



Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen

Rahmenbericht

zur standardisierten

Ausmasseinschätzung und

Risikoermittlung



Impressum

Leitung:

Swissgas, Dr. M. Harzenmoser
Grütlistrasse 44
8027 Zürich

Expertengruppe:

Bundesamt für Energie, Recht und Rohrleitungen (BFE)	Ph. Huber
Eidgenössisches Rohrleitungsinspektorat (ERI)	R. Wendelspiess
Bundesamt für Umwelt (BAFU), Sektion Störfall- und Erdbebenvorsorge	B. Gay
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL)	Dr. M. Merkofer
Amt für Verbraucherschutz des Kantons Aargau, Chemiesicherheit	Dr. J. Hansen
Erdgas Ostschweiz AG (EGO)	Dr. R. Dumont
Swissgas	A. Schwager
	Dr. M. Harzenmoser

Verfasser:


suisse plan
Ingenieure und Planer

Oerlikonerstrasse 88
8057 Zürich

www.suisseplan.ch

Dr. J. Kemmler
D. Thurnherr
B. Locher
R. Sägesser
A. Obrist

Der Bericht wurde zur Konsultation den Kantonalen Fachstellen unterbreitet. Das Echo war positiv, die Änderungsanträge wurden weitgehend berücksichtigt.

Bezugsquelle:

Swissgas
Grütlistrasse 44
8027 Zürich

www.swissgas.ch

Vorwort

Erdgashochdruckanlagen bieten die Möglichkeit, grosse Mengen an Erdgas zu transportieren und zu lagern. Sie sind deshalb ein wichtiger Faktor für die sichere Energieversorgung der Schweiz. Gestützt auf das Rohrleitungsgesetz vom 4. Oktober 1963 und die dazugehörigen Verordnungen hat der Bund von Anfang an hohe sicherheitstechnische Anforderungen an solche Anlagen gestellt. Nach der Inkraftsetzung der Störfallverordnung am 27. Februar 1991 wurden zusätzliche Instrumente zur Beurteilung der Risiken von Anlagen mit grossen chemischen Gefahrenpotentialen erarbeitet. Während die Rohrleitungsgesetzgebung vor allem die Rohrleitung und den nötigen Abstand von 10 m zu anderen Bauwerken sichert, bezieht die Störfallverordnung für den Schutz der Bevölkerung und Umwelt auch den Bereich ausserhalb dieses Korridors mit ein.

Die Störfallverordnung verlangt, dass die Risiken ausgehend von den ihr unterstellten Anlagen auf die Bevölkerung und die Umwelt untersucht werden. Basierend auf dieser Risikoevaluation hat die Aufsichtsbehörde zu beurteilen, ob die Risiken tragbar sind oder Massnahmen zur Risikosenkung angeordnet werden müssen. Wegen der Eigenschaften von entweichendem Erdgas aus Hochdruckanlagen stellen sich immer wieder ähnliche Fragen bezüglich Auswirkungen von Störfällen. Die Erdgaswirtschaft hat daher 1991 zusammen mit den Behörden die allgemein gültigen Aussagen bezüglich der Risiken von Erdgashochdruckanlagen in einem Rahmenbericht „Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen“ zusammengefasst. Der Rahmenbericht hat sich als nützliches Instrument erwiesen, das die Risikoermittlungen für Erdgashochdruckanlagen standardisiert und die Kommunikation zwischen Projektanten, betroffener Bevölkerung sowie Behörden des Bundes, der Kantone und der Gemeinden erleichtert. Der Bericht wurde gestützt auf die gesammelten Erfahrungen 1997 überarbeitet.

Die rasche Siedlungsentwicklung rund um Erdgashochdruckanlagen hat in den vergangenen Jahren vermehrt zu Interessenskonflikten und steigenden Risiken bei bestehenden Anlagen geführt. Die Erfahrungen bei der Beurteilung dieser Projekte haben gezeigt, dass die Rechenmethodik im Rahmenbericht in der Version von 1997 verschiedene sinnvolle Massnahmen zur Risikosenkung nicht berücksichtigt. Zudem ist in den vergangenen Jahren neues Datenmaterial als Grundlage für die Risikoberechnungen entstanden. Eine Arbeitsgruppe, bestehend aus Vertretern der schweizerischen Erdgaswirtschaft, der Kantone Zürich und Aargau, des Eidg. Rohrleitungsinspektorats, des Bundesamts für Umwelt und des Bundesamts für Energie, hat den Rahmenbericht unter Berücksichtigung der neusten internationalen Erkenntnisse aktualisiert und an die heutigen Gegebenheiten angepasst. Ich danke allen, die bei dieser Nachführung mitgewirkt haben, und hoffe, dass der Rahmenbericht auch in Zukunft einen wesentlichen Beitrag zu einer fundierten Risikobeurteilung bei Rohrleitungsanlagen und zu einem optimalen Schutz von Bevölkerung und Umwelt leisten kann.

Bundesamt für Energie

Franz Schneider
Vizedirektor

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anwendungsbereich	1
1.2	Grundlagen	2
1.2.1	Gesetzliche Grundlagen	2
1.2.2	Literatur	2
1.3	Aufbau des Rahmenberichtes	3
2	Relevante Szenarien	4
2.1	Fehlerbaum	4
2.2	Ereignisbaum	4
2.3	Eigenschaften und Wirkung von Erdgas	6
2.3.1	Chemische und physikalische Eigenschaften	6
2.3.2	Verbrennungsvorgänge	8
2.4	Brandszenarien	9
2.4.1	Feuerball	9
2.4.2	Fackelbrand	10
2.5	Explosionsszenarien	11
2.6	Schadenfolgen	12
3	Kontroll- und Beurteilungsverfahren	13
3.1	Gesetzliche Grundlagen	13
3.2	Schadenindikatoren	13
3.3	Kurzbericht (Ausmasseinschätzung)	13
3.4	Risikoanalyse (Risikoermittlung und Risikobeurteilung)	14
3.5	Folgeschäden	14
4	Methodik einer Ausmasseinschätzung	15
5	Methodik einer Risikoanalyse	18
5.1	Definition des Risikos	18
5.2	Vorgehen bei der Risikoermittlung (W-A-Diagramm)	18
5.3	Vorgehen bei der Risikobeurteilung	19
6	Schadenausmass	20
6.1	Bestimmung des Störfallwertes	20
6.2	Brandszenarien	20
6.2.1	Bestimmung der Letalitäten	20
6.2.1.1	Letalitäten für Personen im Freien	21
6.2.1.2	Letalitäten für Personen in Gebäuden	22
6.2.2	Bestimmung der Letalitätsradien	23
6.2.2.1	Feuerball	23
6.2.2.2	Fackelbrand	25
6.3	Explosionsszenarien	27
7	Belegungsannahmen	28
7.1	Methodik	28
7.2	Wohnen	28
7.3	Gewerbe, Industrie, Dienstleistungen	29
7.4	Aufenthaltswahrscheinlichkeiten (Präsenzfactoren)	30
7.5	Öffentlich zugängliche Plätze und Gebäude	30
7.6	Anlässe	31

7.7	Sonderobjekte Gebäude	31
8	Sonderobjekte im Einflussbereich von Erdgashochdruckanlagen	32
8.1	Strassen	32
8.2	Eisenbahnlinien	33
8.2.1	Belegungsannahmen Schienenverkehr	33
8.2.2	Schadensszenarien	34
8.2.3	Berechnungsweise	34
8.2.4	Feuerball mit anschliessendem Fackelbrand	35
8.2.5	Fackelbrand	40
8.2.6	Mechanische Beschädigung der Schienen	41
8.2.7	Übersicht zu berechnende Szenarien	41
8.3	Sonderobjekte Gebäude	42
8.3.1	Exposition der Personen	42
8.3.2	Einkaufszentren	43
8.3.3	Spitäler, Pflegeheime, etc.	43
9	Versagen der Erdgashochdruckanlagen	44
9.1	Überblick Erdgashochdruckanlagen	44
9.1.1	Erdgashochdruckleitungen (Transportleitungen)	44
9.1.2	Röhrenspeicher	44
9.1.3	Stationen	44
9.2	Versagen von Transportleitungen	45
9.2.1	Fehler- und Ereignisbaum	46
9.2.2	Versagensrate aufgrund von äusseren Einwirkungen	47
9.2.3	Versagensrate aufgrund von Bodenbewegungen	49
9.2.4	Versagensrate aufgrund von Materialfehlern	50
9.2.5	Wirkung von Massnahmen	50
9.2.5.1	Erhöhung Wandstärke	51
9.2.5.2	Designfaktor	51
9.2.5.3	Druckabsenkung	52
9.2.5.4	Überdeckung	52
9.2.5.5	Schutzplatten	52
9.2.5.6	Trasseekontrolle	52
9.2.5.7	Kombination der Massnahmen	53
9.2.6	Zündwahrscheinlichkeiten	53
9.3	Versagen von Röhrenspeichern	54
9.3.1	Fehler- und Ereignisbaum	54
9.3.2	Wärmestrahlung und Letalitätsradien	55
9.3.3	Versagensraten	57
9.3.4	Berechnung der Summenkurve	58
9.4	Versagen von Erdgashochdruckanlagen in Stationen	59
9.4.1	Totalversagen der Erdgashochdruckanlage	59
9.4.2	Kleine Lecks an der Erdgashochdruckanlage	59
9.4.3	Schadenauswirkung bei Versagen von Erdgashochdruckanlagen in Stationen	59
9.4.4	Versagensraten	60
9.4.5	Berechnung der Summenkurve	60
9.5	Versagen von Erdgashochdruckleitungen in Stollen, Kanälen und anderen verdämmten Umgebungen	61
9.5.1	Stollen und Kanäle	61

9.5.2 Fehler- und Ereignisbaum Stollen.....	62
9.5.2.1. Explosionswirkung	62
9.5.2.2. Totalversagen	62
9.5.3 Fehler- und Ereignisbaum Kanal.....	63
9.5.3.1. Explosionswirkungen.....	63
9.5.3.2. Totalversagen	63
10 Risikomindernde Massnahmen	64

Anhang

A Berechnungsbeispiel Wohnen.....	A-1
A 1. Situation.....	A-1
A 2. Belegungsannahmen.....	A-2
A 3. Ausmasseseinschätzung	A-2
A 4. Risikoermittlung (W-A-Diagramm)	A-5
A 4.1. Identifikation der risikorelevanten Stellen.....	A-5
A 4.2. Berechnung des Schadenausmasses.....	A-6
A 4.3. Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten.....	A-15
A 4.4. Berechnung der Summenkurve und Darstellung des Risikos	A-18
B Berechnungsbeispiel Gewerbe und Strasse.....	B-1
B 1. Situation.....	B-1
B 2. Belegungsannahmen.....	B-2
B 2.1. Personenbelegung Gewerbe	B-2
B 2.2. Personenbelegung Strassenverkehr basierend auf DTV.....	B-2
B 3. Risikoermittlung (W-A-Diagramm)	B-3
B 3.1. Identifikation der risikorelevanten Stellen.....	B-3
B 3.2. Berechnung des Schadenausmasses.....	B-4
B 3.3. Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten.....	B-7
B 3.4. Berechnung der Summenkurve und Darstellung des Risikos	B-10
C Berechnungsbeispiel Zug.....	C-1
C 1. Situation.....	C-1
C 2. Belegungsannahmen.....	C-2
C 3. Risikoermittlung (W-A-Diagramm)	C-2
C 3.1. Letalitätsradien	C-3
C 3.2. Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten.....	C-3
C 3.3. Feuerball ohne nachfolgender Fackelbrand.....	C-7
C 3.4. Fackelbrand nach Feuerball	C-9
C 3.5. Fackelbrand.....	C-11
C 3.6. Mechanische Beschädigung der Gleise	C-12
C 3.7. Berechnung der Summenkurve und Darstellung des Risikos	C-14
D Berechnungsbeispiel Röhrenspeicher	D-1
D 1. Situation.....	D-1
D 2. Belegungsannahmen.....	D-2
D 2.1. Berechnung des Schadenausmasses.....	D-2
D 2.2. Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten.....	D-4
D 2.3. Berechnung der Summenkurve und Darstellung des Risikos	D-7

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Dichte, Siedepunkt und Zündtemperatur einiger Gase (bei Normalbedingungen)	6
Tab. 2	Zusammensetzung Erdgas Schweiz (Import 1996)	7
Tab. 3	Wärmestrahlungsdosen der entsprechenden Letalitäten	20
Tab. 4	Letalitätsfaktoren für Personen im Freien	21
Tab. 5	Standardisierte Letalitäten für Personen in Gebäuden beim Schadenszenarium Feuerball mit anschliessendem Fackelbrand	22
Tab. 6	Standardisierte Letalitäten für Personen in Gebäuden beim Schadenszenarium Fackelbrand	23
Tab. 7	Letalitätsradien Feuerball für Personen im Freien und Radius $R_{ZI\ FE}$ für die Entzündung des Gebäudeinnern während des Feuerballs	24
Tab. 8	Letalitätsradien Fackelbrand und Radius $R_{ZI\ FA}$ für die Entzündung des Gebäudeinnern beim Schadenszenarium Fackelbrand	26
Tab. 9	Letalitäten für Personen im Freien bei Druckstoss (Lungenriss)	27
Tab. 10	Letalitäten für Personen in Gebäuden bei Druckstoss von 0.4 bar (Einsturz von Gebäuden)	27
Tab. 11	Mittlerer Wohnflächenbedarf pro Person in Abhängigkeit der Wohnzone	29
Tab. 12	Präsenzfaktoren	30
Tab. 13	Übersicht Zugtypen	33
Tab. 14	Letalitäten und Aufenthaltszeiten bei Durchfahrt eines Zuges in Abhängigkeit vom Abstand Bahnlinie zum Totalversagen mit Feuerball (Zuglänge 100 m)	36
Tab. 15	Letalitäten und Aufenthaltszeiten bei Durchfahrt eines Zuges in Abhängigkeit vom Abstand Bahnlinie zum Totalversagen mit Feuerball (Zuglänge 300 m)	38
Tab. 16	Radius R_{FAZ} , innerhalb dem die Letalität für Personen in Zügen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h beim Fackelbrand 100% angenommen wird	40
Tab. 17	Versagensraten aufgrund von äusseren Einwirkungen	47
Tab. 18	Minimale Versagensraten aufgrund von äusseren Einwirkungen für Risikoermittlungen (Druck 70 bar)	47
Tab. 19	Versagensraten aufgrund von Bodenbewegungen (Naturereignisse)	49
Tab. 20	Versagensraten aufgrund von Materialfehlern	50

Tab. 21	Zündwahrscheinlichkeiten gemäss Health and Safety Executive (HSE)	53
Tab. 22	Letalitätsradien beim Feuerball eines Röhrenspeicher	56
Tab. 23	Standardisierte Letalitäten für Personen in Gebäuden beim Schadenszenarium Feuerball	56
Tab. 24	Versagensraten Verbindungsleitungen	58

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen von erdverlegten Erdgashochdruckleitungen in unverdämmter Umgebung	5
Abb. 2	Grenzen zwischen gasförmigem und flüssigem Zustand für Methan im Vergleich mit anderen Substanzen	8
Abb. 3	Zündgrenzen von Methan in Abhängigkeit von der Temperatur	9
Abb. 4	Feuerball nach dem Versagen einer Erdgashochdruckleitung in Russland, Jahr 2009 (Quelle: unbekannt)	10
Abb. 5	Fackelbrand nach dem Versagen einer Erdgashochdruckleitung in Gräveneck D, 2007 (Quelle: Feuerwehr-Weblog, 2007)	10
Abb. 6	Beispiel Ausmassprofil	16
Abb. 7	W-A-Diagramm	19
Abb. 8	Ereignisbaum für Zug im Einflussbereich von Erdgashochdruckleitungen	34
Abb. 9	Berechnete Schadenereignisse für grosse Leitungen ($\geq 14''$)	41
Abb. 10	Berechnete Schadensereignisse für kleine Leitungen ($< 14''$)	42
Abb. 11	Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen von erdverlegten Erdgashochdruckleitungen in unverdämmter Umgebung	46
Abb. 12	Fehler- und Ereignisbaum für das Totalversagen (Leckdurchmesser \geq Rohrdurchmesser, "rupture", "full bore rupture") von erdverlegten Erdgashochdruckleitungen in unverdämmter Umgebung	46
Abb. 13	Einfluss Designfaktor auf Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen (K_{DF})	51
Abb. 14	Einfluss Überdeckung auf Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen (K_U)	52
Abb. 15	Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen eines Röhrenspeichers in unverdämmter Umgebung	54
Abb. 16	Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen einer Erdgashochdruckleitung in verdämmter Umgebung (Station)	59
Abb. 17	Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen von Erdgashochdruckanlagen in einem Stollen	62
Abb. 18	Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen von Erdgashochdruckanlagen in einem Kanal	63

Stichwortverzeichnis

A

Aufenthaltswahrscheinlichkeit	I, 18
Ausmass	IV, V, 14, 15, 18, 19, 33, 44, 65
Ausmassschätzung	1, 13, 15, 16, 17, 29, 44
Ausmassprofil	13, 15, 16, 17
äussere Einwirkungen	VI, 46, 48, 52, 53, 54, 58, 65

B

Belegungsannahmen	3, 29, 34, 44, D-7
Bodenbewegungen	4, 46, 50
Brandszenarien	12, 21

D

Designfaktor	II, VI, 52
--------------	------------

E

Eintretenswahrscheinlichkeit	14, 18, D-7
Ereignisbaum	II, 4, 5, 47, 55, 60
Explosion	II, 11, 60, 62

F

Fackelbrand	III, VII, 10, 23, 24, 26, 27, 41, 55, 58, 60, 62
Fehlerbaum	III, 4
Feuerball	III, VII, 9, 23, 24, 25, 36, 37, 39, 55, 57, 58

K

Korrekturfaktor	VI, 49, 54
-----------------	------------

L

Letalitäten	19, 21, 22, 23, 24, 34, 37, 39, 43, 57, 58
Letalitätsradien	15, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 56, 57, 58

M

Massnahmen	24, 51, 54, 63
------------	----------------

P

Präsenzfactoren	31
-----------------	----

R

Risiko	IV, 14, 18
--------	------------

Risikobeurteilung	14, 19, 21
Risikoermittlung	1, 13, 14, 17, 18, 29, 33, 35, 63
Risikorelevante Stellen	15, 17
Röhrenspeicher	1, 55, 57
 S	
Schadenausmass	IV, 21
Schutzplatten	53
Stationen	II, V, 1, 11, 60
Stollen	V, 1, 11, 62, 63
Störfallwert	IV, 19, 21
Summenkurve	IV, V, 14, 18, 19
 T	
Totalversagen	III, IV, 4, 15, 19, 21, 36, 46, 47, 49, 50, 51, 54, 55, 58, 59, 60, 62
Trasseekontrollen	53
 U	
Überdeckung	53, B-1
 V	
Versagen	II, III, V, 4, 5, 10, 47, 49, 50, 51, 55, 58, 60
Versagensraten	3, 46, 48, 50, 51, 58, 59, 62
 W	
W-A-Diagramm	IV, V, 14, 18, 19, 20
Wandstärke	48
 Z	
Zündwahrscheinlichkeit	54

Begriffsdefinitionen

Aufenthalts- wahrscheinlichkeit	Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit gibt an, wie häufig (pro Tag, Jahr, etc.) sich Personen im Einflussbereich der Erdgashochdruckanlage aufhalten.
Ausnützungsziffer (Ausnutzungsziffer, AZ)	$\text{Ausnützungsziffer} = \frac{\text{Bruttogeschossfläche}}{\text{Nettobaupfläche}}$ <p>Die genaue Definition der Ausnützungsziffer muss den kantonalen Planungs- und Baugesetzen und den kommunalen Bau- und Zonenreglementen entnommen werden.</p>
Bruttogeschossfläche (BGF)	Die Bruttogeschossfläche (BGF) ist die Summe aller ober- und unterirdischen Geschossflächen inklusive Mauer- und Wandquerschnitt. Die genaue Definition der Bruttogeschossfläche muss den kantonalen Planungs- und Baugesetzen und den kommunalen Bau- und Zonenreglementen entnommen werden.
Deflagration	Eine Deflagration ist wie die Detonation ein schneller, von einer Druckentwicklung begleiteter Verbrennungsvorgang. Von einer Detonation unterscheidet sich die Deflagration durch folgende Merkmale: Der Explosionsdruck wird nur durch die bei der Verbrennung entstehenden und sich ausdehnenden Gase hervorgerufen. Das unverbrannte Gemisch wird bei der Deflagration durch Aufheizen an der Flammenfront gezündet. Die Flamm- oder Reaktionsfront breitet sich langsamer als die Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Medium aus. Deflagrationen können unter Umständen in Detonationen übergehen. Deflagrationen, bei denen kein relevanter Druck aufgebaut wird, werden auch Verpuffung genannt.

Designfaktor Der Designfaktor oder Nutzungsgrad f_0 ist das Verhältnis zwischen vorhandener Spannung und der Streckgrenze des Stahls.

$$f_0 = DF = \frac{P_d \cdot D_a}{20 \cdot R_{t,0,5} \cdot s}$$

wobei	s =	Mindest-Wanddicke	[mm]
	P_d =	Auslegungsdruck	[bar]
	D_a =	Rohraussendurchmesser	[mm]
	f_0 =	Nutzungsgrad (=Designfaktor DF)	[---]
	$R_{t,0,5}$ =	Streckgrenze bei 0.5% gesamter Dehnung (spezifischer Mindestwert) bei 20°C	[N/mm ²]

Für erdverlegte Abschnitte ausserhalb von Stationen ist gemäss ERI - Richtlinien ein Designfaktor (Nutzungsgrad) von ≤ 0.6 einzuhalten.

Detonation Eine Detonation ist wie die Deflagration ein schneller, von einer Druckentwicklung begleiteter Verbrennungsvorgang.

Im Gegensatz zur Deflagration entsteht bei der Detonation eine Stosswelle, welche das abbrennende Gemisch mit Überschallgeschwindigkeit durchläuft. Detonationen erreichen wesentlich höhere Explosionsdrücke als Deflagrationen.

Detonationen sind in verdämmter Umgebung möglich.

Dispersion Dispersion bezeichnet in diesem Bericht die Ausbreitung von Erdgas, welches aufgrund eines Lecks an einer Erdgashochdruckanlage austritt und dessen (teilweises) Vermischen mit der Umgebungsluft.

Ereignisbaum Im Ereignisbaum werden im vorliegenden Bericht die möglichen Ereignisse, die aus dem Versagen der Erdgashochdruckanlage resultieren können, dargestellt.

Explosion Als Explosion bezeichnet man eine Oxidations- oder Zerfallsreaktion mit plötzlichem Anstieg der Temperatur und/oder des Druckes. Dabei kommt es zur plötzlichen Volumenausdehnung von Gasen und Freisetzung von grossen Energiemengen auf kleinem Raum. Deflagrationen und Detonationen sind unterschiedliche Typen von Explosionen.

Fackelbrand Beim Fackelbrand brennt das aus einem Leck kontinuierlich ausströmende Gas in einer länglichen Flammenform ähnlich einer Fackel ab. Der Fackelbrand ist die häufigste Abbrandform bei einer Freisetzung von Erdgas infolge Versagen einer Erdgashochdruckanlage mit anschliessender Zündung.

Fehlerbaum	Der Fehlerbaum stellt im vorliegenden Rahmenbericht die Initialereignisse dar, welche zu einem Leck und damit zu einer unbeabsichtigten Freisetzung von Erdgas führen können.
Feuerball	Der Feuerball ist die kugelförmige Abbrandform von Erdgas nach einem Totalversagen der Leitung mit sofortiger oder nur kurz verzögerter Zündung des Gas-/Luftgemisches.
Gefahrenszenarium	Das Gefahrenszenarium beschreibt im vorliegenden Bericht die möglichen Auswirkungen des Versagens einer Erdgashochdruckanlage.
Letalität	Unter Letalität versteht man im vorliegenden Bericht den Anteil der Personen im Einflussbereich der Erdgashochdruckanlage, der bei einem durch die Leitung verursachten Schadenereignis tödlich verletzt wird. In der Regel ist bei Erdgashochdruckanlagen die Letalität infolge thermischer Auswirkungen massgebend.
Letalitätsradius	Letalitätsradius ist im vorliegenden Bericht der Abstand vom Zentrum eines Schadenereignisses (bei Gasleitungen in der Regel das Leck) bis zu einem Ort einer bestimmten Letalität.
Nettobaufläche (NBF)	<p>Die Nettobaufläche (NBF) oder anrechenbare Grundstücksfläche umfasst die Grundstücksfläche abzüglich der Fläche für Erschliessung, etc.</p> <p>Die genaue Definition der Nettobaufläche muss den kantonalen Planungs- und Baugesetzen und den kommunalen Bau- und Zonenreglementen entnommen werden.</p>
Nettogeschossfläche (NGF)	<p>Die Nettogeschossfläche (NGF) ist der Teil der Geschossfläche zwischen den umschliessenden oder innenliegenden Konstruktionsbauteilen.</p> <p>Die genaue Definition der Nettogeschossfläche muss den kantonalen Planungs- und Baugesetzen und den kommunalen Bau- und Zonenreglementen entnommen werden.</p> <p>Als Faustregel gilt:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">$\text{Nettogeschossfläche} = \text{Bruttogeschossfläche} - 15\%$</div>
Präsenzfaktor	Der Präsenzfaktor gibt an, wie lange (pro Tag, Jahr, etc.) sich Personen im Einflussbereich der Erdgashochdruckanlage aufhalten.
Risiko	Das Risiko wird bestimmt durch das Ausmass der möglichen Schädigungen der Bevölkerung oder der Umwelt infolge von Störfällen und der Wahrscheinlichkeit, mit der diese eintreten (Art. 2 Abs. 5 StFV).

Schadenausmass / Ausmass	Als Folge eines Gefahrenszenariums können unterschiedliche Einwirkungen (Hitzeabstrahlung, Druckwellen, Trümmerwurf, etc.) auf Bevölkerung und Umwelt auftreten. Je nach Betroffenheit der Umgebung führen diese Einwirkungen zu einer Schädigung. Das Ausmass der möglichen Schädigungen wird als Schadenausmass bezeichnet.
Schadenindikator	Als Hilfsmittel zur einheitlichen Darstellung und Bewertung des Ausmasses für potentiell von einem Störfall betroffene Menschen oder Umweltbereiche dienen Schadenindikatoren. Im vorliegenden Rahmenbericht wird nur die Anzahl tödlich verletzter Personen als massgebender Schadenindikator betrachtet.
Störfall	Als Störfall wird ein ausserordentliches Ereignis an einer Anlage bezeichnet, bei dem erhebliche Einwirkungen auf die Bevölkerung oder die Umwelt ausserhalb des Betriebsareals auftreten.
Störfallwert	Der Störfallwert ist eine normierte Grösse für das berechnete Ausmass für verschiedene Schadenindikatoren. Dieser ist proportional zum Logarithmus des Schadenindikators (z.B. Anzahl getöteter Personen).
Summenkurve	Die Summenkurve (Treppenlinie) erhält man, indem die Wahrscheinlichkeiten der Störfallwerte aus den einzelnen Gefahrenszenarien, ausgehend vom Szenarium mit dem grössten Störfallwert, sukzessive addiert werden. Die Beziehungen zwischen den Störfallwerten (Ausmass) und kumulierten Wahrscheinlichkeiten ergeben die Summenkurve im W-A-Diagramm.
Totalversagen	Das Totalversagen an einer Erdgashochdruckleitung (full bore rupture) ist ein Leck mit einem Durchmesser von mindestens dem Leitungsdurchmesser.
Verdämmte Umgebung	Von einer verdämmten Umgebung spricht man, wenn sich aufgrund beengter räumlicher Verhältnisse eine explosionsfähige Gaskonzentration bilden kann. Da bei einer Zündung des Gas-Luft-Gemisches in verdämmter Umgebung die Druckausbreitung behindert wird, können sich erhebliche Explosionsdrücke aufbauen. Beispiele verdämmter Örtlichkeiten sind Innenräume, enge Gassen, Innenhöfe, Stollen und Tunnels sowie Örtlichkeiten mit einer grossen Anzahl dreidimensionaler Objekte, welche eine blockierende Wirkung haben (z.B. Verrohrung in Stationen u.ä.).
Versagen	Unter Versagen wird im vorliegenden Rahmenbericht das Auftreten eines Lecks an einer Erdgashochdruckanlage, verbunden mit unbeabsichtigtem Austreten von Erdgas, bezeichnet.
Versagensrate	Die Versagensrate gibt an, mit welcher Häufigkeit ein Versagen auftritt. Die Angabe erfolgt bei Versagen von Erdgashochdruckleitung meist in Vorkommnissen pro Jahr und 1'000 Leitungskilometer (1'000 km y) ⁻¹ .

W-A-Diagramm

Das Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm ist ein Instrument zur Darstellung des Risikos, in welchem die Wahrscheinlichkeit eines Störfallereignisses gegen das Ausmass der Schädigung als Summenkurve aufgetragen wird.

Abkürzungen

$A_{b,i}$	Anzahl betroffene Personen im Letalitätsbereich i
AZ	Ausnützungsziffer [-]
BGF	Bruttogeschossfläche [m ²]
D_a	Rohraussendurchmesser [mm]
D_F	mittlere Distanz zwischen zwei Fahrzeugen auf der Strasse [km oder m]
DF	Designfaktor (= Nutzungsgrad) [-]
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr [Fahrzeuge pro Tag (24 h)]
EGIG	European Gas Pipeline Incident Data Group
f_0	Nutzungsgrad (= Designfaktor DF) [-]
K	Kompressibilitätsfaktor
K_{total}	Korrekturfaktor (kumuliert) für Versagensrate [-]
K_U	Korrekturfaktor aufgrund Lage der Leitung in Bauzone auf Versagensrate aufgrund äusseren Einwirkungen
K_{DF}	Korrekturfaktor aufgrund Designfaktor auf Versagensrate aufgrund äusseren Einwirkungen
$K_{\bar{U}}$	Korrekturfaktor aufgrund Überdeckung auf Versagensrate aufgrund äusseren Einwirkungen
K_{S-W}	Korrekturfaktor aufgrund Schutzplatte auf Versagensrate aufgrund äusseren Einwirkungen
K_T	Korrekturfaktor aufgrund wöchentlicher Trasseekontrolle auf Versagensrate aufgrund äusseren Einwirkungen
L_i	Letalität von i% [-]
L	Länge [m]
LNG	liquefied natural gas (verflüssigtes Erdgas)
LPG	liquefied petroleum gas
M_g	Freigesetzte Gasmenge [kg]
μ	Molekulargewicht [kg mol ⁻¹]
N	Verkehrsfrequenz pro Stunde und Fahrtrichtung [Fahrzeuge/h]
NBF	Nettobaupfläche (anrechenbare Grundstücksfläche) [m ²]
NGF	Nettogeschossfläche [m ²]
n_1	Schadenindikator für die Anzahl Todesopfer [-]
P	Druck [bar]

P_d	Auslegungsdruck [bar]
R	Gaskonstante ($8.314472 \text{ J (mol K)}^{-1}$)
R_{25}	Letalitätsradius mit Letalität 25% [m]
$R_{25 \text{ FA}}$	Letalitätsradius für Fackelbrand mit Letalität 25% [m]
$R_{25 \text{ FE}}$	Letalitätsradius für Feuerball mit Letalität 25% [m]
$R_{ZI \text{ FA}}$	Radius mit Zündung des Gebäudeinneren bei Fackelbrand [m]
$R_{ZI \text{ FE}}$	Radius mit Zündung des Gebäudeinneren bei Feuerball [m]
R_{FAZ}	Letalitätsradius von Zugspassagieren beim Fackelbrand
$R_{10,5}$	Streckgrenze bei 0.5% gesamter Dehnung (spezifischer Mindestwert) bei 20°C [N/mm^2]
s	Mindest-Wandstärke [mm]
t_{FE}	Abbranddauer Feuerball [s]
T	Temperatur (°K)
V	Wärmestrahlungsdosis [$\text{s(Wm}^{-2})^{4/3}$]
v	Geschwindigkeit [m/s]

1 Einleitung

1.1 Anwendungsbereich

Der vorliegende Rahmenbericht dient als Grundlage zur Erstellung von Ausmasseschätzung und Risikoermittlung nach Art. 5 und 7 der Rohrleitungsverordnung (RLV) bei Erdgashochdruckanlagen. Darunter fallen gemäss Art. 2a der RLV Rohrleitungsanlagen, bei denen das Produkt aus dem genehmigten Betriebsdruck in Pascal (Pa) mal Aussendurchmesser in Meter grösser als 200'000 Pa m (200 bar cm) und zugleich der genehmigte Betriebsdruck grösser als 500'000 Pa (5 bar) ist.

Der Rahmenbericht behandelt die standardisierte Ausmasseschätzung und Risikoermittlung für:

- Erdverlegte Erdgashochdruckleitungen
- Röhrenspeicher
- gasführende Nebenanlagen wie Stationen
- Erdgashochdruckleitungen in begehbaren Stollen und Kanälen

Nicht Gegenstand dieses Rahmenberichtes sind Anlagen mit einem maximal zulässigen Betriebsdruck bis und mit 5 bar. Diese sind im Rahmenbericht "Sicherheitsbeurteilung von Erdgasleitungen mit Betriebsdruck 1 bis 5 bar" (SVGW, 1999) beschrieben. Ebenfalls nicht erfasst werden Erdgashochdruck-Kugelbehälter sowie Anlagen zum Transport oder zur Lagerung von Flüssiggas (LNG: liquefied natural gas, LPG: liquefied petroleum gas).

Der vorliegende Rahmenbericht (Revision 2010) ersetzt den bisherigen Rahmenbericht "Sicherheit von Erdgas-Hochdruckanlagen", rev. Ausgabe 1997, und hat Gültigkeit sowohl für geplante wie auch für bestehende Anlagen.

Die im Rahmenbericht verwendeten Werte aus der Literatur werden nach Bedarf durch ein Expertengremium bestehend aus Vertretern der Gaswirtschaft und der Behörden auf ihre Aktualität überprüft.

1.2 Grundlagen

1.2.1 Gesetzliche Grundlagen

Der Rahmenbericht stützt sich insbesondere auf die folgenden gesetzlichen Grundlagen und Vollzugshilfen:

- Bundesgesetz über Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brenn- oder Treibstoffe (Rohrleitungsgesetz, RLG) vom 4. Oktober 1963 (SR 746.1)
- Rohrleitungsverordnung (RLV) vom 2. Februar 2000 (SR 746.11), insbesondere Art. 5 und Art. 7
- Verordnung über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen (RLSV) vom 4. April 2007 (SR 746.12)
- ERI-Richtlinie 2003, Revision 2 (gültig ab 1. März 2009)
- Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV) vom 27. Februar 1991 (SR 814.012)
- Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung, Bundesamt für Umwelt (BAFU)
- Handbuch I zur Störfallverordnung, Bundesamt für Umwelt (BAFU, ehemals BUWAL), 2008, Vollzugshilfe für Betriebe mit Stoffen, Zubereitungen oder Sonderabfällen
- Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG) vom 7. Oktober 1983 (SR 814.01), insbesondere Art. 10
- Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPV) vom 19. Oktober 1988 (SR 814.011)

1.2.2 Literatur

- EGIG (European Gas Pipeline Incident Data Group) Statistik 1970 – 2007 (7th Report)
- "Yellow Book", Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials, VROM, 2nd ed. 2005
- IGEM/TD/2 Communication 1737: Application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of high pressure Natural Gas pipelines, IGEM (Institution of Gas Engineers & Managers)

1.3 Aufbau des Rahmenberichtes

Der vorliegende Rahmenbericht beinhaltet die Anleitung zur Berechnung des Risikos, das von den wichtigsten in der Schweiz vorkommenden Erdgashochdruckanlagen ausgeht. Im Anhang des Rahmenberichtes werden anhand von unterschiedlichsten Beispielen die Berechnungsmethoden erklärt. Die theoretische Herleitung und Erläuterung der im Rahmenbericht beschriebenen Berechnungsmethoden ist in separaten Erläuterungen pro Thema dargestellt.

Diese Erläuterungen umfassen folgende Themenbereiche:

- Schadensszenarien
- Letalitäten bei Brandszenarien
- Belegungsannahmen
- Eisenbahnlinien im Einflussbereich von Erdgashochdruckleitungen
- Versagensraten
- Röhrenspeicher
- Stationen
- Stollen und Kanäle

2 Relevante Szenarien

2.1 Fehlerbaum

Der Fehlerbaum erfasst die möglichen Ursachen für das Versagen einer Erdgashochdruckanlage. Das Versagen wird als Leck mit unbeabsichtigtem Gasaustritt definiert.

Die möglichen Schadenursachen für erdverlegte Erdgashochdruckleitungen ausserhalb von umzäunten Arealen werden gemäss europäischer Schadensstatistik in folgende Gruppen unterteilt:

- Einwirkungen von aussen
- Bodenbewegungen ("ground movement")
- Material- und Konstruktionsfehler
- Korrosion
- Hot tap made by error
- Andere / unbekannte Gründe

Unter Bodenbewegungen werden alle Ursachen verstanden, welche gemäss der EGIG-Statistik (7th report) in die Kategorie "ground movement" fallen: Gewässer ("Flood", "River", "Erosion", "Dike break"), Rutschungen ("Landslide"), Bergbau ("Mining").

Unter "Hot tap made by error" wird das irrtümliche Anbohren einer Erdgashochdruckleitung aufgrund einer Verwechslung mit einer Niederdruckgasleitung oder einer Wasserleitung verstanden.

Bei Installationen von Erdgashochdruckanlagen (z.B. bei Stationen) kann ein Versagen auch aufgrund von Fehlmanipulation auftreten (siehe auch Abb. 16).

Bei Erdgashochdruckanlagen insbesondere mit grösserer Flächenausdehnung (z.B. bei Röhrenspeichern) kann je nach Lage auch ein Flugzeugabsturz für das Versagen der Anlage relevant sein (siehe auch Kap. 9.3.3).

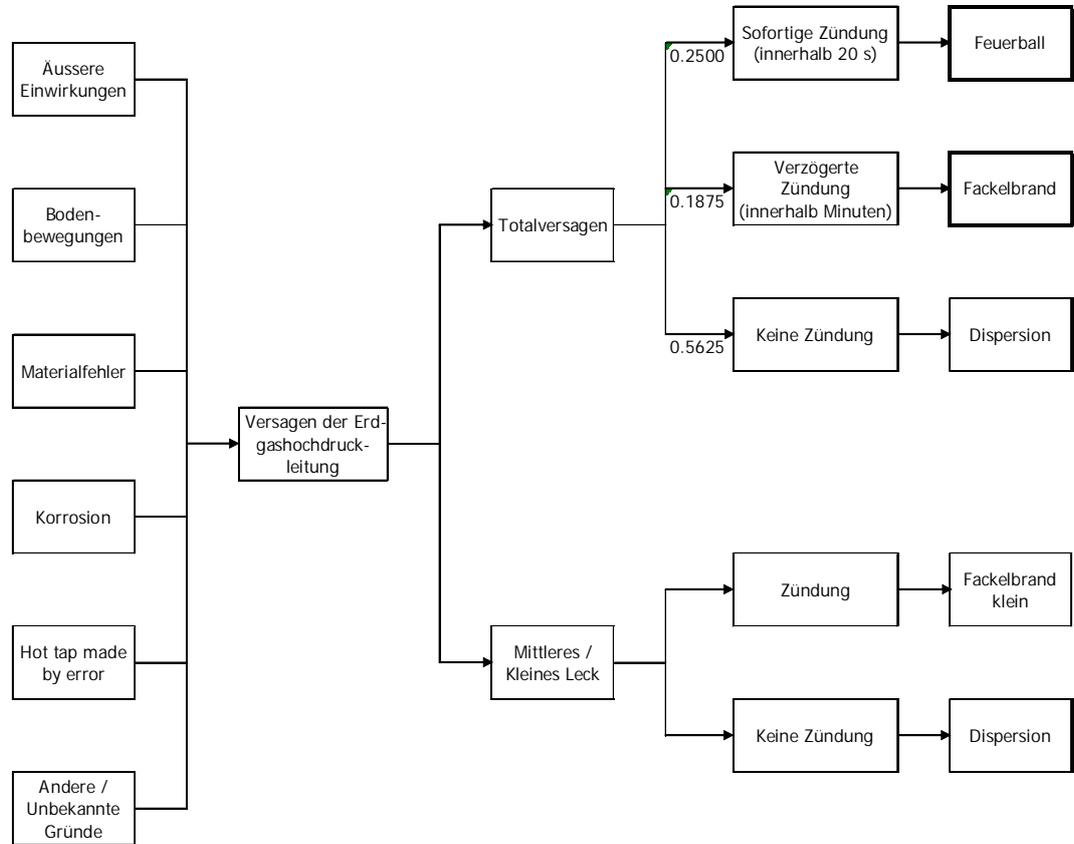
2.2 Ereignisbaum

Im Ereignisbaum für Erdgashochdruckleitungen werden die wesentlichen Gefahrenszenarien bestimmt.

