

# **REFERENZSZENARIEN ZUR RICHTLINIE 96/82/EG**

**ERSTELLT IM AUFTRAG DES  
BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT,  
JUGEND UND FAMILIE**

**WIEN, 1999**

AUTOR:

Dr. Heinz Koinig  
Allg. beeid. und gerichtl. zert. Sachverständiger  
Technisches Büro für Technische Physik  
Donaustr. 101/1  
2344 Maria Enzersdorf

PROJEKTLEITUNG IM BMUJF:

Abt. I/1, Anlagenbezogener Umweltschutz, DI Armin Heidler  
und DI Michael Struckl (BMwA)

---

---

## INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT.....	8
1. EINFÜHRUNG.....	9
1.1 Integraler Ansatz für Sicherheit und Umweltschutz.....	9
1.2 Konsequenzenanalyse von möglichen schweren Unfällen.....	10
1.3 Methode der Referenzszenarien - Deterministische Vorgangsweise.....	11
1.4 Probabilistische Vorgangsweise.....	11
1.5 Deterministische/Probabilistische Vorgangsweise.....	12
1.5.1 Vollständigkeit der Analysen.....	15
2. UNFALLSZENARIEN.....	15
2.1 Zielsetzung.....	15
2.2 Ablaufschema zur Einschätzung der Konsequenzen eines Unfalles.....	17
2.3 Mögliche Unfallszenarien.....	18
2.3.1 Freisetzung von Flüssigkeiten und Feststoffen (Leckage).....	18
2.3.2 Freisetzung von Gasen.....	18
2.3.3 Brand / Explosion.....	18
2.3.4 Auswahl der Unfallszenarien.....	19
2.3.5 Schwere Unfälle in gefahrgeneigten Anlagen.....	22
3. BERÜCKSICHTIGUNG VON SICHERHEITSMABNAHMEN UND - EINRICHTUNGEN.....	24
4. UNFALLSZENARIEN - BESTIMMUNGSGRÖßEN UND EINFLUßPARAMETER.....	24
4.1 Freisetzungsvorgänge und freigesetzte Mengen.....	26
4.2 Wirkung der Freisetzung.....	27
4.3 Folgen für Bevölkerung und Umwelt.....	28
5. AUSWAHL DER REFERENZSZENARIEN.....	28
6. FEUERBALL, BLEVE, BOIL-OVER.....	29
6.1 BLEVE.....	30
6.1.1 Ursachen und typischer Ablauf eines BLEVE.....	31
6.1.2 Auswirkungen des BLEVE.....	31
6.1.3 Berechnung der Wärmestromdichte.....	32
6.1.4 Auswirkungen der Hitzestrahlung auf Menschen und Bauten.....	33
6.1.5 Qualitative Methode.....	33
6.1.6 Probit-Methode.....	34

---

6.1.7 Berechnung der Explosionsdruckwelle (Überdruck) .....	36
6.1.8 Trümmerwurf.....	36
6.2 BOIL-OVER .....	36
6.2.1 Ablauf-Modell .....	37
6.2.2 Auswirkungen des BOIL-OVER .....	37
6.2.3 Berechnung der Wärmestromdichte .....	38
6.2.4 Berechnung der Explosionsdruckwelle (Überdruck) .....	38
6.3 Gezündeter Freistrahler (JET-FIRE) .....	38
6.3.1 Ablauf.....	38
6.3.2 Auswirkungen.....	38
7. LACHENBRAND, POOL-FIRE, TANK-FIRE.....	39
7.1 Lachengröße .....	40
7.2 Verdampfung von Flüssiggasen.....	40
7.3 Verdunstung einer nicht siedenden Flüssigkeit .....	41
7.4 Brand.....	41
7.5 Berechnung der Wärmestromdichte .....	43
7.6 Auswirkungen der Hitzestrahlung .....	44
8. GASWOLKENBRAND, DEFLAGRATION, FLASH-FIRE.....	45
9. FESTSTOFFBRAND, STAUBBRAND/-EXPLOSION .....	45
9.1 Feststoffbrand .....	46
9.1.1 Brandgase .....	46
9.1.2 Ausbreitung der Brandgase.....	46
9.2 Staubbrand/-Explosion .....	47
9.2.1 Gefahren durch brennbaren Staub .....	47
9.2.2 Brand- und Explosionsverhalten von Staub.....	48
9.2.3 Auswirkungen von Staubbrand/-Explosion .....	50
10. GASWOLKENEXPLOSION.....	50
10.1 Unverdämmte Gaswolkenexplosion .....	51
10.1.1 Ablauf-Modell .....	51
10.1.2 Berechnung des Spitzenüberdruckes .....	52
10.1.3 TNO-Modell.....	52
10.1.4 Auswirkungen der Druckwellen auf Menschen, Bauten .....	54
10.1.5 TNT-Äquivalenzmodell.....	56
10.2 Verdämmte Gaswolkenexplosion.....	56
11. EXPLOSIONSARTIGE ZERSETZUNG .....	57
11.1 Sprengstoff .....	58

---

---

12. WASSER- UND BODENGEFÄHRDUNG .....	58
12.1 Ausbreitungspfade .....	58
12.2 Verunreinigung von Gewässern .....	59
12.2.1 Ausbreitung in Oberflächengewässer .....	60
12.2.2 Auswirkungen der Kontamination .....	61
13. TOXISCHE SCHWERGASE .....	62
13.1 Allgemeine Grundlagen der Gasausbreitung (schwere/leichte Gase) .....	62
13.1.1 Schwergasausbreitung .....	63
13.1.1.1 Ausbreitungseigenschaften von Ammoniak .....	63
13.1.1.2 Leichtgasausbreitung .....	63
13.1.2 Leichtgasausbreitung .....	63
13.1.3 Unfallbedingte Ausbreitung von schweren Gasen .....	64
13.2 Toxikologische Bewertung unfallbedingter Freisetzungen .....	64
13.2.1 Wirkung toxischer Substanzen auf den Organismus .....	64
13.2.2 Schädigung und Wirkungsweise .....	65
13.2.3 Toxizitätswerte, Grenzwerte, Orientierungswerte .....	66
13.2.4 Toxische Konzentrationen und Dosen .....	67
13.2.5 Probit-Methode .....	68
13.3 Modelle für Schwergasausbreitung .....	69
13.3.1 Typische Eigenschaften der Schwergasausbreitung .....	70
13.3.2 Gauß-Fahnenmodell .....	70
13.3.3 Boxmodell .....	71
13.3.4 Lagrange-Partikelmodell .....	71
13.3.5 Euler-Modell .....	71
13.4 Modellvergleiche - Evaluierungen .....	71
13.4.1 Modellunsicherheiten (Hanna et al., 1993) .....	72
13.4.2 EPA-Evaluierungsstudie (Touma et al., 1995) .....	72
13.4.3 Sigma Research Corporation-Studie (Hanna et al., 1993) .....	72
13.4.4 American Institute of Chemical Engineers (AIChE, 1996) .....	73
13.4.5 U.S. Department of Energy (US DOE, 1997a,b) .....	73
13.4.6 Europäische Union .....	73
13.4.7 Resümee .....	73
13.5 Modellvergleiche BRD, Schweiz .....	74
13.6 Empfehlungen zur Anwendung .....	74
13.6.1 VDI-Richtlinie 3783 .....	74
13.6.2 DEGADIS .....	75
13.6.3 MET-Modell .....	75
13.6.4 Resümee .....	76
13.7 Ausbreitung nach MET-Modell und Auswirkungen .....	76
14. LITERATUR .....	78
ANHANG (TABELLEN UND ABBILDUNGEN) .....	80

---

---

## TABELLENVERZEICHNIS

**Tabelle 1:**

Hitzestrahlung durch Feuerbälle: Wirkdistanzen [m] vom Zentrum des Feuerballes für ausgewählte Wärmestromdichten, Referenzstoff Propan („EFFECTS“-TNO).

**Tabelle 2:**

Hitzestrahlung durch Feuerbälle: Wirkflächen [km<sup>2</sup>] für ausgewählte Wärmestromdichten, Referenzstoff Propan („EFFECTS“-TNO).

**Tabelle 3:**

Hitzestrahlung durch Lachenbrand (Flächenbrand): Wirkdistanzen [m] vom Rand der Lache für ausgewählte Wärmestromdichten, Referenzstoff Isobutylen („EFFECTS“-TNO).

**Tabelle 4:**

Hitzestrahlung durch Lachenbrand (Flächenbrand): Wirkflächen [km<sup>2</sup>] für ausgewählte Wärmestromdichten, Referenzstoff Isobutylen („EFFECTS“-TNO).

**Tabelle 5:**

Druckwellen von Gaswolkenexplosionen im Freien: Maximale Wirkdistanzen [m] vom Zentrum der Gaswolke für ausgewählte Überdrücke, Referenzstoff Propan („EFFECTS“-TNO).

**Tabelle 6:**

Druckwellen von Gaswolkenexplosionen im Freien: Maximale Wirkflächen [km<sup>2</sup>] für ausgewählte Überdrücke, Referenzstoff Propan („EFFECTS“-TNO).

**Tabelle 7:**

Ursachen und schädigende Auswirkungen (qualitativ) von Chemikalien auf Lebewesen in Gewässern.

**Tabelle 8:**

Wassergefährdung durch verschiedene Stoffgruppen und mögliche Gegenmaßnahmen.

**Tabelle 9:**

Quantitative Angaben zum kontaminierten Wasservolumen [m<sup>3</sup>] als Funktion der freigesetzten Produktmenge [kg], der Wassergefährdungsklasse und der Toxizität für Wasserlebewesen (LC<sub>50</sub> - Werte). Volumen, in dem 50% der Wasserlebewesen nach 30 Minuten sterben.

**Tabelle 10:**

Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien: Wirkdistanzen [m] vom Ort der Freisetzung, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse D, Ausbreitungswinkel 60°).

**Tabelle 11:**

Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien: Wirkflächen [km<sup>2</sup>], bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse D, Ausbreitungswinkel 60°).

**Tabelle 12:**

Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien mit Brand: Wirkdistanzen [m] vom Ort der Freisetzung, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist; (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse C, Ausbreitungswinkel 60°).

**Tabelle 13:**

Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien mit Brand: Wirkflächen [km<sup>2</sup>], bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist; (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse C, Ausbreitungswinkel 60°).

---

---

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

**Abb. 1:**

Vergleich des deterministischen mit dem probabilistischen Ansatz.

**Abb. 2:**

Durchmesser des Feuerballes in Abhängigkeit von der Menge des brennenden Produktes, Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

**Abb. 3:**

Lebensdauer des Feuerballes in Abhängigkeit von der Menge des brennenden Produktes.

**Abb. 4:**

Hitzestrahlung durch Feuerbälle: Wirkdistanzen vom Zentrum des Feuerballes in Abhängigkeit von der Menge des brennenden Produktes, Entfernungen für verschiedene Wärmestromdichten [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ], Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

**Abb. 5:**

Hitzestrahlung durch Feuerbälle: Wirkflächen in Abhängigkeit von der Menge des brennenden Produktes, Flächen für verschiedene Wärmestromdichten [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ], Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

**Abb. 6:**

Darstellung der Beziehung zwischen Probit und Prozent.

**Abb. 7:**

Hitzestrahlung durch Lachenbrand (Flächenbrand): Wirkdistanzen vom Rand der Lache für ausgewählte Wärmestromdichten [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ], Referenzstoff Isobutylen (EFFECTS-TNO), Lachentiefe 3 cm. Punktierter Linie = Durchmesser der Lache [m].

**Abb. 8:**

Hitzestrahlung durch Lachenbrand (Flächenbrand): Wirkflächen für ausgewählte Wärmestromdichten [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ], Referenzstoff Isobutylen (EFFECTS-TNO), Lachentiefe 3 cm.

**Abb. 9:**

Druckwellen von Gaswolkenexplosionen im Freien: Maximale Wirkdistanzen vom Zentrum der Gaswolke für ausgewählte Überdrücke [bar], Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

**Abb. 10:**

Druckwellen von Gaswolkenexplosionen im Freien: Maximale Wirkflächen für ausgewählte Überdrücke [bar], Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

**Abb. 11:**

Überdruck einer Gaswolkenexplosion im Freien in Abhängigkeit vom skalierten Abstand vom Zentrum der Gaswolke.

**Abb. 12:**

Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien: Wirkdistanzen in Abhängigkeit von der freigesetzten Menge, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist, für verschiedene IDLH-Werte [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse D, Ausbreitungswinkel  $60^\circ$ ).

**Abb. 13:**

Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien: Wirkflächen in Abhängigkeit von der freigesetzten Menge, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist, für verschiedene IDLH-Werte [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse D, Ausbreitungswinkel  $60^\circ$ ).

**Abb. 14:**

Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien mit Brand: Wirkdistanzen in Abhängigkeit von der freigesetzten Menge, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist, für verschiedene IDLH-Werte [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse C, Ausbreitungswinkel  $60^\circ$ ).

**Abb. 15:**

Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien mit Brand: Wirkflächen in Abhängigkeit von der freigesetzten Menge, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist, für verschiedene IDLH-Werte [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse C, Ausbreitungswinkel  $60^\circ$ ).

---

---

## VORWORT

Im Zuge der Umsetzung der EU-Richtlinie 96/82/EG „Seveso II-RL“ ist es erforderlich, zur Überwachung der Ansiedlung nach Art. 12 sogenannte Referenzszenarien und daraus resultierende Sicherheitsabstände für Zwecke der Raumordnung und Flächenwidmung festzulegen, die in der Folge auch als Grundlage zur Erstellung der Notfallpläne nach Art. 11 verwendet werden können.

Die systematische Suche nach Gefahrenpotentialen, die Auswahl von Unfallszenarien und im besonderen die Einschätzung des Schadensausmaßes und der Schwere der Folgen führen oft zu erheblichen Schwierigkeiten, da einerseits die notwendigen Spezialkenntnisse fehlen und andererseits die zur Berechnung erforderlichen Ausbreitungsmodelle entweder nicht bekannt oder nicht vorhanden sind.

Daher ist es das Ziel dieser Studie, den Behörden anhand von Beispielen und Darstellungen ein Instrument zur Verfügung zu stellen, um die Abschätzung von Sicherheitsabständen bzw. der Schwere der Folgen selbständig erarbeiten und beurteilen zu können. Es soll auch ein Eindruck der potentiellen Schadensauswirkung von Chemikalien auf die Umwelt vermittelt werden.

Weiters wird versucht, dieses Hilfsmittel für einen möglichst breiten Anwenderkreis zu schaffen, wobei zum Verständnis gewisse technische Grundkenntnisse vorausgesetzt werden. Dies bezieht sich in erster Linie auf den Umgang mit Tabellenwerken und graphischen Darstellungen und deren Anwendung auf technische Fragestellungen.

Die aufgrund der breiten Anwendbarkeit bedingten Vereinfachungen bzw. Abschätzungen komplexer Vorgänge ergeben natürlich auch Angriffsflächen für Kritik. Dieser Leitfaden soll daher in erster Linie zur raschen Abschätzung von Unfallauswirkungen und daraus abgeleiteter Sicherheitsabstände dienen, die Definition der Szenarien und im speziellen die Annahmen zur Festlegung der freigesetzten Stoffmengen sollte nach Erhebung bei den Betreibern der Anlage erfolgen. Anschließend können die Sicherheitsabstände aufgrund anlagenspezifischer Berechnungen festgelegt werden.

Diese Studie basiert z.T. auf praktischer Erfahrung des Autors aus diversen Unfallszenarien und Auswirkungsberechnungen im Rahmen von Sicherheitsanalysen, wertvolle Anregungen stammen aus der Schweizer Publikation „Schadensmaß-Einschätzung“ (Koordinationsstelle für Störfallvorsorge Zürich) sowie aus Kursunterlagen von ICI Australien („HAZARD ANALYSIS COURSE NOTES“) und der Studie „Voruntersuchungen zur Anwendung eines Schwergasmodells bei Industrieunfällen“ der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik.

Die vorliegende Arbeit ist noch nicht als abgeschlossen zu betrachten, da insbesondere hinsichtlich der Ausbreitung von toxischen, schweren Gasen Modell-Unsicherheiten bestehen, die im Kap. 13.4 aufgezeigt und diskutiert werden. Bei Vorliegen neuer Fakten bzw. Empfehlungen aufgrund einer derzeit noch laufenden europäischen Evaluierung, werden diese entsprechend berücksichtigt.

---

Wien, im Juli 1999

## 1. EINFÜHRUNG

Zum Thema „Die Seveso II-Richtlinie und ihre Auswirkungen auf Österreich“ fand am 28. April 1996 in Linz eine Tagung statt, die vom Österreichischen Forum Anlagensicherheit organisiert wurde. U.a. wurde darauf hingewiesen, daß in technischer Hinsicht mit Neuerungen zu rechnen ist, d.h. man wird sich mit dem Thema „Referenzszenarien“ bzw. probabilistischen Ansätzen der Risiko- und Gefahrenermittlung näher auseinandersetzen müssen.

Im folgenden werden einige in diesen Diskussionen immer wieder auftretende Begriffe erläutert und in Zusammenhang gebracht, um besseres Verständnis für die Hintergründe dieser Sicherheitsphilosophie zu schaffen.

### 1.1 Integraler Ansatz für Sicherheit und Umweltschutz

Der Umgang mit hohen technischen Gefahrenpotentialen in verfahrenstechnischen Anlagen erfordert ein Vorsorgekonzept, mit dem Zweck, Auswirkungen aus Gefahrenpotentialen in sozialverträglicher Weise zu vermeiden. In der EU spielen hierfür die Seveso I- und Seveso II-Richtlinien eine zentrale Rolle. In diesen Richtlinien wurde ein mehrstufiges, hierarchisch aufgebautes Sicherheitskonzept entwickelt und für den Bereich der chemischen Verfahrenstechnik präzisiert.

Zur Erfüllung dieser grundlegenden Sicherheitsprinzipien wurde für den Bereich der Industrieanlagen mit Gefahrenpotential ein integriertes Sicherheitskonzept entwickelt. Es besteht in seinem grundsätzlichen Aufbau aus einem dreistufigem hierarchischen System, das folgend charakterisiert werden kann:

#### *Stufe 1:*

Diese Stufe beinhaltet alle Maßnahmen in der Anlage, die den Einschluß gefährlicher Stoffe oder die Vermeidung unzulässiger Betriebszustände gewährleisten soll.

#### *Stufe 2:*

In dieser Stufe sind alle anlagenbezogenen Maßnahmen zur Begrenzung von Unfallauswirkungen (Freisetzung, Brand, Explosion) zusammengefaßt.

#### *Stufe 3:*

Diese Stufe umfaßt die Maßnahmen zur Begrenzung der Einwirkungen von umgebungsbezogenen Gefahrenquellen (Einwirkung von Schadstoffen, Wärmestrahlung, Druckwellen, Trümmerwurf).

Eine Gefährdung der Schutzobjekte (Nachbarschaft, Umwelt) kann in der Logik des Systems nur dann auftreten, wenn alle drei Sicherheitsstufen gleichzeitig versagen. Dies ist relativ unwahrscheinlich, zumal die Maßnahmen unabhängig voneinander sind. Die Maßnahmen der Stufen 1 und 2 sind anlagenbezogen und somit unabhängig von denen der Stufe 3, die umgebungsbezogen sind.

Ein solches integriertes Sicherheitssystem verlangt die Erstellung systematischer Sicherheitsbetrachtungen in Form von Sicherheitsanalysen.

Dieses dreistufige Sicherheitskonzept wurde im Rahmen der Störfallverordnung umgesetzt.

## **1.2            Konsequenzenanalyse von möglichen schweren Unfällen**

Die von der Seveso II-Richtlinie dreifach geforderte Betrachtung von Unfallauswirkungen, nämlich im Sicherheitsbericht gemäß Art. 9, für Notfallpläne gemäß Art. 11 und für die Überwachung der Ansiedlung gemäß Art. 12, scheint zunächst widersprüchlich zu sein. Einerseits sind die Sicherheitsvorkehrungen detailliert im Sicherheitsbericht dargelegt, andererseits sind noch größere Störungen mit Freisetzung, Brand oder Explosion zu unterstellen und die möglichen Auswirkungen anzugeben.

Dieser scheinbar logische Widerspruch löst sich auf, wenn man den Zweck der Richtlinie näher betrachtet.

Dabei sind zwei Ebenen zu unterscheiden:

### *Ebene 1:*

Mit Hilfe der Auswirkungsbetrachtung soll die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen, vor allem die zur Begrenzung der Auswirkungen nachgewiesen werden. Der geforderten Betrachtung sollten Vorkommnisse zugrundegelegt werden, die in der Praxis bereits wiederholt schwere Unfälle verursacht haben, z.B. Freisetzungen aufgrund von Schlauchriß beim Be-/Entladen, defekte Dichtungen und Armaturen, korrodierte Rohrleitungen etc. Wichtig ist in diesem Zusammenhang eine fortlaufende Registrierung von schweren Unfällen. Aus den Auswirkungsbetrachtungen im Unfall sollen Anhaltspunkte für eine effektive Planung der innerbetrieblichen Gefahrenabwehr entwickelt werden.

### *Ebene 2:*

Die Auswirkungsbetrachtungen auf der 2. Ebene, welche Anhaltspunkte für die Planung der außerbetrieblichen Gefahrenabwehr liefern sollen, muß von anderen Prämissen ausgehen. Diese Angaben, im eigentlichen Sinne Angaben zur Unfallauswirkung, setzen im allgemeinen gemäß Seveso II-Richtlinie einen „schweren Unfall“ mit Bestehen ernster Gefahr für Mensch und Umwelt voraus. Es muß also ein Ereignis zugrunde liegen, welches diese ernste Gefahr bewirken kann. Da es sich bei den Mengenschwellen um eine Definitionsgröße handelt, die sich auf den gesamten Anlagenkomplex bezieht, ist die Einschränkung auf die größte zusammenhängende Stoffmenge innerhalb der Anlage ein realistischer Ansatz. In diese Ebene 2 sind die Szenarien für Notfallpläne lt. Art. 11 und die Überwachung der Ansiedlung lt. Art. 12 der Seveso II-Richtlinie einzuordnen.

