

**CARBURA**

**Schweizerische Zentralstelle für die  
Einfuhr flüssiger Treib- und Brennstoffe**

in Zusammenarbeit mit dem BUWAL  
Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft

Rahmenbericht über die  
**Sicherheit von Stehtankanlagen**  
für flüssige Treib- und Brennstoffe



Revidierte Ausgabe 2005

SKS Ingenieure AG  
CH-8057 Zürich

## Vorwort

Stehtankanlagen für flüssige Treib- und Brennstoffe bieten die Möglichkeit, grosse Mengen an flüssigen Treib- und Brennstoffen zu lagern und sind deshalb ein wichtiges Standbein für die sichere Energieversorgung der Schweiz. Infolge dieser Lagermengen stellen diese Anlagen ein erhebliches Gefahrenpotential dar und unterliegen deshalb der Störfallverordnung (StFV). Die Betreiber von Stehtankanlagen sind verpflichtet, alle geeigneten Sicherheitsmassnahmen zu treffen, die zur Verminderung der mit der Anlage verbundenen Risiken erforderlich sind. Die Vollzugsbehörden der StFV haben im Rahmen eines Kontroll- und Beurteilungsverfahrens zu überprüfen, ob die Betreiber dieser Pflicht nachkommen.

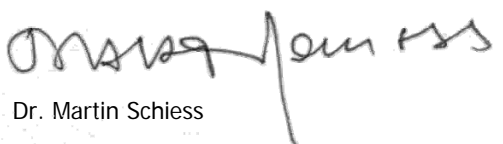
Sowohl die Betreiber wie auch die Vollzugsbehörden der StFV und das BUWAL als Aufsichtsbehörde über den Vollzug der StFV sind sich der Bedeutung ihrer Aufgaben bewusst. Gemeinsam haben sie den vorliegenden Rahmenbericht erarbeitet. Dieser hilft beim Bestimmen der erforderlichen Sicherheitsmassnahmen sowie beim Erstellen und Beurteilen des Kurzberichts, der von den Betreibern zur Einleitung des Kontroll- und Beurteilungsverfahrens an die Vollzugsstelle einzureichen ist.

Die revidierte Ausgabe 2005 basiert auf dem ersten Rahmenbericht vom Oktober 1992 und auf dem überarbeiteten, in der Praxis erprobten Konsultationsentwurf von 1999. Sie berücksichtigt das aktuell in der Fachwelt vorhandene Wissen sowie die im Vollzug der StFV bei diesen Anlagen gemachten Erfahrungen und wurde zudem, profitierend von den in der Schweiz in den letzten Jahren gemachten Fortschritten im Bereich der Erdbebenforschung, durch einen Anhang mit Hinweisen für die Beurteilung von Stehtankanlagen im Hinblick auf Erdbeben ergänzt. Das BUWAL ist der Meinung, dass damit ein geeignetes Hilfsmittel für einen einheitlichen Vollzug der StFV bei den in der ganzen Schweiz vorhandenen Stehtankanlagen vorliegt. Die revidierte Ausgabe 2005 ist unter dem Vorsitz des BUWAL von einer Arbeitsgruppe mit Vertretern der kantonalen Vollzugsbehörden und der Branche ausgearbeitet worden. Die Kosten für diese Arbeiten hat – abgesehen von einzelnen, im Auftrag des BUWAL vorgenommenen, fachtechnischen Abklärungen – die CARBURA übernommen.

Der Vollzug der Störfallverordnung ist eine Daueraufgabe, weil die technologische Entwicklung auch im Bereich der Stehtankanlagen nicht Halt macht. Die vorliegende, revidierte Ausgabe des Rahmenberichts soll dazu dienen, im Konsens aller Beteiligten die Sicherheit dieser Anlagen weiter zu verbessern. Wir danken allen, die in unterschiedlicher Art und Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

November 2005

Bundesamt für Umwelt, Wald und  
Landschaft (BUWAL)  
Abteilung Luft, NIS, Sicherheit



Dr. Martin Schiess

## Impressum

An diesem Bericht haben die folgenden Mitglieder der Arbeitsgruppe "Revision Rahmenbericht über die Sicherheit von Stehtankanlagen für flüssige Treib- und Brennstoffe" mitgewirkt:

Dr. M. Schiess (Vorsitz)	BUWAL, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Sektion Sicherheitstechnik, Bern (neu BAFU)
R. Mürner	armasuisse, Bern (vorm. BABHE Bundesamt für Betriebe des Heeres, Sektion Brennstoffe)
Dr. F. Berdat	KIGA, Kantonales Amt für Industrie, Gewerbe und Arbeit, Abteilung Umweltschutz, Bern
R. Braun	KCB, Kontrollstelle für Chemie- und Biosicherheit, Basel-Stadt (vorm. KCGU)
Dr. P. Buss	AFU, Amt für Umweltschutz des Kantons Luzern, Luzern
Dr. R. Dumont	Kant. Laboratorium Aargau, Sektion Chemiesicherheit und Stoffe, Aarau
G. Fiolka	AFU, Amt für Umweltschutz des Kt. St. Gallen, Abt. Stoffe und Abfälle, St. Gallen
Madame Y. Frésard	SEVEN, Service de l'environnement et de l'énergie, Epalinges (VD)
J. Rickenbacher	SIT, Sicherheitsinspektorat des Kantons Basel-Landschaft, Liestal
Dr. G. Ruchti	Dipartimento del Territorio, Divisione dell'ambiente SPAA, Bellinzona
Dr. A. Stämpfli	AFU, Amt für Umweltschutz des Kantons St. Gallen, St. Gallen
Dr. A. Susini	OCIRT, Office cantonal de l'inspection et des relations du travail, Genève
E. Hofmann	Shell Switzerland, Baar (ZG)
M. Rahn	CARBURA, Schweizerische Zentralstelle für die Einfuhr flüssiger Treib- und Brennstoffe, Zürich

### Berichtverfasser:

Frau M. Bernauer	SKS Ingenieure, Zürich
Dr. M. Montanarini	SKS Ingenieure, Zürich
P. Gassner	SKS Ingenieure, Zürich
L. Audergon	SKS Ingenieure, Zürich
R. Sägesser	SKS Ingenieure, Zürich

### Zeitweise mitgearbeitet haben:

A. Burri	BABHE, Bundesamt für Betriebe des Heeres, Sektion Betriebsstoffe, Bern
Dr. U. Brühlmann	KSF, Koordinationsstelle für Störfallvorsorge, Zürich
R. Rettenhaber	CARBURA, Schweizerische Zentralstelle für die Einfuhr flüssiger Treib- und Brennstoffe, Zürich

### Bereich Erdbeben:

Dr. M. Koller	Résonance SA, Genf
Dr. T. Wenk	Wenk Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik GmbH, Zürich
P. Zwicky	Basler & Hofmann AG, Zürich

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangslage und Ziel der Revision	1
1.1.1	Erster Rahmenbericht (Ausgabe 1992)	1
1.1.2	Revidierter Rahmenbericht (Konsultationsexemplar 1999)	1
1.1.3	Bereinigte Version (Ausgabe 2005)	1
1.2	Inhalt des Rahmenberichts	1
1.3	Zum Gebrauch des Rahmenberichts	2
2	Grundlagen	3
2.1	Bedeutung der Grundlagen für die Ausmasseseinschätzung	3
2.2	Mögliche Störfallursachen und -auswirkungen	3
2.3	Stoffgrundlagen	6
2.3.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften von Treib- und Brennstoffen	6
2.3.2	Ökotoxikologische Eigenschaften von Treib- und Brennstoffen	8
2.3.3	Eigenschaften von Löschmitteln	9
2.3.4	Folgerungen für die Ausmasseseinschätzung	9
2.4	Beurteilungskriterien	10
3	Szenarienbeschreibung	12
3.1	Voraussetzungen für die Gültigkeit der Szenarien	12
3.2	Szenarienbaum	13
3.3	Massgebende Ereignisse	13
3.3.1	Grundlagen	13
3.3.2	Hauptszenarium "Brand"	14
3.3.3	Hauptszenarium "Auslaufen"	14
3.3.4	Hauptszenarium "Explosion"	14
3.4	Spezialfälle	16
3.4.1	Gaswolkenexplosion (Nr. 12)	16
3.4.2	Boil Over (Nr. 16)	16
3.5	Weitere Szenarien	17
3.5.1	Tankexplosion (Nr. 2)	17
3.5.2	Tankbrand (Nr. 4)	18
3.5.3	Tank- und Bassinbrand (Nr. 14)	18
3.5.4	Versickern im Untergrund (Nr. 26)	18
4	Schadenausmass beim Szenarium "Bassinbrand"	19
4.1	Massgebendes Ereignis	19
4.2	Berechnung der Hitzestrahlung	19
4.3	Abschätzung der Auswirkungen	19
5	Schadenausmass beim Szenarium "Auslaufen"	22
5.1	Massgebende Ereignisse	22
5.1.1	Voraussetzungen	22
5.1.2	Abfliessen in die Kanalisation (Nr. 21)	22
5.1.3	Oberflächliches Abfliessen (Nr. 22)	22
5.2	Abschätzung der Auslaufmengen	22
5.2.1	Vorgehen	22

5.2.2	Abfliessen in die Kanalisation (Nr. 21)	23
5.2.3	Oberflächliches Abfliessen (Nr. 22)	24
5.3	Abschätzung der Auswirkungen	25
6	Schadenausmass beim Szenarium "Explosion"	27
6.1	Massgebendes Ereignis	27
6.2	Berechnung der Druckwelle	27
6.3	Abschätzung der Auswirkungen	27
7	Spezialfälle	30
7.1	Gaswolkenexplosion	30
7.1.1	Randbedingungen	30
7.1.2	Massgebende Ereignisse	30
7.1.3	Abschätzung der Auswirkungen (Hitzeabstrahlung, Druckwelle)	30
7.2	Boil Over	32
7.2.1	Randbedingung	32
7.2.2	Abschätzung der Auswirkungen	32
7.2.3	Bestimmung von Evakuationsradien	32
7.3	Sachschäden (Indikator $n_6$ )	33
7.3.1	Randbedingung	33
7.3.2	Abschätzung der Auswirkungen	33
8	Berechnung des Störfallwertes	34

## Verzeichnis der Tabellen

Tab. 2.1	Ursachen von weltweit aufgetretenen Störfällen in Stehtankanlagen	4
Tab. 2.2	Übersicht über wichtige physikalisch-chemische Eigenschaften	7
Tab. 2.3	Toxizitätswerte für die betrachteten Mineralölprodukte	9
Tab. 2.4	Ausmass für eine schwere Schädigung gemäss BUWAL-Richtlinie	10
Tab. 6.1	Kriterien für die Abschätzung der Auswirkungen einer Druckwelle auf Menschen	28
Tab. 7.1	Kriterien für die Abschätzung der Auswirkungen einer Druckwelle auf Infrastrukturen	33

## Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1.1	Aufbau des Rahmenberichts	2
Abb. 3.1	Grundvoraussetzungen für die Richtigkeit der massgebenden Szenarien	13
Abb. 3.2	Szenarienbaum Stehtankanlagen	15
Abb. 4.1	Letalitätsradien $R_1$ , $R_{50}$ und Schmerzgrenze $R_S$ ab Bassinrand in Abhängigkeit von der betrachteten Bassinfläche	20
Abb. 6.1	Diagramm zur Bestimmung der Wirkungsdistanzen für eine Explosion in der Kanalisation	28
Abb. 7.1	Bildung einer Gaswolke durch Verdampfung aus einem Bassin der Länge L und Ausbreitung der zündfähigen Gaswolke bis in Entfernung R vom Beckenrand	31
Abb. 7.2	Darstellung der Wolkenbreite B und der maximalen Entfernungen des Wolkenrandes vom Bassinrand R sowie der Druckbereiche E (0.21 bar) und D (0.17 bar)	31
Abb. 8.1	Skala für die Umrechnung der Auswirkungen eines Störfalls in den Störfallwert gemäss BUWAL-Richtlinie	34

## Anhang

Anhang 1	Literaturverzeichnis
Anhang 2	Glossar der wichtigsten Begriffe
Anhang 3	Schadenausmass für Störfallwert 0.3 gemäss BUWAL-Richtlinie
Anhang 4	Beurteilung von Stehtankanlagen im Hinblick auf Erdbeben
Anhang 5	Zusammenstellung der allgemeinen Sicherheitsmassnahmen, Formular zum Vollzug von Art. 3 StFV (Kurzbericht Teil 1)
Anhang 6	Formular zur Ausmasseseinschätzung (Kurzbericht Teil 2)

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangslage und Ziel der Revision

### 1.1.1 Erster Rahmenbericht (Ausgabe 1992)

Im Jahre 1991 trat die Störfallverordnung (StFV) in Kraft, die "den Schutz der Bevölkerung und der Umwelt vor schweren Schädigungen durch Störfälle" bezweckt. Da Stehtankanlagen durch die grossen Lagermengen an wassergefährdenden und brennbaren Stoffen die Mengenschwellen gemäss StFV [12] überschreiten, gehören sie zu den Betrieben, die einen Kurzbericht erstellen müssen.

Um einen einheitlichen Vollzug der StFV in den verschiedenen Kantonen zu fördern, wurde auf Initiative der Branche, vertreten durch die CARBURA, und in Zusammenarbeit mit den Behörden in den Jahren 1990-1992 ein sogenannter "Rahmenbericht zur Sicherheit von Stehtankanlagen" erarbeitet und herausgegeben [8]. Dieser stellte den damaligen Stand des Wissens dar und konnte mit der ausführlichen Darstellung des Szenariums Brand und einem Kurzberichtsformular einen wichtigen Beitrag zur einheitlichen Beurteilung einer Anlage leisten. Zu anderen Themen (z.B. Szenarium Auslaufen) enthielt er jedoch lediglich erste Ansätze einer generalisierten Beurteilung.

### 1.1.2 Revidierter Rahmenbericht (Konsultationsexemplar 1999)

Verschiedene Unklarheiten in der Beurteilung der Kurzberichte und damit beim Vollzug der StFV sowie Neuerungen bei den Beurteilungskriterien, die später in der BUWAL-Richtlinie vom September 1996 [1] definitiv festgelegt wurden, führten zur Entscheidung, den bestehenden Rahmenbericht zu überarbeiten. Im Jahre 1995 wurde deshalb beschlossen, in einer Arbeitsgruppe unter der Leitung des BUWAL verbesserte Grundlagen zu erarbeiten.

Für die Revision des Berichtes lag das Schwergewicht auf der Festlegung und Beschreibung der massgebenden Szenarien und ihrer Auswirkungen sowie, als neuer Aspekt, in der Zusammenstellung der für die Störfallvorsorge erforderlichen Sicherheitsmassnahmen gemäss Art. 3 der StFV.

### 1.1.3 Bereinigte Version (Ausgabe 2005)

In der Konsultationsphase wurde die revidierte Ausgabe 1999 für mehrere Anlagen in verschiedenen Kantonen benutzt. Das Formular und der begleitende Bericht wurden von den Anlagebetreibern und Behörden grundsätzlich als tauglich befunden. In den letzten Jahren haben die weltweit bei Erdbeben erhobenen Daten im Rahmen des internationalen Erdbebeningenieurwesens wesentlich an Umfang und Aussagekraft zugenommen. Gleichzeitig hat in der Schweiz die Erdbebenforschung vor allem im Zusammenhang mit einer besseren Kenntnis der lokalen Wirkung (Zonierung) Fortschritte gemacht. Das BUWAL und die CARBURA haben dies zum Anlass genommen, eine Systemanalyse zum Verhalten von Tankanlagen unter Erdbeben durchzuführen zu lassen und daraus Hinweise für die Beurteilung von Stehtankanlagen im Hinblick auf Erdbeben abzuleiten. Diese Hinweise sind diesem Bericht angehängt (Anhang 4).

## 1.2 Inhalt des Rahmenberichts

Der vorliegende Bericht beinhaltet im Hauptteil die "Anleitung zur Einschätzung des Schadenausmasses bei Störfällen in Stehtankanlagen" (Ausmasseseinschätzung) mit den relevanten Grundlagen zu den Stoffen und den massgebenden Störfallszenarien Brand, Auslaufen und Explosionen. Basis für die Gültigkeit dieser massgebenden Störfallszenarien und damit auch für die Ausmasseseinschätzung bildet die Einhaltung der allgemeinen Sicherheitsmassnahmen (siehe dazu Kap. 3.1 und die "Zusammenstellung der allgemeinen Sicherheitsmassnahmen" im Anhang 5 dieses Berichtes<sup>A</sup>). Im Anhang 6 findet sich zudem das Formular zur Ausmasseseinschätzung, mit dem die Abklärungen für eine bestimmte Anlage durchgeführt und dokumentiert werden können.

Der Bericht ist so aufgebaut, dass die einzelnen Kapitel als Module für die Berechnung der verschiedenen Szenarien verwendet werden können (vgl. Abb. 1.1). In den Anhängen 1 und 2 finden sich ein Literaturverzeichnis sowie ein Glossar der wichtigsten Begriffe,

<sup>A</sup> Ausgangslage für diese Zusammenstellung waren die CARBURA-Richtlinien [4], die durch zusätzliche Sicherheitsmassnahmen ergänzt wurden.

und im Anhang 4, wie bereits gesagt, Hinweise für die Beurteilung von Stehtankanlagen im Hinblick auf Erdbeben.