Der massgebende Störfall bei erdverlegten Rohrleitungen in unverdämmter Umgebung ist das Totalversagen (englisch "rupture" oder "full bore rupture"). Das Totalversagen ist als Leck mit einer Grösse von mindestens einem Rohrdurchmesser definiert (siehe auch Abb. 12).

Nach dem Totalversagen einer Erdgashochdruckleitung fliesst das Erdgas aus beiden Rohrenden aus und verwirbelt sich stark. Das austretende Erdgas kann sofort oder verzögert zünden oder sich ohne Zündung ausbreiten (siehe Abb. 1).

Abb. 1 Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen von erdverlegten Erdgashochdruckleitungen in unverdämmter Umgebung



2.3 Eigenschaften und Wirkung von Erdgas

2.3.1 Chemische und physikalische Eigenschaften

Das über das schweizerische Erdgasnetz verteilte Erdgas H besteht zu etwa 90% aus Methan (CH_4) sowie aus diversen höheren Kohlenwasserstoffen und geringen Anteilen Stickstoff und Kohlendioxid.

Aufgrund dieser Zusammensetzung sind die chemischen und physikalischen Eigenschaften von Erdgas denjenigen von Methan sehr ähnlich.

Methan gehört zur Gruppe der Kohlenwasserstoffe und ist ein farbloses, geruchloses und ungiftiges Gas. Beim Einatmen wirkt es nur schwach betäubend, in grossen Konzentrationen besteht allerdings Erstickungsgefahr infolge Sauerstoffmangels.

Im vorliegenden Rahmenbericht werden diejenigen Risiken beurteilt, die durch Lagerung und Transport von Erdgas in gasförmigem Zustand auftreten können. Dabei ist zu beachten, dass unterschiedliche Lagerungsbedingungen (flüssig, gasförmig) grundsätzlich andere Beurteilungen erfordern.

Für die Ausbreitung und Verflüchtigung von Gasen und Dämpfen spielt die relative Gasdichte gegenüber Luft eine wichtige Rolle (siehe Tab. 1): Methan und somit auch Erdgas sind bei Normalbedingungen wesentlich leichter als Luft und steigen nach einer Freisetzung in der Atmosphäre sehr schnell hoch. Die Dichte eines Gases ist allerdings abhängig vom Druck und der Temperatur, so dass unter extremen Bedingungen (hoher Druck und/oder tiefe Temperatur) Gase auch schwerer als Luft sein können. Für Methan trifft dies bei Atmosphärendruck und Temperaturen unterhalb von 150°K (d.h. -123°C) zu.

Im Gegensatz zu Methan sind z.B. Butan und Propan auch bei Normalbedingungen (0°C und 1.013 bar) schwerer als Luft und können sich daher bei einem unkontrollierten Austritt aus einer Anlage als Schweregaswolke über relativ grosse Distanzen ausbreiten.

Tab. 1 Dichte, Siedepunkt und Zündtemperatur einiger Gase (bei Normalbedingungen)

	rel. Dichte (Luft = 1)	Dichte [kg/m^3]	Siedepunkt in Luft	Zündtemperatur (Selbstentzündung)
Erdgas H (high)	0.56-0.64	0.7-0.8	ca. -161°C	ca. 600°C
Methan CH_4	0.55	0.72	-161°C	595°C
Propan C_3H_8	1.52	2.01	-42°C	460°C
Butan C_4H_{10}	2.01	2.70	-1°C	365°C
Luft	1.00	1.30	-191°C	-

Tab. 2 Zusammensetzung Erdgas Schweiz (Import 1996)

Eigenschaften der in der Schweiz verteilten Erdgase im Jahre 1996

Blatt 1 von 2

SWISSGAS Schweizerische Aktiengesellschaft für Erdgas, Geschäftsstelle Zürich

Regionalgesellschaften: - EGO Erdgas Ostschweiz AG, Zürich
- GVM Gasverbund Mittelland AG, Arlesheim

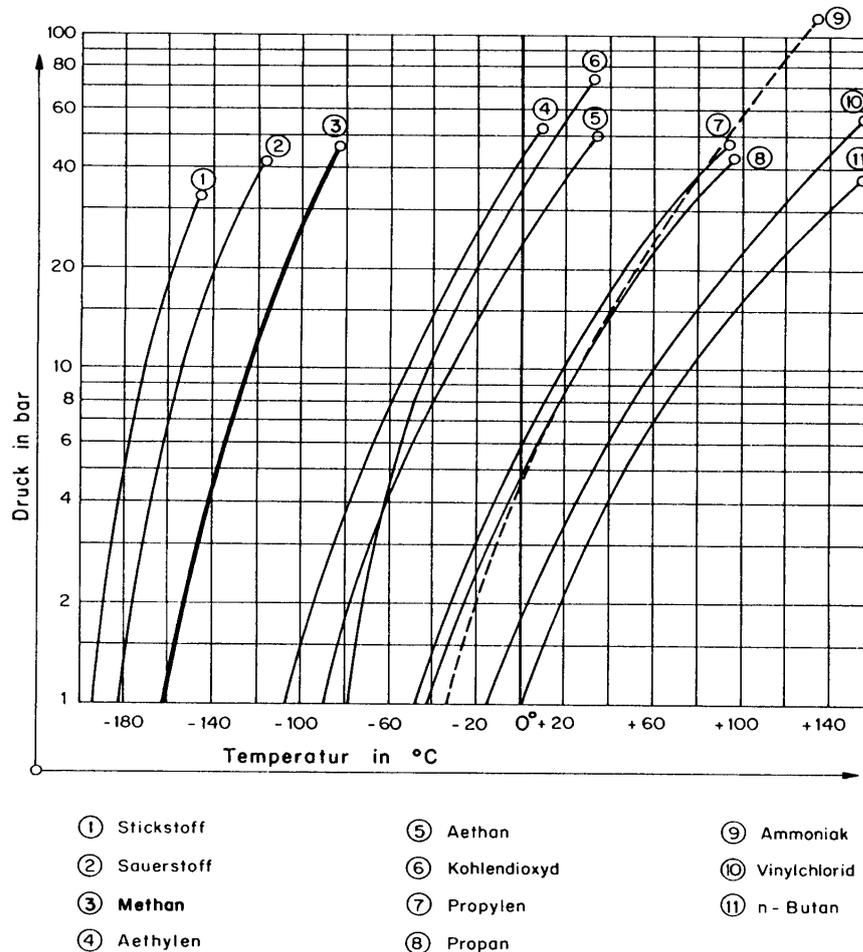
- EGZ Erdgas Zentralschweiz AG, Luzern
- GAZNAT Gaznat SA, Vevey

Zusammenstellung und Berechnung: Erdgas Ostschweiz AG, 8010 Zürich

Herkunft			Swissgas (via Transitgasleitung) EGO, GAZNAT, GVM, EGZ		Gasversorgung Süddeutschland (via Fallentor und Höchst) EGO		Gasversorgung Süddeutschland Kleinhünigen GVM	
Versorgungsgebiet			Mittelwerte	Grenzen	Mittelwerte	Grenzen	Mittelwerte	Grenzen
Kohlendioxid	CO ₂	Vol.-%	0.87	0.6 - 1.0	0.07	0.04 - 0.12	0.84	0.6 - 1.0
Sauerstoff	O ₂	"	0.00		0.00		0.00	
Helium	He	"	0.03	0.02 - 0.03	0.00		0.00	
Wasserstoff	H ₂	"	0.00		0.00		0.00	
Stickstoff	N ₂	"	2.31	1.5 - 3.1	0.84	0.80 - 0.86	2.26	1.5 - 3.1
Methan	CH ₄	"	92.87	91.5 - 94.9	98.30	98.1 - 98.4	93.03	91.6 - 94.9
Ethan	C ₂ H ₆	"	2.81	2.2 - 3.3	0.54	0.49 - 0.64	2.77	2.2 - 3.2
Propan	C ₃ H ₈	"	0.76	0.55 - 0.92	0.17	0.14 - 0.20	0.75	0.50 - 0.90
i-Butan	i-C ₄ H ₁₀	"	0.10	< 0.01 - 0.12				
n-Butan	n-C ₄ H ₁₀	"	0.15	0.02 - 0.18	¹⁾ 0.06	0.05 - 0.07	¹⁾ 0.24	0.17 - 0.28
i-Pentan	i-C ₅ H ₁₂	"	0.03					
n-Pentan	n-C ₅ H ₁₂	"	0.03		¹⁾ 0.02		¹⁾ 0.07	
Hexane	C ₆ H ₁₄	"	0.02		< 0.01		0.04	
Heptane	C ₇ H ₁₆	"	< 0.01					
Oktane	C ₈ H ₁₈	"	< 0.01					
Aromaten	C ₆ +C ₇ Cycl.	"	< 0.01			¹⁾ inkl. Iso- Verbindungen		¹⁾ inkl. Iso- Verbindungen
Gesamtschwefel								
- in unodoriertem Gas	S	mg/m ³ _{VN}	1.7	0.4 - 2.8	< 3	--- - ---	< 3	--- - ---
- in odoriertem Gas	S	mg/m ³ _{VN}	8.8	7.8 - 10.1	6.2	3.5 - 9.7	7.4	6.0 - 9.6
Schwefelwasserstoff	H ₂ S	mg/m ³ _{VN}	0.1	< 0.1 - 0.2	< 0.1	--- - ---	< 0.1	--- - ---
Brennwert	Ho,n	kWh/m ³	11.18	10.89 - 11.51	11.06	11.04 - 11.07	11.19	11.13 - 11.24
Heizwert	Hu,n	kWh/m ³	10.09	9.83 - 10.39	9.97	9.96 - 9.98	10.10	10.05 - 10.85
Wobbeindex	Wo,n	kWh/m ³	14.43	14.08 - 14.76	14.72	14.70 - 14.73	14.44	14.28 - 14.59
Rel.Dichte (Luft = 1)	d	---	0.601	0.56 - 0.64	0.565	0.56 - 0.57	0.600	0.59 - 0.61
Normdichte	ρ _n	kg/m ³	0.777		0.731		0.776	
Dyn. Zähigkeit η _{1, n}	(0 °C, 1 bar)	Pa·s	10.37 * 10 ⁻⁶		10.30 * 10 ⁻⁶		10.36 * 10 ⁻⁶	
Dyn. Zähigkeit η _{2, n}	(20 °C, 1 bar)	Pa·s	10.98 * 10 ⁻⁶		10.91 * 10 ⁻⁶		10.97 * 10 ⁻⁶	
Explosionsbereich	(20 °C, 1 bar)	Vol.-%	4,4 - 15		4,4 - 15		4,4 - 15	
Zündgeschwindigkeit	v max. in Luft	m/s	0.39		0.39		0.39	
Mittl. spez. Wärme c _{pm}	(0°C bis 300°C)	kWh/m ³ * K	0.54 * 10 ⁻³		0.53 * 10 ⁻³		0.54 * 10 ⁻³	
Sutherland Konstante C		---	128		129		128	
Stöchiometrische Verbrennung:								
Luftbedarf	Vol. / Vol. Gas		9.61		9.52		9.61	
Abgasmenge	Vol. / Vol. Gas		10.64		10.53		10.64	
Wassergehalt	trockene Abgase	g/m ³ _n	185		188		185	
Abgasanalyse "feucht"	H ₂ O	Vol.-%	18.7		18.9		18.7	
	CO ₂	"	9.7		9.5		9.7	
	N ₂	"	71.6		71.5		71.6	
Taupunkt		°C	59		59		59	
Abgasanalyse "trocken"	CO ₂	Vol.-%	11.9		11.8		11.9	
	N ₂	"	88.1		88.2		88.1	
- von unodoriertem Gas	SO ₂	mg/m ³ _{VN}	0.4		< 0.7		< 0.7	
- von odoriertem Gas	SO ₂	mg/m ³ _{VN}	2.0		1.5		1.7	

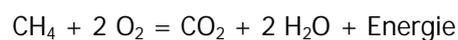
Abb. 2 Grenzen zwischen gasförmigem und flüssigem Zustand für Methan im Vergleich mit anderen Substanzen

Siedetemperatur verschiedener Gase



2.3.2 Verbrennungsvorgänge

Als Verbrennung bezeichnet man die Reaktion eines Stoffes mit Sauerstoff - in der Regel in Flammen - wobei chemisch gebundene Energie als Wärme frei wird. Bei Methan lautet die Reaktionsgleichung:

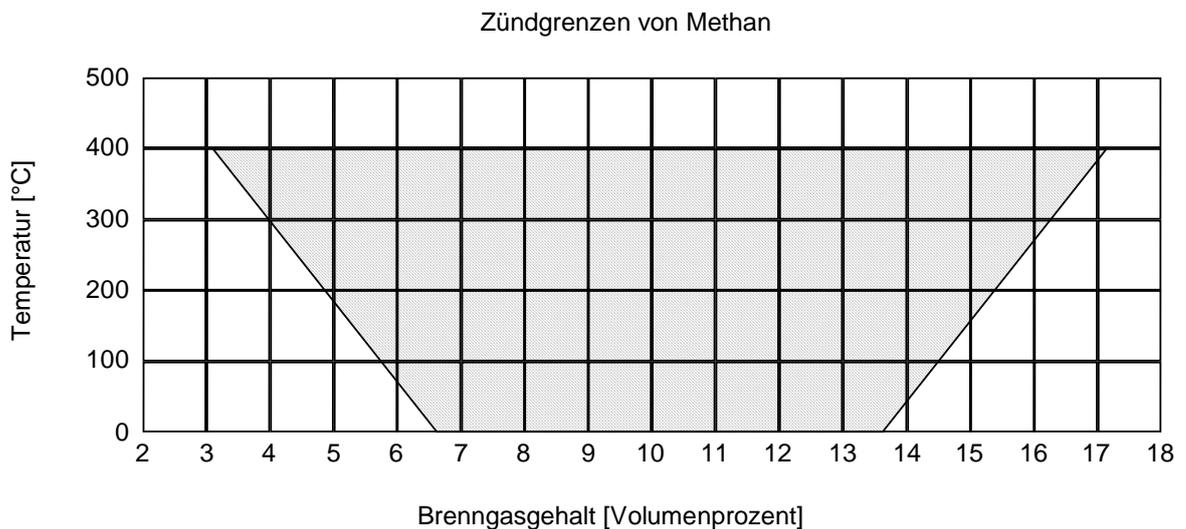


Methan verbrennt zu Kohlendioxid und Wasser bei einer Energiefreisetzung von ca. $3.58 \times 10^7 \text{ Jm}^{-3}$ bzw. 10 kWh pro m^3 (bei 20°C und 1 bar Druck).

Damit eine Verbrennung überhaupt stattfinden kann, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- Das freigesetzte Gas muss brennbar sein;
- Der erforderliche Sauerstoff muss vorhanden sein. Der Luftbedarf bei der Verbrennung beträgt 10 Volumeneinheiten Luft pro Volumeneinheit Erdgas;
- Eine gewisse Durchmischung von Umgebungsluft und Brenngas muss bestehen. Methan ist nur innerhalb der (temperaturabhängigen) Zündgrenzen von 3-17 Vol% (siehe Abb. 3) überhaupt entzündbar. Je turbulenter die Strömung im Gemisch, desto besser die Sauerstoffzufuhr bei der Verbrennung;
- Das Gemisch muss gezündet werden. Die notwendige Zündenergie beträgt 0.28 J, d.h. Funkenbildung kann als auslösendes Ereignis eines Störfalles bereits genügen.

Abb. 3 Zündgrenzen von Methan in Abhängigkeit von der Temperatur



2.4 Brandszenarien

2.4.1 Feuerball

Bei sofortiger oder kurz verzögerter Zündung kann in der Anfangsphase eine kugelförmige Abbrandform entstehen, die nach einigen Sekunden in eine stehende Fackelflamme übergeht. Dieser Feuerball emittiert kurzzeitig eine sehr grosse Hitzestrahlung, die diejenige eines stehenden Fackelbrandes übertrifft.

Abb. 4 Feuerball nach dem Versagen einer Erdgashochdruckleitung in Russland, Jahr 2009
(Quelle: unbekannt)



2.4.2 Fackelbrand

Nach einem Störfall an einer Erdgashochdruckleitung mit anschliessender Zündung brennt das austretende Erdgas im Allgemeinen als Fackelbrand ab. Aus einem Leck strömt kontinuierlich Gas aus, welches in einer länglichen Flammenform ähnlich einer Fackel abbrennt.

Abb. 5 Fackelbrand nach dem Versagen einer Erdgashochdruckleitung in Gräveneck D, 2007
(Quelle: Feuerwehr-Weblog, 2007)



2.5 Explosionsszenarien

Dispersion

Beim Totalversagen einer Erdgashochdruckleitung ohne Zündung strömt das Erdgas strahlartig aus der Leckstelle. Durch Expansion auf Normaldruck kühlt sich das Gas ab, erwärmt sich jedoch durch Vermischung mit der Umgebungsluft rasch auf die Umgebungstemperatur. Die Dichte des Erdgas-/Luft-Gemisches ist dabei annähernd gleich der Dichte der Umgebungsluft, so dass sich kein Schweregas bilden kann.

Deshalb wird bei erdverlegten Rohrleitungen in unverdämmter Umgebung ohne sofortige Zündung davon ausgegangen, dass sich das ausgetretene Gas verflüchtigt, ohne dass es zu einer nachträglichen Zündung und zu einem sogenannten Gaswolkenbrand (engl. flash fire) kommt. In verdämmter Umgebung hingegen kann aufgrund der Dispersion eine erhebliche Explosionsgefahr entstehen.

Explosion

In unverdämmter Umgebung ist nicht mit relevanten Explosionen zu rechnen, da davon ausgegangen wird, dass sich das Gas rasch verflüchtigt und sich ohne Verdämmung keine grösseren Explosionsdrücke aufbauen können.

In stark verdämmten Situationen (Stationen, Stollen, Tunnels, etc.) ist das Szenario Explosion jedoch zu berücksichtigen (siehe Kapitel 9.4 und 9.5).

Deflagration

Eine Deflagration ist ein schneller, von einer Druckentwicklung begleiteter Verbrennungsvorgang.

Von einer Detonation unterscheidet sich die Deflagration durch folgende Merkmale: Der Explosionsdruck wird nur durch die bei der Verbrennung entstehenden und sich ausdehnenden Gase hervorgerufen. Das unverbrannte Gemisch wird bei der Deflagration durch Aufheizen an der Flammenfront gezündet. Die Flamm- oder Reaktionsfront breitet sich langsamer als die Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Medium aus.

Deflagrationen können unter Umständen in Detonationen übergehen. Deflagrationen, bei denen kein relevanter Druck aufgebaut wird, werden auch Verpuffung genannt.

Detonation

Eine Detonation ist wie die Deflagration ein schneller, von einer Druckentwicklung begleiteter Verbrennungsvorgang.

Im Gegensatz zur Deflagration entsteht bei der Detonation eine Stosswelle, welche das abbrennende Gemisch mit Überschallgeschwindigkeit durchläuft. Detonationen erreichen wesentlich höhere Explosionsdrücke als Deflagrationen.

Detonationen sind in verdämmter Umgebung möglich.

2.6 Schadenfolgen

Wärmestrahlung

Bei unbeabsichtigtem Gasaustritt bei einem Leck an der Erdgashochdruckanlage mit sofortiger oder verzögerter Zündung brennt das Gas in Form eines Fackelbrandes oder bei grossen Lecks auch in Form eines Feuerballs ab, welcher eine starke Hitzestrahlung emittiert.

Die Schädigung von Personen aufgrund der Wärmestrahlung (Letalitäten) ist in Kapitel 6.2 erläutert.

Druckwelle

Bei unbeabsichtigtem Gasaustritt bei einem Leck an der Leitung kann das ausströmende Gas zu einem zündfähigen Gemisch und in verdämmter Umgebung und mit einer Zündquelle zu einer Explosion führen.

Die direkte und indirekte Schädigung von Personen aufgrund der Druckwelle (Letalitäten infolge Lungenriss, Einsturz Gebäude) ist in Kapitel 6.3 erläutert.

Trümmerwurf

Bei der Beschädigung einer Erdgashochdruckleitung strömt Gas unter hohem Druck aus. Dabei können Trümmer, z.B. Rohrfragmente weggeschleudert werden.

Das Schadenspotential des Trümmerwurfes nach der Beschädigung einer Erdgashochdruckleitung ist in unverdämmter Umgebung im Vergleich zu den Brandszenarien sehr gering. Es kann deshalb im Allgemeinen vernachlässigt werden.

Allerdings ist es möglich, dass weggeschleuderte Trümmer andere Anlagen beschädigen, z.B. Industrieanlagen mit gefährlichen Gütern (also auch andere Gasanlagen). Dort kann der Trümmerwurf Auslöser für weitere Freisetzungsvorgänge und damit verbundene Störfälle sein.

In Folge von Explosionen kann ebenfalls Trümmerwurf auftreten.

3 Kontroll- und Beurteilungsverfahren

3.1 Gesetzliche Grundlagen

Das Kontroll- und Beurteilungsverfahren bei Erdgashochdruckanlagen stützt sich auf Artikel 5 bis 7 der Störfallverordnung und die Beurteilungskriterien des BAFU.

Die Ausmasseseinschätzung und Risikoermittlung für Erdgashochdruckanlagen gemäss vorliegendem Rahmenbericht erfüllen die Anforderungen gemäss Art. 5 Abs. 1 lit. f bzw. gemäss Anhang 4 StFV (Art. 6 Abs. 4).

3.2 Schadenindikatoren

Für die Beurteilung des Risikos von Erdgashochdruckanlagen wird im Allgemeinen für die Schädigung der Bevölkerung nur der Schadenindikator n_1 (Anzahl Todesopfer) betrachtet. In einzelnen Fällen mit Folgeschäden (z.B. Hitzeschäden an empfindlichen Anlagen in der unmittelbaren Nähe von Erdgashochdruckanlagen) müssen zusätzliche Indikatoren berücksichtigt werden. Die Systemgrenze der Schadenereignisse ist in diesen Fällen zusammen mit den zuständigen Behörden festzulegen.

3.3 Kurzbericht (Ausmasseseinschätzung)

Für die *Ausmasseseinschätzung* wird die Anzahl möglicher Todesopfer innerhalb der massgeblichen Gefährdungsdistanz ermittelt. Wenn an keiner Stelle mehr als 10 mögliche Todesopfer aus dem grössten Schadenereignis resultieren, so ist keine schwere Schädigung der Bevölkerung infolge von Störfällen zu erwarten. In diesem Fall ist das Kontroll- und Beurteilungsverfahren mit der Ausmasseseinschätzung abgeschlossen.

Ergibt das Ausmassprofil Störfallwerte über 0.3 (entspricht 10 Todesopfern), d.h. kann eine schwere Schädigung der Bevölkerung nicht ausgeschlossen werden, so muss eine Risikoermittlung für den entsprechenden Leitungsabschnitt durchgeführt werden.

Anstelle der Ausmasseseinschätzung kann auch ein *Screening-Verfahren* zur Anwendung kommen: Dies ist ein Verfahren zur Prüfung der Risiken für ein ganzes Netz (von Verkehrswegen oder Rohrleitungen), welches vereinfacht und konservativ berechnet, auf 100 m Streckenlänge normierte Summenkurven im W-A-Diagramm sowie eine Liste von Segmenten liefert, die aufgrund von Ausschlusskriterien als unbedenklich betrachtet werden. Die für das Screening verwendeten Methoden werden unter Einbezug der Vollzugsbehörden und des BAFU entwickelt.

3.4 Risikoanalyse (Risikoermittlung und Risikobeurteilung)

Das Risiko von Erdgashochdruckanlagen wird durch die Eintretenswahrscheinlichkeit und durch das Ausmass der möglichen Schädigungen der Bevölkerung infolge von Störfällen bestimmt. Das Risiko muss im Rahmen der *Risikoermittlung* quantifiziert und als Summenkurve in einem W-A-Diagramm dargestellt werden.

Die *Beurteilung* der Tragbarkeit des Risikos erfolgt über die Lage der Summenkurve im Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm (siehe Abb. 7). Es gelten die Beurteilungskriterien im Dokument "Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung" des Bundesamtes für Umwelt.

3.5 Folgeschäden

Die Verantwortlichkeiten bei Störfallbetrieben infolge Folgeschäden, welche durch das Versagen einer Erdgashochdruckleitung ausgelöst werden können, werden folgendermassen abgegrenzt:

Falls der Betrieb, bei dem die Freisetzung ausgelöst wird, in den Geltungsbereich der Störfallverordnung fällt, so muss dieser Inhaber in eigener Sache einen Kurzbericht einreichen und, falls eine schwere Schädigung von Bevölkerung und Umwelt nicht ausgeschlossen werden kann, eine Risikoermittlung erstellen. Im Kurzbericht bzw. in der Risikoermittlung (und beim Treffen von Massnahmen) ist dann das Versagen der Erdgashochdruckleitung als ein möglicher Auslöser für einen Störfall mit zu berücksichtigen. Der Inhaber der Rohrleitungsanlage muss die für diese Abschätzungen erforderlichen Grundlagen zur Verfügung stellen, er muss aber die Folgeschäden in seinem Bericht nicht abhandeln.

4 Methodik einer Ausmasseinschätzung

Die Ausmasseinschätzung erfolgt in folgenden Schritten:

- Bestimmung der Schadenereignisse
- Bestimmung des Schadenausmasses
- Bestimmung der risikorelevanten Stellen

Die relevanten Schadenereignisse werden aufgrund des Fehlerbaums und des Ereignisbaums bestimmt (siehe Kapitel 2). Für erdverlegte Leitungen in nicht verdämmter Umgebung ist das relevante Schadensszenarium das Totalversagen mit einem Gasaustritt mit sofortiger oder verzögerter Zündung, welcher in Form eines Feuerballs oder Fackelbrandes eine starke Hitzestrahlung emittiert (siehe Abb. 4 und Abb. 5).

Für die Ausmasseinschätzung wird alle 10 m die Anzahl maximal möglicher Todesopfer innerhalb der massgeblichen Gefährungsdistanz entlang der Erdgashochdruckanlage ermittelt.

Die Gefährungsdistanz einer erdverlegten Erdgashochdruckleitung in nicht verdämmter Umgebung wird durch das Totalversagen dieser Leitung (Leck mit einem Durchmesser grösser als Rohrdurchmesser) mit sofortiger Zündung des austretenden Erdgases bestimmt. Für die Ausmasseinschätzung ist nur das Brandszenarium Feuerball relevant. Es wird der ganze Bereich bis zum Letalitätsradius R_0 des Feuerballs für Personen im Freien betrachtet. Die Grösse der Letalitätsradien wird gemäss Kapitel 6.2.2 bestimmt.

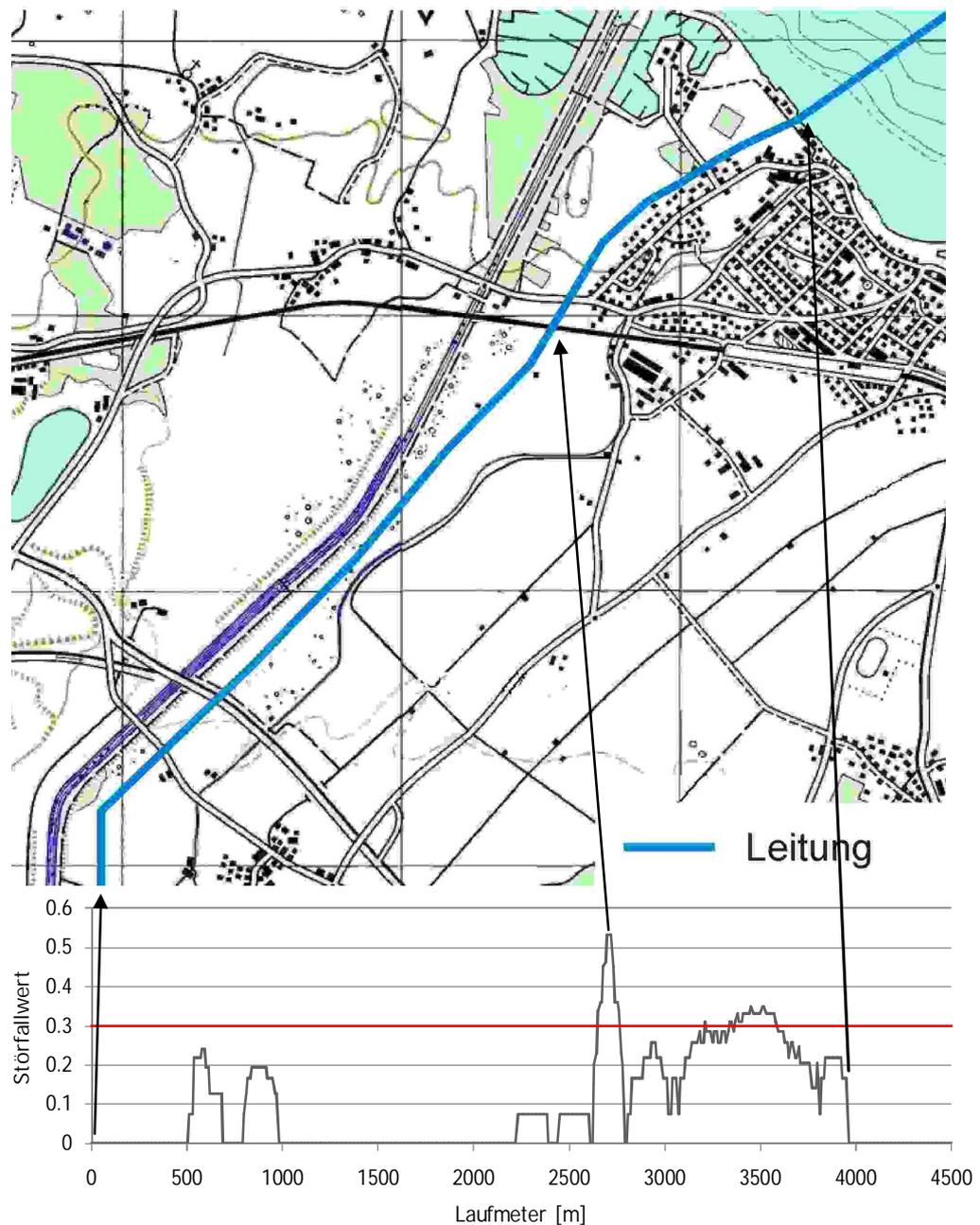
Für die Abschätzung des Ausmasses im Ausmassprofil wird die Letalität der anwesenden Personen gestuft nach den Letalitätsradien R_0 bis R_{100} (Kap. 6.2.2) mit den entsprechenden Letalitäten gemäss Kap. 6.2.1 bestimmt. Zudem wird bei der Bestimmung des grösstmöglichen Ausmasses auch die Schutzwirkung von Gebäuden gemäss Kapitel 6.2.1.2 mitberücksichtigt.

Bei Zügen im Einflussbereich von Erdgashochdruckleitungen wird die schnelle Bewegung durch das Wärmestrahlungsfeld berücksichtigt, die Letalitäten der Passagiere werden gemäss Kapitel 8.2 bestimmt.

Bei der Abschätzung des Ausmasses wird das grösste Ausmass über die gleichzeitig anwesenden Personen bestimmt. Bei gleichzeitig denkbaren Nutzungen müssen somit die anwesenden Personen mit den entsprechenden Letalitäten zusammengezählt werden. Nutzungen hingegen, welche nicht gleichzeitig stattfinden können, müssen bei der Ausmasseinschätzung nicht zusammengezählt werden. In der Regel wird somit die Nutzung mit dem grössten Ausmass berechnet, z.B. Gewerbe an Wochentagen oder Wohnbevölkerung in der Nacht. Bei Bedarf (gemischte Personenbelegung) sind verschiedene Nutzungen zu rechnen. In diesem Fall wird nicht für jede Nutzung separat ein Ausmassprofil dargestellt, sondern ein umfassendes Ausmassprofil mit den jeweils grössten Störfallwerten.

Die Ergebnisse der Ausmasseschätzung werden in einem Ausmassprofil dargestellt:

Abb. 6 Beispiel Ausmassprofil



Wenn an keiner Stelle mehr als 10 mögliche Todesopfer aus einem Totalversagen ("rupture") resultieren, so führt ein Störfall an der Erdgashochdruckanlage zu keiner schweren Schädigung der Bevölkerung. In diesem Fall ist das Kontroll- und Beurteilungsverfahren mit der Ausmasseschätzung abgeschlossen.

Ergibt das Ausmassprofil Störfallwerte über 0.3 (entspricht 10 Todesopfern), so muss in diesem Abschnitt eine Risikoermittlung durchgeführt werden.

Die Identifikation der risikorelevanten Stellen erfolgt in der Regel über eine Ausmasseinschätzung mit zugehörigem Ausmassprofil.

Falls aufgrund der maximalen Personendichte auf einem Abschnitt eindeutig hervorgeht, dass mehr als 10 Todesopfer resultieren, kann auf die Ausmasseinschätzung verzichtet und direkt eine Risikoermittlung erstellt werden.

5 Methodik einer Risikoanalyse

5.1 Definition des Risikos

Im Art. 2 Abs. 5 der Störfallverordnung (StFV) wird das Risiko wie folgt definiert:

"Das Risiko wird bestimmt durch das Ausmass der möglichen Schädigungen der Bevölkerung und der Umwelt infolge von Störfällen und der Wahrscheinlichkeit, mit der diese eintreten."

Das Risiko R ergibt sich aus der Eintretenswahrscheinlichkeit P eines Schadenereignisses und dem Ausmass A der Schädigung.

Beim Risiko wird häufig unterschieden zwischen individuellem Risiko und kollektivem Risiko. Das kollektive Risiko wird für ein bestimmtes, geografisch ausgedehntes Gebiet berechnet, das eine bestimmte Bevölkerungsverteilung über den Raum und die Zeit aufweist. Eine Änderung dieser Verteilung wird sich in der Regel auf die Grösse des kollektiven Risikos auswirken. Das kollektive Risiko entspricht der Summe der individuellen Risiken im betrachteten Gebiet.

5.2 Vorgehen bei der Risikoermittlung (W-A-Diagramm)

In der Risikoermittlung gemäss Störfallverordnung wird nur das kollektive Risiko bestimmt. Im vorliegenden Rahmenbericht wird daher nicht auf die Bestimmung des individuellen Risikos eingegangen.

Die Risikoermittlung erfolgt in folgenden Schritten:

- Systemabgrenzung
- Bestimmung der Eintretenswahrscheinlichkeiten
- Bestimmung der Schadenausmasse
- Berechnung der Summenkurve und Darstellung des Risikos

Die Berechnung der Summenkurve für Erdgashochdruckleitungen erfolgt über eine Abschnittslänge von 100 m.

Die Risikoermittlung muss die Beurteilung des Risikos auf Leitungsabschnitten mit Störfallwerten > 0.3 ermöglichen, d.h. für jeden Ort auf der Leitung mit einem Störfallwert > 0.3 muss ein repräsentatives W-A-Diagramm zugeordnet werden.

Die *Eintretenswahrscheinlichkeit* für einen Störfall mit einem bestimmten Ausmass setzt sich zusammen aus der Wahrscheinlichkeit der Schadenursache, des Schadenereignisses und der Aufenthaltswahrscheinlichkeit von Personen im Einflussbereich eines Gefahrenszenariums der Erdgashochdruckleitung.

Das *Ausmass* ergibt sich aus der Anzahl Todesopfer, welche aufgrund der gleichzeitig anwesenden Personen und der Letalitäten für die massgebenden Störfallszenarien bestimmt wird und in den entsprechenden Störfallwert umgerechnet wird.

Als Schadenereignis bei Erdgashochdruckleitungen wird im betrachtenden Abschnitt von 100 m in regelmässigen Abständen von 10 m ein Totalversagen angenommen.

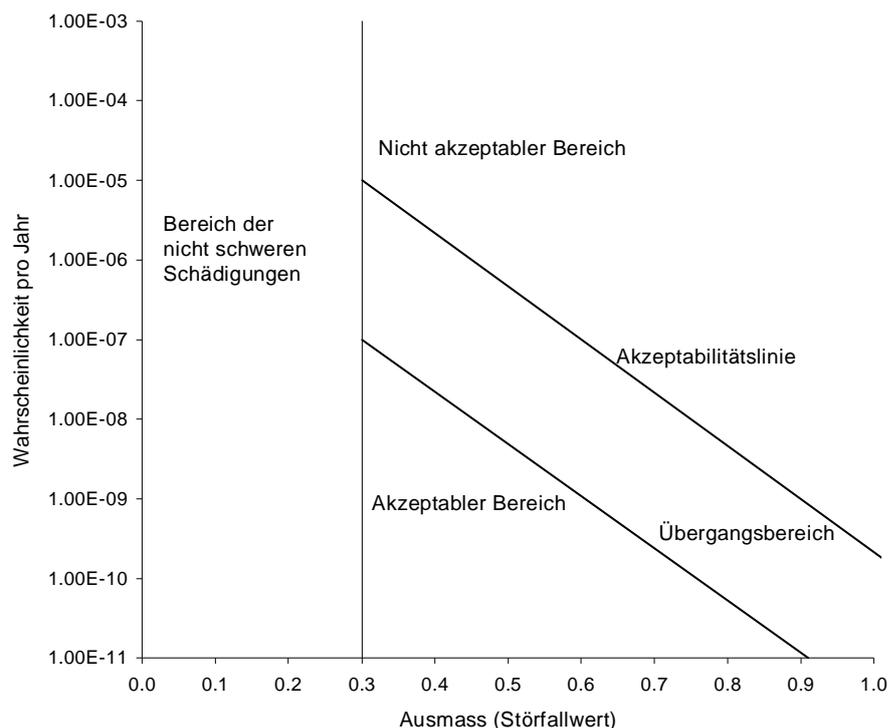
Die Wahrscheinlichkeiten und Störfallwerte der Schadenereignisse bilden die Grundlage für die *Summenkurve* (komplementär-kumulative Verteilungsfunktion), welche im W-A-Diagramm dargestellt wird. Für die Berechnung der Summenkurve werden die Schadenereignisse nach der Grösse ihrer Störfallwerte in absteigender Reihenfolge geordnet und die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Schadenereignisse, ausgehend vom Schadenereignis mit dem grössten Störfallwert, aufsummiert. Die Summenkurve gibt somit näherungsweise die Wahrscheinlichkeiten an, mit welcher bestimmte Ausmasse an Schädigungen infolge von Störfällen an der betrachteten Erdgashochdruckanlage überschritten werden können.

5.3 Vorgehen bei der Risikobeurteilung

Das Ausmass wird gemäss Kapitel 6 bestimmt. Die Eintretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ausmasses setzt sich zusammen aus den Versagensraten und Szenarienwahrscheinlichkeiten (gemäss Kapitel 9) sowie den Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Personen (gemäss Kapitel 7.4).

Die Beurteilung des Risikos erfolgt über die Summenkurve im Wahrscheinlichkeits-Ausmass-Diagramm (siehe Abb. 7). Es gelten die Beurteilungskriterien gemäss der Vollzugshilfe "Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung" des Bundesamtes für Umwelt (BAFU).

