1 Lachenbrand

Modell: Zwei-Zonen-Model Poolfire6 [37] (Tabelle 5-29, Formel #19)

Strahlungsleistung (W/m^2) in Distanz von einem Feuer, abhängig von Emissionsgrad, Sichtfaktor und atmosphärischer Transmission. In diesem semi-empirischen Modell [37] wird die Flamme in Form eines gekippten Zylinders mit zwei Zonen dargestellt: Eine untere Zone mit hoher Emission und sauberer Verbrennung, darüber eine russige, verdunkelte Zone. Das Modell wurde gegen ein breites Spektrum von Testdaten validiert und für die meisten Brennstoffe für gut befunden. Eine Hauptunsicherheit bei der Anwendung solcher Modelle ist die Tatsache, dass der Anwender Parameter definieren muss die einen grossen Einfluss auf die resultierende Oberflächenenergie der Flamme haben. Ein Vorteil des Modells ist die Verfügbarkeit von Werten zu den Brandeigenschaften verschiedener Substanzen [30][Tabelle 5-18].

In der unteren der zwei Zonen von Poolfire6 findet immer saubere Verbrennung statt, bei sehr rüsigen Verbrennungsprozessen (Beispiel: sehr grosse Lache mit entsprechend schlechter Sauerstoffzufuhr) kann dies zu einer Überschätzung von Flammentemperatur und Wärmestrahlung führen. Deshalb wird zusätzlich ein zweites, einzoniges Modell berücksichtigt. Bei nicht-russenden Substanzen wie Methanol wird die Strahlungsleistung von semi-empirischen Ein-Zonen-Modellen jedoch generell unterschätzt [37].

Tabelle 5-18: Brandeigenschaften verschiedener Flüssigkeiten in POOLFIRE6 [37]

Brennstoff	Abbrandrate [kg/(m ² s)]	SEP _{max} [kW/m ²]	U _R [m ² /m ²]		
			D < 10m	10m < D < 20m	D > 20m
Aceton	0.038	130	0.02	0.02	0.02
Erdöl	0.051	130	0.05	0.05	0.05
Diesel	0.054	130	0.02	0.02	0.02
Ethanol	0.020	130	1	1	1
Heizöl	0.034	130	0.02	0.02	0.02
Benzin	0.067	130	0.02	0.02	0.02
Kerosin	0.063	130	0.02	0.02	0.02
Methanol	0.020	70	1	1	1

5.5.1.2 Verpuffung (kurz nach Benzinaustritt oder unverdämmte Gaswolke)

Die Voraussetzung für eine Verpuffung (englisch: flash fire) ist das Vorhandensein eines entflammbar (explosionsfähigen) Gasgemisches aus einer brennbaren Substanz und Sauerstoff. Hierbei müssen zwei Dinge beachtet werden: Der Sauerstoffanteil des Gemisches darf nicht unter einem bestimmten substanzabhängigen Wert, der sogenannten Sauerstoffgrenzkonzentration, liegen, sonst kann das Gemisch nicht gezündet werden. Zudem muss die Konzentration der brennbaren Substanz im Gemisch zwischen der unteren (LFL) und oberen (UFL) Flammgrenze, auch Explosionsgrenze genannt, liegen (Abbildung 5-5). Die Zündung dieser Mischung erzeugt ein Feuer mit einer Flammenfront, die sich bei einer Verpuffung typischerweise mit Geschwindigkeiten zwischen 1 und 10 m/s bewegt [30].

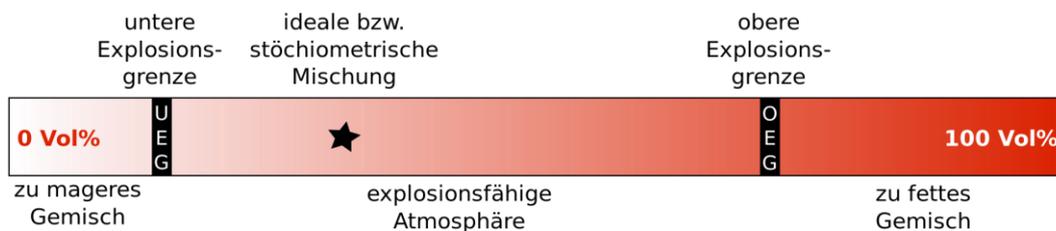


Abbildung 5-5: grafische Darstellung der Explosionsgrenzen und des idealen Mischungsverhältnisses abhängig von der Konzentration. Quelle: Jiver at German Wikipedia (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Explosionsgrenzen.svg>)

Die Modellierungsmethodik besteht aus der Schätzung des brennbaren Bereichs, der durch LFL und UFL begrenzt wird. Form, Grösse und Lage einer entflammbar Wolke sind zeitabhängig und werden üblicherweise durch Ausbreitungsmodelle berechnet (5.3.2, 5.3.3).

Flash fires werden nicht oft modelliert [30]: Da sie nur von sehr kurzer Dauer sind, ist die integrierte Wärmebelastung ausserhalb der Wolke klein. Ein pragmatischer Ansatz ist die Annahme, dass das Phänomen in erster Linie für Objekte innerhalb der brennbaren Wolke von Bedeutung ist [30]. Eine Situation mit Gefahrenpotential für den Menschen ist beispielsweise die Inspektion eines nicht ganz leeren Tanks, in dem ein kleiner Rest des Inhalts in die Gasphase übergegangen ist. Wenn eine brennbare Gaswolke in einem verdämmten Bereich auftritt, kann die Zündung des Gemischs jedoch zu einer Gaswolkenexplosion (5.5.1.5) führen.

5.5.1.3 Feuerball

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #21)

Strahlungsleistung (W/m^2) in Distanz von einem Feuerball, abhängig von Emissionsgrad, Sichtfaktor und atmosphärischer Transmission. Empirische Modelle wie das hier vorgestellte verwenden einen statischen Radius und feste Höhen (hier: 2 x Radius Feuerball). Zur Abschätzung der brennbaren Masse eines Feuerballs wird ein Ansatz angewandt, der auch bei der Schätzung der Masse von BLEVEs Verwendung findet (3 x adiabatic flash)[30].

Die Ursache eines Feuerballs ist meist die Freisetzung durch BLEVE. Weitere Ursachen (insbesondere auch für gasförmige Substanzen) sind die instantane Freisetzung von unter Druck stehendem Gas oder die BLEVE von unter Druck verflüssigtem Gas. Diese Ursachen sind im Kontext von brennbaren Flüssigkeiten ein unwahrscheinliches Szenario (vgl. 5.1.5), dementsprechend ist auch der Feuerball als direkte Folge nicht relevant.

5.5.1.4 Stichflamme

Modell: Chamberlain-Model [38](Tabelle 5-29, Formel #22)

Strahlungsleistung (W/m^2) in Distanz von einer Stichflamme, abhängig von Emissionsgrad, Sichtfaktor und atmosphärischer Transmission.

Mögliche Ursachen im Kontext Bahn sind der Boilover eines unter atmosphärischem Druck stehenden Flüssigkeitsbehälters oder ein kritischer Druckanstieg in einem Tank bei keinem/zu geringem Druckausgleich. Beispiel: Als Folge von Unterfeuerung von Tankwaggons kann es zu Überdruck im Tank kommen, dadurch wird dabei der Domdeckel des Waggons weggeschleudert und das entweichende Gasgemisch entzündet sich in eine bevorzugte Richtung. Im Falle des Grossbrandes von Affoltern (1994) entstand während mehreren Minuten eine Stichflamme von grosser Höhe⁷.

5.5.1.5 Explosion

Unter dem Begriff Explosion werden zwei verschiedene Prozessgruppen zusammengefasst [30]:

- Physische Explosionen sind das Resultat einer so starken Druckzunahme in einem Behälter, dass dieses birst (Kesselbersten). Auch das starke Erhitzen von Flüssigkeiten und die zugehörige Volumenzunahme beim Übergang in die Gasphase kann zu einer physischen Explosion führen (BLEVE). Solche Explosionen erzeugt Druckeffekte und, vorausgesetzt die freigesetzte Substanz ist flammbar und es kommt zu einer Zündung, thermische Effekte.
- Chemische Explosionen resultieren üblicherweise aus einer exothermen Reaktion mit einem Brennstoff. Ein Beispiel sind Gasexplosionen. Die Voraussetzung hierfür ist eine explosive Gaswolke, welche definiert wird als Gemisch von brennbaren Stoffen (Gas, Dampf,

⁷ <http://www.berufsfeuerwehr.ch/einsatz/einsatzberichte/affoltern/affoltern1994.pdf>

https://de.wikipedia.org/wiki/Eisenbahnunfall_von_Z%C3%BCrich-Affoltern

<https://www.youtube.com/watch?v=IEzL7SOXDXy>

Nebel oder Staub einer brennbaren Substanz) mit einem Oxidationsmittel, meist Luftsauerstoff. Nach erfolgter Zündung kommt es zu einer selbständigen Ausbreitung des Verbrennungsvorgangs. Gasgemische reagieren nur innerhalb bestimmter Mischungsverhältnisse explosionsartig (untere und obere Explosionsgrenze; Abbildung 5-5). Chemische Explosionen erzeugen sowohl thermische als auch Druckeffekte. Beispiele sind unbeschränkte Dampfwellenexplosion (UVCE), Gaswellenexplosion (VCE), oder Staubexplosion in einem begrenzten Raum.

Bersten Druckbehälter/BLEVE (Baker Model)

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #23)

Effektive Energie einer Druckwelle [J] in Abhängigkeit von Menge und spezifischer Energie der freigesetzten Flüssigkeit sowie Reflektion durch den Boden: Wenn Kessel hoch über Boden, $A_{sb} = 1$; wenn Kessel vom Empfänger aus gesehen weniger als 15° über Horizont, $A_{sb} = 2$.

Dieses Szenario ist im Zusammenhang mit brennbaren Flüssigkeiten eher unwahrscheinlich (siehe 5.1.1 und 5.1.5).

Gaswellenexplosion (TNO Multi-Energy concept)

Modell: TNO Yellow Book [4] (Tabelle 5-29, Formel #24)

Gesamte Verbrennungsenergie einer (teil)verdämmten Gaswellenexplosion [MJ] in Abhängigkeit vom Volumen der Dampfwolke. Das Verfahren basiert auf der numerischen Simulation einer Explosionswelle aus einer zentral gezündeten sphärischen Wolke mit Flammen von konstanter Geschwindigkeit. Es wird angenommen, dass nur das verdämmte Volumen der Gaswolke beiträgt. Die hier präsentierte Annäherung ist gültig für Kohlenwasserstoff-Luft-Mixturen [39].

Eine potentielle Schwierigkeit in der Anwendung der Methode ist jedoch die korrekte Wahl der Initialbedingungen. Zur Abschätzung der Stärke einer Explosion ist das „Layout“ von Bedeutung (wichtige Parameter sind beispielsweise Obstruktion innerhalb der Gaswolke, Zündstärke und Verdämmung; Tabelle 5-19). Anhand dieser Parameter kann ein Ereignis einer Klasse auf einer Skala von 1 (unbedeutend) bis 10 (Detonationsstärke) zugeordnet werden (Tabelle 5-19). Eine weitere Schwierigkeit ist das korrekte Abschätzen des verdämmten Anteils der Gaswolke. Eine Orientierungshilfe für die Auswahl der verschiedenen Parameter ist in [40] gegeben.

Tabelle 5-19: Druckwellen-Quellenterme [4].

Zündung		Obstruktion			Parallel plane confinement	Multi-energy unconfined	Klasse
Low	High	High	Low	No			
	X	x			X		7-10
	X	X				X	7-10
X		X			X		5-7
	X		X		X		5-7
	X		X			X	4-6
	X			X	X		4-6
X		X				X	4-5
	X			X			4-5
X			X		X		3-5
X			X			X	2-3
X				X	X		1-2
X				X		X	1

Relevant ausschliesslich bei Verdämmung der Gaswolke (siehe 6.1).

5.5.2 Wirkung auf den Menschen

Bei der Beurteilung der Wirkung eines letalen Ereignisses werden zwei Begriffe unterschieden. Die Fatalität beschreibt die qualitative Wirkung (= Tod). Die Letalität bezieht sich auf den quantitativen Effekt, nämlich den Prozentsatz der Menschen, die bei der Exposition gegenüber einem bestimmten Konsequenzniveau zu Tode kommen würden.

Zuerst werden die verschiedenen Gefährdungen vorgestellt. Im Anschluss folgt eine Zusammenstellung von Probit-Funktionen, die zur Abschätzung der Letalität verwendet werden (Tabelle 5-28).

5.5.2.1 Feuer

Je nach Dauer, Intensität und Ausgesetzttheit reichen die Auswirkungen eines Brandes auf den Menschen von Verbrennungen 1., 2. und 3. Grades bis zum Tod. Schon Verbrennungen 2. Grades können zu Todesfällen führen (1% Letalität bei durchschnittlicher Kleidung); bei Verbrennungen 3. Grades ist der Todesfall wahrscheinlich (50% Letalität bei durchschnittliche Kleidung) [41].

Menschen sind gegenüber Feuer auf folgende Arten vulnerabel (Tabelle 5-20):

- Direkte Einwirkung durch das Feuer (*fire engulfment*)
- Thermische Strahlung (ausserhalb des Feuers)
- Aufenthalt innerhalb eines Gebäudes, das Feuer/Strahlung ausgesetzt ist

Tabelle 5-20: Verschiedene Arten von Bränden und potentielle Vulnerabilitäten für den Menschen [41]

Art Brand	Potentielle Vulnerabilität		
	Direkte Einwirkung	Strahlung	Innerhalb Gebäude
Flash fire	X	-	möglicherweise
Lachenbrand	X	X	X
Feuerball/BLEVE	x	X	möglicherweise

Direkte Feuereinwirkung

Eine Person, die nur vorübergehend und teilweise Feuer direkt ausgesetzt ist, wird vermutlich nicht-tödliche Verbrennungen erleiden. Eine Person, die zu grossen Teilen oder vollständig von einem Feuer verschlungen wird kommt sehr wahrscheinlich zu Tode. Es werden folgende Wahrscheinlichkeiten empfohlen [41]:

- Verbrennung/Verschlingung durch Lachenbrand, Flash-fire oder Feuerball im Freien: 100% Letalität
- Im Falle von feuerfester Kleidung, abhängig von der Möglichkeit zur Flucht: 50 bis 100% Letalität

Wärmestrahlung

Die Wirkungen von Wärmestrahlung auf den Menschen ist abhängig von der Dauer der Exposition, die Art der Kleidung sowie der Verfügbarkeit von Schutz und Deckung. In Tabelle 5-21 sind einige Strahlungsstärken und ihre Effekte zusammengefasst.

Tabelle 5-21: Wirkungen von Wärmestrahlung [41]. Die Prozentzahlen gelten für Brände mit längerer Dauer wie beispielsweise Lachenbrände.

Wärmestrahlung [kW/m ²]	Wirkung
1.2	Sonnenwärme am Mittag im Sommer
2	Minimum zur Verursachung von Schmerzen nach 1 Minute
5 >	Schmerzen nach 15 bis 20 Sekunden, Verletzungen nach 30 Sekunden
6<	Schmerzen innerhalb von ca. 10 Sekunden; Beeinträchtigung der Fluchtwege
12.5	Extreme Schmerzen innerhalb von 20 Sekunden; instinktive Suche nach Schutz. Wenn Flucht nicht möglich: Tod. Letalität im Freien: 70% Letalität im Inneren: 30%.
20	Hilflosigkeit, Tod wenn Rettung nicht schnell erfolgt
25	Wahrscheinliche Tötung bei längerer Exposition. Selbstentzündung nach längerer Exposition.
35	Unmittelbar Todesfall (100% Letalität)

Die Auswirkungen der thermalen Ausstrahlung ist in Tabelle 5-22 gegeben.

Tabelle 5-22: Thermal dose units (für Gebrauch empfohlene Dosis, in Klammer die Range der publizierten Werte) und ihre Wirkungen auf den Menschen [41][42].

Thermal dose units [(kW/m ²) ^{4/3} s]	Wirkung
108-127	Schmerz (ungeschützte Haut)
290-440	Verbrennungen 1. Grades
1000 (670-1100)	1% Letalität/ Verbrennungen 2. Grades bei durchschnittlicher Kleidung
1800-2000 (1220-3100)	50% Letalität/ Verbrennungen 3. Grades bei durchschnittlicher Kleidung
3200	100% Letalität

5.5.2.2 Explosion

Die Auswirkungen von Explosionen auf den Menschen lassen sich drei Kategorien zuordnen:

1. Primär/Direkt: Verletzungen durch die Druckänderung selbst.
2. Sekundär: Verletzungen durch Trümmerwurf/Glassplitter hervorgerufen durch die Druckwelle
3. Tertiär: Verletzungen (insbesondere Kopf) durch Stürze etc. hervorgerufen durch die Wucht der Druckwelle

Meistens wird die Letalität nicht unabhängig für die einzelnen Kategorien betrachtet, stattdessen wird die Letalität insgesamt abgeschätzt. Es werden folgende Wahrscheinlichkeiten empfohlen [41]:

Tabelle 5-23: Überdrucke und ihre Letalität für den Menschen [41].

Überdruck [bar]	Letalität [%]
Menschen draussen, in offenem Gelände	

Überdruck [bar]	Letalität [%]
0.35	15
0.5	50
<i>Menschen draussen, angrenzend an Gebäude oder in ungeschützten Strukturen</i>	
0.35	30
0.5	100

Für Menschen in Gebäuden ist die Letalität abhängig von Gebäudetyp sowie -Überdruck. Ein Werkzeug zur Abschätzung sind Relationen zwischen Letalität und Überdruck, ein Beispiel ist in Abbildung 5-6 gegeben. Hierbei wird zwischen 4 Gebäudetypen unterschieden:

- CIA1: Strukturgebäude: Sonderkonstruktion, keine Fenster
- CIA2: Typisches Bürohaus: vierstöckig, Betonrahmen und Dach
- CIA3: Typisches Wohnhaus: zweistöckig, Ziegelwände, Holzböden
- CIA4: Holzhaus", ebenerdig

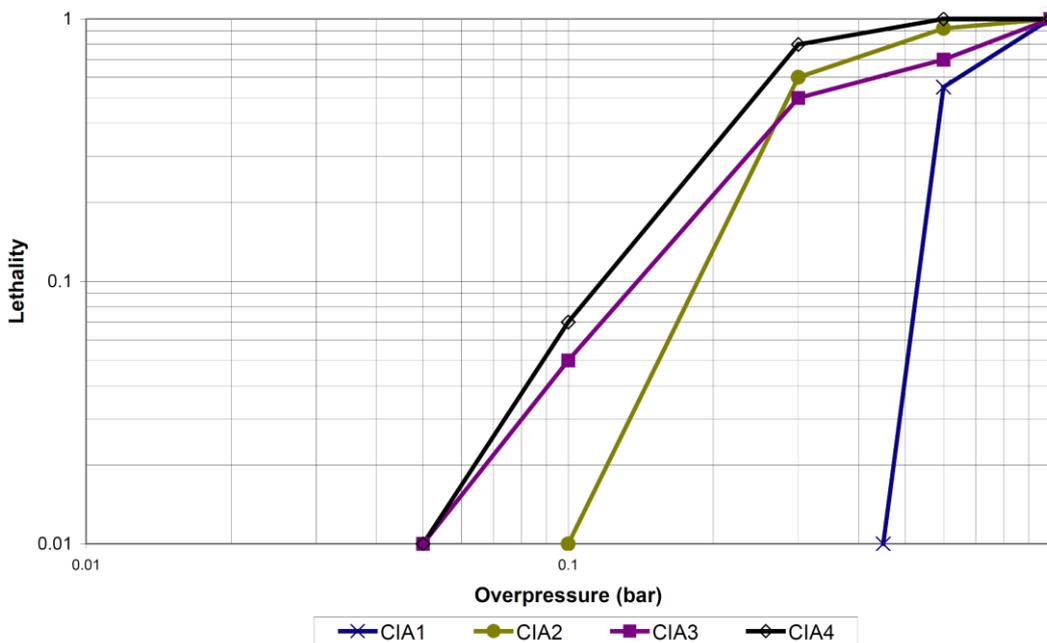


Abbildung 5-6: Relation zwischen Letalität und Überdruck. [42], nach [43].

