



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit

The background features a large, faint watermark of the University of Leoben seal. The seal is circular and contains a shield with various symbols: a hammer and pickaxe, a stork, a lion, and a building. The text 'UNIVERSITAS MONTANA LEOBENSIS' is visible around the perimeter of the seal.

Untersuchung der Anwendbarkeit von
Störfallauswirkungsbetrachtungen im
Rahmen der Katastrophenschutzplanung

Dipl.-Ing. Katja Hüttenbrenner

Jänner 2020

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume.

Leoben, Herbst 2019

Ort/Datum

Kaja Piskol

Unterschrift

Danksagung

Im Ziel angelangt möchte ich noch kurz inne halten, um all jene zu danken, die zum Gelingen dieser Masterarbeit durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung beigetragen haben. Kritisches Hinterfragen und konstruktive Kritik machten es mir erst möglich eine durchdachte Fragestellung aufzubauen und diese zu bearbeiten. Oft steckt man in einer Sackgasse fest, aber durch einen „kleinen Schubs“ in die richtige Richtung löst sich der bekannte „Knoten im Hirn“. Vielen Dank dafür! Aber auch für das eifrige Korrekturlesen mit den vielen nützlichen Kommentaren!

Einem besonderen Dank gilt Prof. Harald Raupenstrauch, welcher mir durch das TPT-Stipendium die Absolvierung eines sehr interessanten Lehrgangs möglich machte und so mein Interesse im Bereich Auswirkungsbetrachtung weckte.

Kurzfassung:

Für die Ressourcenplanung der Gefahrenabwehr im Katastrophenschutz gibt es gegenwärtig verschiedenste Ansätze, welche von den Verantwortlichen abhängig sind. Die Berechnung von Störfällen im Umfeld von Industrieanlagen ist in Österreich zum Zwecke der Raumordnung vorgeschrieben und könnte in ähnlichem Maße für die Katastrophenschutzplanung angewendet werden. Um die Anwendbarkeit der Berechnungsvorschläge nach der TNO (Niederländische Organisation für angewandte Naturwissenschaften) und deren Ergebnisse in Bezug auf die Katastrophenplanung untersuchen zu können, wurden drei Szenarien (BLEVE, VCE, Tankbrand) berechnet und die Auswirkungen abgeschätzt. Mit diesen Ergebnissen könnten Planungen für Ausrüstung, Material und Personal für Rettungsdienste, Krankenhäuser sowie Gefahrenabwehr angestellt werden. Beispielhaft wurden für die drei gewählten Szenarien der Materialbedarf für den Rettungsdienst und der Löschmittelbedarf dargestellt.

Abstract:

Disaster management knows various approaches for emergency response planning which strongly depends on those responsible for planning procedures. Calculations of major accidents in the field of industrial sites are used in Austria for purposes of land use planning and may be used in similar ways for emergency planning. To evaluate the applicability of calculation models of the TNO (Netherlands Organization for applied scientific research) for major accidents three scenarios were chosen (BLEVE, VCE, tank fire). With the results their implications on emergency planning have been estimated. Calculation results could be the basis for planning equipment and personnel of emergency services. Exemplary, for the three chosen scenarios the required material for the emergency medical service and the demand of extinguishing agents for the fire brigade were presented.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Akronyme.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	10
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	11
2 Durchführung Auswirkungsbetrachtung.....	12
2.1 Auswahl der Szenarien	13
2.1.1 BLEVE	13
2.1.2 Brand eines Lagertanks.....	15
2.1.3 Gaswolkenexplosion (VCE).....	16
3 Szenario BLEVE.....	18
3.1 Auswirkungsbetrachtung BLEVE	21
4 Szenario Tankbrand	34
4.1 Berechnung Strahlungswärme	38
4.2 Plausibilitätsprüfung durch Laborversuch	40
4.3 Auswirkungsbetrachtung Pool Fire.....	43
4.3.1 Auswirkungsbetrachtung Wärmestrahlung auf Lebewesen	43
4.3.2 Auswirkungsbetrachtung Schadstoffausbreitung	56
4.3.3 Auswirkungsbetrachtung am Nachbartank.....	57

5	Szenario VCE	61
5.1	TNT-Äquivalenz-Methode	62
5.2	Multi-Energy-Methode	65
5.3	Auswirkungsbetrachtung VCE.....	68
5.3.1	Auswirkungen nach TNT-Äquivalenz-Methode	72
5.3.2	Auswirkungen nach Multi-Energy-Methode.....	72
5.3.3	Vergleich beider Berechnungsmethoden	72
6	Zusammenfassung	75
7	Literaturverzeichnis.....	78
8	Anhang	84
8.1	Das Unglück von Feyzin.....	84
8.2	Das Unglück von Crescent City.....	86
8.3	Tankfahrzeugunglück von Nijmegen	88
8.4	Das Unglück von Nishapur.....	89
8.5	Brand in Wildon 2015	90

Akronyme

ADR	Europäisches Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route)
API	American Petroleum Institute
BLAK	Bundesländerarbeitskreis
BLEVE	Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion
BP	Britisch Petroleum
bzw.	beziehungsweise
CLP	Classification, Labelling and Packaging; Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen
EW	Einwohner
GewO	Gewerbeordnung
GTM	Zeitzone: Greenwich Mean Time
Infus.-Lsg.	Infusionslösung
LD ₅₀	letale Dosis 50
LKW	Lastkraftwagen
Lsg.	Lösung
LPG	Liquified Petroleum Gas

NFPA	National Fire Protection Association
ÖBFV	Österreichischer Bundesfeuerwehrverband
p	Druck
p _s	Spitzenüberdruck
q	Wärmemenge
q“	Wärmestrahlung
SEP	surface emissive power, Emission der Flammenoberfläche
t	Zeit
TDU	thermal dosis unit
TNT	Trinitrotoluol
TPT	Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
TNO	Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (Deutsch: Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung)
u.a.	unter anderem
u.ä.	und ähnliches
UVCE	Unconfined Vapour Cloud Explosion, unverdämmte Gaswolkenexplosion
udg.	und der gleichen
usw.	und so weiter
VCE	Vapour Cloud Explosion, Gaswolkenexplosion
vgl.	vergleiche
z.Bsp.	zum Beispiel
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bild einer BLEVE [13]	14
Abbildung 2: Bild von Tankbrand in Buncefield 2005 [16]	15
Abbildung 3: Flixborough 1974 [18].....	17
Abbildung 4: Berechnungsmodell BLEVE	20
Abbildung 5: Errechnete Wärmestrahlung in Abhängigkeit zum Explosionsort.....	21
Abbildung 6: Altersverteilung der niederländischen Bevölkerung (1985) [21]	23
Abbildung 7: Altersverteilung der österreichischen Bevölkerung 2017 [22].....	24
Abbildung 8: Schadenswahrscheinlichkeit BLEVE	26
Abbildung 9: Schadenswahrscheinlichkeit Tod durch Verbrennung.....	27
Abbildung 10: Berechnungsmodell Pool Fire	37
Abbildung 11: Wärmefluss in Abhängigkeit zum Ort	39
Abbildung 12: Versuchsaufbau.....	40
Abbildung 13: Vergleich Berechnung und Laborversuch.....	42
Abbildung 14: Zeitspanne bis zu Schmerzempfinden [45]	44
Abbildung 15: Zeit bis zum unerträglichen Schmerz [21]	45
Abbildung 16: Grenzen Schmerzempfinden in Abhängigkeit zur eintreffenden Wärmestrahlung bei keiner vorgegebenen Windrichtung (Wind: 1 m/s)	46

Abbildung 17: Kriterium Hauttemperatur in Abhängigkeit von der Dauer der Wärmeeinwirkung [21].....	47
Abbildung 18: Abstände nach BLAK-Empfehlung bei keiner vorgegebenen Windrichtung (Wind: 1 m/s).....	48
Abbildung 19: Feuerwehreinsatz aus Richtung Kläranlage (Quelle Bilder: google maps, FF Weitendorf).....	49
Abbildung 20: Feuerwehreinsatz aus Richtung Eingang Firmengelände (Quelle Bilder: google maps, FF Weitendorf).....	49
Abbildung 21: Berechnete Wärmestrahlung bei Großbrand in Wildon 2015	50
Abbildung 22: Löscharbeiten der Feuerwehr bei einem Öl-Tankbrand [53]	51
Abbildung 23: Funktionsweise Schaumlöschanlage bei Tankbehälter [54].....	52
Abbildung 24: Schaumerzeugung mittels Schwerschaumrohr (oben) und mittels Mittelschaumrohr (unten) [56]	55
Abbildung 25: Bereiche im Tanklager laut BLAK-Empfehlung (Wind: 1 m/s).....	59
Abbildung 26: Druck in Abhängigkeit vom Abstand zur Zündquelle (TNT-Äquivalenz-Modell)	64
Abbildung 27: Multi-Energy-Berechnungsmodell	67
Abbildung 28: Druck in Abhängigkeit vom Abstand zur Zündquelle (Multi-Energy-Modell).....	67
Abbildung 29: Vergleich TNT-Äquivalenz-Modell und Multi-Energy-Methode.....	73
Abbildung 30: Tankanordnung Feyzin (Quelle: [32])	84
Abbildung 31: Großbrand in Wildon 2015 (Quelle: FF Pirka-Windorf).....	91

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Annahmen BLEVE	18
Tabelle 2: Ergebnisse Berechnung BLEVE Propankesselwaggon.....	21
Tabelle 3: Schadensausmaß BLEVE Propankesselwaggon	25
Tabelle 4: Einteilung Verbrennungsgrade [23]	28
Tabelle 5: Infusionsbedarf 100 Patienten [25]	30
Tabelle 6: Notfallbevorratung für 100 Verbrennungspatienten [29]	31
Tabelle 7: Zusammenfassung Realfälle	32
Tabelle 8: Annahmen Pool Fire	35
Tabelle 9: Ergebnisse Berechnung Pool Fire Rohöltank	38
Tabelle 10: Ergebnisse Berechnung Pool Fire Versuchstank	41
Tabelle 11: Schaummittel [54]	53
Tabelle 12: Entstehende Schadstoffe bei Bränden [54]	57
Tabelle 13: Annahmen VCE – TNT-Äquivalenz-Methode	62
Tabelle 14: Annahmen VCE – Mulit-Energy-Methode.....	65
Tabelle 15: Notfallbevorratung zur Akutversorgung von 100 Trauma-Patienten [29].....	70
Tabelle 16: Schadensausmaß VCE nach TNT-Äquivalenz-Methode.....	72
Tabelle 17: Schadensausmaß VCE nach Multi-Energy-Methode	72
Tabelle 18: Zeitlicher Ablauf Feyzin [32]	85

Tabelle 19: Zeitlicher Ablauf Crescent City [33].....	87
Tabelle 20: Zeitlicher Ablauf Nijmegen [36].....	88
Tabelle 21: Zeitlicher Ablauf Nishapur [37].....	89
Tabelle 22: Annahmen Berechnung Brand Wildon	90

1 Einleitung

Der Unfall in Seveso 1976 kann gemeinsam mit dem Unfall in Flixborough 1974 in Europa als Wendepunkt im Bereich der Anlagensicherheit gesehen werden. Ausgehend von den beiden Unglücken wurde 1982 die so genannte „Seveso I“-Richtlinie (Richtlinie 82/501/EWG) erlassen. Eine Überarbeitung führte zur Richtlinie 96/82/EG (Seveso II), welche im nationalen Recht ebenfalls umgesetzt wurde. Seit 2012 ist die Seveso III- Richtlinie anzuwenden (vgl. hierzu [1]). Die Seveso III-Richtlinie hat, wie die Vorgängerrichtlinien, zum Ziel, „schwere Unfälle mit gefährlichen Stoffen zu verhüten und die Unfallfolgen für die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu begrenzen um auf abgestimmte und wirksame Weise ein hohes Schutzniveau in der gesamten Union zu gewährleisten“. Die Umsetzung der Richtlinie erfolge in Österreich in unterschiedlichen Materiengesetzen, wie zum Beispiel durch die Gewerbeordnung (GewO). [1] [2]

Vorgaben, die die Seveso-Richtlinie enthalten, sind unter anderem die Ermittlung und Bewertung der Risiken schwerer Unfälle sowohl bei bestimmungsgemäßem als auch bei gestörtem Betrieb sowie die Abschätzung der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Schwere solcher Unfälle. Die Art der möglichen Störfälle, die Wahrscheinlichkeit und die Bedingung für ihr Eintreten sind zu beschreiben und das Ausmaß abzuschätzen [3]. Die Beschreibung von Störfallabläufen stellt die Grundlage für die Gefahrenabwehrplanung dar. Es können dadurch Zeitverläufe (punktuelle Einfluss oder Dauereinwirkung), betroffene Flächen (Einwohner pro Fläche) und Schadenswirkungen ermittelt werden. Ob eine solche Stofffreisetzung zu einer ernststen Gefahr wird, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Stoffmenge
- Gefahrenpotential
- Ausbreitungsmöglichkeit
- Gefährdung der Beschäftigten
- Nähe zu Verkehrswegen und Wohnbebauung

Um Störfälle und deren Gefahren abschätzen zu können, bieten sich grundsätzlich zwei Vorgehensweise an: Die Probabilistik und die Deterministik. In der Deterministik werden Szenarien für die Planung festgelegt, während diese in der Probabilistik erst ermittelt werden müssen. Diese bilden die Grundlage für die Bestimmung eines Risikos. Die Ermittlung des Risikos erfolgt nach genauer Analyse der Auswirkungen und der Eintrittswahrscheinlichkeiten. [4] Durch eine Gefahrenanalyse und Störfallauswirkungsbetrachtungen werden mögliche Gefahren von Störfällen ermittelt. Die Durchführung von Störfallauswirkungsbetrachtungen für Betriebe beinhaltet folgende Schritte: [3]

- Annahme eines Stofffreisetzungsszenarios unter Auswahl des Stoffes mit dem höchsten Gefährdungspotential
- Festlegung und Ermittlung der Leckagemenge
- Abschätzung der Ausbreitung der gefährlichen Stoffe, einschließlich der Ermittlung von Immissionskonzentrationen, von möglichen Explosions- und Brandauswirkungen
- Bewertung der ermittelten Auswirkungen anhand von geeigneten Beurteilungs- und Grenzwerten

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Der Katastrophenschutz wird bei Störfällen aktiv, welche planungsmäßig nicht auftreten sollten und daher Sicherheitsvorkehrungen nicht oder nur wenig wirksam werden und vom Betrieb daher nicht geplant werden. Eine Planung in diesem Bereich ist aber essentiell zur Bewältigung katastrophaler Schadenslagen für die Gefahrenabwehr. Als Planungsgrundlage können bekannte aufgetretene Schadenslagen oder aber auch Berechnungen, basierend auf naturwissenschaftlichen Grundgesetzen, herangezogen werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Anwendung von Auswirkungsbetrachtungen als Grundlage für die Katastrophenschutzplanung. Hierzu werden Szenarien ausgewählt und Auswirkungsberechnungen durchgeführt, um zu zeigen, welche Bedeutung solche Ergebnisse einer Berechnung für den Katastrophenschutz haben.

2 Durchführung Auswirkungsbetrachtung

Die vorliegenden Auswirkungsbetrachtungen der Szenarien basieren auf der Methode der Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek (kurz TNO; Niederländische Organisation für angewandte Naturwissenschaften), einer Non-Profit-Organisation, die sich u.a. mit der Berechnung und Durchführung von Risikoanalysen beschäftigt. Die von der TNO herausgegebenen „Coloured Books“ geben neben Berechnungsvorschlägen auch fundierte Forschungsergebnisse von durchgeführten Studien wieder und werden auf vielen Teilen der Welt als Standard für sicherheitstechnische Studien herangezogen. Die Studien wurden in den 1990ern durch die Niederländische Regierung finanziert. [5]

Grundlage der Auswirkungsbetrachtung sind zu treffende Annahmen, die in die Berechnung einfließen. Solche müssen vor der Durchführung genau überlegt und begründet werden, da die Berechnung selbst von diesen abhängt. Änderungen dieser führen zu anderen Berechnungsergebnissen, welche das Ergebnis in Bezug auf die Realität verbessern aber auch verschlechtern können. Die gewählten Annahmen wurden nach bestem Wissen und Gewissen getroffen, liegen aber einer rein empirischen Auswahl zu Grunde.

Eine weitere Unsicherheit bei der Auswirkungsbetrachtung in Risikoanalysen stellen die sogenannten Probit-Funktionen dar. Dies sind Wahrscheinlichkeitsfunktionen, welche die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Schadens auf Grundlage des LD₅₀-wertes wiedergeben. Die Lösung der Wahrscheinlichkeitsfunktion kann an sich schon einen Fehler erzeugen. Ein weiterer systematischer Fehler bei der Verwendung dieser Probit-Funktionen ist der LD₅₀-wert. [6] Der LD₅₀-wert (letale Dosis 50) ist jene Dosis eines Stoffes, bei der 50 % einer Population bestimmter Lebewesen sterben. [7] Somit gilt dieser Grenzwert für die

getestete Tierspezies. Eine Übertragung auf den Menschen ist aber in vielen Fällen nicht ohne Bedenken durchführbar.

2.1 Auswahl der Szenarien

Ein Szenario beschreibt einen Umstand, der zu einem großen Schadensereignis (Schwerer Unfall) führen kann, welcher in vielen Fällen zu einem Versagen des Transport- oder Lagergebindes für gefährliche Stoffe führt oder zum Zustandswechsel der Substanz, kombiniert mit einem möglichen Brand, einer Explosion oder einem toxischen Gasaustritt. [8] Das European Commission's Joint Research Centre (JRC) definiert ein Szenario wie folgt:

Scenario = Top Event (Versagen von Transport- oder Lagergebinde) + Dangerous Phenomenon (Feuer, Explosion, toxischer Gasaustritt) [8]

Grundlage für die Auswahl von Szenarien bilden laut European Commission's Joint Research Centre die sechs gefährlichen Substanzen, welche in der EU verwendet werden: Flüssiggas, wasserfreies Ammoniak, Chlor, verflüssigtes Erdgas, brennbare Flüssigkeiten und verflüssigter Sauerstoff. Diese Substanzen werden in den folgenden Anlagen gelagert: Speichertanks, Rohrleitungen, Pumpen, Umladestationen, Tankwägen bzw. Eisenbahnwaggons und andere Transportarten. Die Kombination der Substanzen mit den Anlagenbereichen und den kritischen Events (Austritt / katastrophales Versagen / Bruch oder Leck) ergibt alle möglichen Szenarien, die im EU-Raum betrachtet werden sollten. [8]

Die Anwendung von Auswirkungsbetrachtungen als Grundlage für die Katastrophenschutzplanung erfolgt in dieser Arbeit an drei ausgewählten Szenarien. Als Beispiel dient eine BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), ein Tankbrand (in der Auswirkungsberechnung als Pool Fire bekannt) und eine VCE (Vapor Cloud Explosion). Durch diese Auswahl werden die Auswirkungen Wärmestrahlung und Druckwirkung behandelt. Die Auswahl dieser Szenarien ist im Folgenden beschrieben.

2.1.1 BLEVE

Propangas wird als Energiespeicher oft in Druckbehältern gelagert. Einerseits findet sich dieses Gas in Tanks in Gärten von Einfamilienhäusern wieder, welche nur durch einen Zaun vom Zutritt abgesichert werden. Andererseits werden große Mengen des Gases über den Schienenverkehr in Kesselwägen transportiert. Da dies nur den Transport darstellt, sind keine Sicherheitsmaßnahmen zu treffen, auch dann nicht, wenn der Kesselwagen auf den Schienen

für kurze Zeit abgestellt wird. Verwendet werden muss ein geeigneter Kesselwagen mit europäischer Kennzeichnung (oranger Längsstreifen, orangefarbene Tafel mit UN-Nummer [9]). Laut Seveso-Richtlinie ist der Transport aber ausgenommen, daher gibt es seitens der Betriebe keinen Bedarf diesen zu betrachten. Da Propangas aber ein brennbares Gas ist, treten Gefährdungen auf, welche im Rahmen einer Risikoanalyse für die Bevölkerung zu bewerten wären. Störfallszenarien bei der Lagerung und Transport von druckverflüssigten Gasen sind: [10]

- BLEVE
- Gaswolkenbrand
- Gaswolkenexplosion
- Freistahlbrand
- Trümmerflug

Da ein großes Schadensausmaß bei der Lagerung von druckverflüssigtem Propan von einer BLEVE ausgeht, wird dieses Szenario in der vorliegenden Arbeit behandelt. Eine BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion) erfolgt nach einer schlagartigen Freisetzung einer großen Menge an druckverflüssigtem Gas oder überhitzter Flüssigkeit nach Bersten des Behälters und einer anschließenden Entzündung. [11] [6] [12] [3]

Da vor allem die schlagartige Freisetzung und Entzündung des Gases und daher die Wärmeentwicklung relevant sind [6] [3], erfolgt die Auswirkungsbetrachtung für den entstehenden Feuerball und der damit frei werdenden Wärmestrahlung in die Umgebung.



Abbildung 1: Bild einer BLEVE [13]

2.1.2 Brand eines Lagertanks

Tanklager werden einerseits auf der Produktseite zur Lagerung der Erzeugnisse von Wirtschaftsunternehmen zur Lagerung von petrochemischen Produkten, andererseits werden diese auch zur Lagerung von Edukten verwendet. Als Beispiel kann hierzu die Lagerung von Rohöl genannt werden. Die Rohöllagerung dient den Betrieben der Sicherung ihrer Produktion bei Lieferengpässen, die Lager sind meist direkt am Betriebsgelände angesiedelt. Zur Energieversorgung Österreichs bei Versorgungsengpässen wurde 2012 das Erdölbevorratungsgesetz novelliert, welches die Haltung von Mindestvorräten, die den täglichen Durchschnittsnettoeinfuhren für 90 Tage entsprechen, vorschreibt. [14] Erreicht wird diese Vorratspflicht dadurch, dass ab 1. April jeden Jahres 25 % der im Vorjahr getätigten Importe an Erdöl, Erdölprodukten und biogenen Roh- und Kraftstoffen als Pflichtnotstandsreserven gehalten werden. [15] Hintergrund dieser Gesetzesmaterie ist der Anstieg des Ölpreises 1973 durch eine politisch motivierte Minderung der Erdölförderung, deren man durch fehlender strategischer Ölreserven nicht entgegenwirken konnte. Die Verabschiedung des Erdölbevorratungsgesetzes setzten Tanklager voraus, in welchen das Rohöl gelagert wird. Da Rohöl eine brennbare Flüssigkeit ist, treten Gefährdungen auf, welche im Rahmen einer Risikoanalyse für die Bevölkerung zu bewerten wären. Störfallszenarien bei der Lagerung von brennbaren Flüssigkeiten sind: [8]

- Tankbrand
- Verpuffung
- Gaswolkenexplosion
- Freistrahbrand
- Tankbrand mit Explosionsfolge

Da das größte Schadensausmaß bei der Lagerung von brennbaren Flüssigkeiten von einem Brand des Lagerbehälters ausgeht, wird dieses Szenario im Folgenden behandelt.



Abbildung 2: Bild von Tankbrand in Buncefield 2005 [16]

2.1.3 Gaswolkenexplosion (VCE)

Propangas als Energiespeicher wird neben dem Schienentransport auch in Druckbehältern durch LKW auf der Straße transportiert. Als Straßentransport unterliegt die Verlegung von Propangas der ADR-Richtlinie, dem Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße. Zur Kennzeichnung der Gefahrgutbeförderung dient nach dieser Richtlinie eine orangefarbene rechteckige Tafel („Gefahrentafel“), welche an der Vorder- und Rückseite des Straßenfahrzeuges angebracht wird und den Gefahrguttransport kennzeichnet. Zum Teil tragen diese Tafeln zwei übereinanderstehende Nummerncodes. Falls diese nicht vorhanden sind, sind zusätzlich zu den orangen Gefahrentafeln seitlich Tafeln mit diesen Nummern angebracht. Die obere Zahl ist die sogenannte „Kemler“-Zahl, welche über die Art der Gefahr informiert. Die untere Zahl ist die UN-Nummer, welche den Stoff mit einer vierstelligen Zahlenkombination bezeichnet. [17]

Bei Propangas, welches ein brennbares Gas ist, treten Gefährdungen auf, welche im Rahmen einer Risikoanalyse zu bewerten wären. Störfallszenarien bei der Lagerung von druckverflüssigten Gasen sind: [10]

- BLEVE
- Gaswolkenbrand
- Gaswolkenexplosion
- Freistahlbrand
- Trümmerflug

Ein Ausströmen des druckverflüssigten Gases kann eine entzündliche Gas/Luft-Wolke erzeugen, welche bei Vorhandensein einer geeigneten Zündquelle diese zündet und eine VCE (Vapour Cloud Explosion) hervorrufen kann.

Die Explosionswirkung einer VCE hat Auswirkungen auf Mensch, Tier und Umwelt, folge dessen wird in der vorliegenden Arbeit das Szenario VCE eines Propangas-LKWs berechnet und eine Auswirkungsbetrachtung als Folge der Druckwirkung durchgeführt.