Abb. 7 W-A-Diagramm



6 Schadenausmass

6.1 Bestimmung des Störfallwertes

Die Anzahl der bei einem Störfall getöteten Personen wird durch den Störfallwert für den Schadenindikator n_1 dargestellt. Dieser ist proportional zum Logarithmus der Anzahl getöteter Personen:

$$n_1 = 0.3 \times \log \sum_{i=1}^N (A_{b,i} \times L_i)$$

Wobei $A_{b,i}$ = Anzahl betroffene Personen im Letalitätsbereich i
 L_i = Letalität im Letalitätsbereich i

Für die Risikobeurteilung von Erdgashochdruckanlagen ist in der Regel nur die Anzahl möglicher Todesopfer (Schadenindikator n_1) relevant.

6.2 Brandszenarien

Für erdverlegte Leitungen in nicht verdämmter Umgebung ist das relevante Schadenszenarium ein Gasaustritt bei Totalversagen der Leitung (Leckdurchmesser grösser oder gleich als Rohrdurchmesser) mit sofortiger oder verzögerter Zündung, welcher in Form eines Feuerballs oder Fackelbrandes eine starke Hitzestrahlung emittiert.

6.2.1 Bestimmung der Letalitäten

Für die Berechnung der Letalitätsradien für Personen werden die folgenden Wärmestrahlungsdosen verwendet:

Tab. 3 Wärmestrahlungsdosen der entsprechenden Letalitäten

Letalität	Wärmestrahlungsdosis V im Freien
100%	ab ca. $3'415 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$
75%	bei ca. $2'745 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$
50%	bei ca. $2'075 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$
25%	bei ca. $1'405 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$
0%	bis ca. $735 \text{ s(Wm}^{-2})^{4/3}$

Die Ermittlung der Anzahl betroffener Personen erfolgt über fünf Letalitätsradien R_0 , R_{25} , R_{50} , R_{75} und R_{100} . Die Indizes geben die Letalität in % auf diesem Radius an.

6.2.1.1. Letalitäten für Personen im Freien

Innerhalb dieser Radien gelten für Personen im Freien die folgenden mittleren Letalitätsfaktoren:

Tab. 4 Letalitätsfaktoren für Personen im Freien

Letalitätsbereich	Letalität für Personen im Freien
innerhalb R_{100}	100%
zwischen R_{75} und R_{100}	85%
zwischen R_{50} und R_{75}	60%
zwischen R_{25} und R_{50}	35%
zwischen R_0 und R_{25}	10%

6.2.1.2. Letalitäten für Personen in Gebäuden

Für Personen, die sich in Gebäuden aufhalten, wird eine standardisierte Schutzwirkung der Gebäude angenommen. Es werden die Letalitätsradien für den Fackelbrand für Personen im Freien (R_{FA}) verwendet, jedoch mit folgenden Letalitäten:

Tab. 5 Standardisierte Letalitäten für Personen in Gebäuden beim Schadenszenarium Feuerball mit anschliessendem Fackelbrand

Letalitätsradien	Letalität innerhalb des $R_{ZI\ FE}^a$	Letalität ausserhalb des $R_{ZI\ FE}^a$
innerhalb $R_{100\ FA}$	100%	75%
zwischen $R_{75\ FA}$ und $R_{100\ FA}$	95%	65%
zwischen $R_{50\ FA}$ und $R_{75\ FA}$	80%	45%
zwischen $R_{25\ FA}$ und $R_{50\ FA}$	70%	25%
zwischen $R_{0\ FA}$ und $R_{25\ FA}$	-- ^b	10%

Zusätzlich zu den Radien für den Fackelbrand für Personen im Freien wird der Radius $R_{ZI\ FE}$ verwendet. Dieser Radius markiert die maximale Distanz zum Brandzentrum, innerhalb der das Gebäudeinnere bei intakten Fenstern während der Abbranddauer des Feuerballs in Brand gerät.

Beim Fackelbrand wird ebenfalls ein zusätzlicher Radius, der Radius $R_{ZI\ FA}$ verwendet. Dieser Radius markiert die maximale Distanz, innerhalb derer das Gebäudeinnere bei einem Fackelbrand und bei intakten Fenstern innert maximal 15 s^c Feuer fängt.

^a Die angegebenen Letalitäten gelten für normal mobile Personen in Gebäuden mit durchschnittlicher Schutzwirkung ohne eingeschränkte Fluchtwege.

^b Der $R_{ZI\ FE}$ ist bei den in der Schweiz vorkommenden Leitungsparametern nie grösser als der $R_{25\ FA}$.

^c Der Schwellenwert von 15 s bis zur Zündung trotz intakter Fenster wird als mittlerer Wert für den Fackelbrand eingesetzt, um vergleichbare Werte mit der Abbranddauer des Feuerballs (ca. 4 bis 25 s) zu verwenden.

Tab. 6 Standardisierte Letalitäten für Personen in Gebäuden beim Schadenszenarium Fackelbrand

Letalitätsradien	Letalität für Personen in Gebäuden ^a
innerhalb R _{ZI FA}	100%
zwischen R _{100 FA} und R _{ZI FA}	75%
zwischen R _{75 FA} und R _{100 FA}	35%
zwischen R _{50 FA} und R _{75 FA}	10%
zwischen R _{25 FA} und R _{50 FA}	5%
zwischen R _{0 FA} und R _{25 FA}	0%

Fallweise können zusätzliche bauliche Massnahmen quantifiziert werden.

6.2.2 Bestimmung der Letalitätsradien

Die Letalitätsradien für die Risikoermittlung werden aufgrund des Bewilligungsdruckes bestimmt. Bei starken saisonalen Betriebsunterschieden kann sich die Risikoabschätzung aber auch auf den effektiven Betriebsdruck beziehen. Dabei werden die effektiven Betriebsdrücke (in der Regel Tagesmittelwerte) auf deren Zeitdauer (Anteil Tage pro Jahr) bezogen. Diese Risikoabschätzungen gelten dann für das zu beurteilende Betriebsregime und müssen bei signifikanter Änderung des Betriebsregimes angepasst werden.

6.2.2.1. Feuerball

Für die Expositionszeit wird beim Szenario Feuerball dessen Abbranddauer angenommen. Sie berechnet sich in Abhängigkeit der freigesetzten Gasmenge M_g [kg]:

$$t_{FE} = 0.38 \times M_g^{0.333}$$

Wobei t_{FE} = Expositionszeit = Abbranddauer Feuerball [s]

M_g = freigesetzte Gasmenge [kg]

Gestützt auf die Strahlungsintensitäten und die Abbranddauer ergeben sich für die Erdgas-hochdruckleitungen für das Schadenereignis Feuerball die nachfolgenden Letalitätsradien.

Tab. 7 Letalitätsradien Feuerball für Personen im Freien und Radius $R_{ZI\ FE}$ für die Entzündung des Gebäudeinnern während des Feuerballs

Durchmesser: Nennweite [Zoll] bzw. Rohraus- sendurchmesser	Druck	Ab- brand- dauer	$R_{100\ FE}$ [m]	$R_{75\ FE}$ [m]	$R_{50\ FE}$ [m]	$R_{25\ FE}$ [m]	$R_{0\ FE}$ [m]	$R_{ZI\ FE}$ [m]
4" (114.3 mm)	25 bar	3 s	5	5	10	15	20	5
	50 bar	3 s	5	10	15	20	30	5
	64 bar	3 s	10	10	15	25	35	10
	70 bar	4 s	10	15	20	25	35	10
6" (168.3 mm)	25 bar	3 s	10	15	15	25	35	10
	64 bar	5 s	20	25	30	40	55	15
	70 bar	5 s	20	25	30	40	60	20
8" (219.1 mm)	25 bar	4 s	15	20	25	35	50	15
	50 bar	5 s	25	30	40	50	70	25
	64 bar	6 s	30	35	45	55	70	25
	70 bar	6 s	30	40	45	60	80	25
10" (273.0 mm)	25 bar	5 s	25	30	35	45	65	20
	50 bar	7 s	35	45	50	65	90	30
	64 bar	7 s	40	50	60	75	100	35
	70 bar	7 s	45	50	60	75	105	35
12" (323.9 mm)	25 bar	6 s	30	40	45	60	80	25
	50 bar	8 s	45	55	65	80	110	40
	54 bar	8 s	50	60	70	85	115	40
	70 bar	9 s	55	65	80	95	130	45
14" (355.6 mm)	50 bar	9 s	60	70	80	100	130	45
	70 bar	10 s	70	80	95	115	155	55
16" (406.4 mm)	70 bar	11 s	85	95	110	135	180	65
	80 bar	11 s	90	100	120	145	190	65
20" (508.0 mm)	70 bar	13 s	110	125	145	175	230	80
22" (559.0 mm)	25 bar	10 s	75	85	95	120	160	55
	45 bar	12 s	100	110	130	155	205	75
24" (609.6 mm)	70 bar	15 s	140	155	180	210	280	95
28" (711.0 mm)	70 bar	17 s	165	185	210	250	330	115
34" (863.6 mm)	70 bar	20 s	205	230	260	310	405	135
36" (914.0 mm)	67.5 bar	20 s	215	240	275	325	425	140
	70 bar	21 s	220	245	280	330	430	145
	85 bar	22 s	245	270	305	360	470	155
48" (1219 mm)	67.5 bar	25 s	300	330	375	445	575	185
	70 bar	26 s	305	335	380	450	585	185
	75 bar	26 s	315	350	395	465	600	190

Für die Letalitätsradien für Personen in Gebäuden wird zusätzlich der Radius $R_{ZI\ FE}$ verwendet. Dieser Radius markiert die maximale Distanz zum Brandzentrum, innerhalb der das Gebäudeinnere bei geschlossenen und intakten Fenstern während der Abbranddauer des Feuerballs in Brand gerät.

6.2.2.2. Fackelbrand

Für das Schadenereignis Fackelbrand wird eine Expositionszeit der Personen von 30 Sekunden angenommen.

Gestützt auf die Strahlungsintensitäten und eine Expositionsdauer von 30 Sekunden ergeben sich für die häufigsten Erdgashochdruckleitungen für das Schadenereignis Fackelbrand die Letalitätsradien gemäss Tab. 8.

Für die Letalitätsradien für Personen in Gebäuden wird zusätzlich der Radius $R_{ZI\ FA}$ verwendet. Dieser Radius markiert die maximale Distanz, innerhalb derer das Gebäudeinnere bei einem Fackelbrand und bei geschlossenen und intakten Fenstern innert maximal 15 s Feuer fängt.

Tab. 8 Letalitätsradien Fackelbrand und Radius $R_{ZI\ FA}$ für die Entzündung des Gebäudeinnern beim Schadenszenarium Fackelbrand

Durchmesser: Nennweite [Zoll] bzw. Rohraus- sendurchmesser	Druck	$R_{100\ FA}$ [m]	$R_{75\ FA}$ [m]	$R_{50\ FA}$ [m]	$R_{25\ FA}$ [m]	$R_{0\ FA}$ [m]	$R_{ZI\ FA}$ [m]
4" (114.3 mm)	25 bar	10	10	10	15	20	5
	50 bar	10	15	15	20	30	5
	64 bar	10	15	15	20	35	5
	70 bar	15	15	20	25	35	5
6" (168.3 mm)	25 bar	10	15	15	20	30	5
	64 bar	20	20	25	35	50	10
	70 bar	20	20	25	35	50	10
8" (219.1 mm)	25 bar	15	20	20	30	40	5
	50 bar	20	25	30	40	55	10
	64 bar	25	30	35	45	65	10
	70 bar	25	30	35	45	65	10
10" (273.0 mm)	25 bar	20	20	25	35	50	10
	50 bar	25	30	35	45	70	10
	64 bar	30	35	40	55	80	15
	70 bar	30	35	45	55	85	15
12" (323.9 mm)	25 bar	22	26	30	40	60	10
	50 bar	30	35	45	55	85	14
	54 bar	30	35	45	60	85	15
	70 bar	35	40	50	65	100	15
14" (355.6 mm)	50 bar	35	40	50	65	95	15
	70 bar	40	50	60	75	115	20
16" (406.4 mm)	70 bar	50	55	65	85	130	20
	80 bar	50	60	70	90	135	25
20" (508.0 mm)	70 bar	60	70	80	105	160	25
22" (559.0 mm)	25 bar	40	45	55	70	105	20
	45 bar	50	60	75	95	140	25
24" (609.6 mm)	70 bar	70	80	95	125	190	30
28" (711.0 mm)	70 bar	80	95	110	145	220	40
34" (863.6 mm)	70 bar	95	110	135	175	260	45
36" (914.0 mm)	67.5 bar	100	115	140	180	270	45
	70 bar	100	120	140	185	275	50
	85 bar	110	130	155	200	300	55
48" (1219 mm)	67.5 bar	130	150	185	235	355	60
	70 bar	135	155	185	240	360	65
	75 bar	140	160	190	250	375	65

6.3 Explosionsszenarien

Bei Stationen sowie Gasleitungen in verdämmten Umgebungen (Stollen, Kanäle, etc.) kann ausströmendes Gas zu einem zündfähigen Gemisch, und bei vorhandener Zündquelle, zu einer Explosion führen. Für erdverlegte Leitungen in nicht verdämmter Umgebung sind Explosionsszenarien nicht relevant.

Für Personen werden folgende Letalitäten aufgrund des Druckstosses angenommen:

Tab. 9 Letalitäten für Personen im Freien bei Druckstoss (Lungenriss)

Überdruck	Letalität für Personen im Freien
1 bar	1%
2 bar	99%

Tab. 10 Letalitäten für Personen in Gebäuden bei Druckstoss von 0.4 bar (Einsturz von Gebäuden)

Überdruck	Letalität für Personen in Gebäuden
0.4 bar (Einsturz von Gebäuden)	20 - 50%

Beim Einsturz von Gebäude wird mit einer Letalität von ca. 20 bis 50% der im Gebäude anwesenden Personen gerechnet, abhängig von der Gebäudegrösse.

7 Belegungsannahmen

7.1 Methodik

Für die Ausmasseinschätzung und die Risikoermittlung sind die Belegungsannahmen grundsätzlich nach den unten aufgeführten Kriterien zu treffen. Unsicherheiten bei der Erhebung der Belegung müssen in der Risikoermittlung diskutiert werden.

Bei der Risikoermittlung ist in Ergänzung zur aktuellen Situation auch der Zustand nach erfolgter Siedlungsentwicklung gemäss geltender Nutzungsplanung zu berücksichtigen. Die aktuellen Zonenpläne sind dabei den Unterlagen zur Risikoermittlung beizulegen.

Für die Ausmassberechnungen in der Ausmasseinschätzung und in der Risikoanalyse müssen nur die gleichzeitig anwesenden Personen berücksichtigt werden.

7.2 Wohnen

In *bereits überbauten Wohnzonen* gibt es verschiedene Ansätze zur Bestimmung der Personenbelegung:

- Für Wohnhäuser wird pro Wohneinheit in einem Mehrfamilienhaus eine durchschnittliche Belegung von 2 Personen angenommen, in Einfamilienhäusern eine durchschnittliche Belegung von 3 Personen.
- Bei bekannter Brutto- oder Nettogeschossfläche kann die durchschnittliche Bevölkerungszahl über den durchschnittlichen Wohnflächenbedarf (siehe Tab. 11) abgeschätzt werden.
- Die Wohnbevölkerung kann auch aus den Daten der Einwohnerkontrolle der einzelnen Gemeinden oder aus Volkszählungsdaten ermittelt werden.

In *noch nicht überbauten Wohnzonen* wird die Belegung gemäss geplanten Bauprojekten oder wenn nicht vorhanden aus den zonengerechten Kapazitätsberechnungen ermittelt. Die maximale Personenzahl eines Grundstücks wird über die Nettogeschossfläche und einem durchschnittlichen Wohnflächenbedarf gerechnet.

$$\text{Nettogeschossfläche} = \text{Bruttogeschossfläche} - 15\%$$
$$\text{Bruttogeschossfläche} = \text{Ausnutzungsziffer} \times \text{anrechenbare Parzellenfläche}$$

Für den durchschnittlichen Wohnflächenbedarf werden für verschiedene Überbauungsarten folgende Werte angenommen:

Tab. 11 Mittlerer Wohnflächenbedarf pro Person in Abhängigkeit der Wohnzone

Zonenart	Nettogeschossfläche pro Person [m ²]	
W2 bis W4 städtisch	45	Index für städtischen Raum ^d
W2 ländlich	60	Index für ländlichen Raum
W3 ländlich	50	
W4 ländlich	45	

7.3 Gewerbe, Industrie, Dienstleistungen

Für die Abschätzung der Belegungszahlen von Gewerbe- oder Industriegebäuden müssen fallweise Informationen eingeholt werden (Angaben aus Betriebszählungen, Anfragen bei Gemeinden und Gewerbeverbänden, Internetrecherche, Feldbegehung, etc.).

Dabei kann von drei Hauptgruppen bezüglich Personenbelegung ausgegangen werden:

- Wenig personenintensive Gewerbe- und Industriebetriebe (ca. 200 m² Bruttogeschossfläche pro Person)
- Mittlere Gewerbebetriebe und Industriebetriebe (mittlere Bruttogeschossfläche von 100 m² pro Person)
- Personenintensive Dienstleistungsbetriebe (für Bürogebäude ca. 10 bis 50 m² Nettogeschossfläche pro Person)

In *noch nicht überbauten Gewerbe- bzw. Industriezonen* wird die Belegung fallweise nach geplanter oder ortsüblicher Nutzung (z.B. Produktionsbetriebe, Lagerhallen, Dienstleistungsbetriebe etc.) angenommen.

^d Definition Bundesamt für Statistik (BFS):

Städtischer Raum ist die Summe von Städten und Agglomerationen. Als Agglomerationen werden zusammenhängende Gebiete von mehreren Gemeinden, welche mindestens 20'000 Einwohner beherbergen und Zentren aufweisen, bezeichnet.

Ländlicher Raum umfasst für die vorliegende Personenabschätzung die übrigen Gebiete.

7.4 Aufenthaltswahrscheinlichkeiten (Präsenzfaktoren)

Tab. 12 Präsenzfaktoren

	Wochentag (7 – 19 Uhr)	Nacht während Woche (19 – 7 Uhr)	Wochenendtag (7 – 19 Uhr)	Nacht am Wochenende (19 – 7 Uhr)
Wohnbevölkerung	30% der Wohnbevölkerung anwesend (davon 10% draussen)	90% der Wohnbevölkerung anwesend (davon 1% draussen)	60% der Wohnbevölkerung anwesend (davon 10% draussen)	100% der Wohnbevölkerung anwesend (davon 1% draussen)
Arbeitsbevölkerung	80% der Arbeitsbevölkerung anwesend (davon 10% draussen)	5% der Arbeitsbevölkerung anwesend (davon 5% draussen)	5% der Arbeitsbevölkerung anwesend (davon 10% draussen)	0% der Arbeitsbevölkerung anwesend

Betriebe mit stark abweichenden Präsenzfaktoren, z.B. Firmen mit regelmässiger Nacharbeit, Schichtbetrieb, etc. müssen fallweise angepasst werden (z.B.: Schichtbetrieb während 24 Stunden pro Tag und 7 Tagen pro Woche: 20% der Schichtarbeitenden Tag und Nacht anwesend).

7.5 Öffentlich zugängliche Plätze und Gebäude

Zu den öffentlichen Plätzen zählen alle Einrichtungen, welche der Öffentlichkeit frei oder gegen Gebühr zugänglich sind (Sportplätze, Freizeitveranstaltungen, Campingplätze, Bahnhöfe, Haltestellen, Parkplätze, Schifflanlegestellen, etc.).

Die Belegungszahlen dieser Einrichtungen werden bei der Gemeinde oder den zuständigen Betreibern und Veranstaltern eingeholt. Sofern keine Angaben zur Belegung verfügbar sind, sind diese mittels Feldbegehung abzuschätzen.

Verfügt die Einrichtung über einen grösseren Parkplatz, so ist ein Anteil der Personenbelegung im Freien auf dem Parkplatz anzunehmen.

Bei Bahnhöfen, Haltestellen etc. wird für die Bestimmung des Ausmasses die Personenbelegung des Fahrzeuges (Zug, Tram, etc.) plus die wartenden Passagiere auf dem Perron, Trottoir, etc. angenommen.

Für Schienenfahrzeuge (Eisenbahn, Strassenbahn) wird mit einer durchschnittlichen Aufenthaltsdauer an Bahnhöfen von 0.5 bis 5 Minuten, je nach Grösse des Bahnhofs bzw. der Haltestelle und Fahrzeuge (Eisenbahn, Strassenbahn) entsprechend der Anzahl Passagierbewegungen, gerechnet.

7.6 Anlässe

Beispiele sind Sportanlässe, Kulturanlässe wie Open Air Vorführungen, etc.

Die Anzahl der anwesenden Personen und die Aufenthaltsdauer müssen bei Veranstaltern oder zuständigen Behörden erhoben werden.

7.7 Sonderobjekte Gebäude

Angaben zur Belegung von Sonderobjekten wie Einkaufszentren oder Spitäler, Pflegeheime etc. sind in Kap. 8.3 zu finden.

8 Sonderobjekte im Einflussbereich von Erdgas-hochdruckanlagen

8.1 Strassen

Die Verkehrszahlen werden aus den bestehenden Verkehrszählungen ermittelt. Dabei wird in der Regel der normale Tagesverkehr (stündlicher Verkehr von 6 Uhr bis 22 Uhr) mit 5.8% des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV = durchschnittliche Anzahl Fahrzeuge pro Tag (24 h) und Strassenquerschnitt) angenommen, der normale Nachtverkehr (stündlicher Verkehr von 22 Uhr bis 6 Uhr) mit 0.9% des DTV. Wird der Verkehr von 7 bis 19 Uhr gemittelt, so beträgt der stündliche Tagesverkehr 6.7% des durchschnittlichen täglichen Verkehrs (DTV), der stündliche Nachtverkehr (19 bis 7 Uhr) entsprechend 1.6% des DTV.

Das Ausmass beim Strassenverkehr wird über den mittleren Fahrzeugabstand abgeschätzt:

$$D_F = \frac{v}{N}$$

Wobei D_F = mittlere Distanz zwischen zwei Fahrzeugen pro Fahrtrichtung [km]

v = Geschwindigkeit [km/h]

N = Verkehrsfrequenz pro Stunde und Fahrtrichtung [Fahrzeuge/h]

Fallweise müssen auch weitere Verkehrsszenarien (Stossverkehr, Staus, Wochenendverkehr, Ferienverkehr etc.) berücksichtigt werden. Im Stau (stehende Kolonne) werden pro Fahrspur alle 6.5 m ein Fahrzeug angenommen, stockender Kolonnenverkehr wird fallweise bestimmt.

Es wird in der Regel mit einer Belegung von 1.5 Personen pro Fahrzeug gerechnet. Bei typischem Arbeitsverkehr zu Stosszeiten kann die Anzahl Fahrgäste auf 1.3 Personen pro Fahrzeug reduziert werden, bei typischem Ferienreiseverkehr muss mit mindestens 2 Personen pro Fahrzeug gerechnet werden. Auf Reiserouten muss zu Hauptreisezeiten angenommen werden, dass es sich bei bis zu 0.5% aller Fahrzeuge um Cars (50 Fahrgäste pro Fahrzeug) handelt. Fahrende Cars werden indirekt mittels einer Erhöhung der durchschnittlichen Fahrgastzahl pro Fahrzeug erfasst. Linienbusse werden bei der Berechnung nur an den Haltestellen berücksichtigt (siehe Kap. 7.5).

Strassen mit einem DTV < 10'000 (d.h. Sammelstrassen und Erschliessungsstrassen) müssen in der Risikoermittlung ausser bei Stauvorkommen nicht berücksichtigt werden. Die Strassenkategorien "Nationalstrassen" und "Hauptstrassen" müssen in der Risikoanalyse mitberücksichtigt werden.

Für die Strassenfahrzeuge wird in der Risikoberechnung kein Faktor für die Schutzwirkung eingesetzt, die Letalität wird wie bei Personen im Freien gerechnet. Bei Strassenfahrzeugen muss davon ausgegangen werden, dass sich bei Störfällen an der Gasleitung Fahrnfälle ereignen oder Personen in beschädigten Fahrzeugen in der Flucht behindert werden.

8.2 Eisenbahnlinien

Personenbelegungen im Einflussbereich von Erdgashochdruckleitungen, die sich aus dem Bahnverkehr ergeben, müssen in der Risikoberechnung berücksichtigt werden.

8.2.1 Belegungsannahmen Schienenverkehr

Zugfrequenzen können aus dem aktuellen Fahrplan entnommen werden.

Belegungszahlen zu den auf dem betrachteten Abschnitt verkehrenden Zugkompositionen müssen bei den zuständigen Stellen eingeholt oder mit Erhebungen vor Ort ermittelt werden. Einzelne Zugkompositionen sind an den Bahnhöfen aufgelistet oder können für die Zugsgattungen IC, IR, EC, CIS, TGV, RE etc. über die Website www.reisezuege.ch abgerufen werden.

Fehlen Angaben zu den Belegungszahlen, sind in folgender Tab. 13 Annahmen für starke Belegungen der Züge aufgelistet. Diese hohen Belegungen werden in der Regel während des Pendlerverkehrs bzw. Ferienverkehrs erwartet, bei den übrigen Verbindungen kann von einer stark reduzierten Belegung (10 bis 50% der hohen Belegung) ausgegangen werden.

Tab. 13 Übersicht Zugtypen

Zugtyp	Anzahl Wagen	Anzahl Personen
S-Bahnen	3 – 10 ^e	100 – 1'000 Personen ^e
REG / RX	4 – 6	100 – 200 Personen
IC / EC / CIS	6 – 12	500 Personen
ICN / EN	6 – 12	500 Personen

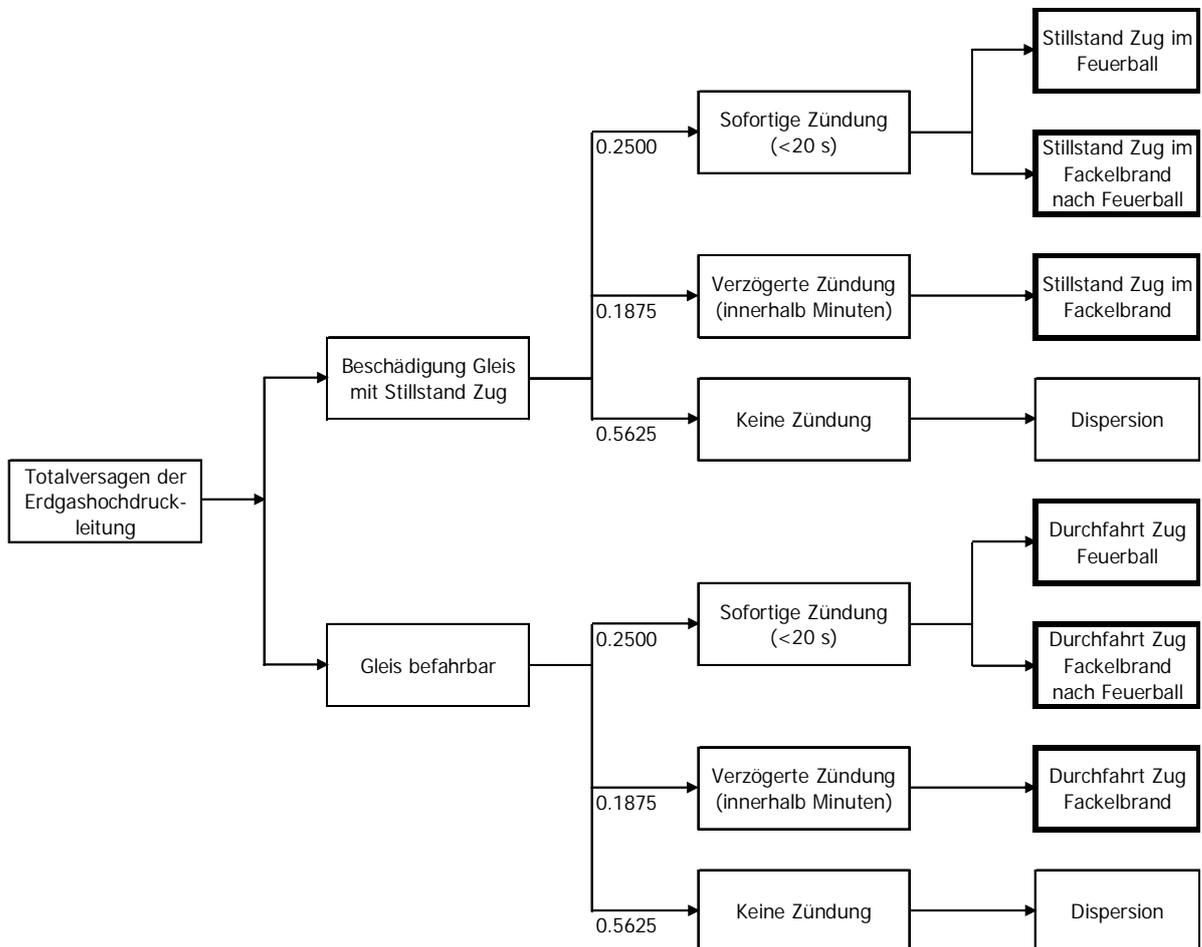
Weil sich die Zugsbelegungen regional stark unterscheiden, sollten diese Zahlen und die Zugverbindungen mit hoher Belegung immer mittels Erhebung vor Ort und Nachfragen bei den zuständigen Stellen an die Situation angepasst werden.

Die Schutzwirkung der Schienenfahrzeuge ist bei der Berechnung der Letalitäten indirekt berücksichtigt und muss bei der Ausmassberechnung nicht separat berücksichtigt werden.

^e Die grosse Spannweite bei den Personenbelegungen der S-Bahnen ergibt sich aus den grossen regionalen Unterschieden resp. den unterschiedlichen Zugs- und Wagentypen.

8.2.2 Schadensszenarien

Abb. 8 Ereignisbaum für Zug im Einflussbereich von Erdgashochdruckleitungen



8.2.3 Berechnungsweise

(siehe auch Berechnungsbeispiel Anhang C)

Schienenfahrzeuge im Bereich von Bahnhöfen und Haltestellen werden in der Ausmasseinschätzung und in der Risikoermittlung als stationäre Objekte berechnet.

Fahrende Schienenfahrzeuge hingegen bewegen sich schnell durch das Wärmestrahlungsfeld des Brandes hindurch. Dies muss bei der Berechnung der Wärmestrahlungsdosis, welche auf den einzelnen Passagier einwirkt, und bei der Bestimmung der Aufenthaltsdauer berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Wärmestrahlungsdosen, welche auf einen einzelnen Passagier einwirken, wurde eine standardisierte Fahrgeschwindigkeit des Zuges von 80 km/h angenommen. Für die Verteilung der Passagiere auf den Zug wurde mit zwei repräsentativen standardisierten Zugslängen von 100 und 300 m gerechnet.

Die daraus resultierenden Letalitäten und Aufenthaltswahrscheinlichkeiten sind in den Tab. 14 bis Tab. 16 und Kap. 8.2.5 zusammengefasst, sie werden für die Berechnung der

Summenkurven benötigt. Für die Berechnung des Ausmassprofils werden nur die Letalitäten benötigt.

8.2.4 Feuerball mit anschliessendem Fackelbrand

Bei standardisierter Geschwindigkeit ist die Distanz der Bahnlinie zum Ort des Totalversagens an der Erdgashochdruckleitung massgebend für die Wärmestrahlungsdosis, welche auf die Passagiere einwirkt, und damit auch massgebend für die *Letalität*. Die Letalität der Passagiere in einem Zug, der bei einem Totalversagen der Erdgashochdruckleitung während des Abbrandes des Feuerballs vorbeifährt, lässt sich gemäss nachfolgenden Tab. 14 und Tab. 15 bestimmen.

Die *Wahrscheinlichkeit*, dass ein Zug vom Feuerball betroffen wird, ergibt sich aus der Aufenthaltsdauer eines Zuges im Gefahrenbereich. Für die Aufenthaltsdauer aller Züge wird diese Aufenthaltsdauer eines einzelnen Zuges mit der Zugsfrequenz auf dem betreffenden Abschnitt multipliziert. Nachfolgende Tab. 14 und Tab. 15 zeigen die Aufenthaltszeiten eines Zuges bei verschiedenen Zugslängen.

Zusätzlich zum Feuerball muss der auf den Feuerball folgende Fackelbrand berücksichtigt werden, da Züge, welche nach dem Ende des Feuerballs an der Leckstelle vorbeifahren, vom auf den Feuerball folgenden Fackelbrand betroffen sein können. In grober Abschätzung wird die Wahrscheinlichkeit, dass beim Ereignis eines Fackelbrands nach dem Feuerball ein Zug betroffen ist, folgendermassen berechnet: Die Durchfahrtszeit eines Zuges durch den Gefahrenbereich des Fackelbrandes (gemäss Kap. 8.2.5) wird mit 50% der Zugsfrequenz auf dem betreffenden Abschnitt multipliziert. Die Letalität dieser Zugspassagiere wird gemäss Kap. 8.2.5. bestimmt.

Tab. 14 Letalitäten und Aufenthaltszeiten bei Durchfahrt eines Zuges^f in Abhängigkeit vom Abstand Bahnlinie zum Totalversagen mit Feuerball (Zuglänge 100 m)

Durchmesser: Nennweite bzw. Rohraussen- durchmesser	Druck [bar]	Letalität [%] und Aufenthaltszeit eines Zuges versus Abstand des Totalversagens zur Bahnlinie bei einer Zuglänge von 100 m									
		< 10 m	10 m bis < 30 m	30 m bis < 50	50 m bis < 70 m	70 m bis < 90 m	90 m bis < 125 m	125 m bis < 175 m	175 m bis < 225 m	225 m bis < 275 m	275 m bis < 325 m
4" (114.3 mm)	25 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6" (168.3 mm)	25 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	40% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	40% / 8 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8" (219.1 mm)	25 bar	30% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	50% / 9 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	55% / 10 s	35% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	55% / 10 s	40% / 8 s	-	-	-	-	-	-	-	-
10" (273.0 mm)	25 bar	45% / 8 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	60% / 11 s	50% / 9 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	60% / 11 s	55% / 10 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	60% / 12 s	60% / 11 s	-	-	-	-	-	-	-	-
12" (323.9 mm)	25 bar	55% / 10 s	40% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	65% / 12 s	60% / 11 s	25% / 6 s	-	-	-	-	-	-	-
	54 bar	65% / 12 s	60% / 12 s	40% / 7 s	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	65% / 14 s	65% / 13 s	55% / 10 s	-	-	-	-	-	-	-

^f Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Zuges muss für die Berechnung der Summenkurve mit der Anzahl Züge in beiden Fahrtrichtungen multipliziert werden (siehe Berechnungsbeispiel im Anhang C).

Durchmesser: Nennweite bzw. Rohraussen- durchmesser	Druck [bar]	Letalität [%] und Aufenthaltszeit eines Zuges versus Abstand des Totalversagens zur Bahnlinie bei einer Zuglänge von 100 m									
		<10 m	10 m bis <30 m	30 m bis <50	50 m bis <70 m	70 m bis <90 m	90 m bis <125 m	125 m bis <175 m	175 m bis <225 m	225 m bis <275 m	275 m bis <325 m
14" (355.6)	50 bar	65% / 14 s	65% / 13 s	55% / 11 s	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	70% / 15 s	70% / 15 s	65% / 13 s	50% / 9 s	-	-	-	-	-	-
16" (406.4 mm)	70 bar	75% / 17 s	75% / 17 s	70% / 15 s	65% / 13 s	-	-	-	-	-	-
	80 bar	75% / 18 s	75% / 17 s	75% / 16 s	70% / 14 s	50% / 9 s	-	-	-	-	-
20" (508.0 mm)	70 bar	80% / 20 s	80% / 20 s	75% / 19 s	75% / 18 s	70% / 15 s	55% / 10 s	-	-	-	-
22" (559.0 mm)	25 bar	70% / 16 s	70% / 15 s	65% / 14 s	55% / 10 s	-	-	-	-	-	-
	45 bar	75% / 19 s	75% / 19 s	75% / 18 s	70% / 16 s	65% / 13 s	-	-	-	-	-
24" (609.6 mm)	70 bar	80% / 24 s	80% / 24 s	80% / 23 s	80% / 22 s	80% / 20 s	75% / 18 s	-	-	-	-
28" (711.0 mm)	70 bar	85% / 27 s	85% / 27 s	85% / 27 s	85% / 26 s	80% / 25 s	80% / 23 s	70% / 14 s	-	-	-
34" (863.6 mm)	70 bar	85% / 32 s	85% / 32 s	85% / 32 s	85% / 31 s	85% / 30 s	85% / 29 s	80% / 24 s	65% / 12 s	-	-
36" (914.0 mm)	67.5 bar	85% / 33 s	85% / 33 s	85% / 33 s	85% / 32 s	85% / 32 s	85% / 30 s	80% / 26 s	70% / 16 s	-	-
	70 bar	85% / 34 s	85% / 34 s	85% / 33 s	85% / 33 s	85% / 32 s	85% / 31 s	85% / 27 s	75% / 18 s	-	-
	85 bar	90% / 36 s	90% / 36 s	90% / 36 s	85% / 36 s	85% / 35 s	85% / 34 s	85% / 30 s	80% / 24 s	-	-
48" (1219 mm)	67.5 bar	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 42 s	90% / 41 s	90% / 39 s	85% / 35 s	85% / 27 s	65% / 13 s
	70 bar	90% / 44 s	90% / 44 s	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 42 s	90% / 42 s	90% / 39 s	85% / 35 s	85% / 28 s	70% / 15 s
	75 bar	90% / 45 s	90% / 45 s	90% / 45 s	90% / 45 s	90% / 44 s	90% / 43 s	90% / 41 s	90% / 37 s	85% / 31 s	75% / 20 s

Tab. 15 Letalitäten und Aufenthaltszeiten bei Durchfahrt eines Zuges⁹ in Abhängigkeit vom Abstand Bahnlinie zum Totalversagen mit Feuerball (Zuglänge 300 m)

Durchmesser: Nennweite bzw. Rohraussen- durchmesser	Druck [bar]	Letalität [%] und Aufenthaltszeit eines Zuges versus Abstand des Totalversagens zur Bahnlinie bei einer Zuglänge von 300 m									
		< 10 m	10 m bis < 30 m	30 m bis < 50 m	50 m bis < 70 m	70 m bis < 90 m	90 m bis < 125 m	125 m bis < 175 m	175 m bis < 225 m	225 m bis < 275 m	275 m bis < 325 m
4" (114.3 mm)	25 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6" (168.3 mm)	25 bar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	20% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	20% / 17 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8" (219.1 mm)	25 bar	15% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	25% / 18 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	30% / 19 s	15% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	30% / 19 s	20% / 17 s	-	-	-	-	-	-	-	-
10" (273.0 mm)	25 bar	25% / 17 s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	30% / 20 s	25% / 18 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	64 bar	35% / 20s	30% / 19 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	35% / 21 s	30% / 20 s	-	-	-	-	-	-	-	-
12" (323.9 mm)	25 bar	30% / 19 s	15% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-	-
	50 bar	35% / 21 s	35% / 20 s	10% / 15 s	-	-	-	-	-	-	-
	54 bar	35% / 21 s	35% / 21 s	20% / 16 s	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	40% / 23 s	40% / 22 s	30% / 19 s	-	-	-	-	-	-	-

⁹ Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Zuges muss für die Berechnung der Summenkurve mit der Anzahl Züge in beiden Fahrrichtungen multipliziert werden (siehe Berechnungsbeispiel im Anhang C).