Verletzungen durch die Druckänderung selbst

Die schnelle Kompression und Dekompression einer Explosionswelle beeinträchtigt das menschliche Gewebe. Speziell Lunge, Magen-Darm-System (beide enthalten Luft) und Trommelfelle sind anfällig für Verletzungen, es kann zu schweren Blutungen oder Embolien mit potentiell fatalem Ausgang kommen.

Trümmerwurf/Glassplitter

Fliegende Fragmente einer Explosion sind meist gefährlicher als der Überdruck an sich [42]. Sehr häufig und gefährlich sind Glassplitter, Schätzungen des notwendigen Druckes zum Bruch von konventionellem Glas sind in [42] gegeben:

- 0,017 bar: 1% Glasbruch
- 0,062 bar: 90% Glasbruch

Der Hauptfaktor bei der Verursachung von Verletzungen ist die Geschwindigkeit der Fragmente: die Wahrscheinlichkeit einer Penetrationsverletzung steigt mit zunehmender Geschwindigkeit, besonders bei kleinen, scharfen Trümmern wie Glasfragmenten.

Tabelle 5-24: Verletzungen von fliegenden Trümmern [42]

Verletzung	Spitzen-Überdruck [bar]	Aufprallgeschwindigkeit (m/s)	Impuls (N s/m ²)
Hautverletzungen, Schwellwert	0,07 - 0,15	15	512
schwere Wunde, Schwellwert	0.15 - 0.2	30	1024
Schwere Wunden, um 50% Wahrscheinlichkeit	0,25 - 0,35	55	1877
Schwere Wunden, um 100% Wahrscheinlichkeit	0,5 - 0,55	90	3071

5.5.2.3 Rauch

Rauch aus der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen hat drei Merkmale, die für die Wirkung auf den Menschen relevant sind. Er enthält Kohlenmonoxid (giftig) und Kohlendioxid bei einem gleichzeitigen Mangel an Sauerstoff. Zudem erschwert er die Sicht.

Die Toxizität von Kohlenmonoxid ist auf die Bildung von CO-Hämoglobin im Blut zurückzuführen, welches zu einer Verringerung der Zufuhr von Sauerstoff zu den Körperorganen führt. Eine Übersicht über die körperliche Reaktion zu verschiedenen Konzentrationen ist in Tabelle 5-25 gegeben.

Tabelle 5-25: Auswirkungen von atmosphärischem CO auf den Menschen [41]

CO Konzentration [ppm]	Wirkung
1500	Kopfschmerzen nach 15 Minuten, Zusammenbruch nach 30 Minuten, Tod nach 1 Stunde
2000	Kopfschmerzen nach 10 Minuten, Zusammenbruch nach 20 Minuten, Tod nach 45 Minuten
3000	Maximale "sichere" Exposition 5 Minuten, Kollapsgefahr nach 10 Minuten, Todesgefahr nach 15 bis 45 Minuten
6000	Kopfschmerz und Schwindelgefühl nach 1 bis 2 Minuten, Todesgefahr nach 10 bis 15 Minuten
12800	Sofortwirkung, Bewusstlosigkeit nach 2 bis 3 Atemzügen, Todesgefahr nach 1 bis 3 Minuten

Kohlendioxid ist an sich nicht giftig, allerdings beeinflusst es die menschliche Atmung. Eine Übersicht über die körperliche Reaktion zu verschiedenen Konzentrationen ist in Tabelle 5-26 gegeben.

Tabelle 5-26: Auswirkungen von atmosphärischem CO₂ auf den Menschen [41]

CO ₂ Konzentration [ppm]	Wirkung
45 000	Reduzierte Konzentrationsfähigkeit nach mehr als 8 Stunden Exposition, Anpassung möglich
55 000	Atemnot, Kopfschmerzen und erhöhte Herzfrequenz nach 1 Stunde
65 000	Schwindel und Verwirrtheit nach 15 Minuten Exposition

CO ₂ Konzentration [ppm]	Wirkung
70 000	Angstgefühl durch Atembeschwerden, schwere Symptome nach 6 Minuten Exposition
100 000	Bewusstlosigkeit nach 30 Minuten
120 000	Bewusstlosigkeit nach 5 Minuten
150 000	Expositionslimit 1 Minute
200 000	Bewusstlosigkeit nach weniger als 1 Minute

Eine Übersicht über die körperliche Reaktion zu einer Abnahme von Sauerstoff in der Luft ist in Tabelle 5-27 gegeben.

Tabelle 5-27: Auswirkungen von atmosphärischer Sauerstoffabnahme [41]

% Sauerstoff in der Luft	Wirkung
21-20	Normal
18	Nachtsicht ist beeinträchtigt
17	Atmungsvolumen nimmt zu, muskuläre Koordination nimmt ab, Aufmerksamkeit und Denken erfordern deutlich mehr Aufwand
12 - 15	Kurzatmigkeit, Kopfschmerzen, Schwindel, beschleunigter Puls, schnelle Ermüdung, muskulöse Koordination für qualifizierte Bewegung verloren
10 - 12	Übelkeit und Erbrechen, Anstrengung unmöglich, Bewegungslähmung
6 - 8	Kollaps und Bewusstlosigkeit
6 >	Tod in 6 bis 8 Minuten

5.5.2.4 Probit-Funktionen zur Abschätzung

Ein gebräuchliches Tool zur Abschätzung von Letalität sind Probit-Funktionen [41]. Diese Gleichungen verknüpfen die Letalität mit der Stärke oder Konzentration einer Gefährdung sowie der Expositionsdauer. Ähnliche, weniger gebräuchliche Ansätze sind "Specific Level of Toxicity (SLOT) " / "Significant Likelihood of Death (SLOD) " sowie "Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH)" [42].

Die im Rahmen der Literaturrecherche zusammengetragenen Probit-Funktionen sind in Tabelle 5-28 zusammengefasst, die entsprechenden Dosen sowie Letalitätswerte in folgenden Tabellen gegeben:

- Wärmestrahlung: Tabelle 5-22
- Druckwelle bei Explosion: Tabelle 5-23
- Trümmerwurf/Glassplitter: Tabelle 5-24
- CO-Exposition: Tabelle 5-25

Tabelle 5-28: Gebräuchliche Probit Funktionen zur Abschätzung der Letalität von Gefährdungen. Einheit Tödliche Dosis Wärmestrahlung: $[(kW/m^2)^{3/4}] * s$

Referenz	Probit Funktion	Tödliche Dosis			Variablen
		1%	50%	99%	
Letalität durch Wärmestrahlung [42][44]					
Eisenberg et al., 1975	$Y = -14.9 + 2.56 \ln V$	957	2377	5905	thermale Dosis $V = (I^{4/3} t)$ mit

Referenz	Probit Funktion	Tödliche Dosis			Variablen
Tsao & Perry, 1979	$Y = -12.8 + 2.56 \ln V$	421	1046	2600	Wärmestrahlung I (kW/m ²) Dauer Exposition t (s)
Lees 1994	$Y = -10.7 + 1.99 \ln V$	828	2669	8607	
TNO [5],[6]	$Y = -36.38 + 2.56 \ln V$	421	1047	2602	Wie oben, aber: I (W/m ²)
[21]	$Y = -36.48 + 2.56 \ln V$	438	1089	2705	
Letalität durch CO-Exposition					
TNO [5],[42]	$Pr = -38.8 + 3.7 \ln(C * t)$	5.74E-05	1.08E-04	2.02E-04	Konzentration C Dauer Exposition t
Letalität durch Lungenverletzung					
[42]	$Y = 5.13 + 1.37 \ln P$	0.17	0.91	4.98	Druck P (barg)
TNO [5]	$Pr = 5.0 + 5.74 \ln S$	0.66	1.00	1.50	$S = \frac{4.2}{P} + \frac{1.3}{i}$ mit Druck P (Pa) & Impuls i (Pa ^{1/2} s kg ^{-1/3})
Letalität durch Trümmerwurf					
TNO [5]	Trümmer 4.5+kg: $Pr = -13.19 + 10.54 \ln v_0$	4.50	5.62	7.01	v_0 = Einschlaggeschwindigkeit Fragment (m/s); m = Masse (kg)
	Trümmer 0.1-4.5kg: $Pr = -17.56 + 5.30 \ln S$	45	71	110	$S = \frac{1}{2} m v_0^2$
	Trümmer 0.001-0.1kg: $Pr = -29.15 + 2.10 \ln S$	3.8E+06	1.2E+07	3.5E+07	$S = m v_0^2$
Letalität durch Glassplitter					
TNO [5]	$Pr = 2.67 + 5.62 \ln DLF * P / P_{st}$	1.00	1.51	2.29	DLF = dynamic load factor P = Spitzen-Überdruck (Pa)
TNO [5], Update 2003	$Pr = 2.67 + 3.38 \ln DLF * P / P_{st}$	1.00	1.99	3.97	P_{st} = Druck Fensterscheibe

Probit-Funktionen Wärmestrahlung

Die klassischen Probit-Funktionen für Wärmestrahlung (Eisenberg, Tsao&Perry, Lees, TNO) werden im Folgenden sowie in [42] und [44] vorgestellt und diskutiert. Grundlegende Zahlen für den Zusammenhang zwischen Thermal dose units und Letalität sind in Tabelle 5-22 gegeben.

Die Probitfunktion von **Eisenberg et al. (1975)** basiert auf Untersuchungen, in denen die Auswirkungen der beiden Atombombenabwürfe in Hiroshima und Nagasaki auf die Bevölkerung analysiert wurden. Früher verbreitet eingesetzt, wurden mit der Zeit Zweifel an der Methode laut: Hauptkritikpunkt ist, dass bei Nuklearexplosionen vor allem Strahlung im kurzwelligen UV-Bereich emittiert wird (im Vergleich zu Strahlung im langwelligen Infrarotbereich bei Kohlenwasserstoffbränden). Infrarotstrahlung dringt tiefer in die Haut ein als UV-Strahlung, dementsprechend unterschätzt die Probit-Funktion die Letalitätswahrscheinlichkeit. Weitere methodische Unsicherheiten werden in [44] diskutiert, Beispiele sind der unbekannte Anteil der Bevölkerung, der sich im Freien befand und überhaupt direkter Strahlung ausgesetzt war, sowie die fehlende genaue Unterscheidung der Todesopfer nach der Ursache (neben der Hitzestrahlung forderte die Druckwelle samt Folgen zahlreiche Todesopfer, ebenso die ionisierende Strahlung). **Tsao & Perry (1979)** versuchten, die Probit-Funktion von Eisenberg et al. (1975) für die langwellige Wärmestrahlung anzupassen. Untersuchungen hatten gezeigt, dass die notwendige Strahlungsdosis, um Verbrennungen ersten Grades

zu erzeugen, für Infrarotstrahlung 2.23-mal kleiner ist als bei UV-Strahlung. Tsao & Perry (1979) teilten schlicht und einfach die Strahlungsdosen der Probit-Funktion von Eisenberg et al. (1975) durch 2.23, womit ihre neue Probit-Funktion die meisten methodischen Unsicherheiten von Eisenberg et al. (1975) übernimmt. Die Probit-Funktion von **Lees (1994)** basiert auf Bestrahlungsversuchen mit Schweinehaut. Es wird ein Faktor für die Schutzfunktion von Bekleidung berücksichtigt, je nachdem ob die thermale Dosis über oder unter dem Zündpunkt von Bekleidung liegt. Ein Kritikpunkt ist, dass eine Lampe eingesetzt wurde, die vor allem im UV-Bereich strahlt. Somit wird die Letalitätswahrscheinlichkeit ebenfalls unterschätzt. Die Ansätze im **TNO Green Book (1992)**[5] sind von der Probit-Funktion von Tsao & Perry (1979) abgeleitet und dementsprechend von denselben methodischen Problemen betroffen. Die Probit-Funktion findet Anwendung in dem Fall, dass eine Schutzwirkung von Kleidung nicht speziell berücksichtigt werden soll. In der neueren Version, dem Green Book (2003), finden sich auch Vorschläge zur Berücksichtigung der Schutzwirkung von Kleidung auf Basis von Lees (1994). In EFFECTS sind beide Ansätze implementiert. Über den neusten Ansatz, präsentiert in [21], gibt es keine Hintergrundinformation.

Fazit: Alle Funktionen weisen methodische Unsicherheiten auf. Die Ansätze von Eisenberg und Lees jedoch unterschätzen die Letalitätswahrscheinlichkeit grundsätzlich und sind für eine konservative Risikoabschätzung nicht geeignet.

Probit-Funktionen Druckwelle und CO-Exposition

Für die Risiken Druckwelle (Verletzung Lunge, Trümmerwurf, Glassplitter) und CO-Exposition wurden im Rahmen der Literaturrecherche ausschliesslich die Probit-Funktionen des TNO Green Book (1992)[5] gefunden.

5.5.3 Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ergebnisse

Die präsentierten empirischen Modelle für Lachenbrand (5.5.1.1), Feuerball (5.5.1.3), Bersten eines Behälters/BLEVE (5.5.1.5) sowie Gaswolkenexplosion (5.5.1.5) wurden gründlich evaluiert und werden breit eingesetzt. Eine Gemeinsamkeit ist die Tatsache, dass viele Parameter definiert werden müssen, die potentiell einen grossen Einfluss auf das Endresultat haben. Hier sind die Modelle für Lachenbrand und Gaswolkenexplosion hervorzuheben, da sie verhältnismässig viele Parameterwerte zur Auswahl bereitstellen. Mittlerweile werden auch in diesem Bereich CFD-Modelle verwendet, ein Beispiel ist die Abschätzung von Gaswolkenexplosionen auf Offshore-Plattformen [30].

Im Kontext des LS Benzin relevant sind Lachenbrand und verdämmte Gaswolkenexplosion. Für letzteres sind CFD-Modelle das Tool der Wahl – siehe auch 5.3.5. Nicht relevant sind die Ereignisse Bersten eines Behälters, Feuerball als Folge einer BLEVE (5.1.5) sowie Gaswolkenexplosion im Freien.

Ein gebräuchliches Tool zur Abschätzung von Letalität sind Probit-Funktionen [41]. Hier ist zu beachten, dass es für die gleichen Parameter unterschiedliche Ansätze gibt, abhängig von Datengrundlage und genauer Fragestellung [42].

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

- Relevant und State-of-the-Art sind das Modell für Lachenbrand und die Probit-Funktionen zur Abschätzung der thermalen Wirkung auf den Menschen. Für letzteres werden die Funktionen von Tsao & Perry (1979) und dem TNO Green Book (1992)[5] empfohlen.
- Verdämmte Gaswolkenexplosion ist ebenfalls ein relevantes Szenario, durch ihre Defizite bei der Darstellung von verdämmten Strukturen sind empirischen Modelle (speziell jene für Gasausbreitung) für eine robuste, quantitative Risikoabschätzung jedoch nicht geeignet. In solchen Fällen sind CFD-Modelle für eine genauere Analyse nötig, siehe 5.3.5.

Tabelle 5-29: Übersicht über die Modelle des Standes der Technik

Modul	Ereignis/Vorgang	#	Modell/Formel	Beschreibung/Relevanz	Referenz
Freisetzung	Grosses Leck/Bruch Behältnis (instantane Freisetzung) 5.1.1	1	$Q_L = \phi \times V \times \rho_L$	Anfänglich vorhandene Flüssigkeitsmasse im Behältnis (kg), äquivalent zur maximalen Freisetzungsmenge. Abhängig von Füllgrad, Behältnisvolumen, und Flüssigkeitsdichte bei Lagertemperatur.	TNO, Yellow Book [4], Sektion 2.5.4.1. (Seite 2.118)
	Leck in Kessel/Tank (kontinuierliche Freisetzung) 5.1.2	2	$q_s = C_d \times A_h \times \sqrt{(2(P - P_a) \times \rho_L)}$	Mengendurchfluss (kg/s), abhängig u. A. von Leckform (Ausflusskoeffizient C_d ; Tabelle 5-3), Leckgrösse, dem Druck über der Flüssigkeit sowie dem hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäule. Nach [8] entspricht der mittlere Verlust eines betroffenen Eisenbahnkesselwagens rund 35% des Inhalts.	TNO, Yellow Book [4], Sektion 2.5.4.2. (Seite 2.121)
	Leck in/Ausfluss durch Rohr (kontinuierliche Freisetzung) 5.1.3	3	$q_s = \rho_L \times u_L \times A_{\text{pipe}}$ mit $u_L = \sqrt{2 \times \frac{\Delta P}{\rho_L} \times \frac{d_p}{(f_D \times \rho_L)}}$, $1/\sqrt{f_D} = -2 \times 10 \log\left(\frac{\epsilon}{(3.715 \times d_p)} + 2.51/(Re \times \sqrt{f_D})\right)$ und $Re = \rho_L \times u \times d_p / \eta$	Mengendurchfluss (kg/s). Wie oben, zusätzlich wird Friktion durch das Rohr berücksichtigt (abhängig von Länge, Durchmesser und Rohrwandrauigkeit ϵ ; Tabelle 5-5).	TNO, Yellow Book [4], Sektion 2.5.4.2. (Seite 2.122).
	Zerstäubung durch kleines Leck 5.1.4	4	$x_F = \frac{c_{pL} \times (T_0 - T_{KG})}{h_{vL}}$ $x_V = 0.32 \times \sqrt{\frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho_L}} \times \frac{c_{p,\text{Luft}} \times (T_U - T_{KG})}{h_{vL}} \times \frac{Z}{d_0}$	Verdampfungsanteil bei adiabater Sättigungstemperatur X_F und Verdunstungsanteil X_V (je kg/kg) bei Freisetzung in Form von Zerstäubung, abhängig von der spezifischen Wärmekapazität der Flüssigkeit, Ruhe-, Kühlgrenz- und Umgebungstemperatur sowie Verdampfungsenthalpie.	Modell von Fauske [17], beschrieben und evaluiert bei [7]
	BLEVE Kessel/Tank 5.1.5	5	siehe «Grosses Leck/Bruch Behältnis (instantane Freisetzung)»		
Lachenbildung und Verdampfung	Fläche Lache 5.2.1	6	$A = \pi \times r^2$	Fläche (m ²) einer unverdämmten Lache auf glatter Ober- oder Wasserfläche, abhängig vom Radius. Bei Verdämmung entspricht die maximale Lachenfläche der verdämmten Fläche.	TNO, Yellow Book [4], Sektion 3.5.2.4 (Seite 3.51)
	Tiefe einer Lache auf ebener Oberfläche 5.2.2	Z	$h = \frac{V}{A}$	Tiefe (m) einer Lache auf glatter Ober- oder Wasserfläche.	
	Tiefe einer Lache auf unebener Oberfläche	8	$h_e = \frac{V}{A} - h_p$	Tiefe (m) einer Lache auf unebener Oberfläche. Hierbei wird Lache in zwei Schichten aufgeteilt: h_p repräsentiert die	