---

Während der Unfall auf Ebene 1 zwar mit großer Wahrscheinlichkeit eintreten aber durch entsprechende technische und organisatorische Maßnahmen vermieden werden kann, ist es nicht möglich, den sogenannten „hypothetischen Störfall“ oder schweren Unfall auf Ebene 2, dessen Wahrscheinlichkeit so gering eingeschätzt wird, daß sie praktisch nicht berücksichtigt werden muß, zu vermeiden. D.h. der „hypothetische Störfall“ schließt eine Berücksichtigung der (aktiven) unfallvermeidenden Maßnahmen (siehe Kap. 3) aus. Dieser „hypothetische Störfall“ wird in deutschsprachigen Fachkreisen auch manchmal als „exzeptioneller Störfall“ bezeichnet. Der in der deutschen und in der englischen Literatur häufig verwendete Begriff „Worst-Case“ wird ganz allgemein für die Unfälle (aus einem Spektrum von Unfallszenarien) mit den schlimmsten Auswirkungen verwendet, d.h. im gegenständlichen Falle wären es Unfälle auf Ebene 2. Um mögliche Auswirkungen dieser denkbaren schweren Unfälle zu begrenzen, ist der Notfallplan zur außerbetrieblichen Gefahrenabwehr erforderlich. Diese Maßnahmen mindern lediglich die Unfallauswirkungen auf Ebene 2, verhindern sie aber nicht.

### **1.3 Methode der Referenzszenarien - Deterministische Vorgangsweise**

Um bei der Auswahl der Szenarien für denkbare schwere Unfälle nicht über das Ziel zu schießen, wurde die Methode der „Referenzszenarien“ entwickelt, welche besonders in Frankreich stark in Verwendung ist. Bei der Definition der Szenarien wird auf die praktische Erfahrung und hauptsächlich auf Aufzeichnungen früherer schwerer Unfälle für eine spezifische Art von Anlage zurückgegriffen. Um die Betriebsgenehmigung für eine Anlage zu bekommen muß der Betreiber nachweisen, daß geeignete Maßnahmen gesetzt wurden, um die aus den Referenzszenarien resultierenden Konsequenzen/Risiken zu minimieren. Das Resultat sind Sicherheitsabstände als Planungs- und Entscheidungsgrundlage für die Raumplanung.

Der „Größte Anzunehmende Unfall“, der sogenannte GAU, wurde als Prinzip der sicherheitstechnischen Beurteilung bereits 1955-1960 in der Kerntechnik eingeführt und stellt denjenigen (schlimmsten) Unfall dar, dessen Auswirkungen durch entsprechende anlagenspezifische Maßnahmen beherrscht werden können. In der englischen Literatur wird der GAU auch als MCA („Maximum Credible Accident“) bezeichnet. In den Jahren 1965-1970 wurde das sicherheitstechnische Prinzip der „Auslegungsunfälle“ eingeführt und ein ganzes Spektrum von möglichen Unfällen bei der Auslegung der Anlagen berücksichtigt. Man nennt diese Vorgangsweise „deterministisch“.

### **1.4 Probabilistische Vorgangsweise**

Eine zweite Methode, die in einigen Mitgliedstaaten der EU bevorzugt wird, ist die „probabilistische“ Vorgangsweise.

Während die deterministische Methode („Konsequenz-orientiert“) aufgrund von Referenzszenarien als Resultat die Zonen für Todesfälle und ernste Verletzungen aufzeigt, ergibt die probabilistische Methode („Risiko-orientiert“) die Zonen, innerhalb

---

derer als Resultat aller möglichen Unfälle mit einer berechneten Wahrscheinlichkeit ein festgelegtes Schadensausmaß (Risiko-Kriterium) erreicht wird.

Um ein klareres Verständnis für diese beiden sicherheitstechnischen Vorgangsweisen zu schaffen, werden im folgenden einige Erläuterungen dazu gegeben.

## 1.5 Deterministische/Probabilistische Vorgangsweise

Die steigende Komplexität technischer Systeme und die erhöhten sicherheitstechnischen und wirtschaftlichen Anforderungen, die an sie gestellt werden, im besonderen bei der Planung von Flächennutzung in dicht besiedelten Gebieten, haben dazu geführt, daß quantitative Sicherheitskenngrößen eine immer größere Bedeutung erlangen, ohne allerdings den bewährten deterministischen Ansatz ersetzen zu können.

Die probabilistischen Methoden werden heute in erster Linie zur Überprüfung der Ausgewogenheit von Sicherheitskonzepten eingesetzt. Darüber hinaus bieten derartige Methoden Entscheidungshilfen

- für Optimierungen der Anlagenauslegung,
- bei der Auswertung und Bewertung von Betriebserfahrungen,
- für detailliertere Beschreibungen des erreichten Sicherheitsniveaus,
- für die Bewertung von Ereignisabläufen, die über die Auslegung (deterministischer Ansatz) hinausgehen können,
- bei der Planung von Wartungs- und Reparaturstrategien und
- für die Prioritätensetzung in der Sicherheitsforschung.

Anwendungsmöglichkeiten für Zuverlässigkeits- und Risikoanalysen ergeben sich in erster Linie in der Raumfahrt, Schiffstechnik, Kerntechnik und in vielen Bereichen der Verfahrens- und Energietechnik sowie im Verkehrswesen.

Wie bereits erwähnt, werden die probabilistischen Methoden heute in erster Linie zur Überprüfung der Ausgewogenheit von Sicherheitskonzepten eingesetzt. Als ergänzendes Werkzeug der Auslegung von Sicherheitseinrichtungen in gefahrgeneigten Anlagen wird also die probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) genutzt. Sie bildet die Basis für die Erarbeitung jeder Risikostudie und wird in Zukunft immer mehr verwendet werden. Sie könnte auch ein gewichtiges Instrument bei der Beurteilung der Notwendigkeit von Nachrüstungen von gefahrgeneigten Anlagen werden.

Aus einem Bericht der EU-Kommission über „Land Use Planning in the Context of Major Accident Hazards - An Analysis of Procedures and Criteria in Selected EU Member States“ aus dem Jahre 1996 geht hervor, daß zur Planung der Flächennutzung in dicht besiedelten Gebieten in Ländern wie Belgien, Dänemark, Niederlande und UK bereits die sogenannte „Risiko-orientierte“ probabilistische Methode verwendet wird; in Belgien (sowohl als auch) , Finnland, Frankreich, BRD, Luxemburg, Spanien und

---

Schweden gelangt die sogenannte „Konsequenz-orientierte“ deterministische Methode zum Einsatz. In Frankreich, BRD, Luxemburg, Niederlande und UK werden nebenbei noch andere Kriterien (z.B. Risikokriterien) zur Flächennutzungs-Planung eingesetzt. In Österreich und zahlreichen weiteren EU-Ländern war die Vorgehensweise zu diesem Zeitpunkt noch nicht endgültig festgelegt.

Die Probabilistik wurde in Österreich im Zusammenhang mit der Genehmigung von Betriebsanlagen noch nicht eingesetzt, die Vorgangsweise ist rein deterministisch. Diese entspricht der derzeit herrschenden Sicherheitsphilosophie und auch dem Aufbau der Sicherheitsanalysen. Da jedoch die Probabilistik unaufhaltsam im Vormarsch ist, sollten auch in Österreich so rasch wie möglich die entsprechenden Voraussetzungen hierfür geschaffen werden. Dies bedeutet u.a. eine fortlaufende Registrierung von schweren Unfällen sowie das Anlegen einer Datenbank für die entsprechenden Ausfalldaten von Komponenten und Systemen in verfahrenstechnischen Anlagen.

Zur richtigen Einordnung der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA), manchmal auch als PRA („Probabilistic Risk Assessment“) oder QRA („Quantified Risk Assessment“) bezeichnet, muß daran erinnert werden, daß z.B. die Auslegung einer verfahrenstechnischen (gefahrengeeigneten) Anlage, wie in anderen Bereichen der Technik, zunächst *deterministisch* aufgrund erforderlicher Funktionen, Regeln der Technik, Erfahrungen und weiterer anderer Grundlagen erfolgt. Die Entscheidung für den Qualitätsstandard ist deterministisch, ebenso die Entscheidung, die Anlage mit unfallvermeidenden und -begrenzenden Systemen auszustatten oder z.B. in einer Rohrleitung Doppelabsperrung vorzusehen.

Um nun den probabilistischen Ansatz neben der deterministischen Vorgangsweise ins richtige Licht zu stellen, wird ein Vergleich zwischen dem deterministischen mit dem probabilistischen Ansatz am Beispiel der Auslegung einer Brücke aufgezeigt (siehe Abb. 1).

Die Brücke wird zunächst deterministisch für eine Festigkeit ausgelegt, die mit einem deutlichen Abstand über ihrer Belastung liegt, wie dies im oberen Teil von Abb. 1 dargestellt wird.

Würde man für diesen Fall eine probabilistische Betrachtung anstellen, dann wäre zu unterstellen, daß sowohl die tatsächliche Belastung als auch die Lastabtragung, wie in Abb. 1 unten dargestellt, abweichen können, wobei mit der Größe der Abweichung ihre Wahrscheinlichkeit sinkt. Im ungünstigsten, sehr unwahrscheinlichem Fall ist die Betriebslast, z.B. infolge gleichzeitiger Beanspruchung durch Sturm, Schneelast und eine Kompanie im Paradeschritt so groß und die Tragfähigkeit der Brücke durch Zusammentreffen von Materialfehler, Erosion und Korrosion so klein, daß der überlappte Bereich (Abb. 1 unten) erreicht wird und die Brücke versagt. Mittels einer PSA würde man die beiden Wahrscheinlichkeitskurven quantifizieren und das Restrisiko berechnen.

Zur Einordnung der PSA gehört auch ihre historische Entwicklung. Vor mehr als 20 Jahren ( vor 1970) gab es bereits, z.B. in der Schiffstechnik und bei der Raumfahrt,

---

Bemühungen, mit probabilistischen Überprüfungen die Zuverlässigkeit besonders wichtiger Systeme zu verbessern.

Die *Rasmussen-Studie* im Jahre 1975 war die erste große Untersuchung des Risikos einer technischen Anlage und seines Vergleiches mit anderen zivilisatorischen und natürlichen Risiken. Diese Analyse und die *Deutsche Risikostudie Phase A* auf der Basis des KKW Biblis B führten zu einer breiteren Kenntnisnahme und Diskussion der probabilistischen Analysen, insbesondere in der Fachwelt.

Zur Gesamtentwicklung gehört ein Blick auf die aktuelle internationale Szene und die PSA-Anwendung in anderen technischen Bereichen. Praktisch in der gesamten westlichen Welt ist die individuelle PSA, in erster Linie in der Kernenergie, mit der Zielsetzung Schwachstellenanalyse, zum Standard geworden.

Außerhalb der Kernenergie gab es vermehrt Ansätze, zur Verbesserung der Verfügbarkeit und Sicherheit komplexer Systeme sowie zur Abschätzung damit verbundener Risiken, probabilistische Methoden auch in der Chem. Industrie einzusetzen (Frankreich - Projekt Lyon, UK - Projekt Canvey Island, Niederlande - Projekt Rijnmond, Italien - Projekt ARIPAR und Projekt ARTIS).

Die Seveso II-RL spiegelt für die gesamte Prozeßindustrie, die unter diese Richtlinie fällt, die Leistungsfähigkeit heutiger Zuverlässigkeitstechnik wider. Aus der Erfahrung in der Kerntechnik wird nämlich der gesamten Prozeßindustrie die Möglichkeit einer rationalen Bewertung der Sicherheit anhand eines Risikomodelles nun regulatorisch nahegelegt. Dies bedeutet, daß der mögliche Schaden durch Blockierung einer Technologie aufgrund der Ermittlung und Offenlegung von Risiken geringer angesehen wird als der Nutzen, mit Hilfe dieser Analysen vorhandene Risiken zu vermindern.

Es wird weiters noch darauf hingewiesen, daß die Anwendung des deterministischen Schemas in der Physik vor allem auf Differentialgleichungen führt, z.B. Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung. Solche Differentialgleichungen sind Ausdruck der Determiniertheit, sie sind dann das in Rede stehende Naturgesetz.

In der statistischen Mechanik, die aus dem Gebiet der Thermodynamik entwickelt worden war, wurde als zentraler Begriff die Wahrscheinlichkeit eingeführt. Es ist daher ebenso erstaunlich, daß man ohne alle Ausgangsparameter der Bahnen der beteiligten Partikel zu kennen und ohne deren Bahn berechnen zu müssen, zu einem deterministischen (Über) Gesetz, etwa der Zustandsgleichung idealer Gase, kommt.

Es ist verständlich, daß vor einigen Jahrzehnten, als komplexe Sachverhalte noch mit Rechenschieber und einfachsten mechanischen Rechenmaschinen und Meßgeräten bearbeitet werden mußten, der Techniker rigoros Sachverhalte vereinfacht hat. Dabei wurden Variable mit ihren Parameterunsicherheiten zu festen Größen gemacht und Zufallsvariable (vor allem sogenannte seltene Ereignisse) vernachlässigt. Auch wurde meist die perfekte Funktion von Mensch und Maschine unterstellt. Die Verfügbarkeit hochentwickelter Rechner und auch der angewachsene Wissensstand über mögliche Modellierungen und das tatsächliche Betriebsverhalten von Anlagen aller Art erlauben

---

es heute, für komplexe Fragen auch komplexe Analysen mit geeigneten Modellen durchzuführen.

### **1.5.1 Vollständigkeit der Analysen**

Bei Errichtung und Betrieb von verfahrenstechnischen Anlagen wird, wie bereits erwähnt, überwiegend *deterministisch* vorgegangen. Determinieren heißt abgrenzen, d.h. ein bestimmter Ereignisablauf wird als Ergebnis reiflicher Überlegung ausgeschlossen: Gegenmaßnahmen sind daher nicht erforderlich. Ein anderer Ereignisablauf ist nicht auszuschließen: Gegenmaßnahmen sind vorzusehen. Jedem Ereignisablauf wird also aus der Erfahrung heraus die Eintrittswahrscheinlichkeit 0 oder 1 zugewiesen. Das Problem der Vollständigkeit des berücksichtigten Spektrums von Ereignisabläufen wird dadurch gelöst, daß vom Verlauf her ähnliche Ereignisabläufe zusammengefaßt und die jeweils abdeckenden behandelt werden.

In *probabilistischen* Analysen wird berücksichtigt, daß Ereignisse mit einer beliebigen Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 1 auftreten und daß die Maßnahmen zur Beherrschung dieser Ereignisse im Anforderungsfall ebenso mit einer Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 1 zur Verfügung stehen. Der Erfahrungshorizont, der einmal für die qualitative Entscheidung: „Vernachlässigen oder Berücksichtigen eines Ereignisablaufes“ bzw. für die quantitative Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten zur Verfügung steht, ist selbstverständlich derselbe. Weil die PSA aber zum Unterschied von der deterministischen Betrachtung ein quantitatives Ergebnis liefert, hat die Frage nach eventuellen Beiträgen nicht berücksichtigter Ereignisabläufe einen höheren Stellenwert. D.h. die PSA erfordert sowohl ein Spektrum der zu berücksichtigenden Ereignisse als auch ein quantitatives Abschneidekriterium. Das Spektrum der zu berücksichtigenden Ereignisse enthält nicht nur tatsächlich beobachtete Ereignisabläufe sondern umfaßt auch hypothetische Ereignisse. Demzufolge brauchen z.B. in der Kerntechnik Ereignisabläufe, deren Beiträge zur Häufigkeit von Gefährdungszuständen kleiner als  $10^{-7}$  pro Jahr sind, nicht analysiert werden. Insgesamt folgt daraus, daß das vorgegebene Spektrum auslösender Ereignisse, dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechend, möglichst vollständig sein muß.

## **2. UNFALLSZENARIEN**

### **2.1 Zielsetzung**

Gemäß Art. 11 und Art. 12 der Seveso II-Richtlinie ist es erforderlich, das Schadensausmaß von schweren Unfällen hinsichtlich der möglichen Schädigung der Bevölkerung und der Umwelt entweder nach der deterministischen oder probabilistischen Vorgangsweise oder einer Kombination von beiden abzuschätzen.

Die vorliegende Studie soll den Behörden die Erstellung von Unfallszenarien und die Abschätzung der Schwere der Folgen erleichtern. Zu diesem Zwecke sind eine Reihe von Beispielen angegeben, die mit Hilfe der beigelegten Tabellen auf die eigenen Verhältnisse übertragen werden können.

Um eine generelle Anwendbarkeit zu erzielen, wurden gewisse Vereinfachungen hinsichtlich des (vollständigen) Ablaufes des ungünstigen Ereignisses (z.B. Initialphase/Freisetzung) vorgenommen. Die Ausbreitungs-/Einwirkungsrechnungen wurden unter pessimistischen Annahmen auf Referenzstoffe beschränkt, die Einschätzung der Wirkdistanzen erfolgt jeweils für das diskrete ungünstige Ereignis, d.h. Freisetzung, Brand oder Explosion. Kombinierte Abläufe sind sinngemäß zu behandeln.

Die Vereinfachungen und Beschränkungen sind bei der Behandlung der jeweiligen Szenarien angeführt. Wie bereits erwähnt, schließt der „hypothetische Störfall“ eine Berücksichtigung der (aktiven) unfallvermeidenden Maßnahmen aus (siehe Kap. 3).

Die verschiedenen Phasen bei der Einschätzung des Schadensausmaßes sind im folgenden Kapitel schematisch dargestellt.

## 2.2 Ablaufschema zur Einschätzung der Konsequenzen eines Unfalles

Das allgemeine Vorgehen bei der Analyse der Konsequenzen eines schweren Unfalles kann wie folgt dargestellt werden:

Ablauf	Kriterien	Hilfsmittel
Auslösendes Ereignis ↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Freisetzung</li> <li>• Brand</li> <li>• Explosion</li> </ul>	
Gefahreigenschaften ↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Relevante physikalische und chemische Eigenschaften</li> <li>• Gefahrenklassierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sicherheitsdatenblatt</li> <li>• Lieferant</li> <li>• Nachschlagewerke</li> </ul>
Ausbreitungspfad ↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boden</li> <li>• Wasser</li> <li>• Luft</li> </ul>	
Wirkdistanz ↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aggregatzustand</li> <li>• Freisetzungsort</li> <li>• Stoffmenge (*)</li> <li>• Wetter/Wind</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tabellen aus Leitfaden</li> </ul>
Umgebung ↓	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Topographie</li> <li>• Siedlungsdichte</li> <li>• Empfindliche Objekte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Karten</li> <li>• Katasterplan</li> </ul>
Einschätzung der Konsequenzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mensch</li> <li>• Ökosphäre</li> <li>• Infrastruktur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Überlagerung Unfallzonen mit Siedlungsdichte</li> </ul>

(\*) Da es sich bei den Mengenschwellen in der Seveso II-RL um eine Definitionsgröße handelt, die sich auf den gesamten Anlagenkomplex bezieht, ist die Einschränkung auf die größte zusammenhängende Stoffmenge innerhalb der Anlage ein realistischer Ansatz.

---

## **2.3 Mögliche Unfallszenarien**

Aufgrund der Gefahreneigenschaften eines Stoffes kann man die Unfallszenarien hinsichtlich ihrer Auswirkungen nach folgenden Gesichtspunkten einteilen:

### **2.3.1 Freisetzung von Flüssigkeiten und Feststoffen (Leckage)**

Bodenverschmutzung, Verunreinigung von Grundwasser und Oberflächengewässer, Vernichtung von Wasserlebewesen, Schädigung öffentlicher Ver- und Entsorgungsanlagen wie Trinkwasserreservoirs und Abwasserreinigungsanlagen.

Beteiligte Stoffe: Flüssigkeiten entsprechender Wassergefährdungsklassen, z.B.

- Mineralöle
- Anorganische Säuren und Laugen
- Chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW)
- Organische Lösungsmittel
- Schwermetalle
- Cyanide

### **2.3.2 Freisetzung von Gasen**

Vergiftung von Mensch und Tier aufgrund großräumiger Ausbreitung von toxischen, schweren Gasen. Gefährdung besonders empfindlicher öffentlicher Einrichtungen wie Schulen, Spitäler, Altersheime, Einkaufszentren (beschränkte Fluchtmöglichkeiten, Evakuierung teilweise problematisch).

Beteiligte Stoffe: Toxische Gase, z.B.

- Chlor
- Ammoniak
- Chlorwasserstoff
- Cyanwasserstoff

aber auch Kombinationen von Stoffen, die erst beim Zusammentreffen hochgiftige Gase freisetzen:

- Salzsäure und Javellewasser=Kaliumhypochlorit (Chlor)
- Salzsäure und Natriumchlorit (Natriumchlorid)
- Cyanidhaltige Salze und Säuren (Blausäure)

### **2.3.3 Brand / Explosion**

Unmittelbar eintretende Auswirkungen auf Bevölkerung und Bauwerke durch Explosionen und intensive Brände mit Folgewirkungen wie Trümmerwurf, Druckwellen und Hitzestrahlung.