Durchmesser: Nennweite bzw. Rohraussen- durchmesser	Druck [bar]	Letalität [%] und Aufenthaltszeit eines Zuges versus Abstand des Totalversagens zur Bahnlinie bei einer Zuglänge von 300 m									
		<10 m	10 m bis <30 m	30 m bis <50 m	50 m bis <70 m	70 m bis <90 m	90 m bis <125 m	125 m bis <175 m	175 m bis <225 m	225 m bis <275 m	275 m bis <325 m
14" (355.6 mm)	50 bar	40% / 23 s	40% / 22 s	30% / 20 s	-	-	-	-	-	-	-
	70 bar	45% / 24 s	45% / 24 s	40% / 22 s	25% / 18 s	-	-	-	-	-	-
16" (406.4 mm)	70 bar	50% / 26 s	45% / 26 s	45% / 24 s	40% / 22 s	-	-	-	-	-	-
	80 bar	50% / 27 s	50% / 26 s	45% / 25 s	40% / 23 s	25% / 15 s	-	-	-	-	-
20" (508.0 mm)	70 bar	55% / 29 s	55% / 29 s	55% / 28 s	50% / 27 s	45% / 24 s	30% / 19 s	-	-	-	-
22" (559.0 mm)	25 bar	45% / 25 s	45% / 24 s	40% / 23 s	30% / 19 s	-	-	-	-	-	-
	45 bar	50% / 28 s	50% / 28 s	50% / 27 s	45% / 25 s	40% / 22 s	-	-	-	-	-
24" (609.6 mm)	70 bar	60% / 33 s	60% / 33 s	60% / 32 s	55% / 31 s	55% / 29 s	50% / 27 s	-	-	-	-
28" (711.0 mm)	70 bar	65% / 36 s	65% / 36 s	60% / 36 s	60% / 35 s	60% / 34 s	60% / 32 s	40% / 23 s	-	-	-
34" (863.6 mm)	70 bar	65% / 41 s	65% / 41 s	65% / 41 s	65% / 40 s	65% / 39 s	65% / 38 s	60% / 33 s	35% / 21 s	-	-
36" (914.0 mm)	67.5 bar	70% / 42 s	70% / 42 s	70% / 42 s	65% / 41 s	65% / 41 s	65% / 39 s	60% / 35 s	45% / 25 s	-	-
	70 bar	70% / 43 s	70% / 43 s	70% / 42 s	70% / 42 s	65% / 41 s	65% / 40 s	60% / 36 s	50% / 27 s	-	-
	85 bar	70% / 45 s	70% / 45 s	70% / 45s	70% / 45 s	70% / 44 s	70% / 43 s	65% / 39 s	60% / 33 s	-	-
48" (1219 mm)	67.5 bar	75% / 52 s	75% / 52 s	75% / 52 s	75% / 52 s	75% / 51 s	75% / 50 s	70% / 48 s	70% / 44 s	65% / 36 s	40% / 22 s
	70 bar	75% / 53 s	75% / 53 s	75% / 52 s	75% / 52 s	75% / 51 s	75% / 51 s	70% / 48 s	70% / 44 s	65% / 37 s	45% / 24 s
	75 bar	75% / 54 s	75% / 54 s	75% / 54 s	75% / 54 s	75% / 53 s	75% / 52 s	75% / 50 s	70% / 46 s	65% / 40 s	55% / 29 s

8.2.5 Fackelbrand

Bei kleineren Leitungen hat der Fackelbrand bei der Durchfahrt für die Zugspassagiere keine relevante Letalität zur Folge. Für die grösseren Leitungen wurde ein Radius R_{FAZ} berechnet, innerhalb dessen Passagiere von Zügen, die diesen Radius durchfahren, eine Letalität von 100% haben. Passagiere von Zügen, die ausserhalb dieses Radius zum Totalversagen der Erdgashochdruckleitung durchfahren, haben eine Letalität von 0%.

Tab. 16 Radius R_{FAZ} , innerhalb dem die Letalität für Personen in Zügen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h beim Fackelbrand 100% angenommen wird

Durchmesser: Nennweite [Zoll] bzw. Rohraussen- durchmesser	Druck	R_{FAZ} [m]	Durchmesser: Nennweite [Zoll] bzw. Rohraus- sendurchmesser	Druck	R_{FAZ} [m]
4" (114.3 mm)	25 bar	-	14" (355.6 mm)	50 bar	5
	50 bar	-		70 bar	15
	64 bar	-	16" (406.4 mm)	70 bar	15
	70 bar	-		80 bar	20
6" (168.3 mm)	25 bar	-	20" (508.0 mm)	70 bar	25
	64 bar	-	22" (559.0 mm)	25 bar	10
	70 bar	-		45 bar	20
8" (219.1 mm)	25 bar	-	24" (609.6 mm)	70 bar	30
	50 bar	-	28" (711.0 mm)	70 bar	40
	64 bar	-	34" (863.6 mm)	70 bar	60
	70 bar	-	36" (914.0 mm)	67.5 bar	65
10" (273.0 mm)	25 bar	-		70 bar	70
	50 bar	-		85 bar	85
	64 bar	-	48" (1219 mm)	67.5 bar	125
	70 bar	-		70 bar	130
12" (323.9 mm)	25 bar	-		75 bar	140
	50 bar	-			
	54 bar	-			
	70 bar	-			

Die Wahrscheinlichkeit, dass beim Ereignis eines Fackelbrands ein einzelner Zug betroffen wird (t_{FAGZ}), ergibt sich aus der Durchfahrtszeit des Zuges durch die Länge des Bahnabschnittes im direkten Gefährdungsbereich (R_{50} Fackelbrand für Personen im Freien), den Anhalteweg und die Zuglänge. Als Anhalteweg wird für einen Zug mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h eine Strecke von 400 m angenommen. Die Länge des Gleisabschnittes im

Gefährdungsbereich $R_{50\text{ FA}}$ ist je nach Abstand der Leckstelle zur Bahnlinie kleiner oder gleich dem Durchmesser des Letalitätsradius $R_{50\text{ FA}}$.

Diese Durchfahrtszeit eines Zuges wird mit der Zugsfrequenz auf dem betreffenden Abschnitt multipliziert.

8.2.6 Mechanische Beschädigung der Schienen

Bei einem Totalversagen in unmittelbarer Nähe der Gleise (z.B. Kreuzung der Bahnlinie mit der Erdgashochdruckleitung) muss durch die Kraterbildung mit einer mechanischen Zerstörung der Gleise in kurzer Zeit gerechnet werden.

Bei grossen Leitungen ($\geq 14''$) wird der Fall der Beschädigung des Gleises mit Stillstand des Zuges gleich berechnet wie die Durchfahrt des Zuges.

Bei kleinen Leitungen ($< 14''$) wird der Fall der Beschädigung des Gleises mit Stillstand des Zuges für den Feuerball gleich berechnet wie die Durchfahrt des Zuges. Für den Fackelbrand wird angenommen, dass Züge, die näher als 5 m an der Leckstelle vorbeifahren würden, zum Stillstand kommen. Dabei wird die Zugspitze am nächsten Punkt zur Leckstelle angenommen. Die Letalitäten der Zugspassagiere werden in diesem Fall wie bei Personen im Freien berechnet, wobei angenommen wird, dass die Passagiere gleichmässig über den gesamten Zug verteilt sind.

8.2.7 Übersicht zu berechnende Szenarien

Die nachfolgenden Szenarienbäume zeigen im Überblick die Berechnungsweise für grosse und kleine Leitungen. Sie enthalten nur diejenigen Szenarien, die effektiv berechnet werden müssen.

Abb. 9 Berechnete Schadenereignisse für grosse Leitungen ($\geq 14''$)

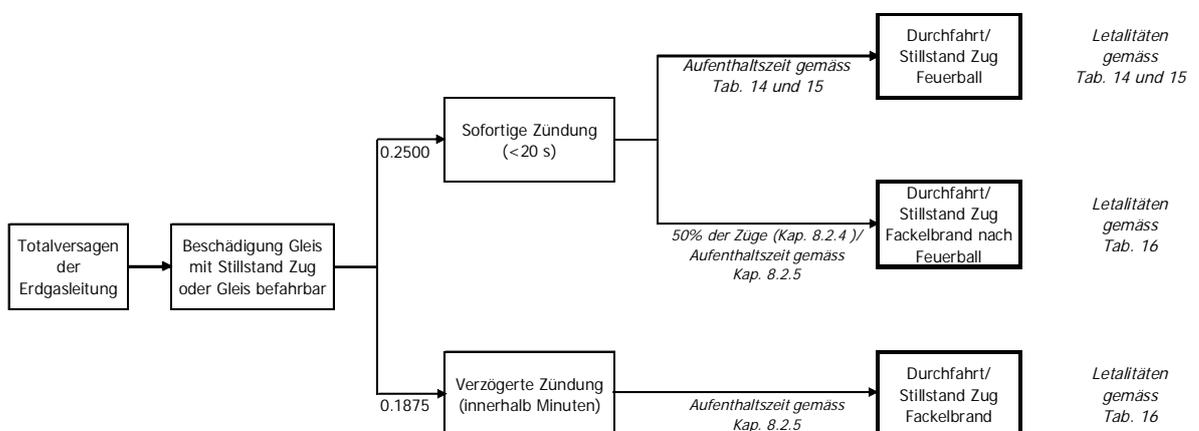
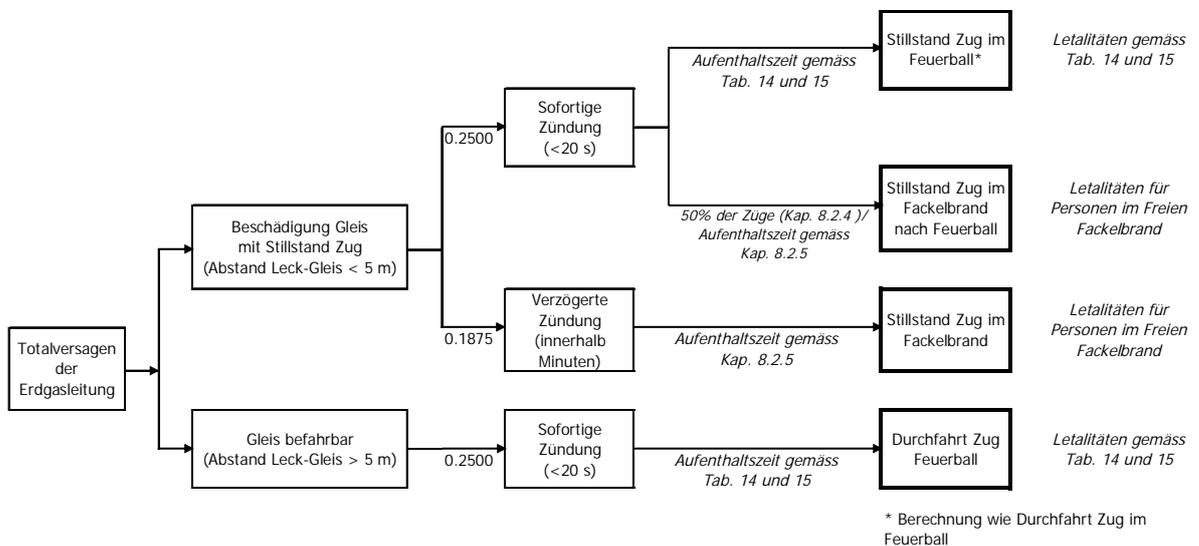


Abb. 10 Berechnete Schadensereignisse für kleine Leitungen (< 14")



8.3 Sonderobjekte Gebäude

8.3.1 Exposition der Personen

Die Kategorie Sonderobjekte umfasst alle Gebäude, auf welche die standardisierten Letalitäten für Personen in Gebäuden nicht ohne Überprüfung anwendbar sind. Dazu gehören vor allem Gebäude mit grossen Menschenansammlungen wie Einkaufszentren, Konzertsäle, Tagungszentren, Hotels, Schulen, Stadien, Spitäler, Betagten- und Behindertenheime, grosse Kinderkrippen, etc.

Bei diesen Objekten können die Fluchtwege und die daraus resultierenden Wärmestrahlungsdosen für die Personen nicht mit den standardisierten Annahmen berechnet werden.

Bei diesen häufig grossen Gebäuden sind einerseits die Fluchtmöglichkeiten innerhalb des Gebäudes in abgewandte Gebäudeteile zu berücksichtigen, so dass Personen nicht unbedingt ins Freie fliehen müssen.

Bei grossen Personenansammlungen müssen andererseits auch Panikreaktionen beim Fluchtverhalten berücksichtigt werden.

Bei bestimmten Personengruppen (z.B. bei Betagten- und Behindertenheimen, Krippen für Kleinkinder) muss die eingeschränkte Mobilität beim Fluchtweg berücksichtigt werden.

Die Letalitäten bei diesen Spezialfällen müssen individuell unter Berücksichtigung der jeweiligen Gegebenheiten bestimmt werden.

8.3.2 Einkaufszentren

Bei Einkaufszentren und grossen Ladenzentren mit Wochenganglinien wird bei der Bestimmung des Ausmasses einerseits der Spitzentag pro Woche und andererseits alle übrigen Wochentage als relevante Zustände berechnet.

Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Personen wird basierend auf den Öffnungszeiten bestimmt.

8.3.3 Spitäler, Pflegeheime, etc.

Bei Institutionen mit Pflegeeinrichtungen wird die mittlere spezifische Personenbelegung mit 1.5 bis 2.5 Personen pro Bett angenommen. Diese Belegungsannahmen werden für den Tag verwendet. Für die Besuchszeiten sind zusätzlich die anwesenden Besucher mit zu berücksichtigen. Für die Nacht muss zusätzlich zur Bettenbelegung fallweise das anwesende Personal bestimmt werden.

Bei der Ausmasseschätzung muss die stark eingeschränkte Mobilität der Personen berücksichtigt werden.

9 Versagen der Erdgashochdruckanlagen

9.1 Überblick Erdgashochdruckanlagen

9.1.1 Erdgashochdruckleitungen (Transportleitungen)

In der ganzen Schweiz waren Ende 2007 ca. 2'000 km Erdgashochdruckleitungen in Betrieb mit Durchmessern von 4" (114.3 mm) bis 48" (1219 mm) und Betriebsdrücken von 16 bis 80 bar.

Für Erdgashochdruckleitungen werden nur Stahlrohre verwendet. Die Rohre werden durch eine Schweissverbindung längskraftschlüssig verbunden und mit einer Überdeckung von mindestens 1 m verlegt. Neben einer gut haftenden Aussenisolation meist aus Kunststoffmaterialien (Polyethylen) wird die gesamte Leitung im Erdreich kathodisch geschützt.

9.1.2 Röhrenspeicher

Röhrenspeicher bestehen aus grosskalibrigen Rohrleitungsstücken von mehreren hundert Metern Länge, die meist parallel verlegt werden. Die Rohrdurchmesser der in der Schweiz gebauten Anlagen liegen in der Regel zwischen 36" (0.90 m) und 100" (2.5 m). Die Länge der einzelnen Speicherrohre beträgt typischerweise etwa 200 bis 300 m.

9.1.3 Stationen

Druckreduzier- und Messstationen (DRM-Stationen) sind Verbindungsglieder zwischen Netzteilen mit verschiedenen Betriebsdrücken.

Die *Druckreduzierung* hat den Zweck, den Gasdruck auf den Wert zu reduzieren, für den das nachgeschaltete Netz ausgelegt ist. Im Allgemeinen sind dies 5 bar-Netze der örtlichen Gasversorgungsunternehmen. Sicherheitsarmaturen wie Sicherheits-Absperrventile oder Sicherheitsabblasventile verhindern automatisch das Überschreiten des maximal zulässigen Drucks im nachgeschalteten Netz. Zur Vermeidung von zu tiefen Gastemperaturen bei der Druckreduzierung wird das Gas vorgewärmt. Filter reinigen das ankommende Gas und schützen damit die nachgeschalteten Geräte, insbesondere die Zähler. Betriebsdaten der Anlage und Störmeldungen werden durch Fernübertragung in die Kommandozentrale des Anlagenbetreibers übermittelt.

Zollmess-Stationen dienen der Erfassung und Regulierung der importierten Gasmengen. In diesen Stationen wird das Gas normalerweise vor dem Weitertransport odorisiert.

Die Gasmengenmessung und Durchflussregulierung dient auch der Abrechnung der gelieferten bzw. bezogenen Gasmengen und -leistungen.

Damit das Erdgas befördert werden kann, muss ein Transportdruck aufgebaut werden. Da dieser Druck für den Transport verbraucht wird, befindet sich alle 150 bis 200 km eine *Kompressorenstation*, welche den Druck wieder erhöht. Die Kompressoren werden in der

Regel mit Gasturbinen, welche das Erdgas direkt aus der Transportleitung beziehen, oder elektrisch betrieben.

Die *Stationen* werden in der Regel in Gebäuden in Leichtbauweise untergebracht. Dadurch sind die Apparaturen vor Witterungseinflüssen geschützt. Zudem wird die Schallemission in die Umgebung reduziert.

Neben dem Gebäude befindet sich die *Aussenverrohrung*, insbesondere die Feuerschieber in der Eingangs- und Ausgangsleitung sowie Molchschleusen und Abbläser der ankommenden und abgehenden Erdgashochdruckleitungen. Die gesamte Anlage ist in der Regel umzäunt.

9.2 Versagen von Transportleitungen

Die Schweiz verfügt zurzeit über keine eigene ausreichende Versagensstatistik. Für die Risikoberechnungen werden daher die Versagensraten aus der EGIG-Statistik (European Gas Pipeline Incident Data Group) verwendet. Für die Schweiz wurden diese Daten aus dem 7. EGIG-Report (1970 – 2007) mittels Partialstatistiken angepasst.

Die Gesamtversagensrate ist die Summe der Versagensraten aufgrund von äusseren Einwirkungen, Bodenbewegungen, Materialfehlern, Hot tap made by error, Korrosion, sowie einem Anteil unbekannter Ursachen.

Das Totalversagen (engl. rupture oder full bore rupture) ist definiert durch eine Leckgrösse grösser oder gleich dem Leitungsdurchmesser.

Das Totalversagen ist aufgrund folgender Ursachen denkbar:

- Einwirkungen von aussen
- Bodenbewegungen^h und
- Materialfehlern.

Andere Versagensursachen führen gemäss den statistischen Daten nicht zu einem signifikanten Anteil an Totalversagen.

^h Unter Bodenbewegungen werden alle Ursachen verstanden, welche gemäss der EGIG-Statistik (7th report) in die Kategorie "ground movement" fallen: Gewässer ("Flood", "River", "Erosion", "Dike break"), Rutschungen ("Landslide"), Bergbau ("Mining").

9.2.1 Fehler- und Ereignisbaum

Abb. 11 Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen von erdverlegten Erdgashochdruckleitungen in unverdämmter Umgebung

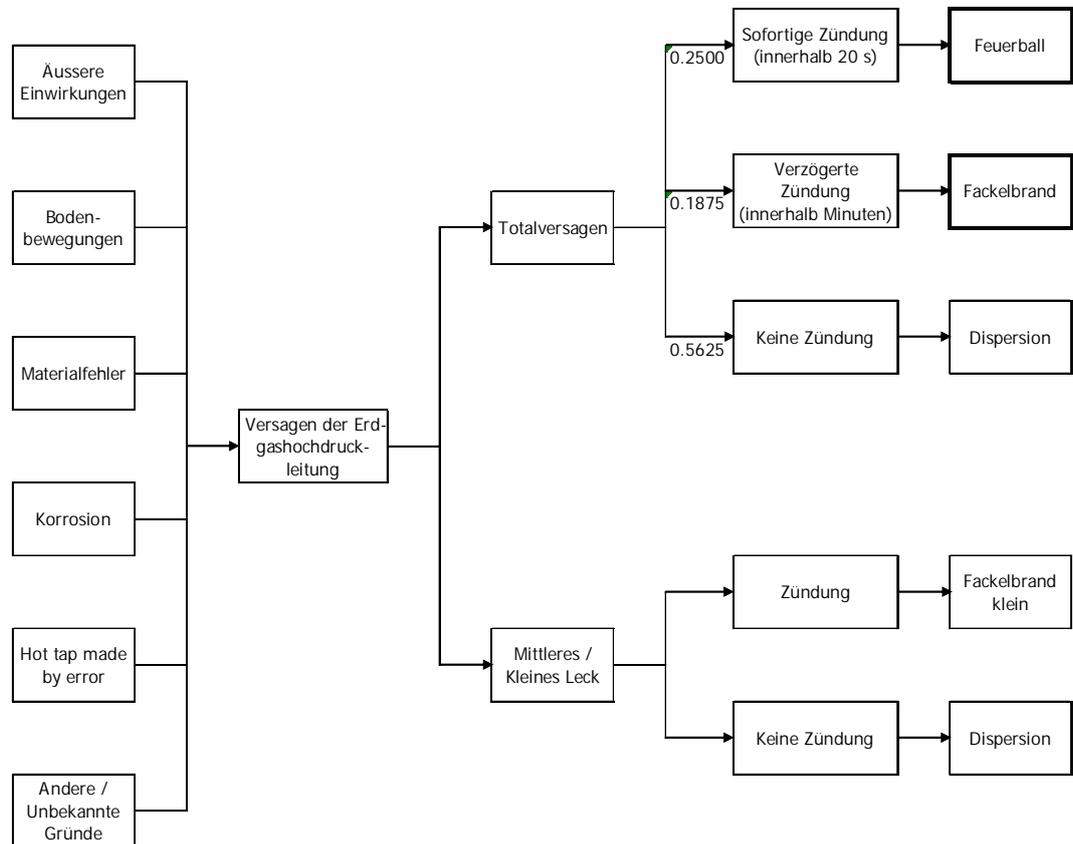
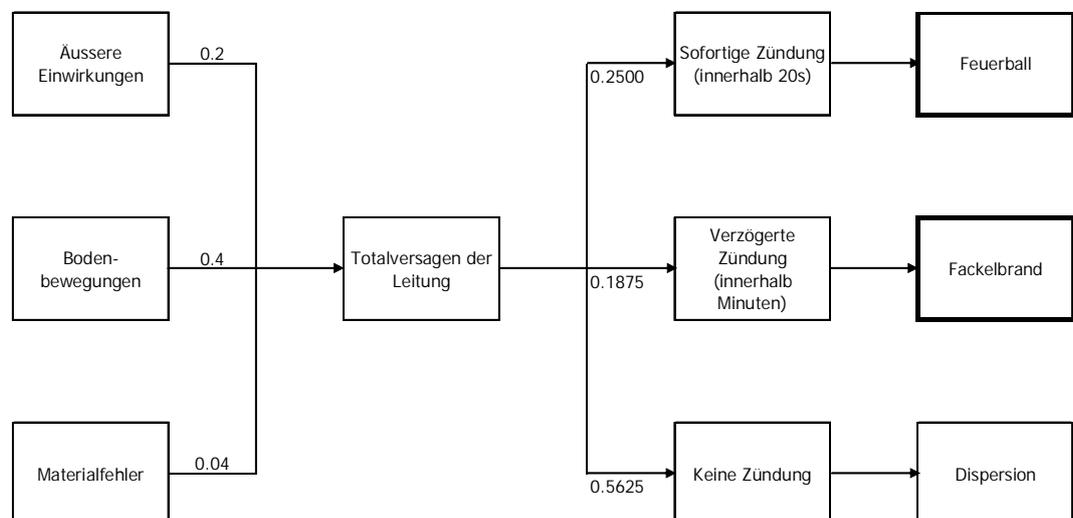


Abb. 12 Fehler- und Ereignisbaum für das Totalversagen (Leckdurchmesser \geq Rohrdurchmesser, "rupture", "full bore rupture") von erdverlegten Erdgashochdruckleitungen in unverdämmter Umgebung



9.2.2 Versagensrate aufgrund von äusseren Einwirkungen

Die Versagensraten aufgrund von äusseren Einwirkungen werden basierend auf der EGIG-Statistik (1970 – 2007) in Abhängigkeit der Wandstärke wie folgt festgelegt:

Tab. 17 Versagensraten aufgrund von äusseren Einwirkungen

Wandstärke [mm]	Versagensrate $[(1'000 \text{ km y})^{-1}]$ aufgrund von äusseren Einwirkungen	Wandstärke [mm]	Versagensrate $[(1'000 \text{ km y})^{-1}]$ aufgrund von äusseren Einwirkungen
5	0.340	12.5	0.008
5.6	0.260	14.2	0.004
6.3	0.180	16	0.001
7.1	0.120	17.5	0.001
8	0.070	20	0.001
8.8	0.040	22.2	0.001
10	0.020	25	0.001
11	0.012		

Bei Erhöhung der Wandstärke zur Reduktion der Versagensrate aufgrund von äusseren Einwirkungen darf Tab. 17 bis zu einem Designfaktor von 0.35 angewendet werden. Diese ergibt bei den häufigsten Leitungstypen (Bewilligungsdruck 70 bar, Stahlqualität mit 360 N/mm^2 Streckgrenze) folgende minimalen Versagensraten (Tab. 18) für die Berechnung der Summenkurven:

Tab. 18 Minimale Versagensraten aufgrund von äusseren Einwirkungen für Risikoermittlungen (Druck 70 bar)

Durchmesser	Minimale Versagensrate $[(1'000 \text{ km y})^{-1}]$ aufgrund äusserer Einwirkungen
$\leq 6''$	0.340
8''	0.260
10''	0.120
12''	0.040
14''	0.020
16''	0.012
18''	0.008
20''	0.004
$> 20''$	0.001

Wird durch eine Erhöhung der Wandstärke der Designfaktor kleiner als 0.35, so erfolgt die Beurteilung der Risikominderung in Absprache mit den zuständigen Behörden.

Bei Erhöhung der Wandstärke zur Reduktion der Versagensrate aufgrund von äusseren Einwirkungen darf nicht eine mindere Stahlqualität eingesetzt werden.

Wenn die Erdgashochdruckleitung in Bauzonen liegt, wird die Versagensraten aufgrund von äusseren Einwirkungen mit dem Korrekturfaktor $K_U = 3.0$ multipliziert. Leitungen in Strassen, die beidseitig von Bauzonen umgeben sind, werden als in Bauzone gerechnet.

Der *Anteil Totalversagen* am Versagen aufgrund von äusseren Einwirkungen wird gemäss EGIG Statistik 1970 – 2007 auf 20% festgelegt.

9.2.3 Versagensrate aufgrund von Bodenbewegungen

Die Versagensraten aufgrund von Bodenbewegungen werden basierend auf der EGIG-Statistik (1970 – 2007) in Abhängigkeit des Durchmessers wie folgt festgelegt:

Tab. 19 Versagensraten aufgrund von Bodenbewegungen (Naturereignisse) ⁱ

Durchmesser [Zoll]	Versagensrate [(1'000 km y) ⁻¹] aufgrund Bodenbewegungen
4" (114.3 mm)	0.039
6" (168.3 mm)	0.036
8" (219.1 mm)	0.033
10" (273.0 mm)	0.030
12" (323.9 mm)	0.028
14" (355.6 mm)	0.026
16" (406.4 mm)	0.023
18" (457.2 mm)	0.021
20" (508.0 mm)	0.019
22" (558.8 mm)	0.017
24" (609.6 mm)	0.016
26" (660.0 mm)	0.014
28" (711.0 mm)	0.013
34" (864.0 mm)	0.009
36" (914.0 mm)	0.007
48" (1219 mm)	0.003
60" (1524 mm)	0.003

Der Anteil *Totalversagen* am Versagen aufgrund von Bodenbewegungen wird gemäss EGIG-Statistik 1970 – 2007 auf 40% festgelegt.

ⁱ Unter Bodenbewegungen werden alle Ursachen verstanden, welche gemäss der EGIG-Statistik (7th report) in die Kategorie "ground movement" fallen: Gewässer ("Flood", "River", "Erosion", "Dike break"), Rutschungen ("Landslide"), Bergbau ("Mining").

Abschnittsspezifische Anpassungen der Versagensraten aufgrund von Bodenbewegungen, können basierend auf geologischen Spezialgutachten geltend gemacht werden. So können in Gebieten ganz ohne Naturgefahren die Versagensraten aufgrund von Bodenbewegungen reduziert werden. Ebenso sind die Versagensraten aufgrund von Bodenbewegungen in speziell durch Naturgefahren gefährdeten Gebieten angemessen zu erhöhen:

- Wenn die Leitungssachse nicht in einer Gefahrenzone gemäss Naturgefahrenkarte der Kantone liegt, wird die Versagensrate für "ground movement" in Tab. 19 um den Faktor 10 reduziert.
- Wenn keine Naturgefahrenkarten vorhanden sind, dienen die Empfehlungen 1997 zur "Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten" und zur "Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten" als Hilfe.
- Liegt die Leitungssachse in einer Gefahrenzone gemäss Naturgefahrenkarte der Kantone, so muss die Versagensrate für "ground movement" in Tab. 19 angemessen erhöht werden, wenn die kartierte Naturgefahr ein Totalversagen auslösen könnte.

9.2.4 Versagensrate aufgrund von Materialfehlern

Die Versagensraten aufgrund von Materialfehlern werden basierend auf der EGIG-Statistik (1970 – 2007) in Abhängigkeit des Alters der Leitung (Inbetriebnahmejahr) wie folgt festgelegt:

Tab. 20 Versagensraten aufgrund von Materialfehlern

Baujahr	Versagensrate [(1'000 km y) ⁻¹] aufgrund Materialfehlern
1964 - 1973	0.060
1974 - 1983	0.033
ab 1984	0.006

Der Anteil Totalversagen am Versagen aufgrund von Materialfehlern wird mit 4% angenommen.

9.2.5 Wirkung von Massnahmen

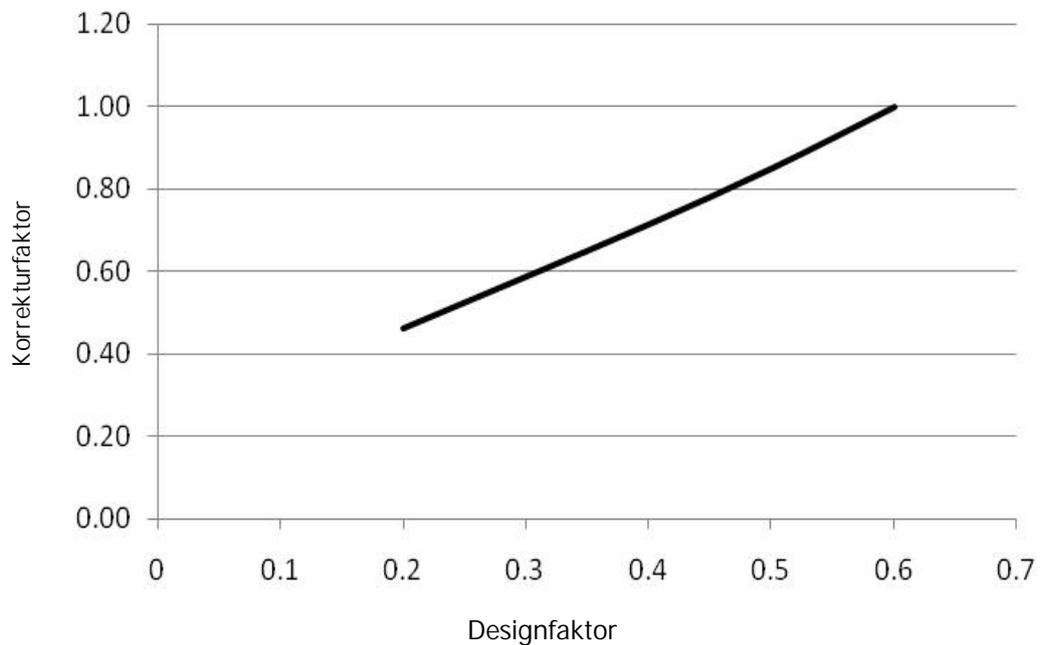
Die Wirkung einzelner Massnahmen auf die Versagensraten lassen sich wie folgt bestimmen:

9.2.5.1. Erhöhung Wandstärke

Die Versagensraten aufgrund von äusseren Einwirkungen werden bei einer Erhöhung der Wandstärke gemäss Tab. 17 in Kap. 9.2.2 bestimmt, wobei die Einschränkungen gemäss Tab. 18 zu beachten sind.

9.2.5.2. Designfaktor

Abb. 13 Einfluss Designfaktor auf Versagensrate aufgrund äusseren Einwirkungen (K_{DF})



Der Designfaktor DF berechnet sich dabei folgendermassen:

$$f_0 = DF = \frac{P_d \cdot D_a}{20 \cdot R_{t0,5} \cdot s}$$

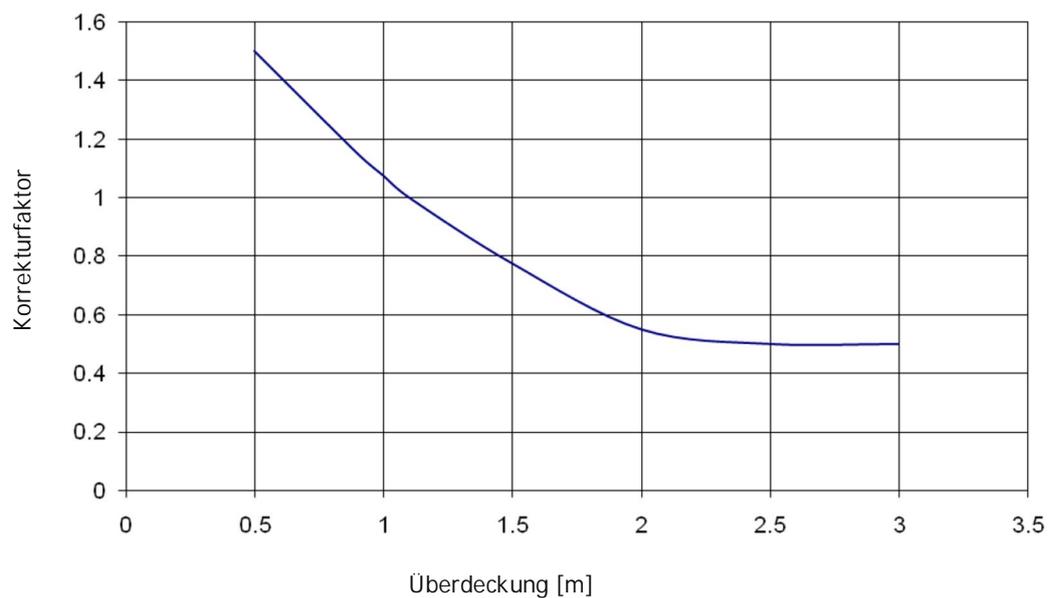
wobei	s =	Mindest-Wanddicke	[mm]
	P_d =	Auslegungsdruck	[bar]
	D_a =	Rohraussendurchmesser	[mm]
	f_0 =	Nutzungsgrad (=Designfaktor DF)	[---]
	$R_{t0,5}$ =	Streckgrenze bei 0.5% gesamter Dehnung (spezifischer Mindestwert) bei 20°C	[N/mm ²]

9.2.5.3. Druckabsenkung

Eine Druckabsenkung (Betriebsdruck) führt zu einer Reduktion des Ausmasses (Kapitel 6.2.2) sowie einer Reduktion des Designfaktors und damit der Versagensrate aufgrund von äusseren Einwirkungen (gemäss Abb. 13, Kap. 9.2.5.2).

9.2.5.4. Überdeckung

Abb. 14 Einfluss Überdeckung auf Versagensrate aufgrund äusseren Einwirkungen (K_U)



9.2.5.5. Schutzplatten

Einfluss Schutzplatten auf Versagensrate aufgrund äusseren Einwirkungen (K_S)

Schutzplatte + Warnband: $K_{S-W} = 0.1$

9.2.5.6. Trasseekontrolle

Einfluss Häufigkeit Trasseekontrollen auf Versagensrate aufgrund äusseren Einwirkungen (K_T)

Wöchentliche Kontrolle: $K_T = 0.7$

9.2.5.7. Kombination der Massnahmen

Die Korrekturfaktoren können bei einer Kombination der oben aufgeführten Massnahmen zur Reduktion eines Versagens aufgrund äusserer Einwirkungen multipliziert werden, weil die Massnahmen unabhängig voneinander sind:

Korrekturfaktor total:	$K_{\text{Total}} = K_{\text{DF}} \times K_{\text{Ü}} \times K_{\text{S-W}} \times K_{\text{T}}$
------------------------	--

Bei Erdgashochdruckleitungen, welche in Bauzonen liegen, muss der Korrekturfaktor total noch mit dem Korrekturfaktor für Bauzonen ($K_{\text{Ü}} = 3$) multipliziert werden. Leitungen in Strassen, die beidseitig von Bauzonen umgeben sind, werden als in Bauzone gerechnet.

Die Berücksichtigung von weiteren risikomindernden baulichen Massnahmen in der Risikoermittlung erfolgt in Absprache mit den zuständigen Behörden.

9.2.6 Zündwahrscheinlichkeiten

Die Zündwahrscheinlichkeit bei einem Totalversagen in unverdämmter Umgebung wird durchschnittlich mit 0.4375 angenommen. Der Anteil sofortige und verzögerte Zündung wird gemäss Tab. 21 angenommen.

Tab. 21 Zündwahrscheinlichkeiten gemäss Health and Safety Executive (HSE)

Zündung	Zündwahrscheinlichkeit
sofortige Zündung	0.2500
verzögerte Zündung	0.1875
keine Zündung	0.5625

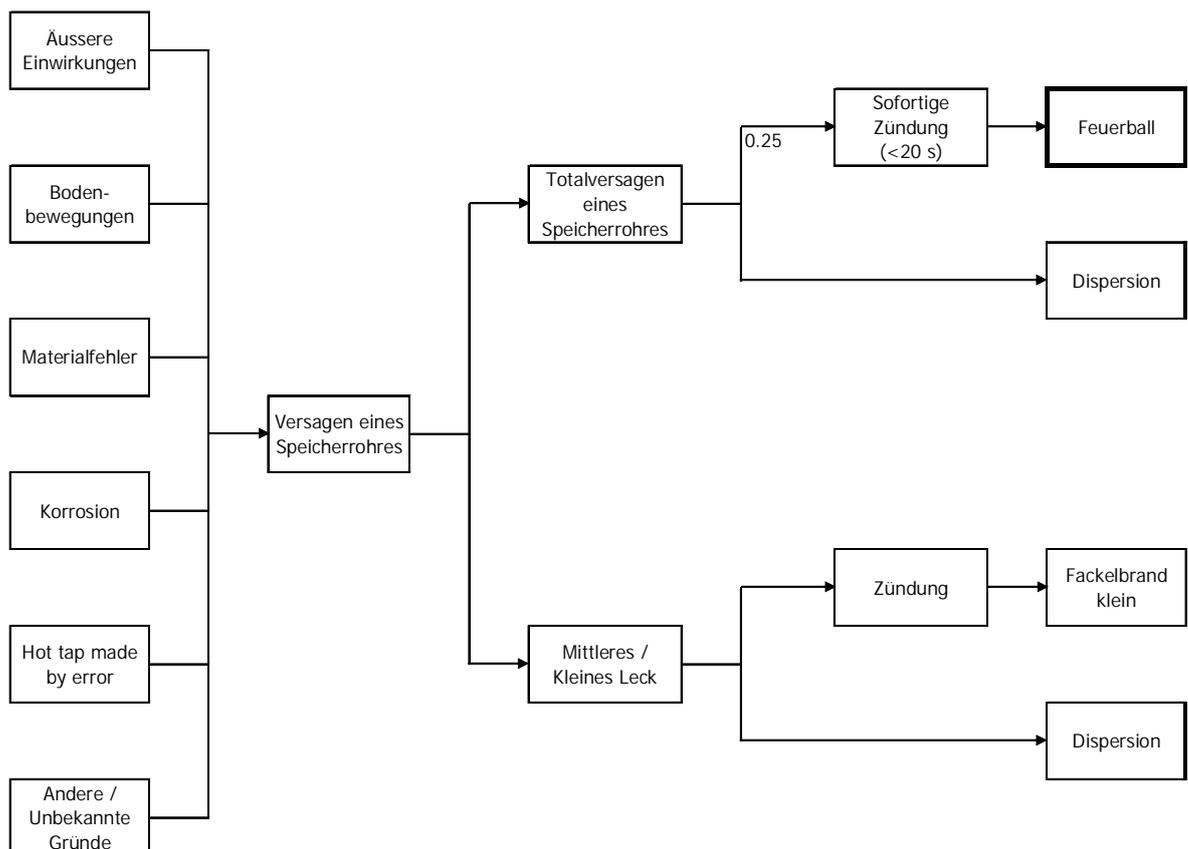
9.3 Versagen von Röhrenspeichern

9.3.1 Fehler- und Ereignisbaum

Das bei einem Röhrenspeicher relevante Schadensszenarium ist das Totalversagen eines Speicherrohres. Der gesamte Gasinhalt eines Speicherrohres kann innerhalb weniger Sekunden austreten und bei sofortiger Zündung in Form eines Feuerballs abbrennen. Beim Versagen eines Speicherrohres wird also nicht wie bei Transportleitungen über längere Zeit grössere Mengen Gas austreten, weil der Nachschub an Erdgas nach kurzer Zeit nur noch über die Verbindungsleitungen mit kleinem Durchmesser aufrechterhalten wird.