Abbildung 3: Flixborough 1974 [18]

3 Szenario BLEVE

Die vorliegende Berechnung einer Auswirkungsbetrachtung am Beispiel BLEVE eines Propangas-Kesselwaggons basiert auf der TNO-Methode, beschrieben in den „Coloured Books“. Auf Grundlage der berechneten Dimension des entstehenden Feuerballs wurde die Wärmestrahlung abgeschätzt, um somit den Schaden, der aufgrund dieser Strahlungswärme auftritt zu quantifizieren. Bei dem angenommenen Szenario handelt es sich um einen normgerechten Kesselwaggon zum Transport von druckverflüssigten Gasen im Schienenverkehr in der Europäischen Union. Es handelt sich um einen vierachsigen Eisenbahnwagen mit einem Volumen von 54 m³ und einem Füllgrad von 85% (maximal zulässiger Füllgrad). Für Eisenbahnkesselwagen ist zu berücksichtigen, dass diese Behälter kein Sicherheitsventil besitzen [19].

Um eine Berechnung durchführen zu können, müssen Annahmen wie Wetter udg. getroffen werden. Die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zur Berechnung einer BLEVE eines Eisenbahnkesselwaggons sind in Tabelle 1 ersichtlich.

Tabelle 1: Annahmen BLEVE

Wetter	Zum Zeitpunkt des Behälterberstens herrscht schönes Wetter bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 45%.
Umgebungsbedingungen	Für die Berechnung wurde ein Luftdruck von 1250 hPa bei einer Temperatur von 25 °C angenommen.

Kesselwaggon	Bei dem Kesselwagen handelt es sich um einen vierachsigen Wagen mit einem Eigengewicht von 25 Tonnen und einer Gesamtlänge über den Puffern von 13,5 m. Das Volumen beträgt 54 m ³ , der maximale Füllgrad liegt bei 85 %. Als Material wird Feinkornbaustahl P460 NL1, bei einem Berechnungsdruck von 22 bar, verwendet.
Produkt	Propangas ist ein hochentzündliches, geruchloses Gas, welches als Energiequelle verflüssigt gelagert wird. Es gehört zur Gruppe der Kohlenwasserstoffe und hat eine Kettenlänge von 3 C-Atomen.
Behälterbersten schon nach kurzer Zeit	Behälter berstet schon nach kurzer Zeit, das bedeutet, dass sich noch genug Inhalt im Behälter befindet, um zu zünden. Begründet kann diese Annahme durch Versuche der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) werden, welche 1999 auf ihrem Versuchsgelände in Horstwalde einen Kesselwagen mit 5 Tonnen Propan durch Unterfeuerung schon nach 15 Minuten zum Bersten und zur anschließenden Zündung brachte. (vgl. hierzu [20])
Freies Feld, keine Bebauung	Es gibt keine Bebauung, d.h. man kann nicht flüchten und es gibt keinen Gebäudeschutz. Die Wärmeeinwirkung entspricht daher der vollen Wirkzeit des Feuerballs.
Bevölkerungsdichte	Als Bevölkerungsdichte wurde eine durchschnittliche Stadt angenommen, mit 2.200 EW/km ² (vergleichbar mit Graz, Verona, Mannheim, Ludwigshafen oder Gijón). Die Verteilung ist gleichmäßig über die gesamte Fläche.

Mensch	Als Betroffener wird ein Mann mit 70 kg und einem Alter von 35 Jahren angenommen. Er trägt eine lange Hose, ein T-Shirt und Schuhe. Die Kleidung zündet nicht. Das ergibt ein Verbrennungsareal von 20 % Körperoberfläche: [21]
	Kopf 7 %
	Nacken 2 %
	Unterarme 2 * 3 %
	Hände 2 * 2,5 %
Keine Folgeschädenbetrachtung	In der Berechnung werden keine Folgeschäden betrachtet.

Die Berechnung der Wärmeentwicklung erfolgte in zwei Schritten. Zu Beginn wurde der entstehende Feuerball berechnet, um daraus in einem zweiten Schritt die Wärmestrahlung und somit den Schaden, der auf Grund der Strahlung auftritt zu quantifizieren. Die Rechenschritte sind den TNO Büchern (Yellow Book, vgl. [11]) zu entnehmen und werden hier nicht genauer beschrieben. In Abbildung 4 ist schematisch das Berechnungsmodell Feuerball ersichtlich.

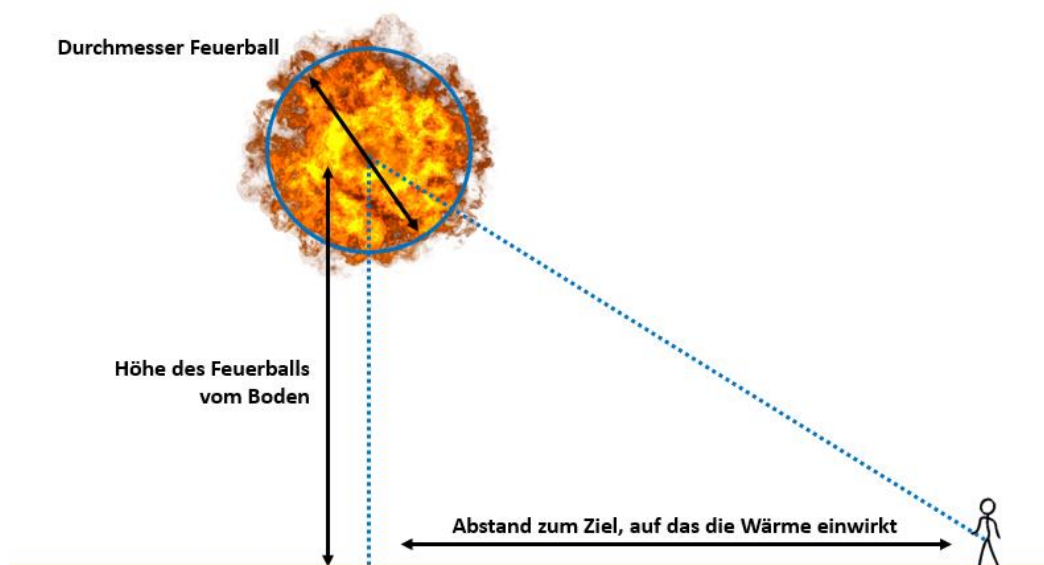


Abbildung 4: Berechnungsmodell BLEVE

Die Ergebnisse sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Ergebnisse Berechnung BLEVE Propankesselwaggon

Ergebnisse BLEVE Propangaskesselwaggon	
Masse brennbares Material	26.622 kg
Radius Feuerball	89 m
Zeitdauer des Feuerballs	12 sec
Höhe des Feuerballs	178 m

3.1 Auswirkungsbetrachtung BLEVE

Für das Szenario BLEVE sind nach dem Österreichischen Bundesländer-Arbeitskreis Seveso die beiden Auswirkungen Druckwelle und Wärmestrahlung zu betrachten. [19] In der vorliegenden Arbeit basiert die Schadensauswirkung aber rein auf der Wärmeentwicklung, da bei diesem Szenario die größten Schäden an Lebewesen auf Grund der Wärmestrahlung auftreten. Die Auswirkungsberechnung erfolgte nach dem Green Book der TNO (vgl. [21]). Abbildung 5 zeigt die Wärmestrahlung in Abhängigkeit vom Abstand zum Kesselwagen.

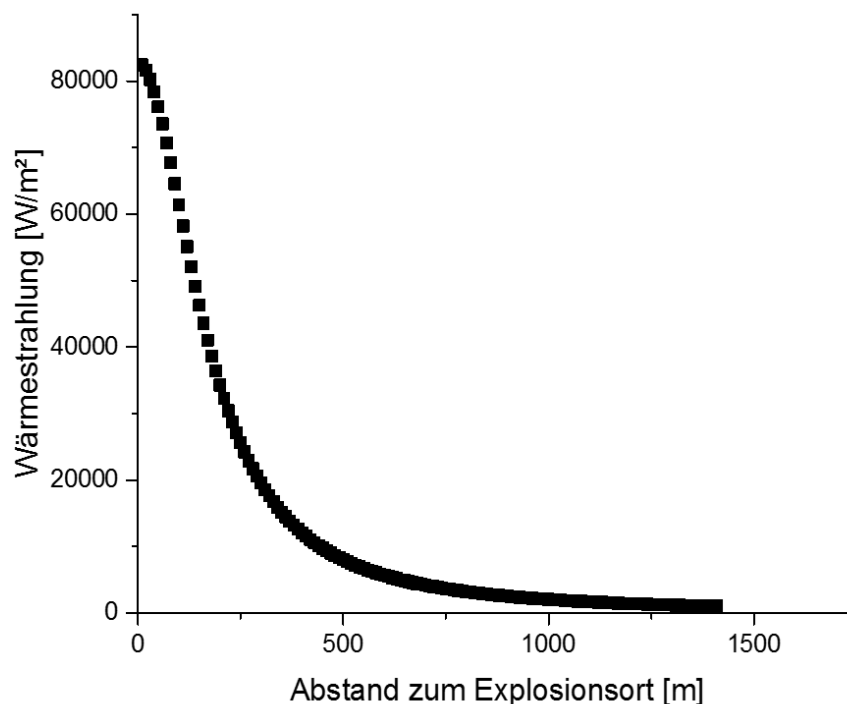


Abbildung 5: Errechnete Wärmestrahlung in Abhängigkeit zum Explosionsort

Um einen Schaden zu bewerten, gibt es neben den Grenzwerten, basierend auf der Wärmestromdichte, auch sogenannte Probit („probability unit“)-Beziehungen, welche angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Folge (z.Bsp. Tod aufgrund Verbrennung) zu erwarten ist. Probitfunktionen sind so formuliert, dass sie den Wert $Y = 5$ für eine Schadenswahrscheinlichkeit von 0,5 annehmen. Dies entspricht der letalen Dosis 50, LD_{50} , bei der 50 % der Betroffenen versterben [6]. Das bedeutet nun, dass die Ergebnisse der Auswirkungsbetrachtung die Wahrscheinlichkeit, dass 50 % der Bevölkerung im betrachteten Areal betroffen sind, wiedergeben.

Die Schadenswahrscheinlichkeit (P) ergibt sich dabei aus [6]:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \Phi(Y - 5)$$

In der Wahrscheinlichkeitsgleichung ist Φ die Standardnormalverteilung.

Mit steigender Intensität des schadensverursachenden Faktors (zum Beispiel Wärme) wächst die Wahrscheinlichkeit des Schadens (zum Beispiel Tod durch Verbrennung), daher gibt die Verwendung einer Probitfunktion im Vergleich zum Grenzwert eines Stoffes den größeren Realismus wieder. Um Erkenntnisse aus Bereichen wie Medizin und Toxikologie in Ingenieurtechnischen Berechnungen einfließen zu lassen, ist die Verwendung solcher Probitbeziehungen der geeignetere Weg [6].

Für die Auswirkungsbetrachtung wurden drei Probitbeziehungen ausgewählt: Die Funktion für „Fatal Injury“ aufgrund der Wärmestrahlung („Tod durch Verbrennung“), die Funktion für den Schaden „Verbrennung zweiten Grades“ und die Probitfunktion für den Schaden „Verbrennung ersten Grades“. Bei den Probitbeziehungen ist zu beachten, dass diese immer nur eine Ja/Nein-Aussage geben. Das bedeutet, dass die Funktion „Tod durch Verbrennung“ nicht angibt wie viele Betroffene von den Überlebenden an Verbrennungen zweiten Grades usw. leiden. Des Weiteren ist zu beachten, dass Probitbeziehungen nicht unterscheiden, ob ein Betroffener schon am größeren Schaden leidet, d.h. dass ein Toter durch Verbrennung auch eine Verbrennung ersten Grades rechnerisch erleiden kann. [21] Die verwendeten Probitfunktionen lauten:

Tod durch Verbrennung: [21]

$$Probit = -36,38 + 2,56 * \ln(t * q^{\frac{4}{3}})$$

Verbrennung zweiten Grades: [21]

$$Probit = -43,14 + 3,0186 * \ln(t * q^{\frac{4}{3}})$$

Verbrennung ersten Grades: [21]

$$Probit = -39,83 + 3,0186 * \ln(t * q^{\frac{4}{3}})$$

Weiters wurde ein Abminderungsfaktor in die Berechnung miteinbezogen, der den Gesundheitszustand der Bevölkerung widerspiegelt. Laut Untersuchungen der TNO versterben bei einer Verbrennungsausdehnung von 20 % Körperoberfläche bei einer Altersverteilung wie der der niederländischen Bevölkerung 14 % der Betroffenen, der restliche Teil kann aufgrund seiner Gesundheit bei Behandlungsmaßnahmen überleben. [21] In Abbildung 6 ist die Altersverteilung der niederländischen Bevölkerung im Jahr 1985 ersichtlich, hierzu im Vergleich in Abbildung 7 die Altersverteilung von Österreich im Jahr 2017, welche nicht mehr als deckungsgleich angesehen werden kann. Die Verlagerung zu mehr älteren Menschen in der Bevölkerung muss bei der Interpretation der Berechnungsergebnisse beachtet werden, da sich durch den tendenziell schlechteren Gesundheitszustand bei höherem Altersschnitt auch die Anzahl der Betroffenen erhöht bzw. Wahrscheinlichkeit der Überlebenschance verschlechtert.

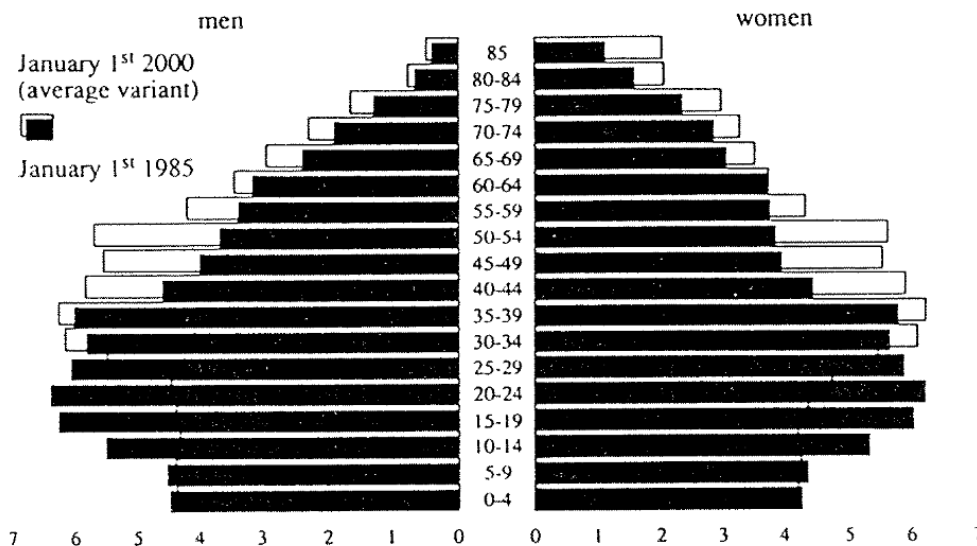
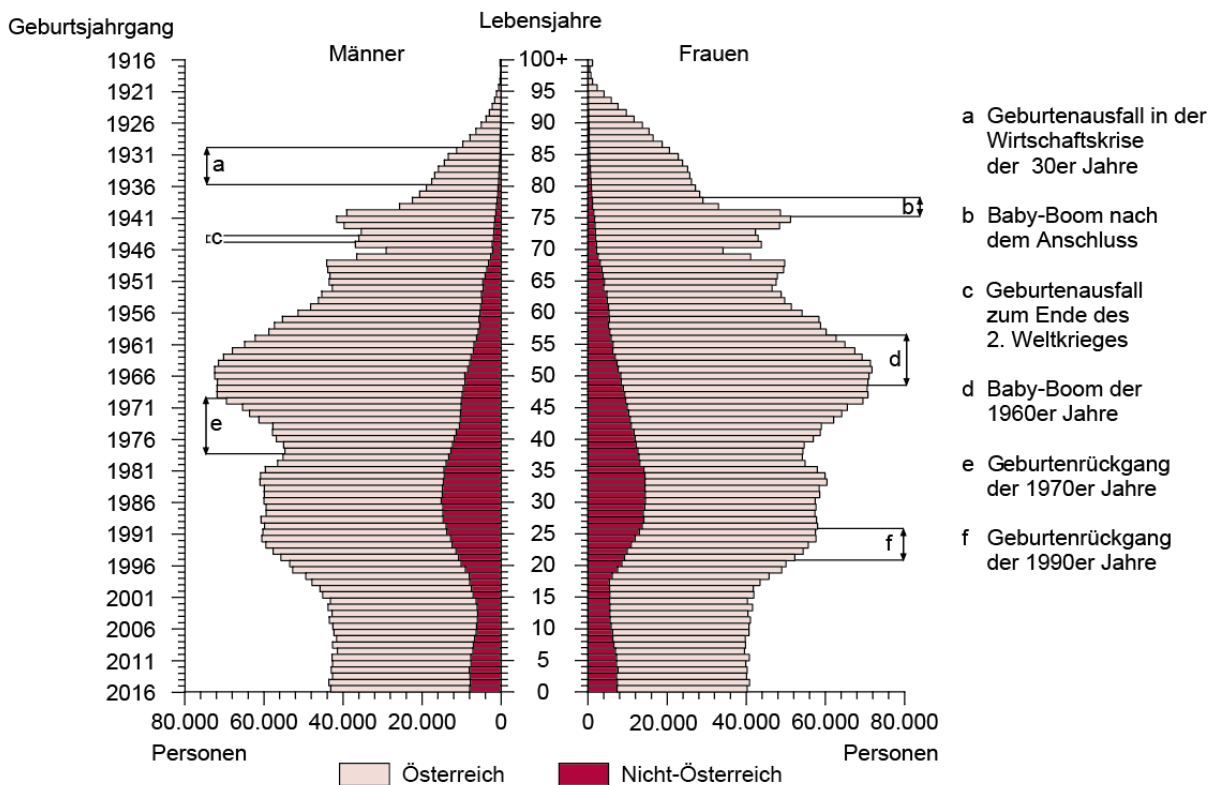


Abbildung 6: Altersverteilung der niederländischen Bevölkerung (1985) [21]

Bevölkerungspyramide am 1.1.2017 nach Staatsangehörigkeit Österreich



Q: STATISTIK AUSTRIA, Statistik des Bevölkerungsstandes. Erstellt am 23.05.2017.

Abbildung 7: Altersverteilung der österreichischen Bevölkerung 2017 [22]

Das Schadensausmaß basierend auf der Auswirkungsbetrachtung ist Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Schadensausmaß BLEVE Propankesselwaggon

Schadensausmaß BLEVE Kesselwaggon	
Radius Wahrnehmung der Wärmestrahlung ¹	1.410 m vom Kesselwaggon entfernt
Anzahl Tote ²	54
Anzahl Verbrennung zweiten Grades ²	65
Anzahl Verbrennung ersten Grades ²	177

Die Wahrscheinlichkeit des Schadensausmaßes in Abhängigkeit des Abstandes zum Schadensort ist in Abbildung 8 ersichtlich. Die schwarzen Zahlen geben den Abstand in Meter zum Schadensort wieder. In Rot ist die Wahrscheinlichkeit für Tod durch Verbrennung angegeben, in Violett die Wahrscheinlichkeit für Verbrennung zweiten Grades und in Gelb die Wahrscheinlichkeit für Verbrennung ersten Grades.

¹ Der höchste Wärmestrom, den die Haut über einen langen Zeitraum absorbieren kann, ohne geschädigt zu werden, ist laut TNO 1 kW/m².

² Diese (Minimal-)Anzahl tritt sicher auf, da sie dem LD₅₀ entspricht, d.h. 50 % der Bevölkerung sind betroffen. Eine höhere Anzahl kann aber auftreten.

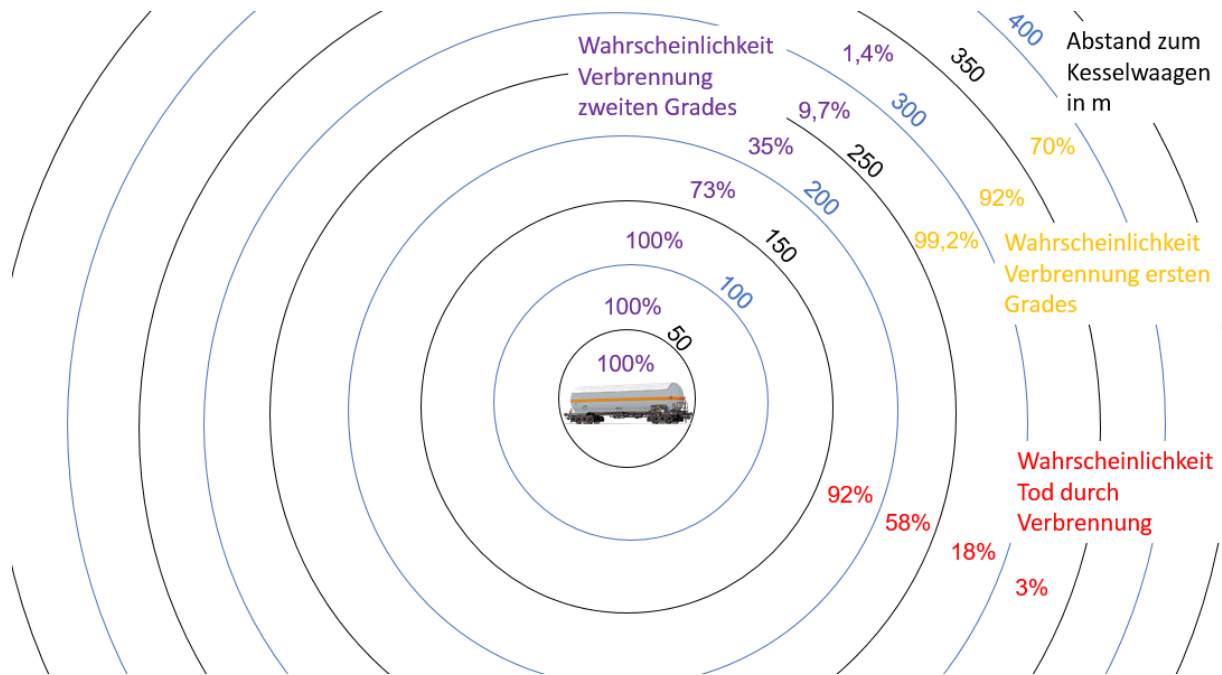


Abbildung 8: Schadenswahrscheinlichkeit BLEVE

Aus der Abbildung der Schadenswahrscheinlichkeit ist ersichtlich, dass die Wahrscheinlichkeit, dass 50% der Bevölkerung am Tod durch Verbrennung im Abstand von 150 m sterben, 100 % ist. Im Abstand von 250 m ist die Wahrscheinlichkeit dass 50 % der Bevölkerung sterben 35 %, an Verbrennung zweiten Grades leiden mit einer Wahrscheinlichkeit von 58 % fünfzig Prozent der Bevölkerung.

Maßgebend sind die Energiemenge, die durch die BLEVE freigesetzt wird, und der Abstand, in dem sich die Bevölkerung zum Explosionsort aufhält. Werden ein Eisenbahnkesselwagen und ein Propangas-Haustank (Volumen: 6,4 m³) gegenüber gestellt (Abbildung 9), ist die Verringerung des Sicherheitsabstandes klar erkennbar. Beim Kesselwagen sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass 50 % der Betroffenen durch Verbrennung sterben erst ab 200 m, während beim Haustank ein Sinken schon nach 10 Metern auftritt.