Modul	Ereignis/Vorgang	#	Modell/Formel	Beschreibung/Relevanz	Referenz
	5.2.3			mittlere Tiefe der Unebenheiten des Untergrundes, h_e die «dynamische» Schicht darüber.	
	Ausbreitung Lache auf Wasserkörper 5.2.4	9	$\frac{dr}{dt} = u$ wobei $\frac{\partial u}{\partial t} + u \times \frac{\partial u}{\partial r} = -g \times \frac{\partial h}{\partial r}$ $\frac{\partial h}{\partial t} + u \times \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{h}{r} \times \frac{\partial(r+u)}{\partial r} = 0$	Unverdämmte Ausbreitung Lache (m/s) auf einem Wasserkörper, abhängig von der Radialgeschwindigkeit der Flüssigkeit am Rand der Lache.	TNO, Yellow Book [4], evaluiert bei [45] und [46].
	Ausbreitung Lache in freiem Gelände, ebener Untergrund 5.2.5	10	$\frac{dr}{dt} = u \times \phi_2(\epsilon)$	Unverdämmte Ausbreitung Lache (m/s) in freiem Gelände, abhängig von der Radialgeschwindigkeit der Flüssigkeit am Rand der Lache sowie der Oberflächenrauigkeit.	
	Lachenausbreitung verdämmt 5.2.6	11		Ausbreitung Flüssigkeit anfangs wie oben (vorausgesetzt Ausbreitung in alle Richtungen möglich), sobald $A_{Lache} = A_{Verdämmung}$ bleibt die Fläche konstant.	
	Verdampfung 5.2.7	12	<p><u>Nicht siedend:</u></p> $q_v(t) = \frac{k_m(t) \times P_v(T_L(t)) \times MW}{R \times T_L(t)} \times A$ mit $k_m(t) = 0.004786 \times (u_{w,10})^{0.78} \times (2 r(t))^{-0.11} \times Sc^{-0.67}$ <p><u>Siedend:</u></p> $q_v(t) = \frac{\sum H(t)}{\Delta H_v(T_b)} \times A$ mit $0 = \sum H(t) - q''_v \Delta H_v(T_b)$ $\sum H(t) = H_{soil}(t) + H_{air}(t) + H_{sol} + H_{long} + H_{flow}(t)$ sowie $H_{soil}(t) = \frac{\lambda_s(T_s - T_L(t))}{\sqrt{\alpha_s \pi t}}$ $H_{air}(t) = \frac{0.0037 \times Pr_a^{\frac{1}{3}} \times Re^{\frac{4}{5}} \times \lambda_a}{d_L} (T_u - T_L(t))$ und, im Fall einer kontinuierlichen Freisetzung:	Verdampfungsrate (kg/s), abhängig von Dampfdruck, Lachentemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Oberflächenrauigkeit (nicht siedende Lache) sowie von der Energiebilanz der Lache (Energiezufuhr von Untergrund, Umgebungsluft, kurz- und langwellige Strahlung sowie, bei kontinuierlicher Freisetzung, Zufluss [siedende Lache]).	[26], auf Basis von [4]

Modul	Ereignis/Vorgang	#	Modell/Formel	Beschreibung/Relevanz	Referenz
			$H_{\text{flow}}(t) = \frac{q_s c_{pl} (T_0 - T_L)}{A(t)}$		
Ausbreitung und Verdünnung der Gaswolke	Neutrale Gaswolke unverdämmt (<i>passive dispersion</i>) 5.3.2	13	$C_{(x,y,z,t)} = \begin{cases} \frac{\chi}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x - u_w(t)}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) \right] & (t \leq t_r) \\ \frac{\chi}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x - u_w(t - t_r)}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{x - u_w(t)}{\sigma_x \sqrt{2}} \right) \right] & (t_r < t < \infty) \end{cases}$ <p>mit</p> $u_w(z) = \frac{u_{w,\text{friction}}}{0.4} \left[\ln \frac{z + z_0}{z_0} + \psi(\zeta) \right]$ <p>wobei</p> $\zeta = \frac{z}{L_{MO}}$ $L_{MO} = \begin{cases} \text{Class A: } -11.4z_0^{0.10} \\ \text{Class B: } -26.0z_0^{0.17} \\ \text{Class C: } -123z_0^{0.30} \\ \text{Class D: } \infty \\ \text{Class E: } 123z_0^{0.30} \\ \text{Class F: } 26.0z_0^{0.17} \end{cases}$ <p>und</p> $\chi_{(x,y,z,t)} = \left(\frac{q_v(t)}{u_w} \right) g_y(x, y) g_z(x, z)$ <p>wobei</p> $g_y(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y(x)}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2 \right]$ $g_z(x, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z(x)}} \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z - h_s}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z + h_s}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right] \right\}$ <p>und</p> $\sigma_y(x) = \frac{s_{y1}x}{\sqrt{1 + s_{y2}x}}$ $\sigma_z(x) = s_{z1}x (1 + s_{z2}x)^{s_{z3}}$	Konzentration einer neutralen, unverdämten Gaswolke (kg/m ³) abhängig von einem vertikalen Windgeschwindigkeitsprofil u_w [dieses ist wiederum abhängig von der Bodenrauigkeit z_0 ; Tabelle 5-10] und der atmosphärischen Stabilität [Pasquill Klassen A-F, siehe Tabelle 5-11]. Die Koeffizienten s_x zur Abschätzung der stabilitätsklassenabhängigen Dispersionsparameter σ sind in Tabelle 5-12 gegeben.	ALOHA's Gaussian dispersion model [28], Sektion 4.3

Modul	Ereignis/Vorgang	#	Modell/Formel	Beschreibung/Relevanz	Referenz
	Schwere Gaswolke unverdämmt 5.3.3	14	$C_{(x,y,z)} = 2 b_y b_z C(x) F_y(y, y_b, C_y) F_z(z, h_c, \sigma_z)$ mit $C(x) = \mu_a m(x) / (\mu_s + (\mu_a - \mu_s) m(x)),$ $F_y(y, y_b, C_y) = \operatorname{erf}\left(\frac{y+y_b}{\sqrt{2} C_y}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y-y_b}{\sqrt{2} C_y}\right) / (4 y_b),$ und $F_z(z, h, \sigma_z) = \left(\exp\left(-\frac{(z-h_c)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h_c)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right) / \sqrt{2\pi\sigma_z^2}$	Konzentration einer schweren, unverdämmt Gaswolke (kg/m^3) abhängig von Windgeschwindigkeit, atmosphärischer Stabilität und Bodenrauigkeit.	SLAB model, TNO Yellow Book [4], Sektion 4.5.5.2 (Seite 4.93)
	Gaswolke teilverdämmt Gaswolke verdämmt Eindringen in Kanalisation	15	Die Ausbreitung in komplexem Gelände kann am besten numerisch mit CFD-Modellen simuliert werden. Die hierbei verwendeten Navier-Stokes-Gleichungen werden in [29] vorgestellt. 5.3.4		
Zündung	Wahrscheinlichkeit für spontane Zündung 5.4.1	16	$P_{SZ} = P_{a1} + P_{a2}$ $P_{a1} = \begin{cases} 0, \frac{T_U}{AIT} < 0.9 \\ 1, \frac{T_U}{AIT} > 1.2 \\ 1 - 5000e^{-9.5(\frac{T_U}{AIT})}, \text{sonst} \end{cases}$ $P_{a2} = \left[0.0024 \cdot \frac{(145.04 \cdot P)^{\frac{1}{3}}}{(MIE)^{\frac{2}{3}}} \right]$	Umgebungstemperatur T_U und Autozündungstemperatur AIT des Stoffes in Fahrenheit, Umgebungsdruck P_a in MPa, Minimale Zündungsenergie MIE in mJ	[36], löst Werte aus TNO Purple book [6] ab und Tabelle 5-15
	Wahrscheinlichkeit für verzögerte Zündung aufgrund der Austrittsrate 5.4.2	17	$\ln P_{VZ} = \ln P_{VZ,tief} + \frac{(\ln q_s - \ln q_{s,tief})(\ln P_{VZ,hoch} - \ln P_{VZ,tief})}{\ln q_{s, hoch} - \ln q_{s,tief}}$	Die Wahrscheinlichkeit P_{VZ} wird stückweise linear interpoliert in Abhängigkeit der Austrittsrate q_s der Flüssigkeit. Werte für die Interpolation ($P_{VZ,tief}$, $P_{VZ,hoch}$, $q_{s,tief}$, $q_{s,hoch}$) finden sich in der Studie von [36]	[36], löst TNO Purple book [6] ab
	Wahrscheinlichkeit für verzögerte Zündung aufgrund von Zündungsquellen 5.4.2	18	$M_{Dauer} = 1 - (1 - s^2) \cdot e^{-(0.015 \cdot s) \cdot t}$	Der Einflussfaktor für Zündungsquellen M_{Dauer} innerhalb der Zeitperiode 0 bis t Minuten hängt von der Stärke s der Zündungen pro Minute ab, deren Werte in der Studie von [36] zu finden sind.	[36]

Modul	Ereignis/Vorgang	#	Modell/Formel	Beschreibung/Relevanz	Referenz
Wirkung auf den Menschen	Lachenbrand, Brand Kessel/Tank, Poolfeuer (Auf Wasseroberfläche) 5.5.1	19	$q'' = \tau_L F_L SEP_L + \tau_U F_U SEP_U$ mit $F = \iint_S \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi D^2} dA_1$ $SEP_L = SEP_{max} (1 - \exp^{-k_f D})$ $SEP_U = U_R SEP_L + (1 - U_R) SEP_S$	Strahlungsleistung (W/m ²) in Distanz von einem Feuer, abhängig von Emissionsgrad, Sichtfaktor und atmosphärischer Transmission.	Zwei-Zonen-Modell Poolfire6 [37]
	Verpuffung (Flash fire) 5.5.1.2	20	Zur räumlichen Abschätzung einer Verpuffung, siehe 5.3.2 und 5.3.3. Zusätzlich müssen die substanzspezifischen Werte für die untere und obere Flammgrenze berücksichtigt werden.		
	Feuerball (z.B. BLEVE) 5.5.1.3	21	$q'' = SEP_{act} \times F \times \tau_a$ mit $F = \left(\frac{r_{fb}}{X}\right)^2$ $SEP_{act} = \Delta H \times m_{fl} \times F_s / (4 \times \pi \times r_{fb}^2 \times t)$	Strahlungsleistung (W/m ²) in Distanz von einem Feuerball, abhängig von Emissionsgrad, Sichtfaktor und atmosphärischer Transmission.	TNO Yellow Book [4], Sektion 6.5.7 (Seite 6.88)
	Stichflamme 5.5.1.4	22	$q'' = SEP_{act} \times F \times \tau_a$ mit $F = \iint_S \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2}{\pi D^2} dA_1$ $SEP_{act} = \frac{F_s \times m_{comb} \times H_{comb}}{A_f}$	Strahlungsleistung (W/m ²) in Distanz von einer Stichflamme, abhängig von Emissionsgrad, Sichtfaktor und atmosphärischer Transmission.	Chamberlain Modell [38]
	Bersten Druckbehälter (z.B. BLEVE) 5.5.1.5	23	$E_{ex} = E \times A_{sb}$ mit $E = e_{av} \times M_{fl}$	Effektive Energie einer Druckwelle [J] in Abhängigkeit von Menge und spezifischer Energie der freigesetzten Flüssigkeit sowie Reflektion durch den Boden: Wenn Kessel hoch über Boden, $A_{sb} = 1$; wenn Kessel vom Empfänger aus gesehen weniger als 15° über Horizont, $A_{sb} = 2$.	Baker model, TNO Yellow Book [4], Sektion 7.5.2 (Seite 7.35), evaluiert bei [30]
	Explosion (teil)verdämmte Gaswolke im Freien 5.5.1.5	24	$E \approx 3.5 \times V_{cloud}$	Gesamte freigesetzte Energie einer (teil)verdämmten Explosion [MJ] in Abhängigkeit vom Volumen der Dampf- wolke. Die hier präsentierte Annäherung ist gültig für Kohlenwasserstoff-Luft-Mixturen [39].	Multi-Energy concept, TNO Yellow Book [4], evaluiert bei [30] und [39]
Explosion in Kanalisation					

Modul	Ereignis/Vorgang	#	Modell/Formel	Beschreibung/Relevanz	Referenz
	5.5.1.5				
	Trümmerwurf 5.5.1.5	25	$n_1(L) = \frac{N}{L_{av}} \cdot e^{-\frac{L}{L_{av}}}$ $n_2(\alpha, \beta) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma_\alpha \cdot \sigma_\beta} \cdot e^{-\frac{(\alpha - \alpha_{av})^2}{2 \cdot \sigma_\alpha^2}} \cdot e^{-\frac{(\beta - \beta_{av})^2}{2 \cdot \sigma_\beta^2}}$	Dichteverteilung der Trümmer abhängig von der Länge, n_1 , und abhängig von den Raumwinkeln n_2 .	[47]
	Probit-Funktionen 5.5.2.4	26	Tabelle 5-28		

5.6 Resultate der Literaturrecherche

Bei der **Freisetzung** sind einige Mechanismen relativ einfach zu beschreibende physikalische Vorgänge. In diesen Fällen, der instantanen Freisetzung durch den Bruch des Behältnisses (5.1.1) sowie der kontinuierlichen Freisetzung durch ein Leck (5.1.2, 5.1.3), hat sich der Stand der Technik nicht weiterentwickelt - die Modelle im Yellow Book [4] sind noch aktuell. Für die Zerstäubung von Flüssigkeit durch ein kleines Leck (5.1.4) gibt es Modelle, jedoch ist dieser Vorgang durch seine geringe Freisetzungsrates nur von untergeordneter Bedeutung. Eine Freisetzung durch Kesselbersten in Folge einer BLEVE (5.1.5) ist möglich, verursacht beispielsweise durch Unterfeuerung. Jedoch tritt dieses Phänomen im Kontext der im LS Benzin zusammengefassten Substanzen verhältnismässig selten auf. Die Modellierung der Freisetzung durch Überfüllung eines Tanks, wie geschehen in Buncefield, UK, im Jahr 2005 [22], und die entsprechende Folgenabschätzung (Bildung Gaswolke bei Windstille, Ausbreitung im Tanklager, Gaswolkenexplosion) ist mit empirischen Modellen nur bedingt möglich. Hier wäre beispielsweise ein CFD-Modell (5.3.4) mit Topographie/Bebauung und 3D Windfeld bedeutend besser geeignet. Jedoch sind diese Modelle sehr rechenintensiv; eine weitere potentielle Schwierigkeit ist die Bereitstellung belastbarer Annahmen und Randbedingungen (siehe 5.3.4).

Die häufig zugrunde gelegte relativ einfache physikalische Modellierung der **Lachenbildung** ist angemessen für die Ausbildung einer Lache auf einem ruhigen Wasserkörper (5.2.4). Im freien Gelände (5.2.5) sind die Annahme einer ebenen Fläche sowie die Nicht-Berücksichtigung von Abfluss durch Neigung der Fläche sowie Versickerung potentiell problematisch für eine realistische Berücksichtigung des Geländes. Die empirischen Modelle für **Verdampfung** (5.2.7) funktionieren gut in offenem, homogenem Gelände, trotz einiger problematischer Annahmen. Für komplexe, bebauten Umgebungen sind jedoch mittlerweile CFD-Modelle eine bessere Wahl für eine detailliertere Analyse.

In flachem, offenem Gelände liegen empirische Modelle für die **Ausbreitung** und Verdünnung von Gaswolken (5.3.2, 5.3.3) etwa gleichauf mit komplexeren Modellen. Entsprechend sind empirische Modelle für diese Art Gelände ein angemessenes Tool zur Abschätzung der Gasausbreitung. Durch ihre diversen Annahmen und Limitierungen (siehe 5.3.2), ein Beispiel ist die Nicht-Berücksichtigung der lokalen Topographie, kann jedoch die Ausbreitung in komplexerem, bebauten Gelände nicht robust modelliert werden. Hier wären wiederum CFD-Modelle ein Tool für eine detailliertere Analyse.

Bei der Eintretenswahrscheinlichkeit einer **Zündung** ist die Art der Freisetzung in zweierlei Hinsicht von Bedeutung: Zum einen, ob es sich um eine stationäre Installation oder um ein Transportfahrzeug handelt, zum anderen, ob die Freisetzung spontan oder kontinuierlich abläuft.

Die hier vorgestellten empirischen Modelle für Lachenbrand (5.5.1.1), Feuerball (5.5.1.3), Bersten eines Behälters/BLEVE (5.5.1.5) sowie Gaswolkenexplosion (5.5.1.5) wurden und werden breit eingesetzt, die Resultate sind trotz einiger Annahmen robust. Eine gemeinsame Schwierigkeit der Modelle ist, dass viele Parameter mit potentiell grossem Einfluss auf das Endresultat definiert werden müssen. Mittlerweile werden auch in diesem Bereich CFD-Modelle verwendet, ein Beispiel ist die Abschätzung von Gaswolkenexplosionen auf Offshore-Plattformen [30]. Ein gebräuchliches Tool zur Abschätzung der **Wirkung auf den Menschen**, beispielsweise in Form von Letalität, sind Probit-Funktionen. Hier ist zu beachten, dass es für die gleichen Parameter unterschiedliche Ansätze gibt, abhängig von Datengrundlage und genauer Fragestellung [42].

6 Anforderungsprofil an EDV-Applikationen

Aktuell sind zwei kommerzielle EDV-Applikationen erhältlich, die die gesamte Ereigniskette (Freisetzung und Ausbreitung eines gefährlichen Stoffes bis hin zu den Auswirkungen auf den Menschen) abbilden und quantitativ beurteilen können - EFFECTS und PHAST.

Für die Evaluation dieser zwei EDV-Applikationen (Kapitel 7) wird im Folgenden anhand der Resultate der Literaturrecherche das Anforderungsprofil definiert (Tabelle 6-1). Zuvor werden einige spezifische Fragen diskutiert und die relevanten Szenarien im Kontext Bahn festgelegt.

6.1 Spezifische Fragen

Ist eine Gaswolkenexplosion (VCE) von Benzin im Freien von Relevanz?

Die Wahrscheinlichkeit einer Gaswolkenexplosion hängt unter anderem von den folgenden Variablen ab: (i) der grundsätzlichen Verbrennungsgeschwindigkeit einer Substanz und (ii) dem Grad der Verdämmung [congestion/confinement] des Raumes, in dem sich die Gaswolke bildet [48]. Je höher der Wert dieser Variablen, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein explosionsfähiges Gasgemisch innerhalb der unteren und oberen Explosionsgrenze herausbildet (Abbildung 5-5). Während die Verbrennungsgeschwindigkeit eine intrinsische Charakteristik einer Substanz ist, sind die anderen zwei Variablen potentiell abhängig von der Freisetzungsmenge – je grösser die Freisetzung, desto eher füllt die Gaswolke einen ausreichend verstopften/verdämmten Raum [48]. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Zeitpunkt der Zündung – diese muss verzögert erfolgen. Wird eine un- oder nur unzureichend verdämmte Gaswolke gezündet, oder geschieht die Zündung sofort bei der Freisetzung, kommt es zu einer Verpuffung [18].

Eine Gaswolkenexplosion unter freiem Himmel ist möglich, siehe das Beispiel der stationären Anlage in Buncefield, UK [22]. Jedoch bedarf es für einen solchen Fall eine sehr grosse Freisetzungsmenge, verdämmte Strukturen sowie niedrige Windgeschwindigkeiten [18][22][49]. Folglich ist eine unverdämmte Gaswolkenexplosion im freien Feld, beispielsweise nach instantaner Freisetzung durch Entgleisung eines Tankwaggon, ein sehr unwahrscheinliches Szenario.

Welchen Einfluss hat die Topographie (grosse Gebäude, in Stadt)?

Ein guter Überblick über den Einfluss von urbanen und industriellen Strukturen auf das Windfeld und die Ausbreitung von Gasen ist in [50] gegeben. In einer gross angelegten Vergleichsstudie (The Complex Urban Terrain Experiment; CUTE)[31] wurden verschiedene Arten von Modellen anhand von Daten einer extra durchgeführten Feldkampagne evaluiert. Schauplatz der Studie ist die Downtown einer typischen mitteleuropäischen Stadt – keine signifikanten Höhenunterschiede des Untergrundes, dichte Bebauung, Bebauungshöhen von 25-35m, keine grösseren Grünflächen. Als Tracer wurde Schwefelhexafluorid verwendet. Zudem wurden mit einem Modell des urbanen Raumes im Windkanal Messungen durchgeführt.