Es muss zudem geprüft werden, ob das Versagen von Verbindungsleitungen oder Armaturen relevante Letalitäten ergibt für die Berechnung der Summenkurve.

Abb. 15 Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen eines Röhrenspeichers in unverdämmter Umgebung



Die ausfliessende Gasmenge eines Speicherrohres brennt als Feuerball ab, der anschliessende Fackelbrand wird nur durch die Gasmenge aus Verbindungsleitungen gespeisen.

9.3.2 Wärmestrahlung und Letalitätsradien

Die Letalitätsradien ergeben sich aus der ausfliessenden Gasmenge. Diese berechnet sich aus dem Volumen eines Rohrstranges, dem Druck sowie aus Gaskonstanten. Daraus ergibt sich für die ausfliessende Gasmenge:

$$M_g = \frac{V \times P \times \mu}{R \times T} = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi \times L \times P \times \mu}{R \times T \times K}$$

Wobei

M_g	freigesetzte Gasmenge M_g [kg]
P	Druck [Pa]
D	Innendurchmesser [m]
L	Länge Speicherrohr [m]
μ	Molekulargewicht (17.5×10^{-3} kg / mol)
R	Gaskonstante (8.314472 J (mol K) ⁻¹)
T	Absolute Gastemperatur von komprimiertem Gas (290°K)
K	Kompressibilitätsfaktor ^j

Für Erdgas ($\mu = 17.5 \times 10^{-3}$ kg / mol und $T = 290^\circ\text{K}$) gilt:

$$M_g = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi \times L \times P \times 1 / K \times 0.726$$

Wobei

M_g	freigesetzte Gasmenge M_g [kg]
P	Druck [bar]
D	Innendurchmesser [m]
L	Länge Speicherrohr [m]
K	Kompressibilitätsfaktor ^j

^j Der Kompressibilitätsfaktor ist unter anderem vom Druck und der Gaszusammensetzung abhängig und für Gasgemische relativ aufwändig zu bestimmen. In der Regel wird dieser vom Betreiber geliefert.

Die Letalitätsradien können aufgrund der ausfliessenden Gasmengen gemäss Tab. 22 bestimmt werden:

Tab. 22 Letalitätsradien beim Feuerball eines Röhrenspeicher

Gasmenge eines Speicherrohrs	Abbranddauer	R _{100 FE} [m]	R _{75 FE} [m]	R _{50 FE} [m]	R _{25 FE} [m]	R _{0 FE} [m]	R _{ZI FE} [m]
15'000 kg	9.4 s	67	77	91	110	148	52
20'000 kg	10.3 s	78	90	104	127	169	59
25'000 kg	11.1 s	88	100	117	141	187	66
30'000 kg	11.8 s	97	110	127	154	203	71
35'000 kg	12.4 s	105	119	137	165	218	77
40'000 kg	13.0 s	112	127	146	176	232	81
45'000 kg	13.5 s	119	134	155	186	245	85
50'000 kg	14.0 s	126	142	163	195	257	89
55'000 kg	14.5 s	132	148	170	204	268	93
60'000 kg	14.9 s	138	155	178	212	279	97
65'000 kg	15.3 s	143	161	185	221	290	100
70'000 kg	15.7 s	149	167	191	228	300	103
75'000 kg	16.0 s	154	173	198	236	309	106
80'000 kg	16.4 s	159	178	204	243	318	109
85'000 kg	16.7 s	164	183	210	250	327	112
150'000 kg	20.2 s	216	241	274	325	423	141

Die Letalitäten von Personen im Freien beim Feuerball werden wie bei erdverlegten Transportleitungen gemäss Tab. 4 bestimmt.

Die Letalitäten von Personen in Gebäuden beim Feuerball sind deutlich tiefer als bei einem Totalversagen von Transportleitungen, weil nach dem Feuerball höchstens die Gasmenge der Verbindungsleitungen als Fackelbrand weiterbrennen kann. Die Letalitäten werden gemäss folgender Tab. 23 bestimmt:

Tab. 23 Standardisierte Letalitäten für Personen in Gebäuden beim Schadenszenarium Feuerball

Letalitätsradien	Letalität
innerhalb $\frac{3}{4}$ R _{ZI FE}	100%
zwischen $\frac{3}{4}$ R _{ZI FE} und R _{ZI FE}	80%
innerhalb R _{75 FE}	10%
ausserhalb R _{75 FE}	0%

Für den Fackelbrand der Verbindungsleitungen nach dem Feuerball des Speicherrohres, sowie für das Versagen der Verbindungsleitungen gelten die Letalitäten analog zu den Transportleitungen (Letalitäten Tab. 5 und Tab. 6, Letalitätsradien Tab. 8).

9.3.3 Versagensraten

Die Versagensraten für die *Speicherrohre* werden folgendermassen bestimmt:

Versagen aufgrund von äusseren Einwirkungen:

- Bei Röhrenspeichern in umzäuntem Betriebsareal können die Versagensraten aufgrund von äusseren Einwirkungen für Transportleitungen (gemäss Tab. 17) je nach Situation reduziert werden.
- Weitere Versagensursachen (z.B. Flugzeugabsturz) müssen fallweise betrachtet werden.
- Der Anteil Totalversagen für die Schadenursache "äussere Einwirkungen" wird analog den Transportleitungen mit 20% angenommen.

Versagen aufgrund von Bodenbewegungen:

- Für die Bestimmung der Versagensraten der Rohrstränge aufgrund von Bodenbewegungen können die Versagensraten der Transportleitungen (gemäss Tab. 19) um 6% reduziert werden.
- Für die Bestimmung der Versagensraten der Rohrstränge aufgrund von Bodenbewegungen können die Versagensraten der Transportleitungen (gemäss Tab. 19) um 50% reduziert werden, wenn der Röhrenspeicher nicht in Hanglage oder an einem Hangfuss erstellt ist.
- Für die Bestimmung der Versagensraten der Rohrstränge aufgrund von Bodenbewegungen können die Versagensraten der Transportleitungen (gemäss Tab. 19) um 25% reduziert werden, wenn der Röhrenspeicher nicht im Einflussbereich von Gewässern liegt (Gefahrenkarte Kantone).
- Der Anteil Totalversagen für die Schadenursache "Bodenbewegungen" wird analog den Transportleitungen mit 40% angenommen.

Versagen aufgrund von Material- und Konstruktionsfehlern:

- Die Versagensraten aufgrund von Material- und Konstruktionsfehlern werden analog den Transportleitungen (gemäss Tab. 20) bestimmt.
- Der Anteil Totalversagen für die Schadenursache "Material- und Konstruktionsfehler" wird analog den Transportleitungen mit 4% angenommen.

Die Versagensraten für die *übrigen Anlageteile* (Verbindungsleitungen, Armaturen, Flansche, etc.) werden wie folgt bestimmt:

Tab. 24 Versagensraten Verbindungsleitungen

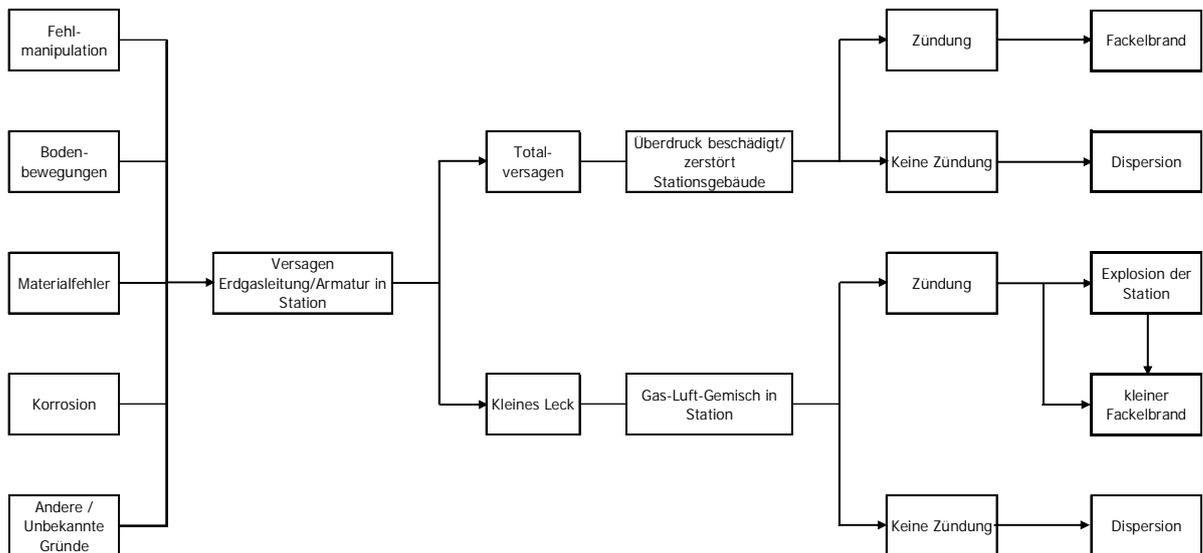
Verbindungsleitung	Versagensrate $[(1'000 \text{ km y})^{-1}]$	Totalversagen $[(1'000 \text{ km y})^{-1}]$
4" (114.3 mm)	2	0.3
6" (168.3 mm)	2	0.3
8" (219.1 mm)	0.5	0.1
10" (273.0 mm)	0.5	0.1

9.3.4 Berechnung der Summenkurve

Für die Risikoanalyse eines Röhrenspeichers wird die Summenkurve für den ganzen Röhrenspeicher als funktionale technische Einheit berechnet. Es werden entlang des effektiven Verlaufs der einzelnen Speicherrohre alle 10 m Totalversagen angenommen.

9.4 Versagen von Erdgashochdruckanlagen in Stationen

Abb. 16 Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen einer Erdgashochdruckleitung in verdämmter Umgebung (Station)



9.4.1 Totalversagen der Erdgashochdruckanlage

Beim Totalversagen einer Erdgashochdruckanlage in einem Stationsgebäude füllt sich der Gasraum sofort mit Erdgas. Das Erdgas-Luft-Gemisch ist aufgrund der hohen Erdgaskonzentrationen nicht zündfähig. Erst durch das Bersten von Bauteilen des Stationsgebäudes kann sich das Gas ausbreiten und in einen Fackelbrand übergehen. Es gelten deshalb die normalen Letalitätsradien für den Fackelbrand.

9.4.2 Kleine Lecks an der Erdgashochdruckanlage

Im Falle eines kleinen Lecks kann das ausströmende Gas zu einem zündfähigen Gemisch, und bei vorhandener Zündquelle, zu einer Explosion führen. Die Auswirkungen der Explosion sind stark von der Geometrie und der Bauweise der Station abhängig.

9.4.3 Schadenauswirkung bei Versagen von Erdgashochdruckanlagen in Stationen

Die Schädigung von Personen und Bauteilen ergeben sich aus den Druckwirkungen bei der Explosion der Station (Überdruck und Art des Impulses) und aus der thermischen Schädigung eines Fackelbrandes.

Auswirkungen von Explosionen bei *kleineren und mittleren Nebenanlagen* (überprüft bis zu einer Gasraumgröße von 720 m³) lassen sich in den Bereich innerhalb des Schutzbereiches (30 m) und in die Umgebung ausserhalb des Schutzbereiches aufteilen:

Ausserhalb der Schutzbereiche sind keine Letalitäten von Personen im Freien aufgrund von direkten Auswirkungen der Druckwelle (Lungenriss) und keine Letalitäten aufgrund von Gebäudeeinsturz zu erwarten.

Innerhalb des Schutzbereiches sind die direkten Auswirkungen einer Explosion (Lungenriss) bei Stationen mit einem Gasraum $< 720 \text{ m}^3$ in der Regel ebenfalls nicht relevant. Die Letalitäten durch indirekte Auswirkungen (Gebäudeeinsturz, Wegschleudern von Personen durch Explosionswind, Trümmerwurf) müssen bei relevanter Personenbelegung innerhalb des Schutzbereiches fallweise bestimmt werden.

Bei Stationen mit einem *Gasraum* $> 720 \text{ m}^3$ müssen denkbare Schadenereignisse und Letalitäten innerhalb und ausserhalb der Schutzbereiche fallweise festgelegt und beurteilt werden.

9.4.4 Versagensraten

Die Versagensraten von *Anlageteilen* können gemäss den Angaben im "Purple Book" abgeschätzt werden.

Eine aktuellere und detailliertere Methodik zur Bestimmung der Versagensraten für verschiedene Anlagenteile wurde von DNV Consulting auf Basis der "hydrocarbon release database (HCRD)" des britischen HSE entwickelt (Spouge, John / DNV Consulting 2005).

Im März 2010 wurde von der International Association of Oil and Gas Producers (OGP) eine von DNV aktualisierte Auswertung des HCRD Datenbestandes bis 2006 publiziert (OGP Report No. 434-1: <http://www.ogp.org.uk/pubs/434-1.pdf>). Diese Versagensraten können ebenfalls verwendet werden.

9.4.5 Berechnung der Summenkurve

Stationen werden in der Risikoermittlung wie Betriebe im Sinne der Störfallverordnung berechnet.

Für die Risikoanalyse von Stationen wird in der Regel das umzäunte Areal berechnet (juristische Aufsichtsgrenze).

Streckenschieber, welche in der Regel unterirdisch angeordnet sind, werden in der Risikoermittlung wie Fernleitungen berechnet.

9.5 Versagen von Erdgashochdruckleitungen in Stollen, Kanälen und anderen verdämmten Umgebungen

Es gibt Situationen, wo Gasleitungen durch räumlich teilweise oder ganz geschlossene Orte führen (Stollen, Kanäle, etc.). Bei einem Totalversagen einer Leitung füllt sich ein solcher Raum sofort mit Erdgas, das dadurch nicht zündfähig ist. Erst durch das Bersten von Bauteilen an den Portalen von Stollen und an Schwachstellen von Kanälen kann sich das Gas ausbreiten und in einen Fackelbrand übergehen.

Im Falle eines kleinen Lecks kann das ausströmende Gas zu einem zündfähigen Gemisch, und bei vorhandener Zündquelle, zu einer Explosion führen. Die Auswirkungen sind stark von der Geometrie abhängig.

9.5.1 Stollen und Kanäle

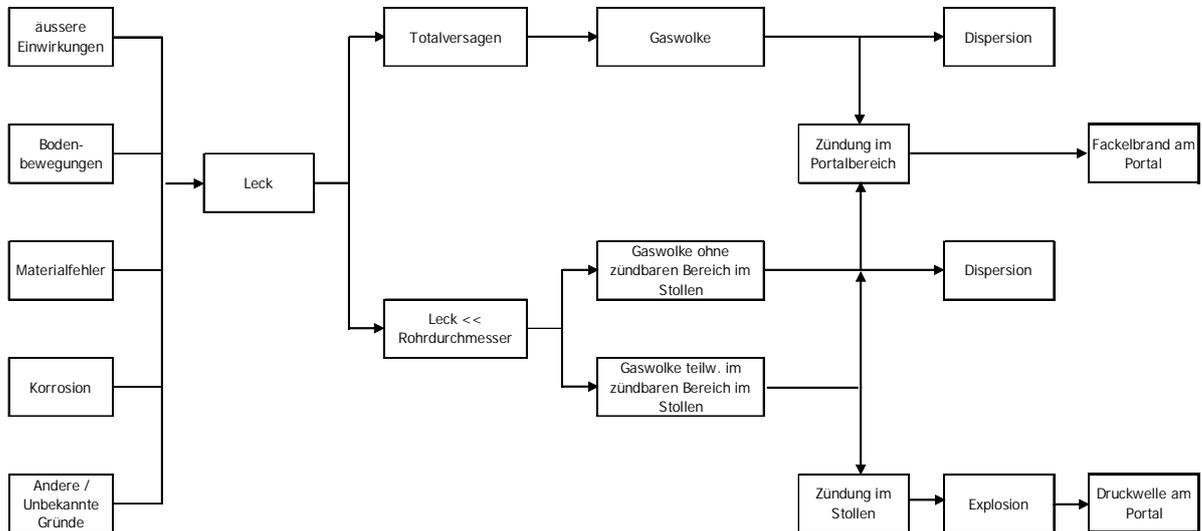
Rohrleitungen werden z.T. in Stollen (bergmännisch, in der Regel im Gebirge) oder Kanälen (gefertigt, oft in überbautem Gebiet) oder Brückenkästen verlegt. Deren Länge kann mehrere Kilometer betragen. Sie sind in der Regel begehbar. Über Versagensraten von Leitungen in Stollen und Kanälen gibt es keine statistischen Grundlagen. Sie müssen individuell ermittelt werden. Einfluss auf die Sicherheit hat u.a. die Art der Nutzung und des Zugangs von Dritten.

Unter *Stollen* versteht man begehbare, in der Regel bergmännisch erstellte, Tunnel mit mehr oder weniger mächtiger Überdeckung und beliebiger Länge.

Kanäle können einen ähnlichen Querschnitt wie Stollen aufweisen, sie sind jedoch im Tagebau erstellte Konstruktionen, in der Regel zur Querung von Plätzen und Strassen oder eingebettet in andere Tiefbauten. Sie sind üblicherweise weniger lang als Stollen.

9.5.2 Fehler- und Ereignisbaum Stollen

Abb. 17 Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen von Erdgashochdruckanlagen in einem Stollen



9.5.2.1. Explosionswirkung

Bei Stollen sind üblicherweise die Drücke an den Portalen relevant, da Stollen mit einer genügenden Überdeckung den im Innern entstehenden Drücken standhalten und diese bis an die Portale leiten können. Die Stärke der Drücke basiert grundsätzlich auf dem Volumen des zündfähigen Gemisches und der Laufstrecke. Dazu sind neben der Geometrie und Rauigkeit des Stollens der Ort des Lecks, die Leckrate, Windrichtung und Windgeschwindigkeit im Stollen, der Ort der Zündquelle und der Zeitpunkt der Zündung ausschlaggebend.

Für einen typischen begehbaren Stollen mit ca. 6 bis 10 m² Querschnitt und mehreren hundert Metern Länge sind aus dieser Kombination Drücke am Portal von <1 bar bis 20 bar möglich.

Für eine Grobabschätzung können folgende Annahmen getroffen werden:

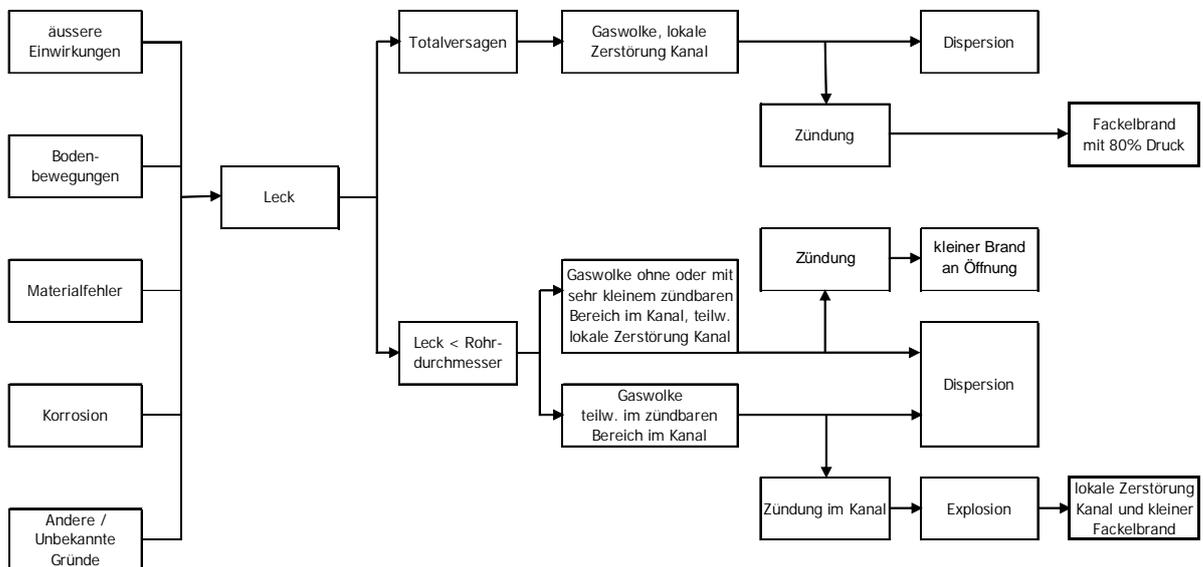
- Für 99% aller Kombinationen im Falle eines Lecks und anschliessender Zündung werden die Explosionsdrücke am Portal oder an einer massgebenden Schwachstelle entlang des Stollens oder des Kanals < 3 bar betragen. Dafür müssen allenfalls bauliche Massnahmen getroffen werden.
- Mit einer Wahrscheinlichkeit <1% können wesentlich höhere Drücke resultieren. Diese seltenen Szenarien müssen in einer allfälligen Risikoermittlung berücksichtigt werden.

9.5.2.2. Totalversagen

Der Fackelbrand am Portal wird gleich wie der Fackelbrand bei Transportleitungen berechnet. Es wird davon ausgegangen, dass am Stollenportal kein Feuerball entsteht.

9.5.3 Fehler- und Ereignisbaum Kanal

Abb. 18 Fehler- und Ereignisbaum für das Versagen von Erdgashochdruckanlagen in einem Kanal



9.5.3.1. Explosionswirkungen

Auch gut armierte, übliche Leitungskanäle beginnen bei Innendrücker in der Grössenordnung von etwa 1 bar aufzureissen. Im Falle einer Explosion hat dies die Zerstörung des Leitungskanals über eine bestimmte Länge mit lokalem Trümmerwurf zur Folge. Auf die Explosion kann ein kleiner Fackelbrand folgen.

Ob dieses Szenario im Sinne der Störfallverordnung relevant ist, hängt von der Umgebung des Kanals, insbesondere in der Nähe der ausgewiesenen Schwachstellen des Kanals ab.

9.5.3.2. Totalversagen

Im Falle eines Rohrversagens in einem Kanal kann die Konstruktion des Kanals durch den Druck des ausströmenden Gases örtlich zerstört werden. Dadurch herrschen einem Versagen im erdverlegten Graben vergleichbare Bedingungen. Durch die rasche Gasausbreitung über einen gewissen Kanalabschnitt und die zu erwartende lokale Zerstörung des Kanals wird allerdings das Bilden eines Feuerballs nahezu verunmöglicht. Ebenfalls wird sich der Fackelbrand an mehreren Stellen entlang der Aufreisslinie entwickeln.

Für den Störfallnachweis wird, sofern nicht eindeutige konstruktive Schwachstellen ein anderes Szenario nahelegen, folgendes empfohlen:

- Feuerball: Keiner, nur nachfolgender Fackelbrand (Berechnung der Flammengeometrie mit 80% des Druckes, Berechnung der Versagensraten mit 100% des Drucks)
- Fackelbrand: Berechnung der Flammengeometrie mit 80% des Druckes (Berechnung der Versagensraten mit 100% des Drucks)

10 Risikomindernde Massnahmen

Schutzmassnahmen sollen im Sinne der Störfallvorsorge als zielorientierte Massnahmen zur Risikominderung geplant werden.

Risikomindernde Massnahmen können entweder die Eintretenswahrscheinlichkeit (Versagensrate, Eintretenswahrscheinlichkeit für das Schadenereignis) oder das Ausmass eines Störfalles an der Erdgashochdruckanlage oder beides reduzieren.

Die Wirkung von verschiedenen Massnahmen, welche die Versagensrate aufgrund von äusseren Einwirkungen reduzieren, sind im Kapitel 9.2.5 (Korrekturfaktoren für die Berechnung der Summenkurve) aufgeführt.

Eine Druckabsenkung (Betriebsdruck) führt zu einer Reduktion des Ausmasses (Kapitel 6.2.2) sowie einer Reduktion des Designfaktors und damit der Versagensrate aufgrund von äusseren Einwirkungen.

Die Reduktion des Ausmasses aufgrund der Schutzwirkung von standardisierten Gebäuden ist in Kapitel 6.2.1.2 aufgeführt. Weitere risikomindernde Massnahmen in der Umgebung der Erdgashochdruckanlage (z.B. bauliche Massnahmen an Gebäuden im Einflussbereich der Erdgashochdruckanlage) können situativ gemäss der Schutzwirkung des Gebäudes und den Fluchtmöglichkeiten für Personen (Kapitel 8.3: Sonderobjekte Gebäude) berücksichtigt werden.

Die Berücksichtigung von weiteren risikomindernden Massnahmen (z.B. bauliche Schutzmassnahmen um die Leitung) in der Risikoermittlung erfolgt in Absprache mit den zuständigen Behörden.

Anhang:

Berechnungsbeispiele

- A Wohnen
- B Gewerbe und Strasse
- C Zug
- D Röhrenspeicher

A Berechnungsbeispiel Wohnen

A 1. Situation

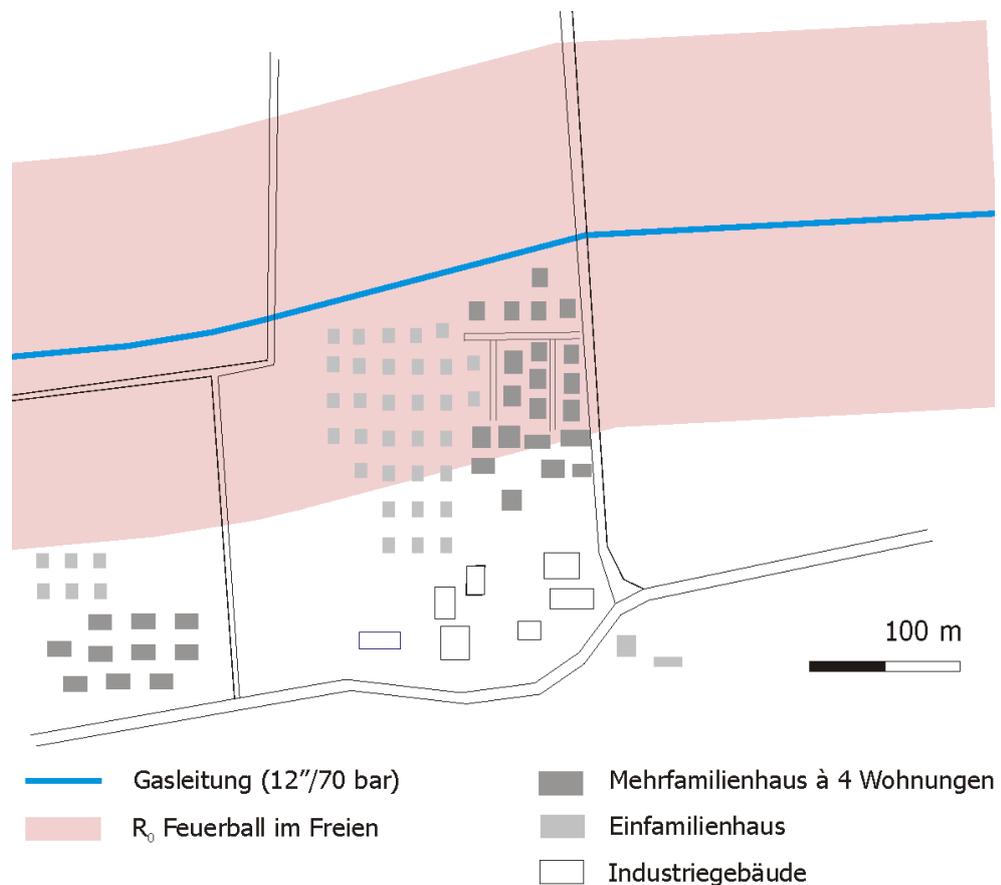
Im gewählten Berechnungsbeispiel wird folgende Situation angenommen:

Es wird ein Leitungstrasse am Rande einer Siedlung geplant. Die Leitung befindet sich nicht in einer Bauzone. Im Einflussbereich dieser geplanten Leitung liegt eine Wohnzone.

Für die geplante Leitung gelten folgende technischen Angaben:

Durchmesser	12"
Aussendurchmesser	323.9 mm
Rohrwandstärke	5.6 mm
Rohrmaterial	StE 360.7
Max. zulässiger Bewilligungsdruck (MOP)	70 bar
Überdeckung	1.2 m
Konstruktionsjahr	1980

Abb. A 1 Detailplan der Situation



A 2. Belegungsannahmen

- Im Einflussbereich der geplanten Leitung befindet sich eine Wohnzone W2 mit Ein- und Mehrfamilienhäusern.
- Mehrfamilienhäuser (Wohnhäuser) werden mit 2 Personen pro Wohneinheit und Einfamilienhäuser mit 3 Personen pro Haus belegt (gemäss Kapitel 7.2, S. 28).
- Präsenzfaktoren: Siehe Tab. 12, Kap. 7.4, S. 30 (Es werden beispielsweise werktags (Mo bis Fr) tagsüber 30% der Wohnbevölkerung als anwesend angenommen, wovon sich 10% draussen befinden.)

A 3. Ausmasseinschätzung

Beim Beispiel "Wohnen" sind am meisten Personen während der Nacht am Wochenende gleichzeitig anwesend, weshalb dieses Szenarium relevant für das Ausmassprofil ist. Für ein Totalversagen bei Punkt A (siehe Abb. A 2) ergibt sich entsprechend:

Tab. A 1 Berechnung des Störfallwerts für den Punkt A für das Szenarium "Wochenende Nacht" (Brandszenarium Feuerball). Die Letalitätsradien sind in Tab. A 2 und Tab. A 3 zu finden.

	Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien
Innerhalb $R_{100\text{ FE}}$	$1^k \times 0.01^l \times 8\text{ P.} = 0.08\text{ P.}$	1.00	0.08
Zwischen $R_{100\text{ FE}}$ und $R_{75\text{ FE}}$	0.03	0.85	0.03
Zwischen $R_{75\text{ FE}}$ und $R_{50\text{ FE}}$	0.22	0.60	0.13
Zwischen $R_{50\text{ FE}}$ und $R_{25\text{ FE}}$	0.33	0.35	0.12
Zwischen $R_{25\text{ FE}}$ und $R_{0\text{ FE}}$	0.75	0.10	0.08
<i>Total Tote im Freien</i>			0.43

	Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden
Innerhalb $R_{100\text{ FA}}$	$1^k \times 0.99^m \times 16\text{P.} = 15.84\text{P}$	1.00	15.84
Zwischen $R_{100\text{ FA}}$ und $R_{75\text{ FA}}$	15.84	0.95	15.05
Zwischen $R_{75\text{ FA}}$ und $R_{Z1\text{ FE}}$	0.00	0.80	0.00
Zwischen $R_{Z1\text{ FE}}$ und $R_{50\text{ FA}}$	0.00	0.45	0.00
Zwischen $R_{50\text{ FA}}$ und $R_{25\text{ FA}}$	10.89	0.25	2.72
Zwischen $R_{25\text{ FA}}$ und $R_{0\text{ FA}}$	65.34	0.10	6.53
<i>Total Tote in Gebäuden</i>			40.14

Total Anzahl Tote Feuerball	40.57
Störfallwert	$0.3 \times \log(40.57) = 0.48$

Das Ausmassprofil für die ganze Strecke wird analog obigem Beispiel berechnet, standardmässig wird alle 10 m ein Störfallwert berechnet (Kap. 4, S. 15).

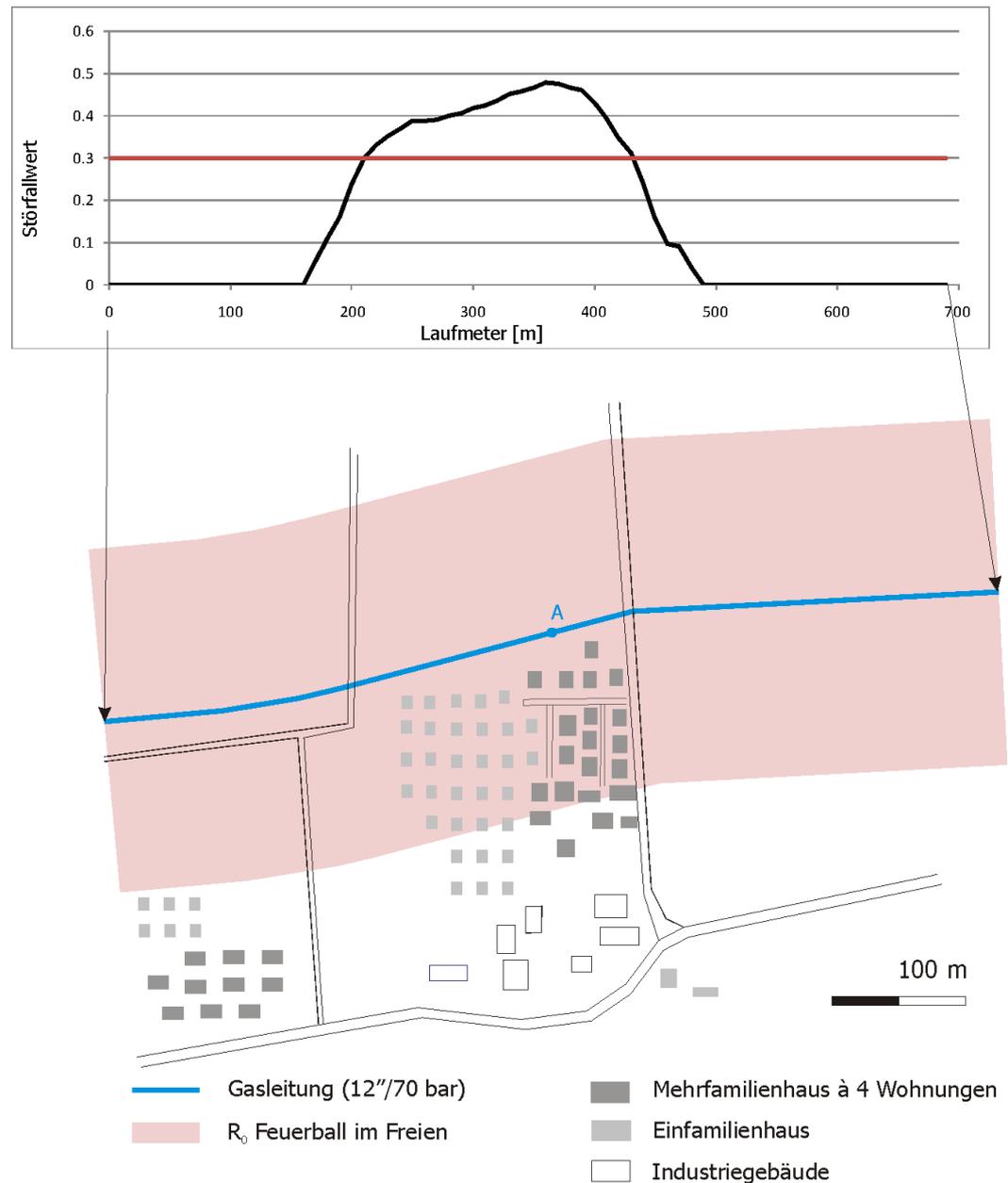
^k Anwesende Personen = 100% der Wohnbevölkerung;

^l Personen im Freien = 1% der anwesenden Wohnbevölkerung;

^m Personen in Gebäuden = 99% der anwesenden Wohnbevölkerung (gemäss Präsenzfaktoren Tab. 12, S. 30)

Folgende Abbildung (Abb. A 2) zeigt das Ausmassprofil des Berechnungsbeispiels für die ganze Strecke.

Abb. A 2 Ausmassprofil



Da die Störfallwerte entlang der Wohnzone grösser als 0,3 sind, muss eine Risikoermittlung (W-A-Diagramm) durchgeführt werden (Kap. 4, S. 15 ff.).

A 4. Risikoermittlung (W-A-Diagramm)

A 4.1. Identifikation der risikorelevanten Stellen

Im vorliegenden Beispiel wird das grösste Risiko auf dem Trasse-Abschnitt bei den Mehrfamilienhäusern erreicht:

Abb. A 3 Detailplan Berechnung des W-A-Diagramms



A 4.2. Berechnung des Schadenausmasses

Tab. A 2 Letalitätsradien (aus Tab. 7 und Tab. 8) und Letalitäten (aus Tab. 4) für Personen im Freien nach dem Totalversagen der 12"/70 bar Leitung

	Exposition	R ₀	R ₂₅	R ₅₀	R ₇₅	R ₁₀₀
Feuerball	9 sec	130 m	95 m	80 m	65 m	55 m
Fackelbrand	30 sec	100 m	65 m	50 m	40 m	35 m
Letalität ⁿ		ca. 10%	35%	60%	85%	100%

Tab. A 3 Letalitätsradien (aus Tab. 8) und Letalitäten (aus Tab. 5 und Tab. 6) für Personen im Gebäude nach dem Totalversagen der 12"/70 bar Leitung (FA = Fackelbrand, FE = Feuerball)

	R _{0 FA}	R _{25 FA}	R _{50 FA}	R _{ZI FE} ^o	R _{75 FA}	R _{100 FA}	R _{ZI FA} ^p
Letalitätsradien	100 m	65 m	50 m	45 m	40 m	35 m	15 m
Letalität Feuerball mit anschliessendem Fackelbrand	ca. 10%	25%	45%	80%	95%	100%	100%
Letalität Fackelbrand	ca. 0%	5%	10%	10%	35%	75%	100%

ⁿ Die Letalitäten gelten für beide Brandszenarien (Feuerball und Fackelbrand)

^o Der Radius R_{ZI} Feuerball markiert die maximale Distanz zum Brandzentrum, innerhalb der das Gebäudeinnere bei intakten Fenstern während der Abbranddauer des Feuerballs in Brand gerät.

^p Der Radius R_{ZI} Fackelbrand markiert die maximale Distanz, innerhalb derer das Gebäudeinnere bei einem Fackelbrand und bei intakten Fenstern innerhalb maximal 15 s Feuer fängt.