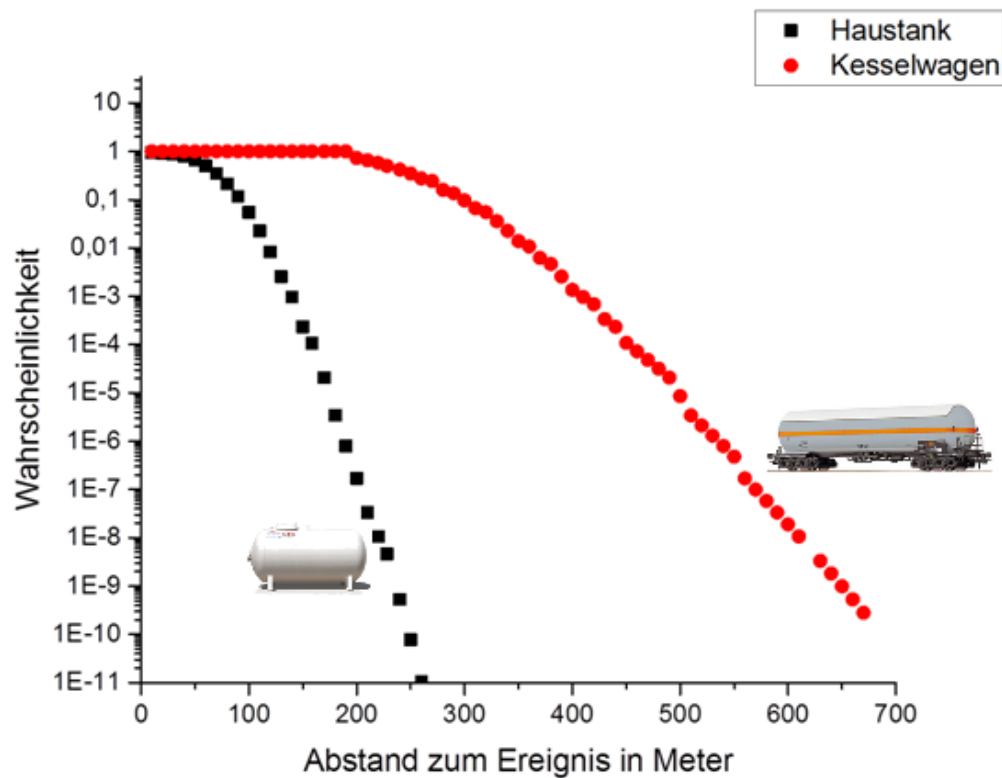


Abbildung 9: Schadenswahrscheinlichkeit Tod durch Verbrennung

Auswirkungsbetrachtung für die medizinische Gefahrenabwehr

Wärmestrahlung ruft Verbrennungen der Haut sowie Schmerzen durch die Zerstörung der Epidermis hervor. Intensität der Strahlungseinwirkung und Dauer bestimmen dabei den Grad der Verbrennung. Durch den Grad der erlittenen Verbrennung und durch die betroffene Fläche der Hautoberfläche ist die Überlebenswahrscheinlichkeit der/des Betroffenen gegeben. Eine Einteilung der Verbrennungen erfolgt in vier Stufen, abhängig von der Tiefe der Verbrennung. Verbrennungen ersten Grades sind rein epidermale Schädigungen, Verbrennungen zweiten Grades werden in oberflächlich dermale (II a) und tief dermale (II b) Hautschäden unterteilt [23]. Verbrennungen dritten Grades reichen bis in die Subkutis, bei Verbrennungen vierten Grades sind Muskeln, Sehnen und Knochen beteiligt [23]. Einen Überblick über die Einteilung der Verbrennungsgrade liefert Tabelle 4.

Tabelle 4: Einteilung Verbrennungsgrade [23]

Verbrennungs- grad	Schädigungs- tiefe	Klinisches Bild	Therapie	Heilung
I	Rein epidermal	Rötung, Juckreiz, brennender Schmerz	Konservativ	Ohne Narben- bildung
II a	Oberflächlich dermal	Blasen, extremer Schmerz, wegdrückbares Erythem	Konservativ	Ohne Narben- bildung
II b	Tief dermal	Blasen, extremer Schmerz, nicht wegdrückbares Erythem, weiße Areale	Operativ	Mit Narben- bildung
III	Bis in die Subkutis reichend	Schmerzlos, avaskulärer weiß- bräunlicher Wundgrund, Lösen der Haare	Operativ	Mit Narben- bildung
IV	Beteiligung von Muskeln, Sehnen, Knochen	Verkohlung	Operativ	Defektheilung

Durch große verbrannte Hautareale steigen der Flüssigkeitsverlust und die Infektionsgefahr durch das Fehlen der Schutzschicht der Haut. Die Überlebenschance eines gesunden Erwachsenen ist bis zu einer Verbrennung der Hautoberfläche von 20 % sehr hoch, sogar bei Verbrennungen zweiten und dritten Grades. Bei einer betroffenen Hautoberfläche von mehr als 50% geht die Überlebenschance, auch bei guter medizinischer Versorgung, gegen Null. [21]

Druckverflüssigtes Propangas als Energiequelle ist nicht mehr wegzudenken. Daher besteht im Falle einer BLEVE die große Herausforderung in der Planung der Hilfeleistung. Wenn bekannt ist wie viele Personen betroffen sein könnten, kann die Überlebenschance der Verletzten durch eine schnelle und gezielte Versorgung gesteigert werden. Medizinisches Material (sogenannte „Burn Sets“, bestehend aus Verbandsmaterial, Venenkatheter, Ringerlösung, Schmerzmittel, metallisch bedampfte Decke, udg.) ist neben Notarzt, Notfallsanitäter, Transportmöglichkeit und der klinischen Versorgung unabkömmlich [24]. Auch sollte man sich Gedanken machen, wie weit eine Verbrennungsambulanz von möglichen Schadensorten entfernt sein kann. Der Transport in die versorgende Klinik sollte nicht länger als 45 Minuten dauern [23]. Angepasste Transportkapazitäten im Bereich von Umschlagplätzen von druckverflüssigten Gasen und der Gleichen sollten daher in der Planung Beachtung finden. Zur systematischen klinischen Untersuchung des Rettungsteams gehört die Einschätzung des Verbrennungsausmaßes mit Beurteilung der verbrannten Körperoberfläche und der Verbrennungstiefe [23]. Auch sollten Begleitverletzungen erkannt werden. Ein Volumenmangelschock ist bei Erwachsenen ab einer verbrannten Körperoberfläche von ca. 15 % und bei Kindern ab 10 % zu erwarten, daher ist eine frühzeitige Infusionstherapie zur Aufrechterhaltung der Organfunktionen prognoseentscheidend [23]. Der bei Verbrennungen auftretende Flüssigkeitsverlust ist in den ersten 24 Stunden am stärksten, daher ist die Zufuhr von Flüssigkeit sehr wichtig für den Heilungserfolg. Die Infusionsmenge wird nach der modifizierten Parkland-Baxter-Formel bestimmt (vgl. hierzu [23]) und hängt vom Körperbau der/des Betroffenen ab.

Am Schadensort selbst werden die Brandwunden mit Verbandmaterial abgedeckt, ein Wärmeschutz am Patienten angebracht und dieser anschließend auf möglichst direktem Weg in ein Brandverletzentrum transportiert [25]. Dies wäre der optimale Versorgungsweg. Bei einer BLEVE eines Kesselwagens, wie beim berechneten Beispiel, mit 65 Brandverletzten (Verbrennung zweiten Grades) kann aber die Bettenkapazität schnell erreicht sein. Hier gilt es in der Planung anzusetzen und die Kapazitäten in der Nähe von Umschlagplätzen von druckverflüssigten Gasen und der Gleichen zu erhöhen. Für das Berechnungsbeispiel einer BLEVE eines Propangaskesselwagens in einer Stadt mit 2.200 EW/m² würde dies bedeuten, dass Kapazitäten für 240 (Brand-)Verletzte vorhanden sein sollten.

Nicht alle Verletzten müssen in ein Zentrum für Brandverletzte transportiert werden, da bei Verbrennungen geringen Ausmaßes eine medizinische Versorgung, wie sie in jedem Krankenhaus zur Verfügung steht, ausreicht. Dennoch muss beachtet werden, dass bei einer BLEVE auch Verletzte anfallen können, welche unbedingt zur erfolgreichen Behandlung in ein Schwerverbranntenzentrum transportiert werden müssen. Ist Österreich gibt es gegenwärtig

(2016) ein Zentrum in Wien und eines in Graz. Der Transport in die versorgende Klinik sollte nicht länger als 45 Minuten dauern [23]. Die Kriterien zur Verlegung in eines dieser Schwerverbranntenzentren sind: [26]

- Drittgradige Verbrennung über 10 % der Körperoberfläche
- Zweitgradige Verbrennung über 25 % der Körperoberfläche
- Inhalationstrauma
- Verbrennungen im Gesicht, an Händen, Füßen und Genitalien
- Kombination mit mechanischen Verletzungen, Polytrauma

Die Schockphase bei Verbrennungen dauert zwei bis drei Tage [25], in welcher bei einem Großschadensfall alle Patienten versorgt werden müssen. Auch diese Menge an Versorgungsressourcen sollte vorrätig sein. Beispielhaft ist im Folgenden der Infusionsbedarf für 100 Verbrennungspatienten berechnet:

Tabelle 5: Infusionsbedarf 100 Patienten [25]

Körpergewicht Patienten: 70 bis 75 kg	
30% verbrannte Körperoberfläche	
Therapie: Initialer Infusionsbedarf: 4 ml pro kg Körpergewicht pro % der verbrannten Körperoberfläche	
Bedarf 1. Tag:	8.000 ml Vollelektrolytlösung inkl. 1/3 Volumenersatz (Kolloide)
Bedarf 2. Tag:	4.000 ml Vollelektrolytlösung, 500 ml Zuckerlösung, 2.000 ml Aminosäurelösung
Bedarf 3.Tag:	2.000 ml Vollelektrolytlösung, 500 ml Zuckerlösung, 2.000 ml Aminosäurelösung

Zur Versorgung von 100 Patienten werden demnach 1.400 Liter Vollelektrolytlösung, 200 Liter kolloidale Lösung, 100 Liter Zuckerlösung und 400 Liter Aminosäurelösung benötigt. Somit müssen zur Versorgung von 100 Patienten über drei Tage mindestens 2.400 Flaschen Infusionslösungen zur Verfügung gestellt werden [25]. Neueren Studien zu Folge wird von geringeren Volumenmengen ausgegangen (vgl. hierzu [27] [28]). Die Heilungszeit für eine zweitgradige Verbrennung wird mit 14 bis 21 Tagen angegeben, die einer drittgradigen Verbrennung mit 21 Tagen [24]. Neben den spezifischen Arzneimitteln für

Verbrennungspatienten, muss weiteres pharmazeutisches Material zur Verfügung stehen. In Tabelle 6 ist eine beispielhafte Notbevorratung für 100 Verletzte zur Behandlung von Verbrennungen angeführt.

Tabelle 6: Notfallbevorratung für 100 Verbrennungspatienten [29]

Wirkstoff	Arzneimittel	Arzneiform	Gehalt	Inhalt	Menge
Esketamin-HCl	Ketanest® S	Ampulle	5 mg/ml	5 ml	200
Vollelektrolyte	Ringer-Lactat-Lsg.	Infus.-Lsg.		1.000 ml	340
HSE 200.000	HAES-steril® 6 %	Infus.-Lsg.	6 %	500 ml	80
Diazepam	Valium® u.a.	Ampulle	10 mg	2 ml	100
Diazepam	Valium® u.a.	Tablette	10 mg		200
Polyvidon-Jod	Braunol 2000	Lsg.		250 ml	25
Polyvidon-Jod	Braunovidon	Salbengabe		100 x 20 cm	250
Medizinprodukte				Größe	Menge
Infusionsgeräte					250
Einmalspritzen				5 ml	500
Einmalkanülen				Gr. 1	500
Einmalkanülen				Gr. 2	200
Venenverweilkanülen				Gr. 1	100
Kanülenplaster					250
Metalline Kompressen				10 x 12 cm	500
Metallines Tuch				73 x 250 cm	100
Einmalhandschuhe				klein	200
				mittel	600
				groß	200

Nicht mit eingerechnet wurde in dieser Auswirkungsbetrachtung die Möglichkeit einer Evakuierung. „Das Schadensausmaß von BLEVE hängt in hohem Maße von der Vorwarnzeit ab. Da die überwiegende Zahl der Behälterbersten durch (längerdauernde) Hitzeeinwirkung verursacht wird, ist eine effektive Evakuierung möglich“ [10].

Um die Effektivität von Evakuierungen aufzeigen zu können wurden Realfälle mit und ohne Evakuierung aufgearbeitet und miteinander verglichen. Das Raffinerie-Unglück 1966 in Feyzin (Frankreich), der Bahnunfall 1970 in Crescent City (Illinois, USA), das Tankfahrzeugunglück von Nijmegen 1978 (Niederlande) und das Eisenbahnunglück 2004 in Nishapur (Iran) wurden hierzu gegenübergestellt. Eine Zusammenfassung der Auswirkungen (ohne Sachschäden) ist in Tabelle 7 ersichtlich. Eine ausführlichere Beschreibung der Fälle ist im Anhang zu finden.

Tabelle 7: Zusammenfassung Realfälle

Ort	Betroffener Behälter	Anzahl der Personen im Gebiet	Tote	Verletzte
Feyzin, FRA	Propan-Kugelbehälter, 693 m ³ ³	158 ³	18 ³	84 ³
Crescent City, USA	9 Kesselwägen mit Propangas, je 128 m ³ ⁴	597 Bewohner ⁴ , 234 Einsatzkräfte ⁴	keine ⁴	66 ⁴
Nijmegen, NLD	LPG-Tankwagen, 31,7 m ³ ⁵	unbekannt	keine ⁵	keine ⁵
Nishapur, IRN	Mehrere LPG-Kesselwagen ⁶	unbekannt	320 ⁶	460 ⁶

Anhand der Realfälle können verschiedene Reaktionen der Gefahrenabwehr analysiert und auf deren Wirksamkeit überprüft werden. Wie das Unglück von Feyzin zeigte, führt das Nicht-Erkennen der Gefahr einer BLEVE bei einem unterfeuerten Behälter zu Toten und Verletzten. Bei dem Unglück von Nishapur wurde die Anzahl der Toten sogar erhöht, da neben der mit Löscharbeiten beschäftigten Feuerwehr Schaulustige an den Unglücksort kamen und so durch die entstehende BLEVE getötet wurden. Diese beiden Fallbeispiele zeigen eine mögliche Reaktion der Gefahrenabwehr. Andere Beispiele aus der Geschichte wiederum geben Handlungsanweisungen, um den Schaden so gering wie möglich zu halten (vgl. Crescent City

³ Quelle: [30] [31] [32]

⁴ Quelle: [31] [33] [34] [35]

⁵ Quelle: [31] [36]

⁶ Quelle: [37] [38]

1970, Nijmegen 1978). In Crescent City waren zu Beginn der Unterfeuerung der LPG-Waggone im Wirkungsradius 597 Personen, welche durch eine rasche Evakuierung nicht zu Schaden gekommen sind. Das Feuer führte in diesem Fall zu sieben BLEVEs, welche zu 66 Verletzten führten, aber kein Toter zu beklagen war. Bei dem Tankfahrzeugunglück von Nijmegen entstand durch die richtige Reaktion des Tankwartes und der Feuerwehr nur Sachschaden. Die Gefahrenabwehr entschied sich hierbei erst nach der BLEVE aus der Deckung heraus mit den Löscharbeiten zu beginnen, da der Startzeitpunkt der Unterfeuerung und der Zustand des Tanks unbekannt waren. Wie sich herausstellen sollte, die richtige Vorgehensweise.

4 Szenario Tankbrand

Die vorliegende Berechnung einer Auswirkungsbetrachtung am Beispiel Tankbrand eines Rohöltanks (pool fire of a confined pool on land) basiert auf der TNO-Methode, beschrieben in den „Coloured Books“. Auf Grundlage der berechneten Dimension des Feuers wurde die Strahlungswärme abgeschätzt. Bei dem angenommenen Szenario handelt es sich um einen vollflächigen Brand eines Öltanks mit dem Produkt Rohöl. Ein vollflächiger Brand inkludiert das Absinken oder Brechen des Schwimmdachs, wodurch die gesamte Oberfläche des Tanks freigegeben wird und zu brennen beginnen kann. Die maximale Wärmestrahlung wird durch diese Annahme frei. Die Höhe des Tanks ist mit 20 m und ein Durchmesser von 70 m angenommen. Die Stärke des Tankmantels wurde nach dem American Petroleum Institute Standard 650 angenommen.

Um eine Berechnung durchführen zu können, müssen Annahmen wie Wetter udg. getroffen werden. Die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zur Berechnung „vollflächiger Brand eines Rohöllagertanks“ sind in Tabelle 8 ersichtlich.

Tabelle 8: Annahmen Pool Fire

Wetter	Zum Zeitpunkt des Brandes herrscht schönes Wetter bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C, einer relativen Luftfeuchte von 50 % und einer Windgeschwindigkeit von 1 m/s.
Umgebungsbedingungen	Die Berechnung wurde bei einer Seehöhe von 355 m durchgeführt. Der Luftdruck wurde daher bei einer Temperatur von 25 °C mit 1012,1 hPa angenommen.
Tank	Öltank mit einem Durchmesser von 70 m und einer Höhe von 20 m.
Material Tank	Öltank nach dem API-Standard 650 aus Kohlenstoffstahl mit einer niedrigen bis mittleren Zugfestigkeit. Der Tank ist aus einzelnen Kreisbögen gefertigt, welche eine maximale Stärke von 3,8 cm am Grund und eine minimale Dicke von 4,7 mm am oberen Tankende aufweisen. [39] Bei der Berechnung des Brandes wurde angenommen dass das Schwimmdach durch den Brand sofort nach Entzündung kippt und untergeht.
Produkt	Rohöl der Sorte Brent. Dieses Rohöl ist für Europa die wichtigste Rohölsorte, welche in der Nordsee gefördert wird und eine Mischung der Felder Brent und Ninian darstellt. Es handelt sich um ein leichtes Öl mit einem geringen Schwefelanteil und gilt daher als qualitativ hochwertig. [40]

Abbrandrate

Empirisch ermittelte Abbrandraten sind in der Literatur nur schwer zu finden bzw. sind wenige Daten vorhanden. Die Abbrandrate von flüssigen Pool Fires wird durch die Wärmestrahlung von der Diffusionsflamme zur flüssigen Brennstoffoberfläche kontrolliert [41]. Für die Berechnung wurde eine Abbrandrate von $0,045 \text{ kg/m}^2\text{s}$ bei einer Dichte von $0,84 \text{ g/cm}^3$ [42] verwendet. Für große Pool Fire kann die Wärmeleitung vernachlässigt und die Konvektion als konstant angenommen werden. Die Wärmestrahlung stellt den dominanten Wärmefluss dar und wird bei Pool Fire mit großem Durchmesser konstant. Als Folge wird auch die Abbrandrate immer konstanter, je größer das Pool Fire wird. [43, 44]

Flammenform

Der Brand wird mittels „solid flame radiation model“ (Zylindermodell) berechnet, welches vor allem bei großen Pool Fires zur Anwendung kommt. Bei großen Bränden von flüssigen Kohlenwasserstoffen konnte festgestellt werden, dass bei einem Kohlenstoff zu Wasserstoff Verhältnis größer 0,3 eine dicke Rauchschiicht entsteht, welche die thermische Radiation verringert. Leuchtende Zonen zeigen durch die turbulente Vermischung eine erhöhte Strahlung. Beobachtungen der NASA und des Naval Weapons Center zeigten, dass diese leuchtenden Zonen zirka 20 % der Flammenoberfläche ausmachen. Hagglund stellte bei Untersuchungen fest, dass die Strahlungsenergie dieser schwarzen Rauchschiicht zirka 20 kW/m^2 beträgt und die

Flammentemperatur zirka 800 K. [45]
Bekannt ist dies bei der sogenannten
Ballenbildung bei Ölbränden.

Keine Folgeschädenbetrachtung

In der Berechnung werden keine
Folgeschäden betrachtet.

Die Berechnung der Wärmeentwicklung erfolgte in zwei Schritten. Zu Beginn wurde das entstehende Feuer und die Flammenausbildung berechnet, um daraus in einem zweiten Schritt die Wärmestrahlung und somit den Schaden, der auf Grund der Strahlung auftritt, zu quantifizieren. Die Rechenschritte sind den TNO Büchern (Yellow Book, vgl. [11]) zu entnehmen und werden hier nicht genauer beschrieben. In Abbildung 10 ist schematisch das solid flame radiation model ersichtlich.

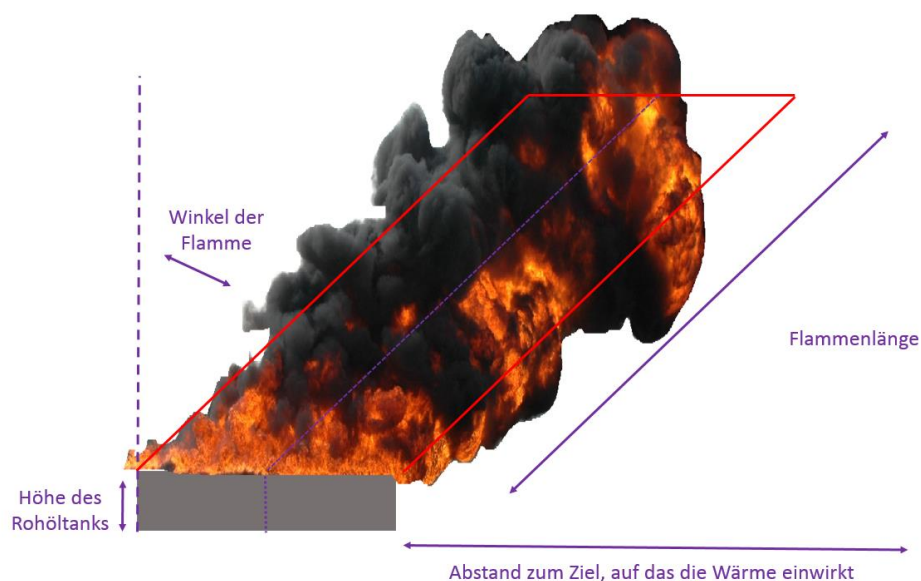


Abbildung 10: Berechnungsmodell Pool Fire

Die Ergebnisse der Brandberechnung sind Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Ergebnisse Berechnung Pool Fire Rohöltank

Ergebnis Pool Fire Rohöltank	
Flammenlänge	63 m
Winkel der Flamme zum Lot	20 Grad
Emission der Flammenoberfläche (SEP)	52 kW/m ²
Dauer des Feuers bis das gesamte Produkt verbrannt ist	4,5 Tage

4.1 Berechnung Strahlungswärme

Eine Auswirkungsbetrachtung beim Szenario Pool Fire basiert auf einer Betrachtung der freigesetzten Wärmestrahlung, da bei diesem Szenario die größten Schäden auf Grund der Wärmeenergieerzeugung auftreten. Die Wärmestrahlung bei Tankbränden mit Kohlenwasserstoffen wird von vielen Parametern beeinflusst, unter anderem von der Zusammensetzung der Kohlenwasserstoffe (im spezifischen Berechnungsfall des Rohöls), der Größe und Form des Brandes, die Dauer des Brandes und damit die Zeit des Einwirkens sowie die Distanz zum Objekt, auf welches die Strahlung einwirkt, und die charakteristischen Eigenschaften des Objektes [45]. Durch den Brennstoff und dessen Zusammensetzung ist die Brennrate gegeben, welche ebenso ein Einflussparameter ist, sowie die Neigung der Rußbildung und in diesem Zusammenhang auch die frei werdende (Wärme-)Emission der Flamme. Die Flammenlänge und das Verhältnis zwischen Flammenlänge und Brennstoffoberfläche muss ebenfalls betrachtet werden. Zu guter Letzt müssen auch die Transmission der Luft und Windeffekte, welche die Neigung der Flamme beeinflussen, in die Berechnung einfließen. [46] Die Intensität der Wärmestrahlung hängt von einigen Parametern, wie dem Brennstoff und dessen Zusammensetzung, die Größe des Feuers und der Flammentemperatur ab. Hauptstrahler bei Tankbränden mit Kohlenwasserstoffen sind Wasserdampf, Kohlendioxid und Ruß. [45] Die Flamme eines Kohlenwasserstoffbrandes setzt sich aus einem sichtbaren und einen unsichtbaren Teil zusammen, da die Verbrennung in einem weiten Spektrum strahlt. Markstein konnte feststellen, dass der nicht sichtbare Teil des Feuers weniger als 10 % des

sichtbaren Strahlungsanteils ausmacht. [47] Auf Grund dieser Feststellung kann das „solid flame radiation model“ (Zylindermodell) so angewendet werden, dass der vereinfachte Zylinder die Dimension der sichtbaren Flamme wiedergibt.

Zur Berechnung der Intensität der Strahlung an einem bestimmten Ort müssen folgende Parameter einfließen: Die Geometrie des Feuers, die Strahlungseigenschaften und die Geometrie des Objektes am Ort. Bei größeren Distanzen wird neben diesen Parametern auch die Atmosphäre beachtet. Hier werden die Transmission, die Feuchte der Luft, die Flammentemperatur und die Absorption der Luft ausschlaggebend. [45] Ein weiterer wichtiger Berechnungsfaktor ist die sogenannte Einstrahlzahl, welche den Teil der Strahlung, welcher beim Beobachter ankommt, darstellt. [46] Die Einstrahlzahl ist von der Flammenform, der Distanz zwischen dem Feuer und dem Objekt und der Orientierung des Objektes abhängig. [45]

Mit diesen Annahmen und Parametern wurde die Wärmestrahlung des Tankfeuers berechnet und die Auswirkung der Strahlung um den Öltank kalkuliert. Ein Wärmefluss von 1 kW/m^2 herrscht bei einer natürlichen Sonnenstrahlung an einem wolkenlosen Sommertag. [21] Die Wärmestrahlung unterliegt dem quadratischen Abstandsgesetz, welches besagt, dass die Wärmestrahlung mit dem Quadrat des Abstandes abnimmt. Dies zeigt sich auch in Abbildung 11, in welchem die Strahlungswärme in Abhängigkeit des Abstandes des Objektes zum Tank aufgetragen ist.