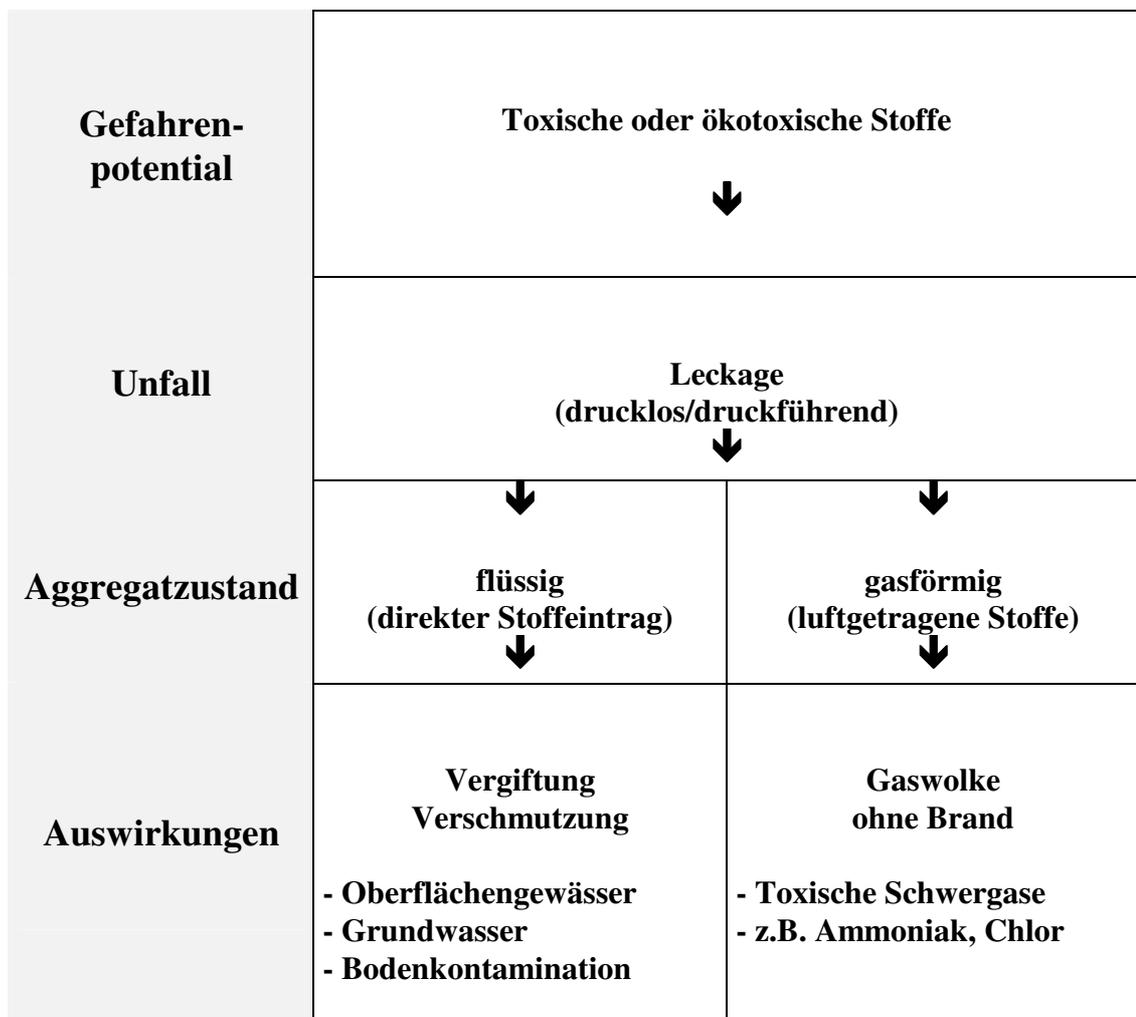
Beteiligte Stoffe: Leichtentzündliche und entzündliche Flüssigkeiten sowie brennbare Gase, z.B.

- Organische Lösungsmittel
- Benzine
- Flüssiggas (Propan, Butan)

### 2.3.4 Auswahl der Unfallszenarien

Bei der Auswahl der Unfallszenarien sind in erster Linie die gefährlichen Eigenschaften (physikalische und chemische Stoffparameter) und der Aggregatzustand der am schweren Unfall beteiligten Stoffe maßgebend. Daraus ergeben sich zwangsläufig die anzunehmenden Unfallszenarien, welche mit den Gegebenheiten der jeweiligen Situation und Umgebung zu ergänzen sind. Die Unfallszenarien können folgendermaßen dargestellt werden:

#### Unfallszenarien: Toxische / Ökotoxische Stoffe



Behandelt in

Kap. 12

Kap. 13

**Unfallszenarien: Brennbare oder explosionsfähige Stoffe - Unfall: Brand**

<b>Gefahrenpotential</b>	<b>Brennbare oder explosionsfähige Stoffe</b>			
	↓			
	<b>Unfall</b>			
	↓			
<b>Aggregatzustand</b>	↓	↓	↓	↓
	<b>fest</b>	<b>flüssig</b>	<b>flüssig/ gasförmig</b>	<b>gasförmig</b>
<b>Auswirkungen</b>	↓	↓	↓	↓
	<b>Feststoffbrand Staubexplosion</b>	<b>Lachenbrand „Pool-Fire“ „Tank-Fire“</b>	<b>Feuerball „BLEVE“ „Boil-Over“ „Jet-Fire“</b>	<b>Gaswolkenbrand „Deflagration“ „Flash-Fire“</b>
<b>Behandelt in</b>	Kap. 9	Kap. 7	Kap. 6	Kap. 8

„Pool-Fire“ Brand in Auffangwanne/Flächenbrand

„Tank-Fire“ Tankbrand

„Boil-Over“ Feuerball durch Boil-Over Phänomen (Bersten eines Behälters/Festdach-Tanks mit brennbaren Flüssigkeiten nach Wärmeeintrag)

„Bleve“ Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (Bersten eines Behälters mit brennbaren druckverflüssigten Gasen nach Wärmeeintrag)

„Jet-Fire“ Gezündeter Freistrah (unmittelbare Zündung bei Austritt)

„Flash-Fire“ Rasche Verbrennung einer Gaswolke ohne eine Druckwelle zu erzeugen

**Unfallszenarien: Brennbare oder explosionsfähige Stoffe -Unfall: Explosion**

<b>Gefahren- potential</b>	<b>Brennbare oder explosionsfähige Stoffe</b>		
	↓		
	<b>Unfall</b>		
	↓		
<b>Aggregat- zustand</b>	↓	↓	↓
	<b>fest</b>	<b>flüssig</b>	<b>gasförmig</b>
<b>Auswirkungen</b>	↓	↓	↓
	<b>explosionsartige Zersetzung</b> - Reaktive Stoffe - Sprengstoffe - z.B. TNT	<b>explosionsartige Zersetzung</b> - Reaktive Stoffe	<b>Gaswolken- explosion</b> „UVCE“ / „VCE“

Behandelt in

Kap. 11

Kap. 11

Kap. 10

„UVCE“     Unconfined Vapour Cloud Explosion  
 Unverdämmte     Gaswolkenexplosion

„VCE“     Confined Vapour Cloud Explosion  
 Verdämmte Gaswolkenexplosion

---

### **2.3.5 Schwere Unfälle in gefahreneigten Anlagen**

Theoretisch könnten sich in gefahreneigten Anlagen der Prozeßindustrie folgende Arten von folgenschweren Vorkommnissen ereignen:

- A. Brand
- B. Flash-Fire
- C. UVCE/VCE
- D. Feuerball/BLEVE/Boil-Over
- E. Staubexplosion
- F. Andere Arten von Explosionen
- G. Freisetzung von toxischen Gasen
- H. Toxische Brandgase

Eine Übersicht gegliedert nach Stoffen und dafür in Betracht kommender Anlagen ist in folgender Zusammenstellung gegeben:

Stoffe / Anlagen	Mögliche Unfälle
<p>1. Verflüssigte brennbare Gase</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lagerung unter Druck</li> <li>• Lagerung unter atmosphärischem Druck</li> <li>• Prozeß-Anlage</li> <li>• Straßen/Eisenbahn-Tankwagen Abfüllung</li> <li>• Straßen/Eisenbahn-Transport</li> <li>• Schiffs- und Werftbetrieb</li> <li>• Überland-Pipelines</li> </ul>	<p>A, B, C, D A, C, D A, B, C, D A, B, C, D A, B, C, D A, B, C, D A, C, D</p>
<p>2. Brennbare Flüssigkeiten</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tanklager</li> <li>• Faßlager</li> <li>• Prozeß-Anlage</li> <li>• Straßen/Eisenbahn-Tankwagen Abfüllung</li> <li>• Straßen/Eisenbahn-Transport</li> <li>• Schiffs- und Werftbetrieb</li> <li>• Überland-Pipelines</li> </ul>	<p>A A, B A, B, C, D A A A A</p>
<p>3. Brennbare Gase</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lager oder Produktion</li> </ul>	<p>A, C, D</p>
<p>4. Brennbare Stäube (oder stauberzeugende Feststoffe)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lager oder Produktion</li> </ul>	<p>A, E</p>
<p>5. Stark reaktive Stoffe</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lager</li> <li>• Produktion</li> </ul>	<p>A, D, E, F, H A, D, E, F, H</p>
<p>6. Toxische Gase</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lager</li> <li>• Verarbeitung, Herstellung</li> </ul>	<p>G G</p>
<p>7. Stoffe mit toxischen Verbrennungsprodukten</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lager oder Verarbeitung</li> </ul>	<p>H</p>

---

### 3. **BERÜCKSICHTIGUNG VON SICHERHEITSMABNAHMEN UND -EINRICHTUNGEN**

Bei der Ermittlung der möglichen Konsequenzen eines Unfalles ist grundsätzlich von einem Versagen des primären Einschlusses (Verpackung, Faß, Tank, Container, Reaktor, Rohrleitung) auszugehen. Das Ausmaß des Schadens wird im wesentlichen durch die Art und Menge der beteiligten Stoffe, den zeitlichen Verlauf des Unfalles und das (eventuelle) Vorhandensein weiterer Rückhaltebarrieren bestimmt.

Barrieren für einen Unfall mit wassergefährdenden Stoffen sind z.B.

- Auffangwannen
- Löschwasserrückhaltebecken
- Vorbereitete Kellergeschoße

Barrieren für einen Unfall mit Brand sind z.B.

- Baulicher Brandschutz
- Abschirmmauer(Wärmestrahlung)
- Erddeckung (keine Unterfeuerung)

Passive Sicherheitsmaßnahmen, wie z.B. der bauliche Brandschutz (Brandabschnitte), Beton-Auffangwannen, Löschwasserrückhaltebecken oder Erddeckung dürfen in der Regel als begrenzende bzw. verhindernde Maßnahmen in der Unfallbetrachtung berücksichtigt werden. Sind Explosionen zu erwarten, können jedoch auch bauliche Sicherheiten versagen.

Wie bereits erwähnt, schließt der „hypothetische Störfall“ eine Berücksichtigung der vermeidenden Maßnahmen kategorisch aus, d.h. aktive Sicherheitsmaßnahmen, wie z.B. MSR-Einrichtungen, Alarmsysteme, brandfallgesteuerte Sicherheitsfunktionen werden außer Betracht gelassen, weil sie prinzipiell versagen können. Dasselbe gilt für Einsatzkonzepte lt. Alarm- und Gefahrenabwehrplan.

### 4. **UNFALLSZENARIEN - BESTIMMUNGSGRÖßEN UND EINFLUßPARAMETER**

Das allgemeine Vorgehen bei der Analyse der Konsequenzen eines schweren Unfalles wurde bereits in Kap. 2.2 dargestellt. Die Auswahl der wesentlichen Unfallszenarien orientiert sich mehr am Ausmaß der Schädigung der Bevölkerung und der Umwelt als an der Eintrittswahrscheinlichkeit. Eine sehr kleine Eintrittswahrscheinlichkeit ist an sich kein Grund, ein Szenarium aus der Liste der wesentlichen Szenarien auszuschließen.

Bei der Untersuchung der wesentlichen Unfallszenarien sind die folgenden drei Fragen zu beantworten:

Freisetzungsvorgänge → Wirkung der Freisetzung → Folgen für Bevölkerung und Umwelt.

Die Bestimmungsgrößen und Einflußparameter für Unfallszenarien sind im folgenden übersichtlich zusammengefaßt:

	<b>Bestimmungsgrößen</b>	<b>Einflußparameter</b>
<b>Freisetzung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leckart/-größe</li> <li>• Leckmenge/-rate</li> <li>• Lachengröße</li> <li>• Verdampfungsrate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ursache der Leckage</li> <li>• Aggregatzustand der freigesetzten Substanz <ul style="list-style-type: none"> <li>• gasförmig</li> <li>• flüssig</li> <li>• zweiphasig</li> </ul> </li> <li>• total freigesetzte minus spontan verdampfende und aerosolbildende Menge</li> <li>• Bodenbeschaffenheit</li> <li>• Verdampfungsmechanismus</li> </ul>
<b>Wirkung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Schadstoffkonzentration am Ort X</li> <li>• Wirkung am Ort X</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Freisetzungsart/Quelle <ul style="list-style-type: none"> <li>• spontan</li> <li>• kontinuierlich</li> </ul> </li> <li>• Dichte der Gaswolke</li> <li>• Geländeart (Häuser, Wald etc.)</li> <li>• Windverhältnisse</li> <li>• atmosphärische Bedingungen</li> <li>• akute Toxizität</li> <li>• Brand/Hitzeabstrahlung</li> <li>• Explosion/Druckwelle</li> </ul>
<b>Folgen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• für die Bevölkerung</li> <li>• für die Umwelt, z.B. das Grundwasser</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bevölkerungsdichte in der Schadenszone</li> <li>• Verweilzeit/Exposition</li> <li>• Schutzgrad (Aufenthalt im Freien oder Gebäuden)</li> <li>• Durchlässigkeit der überdeckenden Schichten</li> <li>• Infiltrationsverhältnisse</li> <li>• Distanz zum Grundwasserspiegel</li> </ul>

---

## 4.1 Freisetzungsvorgänge und freigesetzte Mengen

Dabei wird der Austritt von Stoffen durch größere Schäden, wie z.B. Rohr- und Behälterbrüche an stoffführenden Systemen mit großem Massenstrom (druckführend, drucklos) unterstellt, d.h. das sogenannte „Leck vor Bruch“-Verhalten als Warnsignal für ein bevorstehendes Versagen wird nicht zur Kenntnis genommen.

### **„Leck vor Bruch“-Verhalten:**

Vor dem Totalversagen eines Bauteiles, z.B. völliger und plötzlicher Totalabriß bzw.-aufriß einer Rohrleitung, entsteht in dem belasteten Teil ein rißförmig ausgebildetes Leck. D.h. Rißbildungen führen nicht schlagartig zu großen Öffnungsquerschnitten, sondern es entstehen zuerst Risse, die allmählich größer werden. Das „Leck vor Bruch“-Verhalten gilt lt. Kap. 1.2 für Auswirkungsbetrachtungen von Leckagen auf der Ebene 1.

Eine handhabbare Vorgabe für die Bildung von Unfallablaufszenarien und Unfallauswirkungen bei der Definition von Referenzszenarien können folgende Vorkommnisse darstellen:

- Der Rohrabriß (2F-Bruch) der Leitung, die den größten Massenstrom führt, sowohl bei druckführenden als auch drucklosen Systemen. Darunter versteht man den vollständigen Bruch einer Leitung, sodaß der Stoff über beide Bruchflächen austreten kann. Sind an beiden Enden der Rohrleitung z.B. passive Sicherheitseinrichtungen wie Rückschlagklappen oder sonstige (passive) Absperrarmaturen vorhanden, so kann die insgesamt freigesetzte Menge aus dem Inhalt der Rohrleitung bzw. der Förderleistung der Pumpe und der Zeit bis zum vollständigen Schließen der Rückschlagklappen oder sonstigen Absperrarmaturen abgeschätzt werden.
- Das mechanische Versagen des größten Behälters bzw. Tanks, sowohl bei druckführenden als auch drucklosen Systemen. D.h. der Inhalt des größten Tanks fließt entweder in die (größte) Auffangwanne oder bildet bei unbehinderter Ausbreitung eine Lache, deren Größe abgeschätzt werden kann. In einem Tanklager mit nicht erdgedeckten Lagerbehältern für brennbares Flüssiggas nimmt man z.B. an, daß es beim größten Tank unter Umständen zu einem BLEVE kommen kann.
- Als größte zusammenhängende Stoffmenge innerhalb der Anlage oder des Lagers ist bei einem Feststoffbrand oder Brand einer brennbaren Flüssigkeit die in einem Brandabschnitt/Auffangwanne gelagerte Stoffmenge zu nehmen.
- Bei explosionsartiger Zersetzung von Sprengstoff wird ebenso die größte zusammengelagerte Stoffmenge innerhalb der Anlage oder des Lagers zugrundegelegt.

Bei komprimierten oder tiefgekühlten Gasen ist zu berücksichtigen, daß bei der Freisetzung ein Teil der austretenden Flüssigkeit spontan verdampft und dabei einen weiteren Teil der Flüssigkeit in Form eines Aerosols mitreißt.

Der nicht spontan verdampfende oder aerosolbildende Teil der austretenden Flüssigkeit bildet am Boden eine Lache, deren Größe von der Menge und Art der Flüssigkeit, der Bodenbeschaffenheit sowie vom Vorhandensein allfälliger Begrenzungen abhängt.

Die Verdampfungsrate einer ausgelaufenen Flüssigkeit hängt u.a. von der Lachengröße, der Temperatur der Flüssigkeit sowie dem Wärmefluß aus dem Boden und der Umgebungsluft ab.

Die freigesetzten Mengen müssen anlagenabhängig nach Erhebung bei den Betreibern der Anlage abgeschätzt werden, eine generische Festlegung für die Referenzszenarien wäre nicht zielführend (z.B. in einem Tanklager für brennbare Flüssiggase kann es bei erdgedeckten Lagerbehältern zu keinem BLEVE kommen).

## 4.2 Wirkung der Freisetzung

Für die gewählte Freisetzung ist die räumliche und zeitliche Ausbreitung der freigesetzten Substanz in der Umgebung zu ermitteln. Daraus erhält man eine orts- und zeitabhängige Konzentrationsverteilung des freigesetzten Stoffes.

Die beim Ausbreitungsvorgang zu berücksichtigenden wesentlichen Größen und Parameter sind in der Einführung zu Kap. 4 angegeben. Der zeitliche und örtliche Verlauf der Ausbreitung einer flüchtigen Substanz hängt u.a. von der Art der Freisetzung (spontan oder kontinuierlich), von den Eigenschaften der freigesetzten Substanz im Vergleich zum übertragenden Medium (z.B. bei Gasen: schwerer oder leichter als Luft), von der Topographie, von den atmosphärischen Bedingungen etc., ab.

Aufgrund der Konzentrationszonen werden die Schadenszonen bestimmt. Mit bekannten Kriterien, z.B. dem IDLH-Wert (ImmEDIATELY DANGEROUS TO LIFE AND HEALTH) für die akute Humantoxizität, werden die für die Bevölkerung oder die Umwelt schädlichen Bereiche aufgezeigt.

Bei brennbaren Stoffen muß auch die Möglichkeit eines Brandes oder einer Gasexplosion mitberücksichtigt werden. In diesen Fällen werden die Hitzestrahlung oder die verschiedenen Explosionsarten berücksichtigt.

Breitet sich die freigesetzte Substanz in einem Oberflächengewässer aus, berechnet man in der Regel die Wassermenge, die mit der freigesetzten Schadstoffmenge noch bis zur Fisch- bzw. Daphnientoxizitätskonzentration verunreinigt werden kann. Außerdem ist die Möglichkeit einer Kontamination des Grundwassers durch Infiltration zu untersuchen.

Bei einer Ausbreitung in den Boden interessiert vor allem die Eindringtiefe im Hinblick auf eine allfällige Kontamination des Grundwassers.

---

### 4.3 Folgen für Bevölkerung und Umwelt

Die für die Abschätzung oder Berechnung der möglichen Schädigungen der Bevölkerung oder der Umwelt zu berücksichtigenden wesentlichen Größen und Parameter sind in der Einführung zu Kap. 4 angegeben. Zur Bestimmung der Folgen für die Bevölkerung muß beispielsweise untersucht werden, wer sich innerhalb der Schadenszonen befindet und dadurch gefährdet ist. Dabei sind verschiedene Faktoren zu berücksichtigen, z.B. tageszeitliche Schwankungen der Bevölkerungsdichte (Tag/Nacht), Schutzgrad (Aufenthalt im Freien oder in Gebäuden), besondere Anfälligkeit von Risikogruppen (Kinder, Kranke, Gebrechliche, Betagte).

Zur Bestimmung der Folgen für die Umwelt sind am Beispiel des Grundwassers die wichtigsten Parameter aufgelistet.

## 5. AUSWAHL DER REFERENZSZENARIEN

Wie in Kap. 1.2 betreffend die Konsequenzenanalyse von möglichen schweren Unfällen bereits erläutert, sind die sogenannten Referenzszenarien auf der Ebene 2 der Unfallauswirkungen einzuordnen.

Dabei wird ein größerer „hypothetischer Störfall“ mit Freisetzung, Brand oder Explosion angenommen, der aber ausdrücklich jenseits von „Horror-Szenarien“ liegt und dessen Auswirkungen im Sinne der Seveso II-Richtlinie einen „schweren Unfall“ mit Bestehen ernster Gefahr für Mensch und Umwelt bedeuten.