Die folgenden Abbildungen verdeutlichen den Zusammenhang Letalitätsradien – Letalitäten im vorliegenden Fall:

Abb. A 4 Letalitätsradien und Letalitäten für Personen im Freien beim Feuerball mit anschliessendem Fackelbrand (am Beispiel einer 12"/70 bar Leitung)

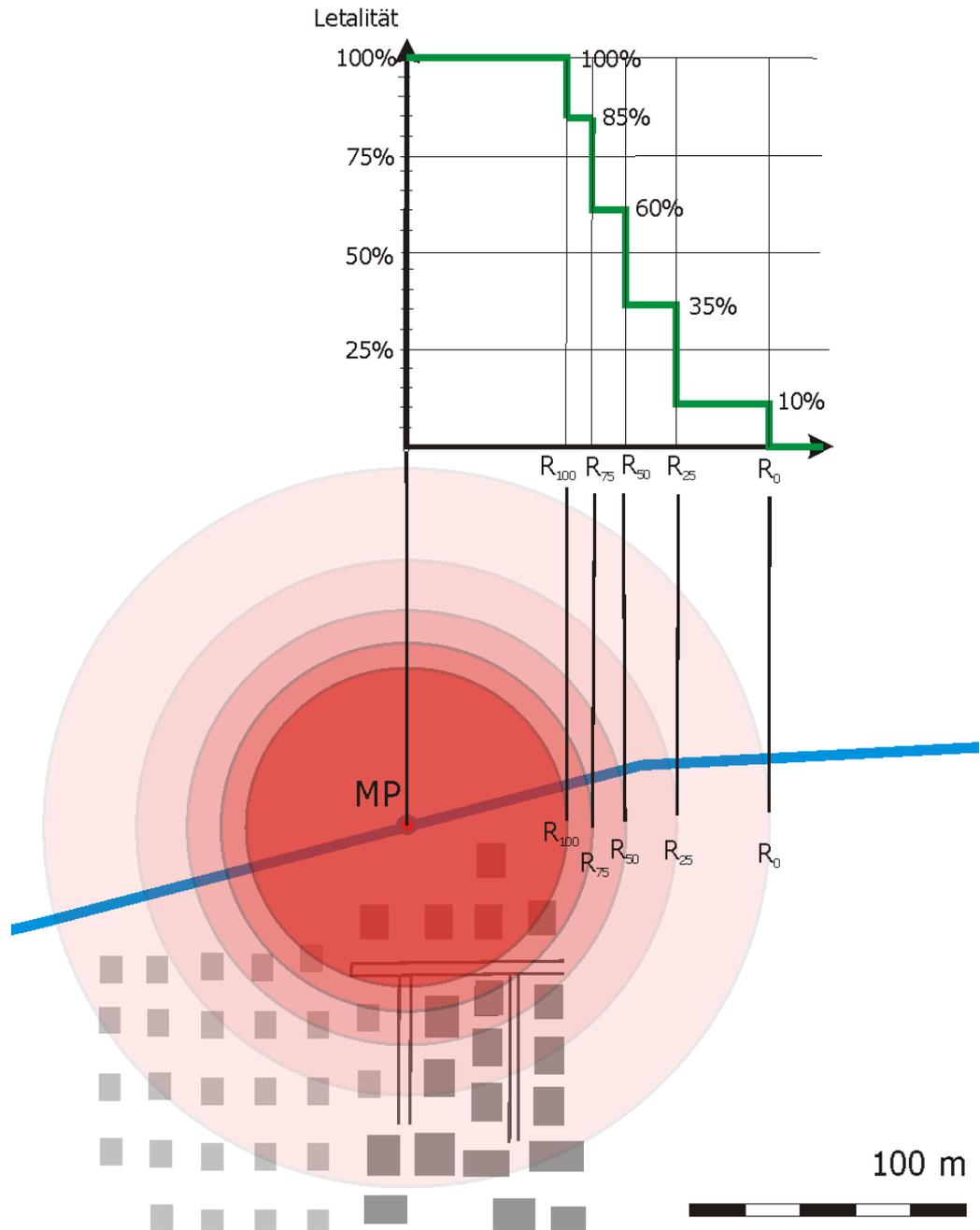


Abb. A 5 Letalitätsradien und Letalitäten für Personen im Gebäude beim Feuerball mit anschliessendem Fackelbrand (am Beispiel einer 12"/70 bar Leitung)

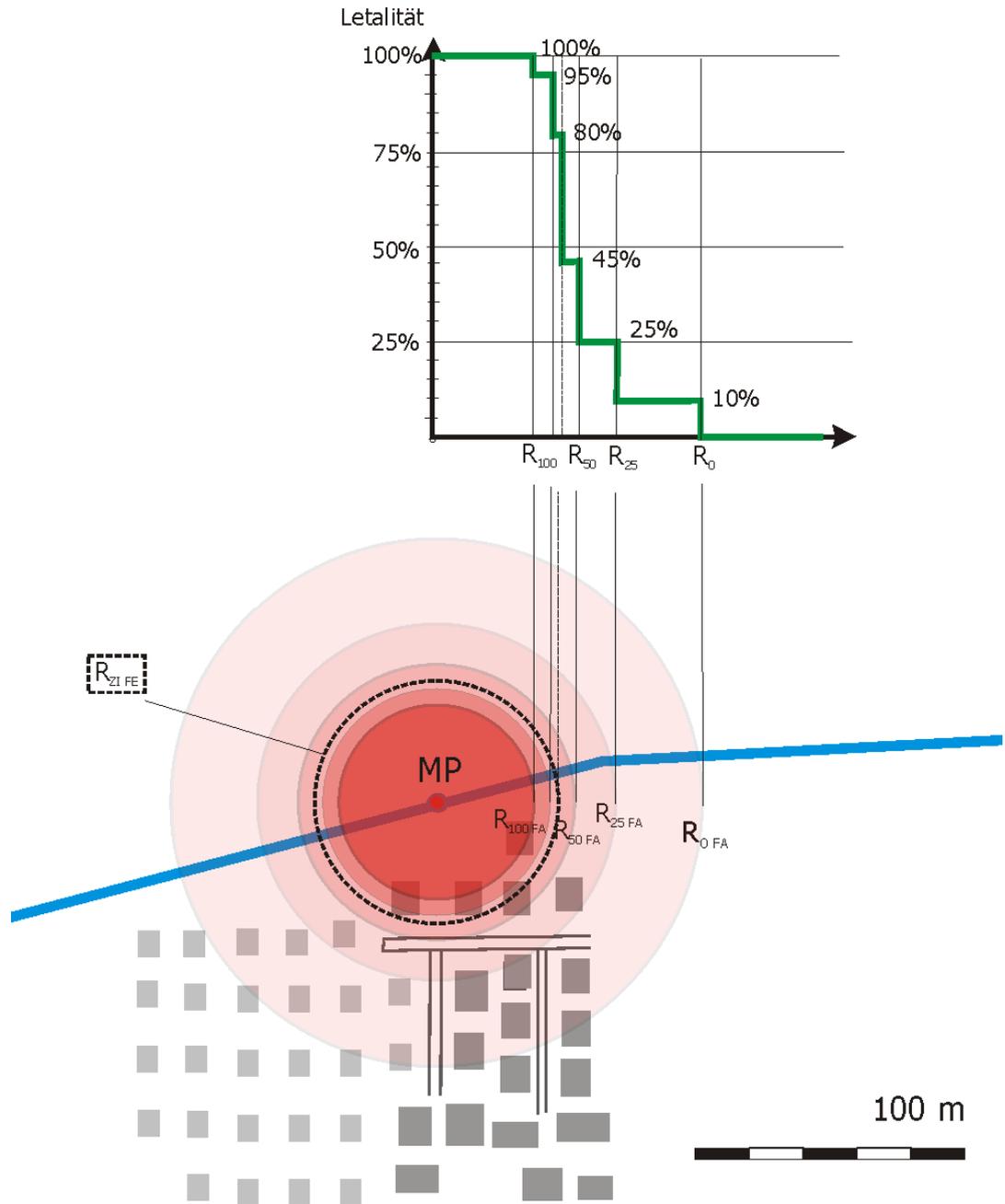
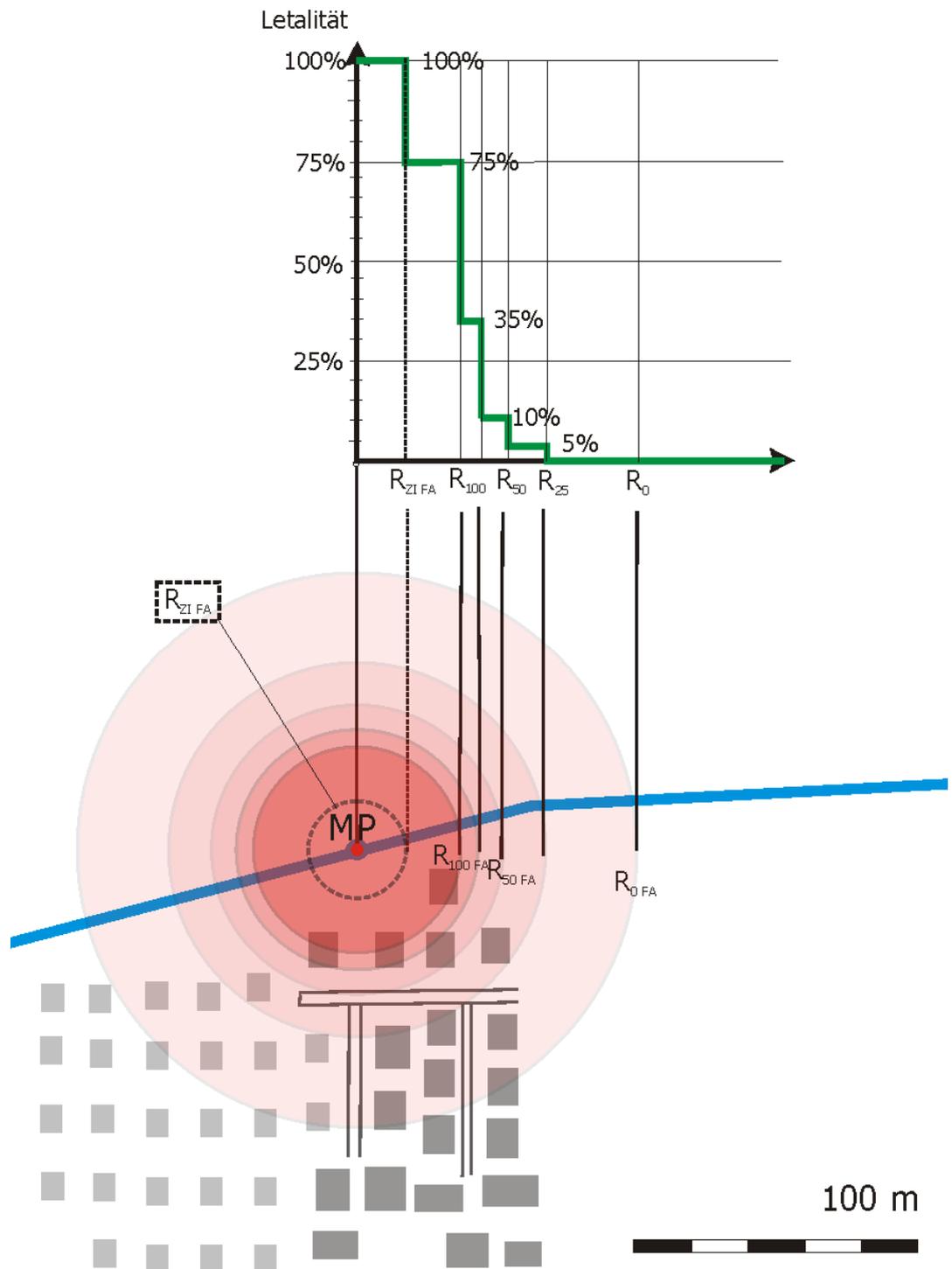


Abb. A 6 Letalitätsradien und Letalitäten für Personen im Gebäude beim Fackelbrand (am Beispiel einer 12"/70 bar Leitung)



Im gewählten Beispiel sind vier Szenarien "Werktags Tag" und "Werktags Nacht" (je 12 h) sowie "Wochenende Tag" und "Wochenende Nacht" relevant. Folgende Tabellen zeigen die Berechnungen der Störfallwerte am Beispiel des Mittelpunkts (MP) des 100 m langen W-A-Abschnitts (siehe Abb. A 3) für die vier Szenarien Werktag tagsüber resp. nachts sowie Wochenende tagsüber resp. nachts.

Die Ausmasse für die weiteren 9 Punkte mit Totalversagen im 100 m Abschnitt werden analog berechnet.

Tab. A 4 Berechnung der Störfallwerte für ein Totalversagen am Mittelpunkt MP, für das Szenarium "Werktag Tag" (Mo – Fr, 7 – 19 Uhr)

Fackelbrand				Feuerball			
	Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien		Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien
Innerhalb R ₁₀₀ FA	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 16 \text{ P.} = 0.48 \text{ P.}$	1.00	0.48	Innerhalb R ₁₀₀ FE	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 8 \text{ P.} = 0.24 \text{ P.}$	1.00	0.24
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 16 \text{ P.} = 0.48 \text{ P.}$	0.85	0.41	Zwischen R ₁₀₀ FE und R ₇₅ FE	0.09	0.85	0.08
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 0 \text{ P.} = 0.0 \text{ P.}$	0.60	0.00	Zwischen R ₇₅ FE und R ₅₀ FE	0.66	0.60	0.40
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 11 \text{ P.} = 0.33 \text{ P.}$	0.35	0.12	Zwischen R ₅₀ FE und R ₂₅ FE	0.99	0.35	0.35
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	$0.3^{1)} \times 0.1^{2)} \times 66 \text{ P.} = 1.98 \text{ P.}$	0.10	0.02	Zwischen R ₂₅ FE und R ₀ FE	2.25	0.10	0.23
<i>Total Tote im Freien</i>			1.20	<i>Total Tote im Freien</i>			1.28
	Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden		Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden
Innerhalb R _{ZI} FA	$0.3^{1)} \times 0.9^{3)} \times 0 \text{ P.} = 0.48 \text{ P.}$	1.00	0.00	Innerhalb R ₁₀₀ FA	$0.3^{1)} \times 0.9^{3)} \times 16 \text{ P.} = 4.32 \text{ P.}$	1.00	4.32
Zwischen R _{ZI} und R ₁₀₀ FA	$0.3^{1)} \times 0.9^{3)} \times 16 \text{ P.} = 4.32 \text{ P.}$	0.75	3.24	Zwischen R ₁₀₀ FA und R ₇₅ FA	4.32	0.95	4.10
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	4.32	0.35	1.51	Zwischen R ₇₅ FA und R _{ZI} FE	0.00	0.80	0.00
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	0.00	0.10	0.00	Zwischen R _{ZI} FE und R ₅₀ FA	0.00	0.45	0.00
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	2.97	0.05	0.15	Zwischen R ₅₀ FA und R ₂₅ FA	2.97	0.25	0.74
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	17.82	0.00	0.00	Zwischen R ₂₅ FA und R ₀ FA	17.82	0.10	1.27
<i>Total Tote in Gebäuden</i>			4.90	<i>Total Tote in Gebäuden</i>			10.95
Total Tote Fackelbrand			6.10	Total Tote Feuerball			12.23
Störfallwert Szenarium Fackelbrand		$0.3 \times \log(6.1) = 0.24$		Störfallwert Szenarium Feuerball		$0.3 \times \log(12.23) = 0.33$	

¹⁾ Anwesende Personen = 30% der Wohnbevölkerung; ²⁾ Personen im Freien = 10% der anwesenden Wohnbevölkerung; ³⁾ Personen in Gebäuden = 90% der anwesenden Wohnbevölkerung (gemäss Präsenzfaktoren Tab. 12, S. 30)

Tab. A 5 Berechnung der Störfallwerte für den Mittelpunkt MP für das Szenarium "Werktag Nacht" (Mo – Fr, 19 – 7 Uhr)

Fackelbrand				Feuerball			
	Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien		Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien
Innerhalb R ₁₀₀ FA	$0.9^{1)} \times 0.01^{2)} \times 16P. = 0.14 P.$	1.00	0.14	Innerhalb R ₁₀₀ FE	$0.9^{1)} \times 0.01^{2)} \times 8 P. = 0.14 P.$	1.00	0.07
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	0.14	0.85	0.12	Zwischen R ₁₀₀ FE und R ₇₅ FE	0.03	0.85	0.02
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	0.00	0.60	0.00	Zwischen R ₇₅ FE und R ₅₀ FE	0.20	0.60	0.12
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	0.10	0.35	0.03	Zwischen R ₅₀ FE und R ₂₅ FE	0.30	0.35	0.10
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	0.59	0.10	0.06	Zwischen R ₂₅ FE und R ₀ FE	0.68	0.10	0.07
<i>Total Tote im Freien</i>			0.36	<i>Total Tote im Freien</i>			0.39

	Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden		Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden
Innerhalb R _{ZI} FA	$0.9^{1)} \times 0.99^{3)} \times 0P. = 0.0 P.$	1.00	0.00	Innerhalb R ₁₀₀ FA	$0.9^{1)} \times 0.99^{3)} \times 16P. = 14.26 P.$	1.00	14.26
Zwischen R _{ZI} und R ₁₀₀ FA	$0.9^{1)} \times 0.99^{3)} \times 16P. = 14.26P.$	0.75	10.69	Zwischen R ₁₀₀ FA und R ₇₅ FA	14.26	0.95	13.54
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	14.26	0.35	4.99	Zwischen R ₇₅ FA und R _{ZI} FE	0.00	0.80	0.00
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	0.00	0.10	0.00	Zwischen R _{ZI} FE und R ₅₀ FA	0.00	0.45	0.00
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	9.80	0.05	0.49	Zwischen R ₅₀ FA und R ₂₅ FA	9.80	0.25	2.45
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	58.81	0.00	0.00	Zwischen R ₂₅ FA und R ₀ FA	58.81	0.10	5.88
<i>Total Tote in Gebäuden</i>			16.17	<i>Total Tote in Gebäuden</i>			36.13

Total Anzahl Tote Fackelbrand 16.53
 Störfallwert Szenarium Fackelbrand $0.3 \times \log(16.53) = 0.37$

Total Anzahl Tote Feuerball 36.52
 Störfallwert Szenarium Feuerball $0.3 \times \log(36.52) = 0.47$

¹⁾ Anwesende Personen = 90% der Wohnbevölkerung; ²⁾ Personen im Freien = 1% der anwesenden Wohnbevölkerung; ³⁾ Personen in Gebäuden = 99% der anwesenden Wohnbevölkerung (gemäss Präsenzfaktoren Tab. 12, S. 30)

Tab. A 6 Berechnung der Störfallwerte für den Mittelpunkt MP für das Szenarium "Wochenende Tag" (Sa/So, 7 – 19 Uhr)

Fackelbrand				Feuerball			
	Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien		Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien
Innerhalb R ₁₀₀ FA	$0.6^{1)} \times 0.1^{2)} \times 16P. = 0.96 P.$	1.00	0.96	Innerhalb R ₁₀₀ FE	$0.6^{1)} \times 0.1^{2)} \times 8 P. = 0.48 P.$	1.00	0.48
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	0.96	0.85	0.82	Zwischen R ₁₀₀ FE und R ₇₅ FE	0.18	0.85	0.15
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	0.00	0.60	0.00	Zwischen R ₇₅ FE und R ₅₀ FE	1.32	0.60	0.79
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	0.66	0.35	0.23	Zwischen R ₅₀ FE und R ₂₅ FE	1.98	0.35	0.69
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	3.96	0.10	0.4	Zwischen R ₂₅ FE und R ₀ FE	4.50	0.10	0.45
<i>Total Tote im Freien</i>			2.4	<i>Total Tote im Freien</i>			2.57
	Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden		Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden
Innerhalb R _{ZI} FA	$0.6^{1)} \times 0.9^{3)} \times 0P. = 0.0 P.$	1.00	0.00	Innerhalb R ₁₀₀ FA	$0.6^{1)} \times 0.9^{3)} \times 16P. = 8.64P.$	1.00	8.64
Zwischen R _{ZI} und R ₁₀₀ FA	8.64	0.75	6.48	Zwischen R ₁₀₀ FA und R ₇₅ FA	8.64	0.95	8.21
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	8.64	0.35	3.02	Zwischen R ₇₅ FA und R _{ZI} FE	0.00	0.80	0.00
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	0.00	0.10	0.00	Zwischen R _{ZI} FE und R ₅₀ FA	0.00	0.45	0.00
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	5.94	0.05	0.30	Zwischen R ₅₀ FA und R ₂₅ FA	5.94	0.25	1.49
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	35.64	0.00	0.00	Zwischen R ₂₅ FA und R ₀ FA	35.64	0.10	3.56
<i>Total Pers. in Gebäuden</i>			9.80	<i>Total Tote in Gebäuden</i>			21.90

Total Anzahl Tote Fackelbrand

12.20

Störfallwert Szenarium Fackelbrand

 $0.3 \times \log(12.2) = 0.33$

Total Anzahl Tote Feuerball

24.47

Störfallwert Szenarium Feuerball

 $0.3 \times \log(24.47) = 0.42$

¹⁾ Anwesende Personen = 60% der Wohnbevölkerung; ²⁾ Personen im Freien = 10% der anwesenden Wohnbevölkerung; ³⁾ Personen in Gebäuden = 90% der anwesenden Wohnbevölkerung (gemäss Präsenzfaktoren Tab. 12, S. 30)

Tab. A 7 Berechnung der Störfallwerte für den Mittelpunkt MP für das Szenarium "Wochenende Nacht" (Sa/So, 19 – 7 Uhr)

Fackelbrand

	Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien
Innerhalb R ₁₀₀ FA	$1^1 \times 0.01^2 \times 16P. = 0.16P.$	1.00	0.16
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	0.16	0.85	0.14
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	0.00	0.60	0.00
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	0.11	0.35	0.04
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	0.66	0.10	0.07
<i>Total Tote im Freien</i>			0.4

	Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden
Innerhalb R _{ZI} FA	$1^1 \times 0.99^3 \times 0P. = 0.0 P.$	1.00	0.00
Zwischen R _{ZI} und R ₁₀₀ FA	15.84	0.75	11.88
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	15.84	0.35	5.54
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	0.00	0.10	0.00
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	10.89	0.05	0.54
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	65.34	0.00	0.00
<i>Total Tote in Gebäuden</i>			17.97

Total Anzahl Tote Fackelbrand

18.37

Störfallwert Szenarium Fackelbrand

 $0.3 \times \log(18.37) = 0.38$

Feuerball

	Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien
Innerhalb R ₁₀₀ FE	$1^1 \times 0.01^2 \times 8 P. = 0.08 P.$	1.00	0.08
Zwischen R ₁₀₀ FE und R ₇₅ FE	0.03	0.85	0.03
Zwischen R ₇₅ FE und R ₅₀ FE	0.22	0.60	0.13
Zwischen R ₅₀ FE und R ₂₅ FE	0.33	0.35	0.12
Zwischen R ₂₅ FE und R ₀ FE	0.75	0.10	0.08
<i>Total Tote im Freien</i>			0.43

	Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden
Innerhalb R ₁₀₀ FA	$1^1 \times 0.99^3 \times 16P. = 15.84P$	1.00	15.84
Zwischen R ₁₀₀ FA und R ₇₅ FA	15.84	0.95	15.05
Zwischen R ₇₅ FA und R _{ZI} FE	0.00	0.80	0.00
Zwischen R _{ZI} FE und R ₅₀ FA	0.00	0.45	0.00
Zwischen R ₅₀ FA und R ₂₅ FA	10.89	0.25	2.72
Zwischen R ₂₅ FA und R ₀ FA	65.34	0.10	6.53
<i>Total Tote in Gebäuden</i>			40.14

Total Anzahl Tote Feuerball

40.57

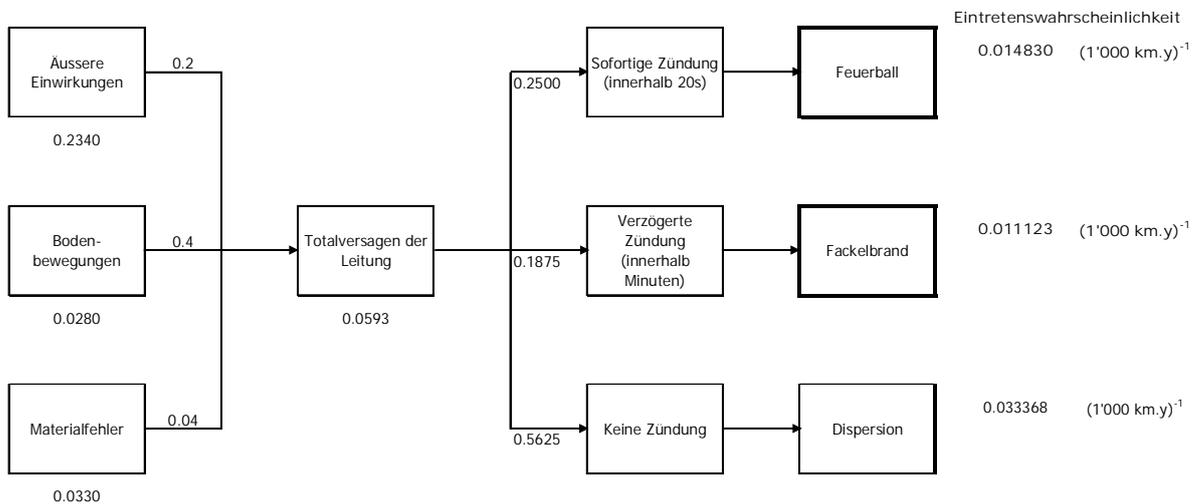
Störfallwert Szenarium Feuerball

 $0.3 \times \log(40.57) = 0.48$

¹⁾ Anwesende Personen = 100% der Wohnbevölkerung; ²⁾ Personen im Freien = 1% der anwesenden Wohnbevölkerung; ³⁾ Personen in Gebäuden = 99% der anwesenden Wohnbevölkerung (gemäss Präsenzfaktoren Tab. 12, S. 30)

A 4.3. Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten

Abb. A 7 Fehler- und Ereignisbaum gemäss Abb. 12 (S. 46) der Beispiel-Leitung 12"/70 bar, 5.6 mm Wandstärke, Baujahr 1980, Designfaktor 0.56



Die Totalversagensrate kann aus den gemachten Angaben berechnet werden:

	Versagensrate [1'000 km.y] ⁻¹	Korrektur- faktor	Anteil Total- versagen	Totalversagen [1'000 km.y] ⁻¹
Äussere Einwirkungen	0.260 ^q	0.9 ^r	0.2	0.0468
Bodenbewegungen	0.028 ^s	--	0.4	0.0112
Materialfehler	0.033 ^t	--	0.04	0.0013
Total				0.0593

Herleitung Korrekturfaktor

Die Versagensrate durch äussere Einwirkungen ist mit folgenden Korrekturfaktoren zu korrigieren:

^q Gemäss Tab. 17 (äussere Einwirkungen), für Wandstärke 5.6 mm

^r Siehe Herleitung Korrekturfaktor (Kap. A 4.3)

^s Gemäss Tab. 19 (Bodenbewegungen), für Durchmesser 12"

^t Gemäss Tab. 20 (Materialfehler), für Konstruktionsjahr 1980

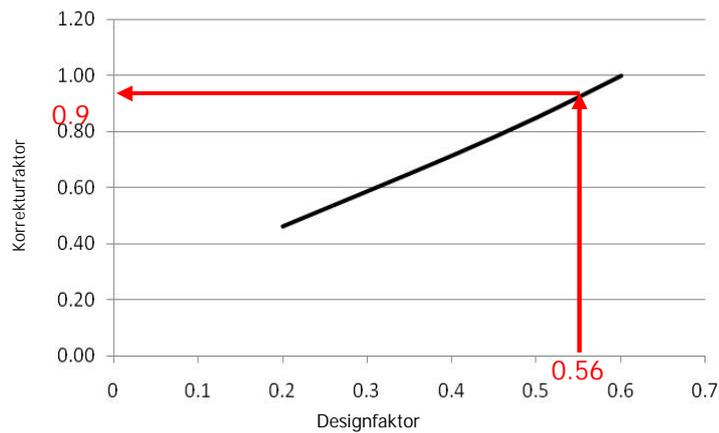
1. Korrekturfaktor Designfaktor (K_{DF})

Für das Berechnungsbeispiel lässt sich der Designfaktor folgendermassen (Formel in Begriffsdefinitionen) berechnen:

$$f_0 = DF = \frac{P_d \times D_a}{20 \times R_{t0,5} \times s} = \frac{70 \times 323.9}{20 \times 360 \times 5.6} = 0.56$$

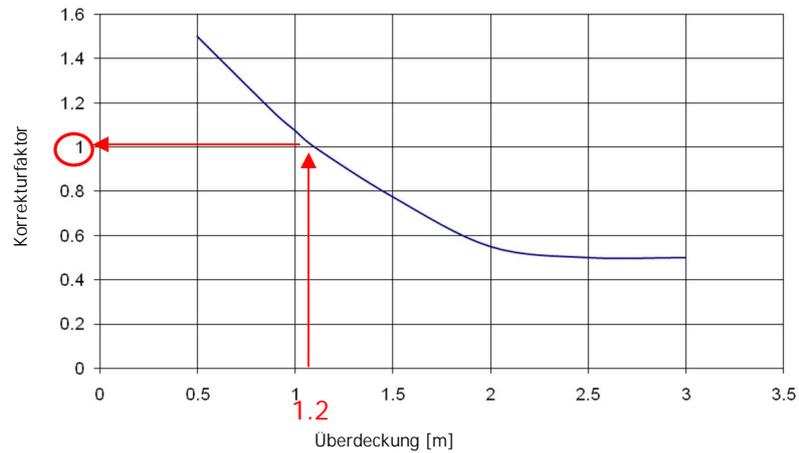
wobei	s =	Mindest-Wanddicke	[mm]
	P_d =	Auslegungsdruck	[bar]
	D_a =	Rohraussendurchmesser	[mm]
	f_0 =	Nutzungsgrad (=Designfaktor, DF)	---
	$R_{t0,5}$ =	Streckgrenze (Mindestwert)	[N/mm ²]

Aus der folgenden Grafik kann der Reduktionsfaktor des Designfaktors 0.56 auf die Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen abgelesen werden: 0.9.



2. Korrekturfaktor Überdeckung (K_U)

Im Beispiel beträgt die Überdeckung 1.2 m. Gemäss nachfolgender Abbildung beträgt der Korrekturfaktor bei 1.2 m Überdeckung 1 (d.h. keine Korrektur).



3. Korrekturfaktor Schutzplatten (K_{S-W}) = 1 (keine Schutzplatten vorhanden)

4. Korrekturfaktor Trasseekontrollen (K_T) = 1 (zweiwöchentliche Kontrolle)

Der Korrekturfaktor K_{total} wird mittels folgender Formel berechnet und beträgt im vorliegenden Fall:

$$K_{\text{Total}} = K_{DF} \times K_U \times K_{S-W} \times K_T = 0.9 \times 1 \times 1 \times 1 = 0.9$$

A 4.4. Berechnung der Summenkurve und Darstellung des Risikos

Im Folgenden wird die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Schadensszenarien für den Punkt MP gezeigt:

Zeitfenster (Belegungs-szenario)	Brand-szenarium	Störfall-wert am Punkt MP	Eintretenswahr-scheinlichkeit Brandszenarium $[10 \text{ m} \cdot \text{y}]^{-1}$	Wahrschein-lichkeit Belegungs-szenario ^u	Wahrschein-lichkeit pro Jahr ^v
Werktag Tag	Feuerball	0.33	1.48×10^{-7}	0.36	5.33×10^{-8}
Werktag Nacht	Feuerball	0.47	1.48×10^{-7}	0.36	5.33×10^{-8}
Wochenende Tag	Feuerball	0.42	1.48×10^{-7}	0.14	2.07×10^{-8}
Wochenende Nacht	Feuerball	0.48	1.48×10^{-7}	0.14	2.07×10^{-8}
Werktag Tag	Fackelbrand	0.24	1.11×10^{-7}	0.36	4.00×10^{-8}
Werktag Nacht	Fackelbrand	0.37	1.11×10^{-7}	0.36	4.00×10^{-8}
Wochenende Tag	Fackelbrand	0.33	1.11×10^{-7}	0.14	1.55×10^{-8}
Wochenende Nacht	Fackelbrand	0.38	1.11×10^{-7}	0.14	1.55×10^{-8}

Für alle Punkte (alle 10 m) werden analog die Störfallwerte mit der entsprechenden Eintretenswahrscheinlichkeit berechnet.

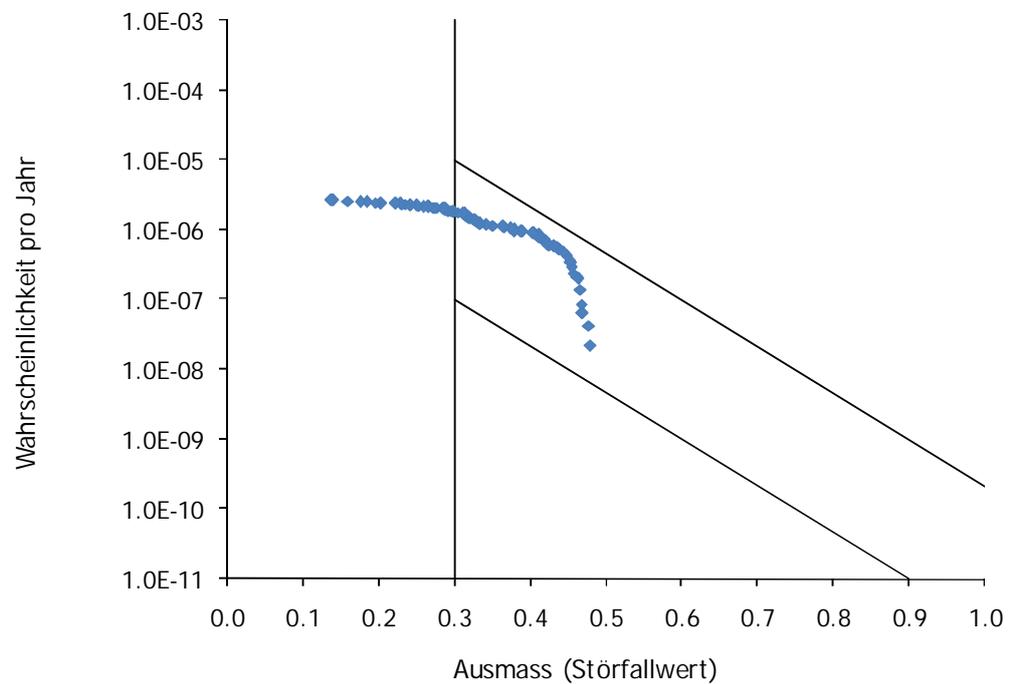
Beginnend mit dem höchsten Störfallwert werden die Wahrscheinlichkeiten kumuliert und im W-A-Diagramm dargestellt.

^u Anteil des Zeitfensters (Belegungsszenario) an der Gesamtzeit

^v Die Wahrscheinlichkeit eines Schadensszenarios berechnet sich durch die Multiplikation der Eintretenswahrscheinlichkeit (siehe vorheriger Abschnitt) mit der Wahrscheinlichkeit des Belegungsszenarios (siehe Belegungsannahmen)

Tab. A 8 Störfallwerte mit kumulierter Wahrscheinlichkeit

Störfallwert	Wahrscheinlichkeit	Kumulierte Wahrscheinlichkeit
0.48	2.1×10^{-8}	2.1×10^{-8}
0.48	2.1×10^{-8}	4.2×10^{-8}
0.47	2.1×10^{-8}	6.3×10^{-8}
0.47	2.1×10^{-8}	8.4×10^{-8}
0.47	5.3×10^{-8}	1.4×10^{-7}
0.46	5.3×10^{-8}	1.9×10^{-7}
...	...	
...	...	
0.14	4.0×10^{-8}	2.7×10^{-6}
0.14	4.0×10^{-8}	2.7×10^{-6}

Abb. A 8 W-A-Diagramm des Berechnungsbeispiels Wohnzone,
Leitung: 12"/70 bar, 5.6 mm Wandstärke, 1.2 m Überdeckung

B Berechnungsbeispiel Gewerbe und Strasse

B 1. Situation

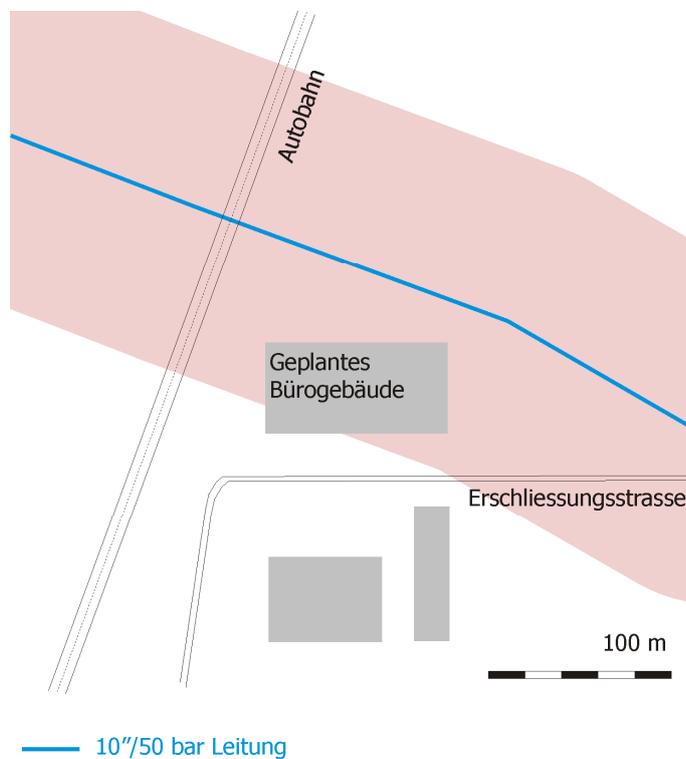
Im gewählten Berechnungsbeispiel wird folgende Situation angenommen:

Ein Leitungstrasse führt am Rande einer Industriezone entlang. Das Leitungstrasse befindet sich nicht in einer Bauzone. Im Einflussbereich der Leitung ist ein neues Bürogebäude geplant.

Für die geplante Leitung gelten folgende technischen Angaben:

Durchmesser	10"
Rohrwandstärke	5 mm
Aussendurchmesser	273 mm
Rohrmaterial	StE 360.7
Max. zulässiger Bewilligungsdruck (MOP)	50 bar
Überdeckung	2 m
Konstruktionsjahr	1970

Abb. B 1 Übersichtsplan



B 2. Belegungsannahmen

B 2.1. Personenbelegung Gewerbe

Kapitel 7.3 beschreibt, wie die Belegungsannahmen für Gewerbe, Industrie und Dienstleistungen getroffen werden. Im vorliegenden Berechnungsbeispiel handelt es sich beim Gebäude im Einflussbereich der Leitung um einen personenintensiven Dienstleistungsbetrieb (Bürogebäude) mit ca. 250 Personen.

Die Präsenzfaktoren für die Arbeitsbevölkerung sind der Tabelle Präsenzfaktoren in Kapitel 7.4 zu entnehmen. Werktags (Mo bis Fr) wird tagsüber 80% der Arbeitsbevölkerung als anwesend angenommen, wovon sich 10% draussen befinden.

B 2.2. Personenbelegung Strassenverkehr basierend auf DTV

Im Einflussbereich liegt ein Autobahnabschnitt mit automatischer Verkehrszählung. Der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV) beträgt 50'239 Fahrzeuge.

Die Belegungsannahmen für den Strassenverkehr werden gemäss Kapitel 8.1 (S. 32) getroffen. Der normale Tagverkehr (stündlicher Verkehr von 6 bis 22 Uhr) beträgt 5.8% des DTV (durchschnittlicher täglicher Verkehr pro Strassenquerschnitt) und der Nachtverkehr (stündlicher Verkehr von 22 bis 6 Uhr) 0.9% des DTV. Um mit den gleichen Zeitfenstern wie beim Gewerbe zu rechnen, kann der Verkehr auch zwischen 7 bis 19 Uhr bzw. 19 bis 7 Uhr ermittelt werden. Für das Berechnungsbeispiel führt dies zu folgender Personenbelegung Strassenverkehr:

Tab. B 1 Personenbelegung Strassenverkehr

Szenario	Verkehrsfrequenz	Belegung	Dauer	Wahrscheinlichkeit
Tagsüber (7 - 19 Uhr)	Tagverkehr = 6.7% DTV = 3'366 Fz/h Tagverkehr pro Fahrtrichtung = $3'366/2 = 1'683$ Fz/h $v = 100$ km/h Mittlere Distanz zwischen zwei Fahrzeugen pro Fahrtrichtung, D_F : $D_F = \frac{v}{N} = \frac{100}{1'683} = 0.060$ km 1 Fz. alle 60 m pro Fahrtrichtung ^w	1.5 P./Fz.	12 h/Tag	0.5

^w Abstand Fahrzeuge = Geschwindigkeit / Verkehrsfrequenz

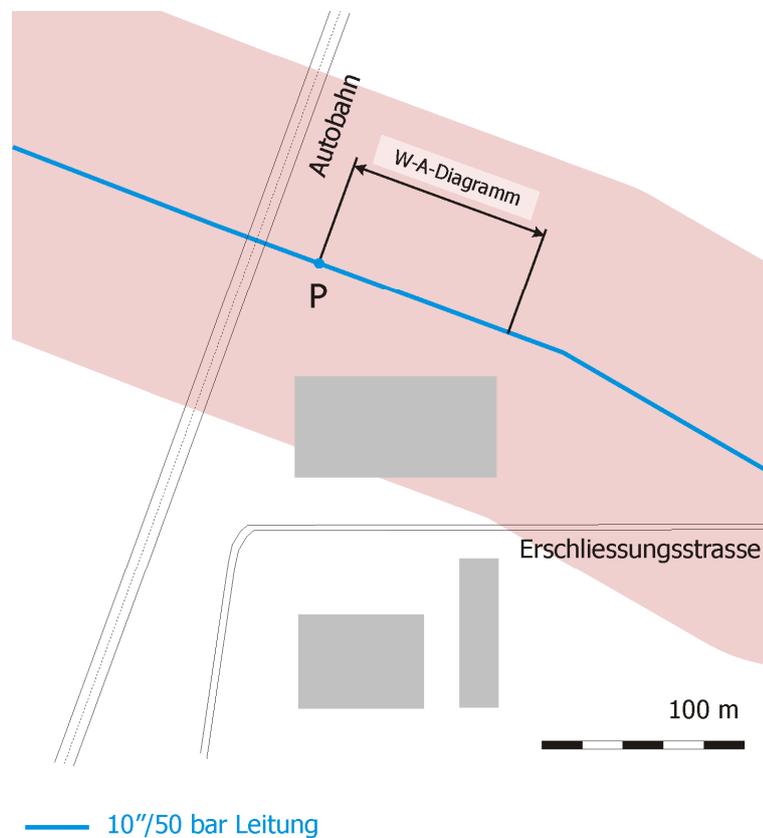
Szenario	Verkehrsfrequenz	Belegung	Dauer	Wahr-schein-lichkeit
Nachts (19 - 7 Uhr)	Nachtverkehr = 1.6% DTV = 804 Fz/h Nachtverkehr pro Fahrtrichtung = $804/2 = 402 \text{ Fz/h}$ $v = 100 \text{ km/h}$ Mittlere Distanz zwischen zwei Fahrzeugen pro Fahrtrichtung, D_F : $D_F = \frac{v}{N} = \frac{100}{402} = 0.249 \text{ km}$ 1 Fz. alle 249 m pro Fahrtrichtung	1.5 P./Fz.	12 h/Tag	0.5

B 3. Risikoermittlung (W-A-Diagramm)

B 3.1. Identifikation der risikorelevanten Stellen

Im gewählten Beispiel soll die Veränderung der Risikosituation durch das geplante Bürogebäude beurteilt werden. Deshalb wird der W-A-Diagramm Abschnitt so gelegt, dass der Einfluss des geplanten Bürogebäudes maximal ist. Der Abschnitt ist etwas in Richtung Autobahn verschoben, da dort die höchsten Störfallwerte durch den gemeinsamen Einfluss des geplanten Bürogebäudes und des Verkehrs auf der Autobahn erreicht werden.