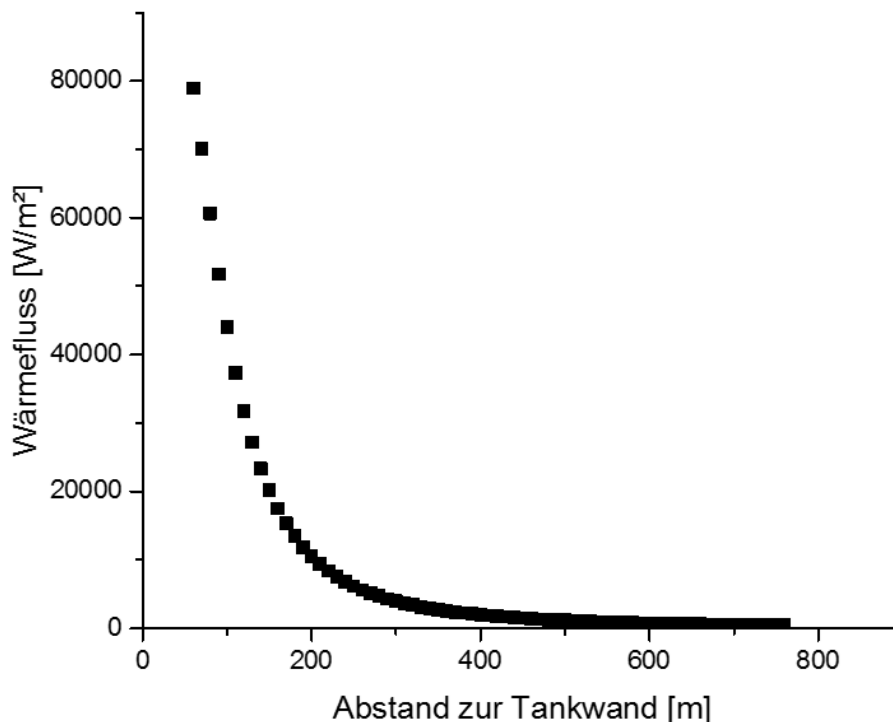


Abbildung 11: Wärmefluss in Abhängigkeit zum Ort

4.2 Plausibilitätsprüfung durch Laborversuch

Um die Plausibilität der Berechnung überprüfen zu können, wurden Laborversuche durchgeführt. Da diese Versuche aber nur im kleinen Maßstab möglich waren, musste auch die Berechnung entsprechend angepasst werden und die Parameter auf Laborbedingungen abgeändert werden. Neben den viel geringeren Abmessungen waren die größten Änderungen das Produkt und die Rußbildung. Da der Versuch mit der Berechnung des Versuches verglichen wird und keine Hochrechnung vom Versuch zur Berechnung des Tanks stattfindet, ist dies ein valider Vergleich.

Für den Versuch wurde anstatt Rohöl das Produkt Xylol (Isomerenmischung) verwendet. Hiervon wurden 60 ml in einen Tank aus Aluminiumlegierung eingefüllt. Die Abmessungen dieses Versuchstanks lagen bei einem Durchmesser von 61 mm und einer Wandstärke von 0,05 mm. Die Füllhöhe des Produktes lag bei 20 mm. Die Versuchsbedingungen wurden bei einer Umgebungstemperatur von 22 °C und einem Wärmefluss von 5,3 W/m² eingestellt und der Versuch wurde ohne Abdeckung, also ohne Schwimmdach, durchgeführt. In Abständen von 10 cm wurde die Wärmestrahlung gemessen. Hierzu wurde ein Heat Flux Messgerät verwendet. Abbildung 12 zeigt den Versuchsaufbau im Labor.



Abbildung 12: Versuchsaufbau

Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss beachtet werden, dass die Sensorfläche zur Messung der Wärmestrahlung im Vergleich zum Versuchstank sehr groß gewählt ist und daher die Messwerte mit dem Abstand immer höher im Vergleich zur Punktmessung werden. Aus diesem Grund können nur die ersten Wertepaare als gesichert angesehen werden. Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Berechnung des Versuchstanks zu entnehmen. Die Ergebnisse der Berechnung im Vergleich zu den Messwerten bei der Versuchsdurchführung sind in Abbildung 13 ersichtlich.

Tabelle 10: Ergebnisse Berechnung Pool Fire Versuchstank

Ergebnis Berechnung Versuchstank	
Tank	Durchmesser: 61 mm, Füllhöhe: 20 mm, Material: Aluminiumlegierung
Produkt	60 ml Xylol
Flammenlänge	49,5 cm
Winkel der Flamme zum Lot	0,196 Grad ⁷
Emission der Flammenoberfläche (SEP)	950 W/m ²

⁷ Es wurde die Annahme „kein Wind“ getroffen

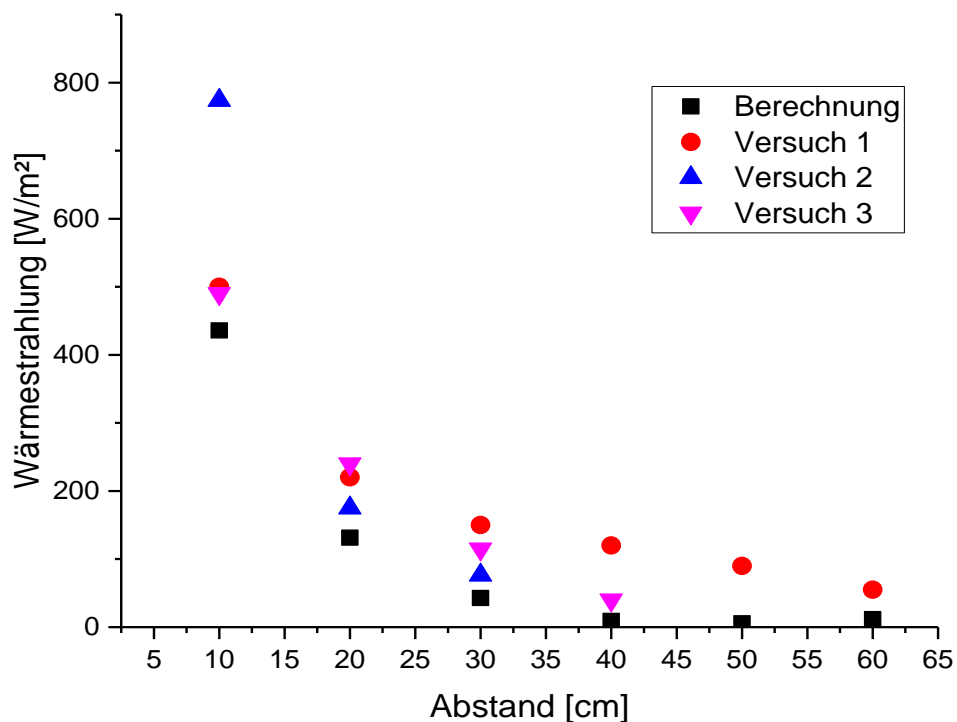


Abbildung 13: Vergleich Berechnung und Laborversuch

In der Gegenüberstellung Berechnung – Versuch ist zu erkennen, dass die ersten Messwerte (im Abstand 10 cm, 20 cm und 30 cm) sehr gut mit den berechneten Werten übereinstimmen. Bei größer werdenden Abständen stimmt die Rechnung immer schlechter mit den gemessenen Werten überein, dies liegt aber im Messaufbau, da die Sensorfläche im Verhältnis zum Versuchstank viel zu groß ist.

Auf Grund der durchgeführten Versuche und dem Vergleich zwischen Messergebnis und Berechnung des Pool Fires kann die angewendete Rechenmethode als abgesichert angesehen werden. Durch diese Prüfung ist anzunehmen, dass auch die Berechnung des Pool Fires eines Rohöltanks ähnliche Ergebnisse liefert und so eine Auswirkungsbetrachtung mit dem Szenario „vollständiger Brand eines Rohöltanks“ möglich ist.

4.3 Auswirkungsbetrachtung Pool Fire

Um sich dem Szenario „vollständiger Brand eines Rohöltanks“ stellen zu können, müssen entsprechende Vorbereitungen getroffen werden. Hierzu ist einer Auswirkungsbetrachtung essentiell, welche die auftretenden Auswirkungen aufzeigt und die Schwere dieser. Bei einem Tankbrand ist die Wärmestrahlung eine wichtige Gefahrenquelle. Neben dem entstehenden Wärmefluss treten auch Belastungen aufgrund der erzeugten Schadstoffe, welche vor allem durch die Luft getragen werden, auf. Folgeschäden und der monetäre Schaden des Szenarios werden in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet.

4.3.1 Auswirkungsbetrachtung Wärmestrahlung auf Lebewesen

Die auftretende Wärmestrahlung macht es Lebewesen unmöglich sich in der Nähe des brennenden Öltanks aufzuhalten, da der Wärmefluss Verbrennungen an der Haut sowie Schmerzen durch die Zerstörung der Epidermis hervorruft. Die Intensität der Strahlungseinwirkung und die Dauer bestimmen den Grad der Verbrennung. Durch den Grad der erlittenen Verbrennung und durch die betroffene Fläche der Hautoberfläche ist die Überlebenswahrscheinlichkeit der/des Betroffenen gegeben. Spezielle Schutzkleidung macht es erdenklich etwas näher an den Brandherd zu treten, dies ist aber zeitlich nur eingeschränkt möglich. Eine Einteilung der Verbrennungen erfolgt in vier Stufen, abhängig von der Tiefe der Verbrennung. Verbrennungen ersten Grades sind rein epidermale Schädigungen, Verbrennungen zweiten Grades werden in oberflächlich dermale (II a) und tief dermale (II b) Hautschäden unterteilt [23]. Verbrennungen dritten Grades reichen bis in die Subkutis, bei Verbrennungen vierten Grades sind Muskeln, Sehnen und Knochen beteiligt [23]. Durch große verbrannte Hautareale steigen der Flüssigkeitsverlust und die Infektionsgefahr durch das Fehlen der Schutzschicht der Haut. Die Überlebenswahrscheinlichkeit eines gesunden Erwachsenen ist bis zu einer Verbrennung der Hautoberfläche von 20 % sehr hoch, sogar bei Verbrennungen zweiten und dritten Grades. Bei einer betroffenen Hautoberfläche von mehr als 50% geht die Überlebenswahrscheinlichkeit, auch bei guter medizinischer Versorgung, gegen Null. [45] [21]

Neben Verbrennungen der Haut und Zerstörung des Gewebes kann die Einwirkung von Wärmestrahlung Schmerzen hervorrufen. Sowohl die Gewebeerstörung als auch Schmerz ist von der Temperatur der Haut abhängig, welche mit der Intensität und der Dauer der Wärmeeinwirkung steigt [45]. Durch die Komplexität des Aufbaus der Haut gibt es kein mathematisches Modell welches diese beschreiben kann, vereinfachte Modelle kommen aber

dennoch zu Anwendung. Die Komplexität des Aufbaus entsteht neben anderen Parametern durch den Aufbau in zwei Schichten: Der äußeren dünnen Schicht, genannt Epidermis, mit einer Dicke von 0,05 bis 0,1 mm, und der inneren Derma mit einer Dicke von 1 bis 2 mm. [45] Durch Versuche konnte Buettner nachweisen, dass Schmerzempfinden auftritt, wenn die durchschnittliche Temperatur in einer Tiefe von 0,1 mm in der Haut auf 45 °C steigt. Durch diese Feststellung konnte eine Berechnungsgleichung aufgestellt werden, welche die Zeit bis Schmerz auftritt berechnet. [48] In Abbildung 14 ist die Zeit bis Schmerzempfinden eintritt, abhängig von auftreffenden Wärmefluss, ersichtlich. Die aufgetragenen Punkte zeigen die Wahrnehmung von „stechenden Schmerzen“ (●, ◊), und den Schwellenwert für Schmerzen (○, ◆) [45].

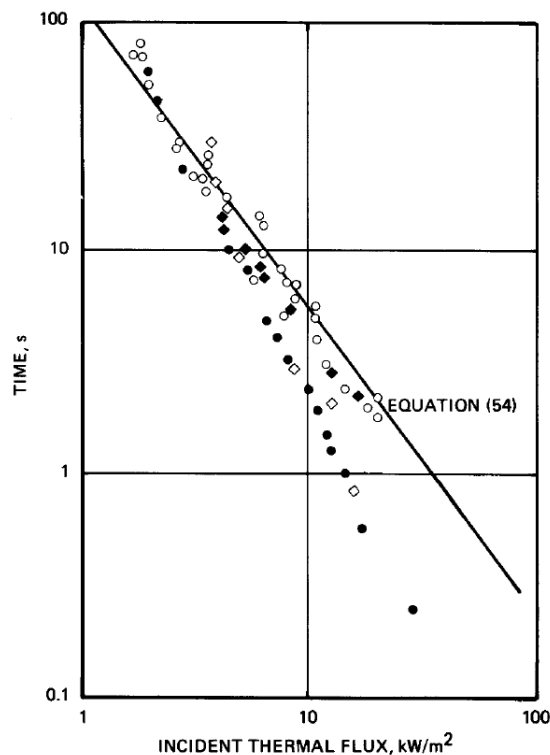


Abbildung 14: Zeitspanne bis zu Schmerzempfinden [45]

Werden die Versuchsdaten aus oben stehendem Diagramm mit der Intensität der Wärmestrahlung in Korrelation gesetzt, erhält man laut Buettner und Mudan folgende Gleichung:

$$t = \left(\frac{35}{q''}\right)^{1,33}$$

Kein Schmerzempfinden zeigte sich bei einer Bestrahlung von unter 1,7 kW/m², unabhängig von der Dauer der Einstrahlung [45]. Die TNO gibt einen Grenzwert von 1 kW/m² an, da dies

der Wert für Sonneneinstrahlung an einem durchschnittlichen Sommertag ist. Angemerkt muss hier werden, dass Gewebeschäden auch bei einem Wert von 1 kW/m^2 auftreten können, falls die Dauer der Wärmeeinwirkung zu hoch ist (Sonnenbrand udg.). Sobald Schmerz empfunden wird, ist die einzige Möglichkeit das Gewebe vor weiterer Schädigung zu schützen, die Unterbindung des Wärmeflusses auf die Haut. [21] In Abbildung 15 ist die Zeit bis zum Zeitpunkt „unerträglicher Schmerz“ in Abhängigkeit von der Wärmestrahlung zu entnehmen.

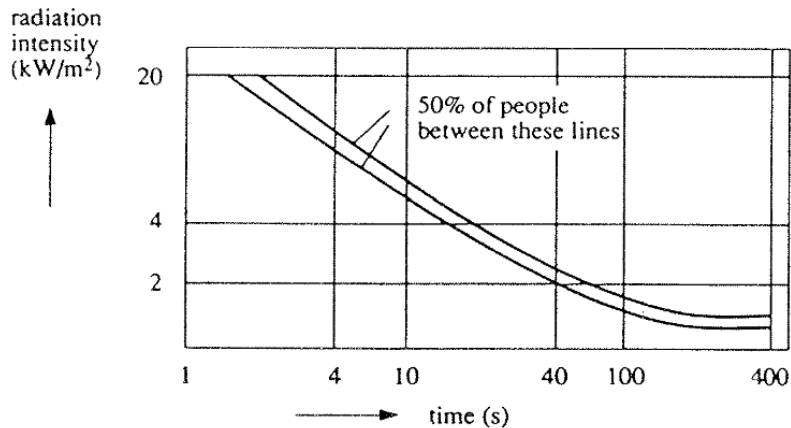


Abbildung 15: Zeit bis zum unerträglichen Schmerz [21]

Schmerzempfinden und leichte Verbrennungen zweiten Grades werden laut Mudan bei einer absorbierten Energie von $41,8 \text{ kJ/m}^2$ hervorgerufen. Steigt die Energieabsorption an der Haut weiter an, treten bis zu einem Wert von $83,6 \text{ kJ/m}^2$ Blasenbildung und starke Verbrennungen zweiten Grades auf. Ab $162,2 \text{ kJ/m}^2$ werden Verbrennungen dritten Grades und irreversible Gewebeschädigungen hervorgerufen. [45]

Wenn man die Gleichung von Buettner [48] auf das berechnete Szenario anwendet, erhält man für einen ungeschützten erwachsenen Menschen (Achtung: Berechnung erfolgte mit blanker Haut, normale Kleidung würde schon einen Abschwächungsfaktor bedeuten) Zeitisothermen, welche die Dauer, bis Schmerzempfinden eintritt, zeigen (vgl. hierzu Abbildung 16). Die rote Linie in Abbildung 16 zeigt den Abstand, bei dem ein Mensch ab einer Minute Schmerzempfinden zeigt. Die orange Linie zeigt den Abstand bei dem nach 4 Minuten Schmerz eintritt, die gelbe Grenze zeigt den Schmerzeintritt nach fünf Minuten und in Abstand der grünen Linie zur Tankwand tritt Schmerzempfinden beim Menschen nach 10 Minuten ein. Diese Werte geben die durchschnittliche Bevölkerung wieder, jeder Mensch hat aber seine individuelle Wahrnehmung von Schmerzen.

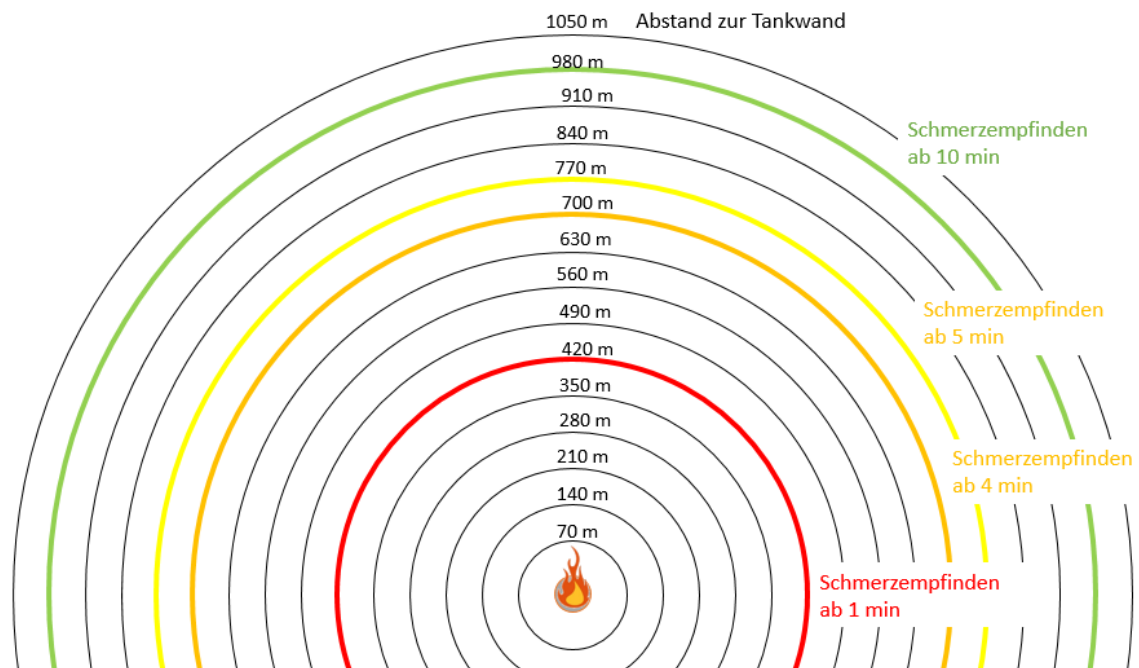


Abbildung 16: Grenzen Schmerzpfinden in Abhängigkeit zur eintreffenden Wärmestrahlung bei keiner vorgegebenen Windrichtung (Wind: 1 m/s)

Neben diesen Werten gibt es aber noch andere Grenzwerte, welche den Wärmefluss auf die Haut charakterisieren. Der United States Federal Safety Standard für Anlagen, welcher verflüssigtes Erdgas beinhaltet, arbeitet mit einem Wärmeflusswert von 5 kW/m^2 bei direkter Wärmeeinwirkung auf den Menschen. Bei diesem Wert tritt bei dem einfallenden Wärmefluss nach 13 Sekunden „unbearable pain“ (unerträglicher Schmerz) auf und nach 40 Sekunden Verbrennungen zweiten Grades. Der Grenzwert für Tod wird bei 10 kW/m^2 bei einer Zeit von 40 Sekunden angegeben. [45]

Um die Haut vor Verbrennungen zu schützen, muss der Wärmefluss auf diese unterbrochen werden. Dies ist einerseits durch einen größeren Abstand zum Brandherd möglich, andererseits kann aber auch Schutz durch Kleidung gewährleistet werden. Für den Hautschutz mittels Kleidung ist das Kriterium Temperatur ausschlaggebend [21]. Versuche zeigten, dass eine Hauttemperatur von 45 °C auch bei längerer Einwirkungsdauer akzeptabel ist, höhere Werte sind nur bei stark verminderten Zeitspannen möglich ohne Schmerzen hervorzurufen. In Abbildung 17 ist die Hautoberflächentemperatur in Abhängigkeit der Wärmeeinwirkung dargestellt.

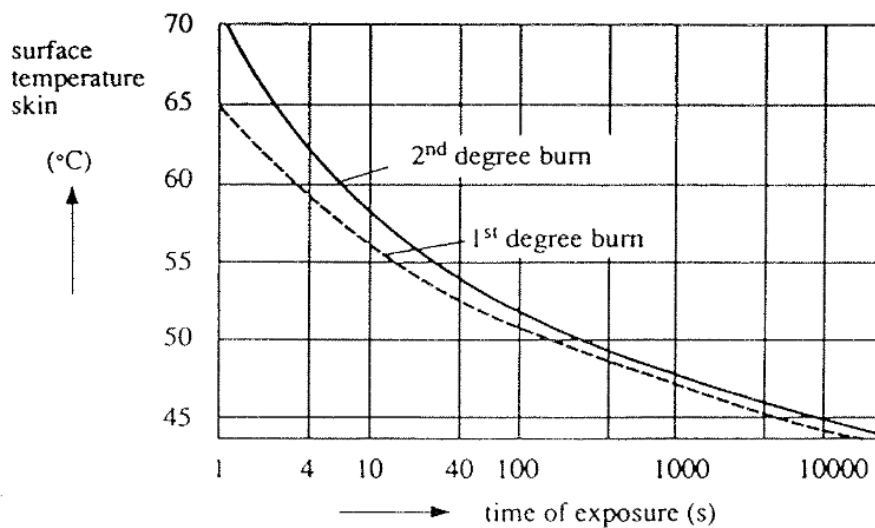


Abbildung 17: Kriterium Hauttemperatur in Abhängigkeit von der Dauer der Wärmeeinwirkung [21]

Schutzkleidung gegen strahlende Wärme umfasst einen großen Bereich von Kleidungsmaterialien. Laut ÖNORM EN ISO 6942 können Feuerwehrfrauen und –männer mit Schutzkleidung über einen langen Zeitraum einer relativ niedrigen, für relativ kurze Zeiträume mittleren und für sehr kurze Zeiträume hohen Strahlungsintensitäten ausgesetzt sein. [49] Bei der Kleidungsanforderung wird in Bezug auf den Widerstand gegen Strahlungswärme in zwei Kategorien unterschieden: Leistungsstufe 1 (Xr1) und Leistungsstufe 2 (Xr2). Die Leistungsstufe 2, welche der Schutzkleidung entspricht, die bei einem Tankbrand von den Feuerwehrfrauen und –männern getragen wird, muss nach ÖNORM EN 469 einen RHT_{124} ⁸ von größer gleich 18,0 entsprechen. [50] Bei einer Umgebungstemperatur von 25 °C kann sich die Gefahrenabwehr bei längeren Arbeiten nur so weit dem brennenden Tank nähern, dass die Temperatur durch die Strahlungswärme an der Hautoberfläche um 20 °C steigt, kurzzeitig ist auch eine noch geringfügigere Erhöhung möglich.

In Österreich ist für die Planung im Bereich Industrieunfälle die Richtlinie 2012/18/EU (Seveso-III-Richtlinie) anzuwenden, welche sich mit der Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen beschäftigt. Um die Anwendung dieser Richtlinie zu erleichtern verfasste der Bundesländer-Arbeitskreis Seveso 2015 die sogenannte BLAK-Empfehlung, welche sich mit „Angemessenen Sicherheitsabständen“ auseinandersetzt. Da ein Vollbrand eines Öltanks in einem Tanklager einem solchen schweren Unfall entspricht, gibt es in dieser

⁸ Unter dem RHT_{124} versteht man nach der ÖNORM EN 469 eine Zahl, die aus dem Mittelwert der gemessenen Zeiten beim Prüfverfahren für Schutzkleidung (Prüfung entsprechend ÖNORM EN ISO 6942) berechnet wird, nach der eine Temperaturerhöhung von $(24 \pm 0,2)$ °C im Kalorimeter erreicht wird, wenn mit einer einfallenden Wärmestromdichte von 40 kW/m² geprüft wird.

Empfehlung, die raumordnungsrechtlich nicht verbindlich ist, Anmerkungen dafür. Laut dem Arbeitskreis gilt bei Belange der Raumordnung für die Gefahrenklasse (CLP) „entzündbare Flüssigkeiten“ beim Szenario „Brand zusammenhängender Brandlasten“ der Beurteilungswert $3,0 \text{ kW/m}^2$ bzw. für kurzzeitige Einwirkung 500 TDU (thermal dosis unit) für die Auswirkung „Wärmestrahlung“ [19]. Bei einer Wärmestrahlung von $4,5 \text{ kW/m}^2$ tritt nach 20 Sekunden Blasenbildung ein, nach 10 sec bei einer Strahlungsintensität von $12,5 \text{ kW/m}^2$ Verbrennungen ersten Grades und bei einem Wärmefluss von 36 kW/m^2 nach 10 sec Verbrennungen dritten Grades [19]. Ein Feuerwehreinsatz ist nach dieser BLAK-Empfehlung bis zu einer Strahlung von $4,5 \text{ kW/m}^2$ vorgesehen [19]. Diese Grenzwerte auf das Berechnungsbeispiel umgelegt kann Abbildung 18 entnommen werden. Der rote Bereich gibt Verbrennungen dritten Grades nach 10 Sekunden an, die blaue Linie zeigt den Grenzabstand für einen Feuerwehreinsatz.