Um bei der Auswahl der Szenarien für denkbare schwere Unfälle nicht über das Ziel zu schießen, wurde die Methode der „Referenzszenarien“ entwickelt, welche u.a. in Frankreich stark in Verwendung ist. Bei der Festlegung dieser Szenarien wird auf die praktische Erfahrung und hauptsächlich auf Aufzeichnungen früherer schwerer Unfälle für eine spezifische Art von Anlage zurückgegriffen. Da in Österreich keine derartigen Aufzeichnungen existieren, wird auf die Erfahrungen im EU-Raum zurückgegriffen. Eine sehr hilfreiche Unterlage dabei ist der Report EUR 16452 EN aus dem Jahre 1996, „Land Use Planning of Major Accident Hazards-An Analysis of Procedures and Criteria in Selected EU Member States“ von M. Smeder et al. Demnach wird von der Mehrheit der EU-Staaten der deterministischen Methode („Konsequenz-orientiert“), d.h. den Referenzszenarien, gegenüber der probabilistischen Methode der Vorzug gegeben.

Wie dem Bericht zu entnehmen ist, kommen für die Referenzszenarien zum Zwecke der Raumplanung in erster Linie schwere Unfälle mit Auswirkungen über das Betriebsgelände hinaus in die nähere bzw. entferntere Umgebung in Frage, und zwar sind dies im speziellen:

- **Schwere Unfälle mit toxischen Auswirkungen,**
- **Schwere Unfälle mit Brand/Hitzestrahlung,**
- **Schwere Unfälle mit Explosion/Druckwelle,**

in Abhängigkeit von der Art des Stoffes (toxisch/brennbar) und dem Erscheinungsbild (Brand/Explosion).

Von den in Kap. 2.3.4 dargestellten Unfallszenarien müssen also folgende als Referenzszenarien berücksichtigt werden:

**Toxische oder ökotoxische Stoffe:**

- **Vergiftung/Verschmutzung von Oberflächengewässer, Grundwasser, Bodenkontamination**
- **Gaswolke ohne Brand, Toxische Schwergase**

**Brennbare oder explosionsfähige Stoffe:**

- **Lachenbrand, Pool-Fire, Tank-Fire**
- **Feuerball, Boil-Over, BLEVE**

Feststoffbrand und Staubexplosion, Jet-Fire, Deflagration und Flash-Fire werden aufgrund ihrer geringen, in der Regel auf das Betriebsgelände beschränkten Auswirkungen, nicht berücksichtigt.

**Brennbare oder explosionsfähige Stoffe:**

- **Gaswolkenexplosion, UVCE, VCE**
- **Sprengstoffe**

Bei den Sprengstoffen (TNT) ist anzumerken, daß entsprechende Sicherheitsabstände auch in der Sprengmittelgesetzgebung festgelegt sind.

Die explosionsartige Zersetzung reaktiver Stoffe wird ebenso aufgrund ihrer geringen, in der Regel auf das Betriebsgelände beschränkten Auswirkungen, nicht berücksichtigt.

## **6. FEUERBALL, BLEVE, BOIL-OVER**

Ein Feuerball entsteht, wenn

- ein Behälter mit brennbarem, verflüssigten Gas
- oder ein mit einer über ihren normalen (atmosphärischen) Siedepunkt hinaus erhitzten, brennbaren Flüssigkeit unter Druck gesetzter Tank

aufgrund von Flammeneinwirkung (externer Brand) aufreißt und der Inhalt schlagartig auf Umgebungsdruck expandiert und sich entzündet..

---

BLEVE steht für Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, typische Vertreter für brennbare Flüssiggase sind Propan und Butan.

Es muß erwähnt werden, daß Tieftemperatur-Lagerung von Flüssiggas bei atmosphärischem Druck keinen BLEVE verursachen kann.

Fässer mit brennbaren Lösungsmitteln oder Festdach-Tanks mit Stoffen wie Benzin können ebenso, wenn von Flammen eingeschlossen, so unter Druck stehen, daß der Behälter versagt. Die Folgen und Auswirkungen sind mit dem BLEVE bei brennbarem Flüssiggas vergleichbar.

Zum BOIL-OVER kommt es z.B. bei einem Festdach-Tank aufgrund von Explosion der Gasphase, Feuerball und Herausschleudern des brennenden Produktes aufgrund des über den Siedepunkt hinaus erhitzten Inhalt des Tanks.

## 6.1 BLEVE

Das Behälterversagen beim BLEVE kann durch zwei voneinander unabhängige Probleme entstehen:

**Starke Flammeneinwirkung auf den oberen Behältermantel** (Gasphase) führt aufgrund der fehlenden Kühlung durch das Lagergut und der geringen Wärmekapazität der Behälterwand zu einem raschen und starken Abfall der Festigkeitskennwerte des Mantelwerkstoffes, sodaß der Behälter auch bei Drücken unterhalb des Ansprechdruckes des Sicherheitsventiles bersten kann.

**Flammenwirkung auf den unteren Bereich des Behältermantels** (Flüssigphase) erzeugt aufgrund des Dampfdruckes des Produktes einen Druckanstieg im Behälter. Dieser verläuft im allgemeinen langsam, da über Wärmeübertragungsvorgänge die Verdampfungswärme in die Flüssigkeit eingebracht werden muß. Kritisch sind in diesem Zusammenhang Flammen eines Freistrahles, wie sie sich bei Leckagen an einer Rohrleitung für brennbare Stoffe mit hohem Betriebsdruck ausbilden können. Der beim Austritt entstehende vollturbulente Produktstrahl führt zu einer starken Lufteinmischung, sodaß eine vorgemischte Flamme hoher Wärmeleistung entsteht, welche beim Auftreten auf die Behälterwand zu einem guten Wärmeübergang führt. Durch solche Flammen können Wärmeleistungen bis zu 300 kW/m<sup>2</sup> übertragen werden, was auf der Innenseite des Behälters zum Filmsieden des Produktes führen kann. Dabei ist die Kühlung der Behälterwand nicht mehr ausreichend, sodaß in solchen Fällen auch ein Behälterversagen unterhalb des Ansprechdruckes des Sicherheitsventiles erfolgen kann.

Die schlagartige Druckentspannung beim Aufreißen des Behälters führt zu einer raschen Verdampfung des Produktes (Flash-Verdampfung), die dabei erzeugte hohe Turbulenz führt zu einer starken Lufteinmischung in die entstehende Dampf Wolke. Das nachfolgende Abbrennen des Feuerballes führt neben einer Druckerhöhung zu einer besonders intensiven Wärmestrahlung in der Umgebung.

### 6.1.1 Ursachen und typischer Ablauf eines BLEVE

1. Leckage in den Rohrleitungen eines Flüssiggastanks
2. Zündung
3. Aufheizen des Tanks. Anfängliche Kühlung des Tanks durch das Flüssiggas, welches zum Sieden kommt und den Druck bis zum Ansprechen des Sicherheitsventils steigen läßt. Das aufgrund der Druckentlastung freigesetzte Gas zündet.
4. Der Flüssigkeitsstand im Tank fällt, bis die Flammen den Teil des Tanks ober dem Flüssigkeitspegel treffen.
5. Der Werkstoff erhitzt sich so lange, bis das Material aufgrund von Festigkeitsverlust versagt.
6. Der Tank zerburst augenblicklich. Das Flüssiggas entweicht in Form von Dampf und Aerosol und zündet. Der entstehende Feuerball expandiert innerhalb etwa einer Sekunde zu seiner vollen Größe, steigt langsam in die Luft und verbrennt innerhalb von 10-15 Sekunden.

Große Bruchstücke des Tanks fliegen bis zu 1800 m im Umkreis (vgl. Kap. 6.1.8).

### 6.1.2 Auswirkungen des BLEVE

Um den Durchmesser des Feuerballes abschätzen zu können, wurden bekannte Unfalldaten analysiert und empirische Korrelationen aufgestellt. Von TNO wurde eine Korrelation entwickelt und daraus eine Formel abgeleitet, die häufigst Verwendung findet:

$$D = 6,48 \cdot M^{0,325}$$

D Durchmesser des Feuerballes [m]

M Masse des Kohlenwasserstoffes (Propan, Butan, etc.) [kg]

Im folgenden werden die Durchmesser berechneter Feuerbälle mit denen aus Unfallberichten beobachteten verglichen.

Ereignis	Masse [t]	D [m] Beobachtet	D [m] Berechnet
Celle, BRD 1958	27	50-100	180
Crescent, Ill. USA	64	200	240

1970			
Houston, Texas 1971	165	300	320
Lynchburg, Virginia 1972	18	240	160
Kingman, Arizona 1973	16	240	210
Nijmegen, Niederlande 1978	15	40	150
<b>Ereignis</b>	<b>Masse [t]</b>	<b>D [m] Beobachtet</b>	<b>D [m] Berechnet</b>
San Juan Ixhuatepec, Mexiko 1984	16-735	200-600	150-520

Für die Lebensdauer des Feuerballes wurde von TNO folgende Beziehung hergeleitet:

$$T = 0,852 \cdot M^{0,26}$$

T Lebensdauer des Feuerballes [s]

M Masse des Kohlenwasserstoffes (Propan, Butan, etc.) [kg]

Der Durchmesser und die Lebensdauer des Feuerballes in Abhängigkeit von der Menge des brennenden Stoffes sind für Propan in Abb. 2 bzw. Abb. 3 dargestellt.

### 6.1.3 Berechnung der Wärmestromdichte

Für die Berechnung der Wärmestromdichten (Intensität) in bestimmter Entfernung von der Oberfläche der Quelle muß ganz allgemein neben dem Strahlungsanteil und Durchlässigkeit (Absorption aufgrund der Luftfeuchtigkeit) der Luft u.a. die geometrische Form des Wärmestrahlers berücksichtigt werden, d.h. Punktquelle, sphärische Quelle, zylindrische Quelle (Pool-Fire), ebene Quelle.

Die Punktquellen-Methode nimmt, wie der Name vermuten läßt, eine punktförmige Wärmequelle an, die sich im Zentrum der Flamme befindet und einen bestimmten Anteil der Verbrennungswärme in Form von Strahlung abgibt, der für beliebigen Abstand von der Quelle berechnet werden kann, wobei der Abschwächungseffekt durch atmosphärischen Wasserdampf für entferntere Distanzen berücksichtigt wird.

Die Punktquellen-Methode liefert für sphärische Quellen, also Feuerbälle und für entferntere Distanzen zufriedenstellende Ergebnisse.

Die Wirkdistanzen für charakteristische (hinsichtlich Einwirkung auf Menschen, Materialien und Einsatzdienste) aus Feuerbällen resultierende Wärmestrahlungsdichten sind in Tabelle 1 für Propan übersichtlich zusammengestellt und in Abb. 4 graphisch dargestellt. Zwischenwerte können linear interpoliert werden. Diese Wirkdistanzen basieren auf dem Punktquellen-Modell, d.h. die Problematik im Zusammenhang mit dem Sichtwinkel bzw. der sogenannten Einstrahlzahl braucht nicht berücksichtigt zu werden, und stellen somit eine konservative Abschätzung dar. Die Einstrahlzahl ist ein Maß dafür, welche die Quelle verlassende Strahlung auf die bestrahlte Oberfläche (Mensch, Gebäude etc.) auftrifft. Die zugehörigen Wirkflächen wurden vereinfachend als Fläche eines Kreises mit Radius = Wirkdistanz berechnet und sind in Tabelle 2 angeführt bzw. in Abb. 5 graphisch dargestellt.

Um das Schadensausmaß für die betroffene Bevölkerung abzuschätzen, wird diese Wirkfläche [km<sup>2</sup>] mit der entsprechenden Siedlungsdichte [Einwohner/km<sup>2</sup>] des betroffenen Gebietes multipliziert.

*Der Referenzstoff Propan wird deshalb herangezogen, da Propan häufig in Verwendung ist und der Heizwert von Kohlenwasserstoffen typisch 46.000 KJ/kg beträgt, d.h. daß man bei der Verbrennung von 1 kg/s eines Kohlenwasserstoffes mit einer Freisetzung von etwa 46 MW rechnen muß.*

#### 6.1.4 Auswirkungen der Hitzestrahlung auf Menschen und Bauten

Für die Auswirkungen der Wärmestrahlung auf den Menschen ist die Hitzbelastung, also die „thermische Dosis“, d.h. die Wärmestromdichte und die entsprechende Expositionsdauer maßgebend.

Um die Auswirkungen der Hitzestrahlung auf den Menschen abzuschätzen, werden üblicherweise 2 Methoden verwendet, und zwar die qualitative Methode und eine quantitative, die sogenannte „Probit“-Methode.

#### 6.1.5 Qualitative Methode

Die qualitative Methode greift auf charakteristische Erfahrungswerte bzw. Richtlinien zurück, d.h. man verwendet Tabellen, aus denen man ablesen kann, für welche Wärmestromdichten eine bestimmte Expositionszeit zu welchen Auswirkungen führt.

Im folgenden werden einige Richtwerte für Auswirkungen auf Menschen, Einsatzdienste sowie auf Bauten und Anlagenteile gegeben („Schadensausmaß-Einschätzung“, Schweiz):

Hitzestrahlung [kW/m <sup>2</sup> ]	Auswirkungen auf Menschen
1	Maximale Sonneneinstrahlung
1,5	Auch bei längerer Exposition keine nachteiligen Auswirkungen
4,5	Nachteilige Auswirkungen (Blasenbildung) nach 20 s

6,5	Schmerzschwelle
12,5	Verbrennungen 1. Grades nach 10 s
20	Blasenbildung nach 5 s
25	Verbrennungen 2. Grades nach 10 s
36	Verbrennungen 3. Grades nach 10 s

Hitzestrahlung [kW/m <sup>2</sup> ]	Auswirkungen auf Einsatzdienste
1,5	Feuerwehr kann längere Zeit eingesetzt werden, ausreichend Zeit zum Abfahren der Anlage (Warte)
4,5	Feuerwehr kann ohne gekühlte Anzüge eingesetzt werden
8	Feuerwehr kann kurzzeitig in speziell gekühlten Anzügen eingesetzt werden
12,5	Tanks können bei ausreichender Kühlung gehalten werden
36	Tanks können trotz genügend Kühlwasser nicht ausreichend gekühlt werden

Hitzestrahlung [kW/m <sup>2</sup> ]	Auswirkungen auf Bauten und Anlagenteile
2	Zerstörung von Lackschichten auf Holz nach ca. 30 min
3	Zerstörung der Oberfläche von Kunststoffen nach ca. 30 min
4,5	Zündung von bitumengetränkter Dachpappe bei Flammenkontakt
12,5	Bersten von Glasscheiben nach ca. 10 min
15	Zündung von Holz bei Flammenkontakt; Schmelzen von Kunststoffen
25	Zündung von Holz ohne Flammenkontakt; Zerstörung von Kunststoffen
30	Verformung von Stahlprofilen nach ca. 30 min
35	Spontanzündung Textilien nach ca. 15 min
36	Spontanzündung von Holz
40	Schäden an Anlagenteilen aus Stahl
75	Spontanzündung von PVC nach 15 min
100	Zündung von mit Aluminiumplatten abgedeckter Dachisolationen; Versagen tragender Stahlprofile nach 20 min

Qualitative Richtwerte für Menschen, Materialien und Einsatzdienste sind auch im unteren Teil von Tabelle 1 und Tabelle 2 angeführt.

### 6.1.6 Probit-Methode

Innerhalb der Bevölkerung ist die Empfindlichkeit von Personen schädlichen Einflüssen (Hitzestrahlung, Überdruck bei Explosionen, toxische Gase) gegenüber verschieden. D.h., die Reaktion verschiedener Personen auf gleiche toxische oder

thermische Belastung ist nicht immer die gleiche. Es wurde allgemein festgestellt, daß der Logarithmus der schädlichen Einwirkung einer Normalverteilung gehorcht.

Um diese Tatsache in ein Modell umzusetzen (siehe Lees, F.P. „Loss Prevention in the Process Industries“), wurde die Probit-Funktion eingeführt, die die allgemeine Form hat:

$$\text{Probit} = -A + B \cdot \ln(I^N \cdot t) \quad \text{für brennbare Substanzen}$$

Probit	Probability Unit
I	Wärmestromdichte [kW/m <sup>2</sup> ]
t	Expositionszeit [s]
A, B, N	Konstanten für Hitzeabstrahlung

Für alle brennbaren Stoffe: N=4/3  
A=14,9  
B=2,56

Das Produkt ( $I^N \cdot t$ ) wird in der Literatur häufig als „thermische Dosis“ bezeichnet, d.h. in anderen Worten, daß die Dosis-Wirkung Beziehung keine lineare Abhängigkeit aufweist.

Ist die Größe Probit berechnet, so kann die entsprechende Wahrscheinlichkeit für Todesfälle angegeben in Prozent aus Abb. 6 abgelesen werden. Abb. 6 stellt die über die Normalverteilung integrierte Wahrscheinlichkeit für Todesfälle [%] als Funktion der Variablen Probit dar.

### Beispiel:

Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit bei einer Wärmestromdichte von 12 kW/m<sup>2</sup> und einer Bestrahlungsdauer von 45 s nicht zu überleben ?

$$\text{Probit} = -14,9 + 2,56 \cdot \ln(45 \cdot 12^{1,333}) = 3,3$$

Aus Abb. 6 abgelesen ergibt die entsprechende Wahrscheinlichkeit = 4 % !

Die auf diese Weise gewonnenen Werte stellen eine konservative Abschätzung dar, da keine Schutz- bzw. Fluchtmöglichkeit in Rechnung gestellt wurde. Für die Flucht/Schutz-Wahrscheinlichkeit können die folgenden Richtwerte verwendet werden:

Wärmestromdichte [kW/m <sup>2</sup> ]	Flucht/Schutz - Wahrscheinlichkeit
4 - 6	0,9
6 - 13	0,5

> 13	0
------	---

D.h. die aus Abb. 6 abgelesene Prozentzahl ist mit

(1 - Wahrscheinlichkeit für Flucht/Schutz)

zu multiplizieren.

### 6.1.7 Berechnung der Explosionsdruckwelle (Überdruck)

Dabei wird für die Explosion der freigesetzten Gaswolke (UVCE) analog Kap. 10 vorgegangen.

### 6.1.8 Trümmerwurf

Kommt es zu einem BLEVE, so kann sich der Tank aus seiner Befestigung lösen und über weite Strecken weggeschleudert werden. Der Geschoß-Effekt kommt durch den Gegendruck des brennbaren Flüssiggases, das aus dem beschädigten Tank entweicht, zustande. Die Tanks selbst bzw. Bruchstücke können dabei bis zu einigen hundert Meter fliegen. Bei dem schweren Unglück in San Juan Ixhuatepec, Mexiko City, im Jahre 1984, wurden 12 Tanks über 100 m weggeschleudert, einer davon sogar 1200 m.

Schätzungen zufolge werden bei einem BLEVE etwa 60 % der Expansionsenergie in kinetische Energie verwandelt, welche die Bruchstücke wie Geschoße wegfliegen läßt. Die maximale Flugstrecke für Kugeltanks wurde auf ca. 900 m, die für zylindrische Tanks auf ca. 1800 m geschätzt (siehe Delvosalle, „Thermal and Missiles Domino Effects“, European Seminar on Domino Effects, Leuven, 1996).

Es hat zwar einige Versuche gegeben, Modelle zur Berechnung der Größe der Bruchstücke und Wurfweiten zu erstellen, zur Zeit gibt es noch keine anerkannten Modelle.

## 6.2 BOIL-OVER

Wie bereits in der Einführung zu Kap. 6 angeführt, kann es in Fässern mit brennbaren Lösungsmitteln oder Festdach-Tanks mit Stoffen wie Benzin ebenso, wenn von Flammen eingeschlossen, durch Verdampfung zu solch einer Druckerhöhung kommen, daß der Behälter versagt. Die Folgen und Auswirkungen sind mit dem BLEVE bei brennbarem Flüssiggas vergleichbar.

Zum BOIL-OVER kommt es z.B. bei einem Festdach-Tank aufgrund von Explosion der Gasphase, Feuerball und Herausschleudern des brennenden Produktes aufgrund des über den (atmosphärischen) Siedepunkt hinaus erhitzten Inhalt des Tanks.

Die Modellierung des Ablaufes ist sehr schwierig, das „BOIL-OVER“-Phänomen bzw. seine Auswirkungen sollten jedoch im besonderen bei der Beurteilung der Lage von Gebäuden, die schwer zu evakuieren sind, berücksichtigt werden.

### 6.2.1 Ablauf-Modell

1. Tank-Leckage in die Auffangwanne
2. Zündung der Dämpfe
3. Brand in der Auffangwanne und Erhitzung des Tanks
4. Versagen des Tank-Daches aufgrund des Überdruckes und Freisetzung einer Gaswolke
5. Herausschleudern des brennenden Produktes in die Auffangwanne
6. Zünden der Gaswolke führt zu Feuerball wie bei BLEVE und zu einer Explosionsdruckwelle wie bei UVCE.

### 6.2.2 Auswirkungen des BOIL-OVER

Der Brand in der Auffangwanne ist ein Flächenbrand und kann wie ein „Pool-Fire“ behandelt werden (vgl. Kap. 7), ebenso das in die Auffangwanne herausgeschleuderte brennende Produkt.

Kommt es zum Zünden der Gaswolke, so müssen sowohl die Auswirkungen eines BLEVE hinsichtlich Wärmestromdichte als auch die Folgen einer Gaswolkenexplosion (UVCE, vgl. Kap. 10) berücksichtigt werden.