Abb. B 2 Detailplan Berechnung des W-A-Diagramms



B 3.2. Berechnung des Schadenausmasses

Um die Störfallwerte zu berechnen, müssen zuerst die Letalitätsradien Letalitätsfaktoren bestimmt werden. Die Letalitätsradien können aus Tab. 7 und Tab. 8 genommen werden.

Die Letalitätsfaktoren innerhalb der Letalitätsradien für Personen im Freien sind in Tab. 4 zu finden und für Personen in Gebäuden in Tab. 5 und Tab. 6.

Tab. B 2 Letalitätsradien und Letalitäten für Personen im Freien nach dem Totalversagen der 10''/50 bar Leitung

	Exposition	R ₀	R ₂₅	R ₅₀	R ₇₅	R ₁₀₀	
Feuerball	7 sec	90 m	65 m	50 m	45 m	35 m	
Fackelbrand	30 sec	70 m	45 m	35 m	30 m	25 m	
Letalität ^x		ca.	10%	35%	60%	85%	100%

^x Die Letalitäten gelten für beide Brandszenarien (Feuerball und Fackelbrand)

Tab. B 3 Letalitätsradien und Letalitäten für Personen im Gebäude nach dem Totalversagen der 10"/50 bar Leitung (FA = Fackelbrand, FE = Feuerball)

	$R_{0\text{ FA}}$	$R_{25\text{ FA}}$	$R_{50\text{ FA}}$	$R_{Z1\text{ FE}}^y$	$R_{75\text{ FA}}$	$R_{100\text{ FA}}$	$R_{Z1\text{ FA}}^z$
Letalitätsradien	70 m	45 m	35 m	30 m	30 m	25 m	10 m
Letalität Feuerball mit anschliessendem Fackelbrand	ca. 10%	25%	45%	----	95%	100%	100%
Letalität Fackelbrand	ca. 0%	5%	10%	----	35%	75%	100%

Im gewählten Beispiel wurden die vier Szenarien "Werktags Tag" und "Werktags Nacht" (je 12 h) sowie "Wochenende Tag" und "Wochenende Nacht" gerechnet. Da im vorliegenden Beispiel nur Gewerbe und Verkehr im Einflussbereich sind, ist das Szenario "Werktags Tag" relevant. Folgende Tabelle zeigt die Berechnungen der Störfallwerte am Beispiel des Startpunktes (P) des 100 m langen W-A-Abschnitts (siehe Abb. B 2) für den Werktag tagsüber.

Die Ausmasse für die weiteren 9 Punkte werden analog berechnet.

^y Der Radius R_{Z1} Feuerball markiert die maximale Distanz zum Brandzentrum, innerhalb derer das Gebäudeinnere bei intakten Fenstern während der Abbranddauer des Feuerballs in Brand gerät.

^z Der Radius R_{Z1} Fackelbrand markiert die maximale Distanz, innerhalb derer das Gebäudeinnere bei einem Fackelbrand und bei intakten Fenstern innerhalb maximal 15 s Feuer fängt.

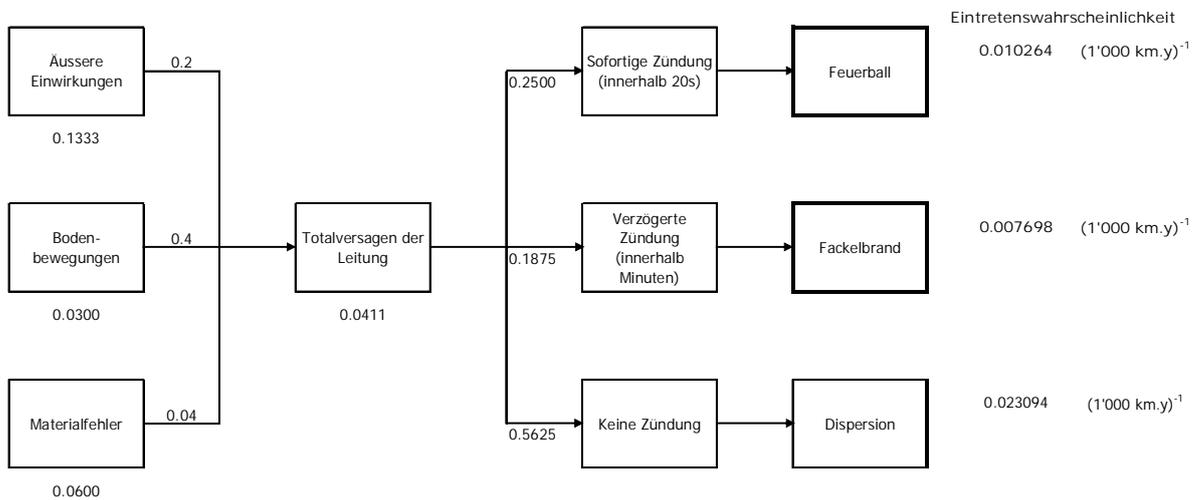
Tab. B 4 Berechnung der Störfallwerte für den Punkt P (siehe Abb. B 2), für das Szenarium "Werktag Tag" (Mo – Fr, 7 – 19 Uhr)

Fackelbrand				Feuerball			
	Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien		Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anz. Tote im Freien
Innerhalb R ₁₀₀ FA	$0.81^1 \times 0.1^{2)} \times 0 \text{ P.} = 0.0 \text{ P.}$	1.00	0.00	Innerhalb R ₁₀₀ FE	$0.8^1 \times 0.1^{2)} \times 20 \text{ P.} = 1.6 \text{ P.}$	1.00	1.60
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	0.00	0.85	0.00	Zwischen R ₁₀₀ FE und R ₇₅ FE	0.00	0.85	0.00
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	1.60	0.60	0.96	Zwischen R ₇₅ FE und R ₅₀ FE	2.40	0.60	1.44
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	1.60	0.35	0.56	Zwischen R ₅₀ FE und R ₂₅ FE	4.80	0.35	1.68
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	8.00	0.10	0.80	Zwischen R ₂₅ FE und R ₀ FE	8.80	0.10	0.88
<i>Total Tote im Freien</i>			2.32	<i>Total Tote im Freien</i>			5.60
	Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden		Anzahl anwesende Personen in Gebäuden	Letalität in Gebäuden	Anz. Tote in Gebäuden
Innerhalb R _{ZI} FA	$0.8^1 \times 0.9^{3)} \times 0 \text{ P.} = 0.0 \text{ P.}$	1.00	0.00	Innerhalb R ₁₀₀ FA	$0.8^1 \times 0.9^{3)} \times 20 \text{ P.} = 0.0 \text{ P.}$	1.00	0.00
Zwischen R _{ZI} und R ₁₀₀ FA	0.00	0.75	0.00	Zwischen R ₁₀₀ FA und R ₇₅ FA	0.00	0.95	0.00
Zwischen R ₁₀₀ und R ₇₅ FA	0.00	0.35	0.00	Zwischen R ₇₅ FA und R _{ZI} FE	0.00	0.80	0.00
Zwischen R ₇₅ und R ₅₀ FA	14.40	0.10	1.44	Zwischen R _{ZI} FE und R ₅₀ FA	14.40	0.45	6.48
Zwischen R ₅₀ und R ₂₅ FA	14.40	0.05	0.72	Zwischen R ₅₀ FA und R ₂₅ FA	14.40	0.25	3.60
Zwischen R ₂₅ und R ₀ FA	72.00	0.00	0.00	Zwischen R ₂₅ FA und R ₀ FA	72.00	0.10	7.20
<i>Total Tote in Gebäuden</i>			2.16	<i>Total Tote in Gebäuden</i>			17.28
Total Anzahl Tote Fackelbrand			4.48	Total Anzahl Tote Feuerball			22.80
Störfallwert Szenarium Fackelbrand			$0.3 \times \log(4.48) = 0.20$	Störfallwert Szenarium Feuerball			$0.3 \times \log(22.8) = 0.41$

¹⁾ Anwesende Personen = 80% der totalen Arbeitsbevölkerung; ²⁾ Personen im Freien = 10% der anwesenden Arbeitsbevölkerung; ³⁾ Personen in Gebäuden = 90% der anwesenden Arbeitsbevölkerung (gemäss Präsenzfaktoren Tab. 12, S. 30)

B 3.3. Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten

Abb. B 3 Fehler- und Ereignisbaum gemäss Abb. 12 (S. 46) der Beispiel-Leitung 10"/50 bar, 5 mm Wandstärke, Baujahr 1970, Designfaktor 0.38



Die Totalversagensrate (Versagensrate x Korrekturfaktor x Anteil Totalversagen) kann aus den gemachten Angaben berechnet werden:

	Versagensrate ¹⁾ [1'000 km·y] ⁻¹	Korrekturfaktor	Anteil Totalversagen	Totalversagen [1'000 km·y] ⁻¹
Äussere Einwirkungen	0.34 ^{aa}	0.392 ^{bb}	0.2	0.0267
Bodenbewegungen	0.030 ^{cc}	--	0.4	0.0120
Materialfehler	0.060 ^{dd}	--	0.04	0.0024
Total				0.0411

^{aa} Gemäss Tab. 17 (äussere Einwirkungen), für Wandstärke 5 mm

^{bb} Siehe Herleitung Korrekturfaktor

^{cc} Gemäss Tab. 19 (Bodenbewegungen), für Durchmesser 10"

^{dd} Gemäss Tab. 20 (Materialfehler), für Konstruktionsjahr 1970

Herleitung Korrekturfaktor

Die Versagensrate durch äussere Einwirkungen ist mit folgenden Korrekturfaktoren zu korrigieren:

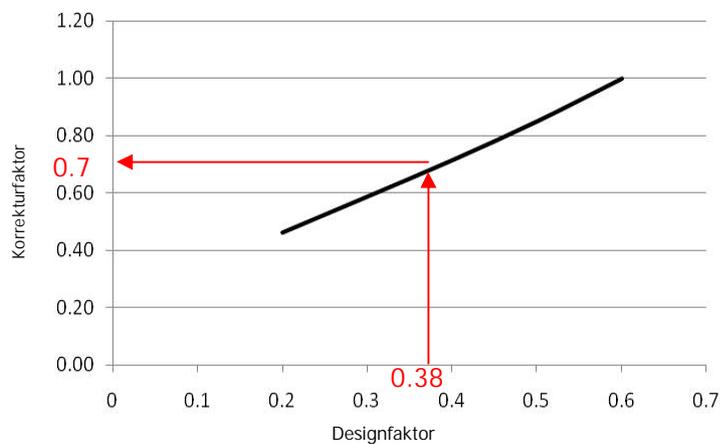
1. Korrekturfaktor Designfaktor (K_{DF})

Für das Berechnungsbeispiel lässt sich der Designfaktor folgendermassen berechnen (Formel in Begriffsdefinitionen):

$$f_0 = DF = \frac{P_d \times D_a}{20 \times R_{t0,5} \times s} = \frac{50 \times 273}{20 \times 360 \times 5} = 0.38$$

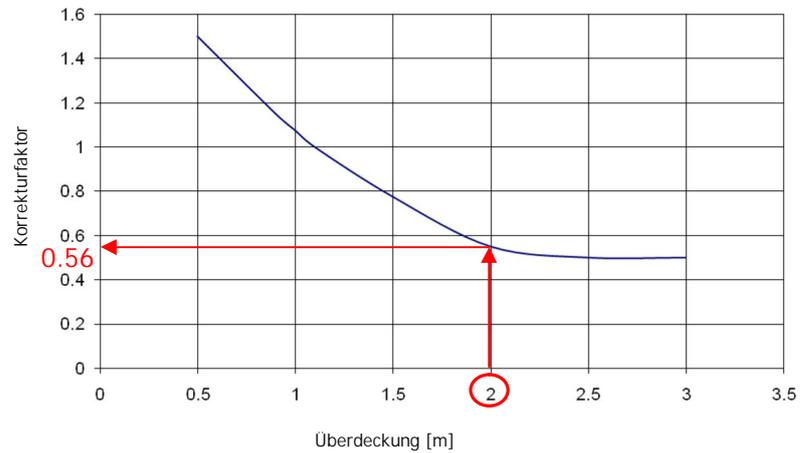
wobei	s	Mindest-Wanddicke	[mm]
	P_d	Auslegungsdruck	[bar]
	D_a	Rohraussendurchmesser	[mm]
	f_0	Nutzungsgrad (=Designfaktor, DF)	[---]
	$R_{t0,5}$	Streckgrenze (Mindestwert)	[N/mm ²]

Aus der folgenden Grafik kann der Reduktionsfaktor auf die Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen abgelesen werden: ca. 0.7.



2. Korrekturfaktor Überdeckung (K_U)

Im Beispiel beträgt die Überdeckung 2 m. Gemäss nachfolgender Abbildung beträgt der Korrekturfaktor bei 2 m Überdeckung ca. 0.56.



3. Korrekturfaktor Schutzplatten (K_{S-W}) = 1 (keine Schutzplatten vorhanden)

4. Korrekturfaktor Trasseekontrollen (K_T) = 1 (zweiwöchentliche Kontrollen)

Der Korrekturfaktor K_{total} wird mittels folgender Formel berechnet und beträgt im vorliegenden Fall:

$$K_{\text{Total}} = K_{DF} \times K_U \times K_{S-W} \times K_T = 0.7 \times 0.56 \times 1 \times 1 = 0.392$$

B 3.4. Berechnung der Summenkurve und Darstellung des Risikos

Im Folgenden wird die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Schadensszenarien pro 10 m Abschnitt und Jahr für den Punkt P gezeigt:

Zeitfenster (Belegungs-szenario)	Brand-szenarium	Stör-fallwert am Punkt P	Eintretenswahrscheinlichkeit Brandszenarium $[10 \text{ m} \cdot \text{y}]^{-1}$	Wahrscheinlichkeit Belegungs-szenario ^{ee}	Wahr-scheinlich-keit pro Jahr ^{ff}
Werktag Tag	Feuerball	0.41	1.03×10^{-7}	0.36	3.70×10^{-8}
Werktag Nacht	Feuerball	0.03	1.03×10^{-7}	0.36	3.70×10^{-8}
Wochenende Tag	Feuerball	0.04	1.03×10^{-7}	0.14	1.44×10^{-8}
Wochenende Nacht	Feuerball	0.00	1.03×10^{-7}	0.14	1.44×10^{-8}
Werktag Tag	Fackelbrand	0.20	7.70×10^{-8}	0.36	2.77×10^{-8}
Werktag Nacht	Fackelbrand	0.00	7.70×10^{-8}	0.36	2.77×10^{-8}
Wochenende Tag	Fackelbrand	0.00	7.70×10^{-8}	0.14	1.08×10^{-8}
Wochenende Nacht	Fackelbrand	0.00	7.70×10^{-8}	0.14	1.08×10^{-8}

Beginnend mit dem höchsten Störfallwert werden die Wahrscheinlichkeiten kumuliert und im W-A-Diagramm dargestellt.

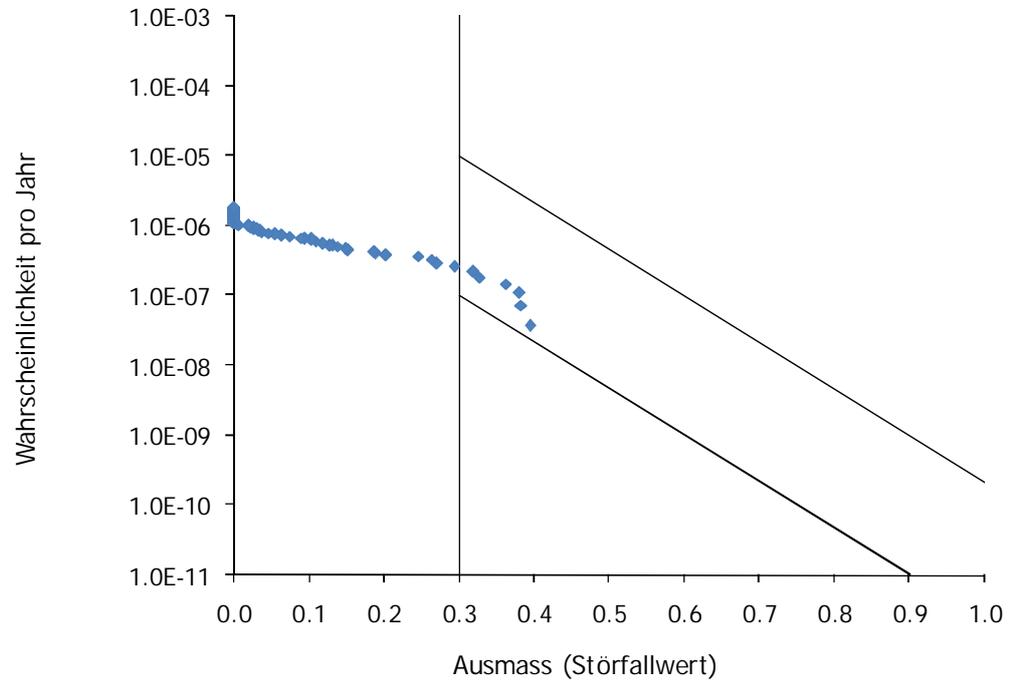
Tab. B 5 Störfallwerte mit kumulierter Wahrscheinlichkeit

Störfallwert	Wahrscheinlichkeit	Kumulierte Wahrscheinlichkeit
0.40	3.7×10^{-8}	3.7×10^{-8}
0.38	3.7×10^{-8}	7.4×10^{-8}
0.38	3.7×10^{-8}	1.1×10^{-7}
0.36	3.7×10^{-8}	1.5×10^{-7}
0.33	3.7×10^{-8}	1.8×10^{-7}
0.32	3.7×10^{-8}	2.2×10^{-7}
...
...
0	1.1×10^{-8}	1.8×10^{-6}
0	1.1×10^{-8}	1.9×10^{-6}

^{ee} Anteil des Zeitfensters (Belegungsszenario) an der Gesamtzeit

^{ff} Die Wahrscheinlichkeit eines Schadensszenarios berechnet sich durch die Multiplikation der Eintretenswahrscheinlichkeit (siehe vorheriger Abschnitt) mit der Wahrscheinlichkeit des Belegungsszenarios (siehe Belegungsannahmen).

Abb. B 4 W-A-Diagramm des Berechnungsbeispiels Gewerbe und Verkehr,
Angaben Leitung: 10"/50 bar, 5 mm Wandstärke, 2 m Überdeckung



C Berechnungsbeispiel Zug

C 1. Situation

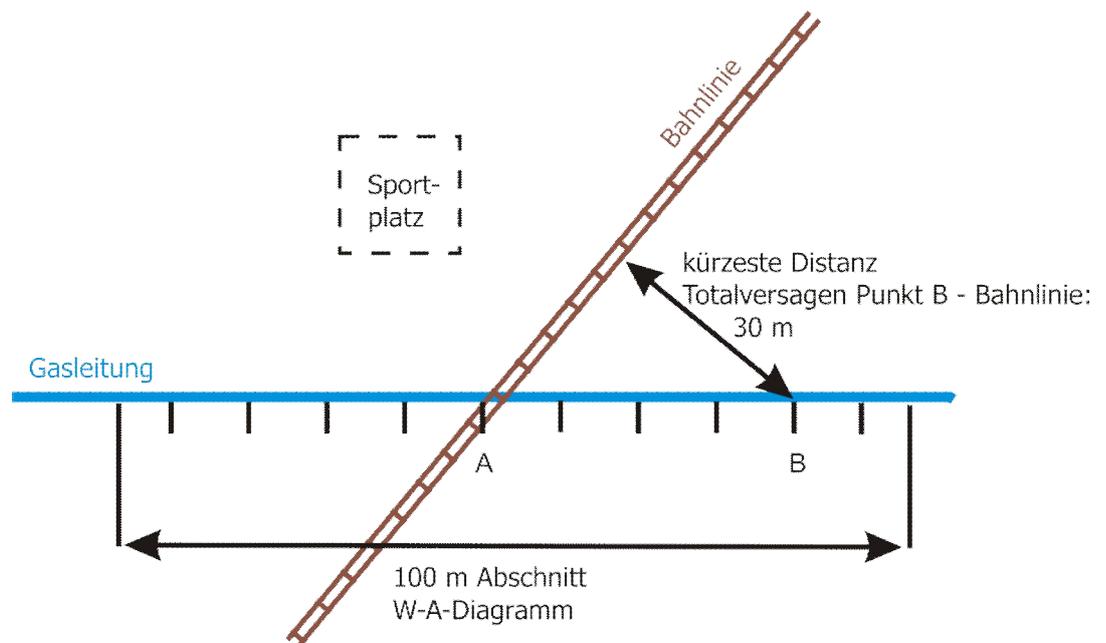
Im gewählten Berechnungsbeispiel wird folgende Situation angenommen:

Eine Erdgashochdruckleitung kreuzt eine Bahnlinie, welche von S-Bahnen befahren wird. Innerhalb des Einflussbereichs der Leitung auf dem zu beurteilenden Leitungsabschnitts befinden sich die Bahnlinie sowie ein Sportplatz.

Für die geplante Leitung gelten folgende technischen Angaben:

Durchmesser	48"
Aussendurchmesser	1219 mm
Rohrwandstärke	20 mm
Rohrmaterial	StE 480.7
Max. zulässiger Bewilligungsdruck (MOP)	70 bar
Überdeckung	2.5 m
Konstruktionsjahr	1990

Abb. C 1 Detailplan der Situation



C 2. Belegungsannahmen

Auf der angenommenen Bahnlinie verkehren S-Bahnzüge mit einer Länge von ca. 100 m.

In der folgenden Tabelle sind die Belegungsannahmen zusammengestellt:

Tab. C 1 Belegungsannahmen Bahnverkehr

Szenario	Zugfrequenz gemäss Fahrplan	Belegung	Dauer	Wahrscheinlichkeit
Tagsüber (6-20 Uhr)	Je 8 S-Bahnen pro Stunde	100 Personen/Zug (durchschnittliche Passagierzahlen)	14 h/Tag	0.583
Abends (20-24 Uhr)	Je 4 S-Bahnen pro Stunde	50 Personen/Zug (geringe Passagierzahlen)	4 h/Tag	0.167
Nachts (24-6 Uhr)	Keine S-Bahnen, nur Güterzüge	1 Personen/Zug	6 h/Tag	0.25

Tab. C 2 Belegungsannahmen Sportplatz

Objekt	Belegung	Dauer	Wahrscheinlichkeit
Sportplatz	70 Personen	4 h pro Tag (13 – 17 Uhr)	0.167

C 3. Risikoermittlung (W-A-Diagramm)

Im Folgenden wird am Beispiel eines Totalversagens der Leitung die Berechnungen der Ausmasse sowie der Wahrscheinlichkeiten gezeigt. Als Beispiel wird der Punkt A und B innerhalb des 100 m Abschnitts genommen (siehe Abb. C 1). Der Punkt A liegt direkt auf bzw. unter den Gleisen, der Punkt B hat einen minimalen Abstand zur Bahnlinie von 30 m.

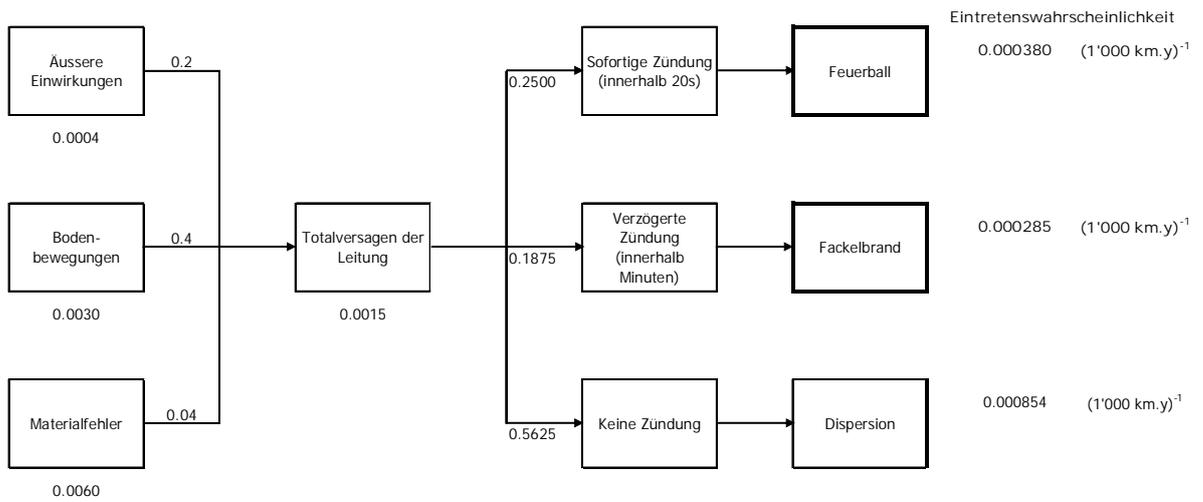
C 3.1. Letalitätsradien

Tab. C 3 Letalitätsradien und Letalitäten für Personen im Freien nach dem Totalversagen der 48"/70 bar Leitung

	Exposition	R ₀	R ₂₅	R ₅₀	R ₇₅	R ₁₀₀
Feuerball	25.6 sec	585 m	450 m	380 m	335 m	305 m
Fackelbrand	30 sec	360 m	240 m	185 m	155 m	135 m
Letalität ⁹⁹		ca. 10%	35%	60%	85%	100%

C 3.2. Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten

Abb. C 2 Fehler- und Ereignisbaumgemäss Abb. 12 (S. 46) der Beispiel-Leitung 48"/70 bar, 20 mm Wandstärke, Baujahr 1990



⁹⁹ Letalitäten gelten für beide Brandszenarien (Feuerball und Fackelbrand)

Die Totalversagensrate kann aus den gemachten Angaben berechnet werden:

	Versagensrate [1'000 km y] ⁻¹	Korrektur- faktor	Anteil Total- versagen	Totalversagen [1'000 km y] ⁻¹
Äussere Einwirkungen	0.001 ^{hh}	0.395 ⁱⁱ	0.2	0.000079
Bodenbewegungen	0.003 ^{jj}	--	0.4	0.0012
Materialfehler	0.006 ^{kk}	--	0.04	0.00024
Total				0.001519

Herleitung Korrekturfaktor

Die Versagensrate durch äussere Einwirkungen ist mit folgenden Korrekturfaktoren zu korrigieren:

1. Korrekturfaktor Designfaktor (K_{DF})

Für das Berechnungsbeispiel lässt sich der Designfaktor folgendermassen berechnen (Formel in Begriffsdefinitionen):

$$f_0 = DF = \frac{P_d \times D_a}{20 \times R_{t0,5} \times s} = \frac{70 \times 1219}{20 \times 480 \times 20} = 0.44$$

wobei	s	Mindest-Wanddicke	[mm]
	P_d	Auslegungsdruck	[bar]
	D_a	Rohraussendurchmesser	[mm]
	f_0	Nutzungsgrad (=Designfaktor, DF)	---
	$R_{t0,5}$	Streckgrenze (Mindestwert)	[N/mm ²]

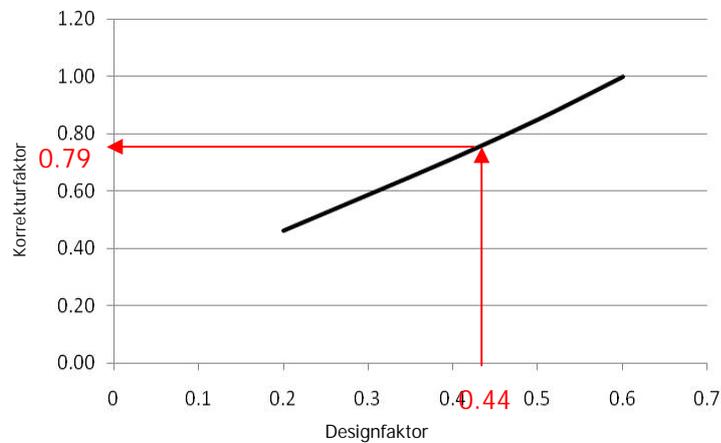
^{hh} Gemäss Tab. 17 (äussere Einwirkungen)

ⁱⁱ Siehe Herleitung Korrekturfaktor

^{jj} Gemäss Tab. 19 (Bodenbewegungen)

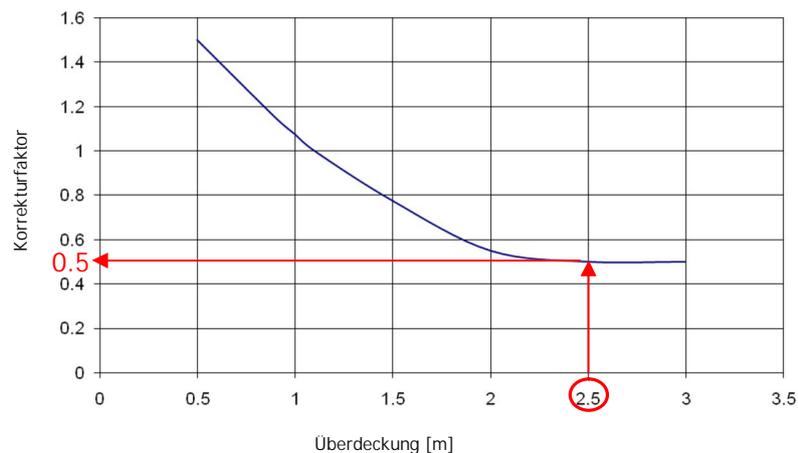
^{kk} Gemäss Tab. 20 (Materialfehler)

Aus der folgenden Grafik kann der Reduktionsfaktor auf die Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen abgelesen werden: ca. 0.79:



2. Korrekturfaktor Überdeckung (K_U)

Im Beispiel beträgt die Überdeckung 2.5 m. Gemäss nachfolgender Abbildung beträgt der Korrekturfaktor bei 2.5 m Überdeckung ca. 0.5.

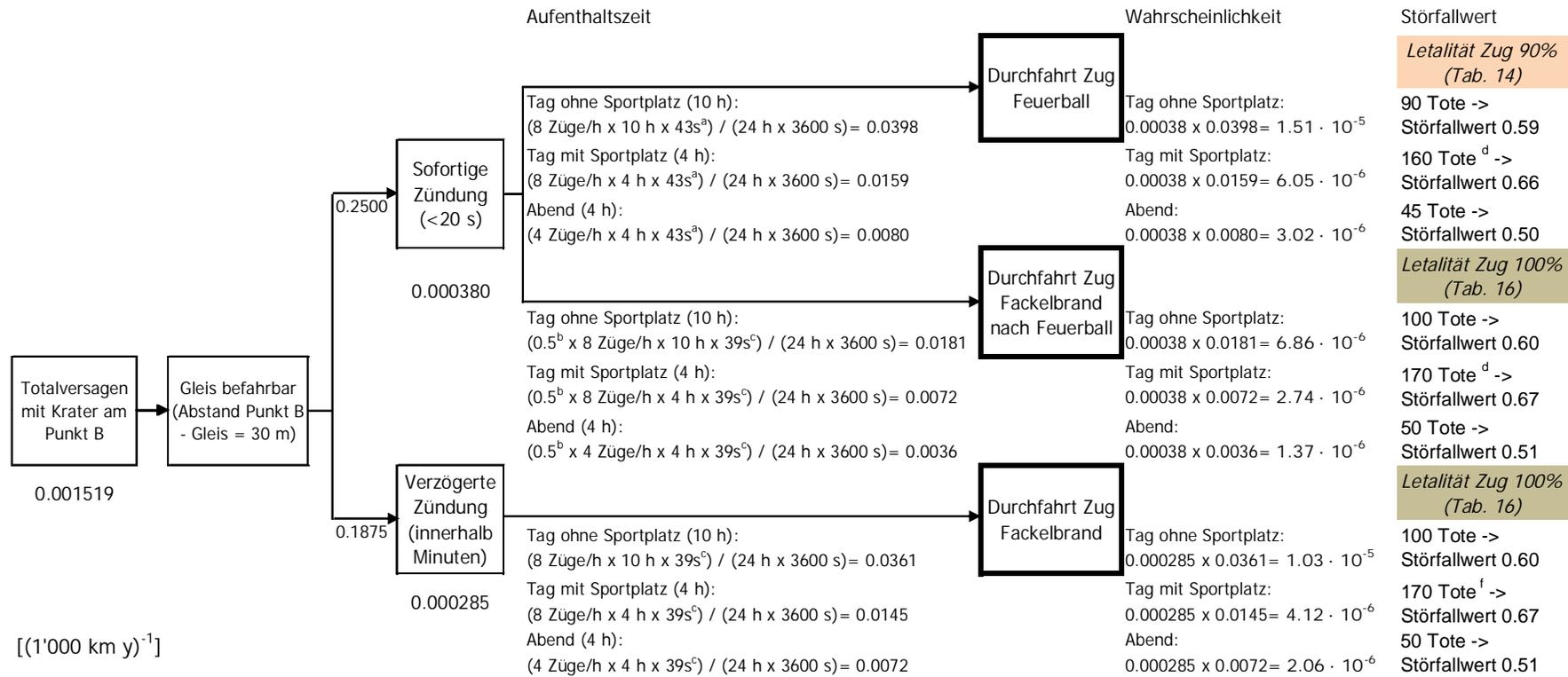


3. Korrekturfaktor Schutzplatten (K_{S-W}) = 1 (keine Schutzplatten vorhanden)
4. Korrekturfaktor Trasseekontrollen (K_T) = 1 (keine wöchentlichen Kontrollen)

Der Korrekturfaktor K_{total} wird mittels folgender Formel berechnet und beträgt im vorliegenden Fall:

$$K_{Total} = K_{DF} \times K_U \times K_{S-W} \times K_T = 0.79 \times 0.5 \times 1 \times 1 = 0.395$$

Abb. C 3 Berechnete Schadensszenarien der 48"/70 bar Leitung gemäss Abb. 9, S. 41, Leck am Punkt B in 30 m Abstand zum Gleis, für die Belegungsszenarien mit Zug (Zuglänge 100 m, Belegung tagsüber 100 Personen/Zug, abends 50 Personen/Zug)



^a 43 s (Tab. 14)

^b 50% der Zugsfrequenz (Kap. 8.2.4)

^c (Bremsweg + Länge Gleis in R₅₀ Fackelbrand + Zuglänge)/ Geschwindigkeit
 = (400 m + 367 m + 100 m)/ 22 m/s = 39 s

^d Sportplatz: 70 Tote durch Feuerball (innerhalb R₁₀₀ Feuerball)

^f Sportplatz: 70 Tote durch Fackelbrand (innerhalb R₁₀₀ Fackelbrand)

C 3.3. Feuerball ohne nachfolgender Fackelbrand

Die Letalität sowie die Aufenthaltszeit eines 100 m langen Zuges, der an einem Totalversagen der Erdgashochdruckleitung mit Feuerball vorbeifährt, kann aus der Tab. 14, Kap. 8.2.4, S. 36 abgelesen werden.

Tab. C 4 Letalitäten und Aufenthaltszeiten einer 48"/70 bar Leitung bei Durchfahrt eines Zuges in Abhängigkeit vom Abstand Bahnlinie zum Feuerball, Auszug aus Tab. 14, Kap. 8.2.4, S. 36

Durchmesser: Nennweite bzw. Rohraussendurchmesser	Druck	Letalität und Aufenthaltszeit eines Zuges bei einem Abstand von Totalversagen zur Bahnlinie bei einer Zuglänge von 100 m				
		< 10 m	10 - < 30 m	30 - < 50 m	50 - < 70 m	70 - < 90 m
48" (1219 mm)	70 bar	90% / 44 s	90% / 44 s	90% / 43 s	90% / 43 s	90% / 42 s

Ausmass für Totalversagen am Punkt B

Für den gewählten Beispielpunkt B in 30 m Abstand zu den Gleisen beträgt die Letalität der Zugspassagiere beim Feuerball 90%. Tagsüber muss entsprechend mit 90 Toten durch den Zugverkehr gerechnet werden und abends mit 45 Toten durch den Zugverkehr. Das Belegungsszenario Nacht (1 Person pro Zug) ergibt einen Störfallwert von 0 und ist deshalb vernachlässigbar.

Die übrige Zeit (tagsüber ohne Sportplatz und ohne Zug sowie abends und nachts ohne Zug) sind keine Personen anwesend, weshalb diese Belegungsszenarien vernachlässigt werden können (Störfallwerte von 0).

Tab. C 5 Ausmass am Punkt B verursacht durch das Brandszenario Feuerball ohne nachfolgender Fackelbrand

Belegungs-szenario	Belegung	Letalität	Anzahl Tote	Störfallwert
Tagsüber mit Zug ohne Sportplatz (6-13 + 17-20 Uhr)	100 P./Zug	90%	90	0.59
Tagsüber mit Zug und mit Sportplatz (13-17 Uhr)	100 P./Zug 70 P. Sportplatz	90% 100% ^{II}	90 70 Total 160	0.66
Tagsüber ohne Zug mit Sportplatz (13-17 Uhr)	70 P. Sportplatz	100% ^{II}	70	0.55
Abends (20-24 Uhr)	50 P./Zug	90%	45	0.50
Nachts (24-6 Uhr)	1 P./Zug	90%	1	0

Aufenthaltswahrscheinlichkeit Zug im Gefahrenbereich von Totalversagen am Punkt B

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich in einem bestimmten Zeitfenster (Belegungsszenario) ein Zug auf der Gefahrenstrecke befindet, berechnet sich folgendermassen:

$$W_{\text{Zug}} = \frac{\text{Anz. Züge pro h} \times \text{Zeitfenster (h)} \times \text{Aufenthaltsdauer Zug im Gefahrenbereich (s)}}{\text{Gesamte Zeitperiode (s)}}$$

Die gesamte Zeitperiode ist in der Regel ein Tag (24 h).