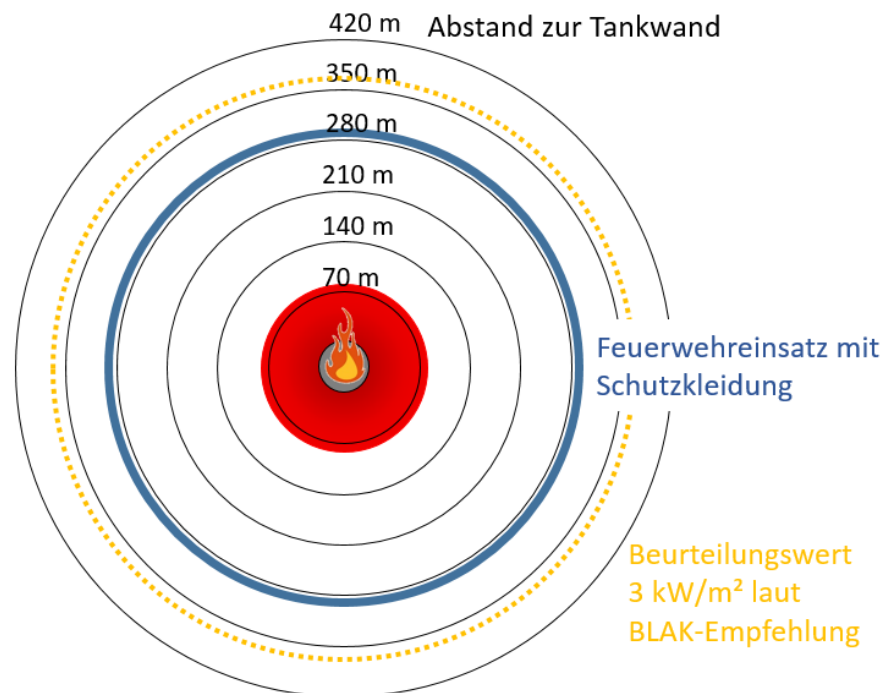


Abbildung 18: Abstände nach BLAK-Empfehlung bei keiner vorgegebenen Windrichtung (Wind: 1 m/s)

Der Vergleich dieses Grenzabstandes bei einem Feuerwehreinsatz mit Bildern von Bränden lässt einige Überlegungen hinsichtlich der Richtigkeit dieses Abstandswertes zu, da bei Brandszenarien die Gefahrenabwehr näher an der Brandlast erscheint. Um dies zu prüfen wurde ein Brand im Jahr 2015 in Wildon/Steiermark nachgerechnet und auf den „Einsatzabstand“ hin überprüft. Am 29. August 2015 kam es in einem Recyclingbetrieb zu einem Großbrand, welcher Haushalts- und Gewerbeabfälle zu sortenreinem Polyethylen-Recyclat verarbeitet und am Firmengelände in Ballen lagert. Der erste Notruf wurde um

12:36 Uhr abgesetzt, erst 24 Stunden später konnte „Brand Aus“ gemeldet werden. Nicht weniger als 54 Feuerwehren kämpften mit einer Löschwassermenge von rund 32.000.000 Litern und 8.000 Liter Schaummittel gegen eine Brandbekämpfungsfläche von rund 10.000 m². [51] [52] Die verwendeten Parameter für die Berechnung dieses Brandes sind dem Anhang zu entnehmen, die daraus berechnete Wärmestrahlung Abbildung 21. Um den tatsächlichen Abstand der Feuerwehrfrauen und –männer zu erhalten wurden Bilder vom Einsatzort geographisch ausgewertet und der Abstand aus Geodatenbanken entnommen. In Abbildung 19 ist der verwendete Abstand ersichtlich, welchen die Feuerwehren von der naheliegenden Kläranlage für den Löschangriff auf Grund der Wärmeentwicklung einhalten mussten. Ein ähnlicher Sicherheitsabstand infolge der Wärmestrahlung wurde auch auf der gegenüberliegenden Seite beim Eingangstor zum Firmengelände, wie in Abbildung 20 zu sehen, beachtet.



Abbildung 19: Feuerwehreinsatz aus Richtung Kläranlage (Quelle Bilder: google maps, FF Weitendorf)



Abbildung 20: Feuerwehreinsatz aus Richtung Eingang Firmengelände (Quelle Bilder: google maps, FF Weitendorf)

Aus den beiden Bildern konnte ein Abstand vom Einsatzort zur Brandlast von rund 40 m ausgelesen werden. Die in dieser Distanz wirkende Wärmebelastung kann nun als die Strahlungsintensität angenommen werden, welche für einen realen Brandeinsatz von der Feuerwehrmannschaft mit Schutzkleidung im Einsatz verträglich ist. Diese Annahme wurde hier aber frei gewählt und sollte in weiterer Folge näher betrachtet und untersucht werden. Wie in Abbildung 21 ersichtlich ist dieser Wert viel höher als in der BLAK-Empfehlung des Bundesländer-Arbeitskreises Seveso vorgeschlagen. Gründe hierfür liegen einerseits in der Anwendung der BLAK-Empfehlung, welche für Belange der Raumplanung verfasst wurden und nicht für die Katastrophenschutzplanung. Andererseits ist dieser Wert wahrscheinlich durch einen hohen Sicherheitsfaktor beaufschlagt, welcher aber im Falle einer Katastrophe hinderlich erscheint. Für Planungen im Bereich Katastrophenschutz erscheint die Verwendung dieser Richtwerte fragwürdig, da diese nicht den realen „Einsatzabstand“ wiedergeben.

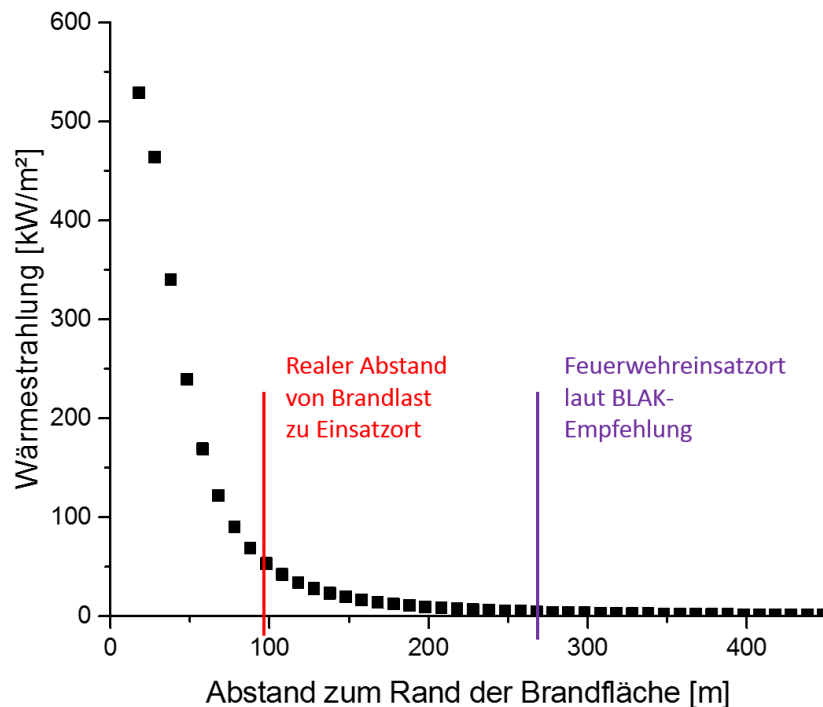


Abbildung 21: Berechnete Wärmestrahlung bei Großbrand in Wildon 2015

Wird nun der reale „Einsatzabstand“ von Feuerwehr zur Brandlast auf den berechneten Tankbrand umgelegt, so zeigt sich sofort, dass der Abstand für den Feuerwehreinsatz sehr viel näher beim Tank gezogen werden kann. Bei Vergleichen mit realen Tankbränden in der Vergangenheit lässt sich, wie in Abbildung 22 zu sehen, diese Tatsache ebenfalls feststellen, da sich Einsatzkräfte fast bis zur Tankwand aufstellen können.



Abbildung 22: Löscharbeiten der Feuerwehr bei einem Öl-Tankbrand [53]

Um einen Tankbrand zu löschen, müssen Hilfsmittel zur Verfügung stehen, da brennbare Flüssigkeiten auf Wasser aufschwimmen und so die Gefahr eines Boil-Overs⁹ besteht. Verwendet wird im Allgemeinen Löschschaum, welcher auf die Oberfläche aufgebracht wird, um dort eine Schicht zu bilden, welche den Brand erstickt. Löschschaum wird durch das Zumischen von Luft zu einem Schaumbildner-Wassergemisch erzeugt (siehe Abbildung 23), welches durch Zumischen von 0,3 bis 6 % eines Schaumbildners zu Wasser hergestellt wird.

⁹ Bei der Einbringung von (Lösch-)wasser in eine brennende Flüssigkeit, sinkt dieses aufgrund der geringeren Dichte ab. Durch weiteren Wärmeeintrag beginnt das Wasser zu siedern und reißt in Dampfform die brennende Flüssigkeit mit aus den Tank. Die Verbrennung dieser erfolgt meist explosionsartig.

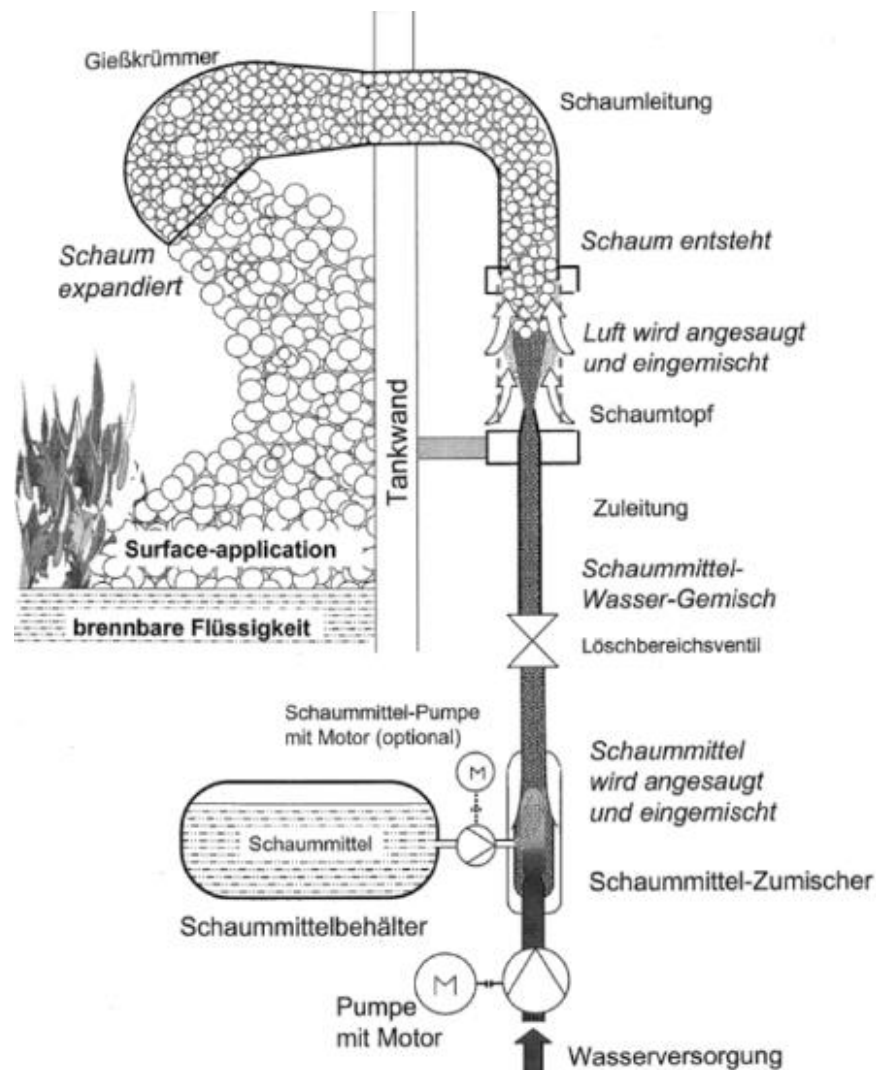


Abbildung 23: Funktionsweise Schaumlöschanlage bei Tankbehälter [54]

Der dadurch gebildete zeitstabile Schaum ist leichter als die brennende Flüssigkeit und schwimmt daher auf der Oberfläche auf. Die Löschwirkung beruht einerseits auf dem Ersticken der Flamme, da sich der Schaum als Sauerstoffundurchlässige Schicht zwischen Brandgut und Luft aufbaut. Andererseits kühlt das aus dem Schaum mit der Zeit ausfallende Wasser das Brandgut. Im Allgemeinen sind drei Arten von Schaumlösungen bekannt: Schwerschaum mit einer vier bis 20-fachen Verschäumung, Mittelschaum mit 21- bis 200-fachen Verschäumung und Leichtschaum mit einer 201- bis 1.000-fachen Verschäumung. Für Tanklager wird Mittel- und Schwerschaum eingesetzt. [54] In Tabelle 11 ist eine Einteilung von Schaummitteln und dessen Einsatzgebiete ersichtlich.

Tabelle 11: Schaummittel [54]

Proteinschaummittel			
Proteinschaummittel P	Brandklasse A + B	Raffinerien, Tanklager, Chemische und Petrochemische Industrie, Schifffahrt	Schwerschaum
Fluor- Proteinschaummittel FP	Brandklasse A + B	Raffinerien, Tanklager, Chemische und Petrochemische Industrie, Schifffahrt, Flughäfen	Schwerschaum
Wasserfilmbildende Proteinschaummittel AFFF	Brandklasse A + B	Chemische und Petrochemische Industrie, Pharmazeutische Industrie, Schifffahrt	Schwerschaum
Polymerfilmbildende Proteinschaummittel FFFP	Brandklasse A + B	Chemische und Petrochemische Industrie, Pharmazeutische Industrie, Schifffahrt	Schwerschaum
Synthetische Schaummittel			
Mehrbereichs- schaummittel S	Brandklasse A + B	<i>Kommunale Feuerwehren,</i> Chemische und Petrochemische Industrie, Flughäfen, Schifffahrt	Schwer-, Mittel- und Leichtschaum Class-A-Schaum
AFFF-Schaummittel AFFF	Brandklasse A + B	Chemische und Petrochemische Industrie, Flughäfen, Offshore Anlagen	Schwer- und Mittelschaum

Alkoholbeständige Universal- schaummittel FFFP	Brandklasse A + B	Pharmazeutische Industrie, Chemische und Petrochemische Industrie, Lackindustrie, Offshore Anlagen	Schwer- und Mittelschaum
---	-------------------	---	-----------------------------

Um den Löschmittelbedarf zu berechnen muss einerseits die benötigte Wassermenge, andererseits aber auch die benötigte Schaummittelmenge kalkuliert werden. Als Hilfestellung dient in Österreich die vorläufige Richtlinie VB-05 des Österreichischen Bundesfeuerwehrverbandes vom 9. Juli 1996. Für die Beschäumung von Lagerbehältern von brennbaren Flüssigkeiten durch die Feuerwehr mit Schwertschaum wird eine Applikationsrate von 8 l/m²/min vorgeschlagen. Die theoretische Löszeit für einen Schwertschaumeinsatz beträgt laut VB-05 15 min. Der Schaummittel-Mindestvorrat muss der dreifachen Schaummittelbedarfsmenge entsprechen. Der Löschwasservorrat ist so zu bemessen, dass die doppelte Menge des erforderlichen Schaummittel-Mindestvorrat verschäumt werden kann [55]. Als State of the Art wird gegenwärtig ein synthetisches Schaummittel mit einer Schaummittelzumischrate von 3,0 % verwendet. Als Beispiel hierzu kann das sogenannte A3F-Schaummittel genannt werden, welches aber auf Grund der enthaltenen Flurproteine Umweltprobleme mit sich zieht. Beliebter ist es aber dank der Bildung eines Flüssigkeitsfilmes zwischen brennbarer Flüssigkeit und Schaum, welcher den Schaum schützt. Für den dargestellten Fall würde dies nach ÖBFV-Richtlinie folgende Mengen für einen Löschangriff bedeuten: 8.000 l/min Schaummittellösung müssen auf die Tankoberfläche aufgebracht werden, zur Erzeugung dieser werden 90 l/min Schaummittel und 7.500 l/min Wasser benötigt. Eine Bevorratung ist ebenfalls Gegenstand der ÖBFV-Richtlinie. Laut dieser ist Schaummittel für die dreifache Beschäumungszeit zu lagern und Löschwasser für die zweifache Verschäumung des Schaummittelvorrates. Umgelegt auf den Berechnungsfall bedeutet dies, dass 10.000 Liter Schaummittel und 670 m³ Wasser, falls kein fließendes Gewässer angrenzend liegt, bereit zu halten sind. Die Aufbringung der Schaummittellösung erfolgt im Allgemeinen mittels Wasserwerfer. Als Beispiel wird hier der Werfer RM 24 der Firma Rosenbauer angeführt, da dieser und Vergleichbare anderer Hersteller der Bestückung von Feuerwehrfahrzeuge in Österreich im kommunalen Bereich entspricht¹⁰. Die maximale

¹⁰ Nach Auskunft im Bereich der freiwilligen Feuerwehren in Stmk und NÖ

Durchflussmenge gibt die Firma mit 3.000 l/min¹¹ an, womit die benötigte Schaummittelmenge aufgebracht werden kann. Die Wurfweite ist mit 80 m¹¹ bei Wasser und 50 m¹¹ bei Schaummittel aber sehr begrenzt. Bei einer Tankhöhe von 20 Metern müsste das Feuerwehrfahrzeug mit dem besagten Werfer im Abstand von 40 m von der Tankwand aufgestellt und der Werfer richtig positioniert werden.

Zur Erzeugung der Schaummittellösung mittels Werfer werden sogenannte Schaumrohre verwendet, welche das Wasser und den Schaumbildner mit der eingestellten Zumischrate mit Luft verschäumen. Die Luft wird hierbei durch Injektorwirkung einer Venturi-Düse eingesaugt und die Schaumbildung erfolgt an geeignet geformten Netzen (siehe Abbildung 24). [54]

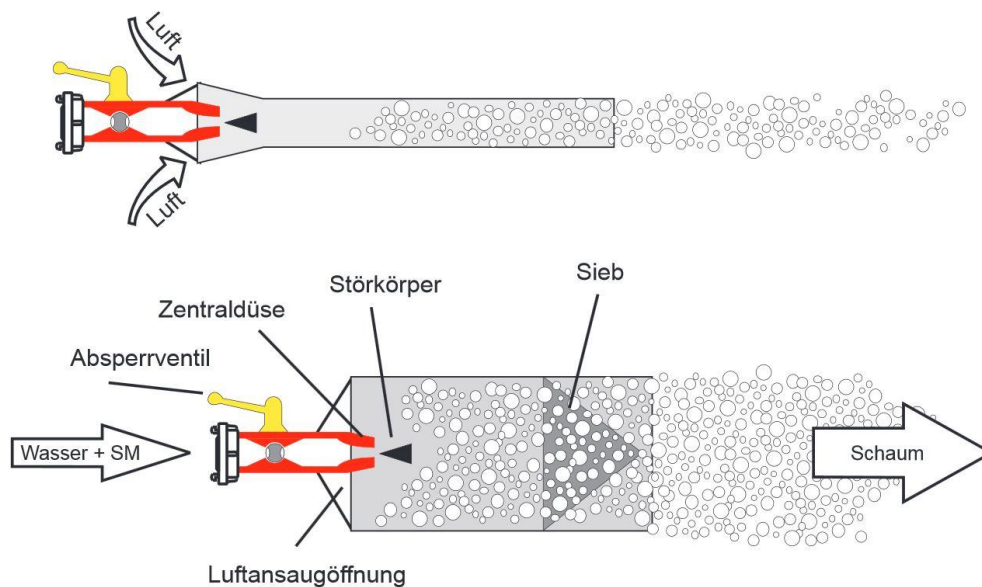


Abbildung 24: Schaumerzeugung mittels Schwerschaumrohr (oben) und mittels Mittelschaumrohr (unten) [56]

Ist es nicht möglich den brennenden Tank zu löschen, ist nur mehr ein kontrolliertes „Abbrennenlassen“ durchführbar. Hierzu wird der Tank von außen gekühlt, um die Gebäudestruktur zu erhalten und so die Umgebung vor Flammenüberschlag zu schützen. Als Kühlmittel wird im Allgemeinen Wasser verwendet. Die Besprühung des Tanks sollte so geregelt werden, dass genau so viel Wasser an den Tankmantel gelangt, dass Wasserdampf erzeugt wird, welcher dem Tank Energie entzieht. Die NFPA (National Fire Protection Association) empfiehlt hierzu als Best Practice die Entstehung von Wasserdampf als Richtwert in der Praxis zu verwenden. BP schlägt auf Grund von Modellberechnungen und

¹¹ Datenblatt RM24 der Firma Rosenbauer, August 2017

Versuchsdurchführungen eine Applikationsrate von 2 l/min/m² für die Mantelkühlung von Speichertanks für flüssige Kohlenwasserstoffe vor. [57]

Die Aufbringung des Kühlmittels erfolgt im Allgemeinen mittels Wasserwerfer. Als Beispiel wird hier der Werfer RM 24 der Firma Rosenbauer angeführt, da dieser und vergleichbare andere Hersteller der Bestückung von Feuerwehrfahrzeuge in Österreich im kommunalen Bereich entspricht¹². Die maximale Durchflussmenge gibt die Firma mit 3.000 l/min¹³ an. Die Wurfweite liegt mit Wasser bei 80 m¹⁵. Zur Kühlung des Tankmantels müssten die Werfer aufgrund der Wurfparabel 30 m von der Tankwand entfernt aufgestellt werden. Problematisch könnte hier die Strahlungswärme vom brennenden Tank werden. Weiters muss die Kühlung des Tanks gleichmäßig über die gesamte Oberfläche erfolgen um einen gleichförmigen Abbrand zu unterstützen. Fragwürdig erscheint hier, ob dies mit einem Strahlrohr zu gewährleisten ist. Durch die Art und Weise des Wasserstrahls scheint dies nicht möglich, wodurch die bauliche Maßnahme einer Wasserberieselung zu empfehlen ist.

4.3.2 Auswirkungsbetrachtung Schadstoffausbreitung

Ein weiteres zu bedenkendes Problem für Lebewesen stellt die Schadstoffbelastung in der Luft durch den Brandrauch dar. Durch die Verbrennung von Rohöl entstehen verschiedenste schädliche Produkte, wie Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, verschiedene Kohlenwasserstoffe, Stickoxide, Ruß, Teere, aber auch unverbrannte Partikel und Feinstaub, welche durch die Wärmeentwicklung in die Atmosphäre aufsteigen und sich so auf einer großen Fläche verbreiten können und zu einem anderen Ort hin vertragen werden. Brandrauch enthält bis zu 5.000 verschiedene, für den Menschen schädliche, Stoffe [54], wobei den sogenannten Leitsubstanzen besondere Bedeutung zukommt, da diese im hohen Maße in der Nähe des Brandherdes auftreten. Ein kurzer Überblick über diese Leitsubstanzen zur Gefährdung von Menschen ist in Tabelle 12 zusammengefasst.

¹² Nach Auskunft im Bereich der freiwilligen Feuerwehren in Stmk und NÖ

¹³ Datenblatt RM24 der Firma Rosenbauer, August 2017

Tabelle 12: Entstehende Schadstoffe bei Bränden [54]

Akut toxische Brandprodukte	
Kohlenmonoxid CO	Führt durch Blockade des Sauerstofftransportes zur „inneren Erstickung“
Blausäure HCN	Führt durch Blockade der Zellatmung zur „inneren Erstickung“
Kohlendioxid CO ₂	Führt bei höherer Aufnahme (> 0,5 %) zu erhöhter Atemfrequenz und dadurch zu erhöhter Schadstoffaufnahme; ab 5 % Atemstillstand
Akut reizende Brandprodukte	
Salzsäuredämpfe (HCl) und Aldehyde	Wirken reizend bis ätzend, insbesondere bei Augen und Schleimhäuten
Stoffe mit toxischer Langzeitwirkung	
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	Krebserzeugend und krebsfördernd. Tritt bei allen stark rußenden Bränden auf, also auch sehr stark bei Tankbränden

4.3.3 Auswirkungsbetrachtung am Nachbartank

Neben den Auswirkungen an Mensch und Tier müssen auch die Belastungen von Materialien in der Umgebung betrachtet werden. Rohöl wird immer in Tanklagern gespeichert, wodurch die örtliche Nähe zu anderen Tanks nicht zu vermeiden ist. Auch diese Tatsache muss in die Auswirkungsbetrachtung einfließen, da die Wärmestrahlung des Brandes, neben einer Materialermüdung der eigenen Tankeinhausung, auch eine Belastung von Nachbarbauten hervorruft. Ein Umgreifen des Feuers auf naheliegende Bauten ist durch Großbrände in der Vergangenheit schon mehrmals belegt worden (vgl. hierzu Buncefield usw.).