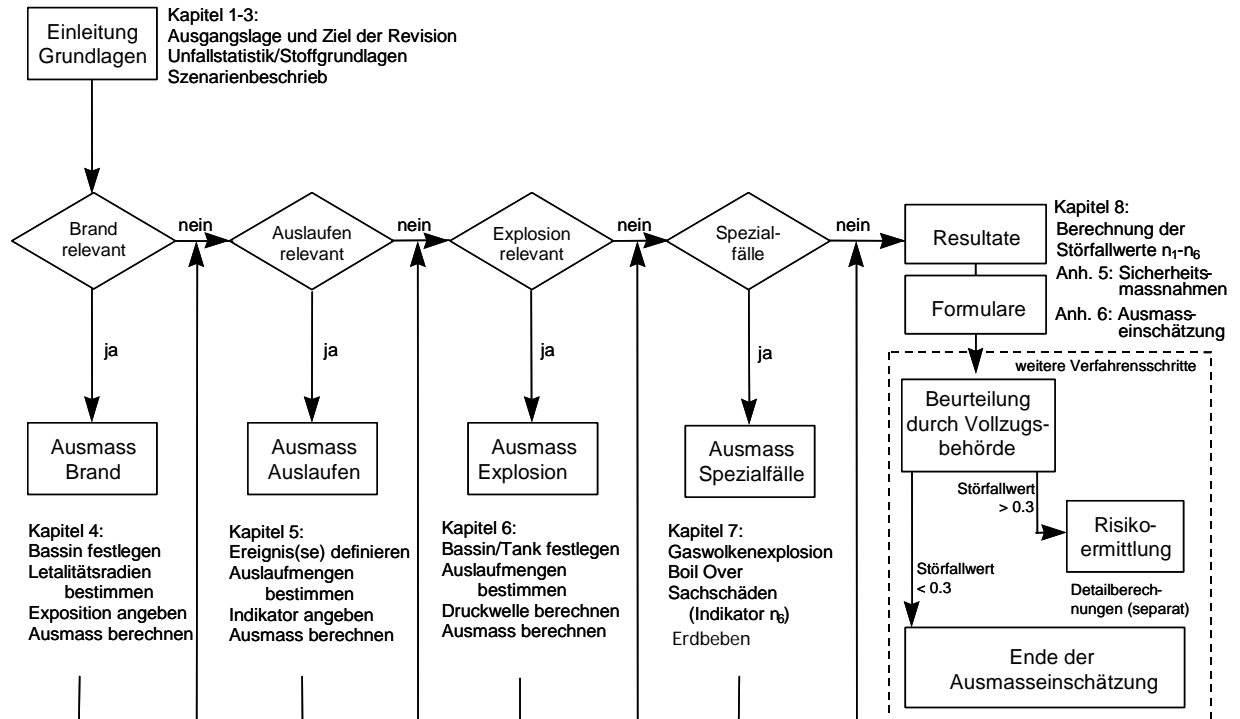


Abb. 1.1: Aufbau des Rahmenberichts

### 1.3 Zum Gebrauch des Rahmenberichts

Der vorliegende Bericht dient dem Betreiber dazu, die vorhandenen Sicherheitsmassnahmen auf Vollständigkeit zu prüfen, die massgebenden Störfallszenarien seiner Anlage festzulegen und deren Ausmass abzuschätzen. Er ist so ausgelegt, dass der Betreiber die notwendigen Grundlagen zusammenstellen und die Abschätzungen selbst vornehmen kann. Anschliessend sollen die getroffenen Annahmen und die erhaltenen Resultate mit der Vollzugsstelle diskutiert und festgelegt werden. Zu diesem Zweck wird eine gemeinsame Begehung der Anlage empfohlen.

Zur Vereinfachung der Dokumentation der Resultate wurden zwei separate Formulare erarbeitet, die dem Betreiber helfen, die notwendigen Unterlagen rasch zusammenzustellen und die Abschätzungen einfach durchzuführen. Sie ersetzen das bereits bestehende

Kurzberichtsformular von 1992 (Details vgl. Formular zur Ausmasseseinschätzung im Anhang 6).

Betreiber von Anlagen, welche aufgrund des Kurzberichts von 1992 nicht definitiv beurteilt werden konnten, haben mit dem neu vorliegenden Rahmenbericht Gelegenheit, die erstellten Kurzberichte zu ergänzen bzw. zu ersetzen, so dass eine definitive Beurteilung möglich wird.

Bei Anlagen, die gemäss Kurzbericht von 1992 zu keinen Beanstandungen Anlass gaben, ist die Überarbeitung des Kurzberichts nicht notwendig. Sie kann aber für den Betreiber wertvolle Hinweise zum sicherheitstechnischen Zustand seiner Anlage liefern.

Auf jeden Fall ist aber im Anhang 5 das Kapitel 7 "Erdbebensicherheit" des Kurzberichts auszufüllen und der Vollzugsstelle zur Beurteilung einzureichen.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Bedeutung der Grundlagen für die Ausmasseinschätzung

Bei der Beurteilung einer Tankanlage mit einem Kurzbericht nach StfV werden üblicherweise Störfall-szenarien zugrunde gelegt, bei denen das grösste Schadenausmass sehr rasch entsteht und es werden dementsprechend keine aktiven, die Einwirkungen begrenzenden Massnahmen berücksichtigt.

Im Gegensatz zu anderen störfallrelevanten Anlagen erhält der Faktor Zeit bei Störfällen in Tankanlagen wegen der Trägheit der Abläufe eine spezielle Bedeutung. Auch aus den vorhandenen Unfallstatistiken (Kap. 2.2) kann gefolgert werden, dass für die Ausmasseinschätzung bei Anlagen mit mehreren Tanks keine Potentialbetrachtungen mit der gesamten Lagermenge notwendig sind. Tatsächlich wird das maximale Schadenausmass nur durch einen Teil der Lagermenge bestimmt. Bei der Festlegung der massgebenden Szenarien können deshalb die folgenden Grundannahmen formuliert werden:

- 1) Mit dem Versagen **eines** Tanks soll gerechnet werden; einzig im Falle von Erdbeben können mehrere baugleiche Tanks beschädigt werden.
- 2) Das (gleichzeitige) **Versagen** eines Bassins wird ausgeschlossen. Für die Begründung im Fall von Erdbeben wird auf den Anhang 4 verwiesen.

Voraussetzung für diese Annahmen sind die elementaren Sicherheitsmassnahmen nach Art. 3 StfV. Sie sind im Anhang 5 "Zusammenstellung der allgemeinen Sicherheitsmassnahmen" nach den Themen Brandschutz, Alarmorganisation und Einsatzplanung, weitere Sicherheitsmassnahmen, Koordination mit anderen Bereichen und dem Spezialthema Bassinkonstruktion zusammengefasst.

Sind deshalb auf einer bestimmten Anlage die Sicherheitsmassnahmen gemäss Anhang 5 erfüllt, dann kann die vorliegende Anleitung mit den hier beschriebenen massgebenden Ereignissen auf dieser Anlage angewendet werden. Sind einzelne Massnahmen nicht oder ungenügend vorhanden, so ist zuerst dieser Mangel zu beheben oder die Ausmasseinschätzung muss mit zusätzlichen Szenarien, die je nach Situation noch definiert werden müssten, ergänzt werden.

Nachfolgend werden die oben formulierten Annahmen aus der Sicht der Unfallstatistik (Kap. 2.2), der Stoffgrundlagen (Kap. 2.3) sowie der Beurteilungskriterien (Kap. 2.4) detaillierter beschrieben. Anschliessend erfolgt die Beschreibung der massgebenden Szenarien (Kap. 3), bevor im Detail auf die Abschätzung der Auswirkungen der einzelnen Szenarien und deren Beurteilung eingegangen wird (Kap. 4).

### 2.2 Mögliche Störfallursachen und -auswirkungen

Stehtanks gehören zu denjenigen technischen Anlagen, die seit Jahrzehnten in grosser Zahl in Gebrauch sind. Auch wenn sie sich auf mannigfaltigste Art in der Grösse und im konstruktiven Detail voneinander unterscheiden, handelt es sich dabei immer um eine grundsätzlich einfache Konstruktion zur Lagerung von flüssigen Treib- und Brennstoffen. Weltweit wird die Zahl grösserer Stehtanks auf rund 1 Million geschätzt (ohne Lagerdepots in den Produktionsstandorten), die im Schnitt mehrere Betriebsjahre aufweisen.

Dementsprechend gehören die Unfälle von Stehtanks bzw. Stehtankanlagen zu den bestdokumentierten, auch wenn keine lückenlose Statistik existiert. Mit diesen Daten lassen sich mögliche Störfallszenarien recht klar definieren. Sie müssen somit nicht hypothetisch festgelegt werden wie bei sehr seltenen Ereignissen (z.B. für grosse Staumauern oder Kernkraftwerke).

Ein Störfall in einem Tanklager kann verschiedene Ursachen haben. Diese lassen sich wie folgt gruppieren:

- Äussere Einwirkungen und Umwelteinflüsse (z.B. Erdbeben, Bodensenkung/Erosion, Erd-rutsch, Blitzschlag, Flugzeugabsturz)
- Menschliches Versagen (z.B. Revisionsarbeit, Fahrlässigkeit im Betrieb, Fahrlässigkeit beim Unterhalt, Sabotage von aussen oder innerhalb der Anlage)
- Technisches Versagen (z.B. Korrosion, Konstruktionsfehler, mangelhafte hydrostatische Festigkeit)

Eine Übersicht über die Häufigkeit der verschiedenen Störfallursachen in Stehtankanlagen ist in Tab. 2.1 dargestellt [11].

Tab. 2.1: Ursachen von weltweit aufgetretenen Störfällen in Stehtankanlagen  
(128 Störfälle von insgesamt 138 ausgewerteten Ereignissen 1975-1988 [11])

Ursachen	Anzahl Ereignisse				
	Benzin	Kerosin	Dieselöl	Heizöl	Total Fälle
Menschliches Versagen	26 (3*)	4	12 (2*)	1	43
Technisches Versagen	15 (2*)	2	5		22
Umwelteinflüsse	5 (3*)	2	1	2	10
Unbekannte Ursachen	40 (7*)	3	9	1	53

\* In Klammer ist jeweils die max. Anzahl Tote pro Ereignis angegeben. Die Opfer sind dabei im Wesentlichen Personen der Werkmannschaft oder Feuerwehrleute.

Die häufigste bekannte Ursache gemäss dieser Auswertung ist menschliches Versagen. Nach abnehmender Häufigkeit geordnet folgen die Störfälle wegen technischen Versagens und danach die Störfälle durch Umwelteinflüsse.

Die Störfälle in Tankanlagen mit Dieselöllagerung waren meistens Vandalenakte, bei denen das Lagergut ausfloss und Boden und Gewässer verschmutzte. In Tanklagern, wo ausschliesslich Heizöl oder Dieselöl gelagert werden und keine leicht entzündlichen Treibstoffe vorhanden sind, ist eine Entzündung erst nach Zufuhr von genügend Wärme möglich. Selbst mutwillig sind Heizöl oder Dieselöl nur schwer zu entzünden. Bei "reinen" Heizöltanklagern ist deshalb ein Störfall mit anschliessendem Brand wesentlich seltener zu erwarten als bei Benzintankanlagen.

Eine weitergehende Untersuchung der weltweit gesammelten Daten der letzten 30 Jahre [11, 23] zeigt zudem, dass sich die Auswirkungen von Störfällen meistens auf das Betriebsareal beschränkten. Häufig mussten grosse Sachschäden im Areal in Kauf genommen werden, Schäden ausserhalb der Anlagen waren hingegen selten und eher von untergeordneter Bedeutung. Eine Ausnahme bildete der einmalig aufgetretene Fall einer Gaswolkenexplosion (Saint Herblain, F, 1991), der Fensterbrüche in über 2 km Distanz zur Folge hatte. Eine Beschädigung der Basinmauer tritt nur ein einziges Mal auf (Jacksonville, USA, 1984), ist jedoch für schweizerische Anlagen nicht relevant, da die Mauer aus Backsteinen erstellt wurde und wegen Hitzeeinwirkung versagte.

In der Schweiz ereigneten sich in den letzten 30 Jahren 5 grössere Unfälle in Tanklagern (Birsfelden BL 1970, Cadenazzo TI 1974, Gerlafingen SO 1982, Vernier GE 1992 und Deisswil BE 1996). Bei den Unfällen in Birsfelden und Gerlafingen handelte es sich um Tankexplosionen. In beiden Fällen blieben die Schäden auf die Anlage beschränkt. Nachfolgend werden die anderen drei Fälle im Sinne von Beispielen ausführlicher beschrieben:

#### **Tankexplosion in Cadenazzo TI, 1974**

Am 16.01.1974 nahm ein spezialisiertes Team mit 4 Arbeitern die Reinigungsarbeit an einem 4'400 m<sup>3</sup> Benzin-Tank der Tankanlage in Cadenazzo auf. Bei kalter Witterung wurde der Tank zuerst während 75 Minuten belüftet. Danach füllte ein mit einem Atmungsgerät ausgerüsteter Arbeiter den Treibstoffschlamm im Tankinnern in einen Kessel und reichte diesen zwei im Freien postierten Mitarbeitern weiter. Infolge eines Stromunterbruchs erlosch plötzlich die Ex-Lampe, welche für Licht im Tankinnern sorgte. Bei der Ursachenforschung am nicht ex-geschützten Trenn-Trafo entstand ein Funke, der das Benzingasgemisch im Tankbassin entzündete. Während der Belüftung und der Reinigungsarbeiten dürften Benzindämpfe durch das Mannloch in das Tankbassin geströmt sein und zu diesem zündfähigen Gasgemisch geführt haben. Nach der Verpuffung brannten die Lüftungsschläuche und die aus dem Mannloch ausströmenden Benzindämpfe in einer Feuerlohe von 30-40 m Höhe. Ein Arbeiter rettete sich hinter eine Schutzmauer; unter Einsatz eines Feuerlöschers ermöglichte der zweite Arbeiter dem im Tank einge-

geschlossenen Kollegen den Ausstieg. Nach ca. 20 Minuten, in denen die Flammenlohe kleiner wurde, erfolgte die Rückzündung in den Benzintank. Durch eine gewaltige Explosion, gefolgt von einer Stichflamme, wurde das Tankdach zerrissen und hoch in die Luft geschleudert. Eine Hälfte des Daches beschädigte die Rohrleitungen; die andere Hälfte riss Löcher in einen benachbarten Tank und stürzte danach auf den Bassinwall. Das aus den beschädigten Rohrleitungen fließende Benzin und Heizöl brannte im Tankbassin. Die automatische Schliessung aller Tankventile verhinderte eine grössere Ausbreitung des Feuers. Die Feuerwehr konnte bei ihrem Eintreffen das Feuer, welches sich mittlerweile stark zurückgebildet hatte, mit mobilen Pulverlöschern bekämpfen. Die starke Druckwelle verwüstete das Betriebsgebäude und riss in der Nachbarschaft die Fensterscheiben aus den Rahmen. Die Verpuffung hatte bei einem Arbeiter der Reinigungsfirma Brandverletzungen 2. Grades zur Folge; daneben entstand bei Explosion und Brand nur materieller Schaden.

#### **Auslaufen in Vernier GE, 1992**

Am 25.1.1992 (Samstagabend) sollten 4000 m<sup>3</sup> Kerosin über die Pipeline von Marseille nach Vernier gepumpt werden. Der Transport sollte portionenweise erfolgen und in zwei Tanks zu 2'000 m<sup>3</sup> und 3'000 m<sup>3</sup> abgefüllt werden. Irrtümlicherweise wurde die erste Portion von 2'700 m<sup>3</sup> Treibstoff statt in den 3'000 m<sup>3</sup> Tank in den 2'000 m<sup>3</sup> Tank geleitet. Dies führte zu einem Überlaufen des Tanks. Die Angestellten versuchten zunächst, den Schaden selbst zu beheben, indem sie den Tankinhalt in den 3'000 m<sup>3</sup> Tank umpumpen versuchten. Mittlerweile waren ca. 250 m<sup>3</sup> Kerosin ins Auffangbecken geflossen. Die Alarmierung der Feuerwehr erfolgte durch einen Anwohner in unmittelbarer Nähe des Tanklagers. Diese war bereits 15 Minuten später zur Stelle und aktiv. Dennoch gelangten ca. 10 m<sup>3</sup> Kerosin durch die Kanalisation zur Kläranlage. Um die Menge Kerosin aufzunehmen und zugleich die Klärprozesse zu retten, wurden die Abwässer direkt in die Rhone geleitet. Als Vorbeugemassnahme zur Verhinderung einer Explosion wurde eine grosse Menge Löschmittel für einen allfälligen Einsatz bereitgestellt, die dann jedoch nicht eingesetzt werden musste (vgl. auch Ref. 8: Rahmenbericht 1992).

#### **Tankexplosion und Brand in Deisswil BE, 1996**

In der Stehtankanlage nordwestlich von Deisswil (Fassungsvermögen = 5 x 2000 m<sup>3</sup>) explodierte am 25.3.1996, einige Minuten vor 16.30 Uhr ein Tank mit einem Inhalt von ca. 500 m<sup>3</sup> Schweröl. Die Wucht der Explosion schleuderte das Dach des Tanks auf die am Rand des Fussballfeldes stehenden Elektroinstallationen. Die durch die Explosion und den Brand stark beschädigte Tankumhüllung knickte ein und bildete so eine Abdeckung über dem brennenden Tankinhalt. Dank dem raschen Einsatz der Wehrdienste konnten die angrenzenden Tanks gekühlt werden. Bei einem gefüllten Tank konnte damit ein Bersten und Auslaufen, bei einem halbgefüllten Tank eine zweite Explosion verhindert werden. Erst nach Stunden gelang es den Wehrdiensten, Löschschaum durch die mit einer schweren Baumaschine in die Tankumhüllung geschlagenen Löcher in den Tank zu bringen und damit den Brand zu löschen. Eine unbekannt Menge Löschmittel gelangte während des Einsatzes via der entlang der Auffangwanne fließenden "Worbla" in die Aare. Zusätzlich floss durch eine undichte Stelle in der Wanne Wasser-Schweröl-Löschschaumgemisch in die "Worbla". Daher wurde die Auffangwanne am nächsten Tag so rasch wie möglich entleert. Es entstand neben der Gewässerverschmutzung ein grosser Sachschaden an der Anlage.

Eine recht systematische Auswertung auch kleinerer Unfälle liegt aus Frankreich vor [23]. Sie basiert auf Daten von 400 Tankanlagen, in denen während 5 Jahren rund 58 Zwischenfälle und Unfälle gemeldet und ausgewertet wurden. Danach sind Auswirkungen ausserhalb der Anlagen die Ausnahme. Diese Auswertung zeigt aber auch, dass Auslaufen ohne Brand mit gut 80% die häufigste Erscheinungsform eines Unfalles in Tankanlagen ist. Aber auch bei den wenigen Grossunfällen in Stehtankanlagen traten keine schwerwiegenden Schädigungen gemäss Richtlinie zu den Beurteilungskriterien des BUWAL auf [1].

## 2.3 Stoffgrundlagen

Zum eindeutigen und nachvollziehbaren Verständnis von Szenarien, Ausmasseschätzungen und Risikoeermittlungen sind Kenntnisse der Stoffgrundlagen eine Voraussetzung. Dabei genügen die rein naturwissenschaftlichen Stoffdaten allein oft nicht, ebenso wesentlich sind die bei den möglichen Störfallereignissen tatsächlich vorhandenen Quantitäten. Zu den Stoffen, die bei einem Störfall zu Schädigungen von Bevölkerung und Umwelt führen können, gehören nicht nur die eigentlichen Lagerprodukte (Treib- und Brennstoffe), sondern auch die Löschmittel, welche im Brandfall eingesetzt werden und im Störfall (zusammen mit Löschwasser) in die Umgebung freigesetzt werden könnten. Nachfolgend werden die Eigenschaften der vier häufigsten Mineralölprodukte in Stehtankanlagen beschrieben [4, 24, 25].