Die Modelle wurden entsprechend ihres jeweiligen Ausbreitungsmoduls in drei Gruppen eingeteilt:

- Typ I, Gauß'sche Ausbreitung, bei diesen Modellen wird die Strömung zwischen Gebäuden nicht berechnet. Entsprechende Ansätze werden in 5.3.2 und 5.3.3 präsentiert, Beispiele für Tools sind EFFECTS (7.1) und PHAST (7.2).
- Typ II, Lagrang'sche Ausbreitung, hier wird die Strömung empirisch oder diagnostisch gelöst, jedoch nicht zwischen Gebäuden.
- Typ III, Euler'sche Ausbreitung, hier wird die Strömung zwischen Gebäuden berechnet. Diese Modelle sind komplexe CFD-Modelle (siehe 5.3.4).

Die Modellsimulationen wurden anonymisiert, die Resultate sind entsprechend nur für den Typ, jedoch nicht für die einzelnen Modelle (z.B. EFFECTS, PHAST) vorhanden.

Die Resultate [31]:

- In offenem Gelände, beispielsweise auf einem grossen Platz, wird die erste Phase der Ausbreitung nach einer kontinuierlichen Gasfreisetzung von allen drei Typen realistisch simuliert. In komplexem Gelände, beispielsweise bei der Freisetzung in einer Häuserschlucht, ist jedoch eine akkurate Berücksichtigung der Geometrie fundamental.
- Bei instantaner Freisetzung eines Gases (*puff release*) schneiden die Typ I-Modelle generell am schlechtesten ab.
- Die Leistung eines Modells steigt grundsätzlich mit dem Komplexitätsgrad, die besten Ergebnisse wurden mit Typ III-Modellen erzielt. Zwei Vorzüge dieser Modelle: Im Vergleich zu den Typen I und II kommt es bei kontinuierlicher Gasfreisetzung zu keiner systematischen Über- oder Unterschätzung von Konzentrationen. Bei instantaner Gasfreisetzung sind sie in der Lage, die Variabilität der Freisetzung bedingt durch die natürliche Variabilität des Strömungsfeldes zu simulieren (dargestellt beispielsweise durch Histogramme).
- Typ III-Modelle sind generell besser als Typ II-Modelle, brauchen jedoch viel Rechen- und Vorbereitungszeit. Typ II-Modelle sind signifikant schneller, stimmen zufriedenstellend mit den Beobachtungen überein und können mit grösserer Konfidenz angewendet werden als Typ I-Modelle.

Eine Dampfwolke auf Basis einer flammbaren Flüssigkeit entsteht durch Verdampfung, dementsprechend handelt es sich um einen kontinuierlichen Freisetzungsvorgang. Im offenen Feld wird solch eine Ausbreitung von allen drei Modelltypen realistisch simuliert. Jedoch ist zu beachten, dass es dieser Art von Gelände die Ausbildung einer flammbaren Gaswolke eher unwahrscheinlich ist (siehe oben; 6.1). In komplexeren, bebauten Umgebungen ist der Einsatz von Modellen der Typen II und III vorzuziehen.

Welchen Einfluss haben die Zündwahrscheinlichkeiten?

Wie in 5.4 vorgestellt hängt die Wahrscheinlichkeit einer Zündung (sofort oder verzögert) von einer Reihe von Parametern ab - der Stoffart, der Art der Freisetzung (spontan oder kontinuierlich) sowie des freisetzenden Behältnisses (stationäre Anlage oder mobiler Transportbehälter). Somit haben Szenario und Umgebungsbedingungen einen grossen Einfluss auf die Zündwahrscheinlichkeiten; dies muss entsprechend berücksichtigt werden.

6.2 Relevante Szenarien

Generelle Annahmen

- Es wird ein Wirkungsradius im Freien von 100m angenommen. Wenn sich innerhalb keine Menschen aufhalten ist ein Szenario nicht relevant.
- BLEVE - sehr unwahrscheinlich, daher nicht relevant (5.1.5).
- Für eine VCE mit letaler Wirkung ist eine Verdämmung der explosionsfähigen Gaswolke notwendig. Ist dies nicht gegeben, beispielsweise im Freien, sind auch Verdampfung und Gasausbreitung nicht relevant.
- Die untersuchten empirischen Modelle sind nicht in der Lage, Verdämmung adäquat zu berücksichtigen. Hier werden 3D-Modelle wie beispielsweise CFD benötigt.

Freies Gelände

Bei einer spontanen oder kontinuierlichen Freisetzung im offenen Feld sind Lachenbildung (abhängig von Versickerung/Ablauf) und ggf. -brand das wahrscheinlichste Szenario. Freisetzung durch BLEVE sowie Verdampfung und Gasausbreitung sind nicht relevant (siehe oben). Die Hauptwirkung ist Hitzestrahlung.

Zwischenfälle im offenen Feld sind nur bei Beteiligung eines Reisezuges relevant, bei zufällig anwesenden Spaziergängern/Joggern etc. kann im Falle eines Lachenbrandes von Selbstrettung ausgegangen werden.

Nähe Siedlung

Bei einer spontanen oder kontinuierlichen Freisetzung in der Nähe einer Siedlung sind Lachenbildung (abhängig von Versickerung/Ablauf) und ggf. -brand das wahrscheinlichste Szenario. Freisetzung durch BLEVE sowie Verdampfung und Gasausbreitung im Freien sind nicht relevant (siehe oben). Die Hauptwirkung ist Hitzestrahlung.

Zudem ist ein Ablauf der Flüssigkeit in die benachbarte Siedlung und/oder in die Kanalisation möglich. Bei Oberflächenabfluss in eine Siedlung ist Lachenbrand ein relevantes Szenario, zudem ist abhängig von Bebauung/Strukturen die Bildung einer (teil-)verdämmten Gaswolke möglich. Bei Ablauf in die Kanalisation sind Verdampfung und Gasausbreitung relevant. Falls es in der Kanalisation zu einer verdämmten VCE kommt ist der durch die Druckwelle verursachte Trümmerwurf die Hauptwirkung. Eine Gefährdung von Menschenleben ist in beiden Fällen gegeben, das Wirkungsausmass ist jedoch abhängig von Selbstrettung und/oder Interventionsmassnahmen bei verzögerter Zündung.

Bahnhof

Bei einer spontanen oder kontinuierlichen Freisetzung in einem Bahnhof sind Lachenbildung (abhängig von Versickerung/Ablauf) und ggf. -brand das wahrscheinlichste Szenario. Die Hauptwirkung ist Hitzestrahlung und, je nach Bebauung/Strukturen, Rauch.

Bei einem Ablauf von Flüssigkeit in eine Unterführung oder unterirdischen Teil des Bahnhofs ist ebenfalls Lachenbrand mit den Hauptwirkungen Hitzestrahlung und Rauch ein wahrscheinliches Szenario. Zudem sind bei verzögerter Zündung Verdampfung und Gasausbreitung relevant, die Ausbildung einer (teil-)verdämmten Gaswolke und VCE sind möglich. Eine explosive Gaswolke kann sich auch ausbilden, wenn die Substanz an der Oberfläche verdampft und direkt in der (schweren) Gasphase in die Unterführung abfließt. Durch die verzögerte Zündung sind in beiden Fällen Interventionsmassnahmen möglich.

Bei Abfluss von Flüssigkeit/Gas in die Kanalisation sind bei verzögerter Zündung Verdampfung und Gasausbreitung relevant, falls es zu einer verdämmten VCE kommt ist der durch die Druckwelle verursachte Trümmerwurf die Hauptwirkung. Das Wirkungsausmass ist wiederum abhängig von Interventionsmassnahmen.

Verdämmte Gaswolkenexplosion / Bemerkungen zu den Tools

Wie schon mehrfach erwähnt sind empirische Konsequenzmodelle nicht in der Lage, Verdämmung adäquat zu berücksichtigen. Ein Szenario in diesem Zusammenhang wäre das Abfließen von Benzin in eine Unterführung/Kanalisation und die folgende verdämmte Lachen- und Gaswolkenbildung sowie gegebenenfalls Explosion.

In EFFECTS ist seit Version 10 eine «Explosion region method» implementiert (Details: siehe EFFECTS Manual [23]), das die Abschätzung des Überdruckes einer Gaswolkenexplosion anhand grundlegender Verdämmungseigenschaften eines Gebiets/Objekts erlaubt. Bei diesen Eigenschaften handelt es sich um Parametrisierungen vergleichbar zur Oberflächenrauigkeit, dementsprechend ist keine genaue Untersuchung von spezifischen Situationen möglich. Hier ist auch zu erwähnen, dass es für PHAST ein zusätzliches Packet «3D-Explosionen» gibt⁸. Dieses war in der bereitgestellten Testversion nicht verfügbar und konnte dementsprechend nicht näher untersucht werden.

Berechnungen auf Basis der «Explosion region method» mit EFFECTS deuten darauf hin, dass das Abfließen von grösseren Mengen von Benzin in eine Unterführung durchaus ein relevantes Szenario ist (der Ablauf in eine Kanalisation ebenso, Beispiel: Zürich-Affoltern, 1994). So kann sich beispielsweise bei Windstille innerhalb von 15 Minuten aus einer Lache von 1000m² eine Gaswolke mit einer

⁸ <https://www.dnvgl.com/services/taking-hazard-analysis-software-one-step-further-phast-3d-explosions-169>

brennbaren Masse von über 100 kg ausbilden, deren Auswirkungen im Falle einer Explosion (Druckwelle sowie nachgeordnete indirekte Effekte wie Trümmerwurf/Glassplitter) bei entsprechender Verdämmungsparameterisierung ein Personenrisiko darstellen können. Eine genauere quantitative sowie räumlich aufgelöste Abschätzung ist jedoch aufgrund der genannten Limitierungen nicht möglich.

6.3 Übersicht Anforderungsprofil an EDV-Applikationen

In Tabelle 6-1 wird das Anforderungsprofil an die EDV-Applikationen definiert. Hierbei wird zuerst die Relevanz eines Ereignisses/Szenarios festgestellt und, falls diese gegeben ist, das entsprechende Modell benannt. Falls mehrere Modelle gleichwertig sind oder ein technisch fortschrittlicheres Modell keinen speziellen Mehrwert bietet wird dies so aufgeführt.

Betreffend **verdämmte Gaswolkenexplosion** - wie oben dargelegt kann die verdämmte Gaswolkenexplosion als relevantes Szenario nicht ausgeschlossen, jedoch mit EFFECTS und PHAST nicht adäquat untersucht werden. Deshalb werden die entsprechenden Module (Verdampfung, Gasausbreitung, Druckwelle bei Explosion sowie direkte/indirekte Folgen) bei der Beurteilung der EDV-Applikationen ausgeklammert. Stattdessen wird eine vertieftere Überprüfung mittels Berechnen von repräsentativen Szenarien mit 3D-Modellen empfohlen.

Tabelle 6-1: Anforderungsprofil an EDV-Applikationen. Betreffend Relevanz eines Sachverhalts/Vorgangs wird unterschieden zwischen dem Prozess generell sowie dem Schadensausmass im Kontext mit dem Transport von leicht brennbaren Flüssigkeiten mit der Bahn. Ein Sachverhalt/Vorgang wird in das Anforderungsprofil aufgenommen, wenn beides gegeben ist. Eine Ausmassrelevanz wird nur angegeben, wenn ein Vorgang auch für den Prozess relevant ist.

Modul	Ereignis/Vorgang	Relevanz für		Model Stand der Technik	Begründung
		Prozess	Ausmass		
Freisetzung	Instantane Freisetzung - Grosses Leck/Bruch Behältnis (5.1.1)	X	X	TNO, Yellow Book [4]	
	Instantane Freisetzung - BLEVE Kessel/Tank (5.1.5)			-	Entsprechender Druckaufbau im Kessel sehr unwahrscheinlich, dieser gibt vorher nach. Stattdessen/Resultat: Instantane Freisetzung - Grosses Leck/Bruch Behältnis
	Kontinuierliche Freisetzung - Leck in Kessel/Tank (5.1.2)	X	X	TNO, Yellow Book [4]	
	Kontinuierliche Freisetzung - Leck in/Ausfluss durch Rohr (5.1.3)			-	Im Bahn-Kontext im Vergleich zu einem Leck des Kessels von untergeordneter Bedeutung.
	Kontinuierliche Freisetzung - Zerstäubung durch kleines Leck (5.1.4)			-	Nur kleine Freisetzungsrates, für Bildung einer Dampfwolke im Vergleich zur Lachenverdampfung von untergeordneter Bedeutung [18].
	Kontinuierliche Freisetzung - Überfüllung eines Tanks			-	Relevant bei stationären Anlagen sowie dem Transport von Gasen. Im Kontext Benzin eher ein Umwelt-, weniger ein Personenrisiko.
Lachenbildung und Verdampfung	Ausbreitung Lache auf Wasserkörper (5.2.4)	X		-	Relevant für Umwelt-, weniger für Personenrisiken.
	Ausbreitung Lache - in freiem Gelände (5.2.5) - verdämmt (5.2.6)	X	X	<i>Sofortige Zündung:</i> TNO, Yellow Book [4] <i>Verzögerte Zündung:</i> Berücksichtigung von Versickerung & Abfluss	Gängige Modellen bilden Versickerung und Abfluss (auf geneigter Fläche, in Kanalisation/Auffangbehältnis) nicht ab. Bei verzögerter Zündung spielen diese Faktoren potentiell eine grosse Rolle und sollten berücksichtigt werden.
	Verdampfung (5.2.7)	X	X*	-	*Relevant bei Verdämmung der entstehenden Gaswolke, deren Auswirkungen jedoch mit EFFECTS und PHAST nicht adäquat untersucht werden können (siehe auch 6.2.).
Ausbreitung & Verdünnung Gaswolke	Neutrale Gaswolke (5.3.2)	X		-	Relevant bei Verdämmung der Gaswolke, deren Auswirkungen jedoch mit EFFECTS und PHAST nicht adäquat untersucht werden können. Zudem ist die Entstehung einer flammbaren Gaswolke für neutrales Gas viel unwahrscheinlicher als für schweres Gas – siehe 5.3.2.
	Schwere Gaswolke (5.3.3)	X	X*	-	*Siehe «Verdampfung»

Modul	Ereignis/Vorgang	Relevanz für		Model Stand der Technik	Begründung
		Prozess	Ausmass		
Zündung	Wahrscheinlichkeit für sofortige Zündung (5.4.1)	X	X	[2], [3], [6], [10], [34], [35], [36]	Die Wahrscheinlichkeit einer Zündung hängt stark von der Ereignissituation ab. Für eine konkrete Situation müssen die Zündwahrscheinlichkeiten entsprechend angepasst werden können. Als Defaultwert muss das EDV-Tool eine Unterscheidung zwischen spontaner und kontinuierlicher Freisetzung und zwischen sofortiger und verzögerter Zündung in den Berechnungen verwenden. Bei der verzögerten Zündung muss eine Obergrenze der Wahrscheinlichkeit existieren, welche die Intervention berücksichtigt.
	Wahrscheinlichkeit für verzögerte Zündung aufgrund der Austrittsrate (5.4.2) und Unterscheidung zwischen spontaner und kontinuierlicher Freisetzung	X	X	[2], [3], [10], [34], [35], [36]	
	Wahrscheinlichkeit für verzögerte Zündung aufgrund von Zündungsquellen (5.4.2)	X	X	[36]	
Wirkung auf den Menschen	Lachenbrand, Brand Kessel/Tank, Poolfeuer (auf Wasserfläche) (5.5.1)	X	X	Zwei-Zonen-Model Poolfire6 [37]; TNO, Yellow Book [4]	In der unteren der zwei Zonen von Poolfire6 findet immer saubere Verbrennung statt, bei sehr russigen Verbrennungsprozessen (Beispiel: sehr grosse Lache mit entsprechend schlechter Sauerstoffzufuhr) kann dies zu einer Überschätzung von Flammentemperatur und Wärmestrahlung führen. Deshalb wird zusätzlich ein zweites, einzoniges Modell berücksichtigt.
	Stichflamme (Jet fire) (5.5.1.4)	X	X	Chamberlain model [38][4]	
	Verpuffung (Flash fire) (5.5.1.2)	X		-	Flash fires werden nicht oft modelliert [30]: Da sie nur von sehr kurzer Dauer sind, ist die integrierte Wärmebelastung ausserhalb der Wolke klein. Mögliche Modellierungsmethodik – siehe 5.5.1.2.
	Bersten Druckbehälter (z.B. durch BLEVE) (5.5.1.5)			-	Siehe oben, «Instantane Freisetzung - BLEVE Kessel/Tank (5.1.5)»
	Feuerball (5.5.1.3)			-	Feuerbälle treten im Kontext mit BLEVEs sowie der instantanen Freisetzung beim Bruch eines unter Druck stehenden «kalten» Behältnisses auf [51]. Ersteres ist unwahrscheinlich (siehe «Instantane Freisetzung - BLEVE Kessel/Tank (5.1.5)»), letzteres bei Flüssigkeiten nicht relevant.
	Druckwelle bei Explosion Gaswolke (5.5.1.5)	X	X*		*Siehe «Verdampfung»
	Trümmerwurf (5.5.1.4)	X	X*	[47]	*Siehe «Verdampfung»
	Probit-Funktionen (5.5.2.4)	X	X	Tabelle 5-28	

7 Vergleich und Beurteilung von EDV-Anwendungen

Im Folgenden wird abgeklärt, inwiefern die EDV-Applikationen EFFECTS und PHAST dem Anforderungsprofil des im ersten Teil ermittelten Stand der Technik entsprechen. Zusätzlich werden die Dokumentation der Methodik und die methodische Aktualisierung dieser Applikationen verglichen. In einem ersten Schritt werden die EDV-Applikationen charakterisiert. Um die konkrete Implementierung der Modelle und deren Eingabeparameter zu prüfen, werden die Tools selbst untersucht⁹.

Die Beurteilung der EDV-Tools ist in Tabelle 7-7 zusammengefasst. Eine detaillierte Gegenüberstellung der Modelle inkl. technischer Parameter befindet sich im Anhang in Tabelle 8-1.

7.1 EFFECTS

EFFECTS ist eine kommerzielle Software für Sicherheitsanalysen in der [petro-]chemischen Industrie. Das Tool bietet eine umfassende Palette von Berechnungsmodellen für Störfälle bei der Lagerung oder dem Transport von Chemikalien: von Freisetzungs-, Verdampfungs- und Ausbreitungsmodellen bis hin zu Brand-, Explosions- und Schadensmodellen. Diese Modelle können zum einen manuell verwendet und verknüpft werden, zum anderen gibt es eine Reihe von Default Modellkombinationen die ausgewählt werden können.

Tabelle 7-1: Informationen zu EFFECTS

EFFECTS					
Firma:	TNO Department Urban Environment and Safety P.O. Box 80015 NL-3508 TA Utrecht, the Netherlands				
Kontakt:	Fax: +31 88 86 62050 helpdesk.effects@tno.nl				
Web-Link:	www.tno.nl/en/focus-area/urbanisation/environment-sustainability/public-safety/effects-software-for-safety-and-hazard-analysis				
Referenzen:	User and reference manual [23] TNO Yellow book [4], TNO Green book [5]				
Erstausgabe:	1992	Version:	10.0.6 (2016)	Kosten:	SFr. 2500.- / J

EFFECTS kommt mit einer Datenbank mit den chemischen Eigenschaften von über 2000 Substanzen. Ein integrierter Editor ermöglicht die detaillierte Definition von eigenen Chemikalien. Es werden auch Mischungen berücksichtigt, für Benzin sind beispielsweise die folgenden vorhanden: *Raw Gasoline Sample*, *Summer Grade Gasoline Sample* & *Winter Grade Gasoline sample*.