Die Menge der im freigesetzten Gas-/Luftgemische vorhandenen brennbaren Flüssigkeit kann dabei folgendermaßen abgeschätzt werden:

Volumen des Gas-/Luftgemisches = Volumen des Tanks (konservative Annahme)

Explosionsgrenzen, z.B. Normalbenzin: 0,6 - 8 Vol-% (aus Sicherheitsdatenblatt)

Annahme: Mittlere stöchiometrische Konzentration = 4 Vol-%

Freigesetzte Massenanteil<sub>Benzin</sub> =  $V_{\text{Tank}} \cdot c \cdot \text{Dichte}_{\text{Luft}} \cdot (M_{\text{Benzin}} / M_{\text{Luft}})$  [kg]

$V_{\text{Tank}}$	Tankvolumen
$c$	Konzentration [Vol-%/100]
$\text{Dichte}_{\text{Luft}}$	Luftdichte $\approx 1,2$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$M_{\text{Benzin}}$	Molekulargewicht Benzin $\approx 80$ [kg/kmol]
$M_{\text{Luft}}$	Molekulargewicht Luft = 29 [kg/kmol]

#### Beispiel:

Freigesetzter Massenanteil<sub>Benzin</sub> im explosionsfähigen Gemisch eines Benzintanks mit einem Inhalt von 20.000 m<sup>3</sup> ?

---

Freigesetzter Massenanteil  $m_{\text{Benzin}} = 20000 \cdot 0,04 \cdot 1,2 \cdot (80 / 29) \approx 2600 \text{ kg}$ .

Wird die Dampf-/Luftwolke gezündet, so entsteht ein Feuerball mit einem Durchmesser von ca. 80 m (siehe Abb. 2) und einer Lebensdauer von ca. 7 s (siehe Abb. 3 bzw. Kap. 6.1.2). Die Auswirkungen der Wärmestrahlung sind aus Tabelle 1 bzw. Abb. 4, der aus der Gaswolkenexplosion resultierende Überdruck aus Tabelle 5 bzw. Abb. 9 ersichtlich.

### **6.2.3 Berechnung der Wärmestromdichte**

Dabei wird für den BLEVE analog Kap. 6.1.3 vorgegangen, der freigesetzte Massenanteil von brennbarer Flüssigkeit in der Gaswolke kann gemäß Kap. 6.2.2 abgeschätzt werden.

Die Berechnung der Wärmestromdichte als Folge des Brandes in der Auffangwanne (Pool-Fire) erfolgt nach den Ausführungen in Kap. 7.5.

### **6.2.4 Berechnung der Explosionsdruckwelle (Überdruck)**

Dabei wird für die Gaswolkenexplosion (UVCE) analog Kap. 10 vorgegangen, der freigesetzte Massenanteil von brennbarer Flüssigkeit in der Gaswolke kann wiederum gemäß Kap. 6.2.2 abgeschätzt werden.

## **6.3 Gezündeter Freistrah (JET-FIRE)**

Der gezündete (turbulente) Freistrah braucht wegen seiner auf das Betriebsgelände beschränkten Auswirkungen bei den Referenzszenarien, die die Konsequenzen auf die weitere Umgebung abschätzen, im allgemeinen nicht berücksichtigt zu werden. Der gezündete Freistrah ist jedoch im Zusammenhang mit dem BLEVE von Bedeutung (vgl. Einführung zu Kap. 6.1) und wird hier kurz erläutert.

Für JET-FIRE findet man auch öfters die Bezeichnung TORCH-FIRE (Fackel) oder FLARE.

### **6.3.1 Ablauf**

Wenn ein unter Druck gelagertes brennbares Gas durch eine Öffnung ausströmt und gezündet wird, kommt es zu einem Jet-Fire. Typische Ursachen dafür sind Flansch-Leckagen, Rohrleckagen (Korrosion, mechanische Beschädigung) oder Druckentlastungseinrichtungen wie Sicherheitsventile, also vernünftigerweise nicht ausschließbare Ereignisse, die nach den Ausführungen in Kap. 1.2 der Ebene 1 angehören. Aufgrund seiner Intensität (hohe Flammentemperatur wegen turbulenter Mischung mit Luft, intensive Wärmestrahlung) und Flammenlänge kann ein solcher Brand in einer Anlage großen Schaden anrichten.

### **6.3.2 Auswirkungen**

---

Die Einschätzung des Schadens ist insofern schwierig, als die Ausströmrichtung des Gases, d.h. der Ort der Leckage, nicht vorhersagbar ist. Wenn das Verhältnis Durchmesser zur Länge der Flamme relativ groß ist, kann die Intensität der Wärmestrahlung nach der Punktquellen-Methode wie in Kap. 6.1.4 abgeschätzt werden, sonst wird ein zylindrisches Modell verwendet.

Die Länge des gezündeten Freistrahles kann in guter Näherung folgendermaßen berechnet werden:

$$L = 300 \cdot d$$

L      Länge der Flamme [m]  
d      (äquivalenter) Durchmesser des Lecks [m]

Ein spezieller Fall eines gezündeten Freistrahles ist das Abfackeln, wobei es oft notwendig ist, die Länge des Abfackelrohres so auszulegen, daß das Personal in der Nähe nicht übermäßiger Wärmestrahlung ausgesetzt wird. Dabei kann die Länge der Flamme wie folgt abgeschätzt werden:

$$L = 0,0177 \cdot Q^{1,08}$$

L      Länge der Flamme [m]  
Q      Wärmeleistung [MW]

Nimmt man für den Heizwert eines Kohlenwasserstoffes 46 MJ/kg an (siehe Kap. 6.1.4), so erhält man für die Länge der Flamme

$$L = 1,11 \cdot W^{1,08}$$

W      Massenstrom/Abblaserate [kg/s]

Der Einfluß von Wind auf den Neigungswinkel der Flamme muß ebenso berücksichtigt werden, da sich dadurch die Entfernung zum bestrahlten Objekt verkürzen kann. In der Praxis wird meist ein Neigungswinkel von 30° zur Horizontalen unterstellt.

Das Thematik Freistrahle und Ausströmen aus Sicherheitsventilen wird auch in der ÖNORM M 7323 „Aufstellung ortsfester Druckbehälter zum Lagern von Gasen“, bzw. in der Änderung ÖNORM M 7323 / A1 behandelt.

## **7. LACHENBRAND, POOL-FIRE, TANK-FIRE**

Kommt es infolge von Leckagen zur Freisetzung und Lachenbildung einer Flüssigkeit oder eines druck- bzw. kälteverflüssigten Gases, so wird sich das Produkt abhängig von der Form und Beschaffenheit des Untergrundes ausbreiten und aufgrund von Wärmeaufnahme aus der Umgebung langsam oder schneller verdampfen.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen der Verdampfung von Flüssigkeiten, deren Siedepunkt über der Umgebungstemperatur liegt (Verdunstung) und der Verdampfung von druck- bzw. kälteverflüssigten Gasen mit einem Siedepunkt unterhalb der Umgebungstemperatur, die wesentlich schneller verdampfen.

Der Verdampfungsvorgang als solcher ist instationär und hängt u.a. von folgenden Parametern ab: Freisetzungsart, zeitlicher Verlauf, Topologie und Art des Untergrundes, physikalische Daten der Flüssigkeit, atmosphärische Bedingungen, Struktur der Oberfläche.

## 7.1 Lachengröße

Die Größe der Lachenoberfläche hat einen wesentlichen Einfluß auf den aus der Lache verdampfenden/verdunstenden Stoffstrom. In den meisten Fällen ist die Ausbreitung der Lache durch äußere Hindernisse wie z.B. die Wände einer Tanktasse oder Auffangwanne, Aufkantungen begrenzt und somit die Geometrie der Lache vorgegeben.

Kommt es zu unbehinderter Ausbreitung der Lache, so muß die Lachengröße für die jeweils herrschenden Randbedingungen berechnet werden. Die Flüssigkeit breitet sich unter Einwirkung der Schwerkraft durch unterschiedliche Schichthöhen und z.T. gehemmt durch Oberflächenkräfte und Bodenreibung solange aus, bis die Lache eine minimale Schichthöhe erreicht hat.

Für die minimale Schichthöhe bei unbegrenzter Lachenausbreitung können folgende Richtwerte herangezogen werden:

Bodenbeschaffenheit	Min. Höhe $h_{\min}$ der Lache [mm]
Unebener, sandiger Boden	25-30
Ebener Sand, Kies	10
Beton, Stein	5

Die Lachenfläche ( $F_{\text{Lache}}$ ) kann aus dem freigesetzten Stoffvolumen ( $V_{\text{Stoff}}$ ) und aus der Lachentiefe ( $h_{\min}$ ) berechnet werden:

$$F_{\text{Lache}} = V_{\text{Stoff}} / h_{\min}$$

## 7.2 Verdampfung von Flüssiggasen

Der Verdampfungsvorgang von freigesetzten, unter Druck verflüssigten Gasen (typische Vertreter sind Propan und Butan), erfolgt in drei wesentlichen Schritten, und zwar

1. Schritt:

---

Spontane Flash-Verdampfung eines bestimmten Anteiles der Flüssigkeit und Abkühlung des restlichen Flüssigkeitsanteiles auf Siedetemperatur bei Umgebungsdruck. Der Anteil der Flash-Verdampfung kann in guter Näherung als 20% der freigesetzten Menge angenommen werden.

#### 2. Schritt:

Verdampfen der beim Flashen mitgerissenen Flüssigkeitströpfchen (Aerosol) infolge der Wärmezufuhr aus der umgebenden Luft. Die Bestimmung dieses Anteils und die Beschreibung der anschließenden Verdampfung dieser Tröpfchen ist noch nicht zufriedenstellend gelöst. Das Mitreißen von Flüssigkeitströpfchen wird in der Praxis durch einen 50%igen Aufschlag auf die spontan verdampfte Menge berücksichtigt (grobe Abschätzung).

#### 3. Schritt:

Verdampfen der sich auf dem Boden ausbreitenden Flüssigkeitslache durch Wärmeleitung aus dem Boden, durch Wärmestrahlung (Sonneneinstrahlung) und durch den Einfluß des Windes. Dieser Vorgang kann sich über Stunden hinziehen.

Bei der Verdampfung von tiefkalt-verflüssigten Gasen ist im wesentlichen der 3. Schritt zu beachten.

### 7.3 Verdunstung einer nicht siedenden Flüssigkeit

Für die Verdampfung einer brennbaren Flüssigkeit mit einem Siedepunkt oberhalb der Umgebungstemperatur ist die Dampfdiffusion infolge des Dampfdruckgefälles zwischen der Flüssigkeitsoberfläche und der Umgebung die treibende Kraft. Der von der Lache ausgehende Emissionsmassenstrom hängt in erster Linie vom Sättigungsdampfdruck der Flüssigkeit bei Umgebungstemperatur und von der Windgeschwindigkeit ab. Typische Stoffe sind organische Lösungsmittel, Benzine und Öle.

Für Abschätzungen auf Ebene 2 (vgl. Kap. 1.2) braucht die zeitliche Abhängigkeit des Verdunstungsmassenstromes nicht betrachtet zu werden, es wird konservativerweise angenommen, daß bereits die gesamte Lache verdunstet ist und eine Dampfwolke für einen Gaswolkenbrand oder eine Gaswolkenexplosion bildet.

### 7.4 Brand

Kommt es nach der Zündung des Dampf-/Luftgemisches zu einem Brand, so sind folgende Einflußgrößen für die Berechnung der Wärmestrahlung maßgebend:

#### Art des brennenden Stoffes

Die Bildung von Ruß hängt von der Art des Stoffes ab, die entstehenden Rußballen schwächen die austretende Wärmestrahlung stark ab. Dabei steigt die Rußentwicklung

bei Kohlenwasserstoffen mit steigendem C-H-Verhältnis (Benzin, Toluol, und ähnliche Kohlenwasserstoffe), bei C-H-O-Verbindungen mit sinkendem Sauerstoffgehalt im Molekül (Ethanol, Acetaldehyd und andere vergleichbare Flüssigkeiten).

### Lachengröße

Die Größe der Lache kann bei unbehindeter Ausbreitung gemäß Kap. 7.1 berechnet werden oder ist durch äußere Hindernisse wie z.B. die Wände einer Tanktasse oder Auffangwanne, Aufkantungen vorgegeben.

### Flammenlänge

Bei der Berechnung der Wärmestromdichte wird die geometrische Form des Wärmestrahlers berücksichtigt, d.h. bei einem Lachenbrand wird ein zylindrisches Modell verwendet. Dieses zylindrische Modell gilt ebenso für POOL-FIRE und TANK-FIRE.

Ganz allgemein gilt, je größer die Fläche mit brennender Flüssigkeit, desto höher die Flammen und desto größer die Auswirkungen der Hitzestrahlung auf die Umgebung. Die Länge der Flamme entspricht annähernd dem 2-fachen Durchmesser der Lache (Lachenbrand), der Auffangwanne (POOL-FIRE) oder des Tanks (TANK-FIRE).

Die Flammenlänge wird in der Praxis meist nach der sogenannten Thomas-Korrelation berechnet:

$$h = 42 \cdot D \cdot \left\{ \frac{m}{\rho_{\text{Luft}} \cdot (g \cdot D)^{1/2}} \right\}^{0,61}$$

- h Flammenlänge [m]
- D Durchmesser der Lache (POOL) [m]
- $\rho_{\text{Luft}}$  Dichte der Luft [kg/m<sup>3</sup>]
- g Erdbeschleunigung [9,81 m/s<sup>2</sup>]
- m Abbrandrate des lachenbildenden Stoffes [kg/m<sup>2</sup>s]

Nachfolgend sind gemessene Abbrandraten verschiedener Stoffe als Beispiel aufgelistet:

Brennstoff	Abbrandrate [mm/min]	Brandflächen-Durchmesser [m]
n-Pentan	8,23	2,5
Superkraftstoff	4,4	
Dieselmkraftstoff	2,94	
n-Pentan	9,99	8
Superkraftstoff	4,81	
Dieselmkraftstoff	3,33	
n-Pentan	12,20	25

Superkraftstoff	5,21	
Dieselmkraftstoff	3,66	
Benzol	4,4	
Testbenzin	3,4	
Propan	2,2	0,36
Butan	8	
Erdgas (flüssig)	9,2	4,3
Hexan	7	
Methanol	3	

Die Abbrandraten sind ab Lachendurchmesser von 10-20m als konstant zu betrachten.

### Branddauer

Aus der gemäß Kap. 7.1 berechneten Lachentiefe und der oben angeführten Abbrandrate kann auch die Dauer des Brandes einfach abgeschätzt werden.

## 7.5 Berechnung der Wärmestromdichte

Für die Berechnung der Wärmestromdichte (Intensität) in bestimmter Entfernung von der Oberfläche der Quelle (Lachenbrand) muß, wie bereits beim BLEVE erwähnt, neben dem Strahlungsanteil und Durchlässigkeit (Abschwächungseffekt aufgrund von atmosphärischem Wasserdampf) der Luft auch die geometrische Form des Wärmestrahlers berücksichtigt werden, d.h. eine zylindrische Quelle (Pool-Fire).

Die Wirkdistanzen für charakteristische (hinsichtlich Einwirkung auf Menschen, Materialien und Einsatzdienste) aus Lachenbränden resultierende Wärmestrahlungsdichten sind in Tabelle 3 für Isobutylen ( für 20°C Umgebungstemperatur, 50% relative Luftfeuchtigkeit) übersichtlich zusammengestellt und in Abb. 7 graphisch dargestellt. Zwischenwerte können linear interpoliert werden. Diese Wirkdistanzen basieren auf einem zylindrischen Flammen-Modell, d.h. die Problematik im Zusammenhang mit dem Sichtwinkel ist berücksichtigt. Für unbehinderte Ausbreitung wird für eine kreisförmige Lache eine Lachentiefe von 3 cm unterstellt, die Größe der Lache kann dann gemäß Kap. 7.1 berechnet werden bzw. ist durch äußere Hindernisse wie z.B. die Wände einer Tanktasse oder Auffangwanne, Aufkantungen vorgegeben.

Die zugehörigen Wirkflächen wurden vereinfachend als Fläche eines Kreises mit Radius = Wirkdistanz berechnet und sind in Tabelle 4 angeführt bzw. in Abb. 8 graphisch dargestellt.

Um das Schadensausmaß für die betroffene Bevölkerung abzuschätzen, wird diese Wirkfläche [km<sup>2</sup>] mit der entsprechenden Siedlungsdichte [Einwohner/km<sup>2</sup>] des betroffenen Gebietes multipliziert.

*Der Referenzstoff Isobutylen (Isobuten, Methylpropen) wurde deshalb ausgewählt, da dieser das wirtschaftlich wichtigste und häufigst verwendete Buten darstellt. Isobutylen dient in erster Linie zur Herstellung von klopffestem Polymerbenzin und*

---

*dient als Ausgangssubstanz für die großtechnische Synthese von Isopren. Der Heizwert beträgt, typisch für Kohlenwasserstoffe ca. 46.000 KJ/kg, d.h. bei der Verbrennung von 1 kg/s ist mit einer Freisetzung von etwa 46 MW zu rechnen.*

## 7.6 Auswirkungen der Hitzestrahlung

Bei der Einschätzung der Auswirkungen kommt wieder die qualitative Methode oder die Probit-Methode zum Einsatz und es kann analog Kap. 6.1.4 - 6.1.6 vorgegangen werden.

### **Beispiel: Brand organischer Lösungsmittel - Lachenbrand**

Lager für leicht entzündliche organische Lösungsmittel (Aceton, Methylethylketon, Methanol etc.), während des Befüllens eines Lagerbehälters vom Tankwagen aus wird der Verladeschlauch durch einen Gabelstapler aufgerissen. Es fließt Toluol auf den Vorplatz aus, erst nach einigen Minuten kann der Fördervorgang abgestellt werden, insgesamt sind ca. 2 t Lösungsmittel ausgelaufen. Nach Zündung kommt es zu einem Flächenbrand auf dem Vorplatz.

Es ist mit folgenden Auswirkungen zu rechnen:

Aus Tabelle 3 bzw. Abb. 7 abgelesen ergibt

Wärmestromdichte	4,5 kW/m <sup>2</sup> in 30 m Entfernung vom Rand der Lache
	12,5 kW/m <sup>2</sup> in 12 m Entfernung vom Rand der Lache
	25,0 kW/m <sup>2</sup> in 3,9 m Entfernung vom Rand der Lache

Durchmesser der Lache	12 m bei 3 cm Tiefe
-----------------------	---------------------

Abschätzung des Schadens für Menschen und Sachwerte:

Für die Abschätzung des Schadens können die in Kap. 6.1.5 angeführten kritischen Wärmestromdichten für Menschen, Einsatzdienste sowie für Bauten und Anlagenteile herangezogen werden.

---

## 8. GASWOLKENBRAND, DEFLAGRATION, FLASH-FIRE

Wird eine Wolke eines brennbaren Dampf-/Luftgemisches aufgrund von

- Verdampfung eines brennbaren verflüssigten Gases nach einer Leckage
- Verdampfung einer über den atmosphärischen Siedepunkt hinaus erhitzten brennbaren Flüssigkeit nach einer Leckage
- Freisetzung eines brennbaren Gases nach einer Leckage
- Lachenbildung nach Ausschütten einer flüchtigen, brennbaren Flüssigkeit,

gezündet, so kommt es in der Regel zu einem sogenannten Flash-Fire, bei dem zwar die Wolke sehr schnell verbrennt, aber nicht schnell genug, um eine gefährliche Druckwelle zu erzeugen.

Je kleiner die im freien Gelände driftende brennbare Wolke und je weniger Verdämmung, desto wahrscheinlicher kommt es nach Zündung zu einem Flash-Fire und nicht zu einer Explosion.

In Verbindung mit dem Begriff Explosion wird die rasche Verbrennung einer brennbaren Wolke als Deflagration bezeichnet. In entsprechenden Untersuchungen wurde festgestellt, daß die bei einem Flash-Fire bzw. bei Deflagration erzeugten Überdrücke höchstens ausreichen, um Fensterscheiben zu zersplittern.

Wegen der kurzen Dauer des Flash-Fire sind die Auswirkungen der Wärmestrahlung gering, sie verursacht keine ernsten Verletzungen. Wesentlich gefährlicher ist das Einatmen von Flammen, was zu tödlichen Auswirkungen führen kann.

Die Auswirkungen eines Gaswolkenbrandes sind in der Regel auf das Betriebsgelände beschränkt und brauchen als Referenzszenarium wegen lokaler Folgen nicht berücksichtigt zu werden (vgl. Kap. 5).

## 9. FESTSTOFFBRAND, STAUBBRAND/-EXPLOSION

Im allgemeinen ist bei Feststoffbränden eine Gefährdung der benachbarten Bevölkerung nicht zu erwarten, wenn sie sich in Gebäuden bei geschlossenen Fenstern und Türen aufhält und vorhandene Klimaanlage abgeschaltet worden sind. Grund dafür ist die durch den Auftrieb bzw. die Thermik der heißen Gase verursachte starke Verdünnung der Brandgase sowie die Tatsache, daß Brandgase in geschlossene Räume normalerweise nur sehr langsam eindringen können. Nur unter sehr ungünstigen Voraussetzungen wie z.B. lang anhaltender Schwelbrand und austauscharme Wetterlage kann eine Räumung von Gebäuden erforderlich sein. Geruchsbelästigungen können jedoch auch in größerer Entfernung vom Brandherd auftreten und durch geringste Mengen sehr geruchsintensiver Stoffe verursacht werden.

---

Staubexplosionen können große Schäden an Gebäuden und Todesfälle verursachen, sind allerdings in der Regel auf das Gebäude oder die Anlage beschränkt, wo sie sich ereignen. Der Radius der Auswirkungen außerhalb des Gebäudes ist allerdings sehr beschränkt.

Das allgemeine Vorgehen zur Abschätzung der Auswirkungen von Feststoffbrand und Staubexplosion werden im folgenden kurz erläutert.

## **9.1 Feststoffbrand**

### **9.1.1 Brandgase**

Detaillierte quantitative Angaben zu den pro Zeiteinheit gebildeten Mengen an Brandgaskomponenten bzw. der Gesamtmenge des Brandgases können aufgrund der Einmaligkeit und der Komplexität der Reaktionsbedingungen und -abläufe bei Bränden von Mehrstofflagern, wie z.B. Stückgut-Chemikalienlagern und Handelslagern für Agrochemikalien, nicht vorhergesagt werden.