Um die Auswirkung des Brandes auf einen Nachbartank bewerten zu können, wurde eine Berechnung durchgeführt, welche zeigen soll, wie lange ein Brand mit der berechneten Energie des Pool Fires auf einen anderen Tank einwirken kann, bis sich dieser entzündet. Als Kenngröße für die Entzündung wurde der Flammpunkt verwendet. Als Flammpunkt wird nach NORM ISO 2719 die „niedrigste Temperatur einer Prüfmenge verstanden, [...] bei der unter den festgelegten Prüfbedingungen die Anwendung einer Zündquelle dazu führt, dass sich die Dämpfe der Prüfmenge entzünden und die Flamme sich über die Oberfläche der Flüssigkeit ausbreitet“ [58]. Bei Rohölen liegt der Flammpunkt zwischen 55 und 100 °C, abhängig von der Qualität des Produktes. Für die Berechnung wurde ein Flammpunkt $T_{FP} = 55$ °C angewendet, um so den worst case-Fall zu erhalten. Einerseits wurde ein Tank mit denselben Abmessungen (und derselben Füllmenge) wie die Brandlast berechnet, andererseits wurde ein kleinerer Tank mit einem Durchmesser von 50 m und einer Höhe von 20 m betrachtet. Das Material des Mantels entspricht dem API-Standard 650 mit einer durchschnittlichen Wandstärke von 10 mm. Der Abstand zwischen den Rohöltanks entspricht 80 m.

Die Durchführung der Berechnung der Wärmeeinwirkung auf Nachbartanks führte zu folgenden Ergebnissen: Das Rohöl in einem Tank im Abstand von 80 m mit denselben Abmessungen wie der brennende Öltank (Durchmesser 70 m, Höhe 20 m) erreicht nach 20 Stunden seinen Flammpunkt. In einem kleineren Tank (Durchmesser 50 m, Höhe 20 m) erreicht das Rohöl seinen Flammpunkt nach 13 Stunden. Dies bedeutet, dass ein ungekühlter Tank nach 20 bzw. 13 Stunden bei den gegebenen Umgebungsbedingungen selbst Feuer fangen könnte. Um dies zu verhindern muss Kühlwasser auf den gesamten Tankmantel aufgebracht werden. Je länger die Zeitspanne bis zur Kühlmittelaufbringung, umso kritischer kann die Situation werden, falls folglich eine Unterbrechung bei der Kühlung (zum Beispiel durch Pumpenausfall udg.) stattfindet. Auch sollte beachtet werden, dass die benötigte Menge an Kühlmittel (also Wasser) zur Verfügung steht. Falls diese zu gering ist, kann ein zu später Start der Kühlung die Zündung des Nachbartanks zwar hinauszögern, aber nicht verhindern. Dies ist nur durch die nötige Kühlmittelmenge und das zeitgerechte Starten möglich. BP empfiehlt in seinen „BP Pocess Safety Series“, dass Tanks mit einem Abstand unter einem Tankdurchmesser gegen den Wind und mit zwei Tankdurchmessern in Windrichtung gekühlt werden sollten [57]. Tanks mit einem Abstand von einem Tankdurchmesser normal zur Windrichtung sollten ebenso wie sehr kleine Tanks und beinahe entleerte gekühlt werden. Die Schulung des Feuerwehrpersonals ist hier essentiell für den erfolgreichen Angriff, da bei einer zu hohen Kühlmittelrate das Drainagesystem geflutet werden würde und die Löschmittelrückhaltebecken übergehen könnten. Die Berieselung des Tanks sollte so geregelt werden, dass genau so viel Wasser an den Tankmantel gelangt, dass Wasserdampf erzeugt wird, welcher dem Tank Energie entzieht. Die NFPA (National Fire Protection Association)

empfiehlt hierzu als Best Practice die Entstehung von Wasserdampf als Richtwert zu verwenden. Entsteht Dampf, ist die Kühlung fortzuführen, wird keiner mehr erzeugt, ist diese zu unterbrechen und in regelmäßigen Abständen zu überprüfen. [57] BP schlägt auf Grund von Modellberechnungen und Versuchsdurchführungen eine Applikationsrate von 2 l/min/m² für die Mantelkühlung von Speichertanks für flüssige Kohlenwasserstoffe vor. Dieser Wert würde bei der vorliegenden Modellberechnung folgende Kühlmittelraten bedeuten: Bei Tank Nummer 1 (Durchmesser 70 m) ist seine Kühlmittelmenge von 9.000 l/min erforderlich, bei Tank Nummer 2 (Durchmesser 50 m) eine Menge von 6.500 Liter pro Minute.

BP empfiehlt in seinen „BP Poces Safety Series“ den Wärmefluss auf den Nachbartank unter 8 kW/m² zu halten, um eine Brandausbreitung zu verhindern [57]. Dies würde bei der vorliegenden Modellberechnung einen Abstand zwischen den Rohöltanks von 225 Metern bedeuten, um ohne Kühlmaßnahmen eine Entzündung des Nachbartanks zu verhindern.

Anmerkungen für die Kühlung von Tanks, welche einer Wärmeeinwirkung ausgesetzt sind, sind auch in der BLAK-Empfehlung des Bundesländer-Arbeitskreises Seveso vorhanden. Laut dieser Empfehlung gilt bei Belange der Raumordnung für die Gefahrenklasse (CLP) „entzündbare Flüssigkeiten“ beim Szenario „Brand zusammenhängender Brandlasten“ der Beurteilungswert 3,0 kW/m² bzw. für kurzzeitige Einwirkung 500 TDU (thermal dosis unit) für die Auswirkung „Wärmestrahlung“ [19]. Bei einer Wärmestrahlung von 12,5 kW/m² können Tanks laut BLAK-Empfehlung durch Kühlung gehalten werden (grüner Bereich in Abbildung 25), bei einer Wärmestrahlung von 36 kW/m² können Tanks trotz Kühlung nicht gehalten werden (roter Bereich in Abbildung 25).

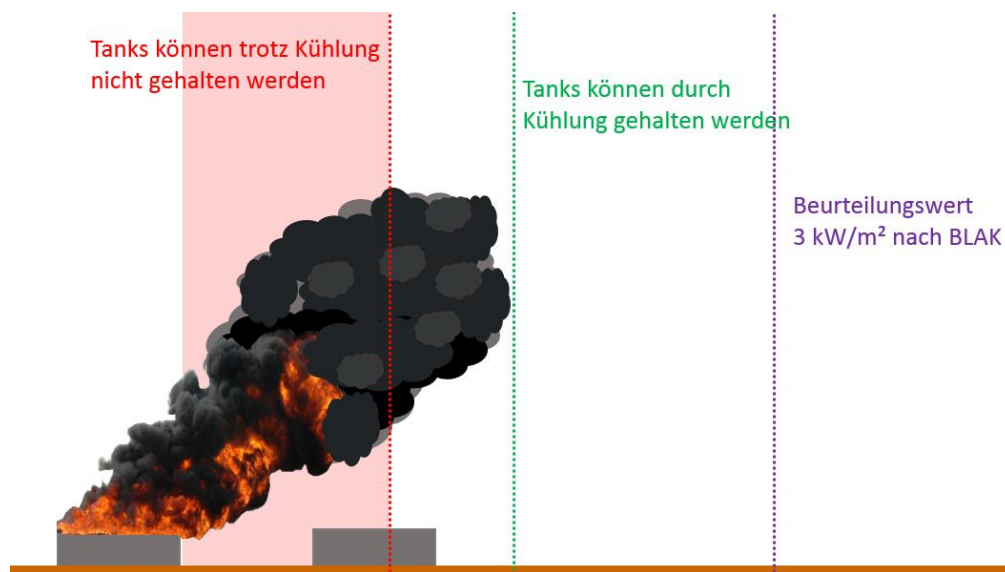


Abbildung 25: Bereiche im Tanklager laut BLAK-Empfehlung (Wind: 1 m/s)

Zur Berechnung der Kühlmittelmenge gibt es, wie in Kapitel 4.3.1 schon beschrieben, die ÖBFV-Richtlinie VB-05, welche neben dem Löschmittelbedarf auch Aussagen über die Kühlmittelmenge liefert. Für das Kühlen von gefährdeten Objekten ist Löschwasser für eine Zeit von mindestens drei Stunden bereit zu halten [55]. Die spezifische Löschwasserrate zur Abführung von Strahlungswärme wird vom Österreichischen Bundesfeuerwehrverband mit $1,5 \text{ l/m}^2 \cdot \text{min}$ angegeben. Wenn nun ein gefährdetes Objekt mit den gleichen Abmessungen wie der brennende Tank im Berechnungsbeispiel zu kühlen wäre, würde eine Kühlwasserrate von 4.000 l/min benötigt werden. Bei einer minimalen Kühldauer von drei Stunden entspricht dies einem Wasserbedarf von 725 m^3 .

Die Aufbringung des Kühlmittels erfolgt im Allgemeinen mittels Wasserwerfer. Als Beispiel wird hier der Werfer RM 24 der Firma Rosenbauer angeführt, da dieser und vergleichbare andere Hersteller der Bestückung von Feuerwehrfahrzeuge in Österreich im kommunalen Bereich entspricht¹⁴. Die maximale Durchflussmenge gibt die Firma mit 3.000 l/min ¹⁵ an. Bei einer Kühlwasserrate von 4.000 l/min bedeutet dies einen Einsatz von zwei Werfern mit je 2.000 l/min . Die Wurfweite liegt mit Wasser bei 80 m ¹⁵. Zur Kühlung des Tankmantels müssten die Werfer 30 m von der Tankwand entfernt aufgestellt werden. Problematisch könnte hier, die Strahlungswärme vom brennenden Tank werden, da genau die Seite des Tanks vermehrt gekühlt werden muss, welche vom Tankbrand bestrahlt wird.

¹⁴ Nach Auskunft im Bereich der freiwilligen Feuerwehren in Stmk und NÖ

¹⁵ Datenblatt RM24 der Firma Rosenbauer, August 2017

5 Szenario VCE

Für die Durchführung einer Auswirkungsbetrachtung einer Vapour Cloud Explosion (VCE) eines Propangas-Sattelauflegers schlägt die TNO in ihren „Coloured Books“ verschiedene Ansätze vor. Einerseits Methoden, die die Energiefreisetzung im Verhältnis zu TNT setzen, andererseits Modellierungen, welche physikalische Basisgleichungen verwenden und Hindernisse und Teilverdämmungen einbeziehen. In der vorliegenden Arbeit wurde das TNT-Äquivalenz-Modell angewendet, da dies eine anerkannte Methode zur Abschätzung der Druckwirkung ist. Vergleichend wurde danach die Multi-Energie-Methode durchgeführt, um Unterschiede hervorzuheben und dadurch die Anwendbarkeit in der Katastrophenschutzplanung zu untersuchen. Diese Methode bezieht die Umgebung mit ein, in dem zwischen verdämmten und unverdämmten Bereichen unterschieden wird und dadurch ein der Wirklichkeit getreueres Bild entstehen soll.

Bei dem angenommenen Szenario handelt es sich um einen Sattelaufleger zum Transport von druckverflüssigten Gasen im Straßenverkehr in der Europäischen Union, entsprechend der Richtlinie 96/53EG (vgl. [59]). Es handelt sich um einen Sattelzug mit drei Achsen mit einem Füllgewicht von 22 Tonnen, bei einem zulässigen Gesamtgewicht von 28 Tonnen.

5.1 TNT-Äquivalenz-Methode

Die vorliegende Berechnung der Auswirkungsbetrachtung einer VCE eines Propangas-Sattelauflegers basiert auf der TNT-Äquivalenz-Methode, beschrieben in den „Coloured Books“ der TNO. Hierbei werden die Auswirkungen von Energiefreisetzen (Entspannung druckgelagerter Gases, Sprengstoffexplosionen usw.) mit denen von TNT-Sprengungen verglichen. Dabei bilden Erkenntnisse über die Wirkung von Explosionsstoffe die Grundlage. Ein wesentlicher Unterschied zwischen einer Explosion eines Sprengstoffes und einer Explosion eines entzündlichen Gases ist die Brisanz. Der zertrümmernde Effekt auf eine Umgebung wird durch die Brisanz beschrieben, welche von der Ladungsdichte (Energie pro Volumen) und der Detonationsgeschwindigkeit (Umsetzungsgeschwindigkeit) abhängt. [60] Sie kommt in einer kurzen Druckwelle zum Ausdruck. Für das Äquivalent werden im Allgemeinen Werte zwischen 4.190 kJ/kg und 4.650 kJ/kg angegeben. [11]

Die für die Auswirkungsbetrachtung getroffenen Annahmen zur Berechnung einer VCE eines Sattelauflegers sind in Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13: Annahmen VCE – TNT-Äquivalenz-Methode

Sattelaufleger	Bei dem Sattelaufleger handelt es sich um einen Sattelzug mit drei Achsen mit einem Füllgewicht von 22 t. Die Gesamtlänge beträgt 16,5 m.
Produkt	Propangas ist ein hochentzündliches, geruchloses Gas, welches als Energiequelle verflüssigt gelagert wird und zur Gruppe der Kohlenwasserstoffe gehört. Zum Zeitpunkt der Zündung ist ein Viertel des Tankinhaltes ausgetreten.
Zündung	Die Zündung erfolgt nachdem $\frac{1}{4}$ des Tankinhaltes ausgeströmt ist. Als Zündquelle wird eine heiße Oberfläche angenommen.

Umgebung	Rund um den LKW wird ein freies Feld, ohne Bebauung angenommen. Dies bedeutet aber dass es keinen Gebäudeschutz udg. gibt.
Äquivalenzwert TNT	Als Äquivalenzwert für TNT werden Werte zwischen 4.190 kJ/kg und 4.650 kJ/kg angegeben. [11] Für die vorliegende Berechnung wurde ein Wert von 4,65 MJ/kg angenommen.
Positiv phase t_d (Dauer der Druckwelle)	Die Druckwelle von VCEs hat im Gegensatz zu Sprengstoffen eine längere Dauer. Die Dauer der positiven Phase einer VCE beträgt zwischen 100 und 300 ms [11]. Roberts und Pritchard fanden durch ihre Untersuchungen heraus, dass die t_d in Flixborough 200 ms betrug. [61]
Bevölkerungsdichte	Als Bevölkerungsdichte wurde eine durchschnittliche Stadt mit 2.200 EW/km ² angenommen (vergleichbar mit Graz, Verona, Mannheim, Ludwigshafen oder Gijón). Die Verteilung ist gleichmäßig über die gesamte Fläche.
Mensch	Als Betroffener wird ein Mann mit einem Gewicht von 75 kg und einem Alter von 35 Jahren angenommen. Der Betroffene steht aufrecht, d.h. die Druckwelle trifft parallel auf und wird durch fehlende Gebäude nicht reflektiert.
Keine Folgeschädenbetrachtung	In der Berechnung werden keine Folgeschäden, wie z.Bsp. Auswirkungen durch Trümmerflug, betrachtet.

Die Berechnung der Druckauswirkung erfolgte in zwei Schritten. Zu Beginn wurde das TNT-Äquivalent berechnet um daraus den Spitzenüberdruck abzuleiten. Im zweiten Schritt konnten so die Auswirkungen auf die Bevölkerung berechnet werden. Die Rechenschritte sind den TNO Büchern (Yellow Book, vgl. [11], Green Book, vgl. [21]) zu entnehmen und werden hier nicht genauer beschrieben.

Abbildung 26 zeigt den herrschenden Überdruck auf Grund der Druckwelle in Abhängigkeit vom Abstand zum Sattelaufleger.

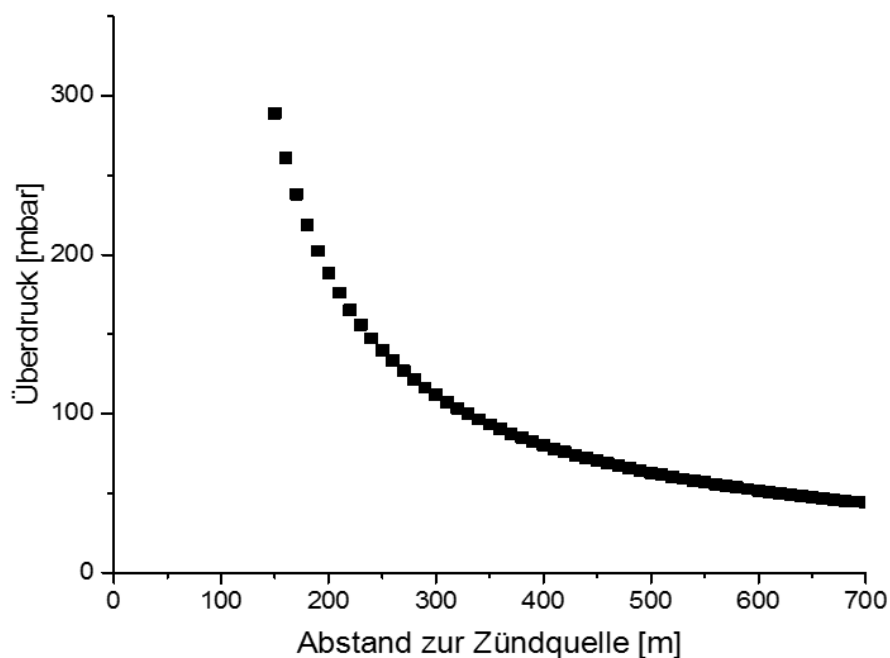


Abbildung 26: Druck in Abhängigkeit vom Abstand zur Zündquelle (TNT-Äquivalenz-Modell)

Van den Berg stellt fest, dass die Brisanz einer VCE beim TNT-Äquivalenz-Modell stark überschätzt wird, und daher nur bei „average major incident conditions“ gültig ist, da diese auf solch einer Annahme fußen. Ergebnisse sind nach van den Berg nur für weite Abstände mit Überdrücken kleiner 30 kPa gültig. [62] Dies konnte auch bei der vorliegenden Berechnung festgestellt werden, da im Nahbereich nicht plausible Ergebnisse berechnet wurden. Das oben stehende Diagramm zeigt daher nur die Werte, welche im Gültigkeitsbereich liegen.

5.2 Multi-Energy-Methode

Die vorliegende Berechnung der Auswirkungsbetrachtung einer VCE eines Propangas-Sattelauflegers basiert auf der Multi-Energy-Methode, beschrieben in den „Coloured Books“ der TNO. Die Multi-Energy-Methode kann nur für die Berechnung der Druckparameter bei unverdämmten Gaswolkenexplosionen angewendet werden, d.h. VCEs in Räumen oder verbauten Bereichen müssen mit anderen Methoden (vgl. hierzu Methode von Brandley und Mitcheson oder CFD-Modellierungen) kalkuliert werden. [11] Grundsätzlich unterscheidet diese Methode zwischen unverdämmter und verdämmter Region, welche, je nach Umgebungsform verschieden, angenommen werden muss. [62] Auf Grundlage der berechneten Dimension der entstehenden Gaswolke wurde die aus der Zündung dieser entstehende Druckwirkung abgeschätzt, um somit den Schaden, der aufgrund des Druckes auftritt zu quantifizieren.

Um eine Berechnung durchführen zu können, müssen Annahmen über das Wetter udg. getroffen werden. Die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zur Berechnung einer VCE eines Sattelauflegers sind in Tabelle 14 ersichtlich.

Tabelle 14: Annahmen VCE – Mulit-Energy-Methode

Wetter	Zum Zeitpunkt des Behälterberstens herrscht schönes Wetter bei einer Umgebungstemperatur von 15 °C und einer relativen Luftfeuchte von 45%.
Umgebungsbedingungen	Für die Berechnung wurde ein Luftdruck von 1250 hPa bei einer Temperatur von 15 °C angenommen.
Sattelaufleger	Bei dem Sattelaufleger handelt es sich um einen Sattelzug mit drei Achsen mit einem Füllgewicht von 22 t. Die Gesamtlänge beträgt 16,5 m.
Produkt	Propangas ist ein hochentzündliches, geruchloses Gas, welches als Energiequelle verflüssigt gelagert wird. Es gehört zur Gruppe der Kohlenwasserstoffe und besitzt

	<p>eine Kettenlänge von drei C-Atomen. Für die Berechnung wurde zum Zeitpunkt der Zündung die Mischung Propan-Luft bei einem stöchiometrischen Volumenanteil von 4 % angenommen.</p>
Verdämmter Bereich	<p>Als verdämmter Bereich wird das Volumen unter dem Sattelaufleger angenommen. Dies ergibt ein Volumen mit einer Länge von 16,5 m, einer Breite von 2,6 und einer Höhe von 1,2 m.</p>
Umgebung	<p>Rund um den LKW wird ein freies Feld, ohne Bebauung angenommen. Dies bedeutet aber dass es keinen Gebäudeschutz udg. gibt.</p>
Zündung	<p>Die Zündung erfolgt nachdem $\frac{1}{4}$ des Tankinhaltes ausgeströmt sind. Als Zündquelle wird eine heiße Oberfläche angenommen.</p>
Bevölkerungsdichte	<p>Als Bevölkerungsdichte wurde eine durchschnittliche Stadt mit 2.200 EW/km² angenommen (vergleichbar mit Graz, Verona, Mannheim, Ludwigshafen oder Gijón). Die Verteilung ist gleichmäßig über die gesamte Fläche.</p>
Mensch	<p>Als Betroffener wird ein Mann mit einem Gewicht von 75 kg und einem Alter von 35 Jahren angenommen. Der Betroffene steht aufrecht, d.h. die Druckwelle trifft parallel auf und wird durch fehlende Gebäude nicht reflektiert.</p>
Keine Folgeschädenbetrachtung	<p>In der Berechnung werden keine Folgeschäden, wie z.Bsp. Auswirkungen durch Trümmerflug, betrachtet.</p>

Die Berechnung der Druckauswirkung erfolgte in zwei Schritten. Zu Beginn wurde die entstehende Gaswolke berechnet, um daraus die Zündung und den dadurch entstehenden Druck zu quantifizieren. Aus dem so erhaltenen Spitzendruck und dessen Verlauf wurden die Auswirkungen auf die Bevölkerung evaluiert. Die Rechenschritte sind den TNO Büchern (Yellow Book, vgl. [11], Green Book, vgl. [21]) zu entnehmen und werden hier nicht genauer beschrieben. In Abbildung 27 ist schematisch das Multi-Energy-Berechnungsmodell ersichtlich.

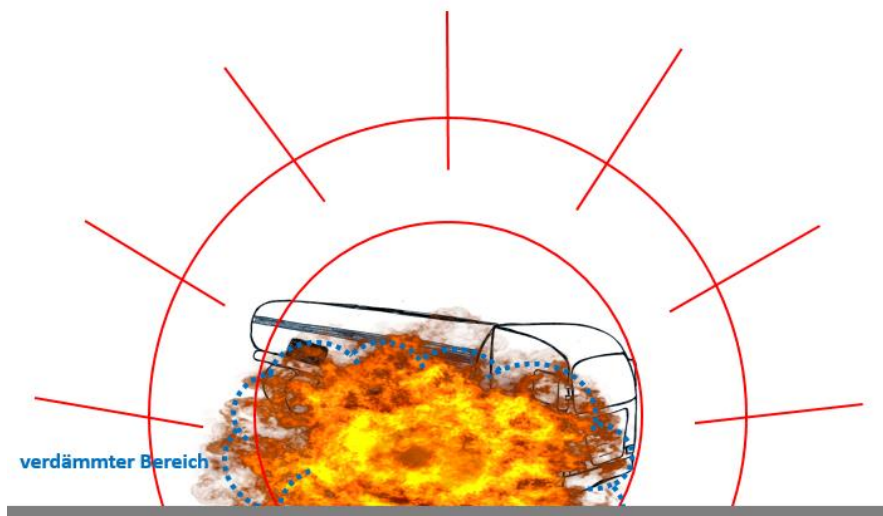


Abbildung 27: Multi-Energy-Berechnungsmodell

Abbildung 28 zeigt den herrschenden Überdruck auf Grund der Druckwelle in Abhängigkeit vom Abstand zum Sattelaufleger.