Tab. C 6 Wahrscheinlichkeiten Belegungsszenarien mit Zügen bei einem Totalversagen am Punkt B, Brandszenario Feuerball ohne nachfolgender Fackelbrand

Belegungsszenario mit Zug	Zugs-frequenz [Züge/h]	Zeit-fenster [h/Tag]	Aufenthaltsdauer Zug im Gefahrenbereich [s] (Tab. 14, Kap. 8.2.4, S. 36)	Aufenthaltswahrscheinlichkeit
Tagsüber ohne Sportplatz (6-13 und 17-20 Uhr)	8 Züge/h	10 h	43 s	$(8 \times 10 \times 43) / (24 \times 3600) = 0.0398$
Tagsüber mit Sportplatz (13-17 Uhr)	8 Züge/h	4 h	43 s	0.0159
Abends (20-24 Uhr)	4 Züge/h	4 h	43 s	0.0080

^{II} Der Sportplatz befindet sich innerhalb des R₁₀₀ Feuerball im Freien.

C 3.4. Fackelbrand nach Feuerball

Ausmass

Aus der Tab. 16, Kap. 8.2.5, S. 40 wird der R_{FAZ} genommen, innerhalb dem die Letalität der Zugspassagiere 100% beträgt.

Tab. C 7 Radius R_{FAZ} für die Berechnung der Letalität von Personen in Zügen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h beim Fackelbrand, Auszug aus Tab. 16

Durchmesser: Nennweite bzw. Rohraussendurchmesser	R_{FAZ} [m]
70 bar / 48" (1219 mm)	132

Für das Totalversagen beim Beispielpunkt B, welcher einen Abstand zur Bahnlinie von 30 m hat, beträgt die Letalität der Zugspassagiere beim Fackelbrand nach Feuerball entsprechend 100%.

Tab. C 8 Ausmass am Punkt B verursacht durch das Brandszenario Fackelbrand nach Feuerball

Belegungs-szenario	Belegung	Letalität	Anzahl Tote	Störfallwert
Tagsüber mit Zug ohne Sportplatz (6-13 Uhr und 17-20 Uhr)	100 P./Zug	100%	100	0.6
Tagsüber mit Zug und mit Sportplatz (13-17 Uhr)	100 P./Zug 70 P. Sportplatz	100% 100% ^{mm}	100 70 (Feuerball!) ⁿⁿ Total 170	0.67
Tagsüber ohne Zug mit Sportplatz (13-17 Uhr)	70 P. Sportplatz	100% ^{mm}	70 (Feuerball!) ⁿⁿ	0.55
Abends (20-24 Uhr)	50 P./Zug	100%	50	0.51
Nachts (24-6 Uhr)	1 P./Zug	100%	1	0

^{mm} Letalität Brandszenario Feuerball: Der Sportplatz befindet sich innerhalb des R_{100} Feuerball im Freien.

ⁿⁿ Anzahl Tote durch Brandszenario Feuerball

Wahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug betroffen wird, ergibt sich aus der Durchfahrtszeit eines Zuges durch den Gleisabschnitt im R₅₀ Fackelbrand für Personen im Freien und dem Anhalteweg sowie der Zuglänge (Kap. 8.2.5, S. 40):

$$R_{50} \text{ Fackelbrand (48"/70 bar)} = 186 \text{ m}$$

$$\text{Länge Bahngleis innerhalb } R_{50} \text{ Fackelbrand} = 2 \times \sqrt{186\text{m}^2 - 30\text{m}^2} = 367\text{m}$$

Anhalteweg (inkl. Reaktionsweg): 400 m

Länge Zug = 100 m

$$\text{Durchfahrtsdauer Zug} = \frac{(367 \text{ m} + 400 \text{ m} + 100 \text{ m})}{22 \text{ m/s}} = 39\text{s}$$

Diese Durchfahrtsdauer wird gemäss Kap. 8.2.4 mit 50% der Zugsfrequenz auf dem betreffenden Abschnitt multipliziert.

Tab. C 9 Wahrscheinlichkeiten Belegungsszenarien mit Zügen bei einem Totalversagen am Punkt B, Brandszenario Fackelbrand nach Feuerball

Belegungsszenario mit Zug	Zugsfrequenz [Züge/h] (50% der Züge, Kap. 8.2.4)	Zeitfenster [h/Tag]	Aufenthaltsdauer Zug im Gefahrenbereich [s] (Kap. 8.2.5)	Aufenthaltswahrscheinlichkeit ^{oo}
Tagsüber ohne Sportplatz (6-13 und 17-20 Uhr)	0.5 x 8 Züge/h	10 h	39 s	$(0.5 \times 8 \times 10 \times 39) / (24 \times 3600) = 0.0181$
Tagsüber mit Sportplatz (13-17 Uhr)	0.5 x 8 Züge/h	4 h	39 s	0.0072
Abends (20-24 Uhr)	0.5 x 4 Züge/h	4 h	39 s	0.0036

^{oo} Wahrscheinlichkeit, dass sich während dem Zeitfenster ein Zug auf der Gefahrenstrecke befindet.

C 3.5. Fackelbrand

Ausmass

Aus der Tab. 16, Kap. 8.2.5, S. 40 wird der R_{FAZ} genommen, innerhalb dem die Letalität der Zugspassagiere 100% beträgt.

Tab. C 10 Radius R_{FAZ} für die Berechnung der Letalität von Personen in Zügen mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h beim Fackelbrand, Auszug aus Tab. 16

Durchmesser: Nennweite bzw. Rohraussendurchmesser	R_{FAZ} [m]
70 bar / 48" (1219 mm)	132

Für das Totalversagen beim Beispielpunkt B, welcher einen Abstand zur Bahnlinie von 30 m hat, beträgt die Letalität der Zugspassagiere beim Fackelbrand entsprechend 100%.

Tab. C 11 Ausmass am Punkt B verursacht durch das Brandszenario Fackelbrand

Belegungszenario	Belegung	Letalität	Anzahl Tote	Störfallwert
Tagsüber mit Zug ohne Sportplatz (6-13 Uhr und 17-20 Uhr)	100 P./Zug	100%	100	0.6
Tagsüber mit Zug und mit Sportplatz (13-17 Uhr)	100 P./Zug 70 P. Sportplatz	100% 100% ^{PP}	100 70 Total 170	0.67
Tagsüber ohne Zug mit Sportplatz (13-17 Uhr)	70 P. Sportplatz	100% ^{PP}	70	0.55
Abends (20-24 Uhr)	50 P./Zug	100%	50	0.51
Nachts (24-6 Uhr)	1 P./Zug	100%	1	0

^{PP} Der Sportplatz befindet sich innerhalb des R_{100} Fackelbrand im Freien.

Wahrscheinlichkeit

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Zug betroffen wird, ergibt sich aus der Durchfahrtszeit eines Zuges durch den Gleisabschnitt im R₅₀ Fackelbrand für Personen im Freien und dem Anhalteweg sowie der Zuglänge (Kap. 8.2.5, S. 40):

R₅₀ Fackelbrand (48"/70 bar) = 186 m

Länge Bahngleis innerhalb R₅₀ Fackelbrand = $2 \times \sqrt{186\text{m}^2 - 30\text{m}^2} = 367\text{m}$

Anhalteweg (inkl. Reaktionsweg): 400 m

Länge Zug = 100 m

Durchfahrtsdauer Zug = $\frac{(367\text{ m} + 400\text{ m} + 100\text{ m})}{22\text{ m/s}} = 39\text{s}$

Tab. C 12 Wahrscheinlichkeiten Belegungsszenarien mit Zügen bei einem Totalversagen am Punkt B, Szenario Fackelbrand

Belegungsszenario mit Zug	Zugsfrequenz [Züge/h]	Zeitfenster [h/Tag]	Aufenthaltsdauer Zug im Gefahrenbereich Fackelbrand [s] (Kap. 8.2.5, siehe Herleitung oben)	Aufenthaltswahrscheinlichkeit ⁹⁹
Tagsüber ohne Sportplatz (6-13 und 17-20 Uhr)	8 Züge/h	10 h	39 s	$(8 \times 10 \times 39) / (24 \times 3600) = 0.0361$
Tagsüber mit Sportplatz (13-17 Uhr)	8 Züge/h	4 h	39 s	0.0145
Abends (20-24 Uhr)	4 Züge/h	4 h	39 s	0.0072

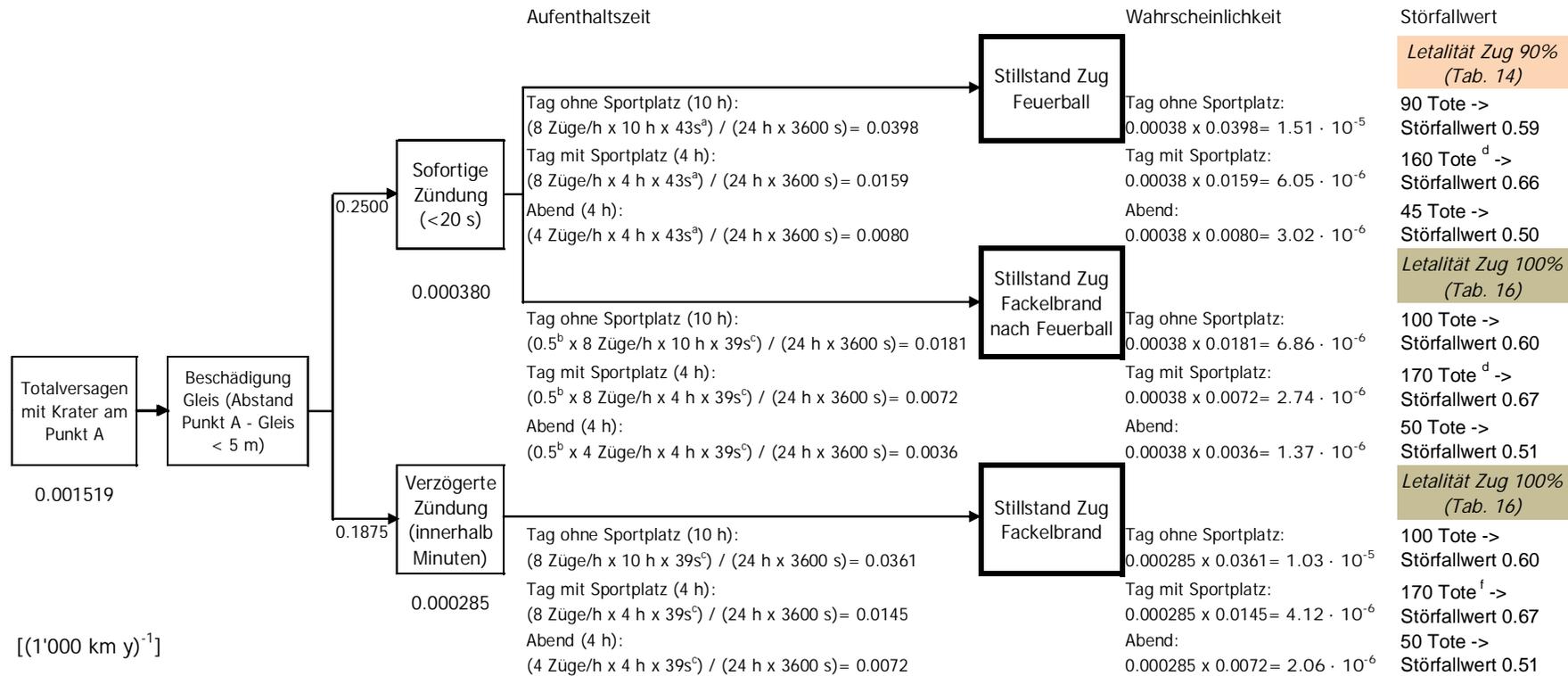
C 3.6. Mechanische Beschädigung der Gleise

Der Beispielpunkt A liegt direkt unter den Gleisen, wo gemäss Kap. 8.2.6 (S. 41) eine mechanische Beschädigung der Gleise angenommen wird.

Ausmass und Wahrscheinlichkeit werden gemäss Kap. 8.2.6, S. 41 (siehe auch Abb. 9) gleich wie bei der Durchfahrt des Zuges durch das Wärmestrahlungsfeld des Feuerballs oder des Fackelbrandes berechnet. Ausmass und Wahrscheinlichkeit für den Punkt A können also analog wie für den Punkt B bestimmt werden (siehe Abb. C 4).

⁹⁹ Wahrscheinlichkeit, dass sich während dem Zeitfenster ein Zug auf der Gefahrenstrecke befindet.

Abb. C 4 Berechnete Schadensszenarien der 48"/70 bar Leitung gemäss Abb. 9, S. 41, Leck am Punkt A direkt unter dem Gleis, für die Belegungsszenarien mit Zug (Zuglänge 100 m, Belegung tagsüber 100 Personen/Zug, abends 50 Personen/Zug)



^a 43 s (Tab. 14)

^b 50% der Zugsfrequenz (Kap. 8.2.4)

^c (Bremsweg + Länge Gleis in R₅₀ Fackelbrand + Zuglänge) / Geschwindigkeit
 = (400 m + 367 m + 100 m) / 22 m/s = 39 s

^d Sportplatz: 70 Tote durch Feuerball (innerhalb R₁₀₀ Feuerball)

^f Sportplatz: 70 Tote durch Fackelbrand (innerhalb R₁₀₀ Fackelbrand)

C 3.7. Berechnung der Summenkurve und Darstellung des Risikos

Tab. C 13 Berechnung der Wahrscheinlichkeit pro Jahr für das Brandszenarium Feuerball für den Beispielpunkt B

Zeitfenster	Brand-szenarium	Aus-mass am Punkt B	Eintretens-wahrschein-lichkeit des Brandszenarios [10 m·y] ⁻¹	Aufenthalts-wahrschein-lichkeit	Wahrscheinlichkeit Störfallwert pro Jahr ^{rr}
Belegungsszenarien mit Zug					
Tagsüber mit Zug ohne Sportplatz (6-13 Uhr und 17-20 Uhr)	Feuerball ohne Fackelbrand	0.59	3.80×10^{-9}	0.0398	1.51×10^{-10}
Tagsüber mit Zug und mit Sportplatz (13-17 Uhr)	Feuerball ohne Fackelbrand	0.66	3.80×10^{-9}	0.0159	6.05×10^{-11}
Abends (20-24 Uhr)	Feuerball ohne Fackelbrand	0.50	3.80×10^{-9}	0.0080	3.02×10^{-11}
Tagsüber mit Zug ohne Sportplatz (6-13 Uhr und 17-20 Uhr)	Fackelbrand nach Feuerball	0.60	3.80×10^{-9}	0.0181	6.86×10^{-11}
Tagsüber mit Zug und mit Sportplatz (13-17 Uhr)	Fackelbrand nach Feuerball	0.67	3.80×10^{-9}	0.0072	2.74×10^{-11}
Abends (20-24 Uhr)	Fackelbrand nach Feuerball	0.51	3.80×10^{-9}	0.0036	1.37×10^{-11}

^{rr} Die Wahrscheinlichkeit eines Schadensszenarios berechnet sich durch die Multiplikation der Eintretenswahrscheinlichkeit (siehe Abschnitt C 3.2) mit der Aufenthaltswahrscheinlichkeit (siehe Abschnitte C 3.3 und C 3.5).

Zeitfenster	Brand-szenarium	Aus-mass am Punkt B	Eintretens-wahrschein-lichkeit des Brandszenarios [10 m·y] ⁻¹	Aufenthalts-wahrschein-lichkeit	Wahrscheinlichkeit Störfallwert pro Jahr ^{rr}
Belegungsszenarien ohne Zug					
Tagsüber ohne Zug ohne Sportplatz (6-13 Uhr und 17-20 Uhr)	Feuerball	0	3.80×10^{-9}	$0.4167 - 0.0398 - 0.0181 = 0.3588^{ss}$	1.36×10^{-10}
Tagsüber ohne Zug mit Sportplatz (13-17 Uhr)	Feuerball	0.55	3.80×10^{-9}	$0.1667 - 0.0159 - 0.0072 = 0.1435$	5.45×10^{-10}
Abends ohne Zug (20-24 Uhr)	Feuerball	0	3.80×10^{-9}	$0.1667 - 0.0080 - 0.0036 = 0.1551$	5.89×10^{-10}
Nachts (24-6 Uhr)	Feuerball	0	3.80×10^{-9}	0.25	9.50×10^{-10}

Tab. C 14 Berechnung der Wahrscheinlichkeit pro Jahr für das Brandszenarium Fackelbrand für den Beispielpunkt B

Zeitfenster	Brandszena-rium	Aus-mass am Punkt B	Eintretens-wahrschein-lichkeit des Brandszenarios [10 m·y] ⁻¹	Aufenthalts-wahrschein-lichkeit	Wahrscheinlichkeit Störfallwert pro Jahr ^{tt}
Belegungsszenarien mit Zug					
Tagsüber mit Zug ohne Sportplatz (6-13 Uhr und 17-20 Uhr)	Fackelbrand	0.60	2.85×10^{-9}	0.0361	1.03×10^{-10}
Tagsüber mit Zug und mit Sportplatz (13-17 Uhr)	Fackelbrand	0.67	2.85×10^{-9}	0.0145	$2.85E-09 \times 0.0145 = 4.12 \times 10^{-11}$
Abends (20-24 Uhr)	Fackelbrand	0.51	2.85×10^{-9}	0.0072	2.06×10^{-11}

^{ss} Die Wahrscheinlichkeit (Aufenthaltswahrscheinlichkeit) der Belegungsszenarien ohne Zug erhält man durch Subtraktion der Wahrscheinlichkeit der Belegungsszenarien mit Zug.

^{tt} Die Wahrscheinlichkeit eines Schadensszenarios berechnet sich durch die Multiplikation der Eintretenswahrscheinlichkeit (siehe Abschnitt C 3.2) mit der Aufenthaltswahrscheinlichkeit (siehe Abschnitte C 3.3 und C 3.5).

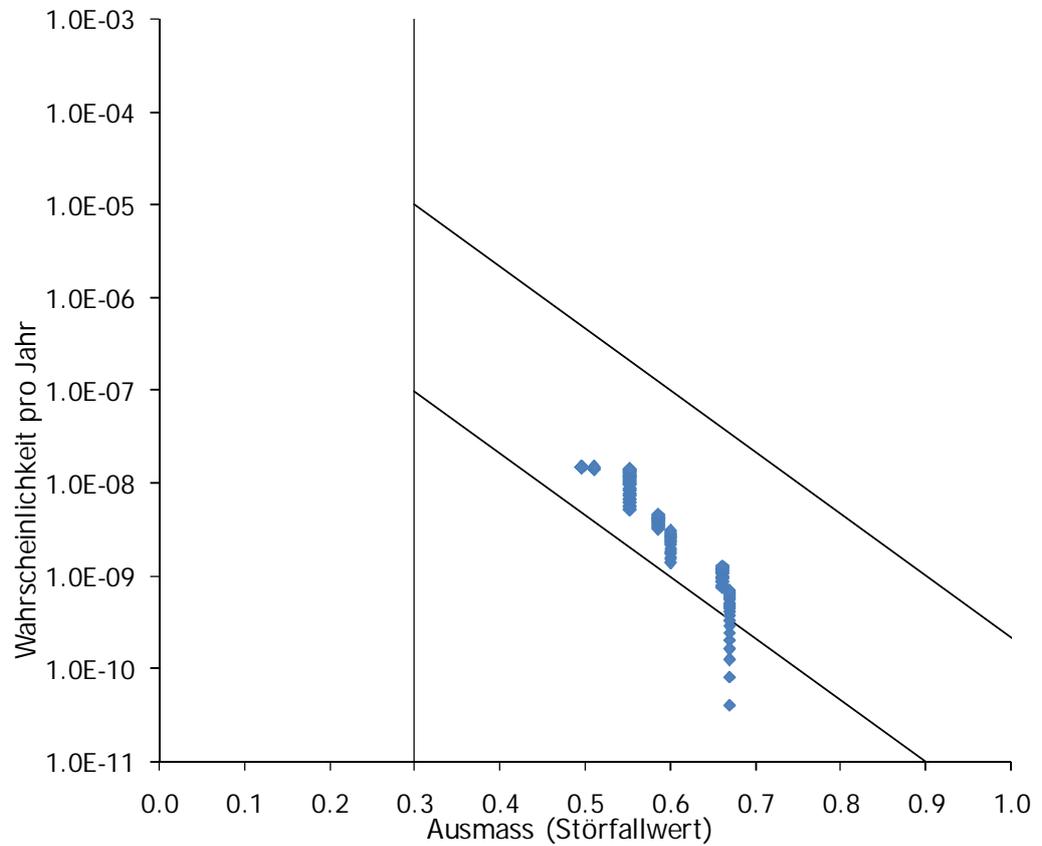
Zeitfenster	Brandszenarium	Ausmass am Punkt B	Eintretenswahrscheinlichkeit des Brandszenarios [10 m·y] ⁻¹	Aufenthaltswahrscheinlichkeit	Wahrscheinlichkeit Störfallwert pro Jahr ^{tt}
Belegungsszenarien ohne Zug					
Tagsüber ohne Zug ohne Sportplatz (6-13 Uhr und 17-20 Uhr)	Fackelbrand	0	2.85×10^{-9}	$0.4167 - 0.0361 = 0.3806$	1.08×10^{-9}
Tagsüber ohne Zug mit Sportplatz (13-17 Uhr)	Fackelbrand	0.55	2.85×10^{-9}	$0.1667 - 0.0145 = 0.1522$	4.34×10^{-10}
Abends ohne Zug (20-24 Uhr)	Fackelbrand	0	2.85×10^{-9}	$0.1667 - 0.0072 = 0.1595$	4.54×10^{-10}
Nachts (24-6 Uhr)	Fackelbrand	0	2.85×10^{-9}	0.25	7.13×10^{-10}

Beginnend mit dem höchsten Störfallwert werden die Wahrscheinlichkeiten kumuliert und im W-A-Diagramm dargestellt.

Tab. C 15 Störfallwerte mit kumulierter Wahrscheinlichkeit

Störfallwert	Wahrscheinlichkeit	Kumulierte Wahrscheinlichkeit
0.67	4.12×10^{-11}	4.12×10^{-11}
0.67	4.13×10^{-11}	8.25×10^{-11}
0.67	4.13×10^{-11}	1.24×10^{-10}
0.67	4.14×10^{-11}	1.65×10^{-10}
...
...
0.50	3.02×10^{-11}	1.50×10^{-8}
0.50	3.02×10^{-11}	1.50×10^{-8}

Abb. C 5 W-A-Diagramm für das Berechnungsbeispiel Zug
Leitung: 48"/70 bar, 20 mm Wandstärke, 2.5 m Überdeckung

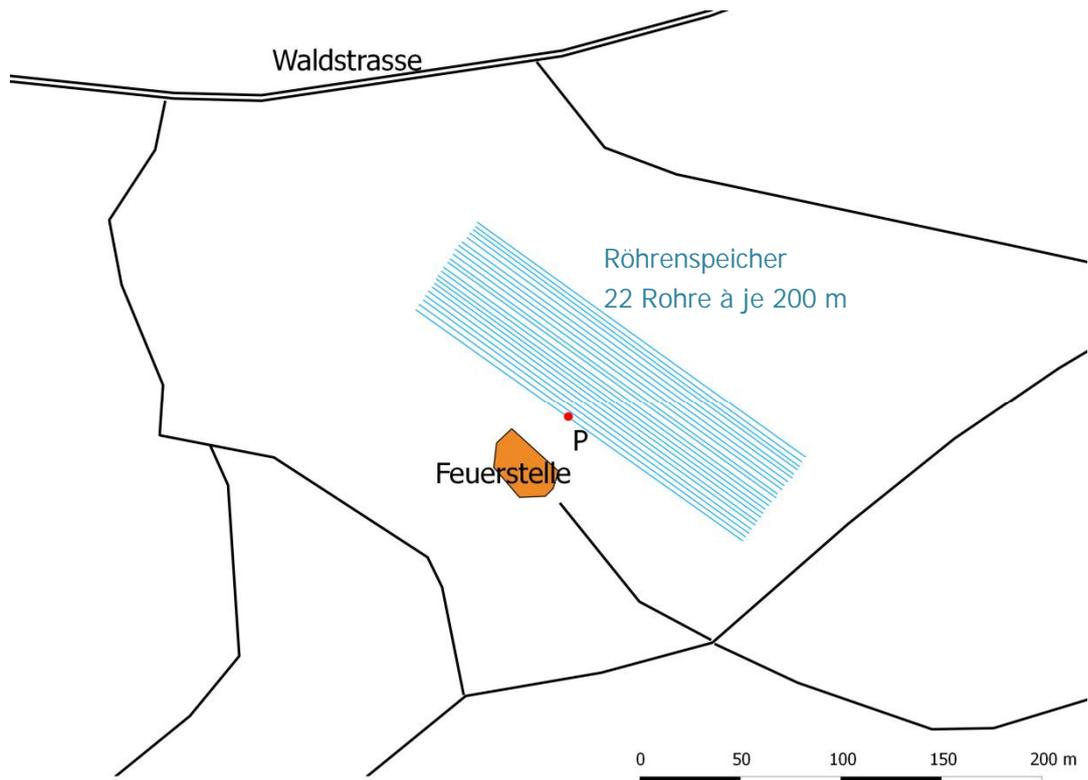


D Berechnungsbeispiel Röhrenspeicher

D 1. Situation

Im gewählten Berechnungsbeispiel wird folgende Situation angenommen:

Abb. D 1 Detailplan der Situation



Für den Röhrenspeicher mit den 22 Speicherrohren gelten folgende technischen Angaben:

Durchmesser	60"
Aussendurchmesser	1'524 mm
Rohrwandstärke	18.9 mm
Länge eines Speicherrohres	200 m
Rohrmaterial	StE 480.7
Max. zulässiger Bewilligungsdruck (MOP)	70 bar
Überdeckung	1 m
Konstruktionsjahr	2010

D 2. Belegungsannahmen

Im Einflussbereich des Röhrenspeichers befinden sich Personen in der Freizeit (Feuerstelle, Jogger, Spaziergänger, etc.).

Tab. D 1 Belegungsannahmen Freizeitnutzung

Objekt	Belegung	Dauer	Wahrscheinlichkeit
Waldstrasse	1 Person (wochentags) bzw. Gruppen à 2 Personen (Wochenende) pro 80 m	10 h pro Tag	0.30 (wochentags) bzw. 0.12 (Wochenende)
Übrige Waldwege	1 Person pro 320 m (wochentags) bzw. pro 180 m (Wochenende)	10 h pro Tag	0.30 (wochentags) bzw. 0.12 (Wochenende)
Feuerstelle	25 Personen am Wochenende	1 h pro Tag	0.012 (Wochenende)

D 2.1. Berechnung des Schadenausmasses

Die Gasmenge in einem 60"/70 bar Speicherrohrs à 200 m beträgt gemäss Berechnungsanleitung in Kapitel 9.3.2 etwa 20'000 kg.

$$M_g = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \pi \times L \times P \times 1 / K \times 0.726 = \left(\frac{1.486}{2}\right)^2 \times 3.14 \times 200 \times 70 \times 1 / 0.8478 \times 0.726 = 20'800$$

Wobei M_g freigesetzte Gasmenge [kg]

P Druck = 70 bar

D Innendurchmesser = 1.486 m

L Länge Speicherrohr = 200 m

K Kompressibilitätsfaktor = 0.8478

Aus dieser Gasmenge lassen sich die Letalitätsradien folgendermassen bestimmen:

Tab. D 2 Letalitätsradien (aus Tab. 22) und Letalitäten (aus Tab. 4) für Personen im Freien nach dem Totalversagen eines 60"/70 bar Speicherrohrs à 200 m (Gasmenge: ca. 20'000 kg)

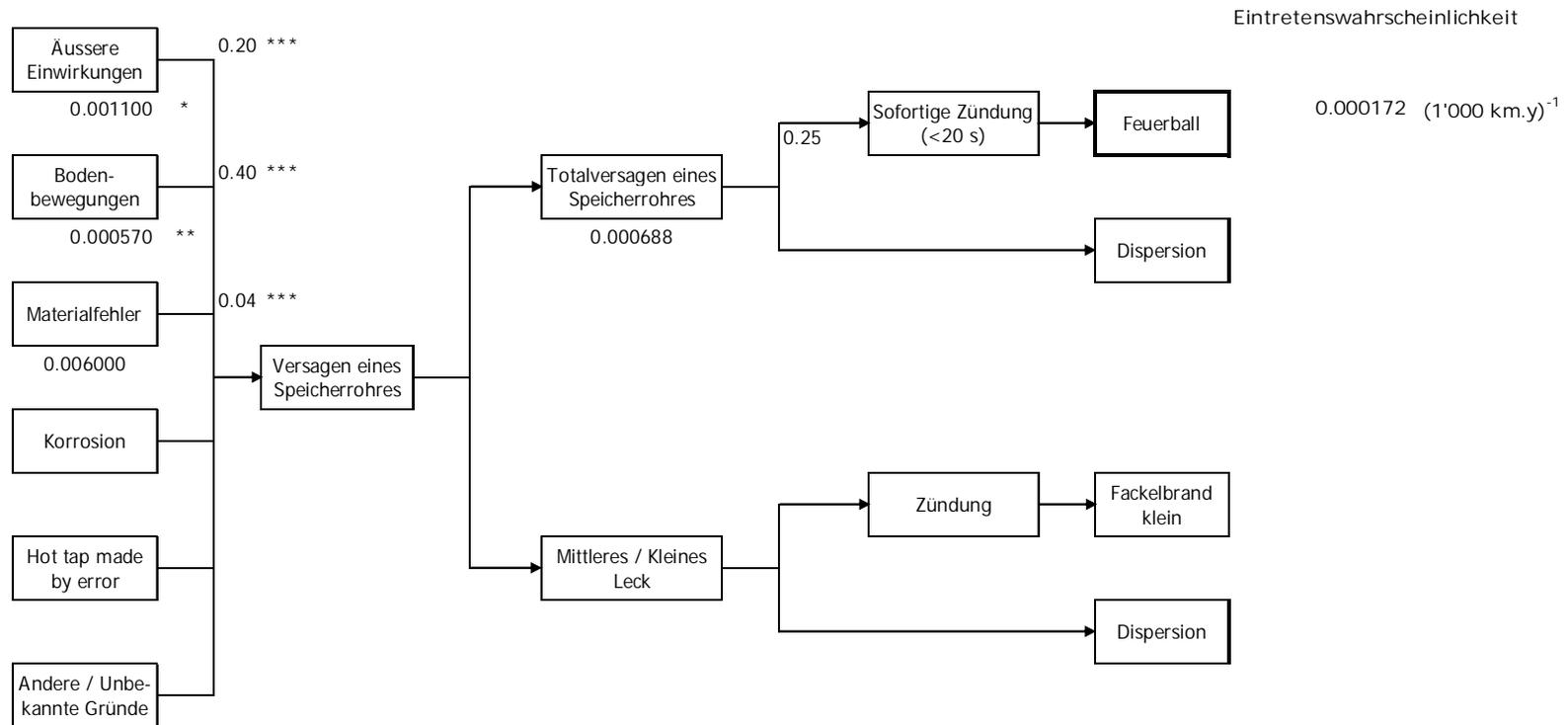
Feuerball	Exposition	$R_{0\text{ FE}}$	$R_{25\text{ FE}}$	$R_{50\text{ FE}}$	$R_{75\text{ FE}}$	$R_{100\text{ FE}}$	
Speicherrohr	10.3 s	170 m	125 m	105 m	90 m	70 m	
Letalität		ca. 10%		35%	60%	85%	100%

Tab. D 3 Berechnung des Störfallwerts für den Punkt P für das Szenarium "Wochenende Tag mit Feuerstelle" (Brandszenarium Feuerball). Die Letalitätsradien sind in Tab. D 2 zu finden.

	Anzahl anwesende Personen im Freien	Letalität im Freien	Anzahl Tote
Innerhalb R _{100 FE}	25 Personen	1.00	25
Zwischen R _{100 FE} und R _{75 FE}	0	0.85	0
Zwischen R _{75 FE} und R _{50 FE}	1	0.60	0.6
Zwischen R _{50 FE} und R _{25 FE}	0	0.35	0
Zwischen R _{25 FE} und R _{0 FE}	5	0.10	0.5
<i>Total Tote im Freien</i>			26.1

D 2.2. Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten

Abb. D 2 Fehler- und Ereignisbaum gemäss Abb. 15 für ein Speicherrohr des Röhrenspeichers



* Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen:
 Versagensrate bei 18.9 mm (v) 0.001
 Korrekturfaktor für Überdeckung (k(Ü)) 1.1
 Korrekturfaktor für Designfaktor (k(DF)) 1
 Total Versagensrate ä.E. (V): $V = v * k(Ü) * k(DF)$
 (Kap. 9.2.2 und 9.3.3)

*** Anteil Totalversagen
 (Kap. 9.3.3)

** Versagensrate aufgrund Bodenbewegungen:
 Versagensrate bei 60" 0.003
 Reduktion für CH -6 %
 Reduktion für Standort ohne Hang -50 %
 Reduktion für Standort ohne Gewässer -25 %
 Total Versagensrate Bodenbewegungen 19 %
 (Kap. 9.3.3)

Herleitung Korrekturfaktor

Die Versagensrate durch äussere Einwirkungen ist mit folgenden Korrekturfaktoren zu korrigieren:

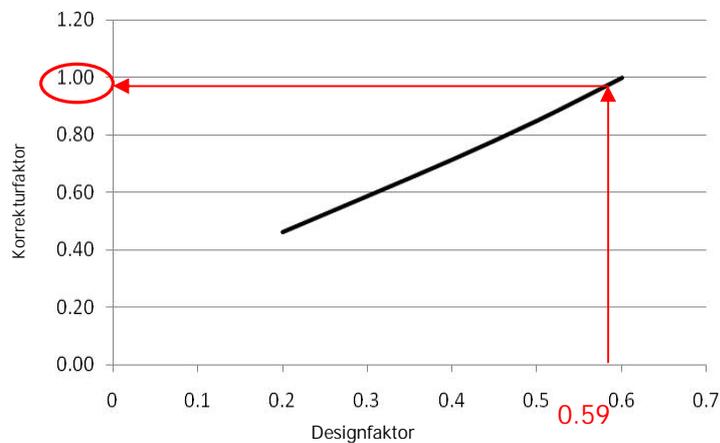
1. Korrekturfaktor Designfaktor (K_{DF})

Für das Berechnungsbeispiel lässt sich der Designfaktor folgendermassen (Formel in Begriffsdefinitionen) berechnen:

$$f_0 = DF = \frac{P_d \times D_a}{20 \times R_{t0,5} \times s} = \frac{70 \times 1524}{20 \times 480 \times 18.9} = 0.59$$

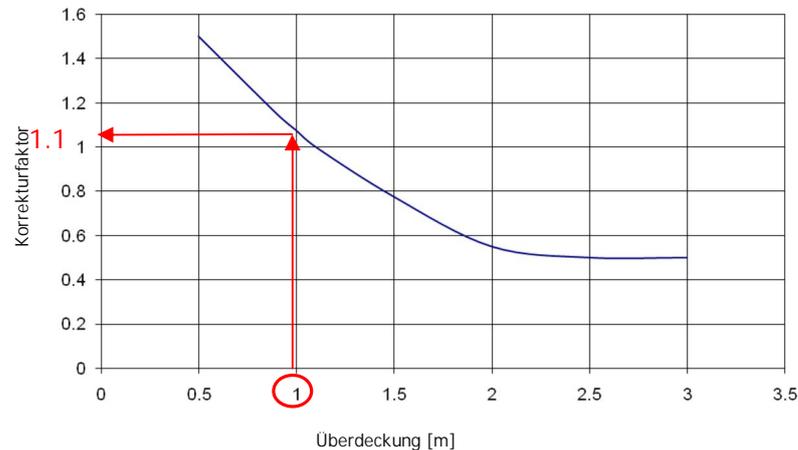
wobei	s	=	Mindest-Wanddicke	[mm]
	P_d	=	Auslegungsdruck	[bar]
	D_a	=	Rohraussendurchmesser	[mm]
	F_0	=	Nutzungsgrad (=Designfaktor, DF)	[----]
	$R_{t0,5}$	=	Streckgrenze (Mindestwert)	[N/mm ²]

Aus der folgenden Grafik kann der Reduktionsfaktor des Designfaktors 0.59 auf die Versagensrate aufgrund äusserer Einwirkungen abgelesen werden: $K_{DF} = 1$.



2. Korrekturfaktor Überdeckung ($K_{\text{Ü}}$)

Im Beispiel beträgt die Überdeckung 1 m. Gemäss nachfolgender Abbildung beträgt der Korrekturfaktor bei 1 m Überdeckung 1.1.



3. Korrekturfaktor Schutzplatten ($K_{\text{S-W}}$) = 1 (keine Schutzplatten vorhanden)

4. Korrekturfaktor Trasseekontrollen (K_{T}) = 1 (zweiwöchentliche Kontrolle)

Der Korrekturfaktor K_{total} wird mittels folgender Formel berechnet und beträgt im vorliegenden Fall:

$$K_{\text{Total}} = K_{\text{DF}} \times K_{\text{Ü}} \times K_{\text{S-W}} \times K_{\text{T}} = 1 \times 1.1 \times 1 \times 1 = 1.1$$

Die Totalversagensrate (Versagensrate x Korrekturfaktor x Anteil Totalversagen) kann aus den gemachten Angaben berechnet werden:

	Versagensrate ¹⁾ [1'000 km·y] ⁻¹	Korrektur- faktor	Anteil Total- versagen	Totalversagen [1'000 km·y] ⁻¹
Äussere Einwirkungen	0.001 ^{uu}	1.1 ^{vv}	0.2 ^{xx}	0.0002
Bodenbewegungen	0.003 ^{ww}	0.19 ^{xx}	0.4 ^{xx}	0.0003
Materialfehler	0.006 ^{yy}	--	0.04 ^{xx}	0.0002
Total				0.0007

^{uu} Gemäss Tab. 17 (äussere Einwirkungen), für Wandstärke 18.9 mm

^{vv} Siehe Herleitung Korrekturfaktor

^{ww} Gemäss Tab. 19 (Bodenbewegungen), für Durchmesser 60"

^{xx} Siehe Kapitel 9.3.3

^{yy} Gemäss Tab. 20 (Materialfehler), für Konstruktionsjahr 2003

D 2.3. Berechnung der Summenkurve und Darstellung des Risikos

Im Folgenden wird die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten der verschiedenen Schadensszenarien pro 10 m Abschnitt und Jahr für den Punkt P gezeigt:

Zeitfenster (Belegungs-szenario)	Brand-szenarium	Stör-fallwert am Punkt P	Eintretenswahrscheinlichkeit [10 m·y] ⁻¹	Wahrscheinlichkeit Belegungs-szenario ^{zz}	Wahrscheinlichkeit pro Jahr ^{aaa}
Werktag Tag	Feuerball	0.02	1.72×10^{-9}	0.30	5.16×10^{-10}
Wochenende Tag ohne Feuerstelle	Feuerball	0.02	1.72×10^{-9}	0.108	1.86×10^{-10}
Wochenende Tag mit Feuerstelle	Feuerball	0.43	1.72×10^{-9}	0.012	2.06×10^{-11}

Gemäss Kap. 9.3.4 wird die Summenkurve für den ganzen Röhrenspeicher als funktionale technische Einheit berechnet. D.h. für alle 22 Speicherrohre à je 200 m wird alle 10 m ein Totalversagen angenommen (440 Punkte). Beginnend mit dem höchsten Störfallwert werden die Wahrscheinlichkeiten kumuliert und im W-A-Diagramm dargestellt:

Tab. D 4 Störfallwerte mit kumulierter Wahrscheinlichkeit

Störfallwert	Wahrscheinlichkeit	Kumulierte Wahrscheinlichkeit
0.43	2.06×10^{-11}	2.06×10^{-11}
0.43	2.06×10^{-11}	4.12×10^{-11}
0.43	2.06×10^{-11}	6.18×10^{-11}
...
...

^{zz} Anteil des Zeitfensters (Belegungsszenario) an der Gesamtzeit

^{aaa} Die Wahrscheinlichkeit eines Schadensszenarios berechnet sich durch die Multiplikation der Eintretenswahrscheinlichkeit (siehe vorheriger Abschnitt) mit der Wahrscheinlichkeit des Belegungsszenarios (siehe Belegungsannahmen).

Abb. D 3 W-A-Diagramm des Berechnungsbeispiels Röhrenspeicher,
Angaben Leitung: 60"/70 bar, Länge Speicherrohre 200 m, 18.9 mm Wandstärke, 1 m
Überdeckung