Bei Bränden entstehen aus organischen Materialien, wie z.B. Holz, Wolle, Chemikalien, mit dem Sauerstoff der Luft Brandgase. Diese sind unabhängig davon, welche Stoffe verbrennen, grundsätzlich als Atemgifte einzustufen. Die vollständige Verbrennung hängt im wesentlichen von der Verbrennungstemperatur, vom Sauerstoffüberschuß und der Reaktionszeit (Verbrennungsgase bei hoher Temperatur) ab.

Die Hauptbestandteile der Brandgase sind immer Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ) und Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Beim Brand schwefel-, chlor- und stickstoffhaltiger Stoffe muß abhängig von den Brandbedingungen (Temperatur, Sauerstoffzufuhr, Branddauer) auch mit der Entstehung von Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Chlorwasserstoff ( $\text{HCl}$ ) und Stickoxiden ( $\text{NO}_x$ ), Blausäure ( $\text{HCN}$ ) in unterschiedlichen, jedoch geringen Konzentrationen gerechnet werden. Im Freien ist die Gefahr durch  $\text{CO}$  und  $\text{HCN}$  gering, da beide Gase leichter als Luft und brennbar sind.

Bei einem Schmelbrand können auch unzersetzte Wirkstoffe emittiert werden, welche sich erfahrungsgemäß in der unmittelbaren Nähe des Brandherdes niederschlagen. Außerdem muß mit erhöhten Konzentrationen von  $\text{CO}$  gerechnet werden.

### **9.1.2 Ausbreitung der Brandgase**

Da das wirkliche Brandgeschehen sehr komplex abläuft und im Einzelfall stark von den örtlichen Verhältnissen bestimmt wird, kann es nicht durch Laborversuche ausreichend erfaßt und hinreichend genau simuliert bzw. vorhergesagt werden.

Die Abschätzung der Ausbreitung von Brandgasen bei Lagerbränden stützt sich auf folgende Annahmen:

- Art des Brandes (Vollbrand oder Schmelbrand)

- Definierte Branddauer
- Produktmenge, die zur Emission beiträgt (z.B. 20% des Inventars des Brandabschnittes)
- Gleichmäßige Freisetzung der Schadstoffkomponenten während des Brandes.

Die in einem Brandabschnitt lagernden Produkte sind eine zeitlich und örtlich variable Mischung einer Vielzahl von Einzelprodukten verschiedenster Zusammensetzung.

Aus einer mittleren Zusammensetzung der Produkte des Sortiments ergibt sich dann die Bildung der entsprechenden Brandgase, wie in folgendem Beispiel angeführt:

Mittlere Zusammensetzung des Produktes	Zusammensetzung von Brandgasen (pro g Produkt)
5% S	→ 100 mg SO <sub>2</sub>
5% Cl	→ 51 mg HCl
5% N	→ 0,5 mg HCN
	→ 10 mg NO <sub>2</sub>
50% C	→ 23 mg CO
	→ 1795 mg CO <sub>2</sub>
10% O	
5% H	
20% Sonstige	

Bemerkung:

Vollständige Umsetzung von S → SO<sub>2</sub>

Vollständige Umsetzung von Cl → HCl

Umsetzung von N zu HCN und NO<sub>2</sub> basierend auf Meßwerten

Vollständige Umsetzung von C zu CO und CO<sub>2</sub> im Verhältnis 2 : 98

Die Ausbreitungsrechnungen der Brandgase können mit einem entsprechenden Rechenmodell durchgeführt werden (z.B. VDI-Richtlinie 3783, Blatt 1).

Bei einem Schmelzbrand können unzersetzte Wirkstoffe emittiert werden. Hierfür kann die hypothetische Freisetzung von 1% unverbrannter Wirkstoffe, d.h. von 10 mg pro g der am Brand beteiligten Produktmenge, angenommen werden.

## 9.2 Staubbrand/-Explosion

### 9.2.1 Gefahren durch brennbaren Staub

Die Brand- und Explosionsgefahren aufgrund von brennbarem Staub sind weniger bekannt als diejenigen, die beim Umgang mit brennbaren Gasen und Flüssigkeiten bestehen und es kommt oft zur Fehleinschätzung der Gefahrensituation.

Eine Entzündung und fortschreitende Verbrennung ist nur möglich, wenn an derselben Stelle und gleichzeitig

- ein exotherm oxidierbarer Stoff,
- ausreichend Sauerstoff und
- eine wirksame Zündquelle

vorhanden sind.

Für das Eintreten einer Explosion sind zusätzlich zu diesen Bedingungen erforderlich

- ausreichende Feinheit des brennbaren Stoffes und
- Konzentration des aufgewirbelten Staubes innerhalb der Explosionsgrenzen.

Nur wenn alle diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann es zu einem Brand bzw. zu einer Explosion kommen.

*Staub ist im Sinne der Richtlinie VDI 2263 (Staubbrände und Staubexplosionen, Gefahren-Beurteilung-Schutzmaßnahmen, Mai 1992) feinzerteilter Feststoff beliebiger Form, Struktur und Dichte unterhalb der Korngröße von ca. 500 µm und kann als Nutz- oder Abfallstaub anfallen.*

## 9.2.2 Brand- und Explosionsverhalten von Staub

Ist der feste Stoff exotherm oxidierbar, so wird das aus ihnen entstehende feinteilige Material als brennbarer Staub bezeichnet. Durch die Zerkleinerung hat Staub eine sehr große Reaktionsoberfläche, somit funktioniert der Wärmeaustausch besser als bei Feststoffen. Auch die Wärmeverluste der Reaktion sind geringer, da Staub durch die Luftzwischenräume die Wärme schlechter ableitet. Der Kontakt zwischen Oxidationsmittel und Staub ist besser, der Aufwand für die Zündenergie geringer.

*Abgelagerter Staub* neigt nach Entzündung im allgemeinen nur zu langsam ablaufenden Reaktionen wie Brennen, Glimmen oder Schwelen.

*Aufgewirbelter Staub* (Staubwolken, Staub/Luft-Gemische) kann innerhalb bestimmter Konzentrationsgrenzen nach Zündung explosionsartig abbrennen. Bei Staubkonzentrationen unter 20 g/m<sup>3</sup> in Luft sind Staubexplosionen im allgemeinen nicht zu befürchten. Die obere Explosionsgrenze bei Staub hat nicht die gleiche sicherheitstechnische Bedeutung wie bei Gas/Luft-Gemischen, da wegen der zeitlich und örtlich begrenzten Mischbarkeit von Staub mit Luft praktisch niemals homogene Staub/Luft-Gemische auftreten.

Das Explosionsverhalten von aufgewirbeltem Staub wird durch folgende Einflußgrößen bestimmt:

- Feinheit des Staubes und dessen Konzentration:

Die heftigsten Reaktionsauswirkungen liegen bei höheren Konzentrationen, als sie dem stöchiometrischen Verhältnis entsprechen (Gegensatz zu Gas/Luft-Gemischen). Die Feinheit eines Staubes läßt sich umfassend nur durch die

---

Korngrößenverteilung beschreiben. Häufig wird als Anhalt nur der Medianwert angegeben, also der Wert für die mittlere Korngröße, d.h.: 50 Gew.-% des Staubes sind gröber und 50 Gew.-% sind feiner als der Medianwert.

– Sauerstoffkonzentration:

Höhere Sauerstoffkonzentrationen führen zu größerer Heftigkeit der Explosion. Bei Senkung der Sauerstoffkonzentration (z.B. Inertgaszusatz) unter einen gewissen Limit (Sauerstoffgrenzkonzentration), ist eine Staubexplosion nicht mehr möglich.

– Druck und Temperatur des Staub/Luft-Gemisches:

Erhöhter Ausgangsdruck erhöht den Explosionsdruck und den zeitlichen Druckanstieg. Eine Temperaturerhöhung bei Atmosphärendruck führt zu einer Abnahme des Explosionsdruckes.

– Wassergehalt:

Eine deutliche Verringerung der Heftigkeit der Explosion tritt in der Regel erst bei relativ hohen Wassergehalten auf. Viele Produkte mit einem Wassergehalt von mehr als 10% lassen sich schlechter aufwirbeln, wodurch die Gefahr der Bildung explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische reduziert wird.

– Erhöhte Turbulenz des Staub/Luft-Gemisches:

Die Heftigkeit der Explosion erhöht sich.

– Behälterform:

In langgestreckten Behältern oder in Rohrleitungen können Detonationen mit wesentlich höheren Drücken und Flammgeschwindigkeiten als bei Explosionen auftreten.

– Gleichzeitiges Auftreten von brennbarem Gas oder Dampf und brennbarem Staub in Luft:

Diese sogenannten hybriden Gemische können z.B. beim Einsatz von brennbaren Lösemitteln entstehen. Sie können die untere Explosionsgrenze herabsetzen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Auswirkungen einer Staubexplosion im wesentlichen von folgenden Parametern abhängen:

**Stoffeigenschaften**, charakterisiert durch *Staubexplosionsklasse* oder  $K_{St}$ -Wert.

**Staubverteilung**, charakterisiert durch *Staubkonzentration* und *homogene* oder *inhomogene Gemische*.

**Behältereigenschaften**, charakterisiert durch *Verhältnis Länge/Durchmesser* und zulässigem *reduzierten Explosionsdruck*.

**Eigenschaften der Entlastungseinrichtung**, charakterisiert durch *Entlastungsfläche*, *Ansprechdruck* sowie ggf. nachgeschaltetes *Abblaserohr*.

Die Brenn- und Explosions-Kenngrößen von nahezu 1900 verschiedenen Staubarten findet man im BIA-Report 12/97 (Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften-HVBG, Alte Heerstraße 111, D-53754 Sankt Augustin).

### 9.2.3 Auswirkungen von Staubbrand/-Explosion

Die physikalisch/chemisch/mathematischen Grundlagen zur Druckentlastung von Staubexplosionen basieren auf den Darlegungen in VDI 3673, Blatt 1, 7/95, diese Richtlinie kann neben der Serie VDI 2263 als „Regel der Technik“ zur Verwendung herangezogen werden.

Die Berechnungen können entweder unter Verwendung von Nomogrammen aus dem Regelwerk VDI 3673, Blatt 1, 7/95 oder schneller mit Hilfe des Programmes 8FEUXX, Version 3.0/1995, von W.R. Klug durchgeführt werden.

## 10. GASWOLKENEXPLOSION

Der Begriff Explosion wird häufig als Oberbegriff für Deflagration und Detonation verwendet.

- **Deflagration:** Explosion mit Flammengeschwindigkeiten bis max. 100 m/s. Aufgrund dieser relativ langsamen Ausbreitungsgeschwindigkeit tritt in der Reaktionszone nur ein geringer Druckanstieg auf.
- **Detonation:** Chemische Umsetzung in einem explosionsfähigen System mit einer Stoßwelle, die sich mit hoher Geschwindigkeit (einige km/s bis Überschallgeschwindigkeit) ausbreitet. Dabei treten wesentlich höhere Drücke auf als bei Deflagration (ca. 20 bar bei Sprengstoffdetonationen).

Mischt sich eine Wolke brennbaren Dampfes mit Luft zu einem brennbaren Gemisch und wird gezündet, so kann sie entweder langsam verbrennen oder als Flash-Fire (vgl. Kap. 8) oder sie explodiert. Das bekannteste Beispiel für eine Gaswolkenexplosion ist Flixborough (UK), 1974. Dabei wurden ca. 70 t Cyclohexan freigesetzt, die entstandene Dampf Wolke von ca. 25-50 t explodierte, 26 Beschäftigte innerhalb und 2 außerhalb der Anlage wurden getötet, Menschen in der Umgebung erlitten Verletzungen und Schäden an Gebäuden waren die Folgen.

Die folgenden Bedingungen begünstigen eine Explosion:

- Einschluß/Verdämmung (ganz oder teilweise)

- Große Dampfmenge
- Nahezu stöchiometrisches Gemisch bzw. exaktes Verhältnis Luft/Brennstoff
- Turbulenz in der brennenden Wolke

Im Freien wird eine Wolke mit weniger als 1 t Dampf kaum zünden und explodieren, bei ganz/teilweiser Verdämmung kann es jedoch bereits bei geringeren Mengen zur Explosion kommen.

Ursachen für Gaswolkenexplosionen sind in erster Linie Freisetzungen von brennbaren Flüssiggasen oder Leckagen beim Verarbeiten von brennbaren Flüssigkeiten unter Druck und bei Temperaturen über dem normalen Siedepunkt (Flixborough).

*Im allgemeinen führen Explosionen von Gaswolken mit einem Energieinhalt von kleiner als  $5 \cdot 10^9$  Joule (ca. 100 kg Kohlenwasserstoffe) im Freien zu keinen ernsthaften Schäden. Für die Auswirkungen von Explosionen von Gaswolken mit einem Energieinhalt größer als  $5 \cdot 10^{12}$  Joule (ca. 100 t Kohlenwasserstoffe) ist es aufgrund geringer Erfahrung schwierig Prognosen zu erstellen.*

Bei den Gaswolkenexplosionen unterscheidet man je nach der Umgebung, in der sie ablaufen, zwischen unverdämmten (UVCE) und verdämmten (VCE) Explosionen.

## 10.1 Unverdämmte Gaswolkenexplosion

### 10.1.1 Ablauf-Modell

1. Freisetzung von brennbaren druckverflüssigtem Gas oder Flüssigkeit unter Druck und bei Temperaturen über dem atmosphärischen Siedepunkt.
2. Der ausbreitende Dampf mischt sich mit Luft und bildet Zonen mit magerer bis fetter Anreicherung. Die Freisetzungsrate und die Wetterbedingungen, d.h. Wind/Temperatur, sind maßgebend dafür, ob sich das Gas schadlos ausbreitet oder ansammeln kann.
3. Die Wolke wird gezündet. Entweder sie bewegt sich auf eine Zündquelle zu oder wird aufgrund elektrostatischer Aufladung/Entladung beim Ausströmen gezündet.
4. Beschleunigung der Flammenfront bis auf Explosionsgeschwindigkeit. Ob diese Geschwindigkeit erreicht wird, hängt von der Zusammensetzung und Größe der Wolke ab.

Die Wahrscheinlichkeit, daß eine Gaswolke nach Zündung explodiert, hängt, wie bereits eingangs erwähnt, von folgenden Faktoren ab:

- Einschluß/Verdämmung (ganz oder teilweise)
- Große Dampfmenge
- Nahezu stöchiometrisches Gemisch bzw. exaktes Verhältnis Luft/Brennstoff
- Turbulenz in der brennenden Wolke.

---

## 10.1.2 Berechnung des Spitzenüberdruckes

Die Zerstörungswirkung einer Explosion ergibt sich aus der „Stärke“ der Druckwelle, d.h. der Höhe der Druckamplitude (Spitzenüberdruck der Explosion) und der Zeitdauer der Druckwirkung (Dauer der positiven Druckphase). Ist die Einwirkdauer des Druckes lang im Vergleich zur charakteristischen Reaktionszeit (Eigenschwingungsdauer) einer belasteten Struktur, so ist die Wirkung quasi statisch und die Druckhöhe entscheidet über die Wirkung. Im anderen Extremfall, nämlich bei sehr kurzer Einwirkung, ist das Integral aus Druck und Zeit, d.h. der Impuls, für die Zerstörungswirkung bestimmend. Obwohl auch die Dauer der positiven Druckphase und somit der Impuls einer Druckwelle mit der Entfernung vom Explosionszentrum korreliert werden können, erfolgt die Abschätzung von Explosionsauswirkungen meistens pauschal über die Druckspitze in der Druckwelle.

Zur Berechnung des Spitzenüberdruckes stehen mehrere Modelle und Verfahren zur Verfügung, die bekanntesten sind:

- TNO-Modell
- TNT-Äquivalenzmodell
- Kogarko/Brötz-Modell
- Giesbrecht/Leuckel-Modell.

Wie aus Vergleichsrechnungen festgestellt wurde, liegt das TNT-Äquivalenzmodell und das Kogarko/Brötz-Modell deutlich höher als das TNO-Modell und das Giesbrecht/Leuckel-Modell.

Für die konkrete Anwendung bedeutet dies folgendes:

Kann man mit Sicherheit davon ausgehen, daß es zu einer unverdämmten oder nur leicht verdämmten Gaswolkenexplosion, also eher Deflagration mit relativ geringem Druckaufbau kommt, so kann das TNO-Modell bzw. das Giesbrecht/Leuckel-Modell verwendet werden.

Für teil-verdämmte Gaswolkenexplosionen liefert das Kogarko/Brötz-Modell bzw. das TNT-Äquivalenzmodell realistische Maximaldruckwerte, die im Nahbereich allerdings tendenziell überhöht sein können.

## 10.1.3 TNO-Modell

Die in Tabelle 5 angeführten Wirkdistanzen (hinsichtlich Einwirkung auf Menschen bzw. auf Bauten und Anlagenteile) wurden mit dem TNO-Modell berechnet. Zwischenwerte können linear interpoliert werden. Diese Wirkdistanzen sind für Druckwellen durch Gaswolkenexplosionen im Freien für Propan berechnet, sie sind für Auswirkungen von Raumexplosionen, Explosionen von Feststoffen oder Detonationen nicht verwendbar.

Der bei einer Gaswolkenexplosion im Freien resultierende Überdruck wird zu einem wesentlichen Teil von der Beschaffenheit (Gebäude, Anlagenteile, Wände) des

---

betrachteten Terrains beeinflusst. Die in der Tabelle 5 angeführten Wirkdistanzen beziehen sich auf Gebiete mit Hindernissen und stellen damit konservative Werte dar. Bei Gebieten ohne nennenswerte Hindernisse reduzieren sich diese Distanzen um einen Faktor 2 bis 3 !

So sind z.B. driftende Gaswolken im freien Gelände praktisch unverdämmt und der Abbrand nach einer Zündung erfolgt als Deflagration, wobei die dabei auftretenden Überdrücke bei ca. 0,05 bar liegen. Bei einem solchen Ereignis ist nur mit dem Zersplittern von Scheiben zu rechnen.

Die in Tabelle 6 angeführten Wirkflächen stellen die Grundfläche einer Halbkugel mit Radius = Wirkdistanz dar.

Um das Schadensausmaß für die betroffene Bevölkerung abzuschätzen, wird diese Wirkfläche [km<sup>2</sup>] mit der entsprechenden Siedlungsdichte [Einwohner/km<sup>2</sup>] des betroffenen Gebietes multipliziert.

Die Wirkdistanzen und die Wirkflächen sind in Abb. 9 bzw. Abb. 10 graphisch dargestellt.

### **Beispiel: Verwendung von Flüssiggas - Wärmestrahlung/Druckwelle**

In einem Tanklager kommt es aufgrund mechanischen Beschädigung zu einem seitlichen Leck eines der zylindrischen Tanks. Der oberirdisch aufgestellte Behälter mit einem Fassungsvermögen von 70 m<sup>3</sup> ist mit druckverflüssigtem Propan zu 80% gefüllt, d.h. er enthält ca. 28 t Propan. Innerhalb kurzer Zeit wird etwa die Hälfte (bis zur Leckstelle), d.h. 14000 kg des flüssigen Propan freigesetzt und bildet eine Gaswolke, die sofort gezündet wird. Der im Tank verbleibende Rest brennt beim Leck als Fackel weiter und wird durch die Feuerwehr unter Kontrolle gehalten.

Es ist mit folgenden Auswirkungen zu rechnen:

Die Gaswolke bildet wie beim BLEVE nach der Zündung einen kurzzeitigen Feuerball mit hoher Wärmestromdichte. Gleichzeitig bildet sich bei der Zündung eine Druckwelle aus, die nur geringen Schaden anrichtet, da die Umgebung nicht dicht verbaut ist (UVCE).

Abschätzung des Schadens für Menschen und Sachwerte:

Nach Abb. 2 (14000 kg) bildet die gezündete Gaswolke einen Feuerball mit einem Durchmesser von ca. 150 m und einer Lebensdauer von ca. 10 s (Abb. 3, 14000 kg). Wie in Kap. 6.1.5 dargestellt, wird z.B. Holz ohne Flammenkontakt noch bei einer Wärmestromdichte von 25 kW/m<sup>2</sup> spontan gezündet. Nach Abb. 4 wird dieser Wert für 14000 kg noch in einer Entfernung von ca. 160 m vom Zentrum des Feuerballes erreicht. In dieser Entfernung erleiden Menschen im Freien Verbrennungen 1. bis 2. Grades (siehe Kap. 6.1.5).

Die Auswirkung der Gaswolkenexplosion kann aus Abb. 9 abgeschätzt werden. Für 14000 kg beträgt der Überdruck in einer Entfernung von ca. 300 m noch 0,1 bar. Bei

diesem Wert können in der angegebenen Entfernung Menschen durch Umwerfen verletzt werden und noch Gebäudeschäden auftreten (siehe Kap. 10.1.4).

### 10.1.4 Auswirkungen der Druckwellen auf Menschen, Bauten

Um die Auswirkungen der Druckwellen auf Menschen abzuschätzen, kommen wie bereits in Kap. 6.1.4 für die Hitzestrahlung angeführt, wiederum 2 Methoden in Frage, und zwar die qualitative Methode und die Probit-Methode. Da in der Praxis festgestellt wurde, daß im Falle von Druckwellen die Probit-Methode die Risiken stark unterschätzt, wird der qualitativen Methode der Vorzug gegeben.

Qualitative Richtwerte für Menschen und Bauten/Anlagenteile sind auch im unteren Teil von Tabelle 5 und Tabelle 6 zur raschen Übersicht angeführt.