Wissenschaftliche Grundlage für die implementierten Modelle sind Yellow Book [4] und Green Book [5] von TNO, die international als Referenzwerke für die Konsequenzanalyse anerkannt sind.

EFFECTS kann in drei verschiedenen Modi verwendet werden. Im «Experten-Modus» werden alle Eingabeparameter angezeigt, die in die Berechnung einfließen. In den Modi «Normale Parameter» und «Einfache Parameter» werden diverse Parameter nicht angezeigt, stattdessen kommt der Default zur Anwendung. Dies betrifft oftmals Umgebungsparameter wie Lufttemperatur oder Windrichtung. Folgend wird EFFECTS im «Experten-Modus» beschrieben und untersucht.

⁹ Für EFFECTS besitzt Emch+Berger eine Lizenz, für PHAST wurde für zwei Wochen eine Version auf Zeit installiert.

Anwendung findet EFFECTS auch im Rahmen des QRA Tools von TNO, Riskcurves¹⁰.

7.1.1 Spezifische Parameter und Einstellungen

Für die folgenden Umgebungsparameter (Tabelle 7-2) und Systemeinstellungen (Tabelle 7-3) werden Standardwerte verwendet, die nur im «Experten-Modus» angepasst werden können.

Tabelle 7-2: EFFECTS: Umgebungsparameter und Standardwerte [6][23]

Parameter	Standardwert
Ambient temperature	9°C
Temperature of the subsoil	9°C
Temperature of the water	9°C
Ambient relative humidity	83 %
Amount of CO ₂ in atmosphere	0.03 %
Ambient pressure	1.0151 bar
Solar heat radiation flux	120 W/m ²
North/South latitude of the location	51 deg
Cloud cover	75%
Roughness length description	High crops; scattered large objects, 15 < x, 'h < 2
Type of subsoil (evaporation)	Average subsoil

Umgebungstemperatur (Ambient temperature)

Im Allgemeinen gilt, je höher die Temperatur, desto grösser die Auswirkungen und Folgen.

Boden-/Oberflächen-/Dammtemperatur (Ground / Surface/ Bund temperature)

Temperatur des Untergrundes, die für die Lachenverdampfung verwendet wird. Je höher die Temperatur, desto grösser die Verdunstungsrate und die Konsequenzen.

Wassertemperatur (Water temperature)

Temperatur des Wasserkörpers, auf dem Lachenverdampfung stattfindet. Je höher die Temperatur, desto grösser die Verdunstungsrate und die Konsequenzen.

Luftfeuchtigkeit (Air relative humidity)

Die relative Feuchtigkeit der Atmosphäre aufgrund des partiellen Dampfdrucks von Wasser in der Atmosphäre. Die relative Feuchte beeinflusst die atmosphärische Transmissivität.

Fraktion von CO₂ in Atmosphäre (Fraction of CO₂ in Atmosphere)

Die Menge an CO₂ in der Atmosphäre kann für Transmissionsberechnungen von Sonnenlicht verwendet werden.

Luftdruck (Atmospheric pressure)

Der Aussendruck wird in verschiedenen Dispersions- und Abflussberechnungen verwendet.

Unterbodenart (Subsoil type)

Wird bei der Lachenausbreitung verwendet und bestimmt die Mindesthöhe der Lache.

Tabelle 7-3: EFFECTS: Systemeinstellungen und Standardwerte [6][23]

Parameter	Standardwert
Pipeline roughness	0.045mm

¹⁰ www.tno.nl/en/focus-areas/urbanisation/environment-sustainability/public-safety/riskcurves-software-for-quantitative-risk-assessment/

Parameter	Standardwert
Discharge coefficient sharp edges	0.62
Discharge coefficient pipe contraction	0.82
Concentration averaging time toxic	600s
Concentration averaging time flammable	20s
Height of poolfire above ground level	0m
Fraction combustion heat radiated	0.35
Outflow angle jetfire (90°-vertical)	90 deg
Use mass between LFL and UFL	No
Receiver height Z _d (toxic inhalation, heat radiation)	1.5m
Maximum toxic exposure duration	1800s
Maximum heat exposure duration	20s
Maximum pool surface	1500m ²
Maximum evaluation time for evaporation	1800s
Fraction of flammable cloud confined	8%
Curve number	10 (Detonation)
Burst Pressure Vessel	25 bar
Take protective effects of clothing into account	No

7.1.2 Beurteilung Stand der Technik

Ob ein Modul dem Stand der Technik entspricht ist folgendermassen gekennzeichnet:

ja: ✓; nein: ✗.

Modul 1: Freisetzung

Referenz: TNO Yellow Book [4][23] ✓

- Sowohl instantane als auch kontinuierliche Freisetzungen werden berücksichtigt, Freisetzungsrates und -dauer sowie austretende Menge werden anhand der gegebenen Parameter berechnet.
- Vorsicht ist geboten bei der Wahl des Parameters *Hole rounding* (Optionen: Rounded edges, Sharp edges, Pipe contraction). Je nach Wahl wird die Ausflussrate anhand des assoziierten *Discharge coefficient* skaliert, unabhängig von der Lochgrösse. Bei störfallrelevanten grossen Lecks ist anzunehmen, dass die Leckform keine Rolle spielt (*Discharge coefficient* = 1; Optionen User defined oder Rounded edges)
- Ein weiteres relevantes Szenario ist die Freisetzung in verdämmte Bereiche (Beispiel Kanalisation). Dies wird nicht explizit berücksichtigt, jedoch wäre für die Folgenabschätzung gegebenenfalls der Einsatz von 3D-Modellen notwendig.
- Dokumentation: Im Manual wird auf das TNO Yellow Book [4] verwiesen. Die Ansätze für Freisetzung sind verhältnismässig einfach und im Yellow Book gut dokumentiert.

Modul 2: Lachenbildung, Verdampfung

Referenz: [26][23]

Lache an Land: Sofortige Zündung/Verzögerte Zündung ohne Versickerung/Abfluss ✓

Lache an Land: Verzögerte Zündung bei Versickerung und/oder Abfluss ✗

- Bei der Lachenbildung wird unterschieden zwischen der Art der Freisetzung (instantan vs. kontinuierlich), dem Ort der Lachenbildung (auf Wasserfläche vs. an Land) sowie der Art der Ausbreitung (frei vs. verdämmt). Versickerung und Abfluss (auf geeigneter Fläche, in Kanalisation/Auffangbehälter) werden nicht berücksichtigt.
- Verdampfung: nicht berücksichtigt (siehe 6.2 und 6.3)

- Die Dokumentation ist nachvollziehbar, jedoch nicht vollständig in einem einzigen Dokument vorhanden (Grundlagen: [26]; Auswahloptionen wie z.B. Bodentyp/-rauigkeit und assoziierte Werte: [23]).

Modul 3: Ausbreitung und Verdünnung der Gaswolke (Benzindämpfe)

nicht berücksichtigt (siehe 6.2 und 6.3)

Modul 4: Zündung

(✗) EFFECTS ist ein reines Konsequenzmodell zur Abschätzung der Folgen eines Störfalls. Modelle zur Berechnung bzw. Angaben zur Wahrscheinlichkeit einer sofortigen oder verzögerten Zündung, beispielsweise für unterschiedliche Zündungsquellen, sind nicht vorhanden und können im Rahmen eines solchen Modells auch nicht vorausgesetzt werden.

Im TNO Tool «Riskcurves» wird EFFECTS im Rahmen eines klassischen QRA für die Konsequenzmodellierung eingesetzt. Die dort verwendeten Zündungswahrscheinlichkeiten sind im TNO Purple Book [6] dokumentiert.

Modul 5: Wirkung auf den Menschen

Lachenbrand

Zwei-Zonen-Model Poolfire6 [37] & TNO Yellow Book [4] ✓

- Poolfire6: Die Flamme wird in Form eines gekippten Zylinders mit zwei Zonen dargestellt: Eine untere Zone mit hoher Emission und sauberer Verbrennung, darüber eine russige, verdunkelte Zone. Das Modell wurde auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche zu Experimente und Beobachtungen von Lachenbränden neu entwickelt und ist als solches den älteren Ansätzen beispielsweise im Yellow Book vorzuziehen. Zudem beinhaltet es eine Datenbank mit substanzspezifischen Werten zur Verbrennungsrate und Strahlungsleistung der Flamme, die die korrekte Anwendung vereinfachen.
- In der in EFFECTS implementierten Version von Poolfire6 findet in der unteren der zwei Zonen immer saubere Verbrennung statt. Bei sehr russigen Verbrennungsprozessen (Beispiel: sehr grosse Lache mit entsprechend schlechter Sauerstoffzufuhr) kann dies zu einer Überschätzung von Flammentemperatur und Wärmestrahlung führen. Hier wäre gegebenenfalls das Yellow Book Modell vorzuziehen, welches ebenfalls in EFFECTS implementiert ist.
- Es wird unterschieden nach der Art (unverdämmt vs. verdämmt) sowie der Form der Lache (rund, Polygon – dieses kann per Hand gezeichnet werden, viereckig, Randfeuer).
- Weitere zu definierende Einflussgrößen sind Temperatur der Lache, Luftdruck und -temperatur, relative Luftfeuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit in 10m Höhe und atmosphärische CO₂-Konzentration.
- Das Model berechnet Konturen für die Hitzestrahlung als auch für die damit assoziierten Schäden (Verbrennungen 1, 2 oder 3 Grades), bei letzterem kann ein Schutz durch Kleidung berücksichtigt werden.
- Die Parameter der Probit-Funktion für Letalität können verändert werden.
- Die Dokumentation ist nachvollziehbar, jedoch nicht vollständig in einem einzigen Dokument vorhanden (Grundlagen: [37]; Auswahloptionen und Beschreibung der Parameter: [23]).

Stichflamme

Chamberlain-Model [4] ✓

- Wirkung auf Mensch analog Modell für Lachenbrand (Hitzestrahlung).

Wirkung Hitzestrahlung

Probit-Funktionen, TNO Green Book [5] ✓

- Es wird unterschieden zwischen individuellem Risiko sowie dem Risiko für Bevölkerungsgruppen.
- Für das individuelle Risiko werden die Wahrscheinlichkeiten (%) für Verbrennungen ersten und zweiten Grades sowie für Todesfälle angegeben. Beim kollektiven Risiko wird die Anzahl der jeweiligen Fälle berechnet: Menschen mit Verbrennungen ersten und zweiten Grades, Todesfälle

durch Wärmestrahlung, Todesfälle durch entzündete Kleidung, Todesfälle innerhalb des brennenden Bereiches.

- Bei den zwei *Damage models* für das individuelle Risiko sowie das Risiko für Bevölkerungsgruppen können die Parameter der Probit-Funktion für Letalität nicht verändert werden. Das individuelle Risiko wird jedoch auch im Rahmen des «Pool fire» Modells berechnet, dort ist eine Anpassung möglich.
- Es kann ein Wert für die maximale Exposition angegeben werden (Default: 20 s; anzupassen unter Edit/Options/Default system set).
- Die Schutzwirkung von Kleidung sowie die Reaktionszeit und Fluchtgeschwindigkeit der Menschen können berücksichtigt werden.
- Die Dokumentation ist gut [5][23].

7.1.3 Dokumentation der Methodik

Die physikalischen Modelle in EFFECTS basieren hauptsächlich auf dem TNO Yellow Book [4]. Somit ist die theoretische Dokumentation grundsätzlich sehr gut und umfangreich, jedoch fehlt der Bezug zur genauen technischen Umsetzung im Modell. Das TNO Yellow Book ist sehr umfangreich und behandelt eine Vielzahl von unterschiedlichen Ansätzen. Teilweise ist es schwer nachzuvollziehen, welche Formeln und Parameter für ein bestimmtes Modell relevant sind und welche nicht. Die Module Lachenbildung/Verdampfung und Lachenbrand basieren auf neueren Ansätzen, hier ist die Situation ähnlich - die entsprechenden Publikationen sind eher theoretisch. Zusammen mit den Beschreibungen der Input-Parameter im User and reference manual [23] ist die Dokumentation aber zweckmässig.

Die Ansätze zur Abschätzung von Auswirkungen auf den Menschen basieren auf den Probit-Funktionen des Green Book [5]. Mit [5] und [23] ist hier die Dokumentation sehr gut.

7.1.4 Methodische Aktualisierung

Im Gegensatz zu den Colored Books, die von TNO nicht mehr upgedated werden, wird EFFECTS fortlaufend weiterentwickelt - siehe EFFECTS Version Info [24]. Dies betrifft sowohl den Ersatz von Modulen durch verbesserte Modelle (Beispiel: Pool evaporation [26], komplett erneuert in EFFECTS v.7.3.0), die Addition von alternativen Ansätzen (Beispiel: ein zweites Modell für Lachenbrand [37], ab EFFECTS v.10.0) als auch die Implementation von neuen Funktionalitäten (Beispiel: die Einführung von *Congestion Areas* [23], verdämmte Gebiete in denen sich eine explosive Gaswolke bilden kann, in EFFECTS v.10).

7.2 PHAST

Das kommerzielle Process Hazard Analysis Software Tool untersucht die Entwicklungsmöglichkeit eines Gefahrenereignisses von der Freisetzung bis zur Wirkung. Modelliert werden unter anderem Flächenausbreitung, Evaporation und Brandereignisse.

Tabelle 7-4: Informationen zu PHAST

PHAST	
Firma:	DNV GL Palace House, 3 Cathedral Street London SE19DE, UK
Kontakt:	software.support@dnvgl.com
Web-Link:	www.dnvgl.com/services/process-hazard-analysis-phast-1675
Referenzen:	Tutorial manual [52] Technical Reference PHAST [54]-[66]

PHAST					
Erstausgabe:	1982	Version:	7.21 (2017)	Kosten:	€ 12029.- / J ¹¹

PHAST bietet eine umfassende Palette von Berechnungsmodellen für den Fall einer unbeabsichtigten Freisetzung von entzündlichen oder giftigen Substanzen, unter anderem Modelle für Freisetzung, Ausbreitung und die Gefährdung durch Feuer oder toxische Substanzen.

PHAST beinhaltet ebenfalls eine Datenbank mit den chemischen Eigenschaften einer Reihe von Substanzen. Im Gegensatz zu EFFECTS ist diese weniger umfangreich, zudem sind keine Mischungen enthalten. Letztere können jedoch selbst erstellt werden. Das Tool wird fortlaufend weiterentwickelt.

Anwendung findet PHAST auch im Rahmen des QRA Tools von DNV GL, Safeti¹².

7.2.1 Spezifische Parameter und Einstellungen

In Tabelle 7-5 und Tabelle 7-6 sind analog zu EFFECTS eine Reihe von Umgebungsparametern und Systemeinstellungen aufgelistet.

Tabelle 7-5: PHAST: Umgebungsparameter und Standardwerte (aus Tool)

Parameter	Standardwert
Atmospheric temperature	9.85°C
Surface temperature	9.85°C
Humidity	70 %
Ambient pressure	1.01325 bar
Solar radiation flux	0.5 kW/m ²
Surface roughness length	183.156 mm
Pipe roughness	0.0457 mm
Type of surface for pools	Concrete

Tabelle 7-6: PHAST: Systemeinstellungen und Standardwerte (aus Tool)

Parameter	Standardwert
Flammable mass calculation method	Mass between LFL and UFL
Flammable averaging time	18.75s
Surface over which dispersion occurs	Land
Maximum distance for dispersion	50000m
Maximum height for dispersion	1000m
Pool fire maximum exposure duration	20s
Radiative fraction for general fires	0.4
Multi Energy: Explosion confined	Curve 10
Multi Energy: Explosion unconfined	Curve 2
Maximum release duration	3600s

¹¹Angebot für Emch+Berger, 09.02.2017: PHAST standalone Lizenz/Jahr: 12 029 €. PHAST dongle Lizenz: 26 151 €
Die Kosten für das in 6.2 erwähnte Packet «3D-Explosionen» belaufen sich auf zusätzliche 6 041 € (pro Jahr) oder 13 133 € (Dongle Lizenz)

¹² <https://www.dnvgl.com/services/quantitative-risk-analysis-safeti--1715>

7.2.2 Beurteilung Stand der Technik

Ob ein Modul dem Stand der Technik entspricht ist folgendermassen gekennzeichnet:

ja: ✓; nein: ✗.

Modul 1: Freisetzung

Referenz: [54] ✓

- Sowohl instantane als auch kontinuierliche Freisetzungen werden berücksichtigt, Freisetzungsrates und -dauer sowie austretende Menge werden anhand der gegebenen Parameter berechnet.
- Ein weiteres relevantes Szenario ist die Freisetzung in verdämmte Bereiche (Beispiel Kanalisation). Dies wird nicht explizit berücksichtigt, jedoch wäre für die Folgenabschätzung sowie der Einsatz von 3D-Modellen notwendig.
- Die Dokumentation von DNV [54] ist sehr gut und beinhaltet neben den theoretischen Grundlagen und Hinweisen zur Anwendung sämtliche Input- und Output-Parameter des Modells.

Modul 2: Lachenbildung, Verdampfung

Referenz: [55]

Lache an Land: Sofortige Zündung/Verzögerte Zündung ohne Versickerung/Abfluss ✓

Lache an Land: Verzögerte Zündung bei Versickerung und/oder Abfluss ✗

- Bei der Lachenbildung wird unterschieden zwischen der Art der Freisetzung (instantan vs. kontinuierlich), dem Ort der Lachenbildung (auf Wasserfläche vs. an Land) sowie der Art der Ausbreitung (frei vs. verdämmt). Versickerung und Abfluss (auf geeigneter Fläche, in Kanalisation/Auffangbehälter) werden nicht berücksichtigt.
- Verdampfung: nicht berücksichtigt (siehe 6.2 und 6.3)
- Die Dokumentation von DNV [55] ist sehr gut und beinhaltet neben den theoretischen Grundlagen und Hinweisen zur Anwendung sämtliche Input- und Output-Parameter des Modells.

Modul 3: Ausbreitung und Verdünnung der Gaswolke (Benzindämpfe)

nicht berücksichtigt (siehe 6.2 und 6.3)

Modul 4: Zündung

[✗] PHAST ist ein reines Konsequenzmodell zur Abschätzung der Folgen eines Störfalls. Modelle zur Berechnung bzw. Angaben zur Wahrscheinlichkeit einer sofortigen oder verzögerten Zündung, beispielsweise für unterschiedliche Zündungsquellen, sind nicht vorhanden und können im Rahmen eines solchen Modells auch nicht vorausgesetzt werden.

Im Tool «Safeti» wird PHAST im Rahmen eines klassischen QRA für die Konsequenzmodellierung eingesetzt. Die dort verwendeten Zündungswahrscheinlichkeiten können vom Anwender definiert oder auf Basis des TNO Purple Book [6] festgelegt werden [65].

Modul 5: Wirkung auf den Menschen

Lachenbrand

POLF [58] ✗/✓

- POLF ist vergleichbar mit dem Yellow Book Modell - im Gegensatz zu Poolfire6 unterscheidet das Modell nicht zwischen verschiedenen Zonen, die Flamme wird als einzoniger Zylinder dargestellt. Hierbei wird jeder Substanz unter Eigenschaften eine «Flame flag» zugeordnet, die die Verbrennung stark beeinflusst. Beispiele: *sooty*, (russige Verbrennung, dementsprechend tief sind die berechneten *Flame temperature* und *Emissive power flame*) oder *luminous* (saubere Verbrennung, dementsprechend hoch sind die berechneten *Flame temperature* und *Emissive power flame*).
- Bei insgesamt homogener, sehr sauberer oder russiger Verbrennung ist das Modell angemessen. Bei inhomogenen Verbrennungsprozessen werden Flammentemperatur und Wärmestrahlung jedoch je nach «Flame flag» im unteren Teil der Flamme über- oder unterschätzt. Eine Abstufung/Mischrechnung wie in Poolfire6 ist nicht möglich.
- Es wird unterschieden nach der Art der Lache (unverdämmt vs. verdämmt).