### 2.3.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften von Treib- und Brennstoffen

Die genaue chemische Zusammensetzung der Mineralölprodukte kann je nach Förderort, Raffinierung, Jahreszeit oder Verwendung variieren. Im allgemeinen ist diese Variation für die Sicherheitsbetrachtungen jedoch wenig relevant. Die gelagerten Mineralölprodukte werden gemäss ihrem Flammpunkt in Gefahrenklassen eingeteilt [4]. Sie lassen sich wie folgt charakterisieren:

- **Benzin** (Fahrbenzin, Flugbenzin, Vergaserkraftstoff, Ottokraftstoff, Benzin, engl. gasoline)  
*Gefahrenklasse Kat. F1*

Benzin besteht hauptsächlich aus Kohlenwasserstoffverbindungen mit 5-9 Kohlenstoff-Atomen ( $C_5$  bis  $C_9$ -Verbindungen) der Gruppe der Alkane, Cycloalkane, Alkene, Aromaten. Benzin ist eine farblose, brennbare Flüssigkeit mit einem Siedebereich von 40-220°C, die bereits bei -20°C (Flammpunkt) zündfähige Dämpfe bilden kann, die schwerer als Luft sind. Benzin ist kaum mit Wasser mischbar. Die Löslichkeit von Autobenzin in Wasser liegt nach [25] bei ca. 120 mg/l (bei 20°C).

- **Kerosin** (Flugturbinenkraftstoff, Düsenkraftstoff, Flugpetrol, engl. jet fuel, kerosene)  
*Gefahrenklasse Kat. F2*

Kerosin ist ein Produkt der fraktionierten Destillation von Erdöl, das zwischen Benzin und Dieselöl anfällt. Es beinhaltet ein komplexes Kohlenwasserstoffgemisch. Wegen der Verwendung in Düsentriebwerken müssen aromatische Kohlenwasserstoffe auf weniger als 20 bis 25%, der Naphthalinengehalt auf weniger als 3% beschränkt bleiben. Kerosin hat einen Siedebereich von ca. 160 bis 280°C und einen Flammpunkt von 30 bis 40°C. Seine Löslichkeit in Wasser liegt bei ca. 5 bis 40 mg/l. Überschallflugzeuge verwenden Treibstoffgemische aus vorwiegend Isoalkanen und Cycloalkanen mit einem Siedebereich zwischen 200°C und 300°C. Für eine Zündung muss Kerosin gegenüber den normalen Umgebungstemperaturen aufgeheizt werden.

- **Dieselöl** (Diesel, Dieseldieselkraftstoff, engl. gas oil, diesel oil)  
*Gefahrenklasse Kat. F3*

Dieselöl fällt bei der Destillation von Erdöl als Fraktion zwischen etwa 200° und 380°C an. Die Zusammensetzung kann stark variieren, aber wie beim Heizöl dominieren Verbindungen aus längerkettigen Kohlenwasserstoffen ( $C_7$ - bis  $C_{14}$ -Verbindungen). Dieselöl unterscheidet sich von Benzin vor allem durch den höheren Siedebereich und Flammpunkt (>55°C). Seine Löslichkeit in Wasser beträgt ca. 10 mg/l. Für eine Zündung im Freien muss Dieselöl aufgeheizt werden.

- **Heizöle** (engl. fuel oil, domestic heating oil)  
*Gefahrenklasse Kat. F3 bis F4*

Heizöl ist ein flüssiges oder leicht zu verflüssigendes Produkt aus Erdöl, Schieferöl oder Teeren verschiedener Herkunft. Es dient vor allem der Wärmeerzeugung. Nach dem Fließvermögen unterscheidet man Heizöl EL (extra leicht), Heizöl M (mittel) und Heizöl S (schwer). In der Schweiz wird vorwiegend noch Heizöl EL verwendet, dessen Zusammensetzung derjenigen von Dieselöl sehr ähnlich ist. Heizöl hat wie Dieselöl einen hohen Flammpunkt (>55°C) und eine Löslichkeit in Wasser von ca. 10 mg/l. Für eine Zündung im Freien muss Heizöl wie Dieselöl aufgeheizt werden.

Zwei weitere, jedoch seltener gelagerte Mineralölprodukte sind Rohöl und Schweröl (Heizöl S). Sie weisen eine Dichte zwischen 900 - 970 kg/m<sup>3</sup> auf, der Flammpunkt liegt bei 23-55°C (Rohöl) bzw. über 65°C (Schweröl). Rohöl und Schweröl sind für die Störfallvorsorge von Bedeutung, weil sie bei lang andauernden Tankbränden zu einem Boil Over (siehe 3.4.2) führen können.

Die Mengenschwellen gemäss BUWAL sind wie folgt festgelegt [12]:

Benzin, Kerosin	je 200'000 kg
Dieselöl	500'000 kg
Heizöl EL, Heizöl S	je 500'000 kg
Rohöl	2'000 kg

Die nachfolgende Tabelle 2.2 fasst die wichtigsten physikalisch-chemischen Eigenschaften nochmals zusammen. Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Treib- und Brennstoffe sind daraus gut ersichtlich. Sie sind alle leichter als Wasser, die Zündtemperaturen liegen über 200°C und die Heizwerte bei 40-44 MJ/kg. Durch den niedrigen Flammpunkt hebt sich Benzin von den anderen beschriebenen Treib- und Brennstoffen ab. Benzine können bereits bei niedrigen Temperaturen ab -20°C zündfähige Dämpfe bilden. Kerosin, Dieselöl und Heizöl müssen dazu erst bis zum Flammpunkt aufgeheizt werden.

Tab. 2.2: Übersicht über wichtige physikalisch-chemische Eigenschaften [24, 25]

<b>Eigenschaften</b> Stoff-Nr. nach Hommel	<b>Benzin</b> 38/38a	<b>Kerosin</b> 119	<b>Dieselöl</b> 83	<b>Heizöl EL</b> 103	<b>Heizöl S</b> 120	<b>Rohöl<sup>2)</sup></b> 155/155a
Flammpunkt [°C]	- 20	30-40	> 55	> 55-80	> 65	20-55
Heizwert [MJ/kg]	41.0-44.0 <sup>4)</sup>	40.6-42.7 <sup>3)</sup>	42.3-43.1 <sup>4)</sup>	42.6 <sup>1)</sup>	39.8 <sup>1)</sup>	
Zündgrenzen [Vol.% Dampf]	0.6-8.0	0.6-6.5	0.6-6.5	0.6-6.5	1.5 - ?	
Dampfdruck nach Reid bei 40°C [kPa]	73.8 <sup>5)</sup>	< 5	< 1	< 1	< 1	-
Zündtemperatur [°C]	220	220	ca. 220 <sup>6)</sup>	ca. 220 <sup>6)</sup>	210-220	
Dichte bei 15°C [kg/m <sup>3</sup> ]	725-780	ca. 800	815-855 <sup>1)</sup> (bei 15°C)	830-860	970	830-950

<sup>1)</sup> nach DIN 51603 Taschenbuch 183, 1982

<sup>2)</sup> Werte je nach Herkunft des Rohöls [24]

<sup>3)</sup> Dubbel 1974

<sup>4)</sup> Kaufhold, Verbrennen und Löschen, 1991

<sup>5)</sup> Untersuchung EMPA: Durchschnittswert für schweiz. Benzin Bleifrei 95 (bei 37.8°C)  
(Wertebereich von 58.6 - 98.6 kPa)

<sup>6)</sup> Variiert je nach Zusammensetzung und Ort der Zündung. In geschlossenen Räumen, die insgesamt auf höherer Temperatur sind, liegt die Zündtemperatur bei ca. 220 °C. Bei freien Oberflächen, einem offenen System, treten höhere Werte bis 320°C auf.

### 2.3.2 Ökotoxikologische Eigenschaften von Treib- und Brennstoffen

Die toxische Wirkung von Mineralölprodukten auf Lebewesen ist abhängig von:

- der Art der Organismen
- der artspezifischen Empfindlichkeit auf ein bestimmtes Produkt oder einen bestimmten Stoff
- der umweltbedingten Vorbelastung des Lebensraumes.

Aus diesem Grund bestehen grosse Unterschiede zwischen den Organismen, ein allgemeingültiger Wert kann nicht festgelegt werden. Für die Abschätzung des Schadenausmasses können deshalb nur Richtwerte in Form von Wertebereichen angegeben werden.

Häufig handelt es sich dabei um Angaben von Konzentrationen, die ein bestimmter Anteil der Organismen innerhalb einer vorgegebenen Zeitdauer nicht überlebt (z.B. ist der  $LL_{50}$ -Wert jene Konzentration, bei der 50% der Organismen eine Expositionsdauer von meist 96 h nicht überleben. Der Wert  $EL_{50}$  ist derjenige Wert, bei dem 50% einer bestimmten Wirkung eintreten).

Diese Richtwerte basieren auf verschiedenen standardisierten Testverfahren, welche z.B. für die Bestimmung der akuten Bakterientoxizität oder Fischtoxizität herangezogen werden.

Für die Berechnung einer verunreinigten Gewässeroberfläche kann der Ansatz in [1] verwendet werden. Dort wird eine Gewässeroberfläche dann als verunreinigt betrachtet, wenn mehr als 15 g Mineralöl pro  $m^2$  Oberfläche vorhanden ist<sup>B</sup>. Damit lässt sich bei bekannter Produktmenge die Ausdehnung der Verunreinigung und damit das Schadenausmass nach [1] abschätzen.

Für Grundwasser bzw. Trinkwasser bestehen Grenzwerte in der Lebensmittelverordnung (LMV), die sich auf die Konzentration von Kohlenwasserstoffen beziehen. Hauptkriterium bildet dabei die Löslichkeit der Stoffe, so dass für alle Mineralölprodukte, die generell schwer wasserlöslich sind, der in der LMV angegebene Grenzwert von 20  $\mu\text{g/l}$  bzw. 20  $\text{mg/m}^3$  angenommen werden kann.

Für die stoffliche Bodenbelastung [7, 29, 30] definiert die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) Richt-, Prüf- und Sanierungswerte für anorganische und ausgewählte organische Schadstoffe, analoge Werte für Mineralölprodukte sind darin nicht definiert. Das Schadenausmass im Boden ( $n_5$ ) hängt im Wesentlichen von Standortparametern wie Topographie, Beschaffenheit des Untergrunds, landwirtschaftliche Nutzung und physikalische Eigenschaften der betroffenen Böden sowie den meteorologischen Verhältnissen zum Zeitpunkt eines Störfalls (u.a. Temperatur, gefrorener Boden) ab. Aufgrund der Vielzahl dieser Faktoren ist eine generelle Voraussage der Ausdehnung einer Bodenverschmutzung sehr schwierig. Die Ausbreitung der Verschmutzung über eine Fläche von mehr als 2 ha, wie sie für einen Störfallwert von 0.3 erforderlich ist, kann praktisch ausgeschlossen werden. Da die meisten Schadenfälle nur eine lokal begrenzte Bodenverschmutzung ergeben und ein möglicher Folgeschaden in einem Oberflächengewässer oder einem Grundwasser über andere Indikatoren bereits abgedeckt ist, werden die Schäden im Boden für die Ausmasseneinschätzung nicht weiter berücksichtigt.

---

<sup>B</sup> Die Kantone können laut Gesetz Schutzziele und damit Grenzwerte festlegen, die von denjenigen des BUWAL [1] abweichen. Die Anlagenbesitzer sind gehalten, den im jeweiligen Kanton gültigen Grenzwert in Erfahrung zu bringen.

Tab. 2.3: Toxizitätswerte für die betrachteten Mineralölprodukte [38, 39]

Mineralölprodukt	Wasser- löslichkeit [mg / l]	Gefahrensymbol	Daphnientoxizität [EL <sub>50</sub> (mg/l)] <sup>**</sup>	Fischtoxizität [LL <sub>50</sub> (mg/l)] <sup>**</sup>
Bleifrei 95 / Bleifrei 98 (Gasolines, low boiling point naphas)	ca. 120	F+*, T* oder Xn*, N	1 – 10 <sup>***</sup>	1 – 10 <sup>***</sup>
Kerosin (Kerosines, straight-run gas oils)	5 - 40	Xn, N	0,4 – 4 <sup>***</sup>	1 – 10 <sup>***</sup>
Dieselöl / Heizöl EL (Other gas oils, distillate fuel oils)	ca. 10	Xn, N	6 – 210	21 – 230
Heizöl S (Heavy fuel oil components)	1.5 - 12	T	10 – 100 <sup>***</sup>	10 – 100 <sup>***</sup>
Rohöl (Crude oil)		T, (evtl. auch F+ od. F)*	17 <sup>***</sup>	34 <sup>***</sup>

\* Zuteilungen je nach spezieller Produkteigenschaft, siehe [39]

\*\* EL = "effective loading" und LL = "lethal loading": Messgrößen, die aufgrund der Messmethode von den üblichen LC<sub>50</sub>- bzw. EC<sub>50</sub>-Werten abweichen (vgl. [38], S.10)

\*\*\* abgeschätzte Toxizitätswerte aufgrund der üblichen Komponenten des entsprechenden Mineralölprodukts (vgl. [38], S. 10f)

### 2.3.3 Eigenschaften von Löschmitteln

Die für das Löschen von Treib- und Brennstoffen üblichen Mittel können ihrem chemischen Aufbau nach in die zwei Hauptgruppen Schaummittel auf Eiweissbasis (Protein-Schaummittel) und synthetische Schaummittel auf Fettalkoholbasis (Tensid-Schaummittel) eingeteilt werden.

Neben dem eigentlichen Grundstoff (Eiweisse und Tenside) enthalten die Löschmittel je nach Produkt und Verwendungszweck einen unterschiedlichen Anteil an Metallsalzen, Desinfektionsmitteln, Frost- und Korrosionsschutzmitteln sowie Lösungsmitteln. Diese Inhaltsstoffe können bei einer Freisetzung in die Umgebung zu Schädigungen von Organismen führen.

Die Wirkung der Löschmittel auf Organismen lässt sich anhand von Toxizitätstests abschätzen. Die Spannbreite der erhaltenen Grenzwerte für eine Schädigung von Organismen ist aufgrund der verschiedenen Testmethoden und -organismen relativ gross: z.B. für Fische LC<sub>50</sub> = 100-3000 mg Löschmittel pro Liter Wasser während 96 Stunden (nach Angaben von

Herstellern). Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass im allgemeinen gelöste Treib- und Brennstoff toxischer sind als die in Wasser löslichen Löschmittel.

Aus diesem Grund wird in der Ausmasseneinschätzung nicht weiter auf Schäden in der Umwelt durch Freisetzung von Löschmitteln eingegangen.

### 2.3.4 Folgerungen für die Ausmasseneinschätzung

- Für die Auswirkungen eines Brandes (Wärmestrahlung) muss nicht zwischen den verschiedenen Mineralölprodukten unterschieden werden.
- Das Szenarium "Explosion" ist nur für Benzin relevant.
- Beim Szenarium "Auslaufen" sind für Schäden im Oberflächengewässer die produktspezifischen LC<sub>50</sub>-Werte für Fische (verunreinigtes Volumen) bzw. der Grenzwert für verunreinigte Oberflächen von 15 g Mineralöl pro m<sup>2</sup> massgebend.

- Für eine Verunreinigung des Trinkwassers kann der Grenzwert für Kohlenwasserstoffe (KWS) aus der Lebensmittelverordnung (LMV) genommen werden. Er wird für alle Mineralölprodukte zu  $20 \text{ mg/m}^3$  festgelegt.
- Bodenverschmutzungen sowie Schäden durch Freisetzung von Löschmitteln sind für die Ausmasseseinschätzung nicht relevant.

## 2.4 Beurteilungskriterien

Die möglichen Auswirkungen eines Störfalls mit Berücksichtigung der vorher beschriebenen Konvention werden im nächsten Abschnitt erläutert. Zur Bestimmung und Beurteilung des Ausmasses wird zunächst auf die Schadenindikatoren gemäss BUWAL-Richtlinie [1] eingegangen.

In der BUWAL-Richtlinie wird das Schadenausmass mit sechs Indikatoren für mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt dargestellt. Je nach Art der Schädigung kommen zur Beschreibung des Schadenausmasses ein oder mehrere Indikatoren zur Anwendung. (vgl. Abb. 8.1). Für jeden Schadenindikator wird ein Störfallwert bestimmt. Diese Störfallwerte sind auch

untereinander vergleichbar. Tab. 2.4 gibt das jeweilige Ausmass an, das zu einem Störfallwert von 0.3 führt und im Anhang 3 für Stehtankanlagen konkretisiert wird. Dieser Wert, als Grenze für eine schwere Schädigung, wurde für jeden Indikator einzeln festgelegt. Störfälle mit Brand und Hitzestrahlung haben vor allem Auswirkungen auf Personen. Beim Ausmass wird generell zwischen der Anzahl Toten (Indikator  $n_1$ ) und der Anzahl Verletzten (Indikator  $n_2$ ) unterschieden. Zur Vereinfachung wird bei der Ausmasseseinschätzung im vorliegenden Bericht auf den Indikator  $n_2$  (Verletzte) verzichtet. Durch Hitzestrahlung entstehen meist nur geringe Sachschäden ausserhalb der Anlage. Der Indikator  $n_6$  für Sachschäden ist somit bei den Brand-szenarien nicht massgebend.

Störfälle durch Auslaufen betreffen vor allem Gewässer. Die Auswirkungen lassen sich durch die Indikatoren  $n_3$  (verunreinigte oberirdische Gewässer) und  $n_4$  (verunreinigte unterirdische Gewässer) beschreiben. Der Indikator  $n_5$  gilt für Auswirkungen auf den Boden. Diese sind für die Ausmasseseinschätzung von Stehtankanlagen in der Regel nicht relevant (vgl. Kap. 2.3.2).

Tab. 2.4: Ausmass für eine schwere Schädigung gemäss BUWAL-Richtlinie [1]

Schadenindikator		Ausmass für Störfallwert = 0.3	
Todesopfer	$n_1$	Die Grössenordnung von 10 Todesopfern	
Verletzte	$n_2$	Die Grössenordnung von 100 Verletzten	
Verunreinigte oberirdische Gewässer	$n_3$	Die Verunreinigung mit Stoffen, Erzeugnissen oder Sonderabfällen von etwa $10^6 \text{ m}^3$ oder $1 \text{ km}^2$	1)
Verunreinigte unterirdische Gewässer	$n_4$	Der Ausfall einer Grundwasserfassung im Ausmass von etwa 10'000 Personenmonaten	2)
(Boden) nicht relevant	( $n_5$ )	(Die Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit auf einer Fläche von etwa 2 ha Boden durch Stoffe, Erzeugnisse oder Sonderabfälle für die Dauer von 1 Jahr)	
Sachschäden	$n_6$	Sachschäden von etwa 50 Mio. Fr.	3)

1) in begründeten Fällen sind strengere Massstäbe möglich

2) auch für bekannte, aber nicht genutzte unterirdische Gewässer anwendbar

3) Indexstand 1996



Beim Indikator  $n_6$  werden Sachschäden beurteilt, die für Stehtankanlagen nur in speziellen Fällen (insbesondere Explosionen und Hitzestrahlung) von Bedeutung sind. Sie werden im Kapitel 7.3 behandelt und erläutert.