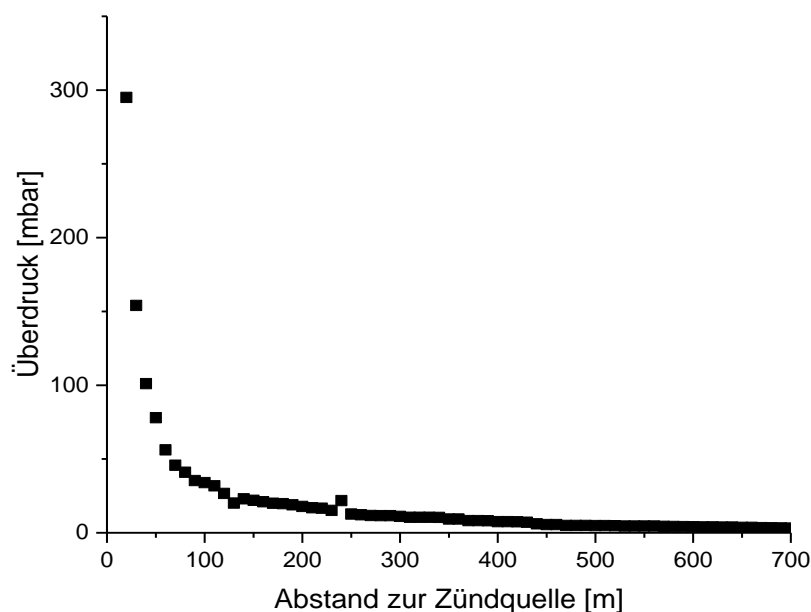


Abbildung 28: Druck in Abhängigkeit vom Abstand zur Zündquelle (Multi-Energy-Modell)

5.3 Auswirkungsbetrachtung VCE

Für das Szenario VCE ist nach dem Österreichischen Bundesländer-Arbeitskreis Seveso die Auswirkung Druckwelle zu betrachten. [19] Die Auswirkungsberechnung erfolgte nach dem „Green Book“ der TNO (vgl. [21]) und wurde sowohl für die TNT-Äquivalenzmethode, als auch für die Multi-Energy-Methode durchgeführt.

Als Zündquelle wurde bei der Berechnung eine heiße Oberfläche angenommen, welche sich am LKW befindet. In Österreich ist die Richtlinie 2012/18/EU (Seveso-III-Richtlinie) anzuwenden, welche sich mit der Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen beschäftigt. Um die Anwendung dieser Richtlinie zu erleichtern verfasste der Bundesländer-Arbeitskreis Seveso 2015 die sogenannte BLAK-Empfehlung, welche sich mit „Angemessenen Sicherheitsabständen“ auseinandersetzt. Laut dem Arbeitskreis gilt bei Belange der Raumordnung für die Gefahrenklasse (CLP) „entzündbare Flüssigkeiten; entzündbare Flüssigkeiten (Dämpfe)“ beim Szenario „UVCE der gesamten nach einer Minute freigesetzten Masse aus der Leckage mit dem größten Massenstrom“ der Beurteilungswert 0,05 bar (irreversibler Personenschaden). [19] Ein Unterschied ergibt sich in der Parameterannahme: Laut BLAK-Empfehlung ist für die Auswirkungsberechnung einer UVCE die Menge zu berücksichtigen, welche innerhalb von 60 s austritt. Die Zündung ist an der Austrittsstelle anzunehmen [19].

Um einen Schaden zu bewerten gibt es neben den Grenzwerten, basierend auf Druckwerten, auch Probit („probability unit“) -Beziehungen, welche angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Folge zu erwarten ist. Die Ergebnisse der Auswirkungsbetrachtung mit solchen Probit-Funktionen geben die Wahrscheinlichkeit, dass 50 % der Bevölkerung im betrachteten Areal betroffen sind, wieder.

Die Schadenswahrscheinlichkeit ergibt sich dabei aus [6]:

$$P = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \Phi(Y - 5)$$

In der Wahrscheinlichkeitsgleichung ist Φ die Standardnormalverteilung.

Mit steigender Intensität des schadensverursachenden Faktors Druck wächst die Wahrscheinlichkeit des Schadens, daher gibt die Verwendung einer Probitfunktion im Vergleich zum Grenzwert eines Stoffes den größeren Realismus wieder. Um Erkenntnisse aus Bereichen wie Medizin und Toxikologie in ingenieurtechnischen Berechnungen einfließen zu lassen, ist die Verwendung solcher Probitbeziehungen der geeignete Weg [6].

Für die Auswirkungsbetrachtung wurden zwei Funktionen ausgewählt, die Funktion für „lung damage“, also „Tod durch Lungenödem auf Grund des Überdrucks“, und die Probitfunktion für den Schaden „ear-drum rupture“, also den Trommelfellriss. Ausgewählt wurden diese beiden Funktionen auf Grund der medizinischen Relevanz. Das Mittelohr ist vor der Lunge das sensibelste Organ bei Explosionsverletzungen, entscheidend für das Überleben sind jedoch die Auswirkungen des Barotraumas auf die Lunge. [25] Bei den Probitbeziehungen ist zu beachten, dass diese immer nur eine Ja/Nein-Aussage geben. Das bedeutet, dass die Funktion „Tod durch Lungenödem“ nicht angibt wie viele Betroffene von den Überlebenden an einem Trommelfellriss leiden. Des Weiteren ist zu beachten, dass Probitbeziehungen nicht unterscheiden, ob ein Betroffener schon am größeren Schaden leidet, d.h. dass ein Toter durch Lungenödem auch einen Trommelfellriss rechnerisch erleiden kann. [21] Die verwendeten Probitfunktionen lauten:

Tod durch Lungenödem: [21]

$$\text{Probit} = 5,0 + 5,74 * \ln(S)$$

Trommelfellriss: [21]

$$\text{Probit} = -12,6 + 1,524 * \ln(Ps)$$

Der Bundesländer-Arbeitskreis Seveso 2015 gibt in seiner BLAK-Empfehlung für einen Überdruck von 170 mbar eine Wahrscheinlichkeit von 1 % für einen Trommelfellriss an, bei 2 bar treten bei 99 % Lungenrisse auf. Keine Verletzungen im offenen Gelände (wie bei der Berechnung die getroffene Annahme) treten bei einem Überdruck bis 70 mbar auf. Bei einer Druckwelle mit 6 mbar ist der auftretende Druck vergleichbar mit einem Orkan der Windstärke 12. [19]

Verletzungsmuster von Explosionen können je nach Position des Opfers und nach Stärke des reagierenden Materials variieren. Eine gängige Klassifikation teilt die Verletzungen anhand der Ursachen in vier Kategorien ein. Primäre, sekundäre, tertiäre und quartäre Explosionsverletzungen. Unter den primären Explosionsverletzungen versteht man die Verletzungen, welche auf Grund der hohen Druckbelastung durch die Druckwelle auftreten und zu Verletzungen der luftgefüllten Organe (Mittelohr, Lunge, Gastrointestinaltrakt) führt. Äußere Verletzungen sind dabei selten zu beobachten. Sekundäre Explosionsverletzungen treten vorwiegend bei terroristischen Aktivitäten auf und bezeichnen penetrierende und stumpfe Verletzungen, welche durch das Wegschleudern von Projektilen und Splintern, die aus der Hülle des Sprengstoffes stammen, auftreten. Werden Personen durch die Druckwelle umhergeschleudert spricht man von tertiären Explosionsverletzungen. [25] Ein Überdruck von 10 mbar entspricht einem Windstoß, welcher eine stehende Person umreißen kann [19] und

dadurch zu tertiären Verletzungen führen könnte. Alle oben nicht genannten Verletzungs- und Erkrankungsursachen, die im Zusammenhang mit einer Explosion auftreten, werden zu den quartären Explosionsverletzungen gezählt. Hierzu zählen u.a. auch thermische oder chemische Verbrennungen, aber auch die Exazerbation vorbestehender internistischer Erkrankungen durch Stress, Schmerz oder Angst. [25]

Die Versorgung von Verletzten richtet sich nach den üblichen Regeln der Behandlung von Verletzungen, die durch Gewalteinwirkung entstanden sind. Weiters sind otoskopische Untersuchungen notwendig, um Patienten identifizieren zu können, bei denen die Gefahr späterer primärer Verletzungen infolge des Barotraumas besteht. Bei Patienten mit keinen offensichtlichen Verletzungen, aber mit rupturiertem Trommelfell sollte die Sauerstoffsättigung für sechs bis acht Stunden überwacht werden. [23] Ein stationärer Krankenhausaufenthalt ist daher nötig. Laut Luiz et al ist für das Überleben instabiler Personen das Zeitintervall, in dem der Patient einer apparativen Diagnostik und definitiven chirurgischen Versorgung zugeführt wird, maßgeblich entscheidend [25]. Der schnelle Abtransport der Betroffenen vom Unfallort in ein Krankenhaus und die anschließende Versorgung beeinflusst daher die Überlebenschancen bei einem Unglück und sollte aus diesem Grund gut geplant werden.

Neben Patienten mit Barotrauma gibt es bei einem Explosionsereignis Betroffene, welche an einem Trauma infolge von Trümmerflug u.a. leiden. Für die medizinische Akutversorgung im Schadensgebiet sowie für die klinische Behandlung entsteht ein erhöhter bis hoher Bedarf an Sanitätsmaterial, der nicht durch die pharmazeutische Regelversorgung abgedeckt werden kann [29]. In Tabelle 15 ist der Bedarf zur medizinischen Akutversorgung von 100 Notfallpatienten, vorgeschlagen von der Arbeitsgruppe Pharmazie für Not- und Katastrophenfälle in der Deutschen Gesellschaft für Katastrophenmedizin e.V., angeführt.

Tabelle 15: Notfallbevorratung zur Akutversorgung von 100 Trauma-Patienten [29]

Wirkstoff	Arzneimittel	Arzneiform	Gehalt	Inhalt	Menge
Esketamin-HCl	Ketanest® S	Ampulle	5 mg/ml	5 ml	250
Esketamin-HCl	Ketanest® S	Ampulle	25 mg/ml	10 ml	50
Beclomethason	Junik®/ Ventolar®	Aerosol	100 µg	15 ml	150
Alkohole u.a.	Kodan® Tinktur Forte	Spray		250 ml	10

Vollelektrolyte	Ringer-Lactat-Lösung	Infusionslösung		1.000 ml	240
HES 200.000	HAES-steril® 6 %	Infusionslösung	6 %	500 ml	80
Diazepam	Valium® u.a.	Ampulle	10 mg	2 ml	100
Diazepam	Valium® u.a.	Tablette	10 mg		200
Medizinprodukte				Größe	Menge
Infusionsgerät					150
Einmalspritzen				2 ml	200
				5 ml	200
				10 ml	200
Einmalkanülen				Gr. 1	300
				Gr. 2	300
Venenverweilkanülen				Gr. 1,0	100
				Gr. 1,2	100
Heftplaster				1,25 cm	20
Staubbinden					> 10
Einmalhandschuhe				klein	200
				mittel	600
				groß	200

5.3.1 Auswirkungen nach TNT-Äquivalenz-Methode

Das Schadensausmaß basierend auf der Auswirkungsbetrachtung nach der TNT-Äquivalenz-Methode ist Tabelle 16 zu entnehmen.

Tabelle 16: Schadensausmaß VCE nach TNT-Äquivalenz-Methode

Schadensausmaß VCE nach TNT-Äquivalenz-Methode	
Anzahl Tote ¹⁶ durch Lungenödem	0
Anzahl Trommelfellriss ¹⁶	9

5.3.2 Auswirkungen nach Multi-Energy-Methode

Das Schadensausmaß basierend auf der Auswirkungsbetrachtung nach der Multi-Energy-Methode ist Tabelle 17 zu entnehmen.

Tabelle 17: Schadensausmaß VCE nach Multi-Energy-Methode

Schadensausmaß VCE nach Multi-Energy-Methode	
Anzahl Tote ¹⁶ durch Lungenödem	0
Anzahl Trommelfellriss ¹⁶	0

5.3.3 Vergleich beider Berechnungsmethoden

Sowohl TNT-Äquivalenz-Methode als auch die Multi-Energy-Methode geben einen guten Überblick über die Auswirkungen einer VCE. Im Vergleich fällt auf, dass das TNT-Äquivalent die Druckwelle überschätzt, mehr Schaden ist die Folge. Die Energiefreisetzung bei VCEs dauert im Gegensatz zu TNT-Sprengungen über längere Zeitspannen an, was sich bei den Auswirkungen (Strukturschäden) widerspiegelt. [61]

¹⁶ Diese (Minimal-)Anzahl tritt sicher auf, da sie dem LD₅₀ entspricht, d.h. 50 % der Bevölkerung sind betroffen. Eine höhere Anzahl kann aber auftreten.

Ein direkter Vergleich beider Methoden ist auf diese Weise nicht möglich, da die Anzahl der Betroffenen nicht direkt vergleichbar wäre, da das TNT-Modell erst ab einem Abstand von 150 m von der Zündquelle für den berechneten Fall Gültigkeit besitzt. Aus diesem Grund fehlt die Auswirkungsbetrachtung auf einer Fläche von 0,07 km². In Abbildung 29 ist eine Gegenüberstellung der beiden Berechnungsmethoden angeführt.

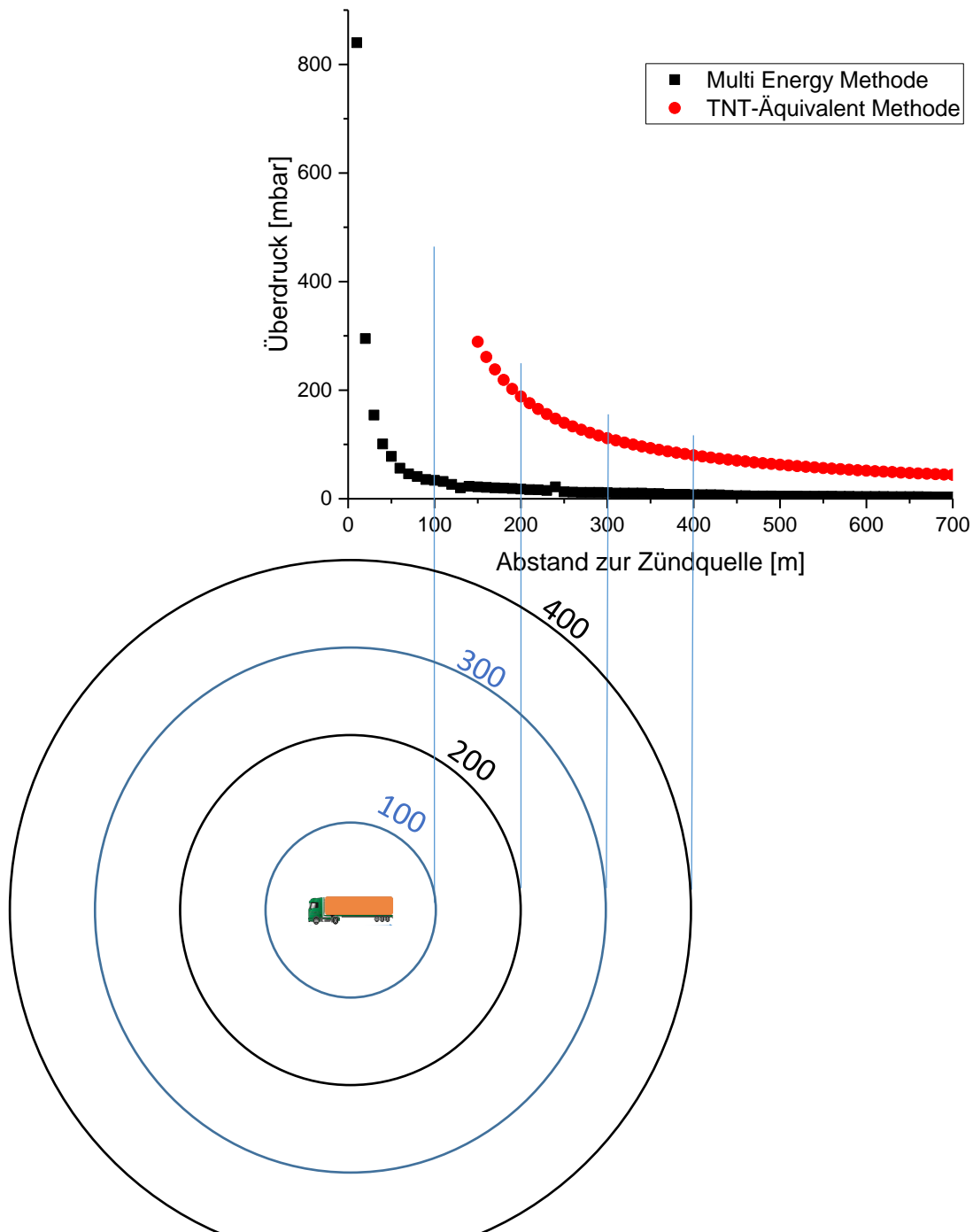


Abbildung 29: Vergleich TNT-Äquivalenz-Modell und Multi-Energy-Methode

Die Anwendbarkeit beider Methoden ist je nach Situation gegeben: Beide Methoden haben ihre Daseinsberechtigung mit ihren Vor- und Nachteilen. Für eine Planung im Vorfeld, ohne Zeit- und Ressourcendruck, sollte die Verwendung der Multi-Energy-Methode sicherlich in Betracht gezogen werden. Die Explosionsstärke wird bei diesem Modell auf den Brennstoff und die Umgebungscharakteristik bezogen. [63] Die zwei Gefährdungsparameter bei einer Explosion Überdruck und Impuls werden genauer betrachtet: Diese Parameter charakterisieren die Verletzungen, Strukturschäden und Umweltschäden. [63] Da im Impuls die positive Dauer der Druckwelle enthalten ist, ist die genaue Betrachtung dieses wichtig. Das TNT-Äquivalenz-Modell setzt diese Dauer mit der einer Sprengstoffreaktion gleich. Die Druckwelle von Sprengstoffen ist im Gegensatz zu Explosionen entzündlicher Gase von sehr kurzer Dauer [61]. Ein weiterer Vorteil des Modelles ist die Betrachtung der Reaktivität des Brennstoffes, welche bei der Multi-Energy-Methode in die Berechnung einfließt. [64]

Im Gegensatz hierzu bietet die TNT-Äquivalenz-Methode ein Tool zur schnellen, überschlagsmäßigen Bewertung eines Szenarios. Der einfache Vergleich mit einer Sprengwirkung verringert den Zeitaufwand enorm und lässt eine Abschätzung schnell zu. Eine Überschätzung durch die Methode führt zu mehr Sicherheit, wodurch die Anwendbarkeit sicher plausibel ist. Der Bundesländer-Arbeitskreis Seveso 2015 nennt in seiner BLAK-Empfehlung die TNT-Äquivalenz-Methode als Methode der Wahl für Belange der Raumordnung. [19]

6 Zusammenfassung

Zum Zwecke der Raumordnung ist es in Österreich vorgesehen, dass Störfallszenarien von vernünftigerweise anzunehmenden Störfällen im Umfeld von Industrieanlagen entwickelt und die Auswirkung dieser abgeschätzt werden. Nicht in Betracht gezogen wird bei dieser Planung der Katastrophenschutz, welcher beim Eintritt von Störfällen, welche Auswirkungen außerhalb von Betriebsgeländen haben, aktiv wird. Eine Planung in diesem Bereich ist aber essentiell für die Bewältigung katastrophaler Schadenslagen. Gegenwärtig liegt die Katastrophenschutzplanung in den Händen der Behörden. Die Gefahrenabwehr findet sich aber bei großen, nicht kommunalen Schadenslagen in einer Rolle wieder, auf welche sie unzureichend oder nicht vorbereitet wurde und daher falsche Ausrüstung und Material vorrätig sind bzw. auch die falsche Vorgehensweise wiederzufinden ist. Eine Lösung wäre hier eine bessere Ressourcenplanung im Vorfeld und die Kommunikation dieser zur kommunalen Ebene hin. Als Planungsgrundlage für die Gefahrenabwehr könnten ähnliche Methoden wie die in der Raumplanung angewendet und mit der durchgeführten Auswirkungsbetrachtung der Schaden abgeschätzt werden. Einen Vorschlag zur Modellbildung und Berechnung von Störfallszenarien bietet die TNO (Niederländische Organisation für angewandte Naturwissenschaften) in ihren „Coloured Books“, in welchen neben Berechnungsvorschlägen auch fundierte Forschungsergebnisse von bereits durchgeführten sicherheitstechnischen Studien zu finden sind. Um die Anwendbarkeit der Berechnungsmethoden und deren Ergebnisse in Bezug auf die Katastrophenschutzplanung untersuchen zu können, wurden drei Szenarien (BLEVE, VCE, Tankbrand) nach dem „Yellow Book“ der TNO berechnet und die Auswirkungen mit Hilfe sogenannter Probit-Funktionen, beschrieben im „Green Book“ der TNO, abgeschätzt. Durch die Kenntnis der Auswirkungen soll es der Gefahrenabwehr möglich sein, Planungen bezüglich Ausrüstung, Material und Personal durchführen zu können.

Auftretende Probleme konnten schon bei der Durchführung der vorliegenden drei Szenarien aufgezeigt werden. Das Ergebnis der Berechnung hängt sehr stark von den zugrundeliegenden Annahmen ab, welche zu Beginn der Berechnung getroffen werden müssen, wie zum Beispiel Stoffdaten und Umgebungsbedingungen, aber auch die Auswahl des Szenariums selbst lässt Variationen zu. Durch den Erhalt eines anscheinend plausiblen Ergebnisses wird Genauigkeit vorgetäuscht, welche in der Realität nicht gegeben ist. Das Szenario selbst wird sehr stark durch die Umgebung und die bei der Schadenslage herrschenden Umgebungsbedingungen beeinflusst, wodurch eine allgemein gültige Planung für den Katastrophenschutz fragwürdig erscheint. Keine Planung im Gegensatz dazu ist aber auch keine Lösung. Zwar kann auf bekannte Schadensfälle zurückgegriffen werden, dies erfordert aber wiederum eine sehr genaue Aufarbeitung der Ereignisse. Daher erscheint eine Kombination von Berechnungsdurchführung mit Aufarbeitung von Realfällen als die ideale Lösung für den Katastrophenschutz.

Oft gibt es durch das Setzen von richtigen Maßnahmen zur richtigen Zeit eine Schadensabschwächung, die durch die Berechnung nicht betrachtet wird. Als Beispiel kann hier die Evakuierung im Fall einer BLEVE genannt werden. Bei der Berechnung dieser kann im durchgeführten Fall mit 240 Verletzten gerechnet werden, diese Zahl kann aber durch effektive Evakuierungsmaßnahmen auf keinen Betroffenen gesenkt werden.

Neben der Maßnahmensetzung werden andere Parameter nicht betrachtet bzw. ungetreu der Realität gesetzt. Die Verdämmung bei VCEs variiert je nach Umgebung, wodurch die auftretende Druckwirkung abgeschwächt oder verstärkt wird. Eine Planungsberechnung für jede Umgebung ist aber nicht zielführend, daher sollte das Ergebnis richtig interpretiert und immer die Eingangsparameter im Kopf behalten werden.

Beurteilungswerte zum Zwecke der Raumordnung sind in der Regel so angesetzt, dass sie genügend Sicherheit aufweisen. Dies zeigt sich auch bei der Berechnung des Tankfeuers, bei welchem der Sicherheitsradius rechnerisch sehr weit weg vom Szenario gezogen wird. Vergleicht man hier bekannte Großbrände und deren Wärmestrahlung wird festgestellt, dass die Gefahrenabwehr in der Hitze des Gefechtes sehr wohl näher am Brandherd arbeiten kann. Die Überprüfung dieser Aussage sollte in einem nächsten Schritt durch eine genauere Untersuchung von Großbränden stattfinden. Damit könnten Beurteilungswerte für die Katastrophenschutzplanung festgelegt werden.

Die Verwendung von Auswirkungsberechnungen von Störfällen für die Planung im Katastrophenschutz weist durch die Auswahl der Eingangsparameter und die Wahl des verwendeten Berechnungsmodelles sicherlich Unsicherheiten auf. Die in der Raumordnungsplanung verwendeten Beurteilungswerte sind für Planungen im Bereich des

Katastrophenschutzes auf keinen Fall zu gebrauchen. Die großen Sicherheitsfaktoren, welche in diesen Werten einfließen, geben kein reales Bild wieder, da auch bei geringeren Abständen sicheres Arbeiten der Gefahrenabwehr möglich ist. Dies zeigte sich auch beim Vergleich eines Großbrandes in Jahr 2015, welcher mit den Berechnungsmodellen nachgerechnet wurde. Die Beurteilungswerte überschätzen die Abstände dermaßen, dass keine Maßnahmen wirksam werden hätten dürfen. Aufarbeitungen des Realbrandes zeigen aber, dass die Gefahrenabwehr sehr wohl bei geringeren Radien sicher arbeiten konnte.

Für Planungsmaßnahmen im Bereich Katastrophenschutz ist die Verwendung von gegenwärtig angewendeten Berechnungsmethoden im Bereich Raumplanung sicherlich nicht optimal. Die Methoden geben aber einen guten Überblick und somit einen Startpunkt für die Planung. Die Verwendung dieses Tools gehört in die Hände von Experten, da das Ergebnis eine Genauigkeit vortäuscht, die mitunter der Realität nicht entspricht. Bei der Interpretation der Ergebnisse sollten die Eingangsparameter miteinbezogen werden um ein plausibles und in sich schlüssiges Bild zu erhalten, mit welchem eine Katastrophenschutzplanung stark unterstützt werden kann.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Europäisches Parlament (04.07.2012):Richtlinie zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen RL 2012/18/EU.
- [2] Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (2015):Verordnung über die Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen in Betrieben (Industrieunfallverordnung) IUUV, revised 26.08.2017.
- [3] Richter, B.:Anlagensicherheit, Hüthig, Heidelberg, 2007.
- [4] Preiss, R.:Methoden der Risikoanalyse in der Technik, Edition TÜV Austria, Wien, 2017.
- [5] TNO, <https://www.tno.nl>.
- [6] Hauptmanns, U.:Prozess- und Anlagensicherheit, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 2013.
- [7] Deutschen Enzyklopädie:LD50-Wert, <http://www.enzyklo.de/Begriff/LD50-Wert>, abgerufen am 26. Oktober 2017.
- [8] Gyenes, Z., Wood, M.H., Struckl, M., 2017:JRC Technical Reports Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks, European Commission.
- [9] Internationales Eisenbahntransportkomitee (01.07.2006):Übereinkommen über den internationalen Eisenbahnverkehr COTIF, revised 03.06.1999.
- [10] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL):Methodikbeispiel für eine Risikoermittlung einer Flüssiggas-Tankanlage, Bern,1996.