- Weitere zu definierende Einflussgrößen sind Temperatur der Lache, Luftdruck und -temperatur, relative Luftfeuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit in 10m Höhe und atmosphärische CO₂-Konzentration.
- Das Model berechnet Konturen für die Hitzestrahlung als auch für die damit assoziierte Letalität.
- Zur Abschätzung der Ausbreitung der Rauchwolke kann POLF mit dem Ausbreitungsmodell UDM gekoppelt werden.
- Die Dokumentation von DNV [58] ist sehr gut und beinhaltet neben den theoretischen Grundlagen und Hinweisen zur Anwendung sämtliche Input- und Output-Parameter des Modells.

Stichflamme

JFSH [59] ✓

- Wirkung auf Mensch analog Modell für Lachenbrand (Hitzestrahlung).

Wirkung Hitzestrahlung

Probit-Funktionen, TNO Green Book [5] ✓

- Die einzelnen Probit-Parameter können verändert werden.
- Neben dieser *Probit Method* kann auch eine *Intensity Method* verwendet werden. Hier kann ausgewählt werden, ob die Vulnerabilitäten anhand Probit, Dose oder Lethality levels berechnet werden sollen, die entsprechenden Werte und Wahrscheinlichkeiten werden für bestimmte Strahlungsintensitäten in einer Tabelle hinterlegt und abgefragt (Default sind 3 Stufen: 4, 12.5 und 37.5 kW/m²). Dies geschieht in Form einer Stufenfunktion, es gibt keine Interpolation zwischen den Intensitäten.
- Es kann ein Wert für die maximale Exposition angegeben werden (Default Lachenbrand: 20 s).

7.2.3 Dokumentation der Methodik

Die Dokumentation der physikalischen Modelle in PHAST ist sehr gut. Gegeben sind jeweils detaillierte theoretische und technische Beschreibungen, komplette Listen samt Erklärungen aller Input- & Output-Parameter sowie Anwendungshilfen. In einigen Fällen gibt es zudem ein zweites Dokument, in dem das jeweilige Modell anhand von Beobachtungen und Messungen verifiziert wird (Beispiele: DISC/Freisetzung, PVAP/Lachenbildung und Verdampfung, UDM/Gasausbreitung).

Die Dokumentation der Auswirkungen auf den Menschen fällt im Vergleich stark ab. Die in PHAST vorhandenen Modelle sind nur unzureichend beschrieben, zusätzlich werden auch Ansätze behandelt die überhaupt nicht implementiert sind (Beispiel: Probit-Funktionen zur Abschätzung von Letalität in Folge Explosion [64]). Ein grundsätzliches Problem ist, dass die Dokumentation sowohl PHAST als auch das QRA-Tool Safeti abdeckt und nicht klar beschrieben wird, welcher Ansatz in welchem Tool Anwendung findet.

7.2.4 Methodische Aktualisierung

PHAST wird fortlaufend weiterentwickelt – siehe PHAST Release Notes [53].

7.3 Gesamtbeurteilung des Modellvergleichs

7.3.1 Stand der Technik

Modul 1: Freisetzung

Sowohl EFFECTS als auch PHAST entsprechen dem Stand der Technik.

Modul 2: Lachenbildung, Verdampfung

Sowohl EFFECTS als auch PHAST entsprechen dem Stand der Technik für Lachen an Land bei sofortiger Zündung sowie für Lachen an Land bei verzögerter Zündung ohne Versickerung/Abfluss. Ein Vorteil von EFFECTS ist das Vorhandensein der Oberflächenkategorie *Gravel* (Kies). Versickerung und Abfluss (auf geneigter Fläche, in Kanalisation/Auffangbehältnis) werden nicht berücksichtigt,

dementsprechend haben beide Tools Defizite bei Lachen an Land bei verzögerter Zündung mit Versickerung/Abfluss.

Sowohl EFFECTS als auch PHAST entsprechen dem Stand der Technik der empirischen Modelle für Verdampfung. Durch die Defizite bei der Darstellung von verdämmten Strukturen sind jedoch beide Tools für eine robuste, quantitative Risikoabschätzung der entsprechenden Szenarien (verdämmte Gaswolkenexplosion) nicht geeignet.

Modul 3: Ausbreitung und Verdünnung der Gaswolke (Benzindämpfe)

Sowohl EFFECTS als auch PHAST entsprechen dem Stand der Technik der empirischen Modelle für Gasausbreitung. Durch die Defizite bei der Darstellung von verdämmten Strukturen sind jedoch beide Tools für eine robuste, quantitative Risikoabschätzung der entsprechenden Szenarien (verdämmte Gaswolkenexplosion) nicht geeignet.

Modul 4: Zündung

Sowohl EFFECTS als auch PHAST sind reine Konsequenzmodelle zur Abschätzung der Folgen eines Störfalls. Modelle zur Berechnung bzw. Angaben zu Zündungswahrscheinlichkeiten sind nicht vorhanden und können im Rahmen solcher Konsequenzmodelle auch nicht vorausgesetzt werden.

Modul 5: Wirkung auf den Menschen

Für das Ereignis Lachenbrand entspricht EFFECTS voll dem Stand der Technik der empirischen Modelle, PHAST teilweise. Sowohl EFFECTS als auch PHAST entsprechen dem Stand der Technik zur Abschätzung der Letalität durch Wärmestrahlung.

7.3.2 Dokumentation der Methodik

Die theoretische Dokumentation der physikalischen Modelle ist für beide Tools grundsätzlich sehr gut. Bei PHAST gibt es pro implementiertem Modell ein eigenes Dokument, dadurch ist die Dokumentation im Vergleich zu EFFECTS/Yellow Book übersichtlicher und besser nachzuvollziehen. Die technische Implementierung der physikalischen Modelle ist in PHAST besser dokumentiert.

Die Ansätze zur Abschätzung von Auswirkungen auf den Menschen sind für PHAST nur unzureichend beschrieben. Für EFFECTS ist hier die Dokumentation mit [5] und [23] sehr gut.

7.3.3 Methodische Aktualisierung

Beide Tools werden fortlaufend weiterentwickelt – siehe EFFECTS Version Info [24] und PHAST Release Notes [53].

7.3.4 „no go“-Kriterien

Von Seiten des BAV wurden für die Beurteilung der Tools einige „no go“-Kriterien definiert, diese sind folgend aufgelistet:

- Es ist keine Dokumentation vorhanden oder nicht erhältlich.
- Das Modell ist eine Blackbox.
- Das Modell ist zwar geeignet, aber kommerziell nicht erhältlich.
- Das Modell wird nicht weiter gepflegt.
- Das Modell ist zu simpel, wichtige Parameter sind nicht veränderbar.

Die genannten Kriterien treffen weder für EFFECTS noch PHAST zu.

Tabelle 7-7: Vergleich der EDV-Applikationen mit dem Anforderungsprofil [eine detaillierte Beschreibung der Tools ist in Tabelle 8-1 gegeben]. Ob ein Model dem Stand der Technik entspricht ist gekennzeichnet (ja: ✓; nein: ✗), die Begründung findet sich jeweils im Abschnitt «Beurteilung Stand der Technik» (EFFECTS: 7.1.2; PHAST: 7.2.2).

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1		Teil 2	
		Stand der Technik	EFFECTS	PHAST	
Freisetzung	Instantane Freisetzung - Grosses Leck/Bruch Behältnis (5.1.1)	TNO, Yellow Book [4]	✓	✓	
	Kontinuierliche Freisetzung - Leck in Kessel/Tank (5.1.2)	TNO, Yellow Book [4]	✓	✓	
Lachenbildung und Verdampfung	Ausbreitung Lache - in freiem Gelände (5.2.5) - verdämmt (5.2.6)	<i>Sofortige Zündung:</i> TNO, Yellow Book [4] <i>Verzögerte Zündung:</i> Berücksichtigung von Versickerung & Abfluss	✓/✗	✓/✗	
Zündung	Wahrscheinlichkeit für spontane Zündung (5.4.1)	[2], [3], [6], [10], [34], [35], [36]	✗	✗	
	Wahrscheinlichkeit für verzögerte Zündung aufgrund der Austrittsrate (5.4.2) und spontaner oder kontinuierlicher Freisetzung	[2], [3], [10], [34], [35], [36]	✗	✗	
	Wahrscheinlichkeit für verzögerte Zündung aufgrund von Zündungsquellen (5.4.2)	[36]	✗	✗	
Wirkung auf den Menschen	Lachenbrand, Brand Kessel/Tank (5.5.1.1)	Zwei-Zonen-Model Poolfire6 [37]	✓	✓/✗	
	Stichflamme (5.5.1.4)	Chamberlain-Modell [4]	✓	✓	
	Letalität durch Wärmestrahlung	Probit-Funktionen (5.5.2.4), Tabelle 5-28	✓	✓	

8 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Zwei gängige EDV-Applikationen, EFFECTS und PHAST, wurden anhand des zuvor erhobenen Standes der Technik bewertet und miteinander verglichen.

Hierbei wurde der Fokus auf die im Kontext des LS Benzin relevanten Szenarien gelegt. Das wahrscheinlichste Szenario mit Personenrisiken ist Lachenbrand, die entsprechende Wirkung Hitzestrahlung und zusätzlich Rauch, je nach Situation. Ein weiteres relevantes Szenario ist der Abfluss von Benzin in die Kanalisation oder eine Unterführung. Falls es in einem solchen Fall zur Ausbildung einer flammbaren Gaswolke und, im Falle einer Zündung, zu einer verdämmten VCE kommt, ist der durch die Druckwelle verursachte Trümmerwurf die Hauptwirkung. Sowohl EFFECTS als auch PHAST entsprechen dem Stand der Technik der empirischen Modelle für Gasausbreitung und Explosion. Allerdings sind empirische Modelle nicht in der Lage, Verdämmung adäquat zu berücksichtigen, und somit für eine robuste, quantitative Risikoabschätzung der entsprechenden Szenarien (verdämmte Gaswolkenexplosion) nicht geeignet. Deshalb wird das Szenario verdämmte Gaswolkenexplosion, obwohl relevant, beim Vergleich der beiden EDV-Anwendungen nicht berücksichtigt. Beide Programme weisen in diesem Bereich ein Defizit aus. Zur Analyse der entsprechenden Ereignisse und Szenarien sind gegebenenfalls CFD-Modelle anzuwenden.

Bezüglich der zugrundeliegenden physikalischen Modelle gibt es zwischen EFFECTS und PHAST grosse Ähnlichkeiten und teilweise Überschneidungen. Beide Tools entsprechen dem Stand der Technik für Freisetzung, der Lachenbildung an Land bei sofortiger Zündung sowie für Lachen an Land bei verzögerter Zündung ohne Versickerung/Abfluss, sowie für Letalität durch Wärmestrahlung. Beide Tools haben Mängel bei der Lachenbildung an Land bei verzögerter Zündung mit Versickerung/Abfluss (letztere Vorgänge werden nicht berücksichtigt), der Zündung (Wahrscheinlichkeiten sind nicht implementiert) sowie grundsätzlich bei der Berücksichtigung von verdämmten Strukturen.

EFFECTS hat Vorteile durch das Vorhandensein einiger relevanter Auswahlparameter (Beispiel: Oberflächenkategorie *Gravel*) sowie bei Lachenbrand (die Präsenz von zwei verschiedenen Modellen erlaubt die robuste Abschätzung einer grossen Bandbreite von Verbrennungsprozessen). Bei letzterem ist PHAST limitiert auf saubere und russige Verbrennung, Zwischenstufen sind nicht möglich. Ein Vorzug von PHAST ist die Tatsache, dass ein Ereignisast gleichzeitig für mehrere Meteoszenerien berechnet werden kann.

Bezüglich der methodischen Aktualisierung sind die Tools vergleichbar – beide werden fortlaufend weiterentwickelt. Die theoretische Dokumentation der physikalischen Modelle ist für beide Tools grundsätzlich sehr gut, bei der Beschreibung der technischen Implementierung hat PHAST Vorteile. So werden bei PHAST beispielsweise sämtliche Input- und Outputparameter sowie ihre Implementierung im Modell detailliert aufgeführt. Die Ansätze zur Abschätzung von Auswirkungen auf den Menschen sind für EFFECTS sehr gut, für PHAST jedoch nur unzureichend beschrieben.

Empfehlungen

Theoretischer Hintergrund, Anwendungsbereich sowie Limitierungen der zwei Tools sind sehr ähnlich. Beide sind ungeeignet für das Szenario verdämmte Gaswolkenexplosion. PHAST besitzt zusätzliche Funktionen wie das parallele Berechnen mehrerer Meteoszenerien, jedoch rechtfertigt dies allein nicht den substantiell höheren Preis. EFFECTS erlaubt zudem eine differenziertere Analyse von Lachenbränden, einem im Kontext LS Benzin sehr relevanten Szenarios, und ist deshalb vorzuziehen.

Anhang A Beschreibung/Vergleich EDV-Applikationen

In Tabelle 8-1 werden beide EDV-Applikationen im Detail vorgestellt. Zuvor werden einige generelle Aussagen zu den Applikationen gemacht.

Generelle Bemerkungen zu den Applikationen

EFFECTS und PHAST weisen eine Reihe von Gemeinsamkeiten auf:

- Anwendungsbereich: beide decken die gesamte Ereigniskette von der Freisetzung bis zur Wirkung auf den Menschen ab
- Bei den methodischen Grundlagen gibt es grosse Ähnlichkeiten und Überschneidungen (TNO etc.)
- Die Ergebnisse der Applikationen sind vergleichbar.
- Resultate können exportiert werden (Excel, Figuren)
- Topographie wird nicht berücksichtigt (wäre wichtig für Gasausbreitung)
- Zündungswahrscheinlichkeiten nicht vorhanden

Unterschiede zwischen den Applikationen:

- Aufbau und Bedienung (Module verbinden, Parameter setzen etc.) ist in EFFECTS um einiges logischer und intuitiver.
- PHAST ist im Gegensatz zu EFFECTS in der Lage, mehrere Meteo-Szenarien parallel zu rechnen
- Die Berechnung von Letalität ist in Phast nur begrenzt implementiert (ja: Wärmestrahlung, Toxizität; nein: Explosion)

Tabelle 8-1: Detaillierte Beschreibung der EDV-Applikationen und Vergleich mit dem Anforderungsprofil. Wenn bei einem Modellparameter der Wert/die Einstellung aus einem Drop-down-Menü ausgewählt werden muss sind die Optionen aufgelistet (je nach Wahl reduziert sich ggf. die Anzahl der insgesamt notwendigen Parameter). Wenn Parameter innerhalb eines Spektrums ausgewählt werden müssen ist dies angegeben, ansonsten sind die Werte frei wählbar. Ob ein Model dem Stand der Technik entspricht ist gekennzeichnet (ja: ✓; nein: ✗).

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2	
		Stand der Technik	EFFECTS	PHAST
Freisetzung	Instantane Freisetzung - Grosses Leck/Bruch Behältnis [5.1.1] - BLEVE Kessel/Tank [5.1.5]	TNO, Yellow Book [4]	TNO, Yellow Book [4] ✓ - Es können sowohl instantane als auch kontinuierliche Freisetzungen berücksichtigt werden (z.B. durch entsprechende Leckgrösse).	DISC [67] ✓ - Vergleichbar wie EFFECTS. Folgende relevante Modelle sind implementiert:
	Kontinuierliche Freisetzung - Leck in Kessel/Tank [5.1.2] - Leck in/Ausfluss durch Rohr [5.1.3]	TNO, Yellow Book [4]	- Freisetzungsrates und -dauer (wenn nicht fixiert) sowie austretende Menge werden anhand der gegebenen Parameter berechnet. - Eine Freisetzung in bestimmte verdämmte Bereiche (Beispiel Kanalisation) ist nicht explizit berücksichtigt. Eine Gaswolkenbildung und ggf. Ex-	- <i>Orifice model</i> . Kontinuierliche Freisetzung aus einem Leck in einem Kessel. - <i>Pipe model</i> . Kontinuierliche Freisetzung durch ein kurzes, mit einem Kessel verbundenen Rohr (inkl. Entlastungsventil und Berstscheibe). - <i>Instantaneous model</i> . Instantane Freisetzung durch Kesselbruch.