In der BUWAL-Richtlinie gibt es keinen Indikator zur Bewertung einer Luftverschmutzung. Bei einem Mineralölbrand in der Anlage mit Russbildung und Luftverschmutzung kann eine allfällige indirekte Gefährdung von Personen oder Anlagen dann auch über die Indikatoren  $n_1$  und  $n_6$  abgehandelt werden.

Für den täglichen Betrieb einer Anlage bestehen andere gesetzliche Vorschriften als die StFV.

## 3 Szenarienbeschreibung

### 3.1 Voraussetzungen für die Gültigkeit der Szenarien

Als Grundvoraussetzung für die Gültigkeit der massgebenden Szenarien, wie sie im vorliegenden Bericht definiert sind, gilt die Einhaltung der allgemeinen Sicherheitsmassnahmen gemäss Art. 3 StFV, wie sie im Anhang 5 zusammengestellt sind. Diese Sicherheitsmassnahmen lassen sich dadurch charakterisieren, dass sie einerseits als aktive Massnahme die Begrenzung des Schadenausmasses bei Eintreten eines Störfalls bewirken und andererseits als passive Massnahme zur Herabsetzung des Gefahrenpotentials und zur Verhinderung von Störfällen beitragen. Konkret handelt es sich um die Massnahmen in Abb. 3.1.

- A** Die Kontrolle der Bassinwand soll gewährleisten, dass das Bassin beim Auslaufen eines Tanks dem Druck der Flüssigkeit oder einer anderen bei der statischen Berechnung einbezogenen Einwirkung standhält. Damit kann bei einem Störfall das gleichzeitige Versagen eines Tanks und des zugehörigen Bassins ausgeschlossen werden.
- B** Das Konzept des Kanalisationssystems muss so ausgelegt sein, dass beim Szenarium Auslaufen Auswirkungen auf die Umgebung der Anlage möglichst vermieden werden. Insbesondere sind die Rückhaltevolumina in der Anlage auf die berechneten Szenarien hin zu beurteilen.
- C** Bei dieser Vorkehrung (Umleiten und / oder Stapeln von ausgelaufenem Produkt) handelt es sich um eine Vorsichtsmassnahme zur Vermeidung der Ausbreitung eines Störfalls und damit von Schäden ausserhalb der Anlage. Für den Fall Auslaufen sollen die miteinander verknüpften Bassins Reservolumen zur Verfügung stellen können, um einerseits Produkte aus der Gefahrenzone zu bringen und andererseits das Überlaufen eines Bassins zu verhindern.
- D** Die Bestimmungen in den CARBURA-Richtlinien zum Thema Brandschutz dienen in erster Linie der Verhinderung einer Brandausbreitung mit weiteren Schäden an der Anlage und ausserhalb des Betriebsareals. In der Richtlinie sind auch Angaben

zur Berechnung der notwendigen Wasser- und Löschmittelmengen vorhanden.

- E** Bei Eintreten eines Störfalls sind ein rasches Erkennen und zielgerichtetes Handeln von entscheidender Bedeutung für die Eindämmung des Schadens. Voraussetzung dafür ist die enge Zusammenarbeit des Betreibers mit den zuständigen Instanzen und unter den Ereignisdiensten. Wichtiger Bestandteil dafür sind die regelmässigen Übungen auf der Anlage und deren Auswertung unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten.

Störfälle in Stehtankanlagen sind in der Regel langsam ablaufende Prozesse. Man kann somit davon ausgehen, dass spätestens nach einigen Stunden die (evtl. wiederholt) angewendeten Massnahmen Erfolg zeigen, das Ereignis unter Kontrolle gebracht ist und (weitere) Schäden oder Personengefährdungen ausserhalb der Anlage ausgeschlossen werden können. Es muss also nicht damit gerechnet werden, dass sich die Ereignisse eines Szenariums ungestört ausweiten und mit der Zeit die gesamte Anlage umfassen können, mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Umgebung. Der Faktor Zeit ist deshalb die Grundlage für die Definition der massgebenden Szenarien in der Ausmasseinschätzung.

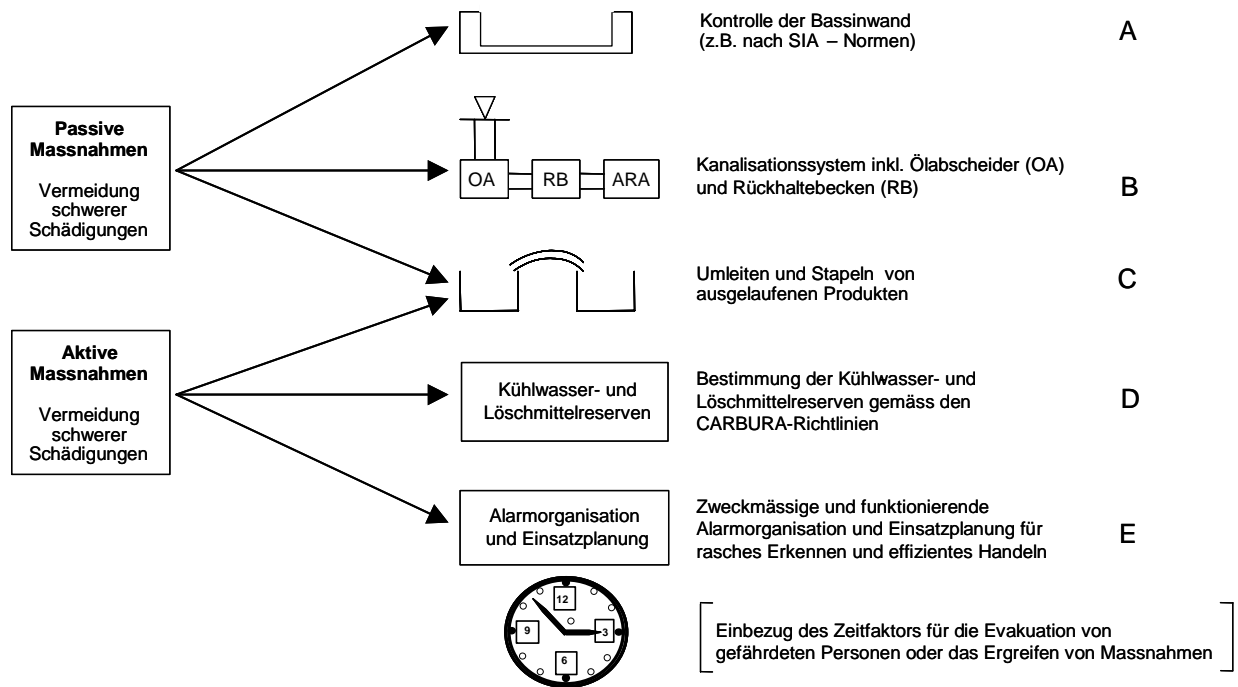


Abb. 3.1: Grundvoraussetzungen für die Richtigkeit der massgebenden Szenarien

### 3.2 Szenarienbaum

Aus dem Grundlagenkapitel (Kap. 2) folgt der Szenarienbaum (Abb. 3.2), die grafische Darstellung der möglichen Ereignisabläufe in Stehtankanlagen. Dieser bildet die Basis für die Anleitung zur Ausmassenschätzung.

Der Szenarienbaum unterscheidet farblich zwischen den drei Hauptszenarien Brand (rot), Auslaufen (blau) und Explosion (gelb). Alle Ereignisse sind zur besseren Übersichtlichkeit nummeriert. Die massgebenden Ereignisse haben zudem um die Ereignisnummer einen Rahmen in der entsprechenden Farbe.

### 3.3 Massgebende Ereignisse

#### 3.3.1 Grundlagen

Die möglichen Störfälle lassen sich gemäss ihren Auswirkungen in drei Hauptszenarien unterteilen. Das Hauptszenarium "Brand" bewirkt Hitzestrahlungen,

die sowohl den Menschen als auch Einrichtungen und Infrastrukturen in einem grösseren Umkreis gefährden können. Beim Hauptszenarium "Auslaufen" verteilt sich Lagergut im Areal oder in der Umgebung. In diesem Fall sind insbesondere nahegelegene Oberflächengewässer oder Grundwasser sowie allenfalls der Boden von einer Verunreinigung bedroht. Beim Hauptszenarium "Explosion" stehen Druckwellen im Vordergrund, die zu Zerstörungen an umliegenden Einrichtungen und Infrastrukturen führen können. Diese drei Hauptszenarien "Brand", "Auslaufen" und "Explosion" umfassen verschiedene Unterszenarien, von denen dasjenige mit dem vermutlich grössten Gefährdungspotential als massgebendes Ereignis auf Stufe Kurzbericht definiert wird. Zusätzlich werden weitere Unterszenarien als Spezialfälle behandelt. Diese Spezialfälle können für Anlagen mit speziellen Randbedingungen wichtig sein (z.B. bei dichter Besiedlung).

Nachfolgend werden zuerst die drei Hauptszenarien mit den jeweiligen massgebenden Ereignissen und anschliessend die Spezialfälle beschrieben.

### 3.3.2 Hauptszenarium "Brand"

#### Bassinbrand (Nr. 10)

Durch Zündung von ausgelaufenem Lagergut oder infolge eines brennenden Tanks, der versagt, kann ein Bassinbrand entstehen. Die Auswirkungen eines solchen Brandes entstehen vor allem durch die Hitzeabstrahlung der Flamme, die je nach Bassinfläche bis zu 100 m um das Bassin herum zu Verletzungen beim Menschen führen kann.

Eine Ausweitung des Brandes auf benachbarte Tanks und Bassins ist frühestens nach einigen Stunden möglich, da sich weitere Tanks zuerst erwärmen müssen, bevor sie versagen können und sich dann auslaufendes Lagergut ebenfalls entzündet. Voraussetzung für eine solche Ausdehnung eines Bassinbrandes auf umliegende Tanks oder Bassins ist das (evtl. mehrmalige) Versagen der vorgesehenen Massnahmen zur Brandbekämpfung und zur Sicherung der umliegenden Tanks. Als Folge einer solchen Brandausdehnung tritt eine grössere Hitzeabstrahlung auf. Da die Letalitätsradien jedoch unterproportional zur Vergrösserung der Brandflächen anwachsen, ist nur in Ausnahmefällen (z.B. bei sehr naher und dichter Besiedlung) ein gegenüber dem Brand eines einzelnen Bassins erhöhtes Schadenausmass zu erwarten. Für die Ausmasseneinschätzung wird deshalb normalerweise nur der Brand des flächengrössten Bassins betrachtet. Im Ausnahmefall ist der Brand des Bassins mit der kleinsten Distanz zu gefährdeten Objekten massgebend.

### 3.3.3 Hauptszenarium "Auslaufen"

#### Abfliessen in die Kanalisation (Nr. 21)

Das Ereignis ist dann für die Ausmasseneinschätzung relevant, wenn eine Verbindung zur öffentlichen Kanalisation oder zu einem Gewässer besteht. Ein ungewolltes Abfliessen von Lagergut oder Löschmittel-Produkte-Gemischen in die Kanalisation kann sich aus einer Fehlmanipulation bei der Bassinentleerung oder beim Umladen sowie nach einem Überlaufen (Überschwappen) aus dem Bassin indirekt über Schächte und versiegelte Flächen ergeben. Je nach vorhandener Kanalisation kann das Leckgut anschliessend ein nahegelegenes Gewässer (Oberflächengewässer, Grundwasser mit oder ohne Trinkwasserfassung) oder die ARA erreichen und verunreinigen. Das Schadenausmass eines solchen Ereignisses hängt insbesondere

von den in der Anlage vorhandenen Sicherheitsmassnahmen ab. So können z.B. Stapelräume in der Kanalisation oder bauliche Massnahmen an der Oberfläche sowie ein schnelles Erkennen und effizientes Eingreifen bei einem Störfall mit Auslaufen helfen, die ausgelaufene Produktmenge im Areal zurückzuhalten, um möglichst eine Verunreinigung in der Umgebung der Anlage zu verhindern.

#### Oberflächliches Abfliessen (Nr. 22)

Die Verunreinigung eines Gewässers durch oberflächliches Abfliessen ist nur dann für die Ausmasseneinschätzung relevant, wenn sich ein Gewässer in unmittelbarer Umgebung der Anlage befindet. Das Schadenausmass richtet sich einerseits nach den lokalen Gegebenheiten (Topografie, Versiegelung der Flächen) und andererseits nach den vorhandenen Sicherheitsmassnahmen (Geländemulden, Abläufe in Stapelräume). Beim oberflächlichen Abfliessen handelt es sich um einen sichtbaren Prozess, der damit ein rasches Erkennen und Handeln erleichtert.

### 3.3.4 Hauptszenarium "Explosion"

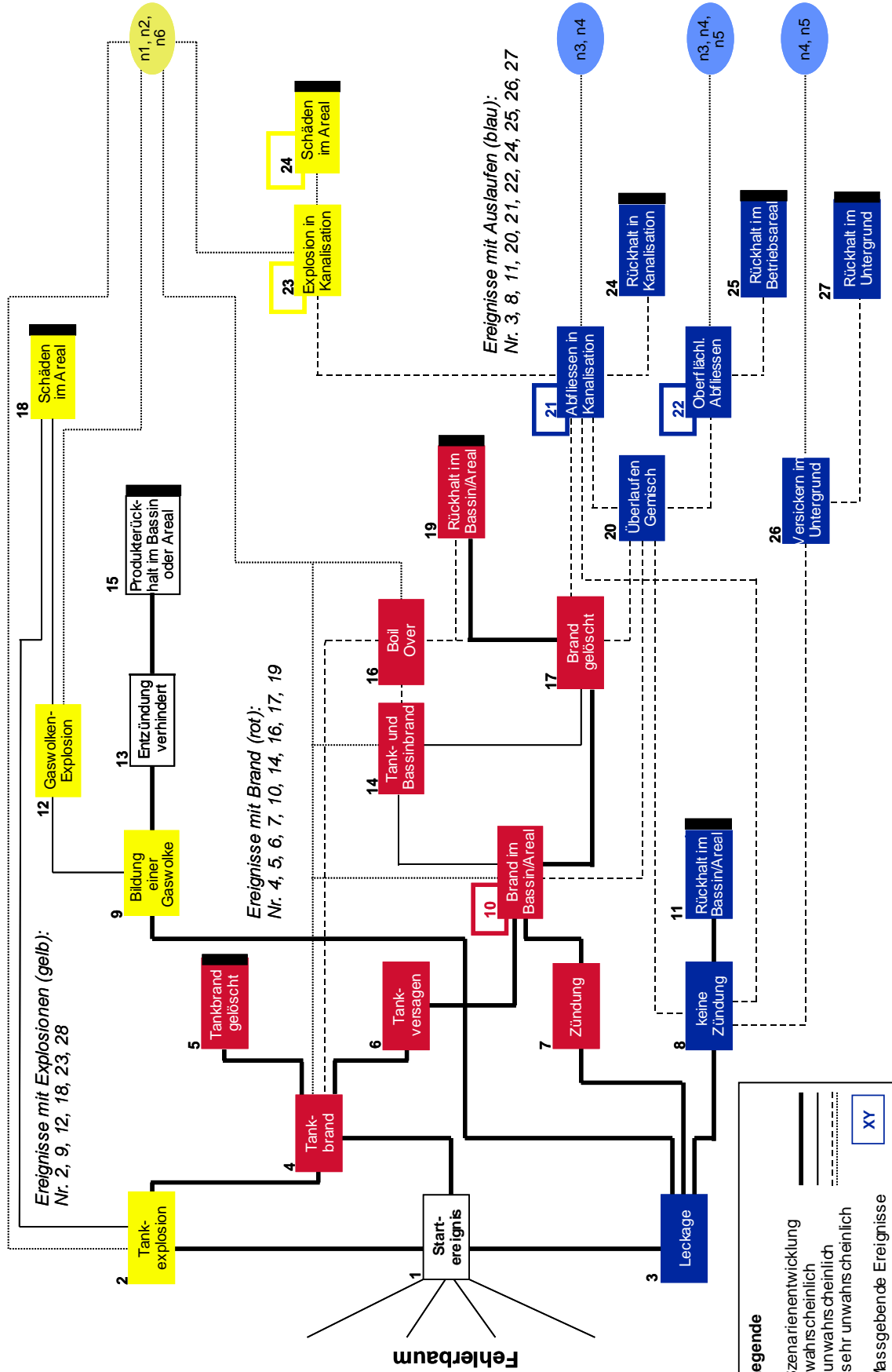
#### Explosion in Kanalisation (Nr. 23)

Eine Explosion in der Kanalisation kann bei Vorhandensein von dichten Nutzungen oder wichtigen Infrastrukturen in der Nähe der Anlage zu grösseren Schäden in der Umgebung führen.

Wegen seines tiefen Flammpunktes und seiner hohen Flüchtigkeit entwickelt vorwiegend Benzin mit Luft explosible Gas-Gemische in der Kanalisation oder anderen geschlossenen Hohlräumen wie z.B. Leitungstollen. Bei einer Zündung dieses Benzin-Luft-Gasgemisches, z.B. durch elektrische Funken, können in unmittelbarer Umgebung des Explosionsortes grosse Explosionsdrücke entstehen. Je nach Lage der betroffenen Kanalisation sind bei dichter Bebauung oder Nutzung grosse Schäden möglich. Eine Gefährdung von Personen besteht durch Trümmerwurf (z.B. weggesprengte Dolendeckel). In solchen Fällen ist dieses Szenarium von Bedeutung.

In Anlagen ohne Lagerung von Benzin oder ohne Anschluss an eine öffentliche Kanalisation ist hingegen eine Explosion in der Kanalisation nicht möglich und somit nicht relevant.

Abb. 3.2: Szenarienbaum Stehtankanlagen



## 3.4 Spezialfälle

### 3.4.1 Gaswolkenexplosion (Nr. 12)

**Explosion im Freien:** Durch Zerstäubung flüchtiger Treibstoffe (Benzin) beim Austritt aus einer Leitung (Aerosolbildung) und durch Verdampfung aus einer Lache kann sich eine Gaswolke bilden. Die Grösse dieser Gaswolke hängt u.a. von der Quellstärke, der Grösse der Lache und der Verdampfungsgeschwindigkeit ab. Da eine solche Gaswolke schwerer als Luft ist, kann sie in Bodennähe schweben und je nach den herrschenden atmosphärischen Bedingungen in eine Kanalisation eindringen oder sich über das Betriebsareal hinaus ausbreiten. Im Falle der Zündung einer unverdämmten Benzin-Gaswolke<sup>c</sup> oder einer Zündung kurz nach dem Benzinaustritt entsteht ein kurzer Brand (flash fire), aber keine Explosion. Durch Flammenrückschlag kann die Lache bei der Auslaufstelle in Brand gesetzt werden.