In der folgenden Zusammenstellung sind Richtwerte für Auswirkungen auf Menschen sowie Bauten und Anlagenteile ausführlicher beschrieben („Schadenausmaß-Einschätzung“, Schweiz):

Überdruck [bar]	Auswirkungen auf Menschen
0,006	Orkan mit Windstärke 12
0,010	Windstoß reißt stehende Person um (150 km/h)
0,030	Leichte Verletzungen durch Glassplitter möglich
0,070	Keine Verletzungen im offenen Gelände
0,080 - 0,090	Windstoß reißt liegende Person mit (360 km/h)
0,170	1% Trommelfellriß
0,190	10% Trommelfellriß
0,210	10% Tote und Verletzte im Freien
0,300	Tote und Verletzte innerhalb von Bauten durch Einsturz
0,340	25% Tote und Verletzte im Freien
0,440	50% Trommelfellriß
0,480	70% Tote und Verletzte im Freien
0,840	90% Trommelfellriß
1,000	95% Tote und Verletzte im Freien 1% Lungenriß
2,000	99% Lungenriß

Überdruck [bar]	Auswirkungen auf Bauten und Anlagenteile
0,001	Lärmimmission bei niedrigen Frequenzen (10-15 Hz) bis zu 137 dB
0,002	Brechen großer unter Spannung stehender Fensterscheiben

	möglich
0,003	Lärmimmission 143 dB, Zerschlagen von Fensterscheiben möglich
0,007	Brechen kleiner unter Spannung stehender Fensterscheiben möglich
0,01	Standardwert für Fensterbruch
0,02	„Sichere Grenze“: mit 95% Wahrscheinlichkeit keine ernsthaften Schäden für Überdrücke kleiner als 0,02 bar Geringe Schäden an Dächern von Häusern (Dachziegel) 1-10% aller Fensterscheiben zerbrochen
0,03	Begrenzte, kleine strukturelle Schäden
0,035 - 0,07	In der Regel Zerbersten von großen und kleinen Fensterscheiben Gelegentlich Beschädigung der Fensterleisten
0,05	Geringe strukturelle Schäden an Häusern
0,06	1% Schaden struktureller Art an Bauten 99% aller Fensterscheiben zerbrochen
0,07	Teilweise Zerstörung von Häusern, Einsturzgefahr
0,07 - 0,14	Zersplittern von Welleternitplatten Befestigung von Wellblechplatten versagt (Stahl, Aluminium)
0,09	Leichte Beschädigung der Stahlskelette von Gebäuden
0,10	Leichte Strukturen fallen zusammen, Druckbehälter intakt
<b>Überdruck [bar]</b>	<b>Auswirkungen auf Bauten und Anlagenteile</b>
0,14	Teilweiser Einsturz der Mauern und Dächer von Häusern
0,14 - 0,21	Zerstörung von Kalksandsteinmauern und nicht armierten Betonmauern
0,16	Untere Grenze für ernsthafte strukturelle Schäden
0,17	50% Zerstörung des Mauerwerks von Häusern
0,21	Geringe Schädigung an Maschinen (1,5 t) innerhalb Gebäude Stahlskelett von Bauten verformt und aus den Fundamenten gehoben, 50% Schaden struktureller Art an Bauten
0,21 - 0,28	Zerstörung von Leichtbauten (ohne Stahlskelett) mit Blechprofilen Aufreißen von leeren Erdöl-Lagertanks
0,28	Aufreißen der Verschalungen von Industriebauten in Leichtbauweise
0,30	Schwere Gebäudeschäden (Einsturz)
0,34	Umknicken von Holzmasten Geringe Schäden an Maschinen (20 t) innerhalb von Bauten
0,34 - 0,41	Totale Zerstörung von Häusern, armierte Mauern brechen 99% Schaden struktureller Art an Bauten
0,48	Überschlagen von beladenen Zugwaggons
0,48 - 0,55	Versagen von 20-30 cm dicken Mauern infolge der Scher- und Biegekräfte, Versagen von Rohrbrücken (Leitungsbruch)
0,62	Totale Zerstörung von beladenen Güterwaggons
0,7	Zerstörung industrieller Bauten Schwere Schäden an Maschinen (3,5 t) innerhalb von Bauten

	durch Verschieben
--	-------------------

### 10.1.5 TNT-Äquivalenzmodell

Mit dem TNT-Äquivalenzmodell kann man den Überdruck einer sich ausbreitenden Druckwelle bei Gasexplosionen einfach und schnell abschätzen. Dabei wird unterstellt, daß eine deflagrativ abbrennende Gaswolke und eine detonativ verlaufende Explosion sich hinsichtlich des Überdruckes in der ausgesandten Druckwelle ähnlich verhalten.

Zur Ermittlung des Druckes wird ein Teil der in der Gaswolke gespeicherten Verbrennungsenthalpie herangezogen. Dieser Energieanteil wird auf eine äquivalente Menge TNT-Sprengstoff umgerechnet und läßt dann Rückschlüsse auf Überdrücke in Abhängigkeit vom Explosionszentrum zu, da diese für TNT bekannt sind.

Das TNT-Äquivalent einer unverdämmten Kohlenwasserstoff-Dampfwolke wird wie folgt geschätzt:

$$\text{TNT}_{\text{äquivalent}} [\text{kg}] = \alpha \cdot H_{\text{CH}} \cdot M_{\text{CH}} / H_{\text{TNT}}$$

$\alpha$  Anteil der Verbrennungsenthalpie zur Bildung der Schockwelle (reaktionsfähige Masse)  $\approx 0,04 - 0,10$

$H_{\text{CH}}$  Reaktionsenthalpie von Kohlenwasserstoff  $\approx 46000 \text{ kJ/kg}$

$M_{\text{CH}}$  Masse der Dampfwolke [kg]

$H_{\text{TNT}}$  Reaktionsenthalpie von TNT = 4400 kJ/kg

Der Spitzenüberdruck der Gaswolkenexplosion in Abhängigkeit von einem skalierten Abstand  $z$

$$z = r / (\text{TNT}_{\text{äquivalent}})^{1/3}$$

$r$  Entfernung vom Explosionszentrum [m]

kann aus Abb. 11 abgelesen werden.

### 10.2 Verdämmte Gaswolkenexplosion

Für verdämmte Gaswolkenexplosionen sind die in Kap. 10.1.2 angeführten Modelle bzw. Methoden nicht anwendbar. Zu solchen Explosionen kann es z.B. in vollständig geschlossenen Behältern oder Gebäuden kommen, dabei sind Überdrücke bis zu 10 bar durchaus möglich. Ist das Gebäude oder der Raum nicht vollständig geschlossen, so ist der Druckanstieg entsprechend geringer (Druckentlastung). Dies bedeutet jedoch, daß die aus dem teilweise geschlossenen Raum mit hoher Geschwindigkeit ausströmenden Gase eine zusätzliche Beschleunigung erfahren. Es ist nicht möglich, für solche Situationen direkt verwendbare Kriterien aufzustellen, da zu viele verschiedene Faktoren zu berücksichtigen wären.

---

In diesem Zusammenhang wird auf die grundlegenden Prinzipien des Explosionsschutzes hingewiesen, nämlich

- Primärer Explosionsschutz (Verhindern explosionsfähiger Atmosphäre)
- Sekundärer Explosionsschutz (Verhindern der Entzündung explosionsfähiger Atmosphäre, Zoneneinteilung)
- Tertiärer Explosionsschutz (Konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen einer Explosion)

Die Problematik der geschlossenen Behälter bzw. geschlossenen Räume ist bei den Staubexplosionen ähnlich gelagert (vgl. Kap. 9.2), für die Auswirkungen von Staubexplosionen wird auf die entsprechenden VDI-Richtlinien verwiesen (Kap. 9.2.3).

Wie bereits angedeutet, gibt es kein einfaches quantitatives Verfahren bzw. Modell, um die Auswirkungen einer verdämmten Gaswolkenexplosion abzuschätzen. Die in Kap. 10.1.2 angeführten Modelle können nicht verwendet werden, da z.B. im Falle von verdämmten Explosionen weitaus geringere Mengen explosiven Dampfes wesentlich schwerere Schäden verursachen können.

Zur Berechnung der Auswirkungen von verdämmten Gaswolkenexplosionen steht das AutoReaGas Software-Paket der Fa. Century Dynamics (USA/UK) zur Verfügung. AutoReaGas ist ein 3-dimensionales CFD (Computational Fluid Dynamics) Programm, das die Navier-Stokes und die Eulersche partielle Differentialgleichung mittels der Methode der Finiten Elemente löst. Diese Software kommt u.a. bei der sicherheitstechnischen Beurteilung von großtechnischen Verfahrensanlagen, Ölplattformen und Bohrinseln in der Nordsee zum Einsatz (Robertson, N.J., AutoReaGas Users Group Meeting, Horsham, 1998).

## **11. EXPLOSIONSARTIGE ZERSETZUNG**

Hoch-reaktive feste oder flüssige Stoffe, die normalerweise unter kontrollierten Bedingungen gelagert werden, können sich bei gestörten Lagerungsbedingungen explosionsartig zersetzen. Da aus sicherheitstechnischen Gründen die gelagerte Menge so gering wie möglich gehalten wird, sind die Auswirkungen lokal, d.h. es sind außerhalb der Betriebsgrenzen keine Schäden für die Menschen und Sachwerte zu erwarten.

Sehr häufig werden z.B. organische Peroxide verwendet. Aufgrund abweichender Lagerungsbedingungen kann es zur Zersetzung kommen und möglicherweise zu einem Brand.

Die Lagerung von Ethylenoxid verlangt besondere Sorgfalt (Kühlung). Ein Versagen der Kontrolle der Lagerungsbedingungen kann zunächst zu einem Brand mit anschließender explosionsartiger Zersetzung führen.

Hoch-reaktiv eingestufte Stoffe sind z.B.

Ethylenoxid, Schwefelwasserstoff, Acetylen, Carbondisulfid, Propylenoxid, Vinylacetat, Benzen.

Kommt es bei der Zersetzung zu einer unverdämmten Explosion im Freien, so kann der Spitzenüberdruck mittels dem TNT-Äquivalenzmodell (vgl. Kap. 10.1.5) abgeschätzt werden. Im Falle einer verdämmten Explosion gelten die Aussagen von Kap. 10.2, der Spitzenüberdruck kann ein Vielfaches des unverdämmten Falles betragen, eine genauere Berechnung ist nicht möglich !

## 11.1 Sprengstoff

Der Spitzenüberdruck nach einer unverdämmten Explosion von TNT kann ebenso mit der in Kap. 10.1.5 erläuterten Methode berechnet bzw. aus Abb. 11 abgelesen werden.

Der Spitzenüberdruck als Folge einer TNT-Explosion in Abhängigkeit von einem skalierten Abstand  $z$

$$z = r / (M_{\text{TNT}})^{1/3}$$

$r$  Entfernung vom Explosionszentrum [m]

$M_{\text{TNT}}$  Masse des Sprengstoffes TNT [kg]

wird aus Abb. 11 entnommen.

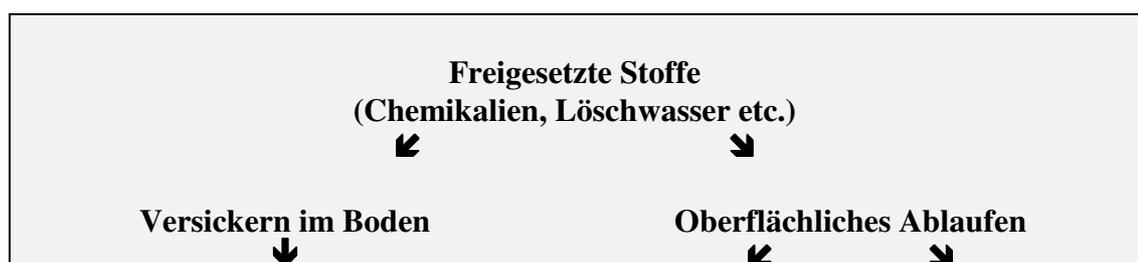
Die Auswirkungen der Druckwellen auf Menschen sind in Kap. 10.1.4 beschrieben.

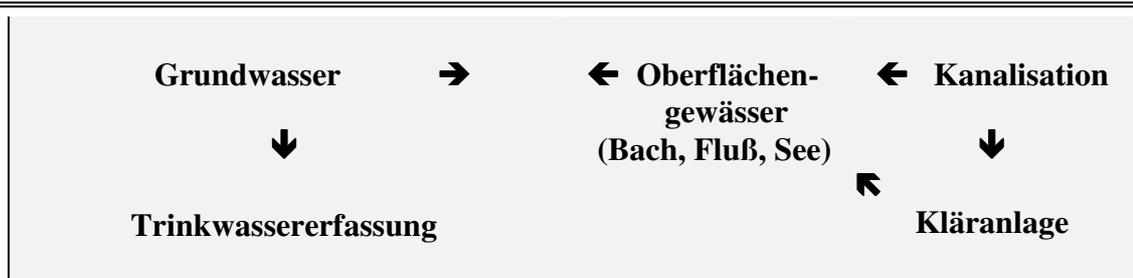
## 12. WASSER- UND BODENGEFÄHRDUNG

Die Stoffe wie Erdölderivate, das sind im besonderen Benzin, Heizöl, Dieseltreibstoff und Kerosin, stellen bei Unfällen eines der größten Gefahrenpotentiale hinsichtlich umweltrelevanter Auswirkungen dar. Andererseits bilden auch chlorierte Kohlenwasserstoffe (CKW) aufgrund ihrer besonders hohen Gefährlichkeit für Boden und Gewässer ein großes Gefahrenpotential.

### 12.1 Ausbreitungspfade

Kommt es zur Freisetzung von Schadstoffen in Gewässer und Boden, so können die möglichen Ausbreitungswege wie folgt dargestellt werden:





Da Berechnungen zur Abschätzung der Ausbreitung und Auswirkungen freigesetzter toxischer oder ökotoxischer Stoffe in Boden und Grundwasser bzw. in Kanalisation und Kläranlagen nur mit erheblichem Aufwand möglich sind, wird bei der Auswahl der Referenzszenarien nur die Ausbreitung und die Auswirkungen auf Oberflächengewässer näher behandelt. Dieser Vorgang läuft wesentlich schneller ab als die Ausbreitung in Boden und Grundwasser, für dieses Szenario sind einfache und schnelle Abschätzungen auch für grenzüberschreitende Auswirkungen (z.B. Flüße) möglich.

## 12.2 Verunreinigung von Gewässern

Wassergefährdende Stoffe sind nach dem deutschen Katalog in 4 sogenannte Wassergefährdungsklassen (WGK) eingeteilt, und zwar

WGK 0	im allgemeinen nicht wassergefährdende Stoffe
WGK 1	schwach wassergefährdende Stoffe
WGK 2	wassergefährdende Stoffe
WGK 3	stark wassergefährdende Stoffe.

Ausschlaggebend für diese Zuordnung sind Testergebnisse der Säugetiertoxizität, der Fischtoxizität und der Bakterientoxizität. Auch das biologische Abbauverhalten mittels BSB-Tests (Biologischer Sauerstoff Bedarf) in bestimmten Zeiträumen wird bewertet.

Weitere wichtige Kriterien zur Beurteilung der Umweltgefährdung sind:

- Daten zur Mobilität
- Daten zur Persistenz
- Daten zur Akkumulierbarkeit
- Direkte Schadenswirkungen
- Indirekte Schadenswirkungen.

Für die Beurteilung der möglichen Schadensauswirkungen ist in der Regel eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Wasser- bzw. Gewässersystemen notwendig, und zwar

- Gefährdung eines Oberflächengewässers
- Gefährdung des Grundwassers
- Gefährdung der Trinkwasserversorgung
- Gefährdung der Kanalisation bzw. Kläranlage.

---

## 12.2.1 Ausbreitung in Oberflächengewässer

Eine Kontamination von oberflächennahen Gewässern kann z.B. durch folgende Ursachen ausgelöst werden:

- Transportunfälle
- Unfälle beim Umschlag
- Überfüllen von Behältern (Versagen von Überfüllsicherungen, Unachtsamkeit)
- Versagen von Flüssigkeitsabscheidern oder -sperrern
- Lecks oder Versagen von Behältern oder Verbindungen (Rohrleitungen, Schläuche, Ventile)
- Kontaminiertes Löschwasser im Brandfall, fehlende Rückhaltebecken.

Beim Auslaufen in die Kanalisation ist, je nach Vorhandensein von Vorklär- oder Rückhaltebecken in der Abwasserreinigungsanlage (ARA), in der die verschmutzten Abwässer behandelt werden, der Schaden unterschiedlich groß. Ist die eingeleitete Fracht zu groß, so wird die biologische Stufe der ARA geschädigt oder unwirksam und sowohl das unfallbedingte als auch die kommunalen Abwässer gelangen ungereinigt in den Vorfluter. Aufgrund der Bakterientoxizität, der Abwassermengen (Verdünnung) und der Steuerung der Kläranlagenprozesse kann man grob abschätzen, welche Schadstofffrachten eine ARA verarbeiten kann.

Wesentlich für die Kontamination eines Gewässers ist die Wasserlöslichkeit der Verunreinigung. Bei geringer Wasserlöslichkeit breitet sich die Verunreinigung als Film auf der Wasseroberfläche aus (Stoffe spezifisch leichter als Wasser) oder sinkt als unlösliche Phase ab (spezifisch schwerere Stoffe) und kontaminiert für längere Zeit das darüber befindliche Wasser. Die Stoffdichte und die Löslichkeit in Wasser kann aus dem Sicherheitsdatenblatt entnommen werden.

Für Brenn- und Treibstoffe müssen folgende Transportmechanismen beachtet werden: Das Entfernen von Brenn- und Treibstoffen aus einem Oberflächengewässer erfolgt nicht nur durch Biodegradation sondern auch durch Verdunstung und fotochemischen Abbau (für leichtflüchtige Erdölprodukte schneller als für schwere). Aufgrund der Abbauprozesse wird die verbleibende Verschmutzung viskoser und dichter, die Bestandteile können koagulieren und absinken und verbleiben im Sediment. Der sauerstoffabhängige biologische Abbau kommt dabei für die abgesunkenen Bestandteile fast zum Erliegen.

Die Wasserlöslichkeit von Mineralölprodukten ist sehr gering, die Giftigkeit für Lebewesen kommt jedoch nicht nur als Lösung zur Wirkung und bereits geringe Mengen reichen aus, um wässrige Ökosysteme zu schädigen. Darüberhinaus dichten schwimmende Ölschichten ein Gewässer gegenüber der Luft ab, als Folge tritt Sauerstoffmangel auf. Durch den späteren biologischen Abbau bedingt kommt es zu einem zusätzlichen Verbrauch von Sauerstoff.

CKW sinken im Gegensatz zu Erdölderivaten aufgrund ihrer hohen Dichte im Wasser ab. Ein Teil kann je nach Beschaffenheit des Untergrundes hier versickern. Diese Verbindungen besitzen teilweise auch eine große Wasserlöslichkeit, sodaß eine

---

laufende Kontamination des Wassers erfolgt. Ohne Zufuhr von Sauerstoff ist der biologische Abbau der CKW sehr langsam, sie gelten als persistent. Wegen ihrer hohen Flüchtigkeit gehen sie aber relativ schnell in die Luft über.

Computerprogramme zur Simulation der Ausbreitung von Schadstoffen in Oberflächengewässern werden z.B. in den Arbeiten

- Jirka G., Summer W., The Expert System CORMIX for Water Quality Management and Hydrodynamic Mixing Zone Analysis, Proceedings of Hydrocomp 1992, Elsevier Science Publishers Ltd.
- Schäfer E., Loiskandl W., Jung H., Anwendung einer Simulationssprache zur Erstellung eines vereinfachten Alarmmodells für die Vorhersage der Stoffausbreitung in Fließgewässern, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 9/10, 1995

vorgestellt.

### 12.2.2                    **Auswirkungen der Kontamination**

Eine qualitative Übersicht der schädigenden Wirkung von Chemikalien auf Lebewesen in Gewässern ist in Tabelle 7 dargestellt.

In Tabelle 8 sind für eine Reihe von Stoffgruppen die maßgebenden Kriterien zu einer qualitativen Beurteilung des Schadenspotentials veranschaulicht.

Die Verunreinigung von Oberflächengewässern mit wassergefährdenden Stoffen führt zu einer Beeinträchtigung des Lebensraumes für Pflanzen und Tiere. Tabelle 9 enthält quantitative Angaben zum kontaminierten Wasservolumen als Funktion der freigesetzten Produktmenge, der Wassergefährdungsklasse und der Toxizität für Wasserlebewesen ( $LC_{50}$  - Werte).

Für die Beurteilung der möglichen Auswirkungen sind weitere Angaben erforderlich und zwar, ob Brand- oder Explosionsgefahr besteht und ob eine Gefährdung des Grundwassers, der Trinkwasserversorgung oder der Kanalisation bzw. Kläranlage möglich ist.

*LC<sub>50</sub> - Wert:*

Mittlere lethale Konzentration, bei der unter standardisierten Versuchsbedingungen 50% der Versuchstiere nach inhalativer Applikation eines Giftes oder Schadstoffes sterben. Auch die Expositionsdauer muß angegeben werden. Bei der Toxizitätsbestimmung für aquatische Lebewesen erfolgt diese Angabe nur als  $LC_{50}$  - Wert, da zwischen oraler und inhalativer Aufnahme nicht unterschieden werden kann.

**Beispiel:            Manipulation organischer Lösemittel - Wassergefährdung**

Durch einen Manövrierfehler des Staplerfahrers werden im Freien 2 Fässer beschädigt und 400 l Trichlorethylen freigesetzt. Etwa 200 l fließen in den naheliegenden Bach,

---

150 l gelangen über einen Bodenablauf in die Kanalisation, 50 l versickern in das Erdreich.