- [11] Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek, kurz TNO:Yellow Book, Niederlande, 2005.
- [12] Crowl, D. A.:Understanding explosions, Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, New York, 2003.
- [13] Rudy Pospisil:Propane Rail Car Fire May Cause Explosion(5,000 evacuated), <http://theprovince.com/news/propane-rail-car-fire-may-cause-explosion5000-evacuated>, abgerufen am 24. August 2017.
- [14] Österreichischer Nationalrat (2012):Bundesgesetz über die Haltung von Mindestvorräten an Erdöl und Erdölprodukten (Erdölbevorratungsgesetz 2012) EBG 2012.
- [15] Erdöl-Lagergesellschaft m.b.H. (ELG), <https://www.elg.at/de/>, abgerufen am 24. August 2017.
- [16] gettyimages:Buncefield, <http://www.gettyimages.at/ereignis/firefighters-gain-control-over-blazing-tanks-at-british-oil-depot-56426254#in-this-handout-image-released-by-the-hertfordshire-police-force-the-picture-id56429247>.
- [17] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit):Gefahrgut, <https://www.bmvit.gv.at/verkehr/gesamtverkehr/gefahrgut/>, abgerufen am 26. August 2017.
- [18] alamy:Flixborough, www.alamy.de.
- [19] Österreichischer Bundesländer-Arbeitskreis Seveso:Grundlage zur Ermittlung von angemessenen Sicherheitsabständen für die Zwecke der Raumordnung Empfehlung Nummer 1, Linz,2015.
- [20] BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 1999:Study of the failure limits of a railway car filled with liquefied petroleum gas subjected to an open poolfire test Final report - BAM project number 3215, BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Available online at <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/docId/25778>.
- [21] Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek, kurz TNO:Green Book, Niederlande, 1992.
- [22] Statistik Austria:Bevölkerung nach Alter und Geschlecht, https://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/b_evoelkerungsstruktur/bevoelkerung_nach_alter_geschlecht/index.html#reiter_dynamic_Charts, abgerufen am 01. November 2017.

- [23] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe:Katastrophenmedizin Leitfaden für die ärztliche Versorgung im Katastrophenfall, Bonn, 2010.
- [24] Notmed:Verbrennungen, <http://www.notmed.info/mkcomb1..>, abgerufen am 29. Juni 2016.
- [25] Luiz, T., Lackner, C. K., Peter, H. and Schmidt, J.:Medizinische Gefahrenabwehr Katastrophenmedizin und Krisenmanagement im Bevölkerungsschutz, Urban & Fischer in Elsevier, München, 2015.
- [26] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe:Notfall- und KatastrophenPharmazie I, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn, 2009.
- [27] Jun Oda, MD, Masashi Ueyama, MD, Katsuyuki Yamashita, MD, Takuya Inoue, MD, Mitsuhiro Noborio, MD:Hypertonic Lactated Saline Resuscitation Reduces the Risk of Abdominal Compartment Syndrome in Severely Burned Patients, The Journal of Trauma, Injury, Infection, and Critical Care 60 (2006), 1, 64–71.
- [28] O'Mara MS1, Slater H, Goldfarb IW, Caushaj PF:A prospective, randomized evaluation of intra-abdominal pressures with crystalloid and colloid resuscitation in burn patients., The Journal of Trauma, Injury, Infection, and Critical Care 58 (2005), 5.
- [29] Wagner, W.:Notfall- und KatastrophenPharmazie II, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bonn, 2009.
- [30] Process Safety Verification:Review the Feyzin Disaster to see how this over pressure incident drove changes in the over protection standards., http://www.processsafetyverification.com.au/Presentations.html/?page_id=29, abgerufen am 15. Oktober 2017.
- [31] Center for Chemical Process Safety:Guidelines for evaluating the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVEs, Center for Chemical Process Safety of the AIChE, New York, NY, 1998.
- [32] French Ministry of the Environment:BLEVE in an LPG storage facility at a refinery, http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/FD_1_feyzin_GC_ang.pdf, abgerufen am 15. Oktober 2017.
- [33] saopaulo1:Crescent City Fire 1970 - Crescent City, IL, http://www.waymarking.com/waymarks/WMM23C_Crescent_City_Fire_1970_Crescent_City_ILhttp://www.waymarking.com/waymarks/WMM23C_Crescent_City_Fire_1970_Crescent_City_IL.

- [34] Adam Groves: CRESCENT CITY TRAIN DERAILMENT: JUNE 21, 1970, <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/93/Crescent%20City%20Train%20Derailment,%201970.pdf>, abgerufen am 15. Oktober 2017.
- [35] National Transportation Safety Board: Tank-Semitrailer Overturn, Explosion, and Fire, <http://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Pages/HAR7604.aspx>.
- [36] Van der Schaaf, J.B.R., Steunenbergh, C.F.: INVESTIGATION INTO THE CIRCUMSTANCES SURROUNDING AN ACCIDENT IN NIJMEGEN INVOLVING A TANKER, Institution of Chemical Engineers Symposium Series 80 (1983), N14 - N23.
- [37] BBC: Iran buries train blast dead, http://news.bbc.co.uk/2/hi/middle_east/3503447.stm.
- [38] the guardian: Scores dead in Iranian train blast, <https://www.theguardian.com/world/2004/feb/18/iran.markoliver>.
- [39] Lawrence George Palmer: Aboveground Fuel Oil Storage Tanks, Master's Thesis, Newark College of Engineering, New Jersey, 1973.
- [40] Thielmann UG: Brent Öl, <http://www.oelpreis.cc/brent-oel/>, abgerufen am 16. August 2017.
- [41] Iwata, Y., Koseki, H., Jannens, M. L., Takahashi, T.: Combustion Characteristics of Crude Oil, *Fire and Materials* 25 (2001), 1–7.
- [42] Mannan, S. and Lees, F. P.: *Loss prevention in the process industries Hazard identification, assessment and control*, Elsevier/Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2005.
- [43] Jiang, P., Lu, S.-X.: Pool Fire Mass Burning Rate and Fire Tilt Angle under Crosswind in Open Space, *Procedia Engineering* 135 (2016), 261–274.
- [44] Blinov, V. I., Khudiakov, G. N.: Certain Laws Governing Diffuse Burning of Liquids, *Fire Research Abstracts and reviews* 1 (1959), 41–44.
- [45] Mudan, K. S.: Thermal Radiation Hazards from Hydrocarbon Pool Fires, *Progress in Energy and Combustion Science* 10 (1984), 59–80.
- [46] Crocker, W.P., Napier, D.H.: Thermal Radiation Hazards of Liquid Pool Fires and Tank Fires. In : *Symposium on Chemical Engineering*, 159–183.
- [47] Markstein, G. H.: Radiative Energy Transfer from Turbulent Diffusion Flames, *Combustion and Flame* 27 (1976), 51–63.
- [48] Buettner, K.: Effects of Extreme Heat and Cold on Human Skin., *Journal of Applied Physiology* 3 (1951), 703–713.

- [49] ÖNORM ISO 6942, 01.08.2002:Schutzkleidung - Schutz gegen Hitze und Feuer.
Prüfverfahren: Beurteilung von Materialien und Materialkombinationen, die einer Hitze-Strahlungsquelle ausgesetzt sind.
- [50] ENTWURF ÖNORM EN 469, 01.09.2015:Schutzkleidung für die Feuerwehr -
Leistungsanforderungen für Schutzkleidung für die Brandbekämpfung.
- [51] Oswald, C., Putz, H.:Großbrand in Wildon, Blaulicht 64, 10-2015, 4–7.
- [52] Widetschek, O.:Aktuelles kommentiert, Blaulicht 64, 10-2015, 16.
- [53] Ulf Laessing:Two Massive Oil Tanks Have Been Burning In Libya For Days,
<http://www.businessinsider.com/r-two-oil-tanks-destroyed-at-libya-port-two-others-still-on-fire-2014-12?IR=T>, abgerufen am 14. Oktober 2017.
- [54] Gressmann, H.-J.:Abwehrender und anlagentechnischer Brandschutz, expert-Verl.,
Renningen, 2014.
- [55] ÖBFV - vorläufige Richtlinie VB-05, 09.07.1996:Löschmittelbedarf für Betriebsanlagen.
- [56] Holger de Vries:Brandbekämpfung mit Wasser und Schaum: Technik und Praxis
(Einsatzpraxis), ecomed Sicherheit, Landsberg, 2008.
- [57] BP Plc and Institution of Chemical Engineers:Liquid hydrocarbon storage tank fires,
Institution of Chemical Engineers, Rugby, 2005.
- [58] Norm DIN EN ISO 2719: 2003-09:Bestimmung des Flammpunktes - Verfahren nach
Pensky-Martens mit geschlossenem Tiegel.
- [59] Europäisches Parlament:Richtlinie zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen
für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden
Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im
grenzüberschreitenden Verkehr RL 96/53EG, revised 25.07.1996.
- [60] Klapötke, T. M.:Chemie der hochenergetischen Materialien, de Gruyter, Berlin, 2009.
- [61] Roberts, A.F., Pritchard, D.K.:Blast effect from unconfined vapour cloud explosions,
Journal of Occupational Accidents 3 (1982), 231–247.
- [62] van den Berg, A.C., Lannoy, A.:Methods for vapour cloud explosion blast modelling,
Journal of Hazardous Materials 34 (1993), 151–171.
- [63] Alonso, F.D., Ferradas, E.G., Perez, J.F.S., Anzar, A.M., Gimeno, J.R., Alonso,
J.M.:Characteristic overpressure-impulse-distanz curves for vapour cloud explosions
using the TNO Multi-Energy model, Journal of Hazardous Materials 137 (2006), 734–
741.

- [64] Baker, Q.A., Tang, M.J., Scheier, E.A., Silva, G.J.: Vapor Cloud Explosion Analysis, Process Safety Progress 15 (1996), 106–109.

8 Anhang

8.1 Das Unglück von Feyzin

In der Raffinerie Feyzin, im Süden von Lyon, Frankreich, geschah am 4. Jänner 1966 ein BLEVE-Unglück, welches neben hohen Sachschäden auch 18 Tote zur Folge hatte. Das Produktionsvolumen der Raffinerie Feyzin belief sich im Jahr 1966 auf 1,7 Millionen Petroleum. Ein Tanklager mit einem Fassungsvermögen von rund 13.100 m³ befand sich auch am Gelände um das produzierte LPG lagern zu können. Hierzu gab es vier Propangas-Kugelbehälter, vier Butangas-Kugelbehälter und zwei Tankbehälter mit je 150 m³ für Propan und Butan. Am Tag des Unglücks wurde der Kugeltank Nummer 443 gefüllt. Bei der Befüllung wurden durch Raffineriemitarbeiter regelmäßig Proben genommen, um die Qualität des LPGs überprüfen zu können. In Abbildung 30 ist die Anordnung der LPG-Kugeltanks ersichtlich. [31] [30] [32]

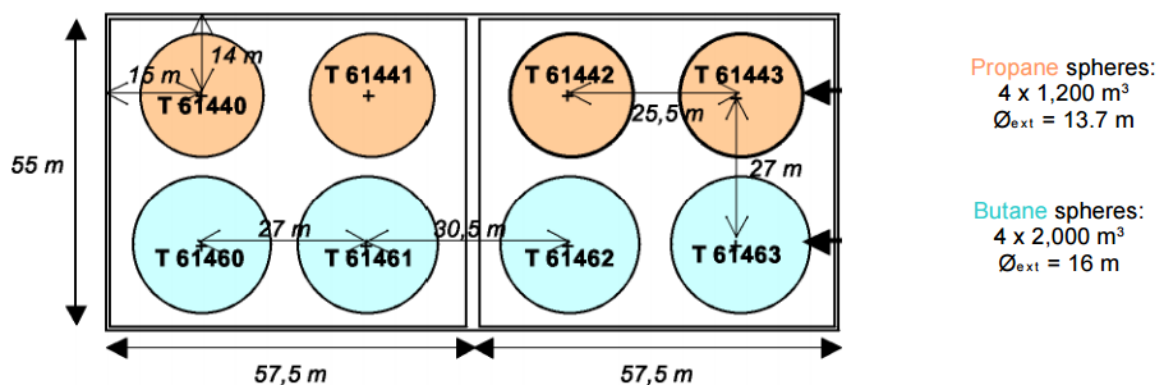


Abbildung 30: Tankanordnung Feyzin (Quelle: [32])

Der zeitliche Ablauf des Unglücks ist im Folgenden zusammengefasst:

Tabelle 18: Zeitlicher Ablauf Feyzin [32]

06:40	Start der Leckage. Bei der Probenentnahme kommt es zum Problem beim Verschließen des Ventils.
06:50	Die Leckage kann nicht gestoppt werden. Obwohl kein Wind geht, begünstigt die niedere Temperatur die Diffusion der Gaswolke. Eine 1 bis 1,5 m hohe Gaswolke wandert langsam Richtung Autobahn. Um 06:50 wird die Autobahn gesperrt.
07:05	Motoren der Pumpanlage werden abgestellt, um Zündquellen zu vermeiden.
07:15	Zündung der Gaswolke. Ein 160 m entferntes, auf der Ostseite des Tanks Nr. 443 fahrendes Fahrzeug entzündet die Gaswolke durch die heiße Oberfläche des Fahrzeuges.
07:16	Zündung der Lache unter dem Tank Nr. 443 durch die VCE. Daraufhin Start der Kühlung des Tanks durch die Feuerwehr.
07:45	Sicherheitsventil des Tanks 443 spricht an. Eine 10 m hohe Flamme bläst das Gas ab. Daraufhin stoppen die Feuerwehrmänner die Kühlung des Tanks und konzentrieren sich auf die umliegenden brennenden Tanks.
08:15	158 Personen befinden sich im Umkreis von 100 bis 120 m um den Tank. Zu dieser Zeit sind 15 Löschdüsen im Einsatz. Die Flammen um Tank 443 sind 40 m hoch; der Tank ist ungekühlt.
08:30	Durch die Wärmestrahlung ist es nicht möglich näher als 40 m zum Tank vorzudringen.
08:45	Kugeltank 443 explodiert in einer BLEVE. Der Feuerball ist einige Sekunden lang wirksam, 250 m im Durchmesser und erreicht eine Höhe von 400 m. 18 Tote (eine Person davon stirbt 4 Tage später

an den Folgen), 84 Verletzte (49 davon mussten stationär aufgenommen werden).

	Emergency Shut Down.
08:55	Evakuierung wird angeordnet. Kurz darauf explodiert Tank Nr. 442 in einer BLEVE. Die anderen Tanks werden auch zerstört. Keine weitere Person wird getötet.

158 Personen befanden sich zum Zeitpunkt der Katastrophe im Einflussradius der BLEVE, davon mussten 18 Tote beklagt werden. Unter den 18 Toten waren 11 Feuerwehrmänner, 2 Arbeiter, 3 Leiharbeiter, 1 Arbeiter der Nachbarfirma und der Autofahrer, an dem sich die erste Dampfwolke entzündete. Zu den 18 Toten gab es 84 Verletzte, wovon 49 Personen stationär im Krankenhaus aufgenommen werden mussten. 42 Personen waren über einen längeren Zeitraum (drei Monate) arbeitsunfähig. [32] [30]

Im Umkreis von 50 m wurden alle Anwesenden getötet, Ausnahme bildeten zwei Feuerwehrleute, die sich gerade hinter einem Schutzobjekt befanden. In einem Radius von 150 m erlitten die anwesenden Personen schwere Verbrennungen. [32]

Durch auftretende Druckeffekte entstand ein enormer Sachschaden. Im Umkreis von 2,2 km war eine Totalzerstörung der Dächer die Folge, Wandbewegungen traten bis zu einer Entfernung von 4,2 km auf. Fensterglasbruch konnte bis zu einer Entfernung von 8 km festgestellt werden. Druckeffekte konnten im Umkreis von 16 km Entfernung wahrgenommen werden. [32]

8.2 Das Unglück von Crescent City

Das Unglück von Crescent City, Illinois, USA, ist auf Grund seines hohen Sachschadens bekannt geworden. Am 21. Juni 1970 passierte am Morgen dieses Tages ein Gütertransport mit 108 Waggone, angetrieben von vier Diesellokomotiven, das Dorf. Um 06:30 entgleisten 15 dieser Waggone, neun davon waren mit 128 m³ LPG beladen. Durch die Wucht der Entgleisung schnitt eine Kupplung den Wagon Nummer 26 auf, wodurch LPG ausfloss und sich sofort entzündete. Durch ansprechende Sicherheitsventile nährte sich das Feuer und unterfeuerte andere Waggone, wodurch mehrere Kesselwagen in Form einer BLEVE

explodierten. Das entstandene Feuer konnte erst nach 56 Stunden gelöscht werden. Insgesamt waren bei dieser Katastrophe 234 Feuerwehrmänner im Einsatz. [31] [33] [34] [35]

Der zeitliche Ablauf des Unglücks ist im Folgenden zusammengefasst:

Tabelle 19: Zeitlicher Ablauf Crescent City [33]

21. Juni 1970 06:30	Entgleisung des Zuges Nr. 20 der „Toledo, Peoria and Western Railroad Company“. Der Waggon Nr. 26 schlug Leck, LPG floss aus und entzündete sich sofort
07:33	BLEVE des Waggons Nr. 27 und zweier weiterer, wodurch ein Feuerball in 3 km Höhe entstand
09:40	BLEVE des Waggons Nr. 28
09:45	BLEVE des Waggons Nr. 30
10:55	BLEVE der beiden Waggone Nr. 32 und 33, dadurch Beschädigung der Waggone Nr. 35 und 36, wodurch weiteres LPG freigesetzt wurde.
23. Juni 1970 14:00	„Brand aus“

Der Bevölkerungsstand im Crescent City betrug im Jahr 1970 597 Personen, welche sich durch die zentrale Lage der Transportroute im Einwirkungsgebiet befanden. Durch die rasche Evakuierung der Bevölkerung musste kein Toter beklagt werden. 66 Personen erlitten bei dem Unglück Verletzungen, wovon 9 stationär im Krankenhaus aufgenommen werden mussten. Insgesamt waren bei den Löscharbeiten 234 Feuerwehrleute mit 53 Fahrzeugen im Einsatz. [34] [33]

Durch den auftretenden Trümmerflug und den Auswirkungen des Feuers sowie der Feuerbälle wurden 16 Geschäfte sowie 25 Privathäuser zerstört. Sieben Geschäftshäuser mussten eine teilweise Zerstörung des Betriebsgeländes beklagen. [34] [33]

8.3 Tankfahrzeugunglück von Nijmegen

Am 18. Dezember 1978 explodierte ein Tanker an einer Tankstation außerhalb von Nijmegen, Niederlande, kurz nachdem ein Brand unter dem Tankwagen ausbrach. Eine Tankstation wurde mit LPG gefüllt und zum Zeitpunkt des Unglücks war der Tankwagen voll befüllt. Neben dem betroffenen Tanker wurde die gesamte Tankstation zerstört. Durch die richtige Reaktion von Tankwart und Feuerwehr entstand nur Sachschaden. Es gab weder Verletzte noch Tode. [36] [31]

Der zeitliche Ablauf des Unglücks ist im Folgenden zusammengefasst:

Tabelle 20: Zeitlicher Ablauf Nijmegen [36]

08:20	Der Tankwagenfahrer verbindet den Tanker durch das Füllventil mit der Tankstation und startet die Pumpe um die Tankstelle mit LPG zu versorgen. Der Fahrer geht daraufhin zum Tankwart in den Shop.
	Kurze Zeit darauf bemerken der Fahrer und der Tankwart ein Feuer unter dem Fahrzeug. Mit Handfeuerlöschern versuchen sie das Feuer zu löschen.
	Da die Löschversuche unwirksam bleiben, schlägt der Tankwart Alarm und flüchtet mit dem Fahrer in seinem Auto.
	Die Feuerwehr trifft an der Tankstelle ein und erkennt das große Gefahrenpotential und geht in Deckung. Beim Speichertank ist eine Fackel durch das Sicherheitsventil sichtbar.
08:45	BLEVE des Tankfahrzeuges. Eine Druckwelle ist nicht spürbar.
08:49	Die Feuerwehr beginnt neben der Kühlung des Speichertanks mit den Löscharbeiten der Brände der BLEVE. Um die Gefahr zu minimieren wird zeitgleich LPG über Schläuche aus dem Speichertank entleert.

Die BLEVE konnte auf einen menschlichen Fehler zurückgeführt werden. LPG konnte über einen Bruch oder ein Leck von der Verbindungsleitung austreten und sich unter dem Tankfahrzeug sammeln. Über die heiße Oberfläche des Motors des Tankers entzündete sich das LPG, welches den Tank-LKW unterfeuerte. [36]

8.4 Das Unglück von Nishapur

Am 18. Februar 2004 ereigneten sich in Khayyam, in der Nähe von Nishapur, Iran, mehrere BLEVEs von Eisenbahnwaggone als Folge einer Entgleisung. 51 Eisenbahnwaggone lösten sich am Morgen vom Zug, welcher sich in der Station Nishapur befand, und bewegten sich 20 km entlang der Schienen. Die Waggone waren mit Petroleum, Schwefel und Düngemittel gefüllt. Im Dorf Khayyam entgleiste der Wagenkomplex, einige Waggone überschlugen sich, und ein Feuer brach um 04:00 Uhr Ortszeit (00:30 GMT) aus. Die alarmierte Feuerwehr begann mit den Löscharbeiten, viele Schaulustige verfolgten das Treiben. Um 09:35 (06:05 GMT) kam es zur Explosion mit vielen Toten und hohem Sachschaden. Ein Seismologe registrierte zum Zeitpunkt der Explosion eine Magnitude von 3,6. [37] [38]

Der zeitliche Ablauf des Unglücks ist im Folgenden zusammengefasst:

Tabelle 21: Zeitlicher Ablauf Nishapur [37]

	51 Waggone lösen sich und bewegen sich rund 20 km entlang der Schienen.
04:00	Die Waggone entgleisen und fangen Feuer. Löscharbeiten beginnen langsam.
09:35	Mehrere BLEVEs entstehen.

Auf Grund der Explosionen mussten 320 Tote beklagt werden. Darunter befanden sich 182 Einsatzkräfte. Von den 460 Verletzten mussten 350 in Krankenhäusern behandelt werden. Hohe Sachschäden traten neben dem betroffenen Dorf auch in den vier umliegenden Dörfern (Eyeshabad, Dehnow, Taquiabad, Mashhad) auf. [37] [38]

8.5 Brand in Wildon 2015

Am 29. August 2015 kam es in einem Recyclingbetrieb zu einem Großbrand, welcher Haushalts- und Gewerbeabfälle zu sortenreinem Polyethylen-Recyclat verarbeitet und am Firmengelände in Ballen lagert. Der erste Notruf wurde um 12:36 Uhr abgesetzt, erst 24 Stunden später konnte „Brand Aus“ gemeldet werden. Nicht weniger als 54 Feuerwehren kämpften mit einer Löschwassermenge von rund 32.000.000 Litern und 8.000 Liter Schaummittel gegen eine Brandbekämpfungsfläche von rund 10.000 m². [51] [52] Die verwendeten Parameter für die Berechnung sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 22: Annahmen Berechnung Brand Wildon

Wetter	Zum Zeitpunkt des Brandes herrschte schönes Wetter bei einer Umgebungstemperatur von 31 °C, einer relativen Luftfeuchte von 46 % und einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s. Diese Daten wurden den Aufzeichnungen der Langzeitwetterdaten des Flughafens Graz für den entsprechenden Tag entnommen.
Umgebungsbedingungen	Die Berechnung wurde bei einer Seehöhe von 340 m durchgeführt, da hier Daten vom Flughafen Graz zur Verfügung standen. Die Seehöhe von Wildon beträgt 294 m. Der Luftdruck wurde mit 735,6 mmHg angenommen.
Produkt	Polyethylen mit einer Verbrennungsenergie von 46 MJ/kg [52]. Die Brandbekämpfungsfläche betrug rund 10.000 m ² [51].
Abbrandrate	Die Abbrandrate wurde mit 0,8 kg/m ² s angenommen.

Berechnungsmodell

Der Brand wurde mittels „solid flame radiation model“ (Zylindermodell) berechnet, welches vor allem bei großen Pool Fires zur Anwendung kommt.



Abbildung 31: Großbrand in Wildon 2015 (Quelle: FF Pirka-Windorf)