Benachbarte Tankbehälter können eine Teilverdämmung bewirken, die eine Durchmischung mit der Umgebungsluft durch Turbulenzen begünstigt. Würde sich ein Benzin-Luft-Gasgemisch erst nach ein paar Minuten in diesen Bedingungen entzünden, würden sehr viel höhere Verbrennungsgeschwindigkeiten und dadurch höhere Überdrücke erreicht. Die Explosion würde sich mit einer rasanten Druckwelle in der Atmosphäre ausbreiten. Wie Nachrechnungen von Explosionsunfällen zeigen, können nach der Explosion einer teilverdämmten Gaswolke im Freien Anfangsüberdrücke von 0.3 bar bis maximal 0.42 bar entstehen [20]. Personen oder Infrastrukturen in unmittelbarer Umgebung der Anlage sind dann gefährdet. Ein solches Ereignis setzt aber eine grosse Ausflussmenge voraus (Beispiel einer lang andauernden Leckage). Es muss dort berücksichtigt werden, wo schwere Schädigungen von wichtigen Infrastrukturen oder die Gefährdung einer grossen Anzahl von Personen im Um-

<sup>c</sup> Unterhalb des Flammpunktes irgendeines Treibstoffes sind weder seine Zündung noch seine Verbrennung möglich. Für Dieselöl bzw. Heizöl liegt der Flammpunkt höher als 55°C. Eine solche Temperatur kann nur mit einer äusseren, lang andauernden Erwärmung der Flüssigkeit erreicht werden. Bei Umgebungstemperatur stellt nur Benzin wegen seines tiefen Flammpunktes (-20°C) und seiner hohen Flüchtigkeit eine grosse Gefährdung dar. Sind keine leicht brennbaren Stoffe im Areal gelagert, kann der Spezialfall Gaswolkenexplosion aus Dieselöl oder Heizöl vernachlässigt werden, da er viel unwahrscheinlicher ist als derjenige aus Benzin.

kreis von ca. 100 m um die Anlage nicht ausgeschlossen werden können.

**Explosion im geschlossenen Pumpenhaus:** Infolge undichter Stellen in der Pumpenanlage können sich Treibstoffdämpfe (Benzin) im Pumpenhaus entwickeln, die im Zündungsfalle zu einer verdämmten Gaswolkenexplosion führen. Der maximale Überdruck im geschlossenen Gebäude beträgt dabei kurzzeitig ca. 7 bar [6, 18]. Je nach Lage des Pumpenhauses sind damit grössere Schäden innerhalb des Betriebsareals möglich. Schäden ausserhalb der Anlage sind nur in Ausnahmefällen relevant, z.B. wenn das Pumpenhaus direkt an der Arealgrenze und neben einem dicht genutzten Nachbargrundstück liegt.

### 3.4.2 Boil Over (Nr. 16)

Das Szenarium tritt insbesondere bei Rohöl, Schweröl, Heizöl sowie evtl. bei Dieselöl auf. Ein Boil Over mit Benzin oder Kerosin kann hingegen ausgeschlossen werden. Der Boil Over ist ein Ereignis, bei dem grosse Mengen aufschäumenden, brennenden Öls heftig und plötzlich aus einem Tank ausgeworfen werden. Der Grund liegt im vorgängigen Erhitzen des Öls, das nach einer gewissen Zeit zu einem spontanen Verdampfen des Wassers am Tankboden führt. Laut klassischer Theorie ist ein Tankbrand die Ursache für die Erhitzung des Tankinhaltes und den nachfolgenden Boil Over. Da in der Literatur jedoch auch ein Ereignis mit anderer Ursache aber ähnlicher Wirkung als Boil Over bezeichnet wurde (Lyon: Aufheizung des Tankinhaltes durch äusseren Bassinbrand), soll nachfolgend eine Unterscheidung in der Bezeichnung eingeführt werden. Dem klassischen Boil Over wird ein Ereignis mit "Boil Over-ähnlichem Effekt" gegenübergestellt (zur Definition des Boil Over siehe auch [9, 22, 26]).

#### A) Klassischer Boil Over mit Wärmezonenebildung bei Tankbränden

Der klassische Boil Over mit Wärmezonenebildung kommt nur bei Tankbränden von Mineralölen mit einem weiten Siedebereich (Rohöl, Heizöl S) vor. Eine Voraussetzung für dieses Phänomen ist das Vorhandensein von Wasser am Tankboden (Kondenswasser oder durch Brandbekämpfung eingebracht). Durch den Tankbrand bildet sich im brennenden Produkt eine Wärmezone. Dabei kommt es zu einer fraktionierten Destillation an der Ober-

fläche. Die leichtflüchtigen Komponenten verdampfen und verbrennen, während schwer flüchtige Komponenten sich in der erhitzten Oberfläche ansammeln. Die Verdampfung setzt sich an der Grenzfläche zwischen heissem Rückstand und kaltem Öl fort, wobei die schwerflüchtigen Komponenten, die zurückbleiben, die Wärmezone vergrössern. Wenn die sich so immer weiter ausdehnende Wärmezone die am Tankboden liegende Wasserschicht erreicht, wird die Verdampfung des Wassers einsetzen und zum Auswurf von grossen Mengen aufschäumenden und brennenden Öls führen.

#### *Massnahmen*

Beim klassischen Boil Over bestehen die möglichen Massnahmen nach Ausbruch eines Tankbrandes vor allem in der Verhinderung von weiteren Schäden. Da der Verlauf der Wärmefront am Tank gut beobachtet werden kann und das eigentliche Auswerfen des Produkts erst nach mehreren Stunden erfolgt, muss in dieser Zeit dafür gesorgt werden, dass alle sich in der Nähe befindenden Personen aus dem Gefahrenbereich evakuiert werden.

## **B) "Boil Over-ähnliche Effekte" nach Bassinbrand**

"Boil Over-ähnliche Effekte" können auch bei Produkten mit relativ engem Siedebereich wie Dieselöl und Heizöl EL auftreten. Diese Produkte bilden keine grossen Wärmezonen. Die Ursache für den "Boil Over-ähnlichen Effekt" liegt in diesem Fall in der Aufheizung eines Tanks durch äussere Wärmeeinstrahlung, also durch einen Bassinbrand. Bei einem lang andauernden Brand in einem Bassin findet eine starke Erwärmung der Tankwand der im Bassin stehenden Tanks statt, wenn keine genügende Tankkühlung gewährleistet werden kann. Das am Boden liegende Wasser wird also hauptsächlich über Wärmeleitung in der Tankwand aufgeheizt. Der Effekt tritt umso stärker auf, je kleiner der Tankdurchmesser und damit je grösser die Wärmeleitung durch die Tankwand ist. Voraussetzung für diesen Ablauf ist ein niedriger Füllstand im Tank, der den Wärmekontakt zwischen Flamme und Tankwand erhöht. Die maximal mögliche Auswurfmenge des Produkts bleibt deshalb geringer als beim klassischen Boil Over.

#### *Massnahmen*

Dieser Effekt entsteht durch äussere Wärmeeinwirkung. Erstes Ziel der Bekämpfung ist deshalb die Ausschaltung dieser Wärmequelle durch einen konzentrierten Löschangriff auf den Bassinbrand. Wo möglich, sind die umliegenden Tanks zu kühlen. Wichtig ist dabei, dass kein zusätzliches Wasser in die erwärmten Tanks eingebracht wird.

## **3.5 Weitere Szenarien**

Die weiteren Ereignisse aus dem Szenarienbaum sind für die Ausmasseseinschätzung nicht relevant und höchstens in Ausnahmefällen bei einer Risikoermittlung näher zu untersuchen. Es handelt sich um:

### **3.5.1 Tankexplosion (Nr. 2)**

Bei einer allfälligen Zündung des verdämmten Gasvolumens in einem Tank, z.B. anlässlich einer Tankkrevision oder durch Überhitzung eines beinahe leeren Tanks, kann es zur Explosion eines Tanks kommen. Explosionen erfolgen meistens als chemische Explosionen, bei denen sich das reagierende Gasgemisch durch Wärmeabgabe rasch ausdehnt. Häufig wird als Folge einer Tankexplosion das Tankdach weggesprengt und oftmals das vorhandene Lagergut entzündet, so dass ein Tankbrand (Nr. 4, vgl. unten) entsteht. Die Auswirkungen der Explosion an sich beschränken sich in der Regel auf das eigentliche Betriebsareal und sind deshalb für die Ausmasseseinschätzung nicht relevant.

Zu beachten ist auch die Möglichkeit der *Explosion des Speichers von Benzindämpfen einer Gaspendingung*. Benzingaspendingungen in Tankanlagen fangen anfallende Benzindampfüberschüsse bei täglichen und saisonalen Temperaturschwankungen oder verdrängte Benzindämpfe bei Benzinumlagerungen auf. Diese Benzindämpfe werden zunächst in einem grossen Puffertank gespeichert. In der Regel handelt es sich um übersättigte Gemische. Überschüssige Benzindämpfe werden verflüssigt. Dieser Gaspuffertank kann infolge Überhitzung explodieren. In einem solchen Fall können wegfliegende Trümmerteile die umliegenden Einrichtungen beschädigen. Es ist in der

Regel jedoch nicht mit grösseren Schäden ausserhalb des Betriebsareals zu rechnen.

### **3.5.2 Tankbrand (Nr. 4)**

Wird ein Tank beschädigt und entzündet sich anschliessend das Lagergut, so kann ein Tankbrand entstehen. Die Schadenwirkung durch die resultierende Wärmestrahlung beschränkt sich auf die unmittelbare Umgebung des Tanks und ist geringer als die Wirkung durch den Brand des zugehörigen Bassins. Eine Gefährdung von Personen ist nur innerhalb einer Distanz von weniger als 100 m möglich. Zudem besteht wegen der trägen Abläufe bei einem Tankbrand (langsame Entwicklung der maximalen Wärmestrahlung) die Möglichkeit, das Gefahrengebiet rechtzeitig zu verlassen. Ein Tankbrand kann durch einen gezielten Einsatz der Feuerwehr mit ausreichend Löschmittel und Kühlwasser gelöscht werden, ohne dass sich Folgeszenarien (insbesondere der Bassinbrand) entwickeln. Der Tankbrand ohne Folgeszenarium ist wegen der geringeren Auswirkungen gegenüber dem Bassinbrand von untergeordneter Bedeutung und deshalb für die Ausmasseseinschätzung nicht relevant.

### **3.5.3 Tank- und Bassinbrand (Nr. 14)**

Der Tank- und Bassinbrand stellt eine Kombination von zwei Einzelereignissen dar. Das Schadenausmass besteht vor allem in der Gefährdung von Personen durch die Wärmestrahlung. Da ein brennender Tank in einem brennenden Bassin nur eine geringe zusätzliche Einwirkung in der Umgebung darstellt, wird auf die separate Berechnung dieses kombinierten Ereignisses in der Ausmasseseinschätzung verzichtet. Massgebend ist der Bassinbrand.

### **3.5.4 Versickern im Untergrund (Nr. 26)**

Durch ein undichtes Bassin oder durch Auslaufen von Produkten auf einen durchlässigen Boden ausserhalb der Anlage kann eine Verunreinigung von Boden oder Grundwasser auftreten. Bei einem undichten Bassin handelt es sich jedoch in der Regel um kleine Mengen, die in den Boden eindringen können. Je nach Bodenverhältnissen breitet sich das ausgelaufene Produkt unterschiedlich schnell aus. Bei undurchlässigen Böden ohne Grundwasservorkommen, wie sie häufig bei Tankanlagen vorkommen, kann normaler-

weise von einer so langsamen Ausbreitung ausgegangen werden, dass kaum Grundwasservorkommen in grösserer Entfernung von der Anlage gefährdet sind. Eine erhebliche Verschmutzung von Grundwasser oder Boden ausserhalb der Anlage durch Versickern im Untergrund ist deshalb wenig wahrscheinlich. Zudem können Grundwasserverunreinigungen bereits durch das Szenarium "Auslaufen" abgedeckt werden. Kann deshalb durch die vorhandenen Sicherheitsmassnahmen ein rasches Erkennen und Beheben einer Undichtigkeit gewährleistet werden und ist die Bassinkonstruktion auf ihre Funktionstüchtigkeit hin geprüft worden, so ist dieses Szenarium für die Ausmasseseinschätzung nicht relevant. Das Ereignis Versickern im Untergrund kann dann für die Ausmasseseinschätzung vernachlässigt werden.



## 4 Schadenausmass beim Szenarium "Bassinbrand"

### 4.1 Massgebendes Ereignis

Ein Bassinbrand tritt gemäss Szenarienbaum auf:

- wenn sich ein Produkt im Tank entzündet und dieser anschliessend versagt, so dass das brennende Lagergut in das Bassin auslaufen kann (Ereignisabfolge: Nr. 2-4-6-10), oder
- wenn nach einem Leck in einem Tank Lagergut ausläuft und sich anschliessend im Bassin entzündet (Ereignisabfolge: Nr. 3-7-10).

Massgebend für die Auswirkungen ist die Hitzestrahlung des Bassinbrandes. Für dieses Szenarium wird davon ausgegangen, dass ein Bassin auf seiner ganzen Fläche (ohne Tankgrundflächen) mit brennendem Lagergut bedeckt ist. Die eigentliche Auslaufmenge spielt nur dann eine Rolle, wenn in einem Bassin zusätzliche (niedere) Trennmauern vorhanden sind, die die Ausbreitung des Leckgutes über die ganze Bassinfläche verhindern können. Massgebend ist immer der Nutzinhalt des grössten Tanks eines Bassins. Bei der Festlegung des massgebenden Bassins ist einerseits die Fläche und andererseits die Distanz zu möglicherweise gefährdeten Personen ausschlaggebend. Je nach Anlage sind mehrere Rechnungen mit verschiedenen Bassins durchzuführen. Ein Bassinbrand ist dann relevant, wenn sich innerhalb von ca. 150 m um das Bassin Personen befinden, die nicht zum Betriebsareal gehören (z.B. Anwohner, Besucher einer Veranstaltung, Sporttreibende, Personen auf Verkehrswegen, etc.).

### 4.2 Berechnung der Hitzestrahlung

Mit dem Zylinder-Flammenstrahlungsmodell [5, 10, 15] kann die Hitzestrahlung in einem bestimmten Abstand zum Brandzentrum bzw. zum Bassinrand berechnet werden. Die Bassinfläche wird dabei durch einen flächengleichen Kreis dargestellt. Basis für die Berechnungen bildet die Bassinfläche sowie die Strahlungsenergie pro Fläche (Strahlungsdichte) des jeweiligen Stoffes [13]. Bei den meisten Bassinbränden werden die Flammen durch Russbildung bis zu 50% abgeschirmt. Es kann für alle betrachteten Mineralölprodukte in guter Näherung eine einheitliche Strah-

lungsenergie von  $84 \text{ kW/m}^2$  angenommen werden, so dass bei der Berechnung der Wirkungsradien nicht mehr nach dem brennenden Produkt unterschieden werden muss (vgl. Abb. 4.1).

### 4.3 Abschätzung der Auswirkungen

Massgebend für das Schadenausmass ist der Indikator  $n_1$  (Tote). Verletzte werden auf Stufe Kurzbericht nicht berücksichtigt. Ebenso ist der Indikator  $n_6$  (Sachschäden) bei Hitzestrahlung normalerweise nicht relevant. Für die Einsatzkräfte kann zusätzlich die sogenannte Schmerzgrenze, d.h. derjenige Abstand, wo die Hitzestrahlung noch  $5 \text{ kW/m}^2$  erreicht, von Bedeutung sein. Bei diesem Wert empfindet ein Mensch nach 10-20 Sekunden Schmerzen [3]. Der Wert kann deshalb einen Anhaltspunkt für den Umkreis darstellen, in dem Menschen von der Hitzestrahlung eines Bassinbrandes betroffen sein können.

Beim Brand einer Lache ist die Hitzestrahlung relativ lange Zeit konstant. Für die Berechnung wird angenommen, dass sich alle betroffenen Personen im Freien aufhalten (ohne Gebäudeschutz), dass sie aber nur in den ersten 30 Sekunden betroffen werden, da sie spätestens nach dieser Zeit geflüchtet sind. Unter diesen Annahmen ergeben sich folgende Wirkungsradien auf den Menschen [17]:

1%-Letalität	bei $15 \text{ kW/m}^2$
50%-Letalität	bei $24 \text{ kW/m}^2$
99%-Letalität	bei $57 \text{ kW/m}^2$

Die Auswirkungen der Hitzestrahlung auf den Menschen, wie sie in diesem Bericht berechnet werden, beruhen auf der beobachteten Letalität bei Nuklearexplosionen [17] und einer Auswertung von Unfallbeispielen mit Kohlenwasserstoffbränden [11]. Als gute Näherung für die Ausmasseschätzung hat sich daraus das vorliegende Modell auf der Basis einer Probitfunktion nach Eisenberg [17] mit der Expositionszeit von 30 Sekunden und den drei Wirkungsradien mit konstanter Letalität ( $R_1$  für 1% Letalität,  $R_{50}$  für 50% Letalität,  $R_{99}$  für 99% Letalität) ergeben.

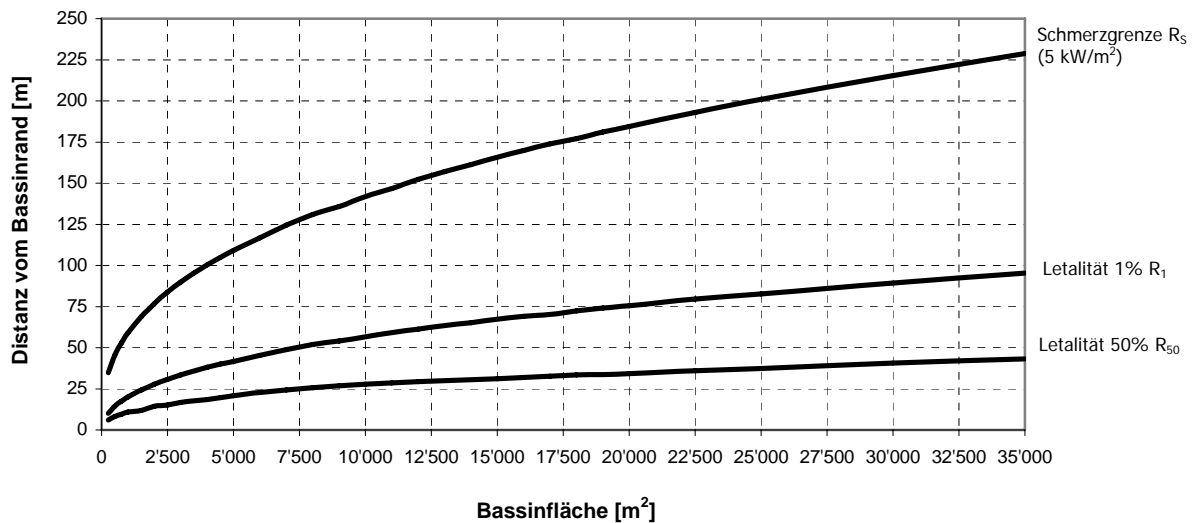


Abb. 4.1: Letalitätsradien  $R_1$ ,  $R_{50}$  und Schmerzgrenze  $R_s$  ab Bassinrand in Abhängigkeit von der betrachteten Bassinfläche (Näherung für die Treibstoffe Benzin, Kerosin, Dieselöl und Heizöl)

Die Letalitätsradien lassen sich in Abhängigkeit von der Bassingrösse aus der Abb. 4.1 herauslesen, wobei der 99% Letalitätsradius für die betrachteten Bassinflächen immer kleiner als 20 m ist und deshalb nicht dargestellt wird.