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>plosion in einem verdämmten Bereich kann jedoch durch entsprechende Parametrisierung mit den Modulen Verdampfung, Gasausbreitung und Explosion abgeschätzt werden (siehe unten).</p> <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Chemical name</p> <p>Use which representative step:</p> <ul style="list-style-type: none"> - First 20% average (flammable) - Second 20% average (toxic) <p>Type of vessel outflow:</p> <ul style="list-style-type: none"> - fixed flow rate - through (a hole in) pipe - through hole in vessel <p>Fixed mass flow rate of source</p> <p>Pipeline length</p> <p>Pipeline diameter</p> <p>Pipeline roughness</p> <p>Hole diameter</p> <p>Hole rounding:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rounded edges - Sharp edges - Pipe contraction - User defined <p>Discharge coefficient</p> <p>Vessel type:</p> <ul style="list-style-type: none"> - horizontal cylinder - vertical cylinder - sphere <p>Vessel volume</p> <p>Length cylinder</p> <p>Filling degree</p> <p>Overpressure above liquid (assuming closed system)</p> </div> <p>In PHAST zu definierende relevante Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Vessel storage data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - two of the following: storage pressure; storage temperature; mass liquid fraction - inventory - height between orifice and top of the liquid <p>Pipe data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - entrance diameter - inner diameter - surface roughness - length <p>Pipe fittings and bends:</p> <ul style="list-style-type: none"> - frequency of three valve types: excess flow, non-return, and shut-off valves - number of velocity head losses for valve types - frequency of pipe couplings, junctions and bends <p>Orifice area</p> <p>Fixed duration (allows run where orifice diameter is scaled to match required mass release rate)</p> <p>Ambient data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - pressure - temperature - relative humidity </div>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>Height leak above tank bottom Initial temperature in vessel Type of calculation: - until device is empty - until specified time Maximum release duration Ambient pressure</p>
Lachenbildung und Verdampfung	Ausbreitung Lache auf Wasserkörper (5.2.4)	TNO, Yellow Book [4]	[26], basierend auf [4]. Lachenbildung auf Wasser: ✓
	Ausbreitung Lache in freiem Gelände (5.2.5)	<i>Sofortige Zündung:</i> TNO, Yellow Book [4]	Lachenbildung an Land: Sofortige Zündung ✓; Verzögerte Zündung bei Versickerung und/oder Abfluss ✗.
	Lachenausbreitung verdämmt (sowohl auf Wasser als an Land) (5.2.6)	<i>Verzögerte Zündung:</i> Berücksichtigung von Versickerung & Abfluss	Die Berechnung der Lachengrösse erfolgt in EFFECTS im Modul «Verdampfung» - vollständige Parameterliste, siehe unten. - Es wird unterschieden zwischen der Art der Freisetzung (instantan vs. kontinuierlich), dem Ort der Lachenbildung (auf Wasserfläche vs. an Land) sowie der Art der Ausbreitung (frei vs. verdämmt). - Die Oberfläche der Lache ist entweder zeitabhängig (=rund) oder entspricht der Fläche einer Verdämmung. Die Höhe der Lache ergibt sich aus dem Volumen und der Fläche, das Minimum (h_{min}) entspricht der Oberflächenrauigkeit des Untergrundes (typische Werte: von 5 mm für sehr glatte Flächen bis zu mehreren Zentimeter für raue Oberflächen). Die Ausbreitung erfolgt annähernd linear bis die verdämmte Fläche gefüllt oder h_{min} erreicht ist. Von da an bleibt die Fläche konstant.
			<p>PVAP [55] ✓ Lachenbildung auf Wasser: ✓ Lachenbildung an Land: Sofortige Zündung ✓; Verzögerte Zündung bei Versickerung und/oder Abfluss ✗. Vergleichbar wie EFFECTS. Die Berechnung erfolgt ebenfalls im Modul «Verdampfung» - Parameter, siehe unten.</p>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> - Versickerung und Abfluss (auf geneigter Fläche, in Kanalisation/Auffangbehältnis) werden nicht berücksichtigt.
	Verdampfung (5.2.7)	[26]	<p>[26], basierend auf [4] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Das Modul behandelt neben der Verdampfung auch die Lachenausbreitung (siehe oben). - Das Modell unterscheidet zwischen siedenden und nicht-siedenden Flüssigkeiten und erlaubt einen fließenden Übergang. Bei nicht-siedenden Flüssigkeiten ist die Verdampfungsrate einer Lache abhängig vom Dampfdruck über der Flüssigkeit und einem Stoffübergangskoeffizienten, hier spielen die zu definierenden Lachen- und Umgebungstemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit in 10m Höhe eine Rolle. Nach jedem Zeitschritt werden Temperatur, Masse und Radius der Lache neu berechnet, dieser Prozess läuft bis die Lache komplett verdunstet ist. Im Falle einer siedenden Lache ist ihre Temperatur konstant, die Wärmebilanz im Gleichgewicht (der Wärmezufuss von Untergrund und Luft sowie durch die solare Strahlung (lang- und kurzwellig) entspricht dem Wärmeverlust durch Verdampfung). Hierfür müssen Temperatur des Untergrundes, solare Strahlung (mögliche Berechnung anhand Jahreszeit, Längengrad und Wolkenbedeckung) und solare Wärmestrahlung definiert werden. - Bekannte Limitierungen [23]: (i) Wenn die Verdampfungsrate höher ist als der Zufluss in die Lache verringert sich die Lachenhöhe bis h_{min} erreicht ist, danach schrumpft die Lache. Bei verdämmten Lachen auf Wasseroberflächen ist dies
			<p>PVAP [55] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vergleichbar wie EFFECTS. Für diverse Parameter sind Werte oder Empfehlungen gegeben (Beispiele: Pasquill stability class, Surface roughness length), diese sind nicht aufgeführt da gleich wie EFFECTS (Referenz ist oft TNO Yellow Book [4]). - Das Modell unterscheidet ebenfalls zwischen siedenden und nicht-siedenden Flüssigkeiten und erlaubt einen fließenden Übergang. - Das Modul behandelt neben der Verdampfung auch die Lachenausbreitung (siehe oben). <p>In PHAST zu definierende relevante Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Release data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Component name or stream name - Number of components (possible are mixtures of up to five) - Release type (1 = instantaneous; 2 = continuous; 3 = time-varying) <p>Data applicable for instantaneous spill only:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Instantaneous spill mass - Duration of instantaneous spill (set to a very small Value by default, should not be modified by the user) - Temperature of instantaneous spill <p>Data applicable for continuous or time-varying spill only:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Array of spill rates </div>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>nicht vollständig implementiert – sobald die maximale Lachenfläche erreicht ist bleibt die Fläche konstant, stattdessen nimmt die Höhe ab bis die Lache komplett verdampft ist. (ii) Wenn eine flüchtige Flüssigkeit freigesetzt wird, nimmt ihre Temperatur gewöhnlich ab. Bei der Freisetzung auf einer Wasseroberfläche bedeutet dies, dass das darunterliegende Wasser auch abkühlt wird – dieser Effekt ist nicht berücksichtigt.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Die Lache wird komplett verdampft (vorausgesetzt es wird keine Zeitbegrenzung vorgegeben). <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Chemical name Use which representative step:</p> <ul style="list-style-type: none"> - First 20% average (flammable) - Second 20% average (toxic) <p>Evaporation from land or water:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Land - Water <p>Type of release in pool:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Instantaneous - Semi-continuous <p>Type of pool growth on land:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Spreading - Spreading in buns <p>Type of pool growth on water:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Open water - Confined water surface <p>Maximum pool surface area Mass flow rate of the source Duration of the release Total mass released Temperature of the pool</p> </div> <ul style="list-style-type: none"> - Array of spill times - Array of spill temperatures <p>Ambient data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pasquill stability class (siehe EFFECTS) - Solar radiation - Atmospheric pressure - Atmospheric temperature - Atmospheric humidity - Wind speed at reference height - Wind speed profile flag (1 = constant, 2 = power-law fit) <p>Substrate data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Surface roughness length (siehe Gasausbreitung in EFFECTS) - Bund diameter - Bund height - Surface temperature - Surface type (1-Dry soil; 2-Wet soil; 3-Concrete; 4-Insulated concrete; 5-Deep open water; 6-Shallow open water; 7-Deep river or channel; 8-Shallow river or channel) - thermal conductivity and diffusivity - minimum thickness

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> Temperature of the subsoil Temperature of the water Max temperature difference between pool and water Wind speed at 10 m height Ambient temperature Ambient Pressure Ambient relative humidity Solar radiation flux: <ul style="list-style-type: none"> - Calculate value - User defined Solar heat radiation flux Cloud cover Date: day number Date: month number Date: year number North/South latitude of the location Type of subsoil (evaporation): <ul style="list-style-type: none"> - Isolation concrete - Light concrete - Heavy concrete - Clinkers - Average subsoil - Dry sandy subsoil - Wet sand - Wood - Gravel - Carbon steel Subsoil roughness description (pool): <ul style="list-style-type: none"> - Very rough overgrown sandy soil with holes - Rough sandy soil, arable land, meadows - Relatively flat sandy soil, gravel - Flat sandy soil, concrete, tiles, plant-yard Maximum evaluation time for evaporation

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
Ausbreitung und Verdünnung der Gaswolke	Neutrale Gaswolke (5.3.2)	ALOHA's Gaussian dispersion model [28], TNO, Yellow Book [4]	<p>TNO, Yellow Book [4] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Gauß'sches Fahnenmodell, berechnet werden die Kontur einer gewissen Konzentration (Länge und maximale Breite bei gegebener Höhe), die explosive Masse (Konzentrationen zwischen LFL und UFL) sowie, je nach Substanz, die toxische Belastung. - Die Ausbreitung ist abhängig von Luftdruck und -temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit in 10m Höhe, Mischungsschichthöhe, atmosphärischen Stabilität (Pasquil oder Monin-Obukov). Weitere meteorologische Parameter wie zeitabhängige Windrichtung und Niederschlag werden nicht berücksichtigt. - Der Einfluss von Hindernissen auf die Ausbreitung wird näherungsweise durch den Parameter «Roughness length» berücksichtigt, es stehen 9 Grundeinstellungen zur Wahl. Eine explizite Berücksichtigung von Hindernissen (genaue Abmessung, Lage im Raum etc.) ist nicht möglich. - Mit der <i>Explosion region method</i> (siehe unten, Explosion) kann die Ausbildung einer potentiell explosiven Gaswolke in einem verdämmten oder «Staubereich» (<i>Congestion area</i>) untersucht werden. <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Chemical name</p> <p>Type of neutral gas release:</p> <ul style="list-style-type: none"> - continuous - Semi-continuous - instantaneuous <p>Total mass released</p> </div> <p>UDM [56] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Unified Dispersion Model, ein Gauß'sches Fahnenmodell. Berücksichtigt sowohl neutrale als auch schwere Gasausbreitung (zudem: aufsteigende und Strahlausbreitung). - Für diverse Parameter sind Werte oder Empfehlungen gegeben (Beispiele: Pasquill stability class, Surface roughness length), diese sind nicht angegeben da gleich wie EFFECTS (Referenz ist oft TNO Yellow Book [4]). - Zusätzlich ist ein <i>Indoor Dispersion</i> Modul [57] implementiert, dass die Gasfreisetzung in einem Gebäude und die potentiell folgende Verfrachtung der Gaswolke ins Freie durch Entlüftung simuliert. Laut Manual ist mit einem Submodell auch eine Abschätzung der Druckwelle im Falle einer Gaswolkenexplosion möglich, jedoch ist dieses nur auf Gebäude ausgelegt, die einem Überdruck von max. 0.1 bar widerstehen – dann gehen Fenster zu Bruch etc. Somit ist das Modell zur Abschätzung einer Druckwelle in einer soliden verdämmten Struktur wie einer Unterführung wenig geeignet. <p>In PHAST zu definierende relevante Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Release data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Release type (1 = instantaneuous; 2 = continuous or multi-segment) - Released material - Release height </div>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>Mass flow rate of the source</p> <p>Duration of the release</p> <p>Height of release (Z-coordinate)</p> <p>Offset X direction (distance) start dispersion</p> <p>Offset Z direction (height) start dispersion</p> <p>Length source in wind (x)direction</p> <p>Length source in crosswind (y) direction</p> <p>Length source in vertical (z) direction</p> <p>Ambient temperature</p> <p>Ambient Pressure</p> <p>Meteorological data :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Monin Obukov - Pasquill <p>Pasquill stability class:</p> <ul style="list-style-type: none"> - A (very unstable) - B (unstable) - C (lightly unstable) - D (neutral) - E (stable) - F (very stable) <p>Wind speed at 10 m height</p> <p>North/South latitude of the location</p> <p>Inverse Monin-Obukhov length (1/L)</p> <p>Mixing Height</p> <p>Stand. dev. of turbulent velocity in vertical direction</p> <p>Stand. dev. of turbulent velocity in horizontal direction</p> <p>Roughness length description:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Open water, at least 5 km - Mud flats, snow, no vegetation, no obstacles - Open flat terrain; grass, few isolated obstacles <p>Ambient data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pasquill stability class - Wind speed at reference height - Pressure - Temperature - Relative humidity <p>Terrain data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Surface roughness - Surface type (land or water)) - Surface temperature <p>Pool data:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pool surface type - Bund diameter - Temperature pool surface

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> - Low crops; occasional large obstacles - High crops; scattered large objects - Cultivated land - Parkland, bushes; numerous obstacles - Regular large obstacle coverage (suburb or forest) - City centre with high and low rise building <p>Time t after start release Concentration averaging time Reporting distance (Xd) Distance perpendicular to wind direction Height (Zd)</p> <p>Predefined concentration:</p> <ul style="list-style-type: none"> - User defined - Lower flammability limit - Upper flammability limit - Dutch ABW/LBW/VRW - ERPG-1/2/3 - IDLH - PAC-1/2/3 <p>Threshold concentration Contour plot accuracy Integration tolerance Predefined wind direction:</p> <ul style="list-style-type: none"> - User defined - N - NNE - NE - ENE - E - ESE - SE - SSE - S

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> - SSW - SW - WSW - W - WNW - NW - NNW <p>Wind comes from (North = 0 degrees) Use dynamic concentration presentation:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No - Yes
	Schwere Gaswolke [5.3.3]	SLAB model, TNO Yellow Book [4], Unified Dispersion Model (UDM) [68].	<p>SLAB model, TNO Yellow Book [4] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - <i>Shallow layer model</i>, berechnet werden die Konzentration einer gewissen Konzentration (Länge und maximale Breite bei gegebener Höhe), die explosive Masse (Konzentrationen zwischen LFL und UFL) sowie, je nach Substanz, die toxische Belastung. - Wie bei den neutralen Gasen ist die Ausbreitung abhängig von Luftdruck und -temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit in 10m Höhe, Mischungsschichthöhe, atmosphärischen Stabilität (Pasquill oder Monin-Obukov), der Einfluss von Hindernissen wird ebenfalls durch den Parameter «Roughness length» berücksichtigt (9 Grundeinstellungen zur Wahl). - Bekannte Limitierungen [23]: Am Ende einer Freisetzung (= nach der Dauer der Freisetzung) kommt es zu einer Transition zwischen zwei verschiedenen Modellen. Dies kann kurz vor und nach diesem Augenblick zu unterschiedlichen Resultaten führen, besonders in einer "Konzentration vs. Zeit"-Graphik kann dieser Moment in Form einer Diskontinuität sichtbar sein.
			<p>UDM [56] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Unified Dispersion Model, ein Gauß'sches Fahnenmodell. Berücksichtigt sowohl neutrale als auch schwere Gasausbreitung (zudem: aufsteigende und Strahlausbreitung). Parameter etc., siehe Neutrale Gaswolke.

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p data-bbox="842 296 1388 464">- Mit der <i>Explosion region method</i> (siehe unten, Explosion) kann die Ausbildung einer potentiell explosiven Gaswolke in einem verdämmten oder «Staubereich» (<i>Congestion area</i>) untersucht werden.</p> <p data-bbox="842 507 1249 531">In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div data-bbox="842 536 1384 1476" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p data-bbox="853 544 1016 568">Chemical name</p> <p data-bbox="853 576 1137 600">Type of heavy gas release:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="853 608 1155 632">- Evaporating pool release <li data-bbox="853 639 1115 663">- Horizontal jet release <li data-bbox="853 671 1093 695">- Vertical jet release <li data-bbox="853 703 1048 727">- instantaneous <p data-bbox="853 735 1070 759">Total mass released</p> <p data-bbox="853 767 1160 791">Mass flow rate of the source</p> <p data-bbox="853 799 1099 823">Duration of the release</p> <p data-bbox="853 831 1128 855">Initial liquid mass fraction</p> <p data-bbox="853 863 1055 887">Fixed pool surface</p> <p data-bbox="853 895 1122 919">Diameter of expanded jet</p> <p data-bbox="853 927 1133 951">Temperature after release</p> <p data-bbox="853 959 1189 983">Height of release (Z-coordinate)</p> <p data-bbox="853 991 1323 1015">Offset X direction (distance) start dispersion</p> <p data-bbox="853 1023 1301 1046">Offset Z direction (height) start dispersion</p> <p data-bbox="853 1054 1077 1078">Ambient temperature</p> <p data-bbox="853 1086 1043 1110">Ambient pressure</p> <p data-bbox="853 1118 1122 1142">Ambient relative humidity</p> <p data-bbox="853 1150 1077 1174">Meteorological data :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="853 1182 1043 1206">- Monin Obukov <li data-bbox="853 1214 976 1238">- Pasquill <p data-bbox="853 1246 1099 1270">Pasquill stability class:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="853 1278 1066 1302">- A (very unstable) <li data-bbox="853 1310 1021 1334">- B (unstable) <li data-bbox="853 1342 1088 1366">- C (lightly unstable) <li data-bbox="853 1374 999 1398">- D (neutral) </div>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> - E (stable) - F (very stable) <p>Wind Speed at 10 m height Inverse Monin-Obukhov length (1/L) Roughness length description:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Open water, at least 5 km - Mud flats, snow, no vegetation, no obstacles - Open flat terrain; grass, few isolated obstacles - Low crops; occasional large obstacles - High crops; scattered large objects - Cultivated land - Parkland, bushes; numerous obstacles - Regular large obstacle coverage (suburb or forest) - City centre with high and low rise building <p>Time t after start release Concentration averaging time Reporting distance (Xd) Distance perpendicular to wind direction Height (Zd) Predefined concentration:</p> <ul style="list-style-type: none"> - User defined - Lower flammability limit - Upper flammability limit - Dutch ABW/LBW/VRW - ERPG-1/2/3 - IDLH - PAC-1/2/3 <p>Threshold concentration Contour plot accuracy Predefined wind direction:</p> <ul style="list-style-type: none"> - User defined

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> - N - NNE - NE - ENE - E - ESE - SE - SSE - S - SSW - SW - WSW - W - WNW - NW - NNW <p>Wind comes from (North = 0 degrees) Use dynamic concentration presentation:</p> <ul style="list-style-type: none"> - No - Yes <p>Resolution of the time-consuming graphs:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Low - Medium - High - Very high
Zündung	Wahrscheinlichkeit für spontane Zündung (5.4.1)	[2], [3], [6], [10], [34], [35], [36]	<p>✘</p> <p>EFFECTS ist ein reines Konsequenzmodell zur Abschätzung der Folgen eines Störfalls. Modelle zur Berechnung bzw. Angaben zur Wahrscheinlichkeit einer sofortigen oder verzögerten Zündung, beispielsweise für unterschiedliche Zündungsquellen, sind nicht vorhanden.</p>
	Wahrscheinlichkeit für verzögerte Zündung aufgrund der Austrittsrate (5.4.2)		
	Wahrscheinlichkeit für verzögerte Zündung aufgrund von Zündungsquellen (5.4.2)		
			<p>✘</p> <p>Wie EFFECTS ist auch PHAST ein reines Konsequenzmodell zur Abschätzung der Folgen eines Störfalls. Modelle zur Berechnung bzw. Angaben zur Wahrscheinlichkeit einer sofortigen oder verzögerten Zündung, beispielsweise für unterschiedliche Zündungsquellen, sind nicht vorhanden.</p>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>Im TNO Tool «Riskcurves» wird EFFECTS im Rahmen eines klassischen QRA für die Konsequenzmodellierung eingesetzt. Die dort verwendeten Zündungswahrscheinlichkeiten sind im TNO Purple Book [6] dokumentiert.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Im Fall eines Lachenbrandes folgt das Poolfire Modul direkt auf die Freisetzung, Freisetzungsdauer, -rate und total freigesetzte Menge werden übernommen. Die Zündung folgt instantan, je nach Art der Freisetzung wird der brennenden Lache noch Treibstoff zugeführt. - Im Fall einer Gaswolke kommt es zunächst auf Basis von Freisetzungsrates und -dauer zur Lachenbildung und Verdampfung (beides zusammengefasst im Modul <i>Pool evaporation</i>). Die resultierenden Werte für Verdampfungsrates und -dauer sind Input für das Modul Gasausbreitung, welches die Ausmasse einer potentiellen flammbaren Gaswolke berechnet. Die hierbei berechnete totale brennbare Masse ist schlussendlich der Input für das Explosionsmodell. Somit erfolgt die Zündung erst nachdem sich die Gaswolke fertig ausgebildet hat, dementsprechend kann hier von einer verzögerten Zündung gesprochen werden.
Wirkung auf den Menschen	Lachenbrand, Brand Kessel/Tank, Poolfeuer (Auf Wasserfläche) (5.5.1.1)	Zwei-Zonen-Modell Poolfire6 [37] & TNO, Yellow Book [4]	<p>Zwei-Zonen-Modell Poolfire6 [37] & TNO, Yellow Book [4] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Poolfire6: Die Flamme wird in Form eines gekippten Zylinders mit zwei Zonen dargestellt: Eine untere Zone mit hoher Emission und sauberer Verbrennung, darüber eine russige, verdunkelte Zone. Das Modell wurde auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche zu Experimente und <p>POLF [58] ✗/✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - POLF ist vergleichbar mit dem Yellow Book Modell - im Gegensatz zu Poolfire6 unterscheidet das Modell nicht zwischen verschiedenen Zonen, die Flamme wird als einzoniger Zylinder dargestellt. Hierbei wird jeder Substanz unter Eigenschaften eine «Flame flag» zugeordnet ist, die die Verbrennung stark beeinflusst. Beispiele:

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2					
			<p>Beobachtungen von Lachenbränden neu entwickelt und ist als solches den älteren Ansätzen beispielsweise im Yellow Book vorzuziehen. Zudem beinhaltet es eine Datenbank mit substanzspezifischen Werten zur Verbrennungsrate und Strahlungsleistung der Flamme, die die korrekte Anwendung vereinfachen.</p> <ul style="list-style-type: none"> - In der in EFFECTS implementierten Version von Poolfire6 findet in der unteren der zwei Zonen immer saubere Verbrennung statt. Bei sehr russigen Verbrennungsprozessen (Beispiel: sehr grosse Lache mit entsprechend schlechter Sauerstoffzufuhr) kann dies zu einer Überschätzung von Flammentemperatur und Wärmestrahlung führen. Hier wäre ggf. das Yellow Book Modell vorzuziehen. - Es wird unterschieden nach der Art (unverdämmt vs. verdämmt) sowie der Form der Lache (rund, Polygon – dieses kann per Hand gezeichnet werden, viereckig, Randfeuer). - Weitere zu definierende Einflussgrößen sind Temperatur der Lache, Luftdruck und -temperatur, relative Luftfeuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit in 10m Höhe und atmosphärische CO₂-Konzentration. - Das Model berechnet Konturen für die Hitzestrahlung als auch für die damit assoziierten Schäden (Verbrennungen 1, 2 oder 3 Grades), bei letzterem kann ein Schutz durch Kleidung berücksichtigt werden. <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <table border="1" data-bbox="842 1406 1384 1476"> <tr> <td>Chemical name</td> </tr> <tr> <td>Type of pool fire calculation:</td> </tr> </table> <p>In PHAST zu definierende relevante Parameter:</p> <table border="1" data-bbox="1424 1369 1924 1476"> <tr> <td>Ambient data:</td> </tr> <tr> <td>- wind speed</td> </tr> <tr> <td>- temperature</td> </tr> </table> <p><i>sooty</i>, (russige Verbrennung, dementsprechend tief sind die berechneten <i>Flame temperature</i> und <i>Emissive power flame</i>) oder <i>luminous</i> (saubere Verbrennung, dementsprechend tief sind die berechneten <i>Flame temperature</i> und <i>Emissive power flame</i>).</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bei insgesamt homogener, sehr sauberer oder russiger Verbrennung ist das Modell angemessen. Bei inhomogenen Verbrennungsprozessen werden Flammentemperatur und Wärmestrahlung jedoch je nach «Flame flag» über- oder unterschätzt. Eine Abstufung/Mischrechnung wie in Poolfire6 ist nicht möglich. - Es wird unterschieden nach der Art der Lache (unverdämmt vs. verdämmt). - Weitere zu definierende Einflussgrößen sind Temperatur der Lache, Luftdruck und -temperatur, relative Luftfeuchte, Windrichtung und -geschwindigkeit in 10m Höhe und atmosphärische CO₂-Konzentration. - Das Model berechnet Konturen für die Hitzestrahlung als auch für die damit assoziierte Letalität. - Zur Abschätzung der Ausbreitung der Rauchwolke kann POLF mit dem Ausbreitungsmodell UDM gekoppelt werden. 	Chemical name	Type of pool fire calculation:	Ambient data:	- wind speed	- temperature
Chemical name								
Type of pool fire calculation:								
Ambient data:								
- wind speed								
- temperature								

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> - Model Yellow Book - <u>Two zone model Rew + Hulbert</u> <p>Pool size determination:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Confined - Unconfined fixed feed <p>Total mass released</p> <p>Mass flow rate of the source</p> <p>Duration of the release</p> <p>Type of pool:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Circular - Polygon - Rectangular - Rim fire <p>Max. pool surface poolfire</p> <p>Diameter of the rim</p> <p>Width of rim</p> <p>Width of rectangle</p> <p>Length of rectangle</p> <p>Rotation rectangle (North = 0 degrees)</p> <p>Shape of pool</p> <p>Height of the receiver</p> <p>Height of confined pool above ground level</p> <p>Temperature of the pool</p> <p>Fraction combustion heat radiated</p> <p>Soot Fraction:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Calculate/default - User defined <p>Fraction of the flame covered by soot</p> <p>Wind Speed at 10 m height</p> <p>Ambient temperature</p> <p>Ambient pressure</p> <p>Ambient relative humidity</p> <p>Amount of CO₂ in atmosphere</p> <p>Reporting distance (Xd)</p>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>Maximum heat exposure duration</p> <p>Predefined wind direction:</p> <ul style="list-style-type: none"> - User defined - N - NNE - NE - ENE - E - ESE - SE - SSE - S - SSW - SW - WSW - W - WNW - NW - NNW <p>Wind comes from (North = 0 degrees)</p> <p>Heat radiation level (lowest) for first contour plot</p> <p>Heat radiation level for second contour plot</p> <p>Heat radiation level (highest) for third contour plot</p> <p>Report heat radiation grid:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Yes - No <p>Resolution for surface discretization:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Low - Medium - High - Very high

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>Take protective effects of clothing into account:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Yes - No <p>Correction lethality protection clothing Percentage of mortality for contour calculations Heat radiation lethal damage Probit A Heat radiation lethal damage Probit B Heat radiation damage Probit N</p>
	Stichflamme (5.5.1.4)		<p>Chamberlain-Modell [4] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wirkung auf Mensch analog Modell für Lachenbrand (Hitzeabstrahlung). <p>JFSH [59] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Wirkung auf Mensch analog Modell für Lachenbrand (Hitzeabstrahlung).
	Bersten Druckbehälter, z.B. durch BLEVE (5.5.1.5)	Baker model, TNO Yellow Book [4]	<p>Baker model, TNO Yellow Book [4] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Es wird unterschieden nach Form und Position (Boden vs. erhöht) des Kessels sowie dem Grund des Berstens. - Das Model berechnet unter anderem Spitzenüberdruck, Masse, Geschwindigkeit und maximale Reichweite des schwersten Trümmerstücks, Masse, Geschwindigkeit und maximale Reichweite des leichtesten Trümmerstücks sowie verursachte Schäden (generell sowie an Gebäuden und Infrastrukturen). <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Chemical name Cause of vessel rupture:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pressure vessel burst with ideal gas - Pressure vessel burst with non-ideal gas/vapour - Pressure liquefied gas, BLEVE - Decomposition of materials - Runaway reaction, ideal gas </div> <p>BLBL [60] ✗</p> <ul style="list-style-type: none"> - Es wird unterschieden nach Form und Position (Boden vs. erhöht) des Kessels. - Das Model berechnet Druckwelle und Impuls einer BLEVE. - Das Model funktioniert nur stand-alone, nicht im Kontext eines Freisetzungsszenarios. <p>In PHAST zu definierende relevante Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Material Mass inventory Phase Temperature Pressure Vessel:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Shape - Elevation - radius <p>Air or ground burst</p> <ul style="list-style-type: none"> - Air burst </div>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> - Runaway reaction, non-ideal gas/vapour - Internal explosions Vessel type: <ul style="list-style-type: none"> - Cylinder - Sphere Length cylinder Burst pressure vessel Initial temperature in vessel Vessel volume Filling degree Is the vessel elevated: <ul style="list-style-type: none"> - No - Yes Total mass of decomposable chemical in vessel Heat of reaction per kg product Liberated energy per kg product Ambient temperature Ambient pressure Distance from centre of vessel (Xd) Fraction of liberated energy going to kinetic energy Fragment distribution: <ul style="list-style-type: none"> - 2 equal pieces - 2 unequal pieces - 2 caps and body - Many equal pieces Number of pieces Mass of empty vessel Mass of heaviest piece (body when cylinder ruptured in 3) Threshold overpressure
	Feuerball (z.B. BLEVE) (5.5.1.3)	TNO Yellow Book [4]	TNO Yellow Book [4] ✓
			<ul style="list-style-type: none"> - Ground Burst, <p>Ideal gas modelling</p> <ul style="list-style-type: none"> - Model as ideal gas - Model as real gas <p>CCPS method</p> <ul style="list-style-type: none"> - Different methods for modelling BLEVE blasts are specified in the first edition and the second edition of the CCPS publication <i>Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires and Bleves</i>. You can choose between the two methods.
			TNO Yellow Book [4][61] ✓

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> - Zur Auswahl stehen zwei Modelle: Das Static BLEVE model des Yellow books sowie ein Dynamic BLEVE model. - Das Model berechnet unter anderem die total involvierte Masse, Dauer, max. Höhe und max. Durchmesser des Feuerballs, Oberflächenstrahlungsenergie, Spitzenüberdruck sowie Konturen für Hitzestrahlung und Verbrennungen 1, 2 und 3 Grades. <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Chemical name</p> <p>Type of BLEVE calculation:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dynamic BLEVE model - Static BLEVE model (Yellow book) <p>Initial temperature in vessel</p> <p>Initial (absolute) pressure in vessel</p> <p>Vessel volume</p> <p>Filling degree</p> <p>Burst pressure of the vessel</p> <p>Ambient temperature</p> <p>Ambient relative humidity</p> <p>Ambient Pressure</p> <p>Amount of CO₂ in atmosphere</p> <p>Reporting distance (Xd)</p> <p>Maximum heat exposure duration</p> <p>Height of the receiver</p> <p>Include BLEVE overpressure effects:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Yes - No <p>Threshold overpressure</p> <p>Heat radiation level (lowest) for first contour plot</p> <p>Heat radiation level for second contour plot</p> </div>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>Heat radiation level (highest) for third contour plot</p> <p>Take protective effects of clothing into account</p> <p>Correction lethality protection clothing</p> <p>Percentage of mortality for contour calculations</p> <p>Heat radiation lethal damage Probit A</p> <p>Heat radiation lethal damage Probit B</p> <p>Heat radiation damage Probit N</p>
	<p>Explosion unverdämmte Gaswolke (5.5.1.5)</p> <p>Explosion (teil)verdämmte Gaswolke (5.5.1.5)</p>	<p>Multi-Energy concept [4][6.1], Baker-Strehlow-Tang model [69][70]</p>	<p>Multi-Energy concept [4] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Neben den 10 <i>Blast curves</i> kann auch die GAME Methode [40] angewendet werden. Hierbei wird die Explosionsstärke anhand weiterer zu setzender Parameter betreffend der Verdämmung und Stauung der Gaswolke (<i>Expansion type, Volume blockage ratio, Flame path length, Typical obstacle diameter</i>) abgeschätzt. Eine Rolle spielt auch die substanzabhängige laminare Brenngeschwindigkeit, diese sind in einer Datenbank hinterlegt und direkt mit der Substanz verknüpft. - Das Model berechnet unter anderem die totale Verbrennungsenergie, Spitzenüberdruck, sowie verursachte Schäden (generell sowie an Gebäuden und Infrastrukturen. <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <p>Chemical name</p> <p>Ambient pressure</p> <p>Total mass in explosive range</p> <p>Fraction of flammable cloud confined</p> <p>Use GAME overpressure method:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Yes - No
			<p>OREM [63] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Implementiert sind sowohl Multi-Energy concept als auch Baker-Strehlow-Tang model. - Die Explosionsstärke wird folgendermassen abgeschätzt: [Multy-Energy] "Defined Strength" anhand <i>Blast curves</i> oder "Calculated Strength" entsprechend GAME Methode, analog zu EFFECTS. [Baker-Strehlow-Tang] "Defined Flame Speed" oder "Calculated Flame Speed". Ersteres wird direkt vom Anwender eingegeben, letzteres wird anhand Parametern zu u. A. Verdämmung berechnet (siehe unten). Eine kostenpflichtige Erweiterung erlaubt die Analyse von Explosionen im 3D-Raum¹³. <p>In PHAST zu definierende relevante Parameter:</p> <p>[Multi-Energy] Data required to define a "Calculated Strength" obstruction:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Degree of expansion, 2D or 3D - Volume blockage ratio, i.e. the ratio between volume of all obstacles and total volume of the obstructed region.

¹³ <https://www.dnvgl.com/services/taking-hazard-analysis-software-one-step-further-phast-3d-explosions-1698>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>Curve number:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 (very weak deflagration) - 2 (very weak deflagration) - 3 (weak deflagration) - 4 (weak deflagration) - 5 (medium deflagration) - 6 (strong deflagration) - 7 (strong deflagration) - 8 (very strong deflagration) - 9 (very strong deflagration) - 10 (detonation) <p>Game expansion type:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2D - 3D <p>Volume blockage ratio</p> <p>Flame path length</p> <p>Typical obstacle diameter</p> <p>Reporting distance (Xd)</p> <p>Offset between release point and cloud centre</p> <p>Threshold overpressure</p> <p>Predefined wind direction:</p> <ul style="list-style-type: none"> - User defined - N - NNE - NE - ENE - E - ESE - SE - SSE - S - SSW - SW - WSW
			<ul style="list-style-type: none"> - Typical diameter of obstacles - Flame path length. This can be supplied directly or calculated by the model by assuming a hemispherical cloud shape <p>[Baker-Strehlow-Tang] Data required to define a "Calculated Flame Speed" obstruction:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Degree of confinement, 2D, 2.5D or 3D - Volume blockage ratio, i.e. the ration between volume of all obstacles and total volume of the obstructed region. - Congestion. Can be given directly as low, medium or high or determined using two different methods. - Material reactivity. Can be supplied directly or determined using the laminar burning velocity of the material.

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<div data-bbox="842 296 1384 469" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> - W - WNW - NW - NNW <p>Wind comes from (North = 0 degrees)</p> </div> <p data-bbox="842 507 1402 991">- In EFFECTS v10 wurde neu eine Methode zur Abschätzung eines Explosionsbereichs implementiert (<i>Explosion region method</i> [23]). Hierbei wird ein Bereich definiert, in dem sich aufgrund verschiedener zu definierender Parameter (<i>Volume blockage ratio, Typical obstacle diameter, Height of congested area</i>) potentiell eine explosive Gaswolke ausbilden kann. Dieser verdämmte oder «Staubereich» (<i>Congestion area</i>) kann mit dem EFFECTS Ausbreitungsmodell (sowohl für neutrales als auch schweres Gas) verknüpft werden, welches für den Bereich die verdämmte/gestaute Masse sowie typische Multi-Energie Explosions-Ergebnisse berechnet.</p> <p data-bbox="842 1029 1402 1093">Für ein <i>Congested Area</i> müssen die folgenden Parameter definiert werden:</p> <div data-bbox="842 1098 1384 1479" style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Shape of receiver (manuell zu zeichnen)</p> <p>Use GAME overpressure method:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Yes - No <p>Curve number:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 1 (very weak deflagration) - 2 (very weak deflagration) - 3 (weak deflagration) - 4 (weak deflagration) - 5 (medium deflagration) - 6 (strong deflagration) </div>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<ul style="list-style-type: none"> - 7 (strong deflagration) - 8 (very strong deflagration) - 9 (very strong deflagration) - 10 (detonation) Game expansion type: <ul style="list-style-type: none"> - 2D - 3D Volume blockage ratio Typical obstacle diameter Height of congested area Use 50% LFL for cloud contour: <ul style="list-style-type: none"> - Yes - No
	Letalität durch Wärmestrahlung (5.5.2.1)	Probit-Funktionen (5.5.2.4), Tabelle 5-28	Probit-Funktionen, TNO Green Book [5] ✓ <ul style="list-style-type: none"> - Es wird unterschieden zwischen individuellem Risiko sowie dem Risiko für Bevölkerungsgruppen. - Im Rahmen des «Pool fire» Modells können die Parameter der Probit-Funktion für Letalität verändert werden. - Für das individuelle Risiko werden die Wahrscheinlichkeiten (%) für Verbrennungen ersten und zweiten Grades sowie für Todesfälle angegeben. Beim kollektiven Risiko wird die Anzahl der jeweiligen Fälle berechnet: Menschen mit Verbrennungen ersten und zweiten Grades, Todesfälle durch Wärmestrahlung, Todesfälle durch entzündete Kleidung, Todesfälle innerhalb des brennenden Bereiches. - Es kann ein Wert für die maximale Exposition angegeben werden (Default: 20 s; anzupassen unter Edit/Options/Default system set). - Die Schutzwirkung von Kleidung sowie die Reaktionszeit und Fluchtgeschwindigkeit der Menschen können berücksichtigt werden.
			Probit-Funktionen, TNO Green Book [5] ✓ <ul style="list-style-type: none"> - Die einzelnen Probit-Parameter können verändert werden. - Neben dieser <i>Probit Method</i> kann auch eine <i>Intensity Method</i> verwendet werden. Hier kann ausgewählt werden, ob die Vulnerabilitäten anhand Probit, Dose oder Lethality levels berechnet werden sollen, die entsprechenden Werte und Wahrscheinlichkeiten werden für bestimmte Strahlungsinintensitäten in einer Tabelle hinterlegt und abgefragt (Default sind 3 Stufen: 4, 12.5 und 37.5 kW/m²). Dies geschieht in Form einer Stufenfunktion, es gibt keine Interpolation zwischen den Intensitäten. - Es kann ein Wert für die maximale Exposition angegeben werden (Default Lachenbrand: 20 s).

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p><i>Individuelles Risiko:</i> Heat radiation level at X (wird berechnet durch, z.B., vorgelagertes Poolfire Modell) Maximum heat exposure duration Take effects of clothing into account: - Yes - No</p> <p><i>Kollektives Risiko:</i> Pool surface Heat emission from surface of the fire "Safe" distance (where heat load = 1 kW/m²) Population density Escape velocity Reaction time Maximum heat exposure duration Take effects of clothing into account: - Yes - No</p> </div>
	<p>Letalität durch Explosion, direkt: Druckwelle (5.5.2.2)</p>	<p>Probit-Funktion, TNO Green Book [5]</p>	<p>Probit-Funktionen, TNO Green Book [5] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Im Gegensatz zur Wärmestrahlung wird nur das individuelle Risiko abgeschätzt. - Berechnet wird die Wahrscheinlichkeit einer Verletzung von Lunge und/oder Trommelfell sowie durch Verfrachtung des gesamten Körpers und folgender Kollision (Körper generell oder Kopf) mit einem Objekt. - Es scheint nicht möglich zu sein, die Probit-Funktion zu verändern. <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p>Chemical name</p> </div>
			<p>✗ Die Auswirkungen von Explosionen werden in Form von Überdruck und Impuls vs. Distanz dargestellt. Die Letalität wird nicht direkt berechnet.</p>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
			<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Positive phase duration Peak overpressure Mass of human </div>
	Letalität durch Explosion, indirekt: Trümmerwurf (5.5.2.2)	Probit-Funktion, TNO Green Book [5]	<p>Probit-Funktionen, TNO Green Book [5] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Berechnet wird die Wahrscheinlichkeit von Mortalität durch Trümmereinschlag. - Es scheint nicht möglich zu sein, die Probit-Funktion zu verändern. <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Mass of non-penetrating fragment Speed of non-penetrating fragment </div>
	Letalität durch Explosion, indirekt: Glassplitter (5.5.2.2)	Probit-Funktion, TNO Green Book [5]	<p>Probit-Funktionen, TNO Green Book [5] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Berechnet wird die Wahrscheinlichkeit von Mortalität durch Glassplittereinwirkung. - Es scheint nicht möglich zu sein, die Probit-Funktion zu verändern. <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> Peak overpressure Positive phase duration Wave type: <ul style="list-style-type: none"> - Pressure Wave - Shock wave Angle of incidence Smallest span length window Largest span length window Smallest thickness window Largest thickness window Modulus in flexure Transverse contraction coefficient Density of glass Ambient pressure </div>

Modul	Vorgang/Ereignis	Teil 1	Teil 2
	<p>Letalität durch Exposition zu toxischen Stoffen (z.B. CO) (5.5.2.3)</p>	<p>Probit-Funktion, TNO Green Book [5]</p>	<p>Probit-Funktionen, TNO Green Book [5] ✓</p> <ul style="list-style-type: none"> - Berechnet wird die Wahrscheinlichkeit von Mortalität durch das Einatmen toxischer Stoffe. - Die Probit-Parameter können verändert werden (die Substanzen selbst sind schreibgeschützt, Kopien können jedoch bearbeitet werden). <p>In EFFECTS zu definierende Parameter:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;"> <p>Chemical name Concentration toxic substance Duration of exposure</p> </div>
			<p>[66] ✓</p> <p>Die letale Wirkung von toxischen Stoffen wird über Probit-Funktionen abgeschätzt. Diese können frei eingegeben werden, zudem sind für die in der Datenbank aufgeführten Substanzen Default-Werte hinterlegt (u. A: CO).</p>