Diese Radien sind nun auf die Umgebung des jeweiligen Bassins zu übertragen. Anschliessend ist die Anzahl der betroffenen Personen abzuschätzen (anhand einer Begehung, eines Zonenplans oder bei Wohngebäuden auch über die Einwohnerkontrolle der Gemeinde). Mit diesen Angaben kann das Schaden ausmass für den Bassinbrand berechnet werden (vgl. Beispiel 1).

Für genauere Abklärungen, z.B. im Rahmen einer Risikoermittlung, sind auch detailliertere Modelle entwickelt worden. So finden sich z.B. im Green Book von TNO [19] Formeln, die spezifisch für Kohlenwasserstoffbrände entwickelt wurden und die Wirkung der Strahlung auf den Menschen unter Berücksichtigung von Kleiderschutz und Fluchtmöglichkeit im Detail beschreiben. Diese Berechnungen sind rein rechnerisch und wegen der Erhebung der notwendigen (häufig jedoch nur ungenau bekannten) Grundlegenden wesentlich aufwändiger als die vorgeschlagene Ausmassschätzung und werden deshalb als für den Kurzbericht kaum geeignet beurteilt.

---

## **Beispiel 1: Bassinbrand (Nr. 10)**

Eine Anlage besteht aus 16 Tanks, die auf 4 Bassins verteilt sind. Das grösste Bassin weist eine Fläche von 5'500 m<sup>2</sup> (ohne Tankgrundflächen) auf. Es besitzt keine Trennwände, sodass sich ausgelaufenes Produkt über die ganze Fläche ausbreiten kann.

Mit dieser Fläche werden im Brandfall gemäss Abb. 4.1 die folgenden Letalitätsradien erreicht:

$R_{50} = 22 \text{ m}$  (Berechnung der Anzahl Toten mit  $F = 0.65$ )

$R_1 = 45 \text{ m}$  (Berechnung der Anzahl Toten mit  $F = 0.15$ )

Schmerzgrenze  $R_S = 115 \text{ m}$  (für Einsatzkräfte wegen Evakuierung relevant)

Die Anlage liegt in der Nähe einer Wohnsiedlung und neben einer regionalen Eisenbahnlinie. Der Abstand vom Bassinrand zum nächstgelegenen Wohnhaus (12 Personen) beträgt 40 m, drei weitere Wohnbauten ( $3 \times 15 = 45$  Personen) liegen innerhalb eines Radius von 100 m, die Eisenbahnlinie (Durchschnittsbelegung = 50 Personen) ist nur gerade 30 m entfernt.

Für den Indikator  $n_1$  (Tote) gilt also:

Innerhalb des Radius  $R_{50}$  (= 22 m) sind keine Personen betroffen.

Zwischen  $R_{50}$  (= 22 m) und  $R_1$  (= 45 m) befinden sich  $12 + 50 = 62$  Personen.

Die Gesamtanzahl Tote berechnet sich daraus zu  $62 \times 0.15 = 9.3$  Tote.

Die Umrechnung der Anzahl Toten zum Störfallwert erfolgt mit Abb. 8.1 (oder mit den Formeln):

Störfallwert =  $0.3 \times \log(\text{Anzahl Tote}) = 0.3 \times \log(9.3) = 0.29$ .

### **Ergebnis:**

Der maximale Störfallwert liegt mit 0.29 knapp unter 0.3. Damit muss normalerweise keine Risikoermittlung für das Szenarium Bassinbrand erstellt werden. Bei einer Vergrösserung der Wohnbevölkerung (z.B. durch verdichtetes Bauen) ist aber die Situation neu zu überprüfen.

### **Folgerungen:**

Da die Eisenbahnlinie nahe an der Anlage liegt, ist für den Ereignisfall klarzustellen, dass die gegenseitige Information durch die jeweiligen Einsatzpläne oder andere geeignete Mittel gewährleistet ist und dass die Einsatzkräfte über die notwendigen Massnahmen instruiert sind.

Die Schmerzgrenze liegt bei 115 m. Im vorliegenden Beispiel befinden sich 3 Wohnbauten mit insgesamt 45 Personen innerhalb dieser Grenze. Es ist somit sicherzustellen, dass diese Personen bei einem Störfall rechtzeitig alarmiert werden.

Falls es sich bei den nächstgelegenen Bauten um schwer evakuierbare Gebäude wie Spitäler oder Altersheime handelt, ist eine allfällige Evakuierung der anwesenden Personen in die Einsatzpläne einzubeziehen.

---

## 5 Schadenausmass beim Szenarium "Auslaufen"

### 5.1 Massgebende Ereignisse

#### 5.1.1 Voraussetzungen

Der massgebende Schaden für das Szenarium "Auslaufen" ist die Verschmutzung eines Oberflächengewässers. In Ausnahmefällen können auch die Auswirkungen auf Grundwasser oder Trinkwasserfassungen von Bedeutung sein.

Damit eine Oberflächengewässerverschmutzung nach einem Auslaufen auftreten kann, müssen folgende Randbedingungen erfüllt sein:

- das Areal weist eine Betriebskanalisation auf, die direkt oder indirekt in ein Oberflächengewässer führt (Ereignis 21) oder
- das Areal weist versiegelte Flächen oder eine entsprechende Topografie auf, so dass ein Produkt oder Gemisch oberirdisch in ein Oberflächengewässer gelangen kann (Ereignis 22).

Falls die Verunreinigung eines Oberflächengewässers oder von Grundwasser ausgeschlossen werden kann, sind die Ereignisse 21 und 22 nicht relevant. Die Ausmassschätzung kann dann mit dem Kapitel 6 (Explosion) fortgesetzt werden.

#### 5.1.2 Abfliessen in die Kanalisation (Nr. 21)

Ein Abfliessen in die Kanalisation ist hauptsächlich durch drei Ereignisabfolgen möglich:

- wenn nach einem Leck in einem Tank Produkt in das Bassin läuft und von dort z.B. über die Bassinentwässerung in die Betriebskanalisation gelangt. Ist diese direkt oder indirekt (z.B. über einen Ölabscheider) mit einem Oberflächengewässer verbunden, kann eine Verunreinigung dieses Gewässers auftreten (Abfolge 3-8-21);
- wenn nach einem Leck in einem Tank Produkt über den Bassinrand ausläuft (z.B. Freistrahler oder Überschwappen) oder bei einem Umladevorgang freigesetzt wird und dann über die Arealentwässerung in die Betriebskanalisation gelangt (Abfolge 3-8-20-21);

- wenn sich nach einem Leck in einem Tank das Bassin mit Produkt füllt und anschliessend Schaum und Löschwasser zur Verhinderung oder Bekämpfung eines Bassinbrandes hinzugefügt werden, so dass die Bassinkapazität nicht mehr ausreicht. Schaum läuft daraufhin über den Bassinrand in das Areal und kann anschliessend in die Betriebskanalisation gelangen (Abfolge 3-7-10-(17)-20-21).

#### 5.1.3 Oberflächliches Abfliessen (Nr. 22)

Prinzipiell sind die gleichen Ereignisabfolgen wie beim Abfliessen in die Kanalisation möglich. Der Unterschied liegt darin, dass ausgelaufenes Produkt oder ein Gemisch nicht in die Betriebskanalisation gelangen, sondern sich über die Oberfläche ausbreiten (Ereignisabfolgen 3-8-20-22 und 3-7-10-(17)-20-22).

### 5.2 Abschätzung der Auslaufmengen

#### 5.2.1 Vorgehen

Beim Szenarium "Auslaufen" wird anhand der massgebenden Ereignisse diejenige Produktmenge bestimmt, die aus einem Tank oder einer Rohrleitung ausläuft. Diese Menge wird sich je nach Anlage auf unterschiedliche Art weiter ausbreiten. Ein Teil wird in der Anlage zurückgehalten (Bassin, Rückhaltevolumen, Geländemulden, Boden), der Rest verlässt die Anlage z.B. via Kanalisation oder Oberfläche. Dieser Rest kann ein Gewässer oder eine ARA verunreinigen und definiert so das eigentliche Schadenausmass.

Wenn das Oberflächengewässer in ein Grundwasser infiltrieren kann, besteht zusätzlich die Gefahr einer Trinkwasserverunreinigung. Das Schadenausmass lässt sich dann über den Indikator "Personenmonate" (= Dauer des Ausfalles der Trinkwasserfassung x betroffene Personenzahl) berechnen. Dieses Schadenausmass hängt von der Grösse der Verunreinigung und der Fassungsmenge ab, im wesentlichen also von der ausgelaufenen Produktmenge, den Bodenverhältnissen im betroffenen Bereich (Versickerungsverhalten, Strömungsverhältnisse), der Distanz zwischen

Anlage und Trinkwasserfassung sowie der Anzahl angeschlossener Personen.

Liegt keine Trinkwasserfassung im Gefahrenbereich, dann kann die Verunreinigung von nutzbarem Grundwasser mittels potentieller Wasserverbrauchszahlen abgeschätzt werden, um eine Beurteilung für unterirdische, nicht genutzte Gewässer zu erhalten [1].

Das resultierende Schadenausmass hängt vor allem von den lokalen Verhältnissen ab, die von Anlage zu Anlage grosse Unterschiede aufweisen. Durch die vorliegende Definition der massgebenden Ereignisse wurde eine grundsätzliche Verallgemeinerung erreicht. Dies entbindet jedoch den Anlagebetreiber nicht davon, die Gültigkeit der Szenarien auf seiner Anlage zu überprüfen und gegebenenfalls eigene Abschätzungen anzuwenden.

### 5.2.2 Abfliessen in die Kanalisation (Nr. 21)

#### Fehlmanipulation an der Bassinentwässerung

Ein direktes Abfliessen in die Kanalisation kann nach einer Fehlmanipulation an der Bassinentwässerung

geschehen, wenn sich gleichzeitig im Bassin ausgelaufenes Produkt befindet. Die Menge an ausgelaufenem Produkt in der Kanalisation ist in diesem Fall abhängig von der Dauer der (fehlerhaften) Entwässerung und von der Pumpenleistung in dieser Zeit. Für den worst case wird eine Zeit von 15 Minuten angenommen, während der ein Mineralölprodukt ungehindert (unentdeckt oder unbehindert) in die Kanalisation gepumpt (geleitet) wird. Spätestens nach dieser Zeit wird die Fehlmanipulation erkannt und gestoppt. Die maximale Produktmenge in der Kanalisation ergibt sich somit zu:

$$\text{Max. Menge in der Kanalisation [m}^3\text{]} = 15 \text{ Min.} \times \text{Pumpleistung (bzw. Abfluss) [m}^3\text{/Min.]}$$

Der weitere Ausbreitungsweg des ausgelaufenen Produkts hängt von der Konzeption der Betriebskanalisation und den baulichen Rückhaltmassnahmen im Areal ab. Ist eine Sperrung der Entwässerung oder die Schliessung von Schiebern möglich, kann das potentielle Schadenausmass entsprechend reduziert werden.

## Beispiel 2: Abfliessen in die Kanalisation (Nr. 21)

#### Fehlmanipulation an der Bassinentwässerung

Eine Anlage entwässert ihre 4 Bassins über Pumpleitungen mit manuellen Schiebern, die normalerweise geschlossen und gesichert sind. Bei einer Fehlmanipulation dieser Bassin-Entwässerung wird ausgelaufenes Lagergut in die Kanalisation gepumpt. Durch die vorhandenen Sicherheitsmassnahmen ist ein Erkennen der Fehlmanipulation innerhalb von 15 Minuten gewährleistet. Mit der vorhandenen Pumpleistung von 40 l/s berechnet sich die maximale Menge Mineralölprodukt in der Kanalisation deshalb wie folgt:

$$\text{Menge [m}^3\text{]} = \text{Dauer} \times \text{Pumpleistung} = 15 \text{ Minuten} \times 40 \text{ l/s} = 15' \times 60'' \times 0.040 \text{ m}^3/\text{s} = 36 \text{ m}^3$$

Die Entwässerungsleitung der Bassins führt über einen Ölabscheider mit 30 m<sup>3</sup> Speichervolumen. Diese Menge bleibt im Speicher zurück und kann später abgepumpt werden. Die restlichen 6 m<sup>3</sup> Mineralöl verschmutzen den mit dem Überlauf des Ölabscheiders verbundenen Bach. Die maximal verunreinigte Fläche ergibt sich zu:

$$\text{max. Fläche [km}^2\text{]} = \text{Auslaufmenge [m}^3\text{]} \times 0.0567 \text{ [km}^2\text{/m}^3\text{]} = 0.340 \text{ [km}^2\text{]} \quad (\text{gemäss Abschn. 5.3})$$

Die Umrechnung des Ausmasses in den Störfallwert erfolgt mit Abb. 8.1 oder mit der Formel:

$$\text{Maximaler Störfallwert } n_3 \text{ für ein oberirdisches Gewässer} = \text{ca. } 0.16$$

#### Ergebnis:

Der maximale Störfallwert liegt unter 0.3, es sind somit keine weiteren Abklärungen notwendig.

### 5.2.3 Oberflächliches Abfließen (Nr. 22)

#### Freistrahл über Bassinrand bei Tankleck

Tritt bei einem Tank ein Leck auf, das höher liegt als die Bassinmauerkrone, ist es denkbar, dass der Freistrahл über die Bassinmauer reicht. Als Folge davon wird sich das Produkt oberflächlich in der Anlage ausbreiten.

Aufgrund dieses Szenariums wurden in den CARBU-RA-Richtlinien [4] Vorschriften für die minimalen Abstände zwischen Tank und Bassinmauer aufgestellt. Das Szenarium Freistrahл über Bassinrand ist also vor allem dann relevant, wenn diese Abstände unterschritten sind.

Für die Berechnung des Ausmasses muss zuerst die maximale Menge an ausgelaufenem Produkt abgeschätzt werden. Diese ist grundsätzlich abhängig von der Leckgrösse, der Höhe der Bassinmauer, dem Abstand des Tanks zur Bassinmauer und der Höhendifferenz zwischen Leck und Füllstand im Tank. Mit dem vereinfachten Modell der Wurfparabel kann bei einer bestimmten Anlage die maximale Menge, die über die Bassinmauer gelangt, abgeschätzt werden (vgl. Beispiel 3a).

Die weitere (oberflächliche) Ausbreitung des ausgelaufenen Produkts hängt wesentlich von der betrachteten Anlage (Topografie, Versiegelungsgrad, Kanalisationsnetz, etc.) und den vorhandenen Eingriffsmöglichkeiten ab und muss für jede Anlage separat abgeschätzt werden.

#### Überschwappen

Beim plötzlichen Versagen eines Tanks entsteht bei genügend hohem Pegelstand eine Flutwelle, die sich in Richtung der Bassinmauer bewegt. Trifft die Flutwelle mit einer gewissen Geschwindigkeit auf die Bassinmauer, kann durch Hochspritzen ein Teil der ausgelaufenen Menge über den Bassinrand hinausfließen.

Der zeitliche Verlauf des Hochspritzens an der Bassinmauer ist je nach Art des Tanklecks (z.B. Totalversagen, Aufplatzen einer Schweissnaht oder Aufreissen eines Mannlochs) verschieden. Im ungünstigsten Fall, bei einem Totalversagen, fallen ca. die Hälfte der hochspritzenden Menge auf der Aussenseite der Bas-

sinmauer zu Boden [27]. Da die hochspritzende Menge höchstens das Volumen der Frontwelle umfasst, beträgt die überschwappende Treibstoffmenge weniger als  $1 \text{ m}^3$  bei vorschriftsmässigen Abständen und Bassinkonstruktionen.

Das Beispiel zeigt, dass dieses Szenarium von untergeordneter Bedeutung ist, selbst dann, wenn sich direkt hinter der Bassinmauer ein Oberflächengewässer oder ein Einlauf in eine Kanalisation befindet.

#### Leckage bei Umladevorgang oder aus Rohrleitung

Tritt bei einem Umladevorgang ein Leck an einer Leitung auf, berechnet sich die maximale Auslaufmenge aus der momentanen Pumpleistung in der Leitung oder dem statischen Druck und der Zeitdauer, bis die Pumpen abgestellt sind oder das Leck abgedichtet ist. Aufgrund der vorhandenen Sicherheitsmassnahmen (Ölabscheider, Rückhaltevolumen) und der topografischen Verhältnisse lässt sich in der jeweiligen Anlage abschätzen, welche Produktmenge sich oberflächlich im Areal ausbreitet und allenfalls die Anlage verlässt (vgl. Beispiel 3b).

#### Überlaufen des Bassins

Das Überlaufen eines Bassins aufgrund eines Tanklecks ist bei vorschriftsgemässen Bassinvolumen nicht möglich, da immer mindestens das Nutzvolumen des grössten Tanks aufgefangen werden muss. Ein Überlaufen ist nur möglich, wenn bei einem Tankleck zusätzliches Volumen, z.B. in Form von Schaum, Lösch- oder Kühlwasser in das Bassin eingebracht wird. Die Gefahr des Überlaufens besteht also vor allem dann, wenn es sich um kleine Bassins mit wenig Volumenreserve oder um grosse Bassins mit vielen Tanks handelt, die in einem Brandfall gekühlt werden. Die Überlaufmengen sind deshalb aufgrund der vorhandenen Bassins und des Löschkonzeptes (inkl. einsetzbare Wassermengen) für jede Anlage separat abzuschätzen.

Für die Abschätzung der Auswirkungen ist von einem Leck im grössten vollen Tank des Bassins mit der kleinsten Volumenreserve auszugehen. Das ausgelaufene Produktvolumen ist zu ergänzen mit dem Schaumvolumen (Brandverhütung) und dem Kühlwasservolumen für die restlichen Tanks im Bassin. Als Annahme für die Dauer des Löschmitteleintrages ist

von einer Dauer von 1 Stunde auszugehen. Als Einsatzzeit der Feuerwehr können 2 Stunden angenommen werden, beim Kühlwassereintrag ist mindestens eine Viertelstunde<sup>D</sup> anzunehmen. Die Differenz zwischen dem Gesamtvolumen des ausgelaufenen Produkts, eingebrachtem Löschmittel und Kühlwasser und dem Bassinvolumen ergibt die Überlaufmenge aus dem Bassin.

### 5.3 Abschätzung der Auswirkungen

#### Oberirdisches Gewässer (Indikator n<sub>3</sub>)

Ein Oberflächengewässer ist dann verunreinigt, wenn die Oberflächenbelastung grösser als 15 g Mineralölprodukt pro m<sup>2</sup> (= 0.015 kg/m<sup>2</sup>) beträgt (unabhängig von der Art des Produkts). Dieser Grenzwert [1]<sup>E</sup> erlaubt aufgrund der geschätzten Produktmenge im Gewässer und der Dichte des Produkts eine Berechnung der verschmutzten Gewässeroberfläche. Der Einfachheit halber wird für die Stoffdichte einheitlich der Durchschnittswert von 850 kg/m<sup>3</sup> eingesetzt. Die Formel zur Berechnung der verschmutzten Oberfläche lautet somit wie folgt:

$$\begin{aligned} \text{Fläche [km}^2\text{]} &= (\text{Auslaufmenge} \times \text{Stoffdichte}) / \\ \text{Grenzwert} &= \text{Auslaufmenge [m}^3\text{]} \times 0.0567 \text{ [km}^2\text{/m}^3\text{]} \\ \text{mit Stoffdichte} &= 850 \text{ [kg/m}^3\text{]} \text{ und} \\ \text{Grenzwert} &= 0.015 \text{ [kg/m}^2\text{]}. \end{aligned}$$

Da Mineralölprodukte auf der Wasseroberfläche schwimmen, kaum eine Durchmischung stattfindet und keine wesentlichen chemischen und biologischen Umwandlungen auftreten, ist die Verunreinigung eines Gewässervolumens nach [1] nicht relevant und wird deshalb vernachlässigt. Die obenstehende Formel für die Verunreinigung einer Gewässeroberfläche durch Kohlenwasserstoffe kann somit allgemein für Gewässer angewendet werden.

#### Unterirdisches Gewässer (Indikator n<sub>4</sub>)

Die Verunreinigung von unterirdischen Gewässern wird gemäss BUWAL-Richtlinie [1] auf die Beeinträchtigung von Trinkwasser bezogen. Als massgebend für die Verunreinigung von Trinkwasser gilt die Lebens-

mittelverordnung (LMV). Der Grenzwert für Mineralölprodukte beträgt 20 mg Kohlenwasserstoffe pro m<sup>3</sup> Wasser. Über den spezifischen Wasserverbrauch pro Person (Annahme: 400 l/Tag = 12 m<sup>3</sup>/Monat) [16] kann die Verunreinigung bzw. der Ausfall einer Trinkwasserfassung in Personenmonaten [PM] wie folgt berechnet werden:

Personenmonate

$$\begin{aligned} &= (\text{Ausgelauf. Produktvolumen} \times \text{Stoffdichte}) / \\ &\quad (\text{Wasserverbrauch} \times \text{Grenzwert}) \\ &= \text{Ausgelauf. Produktvolumen [m}^3\text{]} \times 3.5 \times 10^6 \text{ [PM/m}^3\text{]} \end{aligned}$$

<sup>D</sup> Da Tanks in brennenden Bassins nicht gekühlt werden, wird von einem irr tümlichen Zufluss von Kühlwasser mit der Dauer einer Viertelstunde ausgegangen. Gekühlt werden gemäss CRL 2.1 a) F6 exponierte Tanks, insbesondere in benachbarten Teilbassins.

<sup>E</sup> Vgl. Fussnote B, Kap. 2.3.2

## Beispiel 3: Oberflächliches Abfliessen (Nr. 22)

### Beispiel 3a: Freistrahle über Bassinrand bei Tankleck

Ein voller Tank von 20 m Höhe und 20 m Durchmesser (Grundfläche = 315 m<sup>2</sup>) leckt oberhalb der Bassinmuerhöhe, die 4 m beträgt. Die Bassinmuer ist 5 m vom Tank entfernt, der Abstand entspricht damit den CARBURA-Richtlinien (C 2.1.5). Mit dem Modell der Wurfparabel (Verhältnis Lecköffnung zu Pegelstand < 1/100) ergibt sich die maximale Auslaufmenge ins Areal ausserhalb der Bassinmuer bei einer Leckposition von 6.5 m (= halber Muerabstand + Muerhöhe). Durch den Freistrahle gelangt das folgende maximale Produktvolumen über die Bassinmuer hinaus in das Areal:

$$\begin{aligned} \text{maximal auslaufendes Produktvolumen [m}^3\text{]} &= (\text{max. Pegelstand} - \text{Muerabstand} - \text{Muerhöhe}) \times \text{Tankgrundfläche} \\ &= (20 - 5 - 4) \times 315 = 3465 \text{ [m}^3\text{]} \end{aligned}$$

Innert 1 / 6 / 12 Stunden auslaufendes Produktvolumen bei einer Leckgrösse von 0.0001 m<sup>2</sup> = 1 cm<sup>2</sup>:

$$V(6 \text{ h}) = 35 \text{ [m}^3\text{]} \qquad V(12 \text{ h}) = 70 \text{ [m}^3\text{]}$$

Je nach weiterer Ausbreitung im Areal (Topografie, Versiegelung), den vorhandenen Sicherheitsmassnahmen (Rückhaltevolumen) und der Umgebung der Anlage (Distanz zu Gewässer) muss das Schadenausmass für jede Anlage separat abgeschätzt werden.

### Ergebnis:

Die max. Auslaufmenge ergibt sich im ungünstigsten Fall (worst case), wenn der Tank voll ist, das kleine Leck sich in ungünstigster Höhe befindet und dennoch die Leckabdichtung bzw. Ablenkung des Flüssigkeitsstrahles ins Auffangbecken über längere Zeit nicht gelingt. Das Szenarium kann insbesondere bei grossen Tanks mit gleichzeitig niedrigen Bassinmuern und geringem Abstand zwischen Tank und Bassinmuer relevant sein. Mit dem Eingreifen der Ereignisdienste mindestens innert einiger Stunden reduziert sich die Auslaufmenge drastisch. Das Problem ist so in den Griff zu bekommen.

### Beispiel 3b: Leckage bei Umladevorgang oder aus Rohrleitung

Eine Anlage weist einen Umschlagplatz auf, wo der Treibstoff über Rohrleitungen aus den Tanks in Camions oder Eisenbahnwaggons gefüllt werden kann. Bei einem Umladevorgang bricht eine Rohrleitung und es fliessen während 10 Minuten insgesamt rund 25 m<sup>3</sup> Heizöl aus. Der Umschlagplatz ist versiegelt und wird über einen separaten Ölabscheider von 20 m<sup>3</sup> Volumen entwässert. Der Überlauf führt direkt in den angrenzenden See. Im Gelände selbst können aufgrund der Topografie zusätzlich zu den 20 m<sup>3</sup> im Ölabscheider oberflächlich 3 m<sup>3</sup> Heizöl zurückgehalten werden. Die restlichen 2 m<sup>3</sup> fliessen oberflächlich in den See und verursachen dort die folgende Verunreinigung:

$$\text{Fläche [km}^2\text{]} = \text{Auslaufvolumen [m}^3\text{]} \times 0.0567 \text{ [km}^2\text{/m}^3\text{]} = 2 \times 0.0567 = 0.113 \text{ km}^2 \quad (\text{nach Kap. 5.3})$$

Die Umrechnung dieser Verunreinigung in den Störfallwert erfolgt mit Abb. 8.1 oder der Formel:

Maximaler Störfallwert  $n_3$  für oberirdische Gewässer = ca. 0.02

### Ergebnis:

Der maximale Störfallwert liegt deutlich unter 0.3, es sind somit keine weiteren Abklärungen notwendig.

### Folgerung:

Hätte die Anlage kein Auffangvolumen in Form eines Ölabscheiders, würden rund 22 m<sup>3</sup> in den See fliessen. Die Verunreinigung wäre rund 11x grösser, womit der Störfallwert auf ca. 0.33 steigen würde. In einem solchen Fall müssten zusätzliche Abklärungen getroffen werden (vgl. auch die Tabelle im Anhang 3).



## 6 Schadenausmass beim Szenarium "Explosion"

### 6.1 Massgebendes Ereignis

Für das Ereignis "Explosion in der Kanalisation" wird davon ausgegangen, dass Benzin aus einem Bassin oder Tank bzw. durch einen Umladevorgang in die öffentliche Kanalisation gelangt. Dies ist möglich, wenn:

- Benzin (z.B. über die Bassinentwässerung) die Betriebskanalisation erreicht und von dort in die öffentliche Kanalisation gelangen kann (Ereignisabfolge Nr. 3-8-21-23);
- sich Benzin über versiegelte Oberflächen in der Anlage ausbreitet und danach direkt oder indirekt (über Betriebskanalisation) die öffentliche Kanalisation erreichen kann (Ereignisabfolge Nr. 3-8-20-21-23).

Wird in einer Anlage kein Benzin gelagert oder kann eine Verbindung von einem Benzintank mit dazugehörigem Bassin oder von einer Umladestelle zur öffentlichen Kanalisation ausgeschlossen werden, so ist dieses Ereignis nicht relevant und muss nicht weiter untersucht werden.

Für Anlagen, in denen das Szenarium "Explosion" relevant ist, wird nachfolgend die Abschätzung der Auswirkungen auf den Menschen aufgezeigt (vgl. auch Beispiel 4), die Auswirkungen auf Infrastrukturen werden als Spezialfall im Kapitel 7.3 behandelt.

### 6.2 Berechnung der Druckwelle

Wenn Benzin in die Kanalisation (oder andere geschlossene Hohlräume wie z.B. Leitungstollen) abfließt, können sich wegen seiner Flüchtigkeit und des tiefen Flammpunktes explosive Benzin-Luft-Gasgemische bilden und sich entlang der Kanalisation ausbreiten. Bei einer nachfolgenden Zündung dieser Gaswolke (z.B. durch elektrische Funken) kann eine starke Druckwelle entstehen, die sich durch Reflexion in den Abwinklungen und Verzweigungen des Kanalnetzes rasch abbaut [6, 18]. Je nach Ort der Explosion kann die Druckwelle jedoch Menschen gefährden.

Das Schadenausmass einer solchen Explosion ist abhängig von der betroffenen Kanalisation (Durchmesser, Länge, Lage und Exposition) und den vorhandenen technischen Sicherheitsmassnahmen innerhalb der Anlage (z.B. Rückhaltebecken, Gasmelder, ex-geschützte Installationen). Die Auswirkungen sind vor allem dann relevant, wenn in der Umgebung der Anlage eine grosse Bevölkerungs- und Bebauungsdichte vorliegt oder wichtige Infrastrukturen vorhanden sind (vgl. auch Kap. 7.3 Spezialfälle mit Sachschäden durch Explosion).

Zwei Szenarien sind zu unterscheiden [18]:

- Bei einem kleinen Kanalisationsrohr (bis ca. 400 mm Durchmesser) mit einem grossen Abstand (> 20 m) zwischen Entlastungsstellen (z.B. Schächte) kann sich bei Zündung von Benzindämpfen eine Detonation bilden, die durch den hohen Anfangsüberdruck von ca. 25 bar zu einer Gefährdung von Personen oder zu erheblichen Schäden an Infrastrukturen führen kann.
- Bei grösseren Kanalisationsrohren erfolgt nach einer allfälligen Zündung der Benzindämpfe eine Explosion mit einem Anfangsüberdruck von max. 7 bar.

In beiden Fällen wird sich der entstehende Überdruck im Freien sehr rasch abbauen (innerhalb weniger Meter), sodass für die Ausmassenschätzung für beide Fälle ein Anfangsüberdruck von 7 bar angenommen werden kann.

### 6.3 Abschätzung der Auswirkungen

Das folgende Diagramm Abb. 6.1 zeigt die Wirkungsradien für drei unterschiedliche Überdrücke in Abhängigkeit vom zündfähigen Volumen in der Kanalisation (nach [6], vgl. auch Beispiel 4).

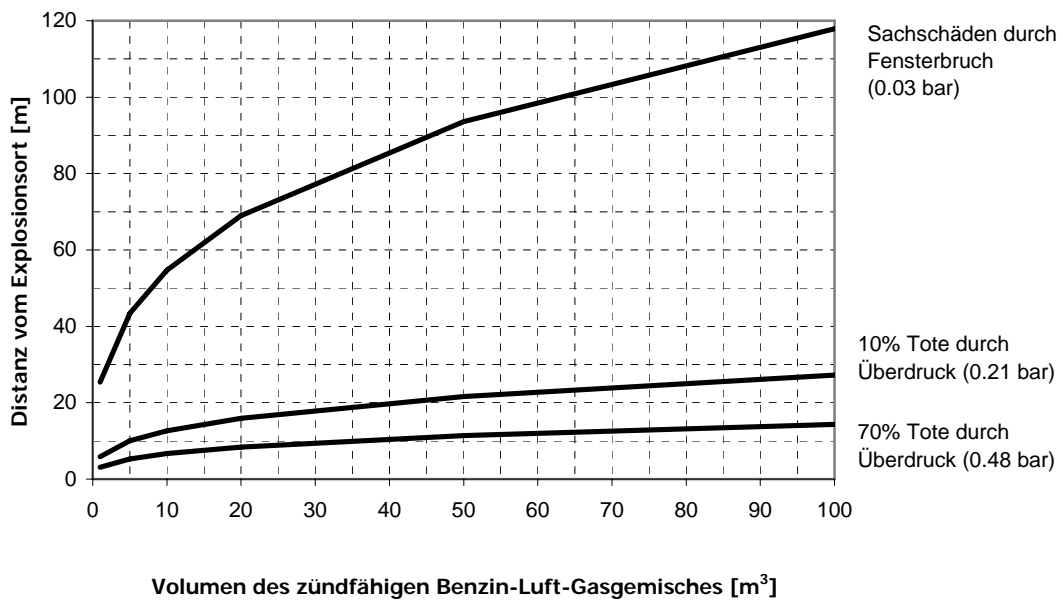


Abb. 6.1: Diagramm zur Bestimmung der Wirkungsabstände für eine Explosion in der Kanalisation

Die Radien  $R_{0,21}$  (Überdruck 0.21 bar) und  $R_{0,48}$  (Überdruck 0.48 bar) sind auf die Umgebung eines möglichen Explosionsortes (bzw. entlang der betroffenen Kanalisation) zu übertragen. Mittels der Personenbelegung kann dann die Anzahl gefährdeter Personen berechnet werden.

Für die Auswirkungen von Druckwellen auf den Menschen kann auf [3] zurückgegriffen werden. Die wichtigsten Werte sind nachfolgend zusammengestellt.

Tab. 6.1: Kriterien für die Abschätzung der Auswirkungen einer Druckwelle auf Menschen [3]

Überdruck [bar]	Auswirkung auf Menschen
1	95% Tote und Verletzte im Freien; 1% Lungenriss
<b>0.48</b>	<b>70% Tote und Verletzte im Freien (Annahme für Ausmasseinschätzung: 70% Tote)</b>
0.34	25% Tote und Verletzte im Freien
<b>0.21</b>	<b>10% Tote und Verletzte im Freien (Annahme für Ausmasseinschätzung: 10% Tote)</b>
0.17	Gehörschäden
0.02-0.03	Verletzungen durch Glassplitter möglich

---

## **Beispiel 4: Explosion in der Kanalisation (Nr. 23)**

In einer Anlage läuft bei einem Umladevorgang Benzin aus. Ein Teil der ausgelaufenen Menge wird in einem Rückhaltebecken aufgefangen, der Rest verlässt über versiegelte Oberflächen das Areal und gelangt in die öffentliche Kanalisation. Ein 100 m langes Teilstück der Kanalisation füllt sich mit Benzindämpfen, die sich entzünden. Das Kanalisationsrohr weist einen Durchmesser von 600 mm auf. Das Volumen des zündfähigen Gas-Luft-Gemisches in der Kanalisation ergibt sich zu:

$$V = 100 \text{ m} \times \text{Querschnittsfläche des Rohres} = 100 \text{ m} \times (0.3)^2 \times \pi = 28.3 \text{ m}^3.$$

Aus Abb. 6.1 ergeben sich die Wirkungsradien zu:  $R_{0.48} = 10 \text{ m}$ ,  $R_{0.21} = 18 \text{ m}$ .

Die öffentliche Kanalisation verläuft in einer Durchgangsstrasse mit Wohnbauten auf beiden Seiten in einer Distanz von 20 m. Innerhalb der Distanz von 10 m befinden sich max. 3 zufällig anwesende Personen, weitere 5 Personen bis 18 m. Für die Ausmasseneinschätzung werden Personen in Gebäuden im Sinne einer konservativen Annahme als im Freien gezählt.

Mit diesen Angaben berechnet sich das Schadenausmass für den Indikator  $n_1$  wie folgt:

Innerhalb des  $R_{0.48}$  befinden sich 3 Personen. Der Letalitätsfaktor beträgt 0.7 (70% Tote). Zwischen  $R_{0.48}$  und  $R_{0.21}$  befinden sich weitere 5 Personen (Letalitätsfaktor 0.1). Die Personen in den Gebäuden befinden sich ausserhalb der 0.21 bar Isobare und fallen somit ausser Betracht.

Anzahl Tote insgesamt:  $(0.7 \times 3) + (0.1 \times 5) = 2.6$  Tote.

Die Umrechnung der Anzahl Toten in den Störfallwert erfolgt mit Abb. 8.1 (oder der Formel):

$$\text{Maximaler Störfallwert } n_1 = 0.3 \times \log(\text{Anzahl Tote}) = 0.3 \times \log(2.6) = 0.12.$$

### **Ergebnis:**

Wegen der geringen Wirkdistanzen ergeben sich Störfallwerte deutlich unter 0.3. Es sind keine weiteren Abklärungen notwendig. Mögliche Sachschäden sind separat abzuklären.

---

## 7 Spezialfälle

### 7.1 Gaswolkenexplosion

#### 7.1.1 Randbedingungen

Die Gaswolkenexplosion ist dann relevant, wenn in einem Umkreis bis ca. 150 m um die Anlage eine grosse Bevölkerungsdichte mit Wohnen oder Gewerbe vorherrscht oder häufig grosse Menschenansammlungen durch Veranstaltungen anzutreffen sind. In diesen Fällen ist eine Abschätzung gemäss folgendem Beschrieb vorzunehmen.

#### 7.1.2 Massgebende Ereignisse

**Verdampfen einer Lache:** Aus ausgelaufenem Benzin kann sich je nach Wetterlage (Temperatur, Sonneneinstrahlung) und Windverhältnissen eine verschieden grosse Gaswolke entwickeln und ausbreiten (vgl. Abb. 7.1). Dieser Prozess wird durch die thermodynamischen Eigenschaften der Flüssigkeit bestimmt. Je höher die Umgebungstemperatur liegt und je näher sie sich beim Siedebereich des Treibstoffes befindet, umso grösser ist der Dampfdruck, d.h. die Flüchtigkeit des Stoffes. Benzin, dessen Siedebereich von ca. 40°C bis 220°C reicht und das zudem einen tiefen Flammpunkt (-20°C) aufweist, kann aus diesen Gründen mit der Luft explosible Gasgemische bilden. Kerosin, Dieselöl und Heizöle sind durch einen viel höher liegenden Siedebereich (ab 140°C) und durch einen höheren Flammpunkt (>30°C) gekennzeichnet.

Im Sommer herrschen höhere Temperaturen. Es ergibt sich damit eine grosse Verdampfungsrate. Im Winter sind durch reduzierte Dauer der Sonneneinstrahlung die Temperaturen niedriger, was geringe Verdampfungsraten bewirkt.

**Zerstäubung nach Rohrleck:** Das Phänomen der Zerstäubung tritt nur bei einer Leckage mit einer engen Lecköffnung auf, ist hingegen bei einem vollständigen Rohrbruch nicht möglich. Es tritt bei allen Mineralölen auf, ist aber nur bei Benzin relevant. Bei einer Zerstäubung bildet sich ohne Windeinfluss eine Tröpfchenwolke, deren Teilchen teilweise verdampfen, während die anderen langsam zu Boden sinken (rain out) und eine Lache bilden. Die Wolke verhält

sich als schwere Gaswolke, ähnlich wie die Verdampfungswolke einer Brenn- oder Treibstofflache.

Das Schadenausmass wird wegen der Kleinheit einer Leckage lokal begrenzt bleiben. Massgebend für das Szenarium Gaswolkenexplosion bleibt die Verdampfung einer Lache.

#### 7.1.3 Abschätzung der Auswirkungen (Hitzestrahlung, Druckwelle)

Die Dispersion der schweren Gaswolke kann mit Modellen für schwere Gase, z.B. mit EFFECTS 2.0/4.0, HGSYSTEM 3.0 oder FLACS abgeschätzt werden.

In Abb. 7.2 sind die geometrischen Masse von möglichen zündfähigen Gaswolken in Abhängigkeit der Verdampfungsfläche dargestellt. Für die Berechnung der maximal zündfähigen Gaswolkengrösse mit dem Programm EFFECTS 2.0 wurden folgende Annahmen getroffen:

Wetterlage im Sommer (D5) mit

Windgeschwindigkeit	5 ms <sup>-1</sup>
Lufttemperatur	20 °C
Pasquill-Stabilitätsklasse	D (neutral)
Bodenrauigkeit	0.3 m

Für die Auswirkungen der Hitzestrahlung einer gezündeten Gaswolke auf die Bevölkerung wird angenommen, dass 50% der anwesenden Personen innerhalb der Wolke tödlich verletzt werden [2]. Personen in Gebäuden sind gemäss [2] nur zu 10% gefährdet. Ausserhalb der Gaswolke können die Auswirkungen der Hitzestrahlung wegen der kurzen Abbranddauer vernachlässigt werden. Es sind keine Menschen gefährdet.

Für die Schadenausmassschätzung durch Hitzestrahlung muss die maximale Ausdehnung einer Gaswolke (nach Abb. 7.1 und 7.2) bestimmt werden. Diese Abmessungen werden durch das Rechteck B x (L+R) angenähert und auf die Umgebung der konkreten Anlage übertragen. Je nach Ausbreitungsrichtung und Exposition ergibt sich ein unterschiedliches Schadenausmass. Für die Ausmassschätzung ist nur die Ausbreitungsrichtung mit dem grössten Schadenausmass relevant.

Die Auswirkungen einer durch Zündung der Gaswolke entstandenen Druckwelle auf Menschen und Infrastrukturen lassen sich mit [6] berechnen. Die Radien der einzelnen Druckniveaus sind von der Verbrennungsenergie, d.h. von der explosiblen Masse, abhängig. Der Anfangsüberdruck für die entstehende

deflagrative Verbrennung im Freien beträgt dabei maximal 0.3 bar [20]. In Abb. 7.2 sind in Abhängigkeit der Verdampfungsfläche (Bassinfläche) die Druckbereiche 0.21 bar (10% Letalität) und 0.17 bar (Gehörschäden) durch die maximalen Entfernungen E resp. D vom Bassinrand dargestellt (Abb. 7.1).

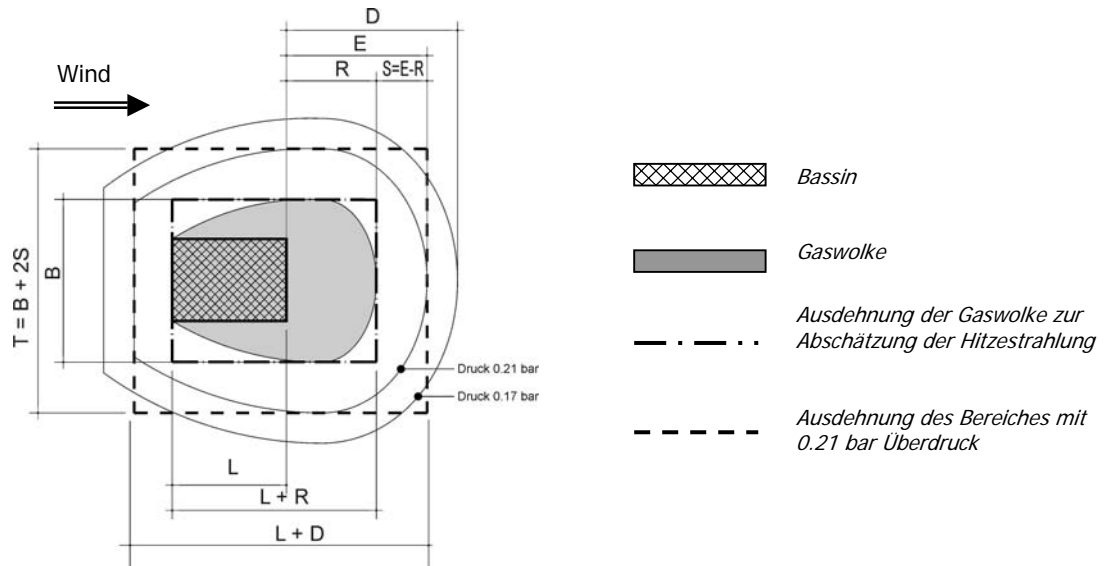


Abb. 7.1: Bildung einer Gaswolke durch Verdampfung aus einem Bassin der Länge L und Ausbreitung der zündfähigen Gaswolke bis in Entfernung R vom Beckenrand. Infolge Zündung entsteht eine teilverdämmte Gaswolkenexplosion mit einer Druckwelle (Entfernung E vom Bassinrand für 0.21 bar, Entfernung D vom Bassinrand für 0.17 bar).

Zündbare Woke: Maximale Breite (B) und Entfernung (R) vom Bassinrand  
 Druckwellen Entfernung E, D und F vom Bassinrand

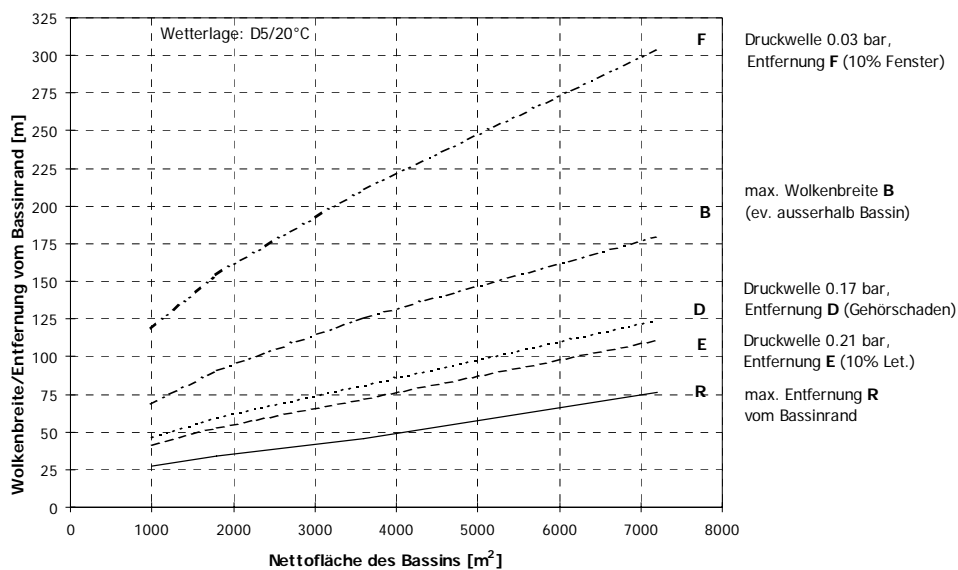


Abb. 7.2: Darstellung der Wolkenbreite B und der maximalen Entfernungen des Wolkenrandes vom Bassinrand R sowie der Druckbereiche E (0.21 bar) und D (0.17 bar)

Für die Schadenausmassschätzung durch Druckwellen muss das Rechteck  $T \times (L+D)$  gemäss Abb. 7.1 anhand Abb. 7.2 bestimmt und dieser Druckbereich auf die Umgebung der konkreten Anlage übertragen werden. Das Schadenausmass ergibt sich als Produkt aus betroffenen Personen in der Fläche und der geltenden Letalität. Der Wind kann aus irgendeiner Richtung wehen. Für die Ausmassschätzung ist daher die Lage der Druckzone mit dem grössten Schadenausmass relevant.

## 7.2 Boil Over

### 7.2.1 Randbedingung

Wenn in einem Tanklager Rohöl, Schweröl, Dieselöl oder Heizöl gelagert werden und sich in einem Umkreis von 300-400 m grössere Menschenansammlungen (z.B. Sportanlagen, Bahnhöfe) oder schwer evakuierbare Gebäude (z.B. Spitäler, Altersheime) befinden, so sind die Auswirkungen dieses Szenariums zu untersuchen.

### 7.2.2 Abschätzung der Auswirkungen

In der Literatur finden sich keine Angaben zur Berechnung des Schadenausmasses. Aus diesem Grund wurden die bisherigen Unfälle mit Boil Over ausgewertet und die Auswirkungen denjenigen eines Basinbrandes gegenübergestellt. Diese Auswertung ergibt, dass die letale Gefährdung von Personen durch die Hitzestrahlung eines Boil Over mit guter Näherung durch das Szenarium Basinbrand abgedeckt werden kann. Für die Berechnung der Anzahl Toten wird demnach auf die Angaben im Kapitel 4 und insbesondere auf die Abb. 4.1 zurückgegriffen. Als massgebendes Basin gilt in diesem Fall das flächengrösste Basin, in dem sich Stehtanks mit Rohöl, Schweröl, Dieselöl oder Heizöl befinden.

Bei einer dichten Nutzung in der Umgebung der Anlage oder bei Vorhandensein von schwer evakuierbaren Gebäuden empfiehlt sich zusätzlich die Definition von Evakuationsradien, die in den Einsatzplänen berücksichtigt werden können (siehe Kap. 7.2.3).

Auch über die Berechnung von Schäden an Infrastrukturen finden sich in der Literatur keine Hinweise. Die Auswirkungen sind jedoch meist lokal auf eine Richtung (Trümmerwurf) begrenzt und können deshalb bei der Ausmassschätzung gegenüber den Auswirkungen durch Wärmestrahlung vernachlässigt werden.

### 7.2.3 Bestimmung von Evakuationsradien

Für die Bestimmung von Evakuationsradien lassen sich zwei verschiedene Ansätze verwenden:

#### A) Theoretischer Ansatz mit Modell Basinbrand

Mittels Berechnung der Wärmestrahlung eines Boil Over und der Auswertung von Unfalldaten lässt sich zeigen, dass der Basinbrand bezüglich Auswirkungen eine gute Näherung für die auftretende Hitzeeinwirkungen darstellt. Gemäss [3] sind innerhalb der Distanz bis zur Wärmestrahlung von  $5 \text{ kW/m}^2$  Verletzungen von Personen möglich. Diese Distanz wird in diesem Bericht Schmerzgrenze genannt. Mittels der Abb. 4.1 wird der entsprechende Radius  $R_s$  bestimmt, der die Evakuationsdistanz angibt, in der alle anwesenden Personen gefährdet sind.

#### B) Ansatz des französischen Umweltministeriums

In [21] finden sich Angaben über einen Gefährdungsradius, der mittels empirischer Näherungsformel ermittelt wird:

$$R[\text{m}] = 5.86 \times M^{1/3}$$

mit  $M = 10\%$  des max. Tankinhaltes [kg]

Mit dieser Formel ergeben sich grössere Radien als mit dem theoretischen Ansatz. Diese Radien können in Spezialfällen von Bedeutung sein, z.B. wenn ein Ereignis ausser Kontrolle gerät oder sich in diesem Umkreis schwer evakuierbare Personen befinden.

## 7.3 Sachschäden (Indikator n<sub>6</sub>)

### 7.3.1 Randbedingung

Sachschäden sind vor allem dann zu erwarten, wenn nach Explosionen Druckwellen oder Trümmerwurf auftreten

- Explosion in einer öffentlichen Kanalisation (ausserhalb des Betriebsareals)
- Gaswolkenexplosion

und sich in unmittelbarer Umgebung des Ereignisses wichtige Infrastrukturen befinden. Für die Ausmass-einschätzung sind die Auswirkungen einer Druckwelle massgebend gegenüber dem Trümmerwurf. Es wird nachfolgend deshalb nur die Ausbreitung einer Druckwelle und deren Wirkung auf Bauten und Anlagen näher beschrieben.

### 7.3.2 Abschätzung der Auswirkungen

Der Indikator Sachschäden ist gemäss BUWAL-Richtlinie [1] nur dann relevant, wenn die Schäden nicht schon mit einem anderen Indikator berücksichtigt werden. Ausserdem dürfen Kosten für Spitalaufenthalte, Evakuierungen, Überbrückungsmassnahmen und Betriebsunterbrüche nicht einbezogen werden. Da der Grenzwert für schwere Schädigung bei 50 Mio Fr. liegt, ist somit nur in Ausnahmefällen (z.B. wichtige Infrastrukturanlagen bedroht) mit solch erheblichen Auswirkungen zu rechnen. Diese können mit Tab. 7.1 und Abb. 6.1 grob abgeschätzt werden.

Tab. 7.1: Kriterien für die Abschätzung der Auswirkungen einer Druckwelle auf Infrastrukturen [3]

Überdruck [bar]	Auswirkung auf Infrastruktur
1	Zerstörung industrieller Bauten
<b>0.48</b>	<b>Überschlagen von Güterwaggons</b>
0.34	99% Schäden struktureller Art an Bauten
0.30	Einsturz von Gebäuden
<b>0.21</b>	<b>50% Schäden an Bauten</b>
0.17	50% Zerstörung von Mauerwerk
0.06-0.08	1% Schäden an Gebäuden
<b>0.02-0.03</b>	<b>10% der Fensterscheiben brechen</b>

## 8 Berechnung des Störfallwertes

### Ausmassskala (Störfallwert):

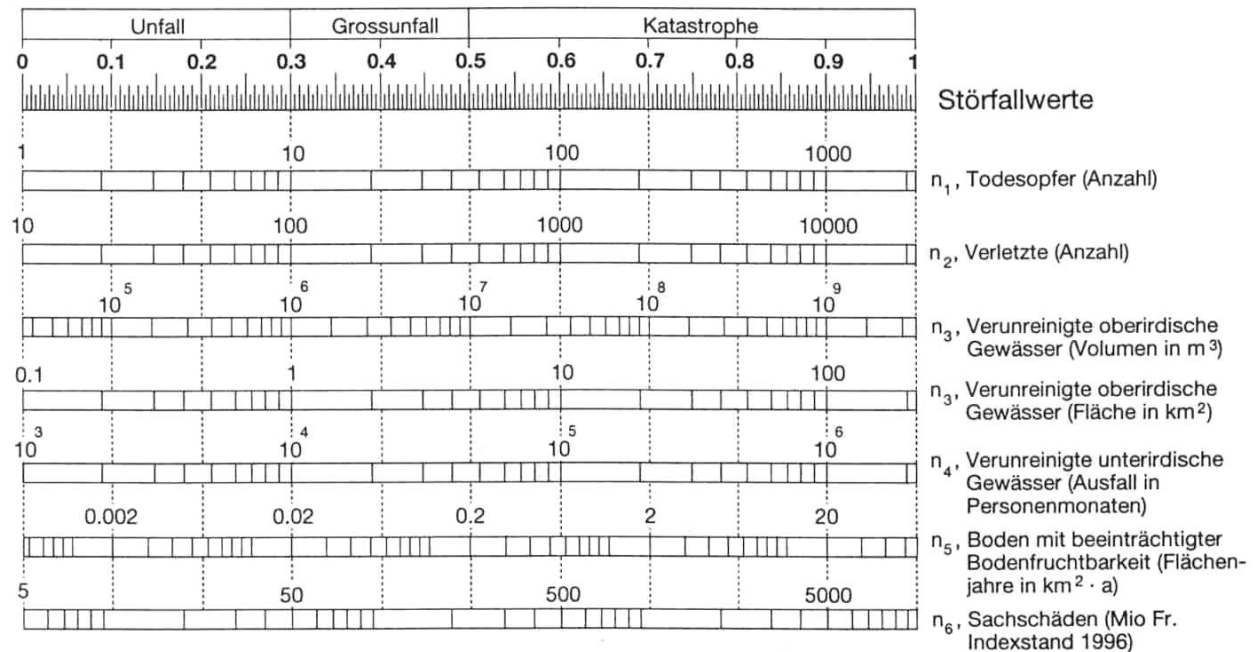


Abb. 8.1: Skala für die Umrechnung der Auswirkungen eines Störfalles in den Störfallwert gemäss BUWAL-Richtlinie [1]

Die erhaltenen Ausmasse können nach BUWAL-Richtlinie [1] in die Störfallwerte der entsprechenden Indikatoren umgerechnet werden.

Die Störfallwerte  $n_1$ ,  $n_3$ ,  $n_4$  und  $n_6$  lassen sich auch über die folgenden Formeln berechnen:

$$\begin{aligned} n_1 &= 0.3 \times \log(\text{Anzahl Tote}) \\ n_3 &= 0.3 \times (\log(\text{Fläche in km}^2) + 1) \\ n_4 &= 0.3 \times (\log(\text{Personenmonate}) - 3) \\ n_6 &= 0.3 \times (\log(\text{Mio Fr.}) - \log 5) \end{aligned}$$

Im Anhang 3 findet sich die Tab. A3, die für jeden Schadenindikator dasjenige Ausmass angibt, das nach der BUWAL-Richtlinie (Umrechnung nach [1]) einen Störfallwert 0.3 ergibt. So wird z.B. für Gewässerverschmutzungen die Menge Mineralöl berechnet, die notwendig ist, um 1 km<sup>2</sup> Gewässeroberfläche zu verunreinigen, was einem n<sub>3</sub>-Schadenausmass von 0.3 entspricht. Die Berechnungen erfolgen dabei unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Stoffeigenschaften und können als Anhaltspunkte für die Beurteilung der Resultate aus der Ausmasseneinschätzung dienen.