Es ist mit folgenden Auswirkungen zu rechnen:

Trichlorethylen löst sich nur geringfügig in Wasser (1.100 mg/l) und sinkt ab (Dichte 1,5 g/ml). Das Lösungsmittel ist stark wassergefährdend, der LC<sub>50</sub>-Wert (48 h) beträgt 9,1-18 mg/l (Daphnientoxizität); die Störschwelle für Fische liegt bei 55 mg/l, 660 mg/l wirken in 15 min. tödlich.

Der Stoff gelangt in die örtliche Abwasserreinigungsanlage und verursacht erhebliche Störungen in der biologischen Stufe.

Der Stoff ist schwer abbaubar, gelangt durch den Boden rasch in das Grundwasser und wird in Richtung Grundwasser getrieben (auch Beton ist für CKW durchlässig).

Abschätzung des Schadens für die Lebewesen im Bach:

Unter der Annahme, daß das Lösungsmittel (200 l  $\cong$  300 kg) in 20 s in den Bach rinnt und die Abflußgeschwindigkeit des Baches 0,5 m<sup>3</sup>/s beträgt, werden 0,5 · 20 = 10 m<sup>3</sup> Wasser direkt verseucht (1.100 mg/l bei Durchwirbelung).

Wird das Lösungsmittel nicht sofort abgepumpt, so bleibt es auf dem Grund des Baches liegen, bis es vom Wasser vollständig aufgenommen worden ist. Da 660 mg/l in 15 min. für Fische tödlich wirken kann, sind bei idealer Durchmischung ca.

$$300 / 0,00066 = 450 \text{ m}^3$$

Bachwasser mit dieser Konzentration behaftet. Demnach ist ein lokales Fischsterben möglich.

## **13. TOXISCHE SCHWERGASE**

### **13.1 Allgemeine Grundlagen der Gasausbreitung (schwere/leichte Gase)**

Das Ziel bei der Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens ist die Berechnung bzw. Abschätzung einer Immissionskonzentration in einer bestimmten Entfernung von der Quelle für einen bestimmten Leckage- oder Verdampfungsmassenstrom.

Grundsätzlich wird dabei zwischen Schwer- und Leichtgasausbreitung unterschieden. Da die Ausbreitungsmechanismen beider Gase unterschiedlichen physikalischen Bedingungen unterliegen, müssen entsprechende Berechnungsmodelle angewandt werden.

Die wichtigsten Einflußgrößen auf das Ausbreitungsverhalten von Gasen in der Atmosphäre sind die folgenden Parameter:

- Turbulenz der Atmosphäre

- Windgeschwindigkeit
- Wetterlage
- Temperaturschichtungen
- Struktur der Erdoberfläche (Topographie des Bodens)
- Gebäude, Hindernisse
- Auftrieb durch Thermik (z.B. Brand).

### 13.1.1 Schwergasausbreitung

Als schwere Gase werden alle Gase mit einer höheren Dichte als die Luftdichte angesehen, es handelt sich dabei überwiegend um druckverflüssigte Gase mit einem hohen Molekulargewicht. Ammoniak, leichter als Luft, zeigt z. B. aufgrund seiner Ausbreitungseigenschaften Schwergas-ähnliches Verhalten.

Für die nach der Freisetzung eintretende Verdampfung von druckverflüssigten toxischen Gasen bzw. die Abschätzung der verdampfenden Mengen kann Kap. 7.2 herangezogen werden.

Der Unterschied im Ausbreitungsverhalten zu Leichtgasen liegt in der Eigendynamik der Schwergaswolke sowie in der starken stabilen Schichtung (großer Dichtesprung am Wolkenrand) innerhalb der Wolke, die eine turbulente Vermischung mit der Umgebungsluft erschweren. Schwergasausbreitungen finden flach und bodennah statt, d.h. bei der Abschätzung des Ausbreitungsverhaltens muß besonderes Augenmerk auf die Struktur der Erdoberfläche, auf Gebäude und Hindernisse und auf die Windgeschwindigkeit gerichtet werden. Schwere Gase „fließen“ z.B. in Richtung des Gefälles, auch gegen den Wind !

#### 13.1.1.1 Ausbreitungseigenschaften von Ammoniak

Die niedrige spezifische Dampfdichte in Vergleich zu Luft (0,6 bei 20° C ) würde bedeuten, daß gasförmiges NH<sub>3</sub> in die oberen Atmosphärenschichten entweichen müßte. Da Ammoniak jedoch stark hygroskopisch ist, bildet gasförmiges NH<sub>3</sub> (an der freien Luft, anders in Räumen) mit der Luftfeuchtigkeit tiefkalte Aerosole, die sich wie schweres Gas verhalten und als Nebel sichtbar werden. Auf gasförmiges NH<sub>3</sub> trifft somit aus sicherheitstechnischer Sicht bei niedriger Luftfeuchte die Einstufung als Leichtgas und bei normaler bzw. höherer Luftfeuchte die Einstufung als Schwergas zu, wobei Leicht- und Schwergas fließend ineinander übergehen können.

### 13.1.2 Leichtgasausbreitung

Leichte Gase sind Gase, deren Dichte ungefähr der Luftdichte entsprechen. Die bestimmende Größe für das Ausbreitungsverhalten ist dabei die Diffusion des Gases in die Umgebungsluft.

Das in der Praxis häufigst verwendete Berechnungsverfahren basiert auf dem Gaußschen Ausbreitungsmodell, wobei eine kurzzeitige Freisetzung einer „Punktwolke“ in einer Höhe H über dem Erdboden angenommen wird, deren Mittelpunkt mit konstanter Windgeschwindigkeit fortbewegt wird. Dabei wird die

---

Wolke durch Zumischung von Luft laufend verdünnt, wobei ihr Gesamtvolumen wächst. Dieser Prozeß wird im Gauß-Modell durch die Streuung wiedergegeben.

### 13.1.3 Unfallbedingte Ausbreitung von schweren Gasen

Bei der unfallbedingten Ausbreitung von schweren Gasen unterscheidet man zwischen:

#### 1. Brennbar schweren Gasen

Als Bestimmungsgröße ist abhängig von der meteorologischen Ausbreitungssituation zunächst die untere Zünddistanz UZD zu ermitteln. Kommt es zur Zündung der Wolke (Ausgangspunkt für ein Referenzszenario), so sind Auswirkungen in Form von Gaswolkenbrand (siehe Kap. 8) oder einer Gaswolkenexplosion (siehe Kap. 10) zu erwarten.

#### 2. Toxischen schweren Gasen

Als Bestimmungsgrößen sind die Maximalkonzentrationen und die zeitlichen Konzentrationsverläufe sowie die Dosiswerte an festen Aufpunkten im Lee der Quelle abhängig von der meteorologischen Ausbreitungssituation zu ermitteln.

## 13.2 Toxikologische Bewertung unfallbedingter Freisetzungen

Um das Gefährdungspotential eines Stoffes einschätzen zu können, müssen Kenntnisse über die Wirkungsweise, die Angriffspunkte/Zielorgane und die Auswirkungen bei gegebenen Konzentrationen oder Dosen vorhanden sein.

### Aufnahmeweg toxischer Substanzen

- durch Verschlucken (oral)
- über die Atmung (inhalatorisch)
- über die Haut (dermal)

### 13.2.1 Wirkung toxischer Substanzen auf den Organismus

#### Akute Toxizität:

- Charakterisierung der Giftigkeit eines chemischen Stoffes nach einmaliger Anwendung
- Kein absolutes Maß für die Toxizität
- Kenngröße: Letale Konzentration  $LC_{50}$ , letale Dosis  $LD_{50}$

#### Chronische Toxizität:

- Charakterisierung der Giftigkeit eines chemischen Stoffes bei wiederholter Verabreichung über einen längeren Zeitraum (meist über 2 Jahre)

- Kenngrößen: Die nicht wirksame Konzentration oder Dosis NOEL (No Observed Effect Level) oder die niedrigste wirksame Konzentration oder Dosis LOEL (Lowest Observed Effect Level).

### 13.2.2 Schädigung und Wirkungsweise

#### 1. Ätzende Stoffe:

Hautverätzungen, z.B. Laugen, Säuren.

#### 2. Atmungsgifte:

*Lungenreizstoffe*, z.B. Chlorwasserstoff (HCl), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Phosgen (COCl<sub>2</sub>).

Der Schädigungsort bei Aufnahme ist abhängig von der Wasserlöslichkeit bzw. Lipoidlöslichkeit der Substanzen:

- Gut wasserlösliche Substanzen (Ammoniak, Chlorwasserstoff, Formaldehyd) wirken sofort im oberen Respirationstrakt (Rachen, Kehlkopf, Luftröhre).
- Weniger wasserlösliche Substanzen (Schwefeldioxid, Chlor, Isocyanate) wirken nach einer Latenzzeit von Minuten bis Stunden im mittleren Respirationstrakt (Bronchien, Bronchiolen).
- Fettlösliche Stoffe (Stickstoffdioxid, Phosgen, Ozon) wirken nach einer Latenzzeit von Stunden bis Tagen im terminalen Respirationstrakt (Bronchiolen, Alveolen).

*Stoffe, die im Blut die Sauerstoffversorgung behindern*, z.B. Kohlenmonoxid, Cyanwasserstoff.

*Synergismus*, d.h. die toxische Wirkung von zwei oder mehr chemischen Stoffen wird als synergistisch bezeichnet, wenn die Gesamtwirkung größer als die Summe der Einzelwirkungen ist und damit eine verstärkte Auswirkung auftritt; z.B. gleichzeitige Einwirkung von Kohlenmonoxid und Cyanwasserstoff.

#### 3. Kanzerogene Stoffe:

Stoffe, die beim Menschen Krebs verursachen, z.B. Benzol, Vinylchlorid, Asbest.

#### 4. Mutagene Stoffe:

Veränderung des genetischen Materials der Zellen, z.B. Acrylamid, Trimethylphosphat.

#### 5. Teratogene Stoffe:

---

Auswirkung auf die körperliche und physische Entwicklung des heranwachsenden Embryos, z.B. Methylquecksilber, Thalidomid, Ethanol, Blei, Toluol.

### 13.2.3 Toxizitätswerte, Grenzwerte, Orientierungswerte

Bei der Bewertung der Immissionsbelastung nach einer unfallbedingten Freisetzung von toxischen Schwergasen muß durch geeignete Wahl der Grenzwerte berücksichtigt werden, daß es sich um eine extrem seltene und dann auch nur kurzzeitig auftretende Immissionsbelastung handelt. Deshalb sind zur Bewertung solche Grenzwerte, die auf einer Langzeitwirkung basieren wie z.B. MAK-Werte, nicht geeignet.

Zur Bewertung der akuten Gefahr durch kurzzeitig auftretende Immissionsbelastungen ist es naheliegend Grenzwerte heranzuziehen, denen Einwirkzeiten von 30 - 60 Minuten zugrunde liegen. Mit solchen Einwirkzeiten liegt man hinsichtlich der zu erwartenden Auswirkungen auf der sicheren Seite.

Dafür kommen in der Reihenfolge ihrer Aussagekraft dargestellt, die folgenden Grenzwerte in Frage:

IDLH-Wert → VCI-Störfallbeurteilungswert → ERPG-3 Wert.

#### **IDLH-Wert: Immediately Dangerous to Life or Health**

Diejenige maximale Konzentration, die für den Fall, daß das Atemschutzgerät ausfällt, die Flucht innerhalb von 30 Minuten ermöglicht, ohne irgendwelche fluchtbehindernden oder irreversiblen gesundheitlichen Effekte zu verursachen. Die Werte sind für gesunde, männliche Arbeiter erstellt. Die IDLH-Werte sind für ca. 500 Stoffe verfügbar !

#### **VCI-Störfallbeurteilungswert**

Diejenige Konzentration eines Stoffes, die nach einer Einwirkzeit von bis zu 60 Minuten in der Regel nicht das Leben des Menschen bedroht oder zu schwerwiegenden, insbesondere irreversiblen Gesundheitsschäden führt. Der Wert ist ausschließlich als eine Planungsgröße für die Auslegung von Betriebsanlagen, für die zu treffenden unfallbegrenzenden Maßnahmen sowie als Hilfsgröße für Katastrophenschutzmaßnahmen zu verstehen und wird in der BRD verwendet. Die Werte sind für ca. 70 Stoffe festgelegt.

#### **ERPG-3 Wert: Emergency Response Planning Guidelines**

Die maximale luftgetragene Konzentration, bei der davon ausgegangen wird, daß innerhalb dieses Wertes beinahe sämtliche Personen bis zu einer Stunde lang exponiert werden könnten, ohne daß sie unter lebensbedrohenden gesundheitlichen Auswirkungen leiden bzw. solche entwickeln. Der ERPG-3 Wert ist ein Worst-Case-Planungswert, bei dem oberhalb des Wertes die Möglichkeit besteht, daß es bei einigen Mitgliedern der Bevölkerung zu lebensbedrohenden gesundheitlichen

Auswirkungen kommen kann. Dieser Beurteilungswert wird in der BRD favorisiert, die Werte sind für ca. 40 Stoffe bekannt.

In der folgenden Übersicht werden für einige toxische Substanzen die IDLH-, VCI- und ERPG-3-Werte miteinander verglichen:

<b>Grenzwerte für toxische Substanzen [ppm]</b>			
<b>Substanz</b>	<b>IDLH</b>	<b>VCI</b>	<b>ERPG-3</b>
Acrolein	5	3	3
Allylchlorid	300	300	300
Ammoniak	500	500	1.000
Brom	10	0,5	5
Butadien	20.000	20.000	5.000
Chlor	30	20	20
Chlorpikrin	4	3	3
Chlorwasserstoff	100	90	100
Crotonaldehyd	400	50	50
Dimethylamin	2.000	500	500
Fluorwasserstoff	30	30	50
Formaldehyd	100	10	25
Methylamin	100	500	500
Methylmerkaptan	400	100	100
Phenol	250	200	200
Phosgen	2	2	1
Schwefeldioxid	100	30	15
Schwefelkohlenstoff	500	500	500
Schwefelsäure (100%)	20	7,4	7,4
Schwefeltrioxid	20	12	9
Schwefelwasserstoff	300	300	100

### 13.2.4 Toxische Konzentrationen und Dosen

**Konzentration:** Einheit ml/m<sup>3</sup> (ppm) oder mg/m<sup>3</sup>.

**Umrechnung Konzentration C [ppm] ↔ C [mg/m<sup>3</sup>]:**

$$C \text{ [ppm]} = (\text{Molvolumen [l/mol]} / \text{Molmasse [g/mol]}) \cdot C \text{ [mg/m}^3\text{]}$$

$$C \text{ [mg/m}^3\text{]} = (\text{Molmasse [g/mol]} / \text{Molvolumen [l/mol]}) \cdot C \text{ [ppm]}$$

Molvolumen = 24,1 l/mol bei 20°C und 1013 mbar.

**Dosis:** Einheit mg/m<sup>3</sup> · min (Konzentration · Zeit).

Der tatsächlich vom Biosystem aufgenommene wirksame Stoffanteil.

**LC<sub>50</sub> : Lethal Concentration Fifty** (mittlere letale Konzentration)

Die berechnete Konzentration der Substanz in der Atemluft, die zum Tode von 50% der über eine bestimmte Zeitspanne hinweg (meist 4 Stunden) exponierten Versuchstieren führt.

**LD<sub>50</sub> : Lethal Dose Fifty** (mittlere letale Dosis)

Die berechnete Dosis eines Stoffes unterhalb LD<sub>50</sub>, die bei irgendeiner Applikationsart außer Inhalation zum Tode von 50% einer signifikant hohen Population einer definierten Tierart führt.

### 13.2.5 Probit-Methode

Wie bereits in Kap. 6.1.4 bei der Darstellung der Auswirkungen der Hitzestrahlung auf Menschen beschrieben, kommen auch bei der toxikologischen Bewertung unfallbedingter Freisetzungen qualitative Orientierungswerte (IDLH, VCI, ERPG-3) für ausgewählte Expositionszeiten und die Probit-Methode im Falle vorgegebener Risikokriterien (Todesfälle) zum Einsatz. Im Unterschied zur Hitzestrahlung sind die stoffabhängigen Konstanten für jedes toxische Schwergas verschieden und im folgenden für häufig vorkommende Gase angeführt.

Probit =  $A + B \cdot \ln(C^N \cdot t)$  für toxische Substanzen

Probit	Probability Unit
C	Konzentration [ppm]
t	Expositionsdauer [min]
A, B, N	Stoffabhängige Konstanten

Das Produkt ( $C^N \cdot t$ ) wird als „toxische Dosis“ bezeichnet, d.h. daß die Dosis-Wirkung Beziehung keine lineare Abhängigkeit aufweist.

Ist die Größe Probit berechnet, so kann die entsprechende Wahrscheinlichkeit für Todesfälle angegeben in Prozent aus Abb. 6 abgelesen werden. Abb. 6 stellt die über die Normalverteilung integrierte Wahrscheinlichkeit für Todesfälle [%] als Funktion der Variablen Probit dar.

Stoffabhängige Konstanten für verschiedene toxische Schwergase			
Toxische Substanz	A	B	N
Acrylaldehyd	-9,93	2.05	1.0

Ammoniak	-9,82	0,71	2,0
Brom	-9,04	0,92	2,0
Kohlenmonoxid	-38,23	3,70	1,0
Tetrachlorkohlenstoff	0,54	1,01	0,5
Chlor	-8,29	0,92	2,0
Chlorwasserstoff	-21,76	2,65	1,0
Fluorwasserstoff	-26,40	3,35	1,0
Schwefelwasserstoff	-40,35	2,90	2,0
Methylbromid (Brommethan)	-19,92	5,16	1,0
Methylisocyanat	-2,97	0,70	1,0
Phosgen (Carbonylchlorid)	-19,27	3,69	1,0
Schwefeldioxid	-23,70	1,14	3,7

Die Probit-Werte stammen zum großen Teil aus Tierversuchen und die Anwendung auf Menschen ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Sie sollen daher mit Vorsicht verwendet werden, geben aber auf jeden Fall gute Schätzwerte ab.

### Beispiel:

Wie groß darf die toxische Dosis sein, daß bei einer Freisetzung von Chlor/Ammoniak nicht mehr als 1% Todesfälle auftreten ?

Aus Abb. 6 abgelesen ergibt für 1% Wahrscheinlichkeit Probit = 2,7.

Chlor:

$$\text{Probit} = 2,7 = - 8,29 + 0,92 \cdot \ln (X)$$

$$X = C^2 \cdot t = 1,5 \cdot 10^5 \text{ [ppm} \cdot \text{min]},$$

entspricht z.B. 70 ppm bei 30 min Expositionsdauer. Der IDLH-Wert für Chlor beträgt vergleichsweise 30 ppm.

Ammoniak:

$$\text{Probit} = 2,7 = - 9,82 + 0,71 \cdot \ln (X)$$

$$X = C^2 \cdot t = 4,6 \cdot 10^7 \text{ [ppm} \cdot \text{min]},$$

entspricht z.B. 1200 ppm bei 30 min Expositionsdauer. Der IDLH-Wert für Ammoniak beträgt vergleichsweise 500 ppm.

## 13.3 Modelle für Schwergasausbreitung

Die atmosphärische Ausbreitung toxischer Schwergase wird im wesentlichen von den folgenden Einflußfaktoren bestimmt: Freisetzungsszenario (Stoffart, Freisetzungsart), meteorologische Verhältnisse (Windfeld, Turbulenz, Geländeeinfluß) sowie die Prozesse in der Gaswolke. Der Ausbreitungsvorgang findet meist in den untersten Schichten der Atmosphäre statt. Zur Abschätzung der Auswirkungen nach Freisetzung sind zahlreiche Ausbreitungsmodelle entwickelt worden. Eine allgemeine Eigenschaft aller Modelle ist, daß die berechneten Ergebnisse immer ein gewisses Maß an Unsicherheit und Fehlern für die Konzentrationswerte und den Umfang bzw. die Position der Gaswolke enthalten. Der Grund dafür ist die Unvollständigkeit der physikalischen Formulierungen und Annahmen im Modell selbst sowie die

---

Unsicherheiten der emissionsseitigen und meteorologischen Eingangsdaten. Dazu kommt noch der stochastische, turbulente Charakter der Atmosphäre. Es wurden bereits einige Evaluierungsstudien durchgeführt bzw. sind derzeit noch im Laufen, es wird im folgenden kurz darauf eingegangen.

Zur Berechnung der Schadstoffausbreitung werden im wesentlichen 4 Modelltypen verwendet, und zwar

- Gauß-Fahnenmodell
- Boxmodell
- Lagrange-Partikelmodell
- Euler-Modell.

In der Praxis kommt das Boxmodell am häufigsten zur Anwendung.

### **13.3.1 Typische Eigenschaften der Schwergasausbreitung**

Da bei Schwergasen die Dichte des Gases höher ist als die der Umgebungsluft, ist eines der Hauptmerkmale die Tendenz, daß sie nach Freisetzung zu Boden sinken. Wenn die Freisetzung in größerer Höhe geschieht, so sinkt das Gas zuerst in Richtung Boden, um sich dann entlang dem Boden in Form einer Gravitationsausbreitung auszudehnen. Bei Austritten in Bodennähe tritt diese Gravitationsphase sofort ein. In der Anfangsphase der Ausbreitung, d.h. solange die Dichteunterschiede von Bedeutung sind, wird der Ausbreitungsvorgang und die Durchmischung in erster Linie durch die Eigendynamik des schweren Gases gesteuert. Durch die während der Ausbreitung stattfindende Durchmischung von Gas und Umgebungsluft reduziert sich der Dichteunterschied allmählich. Wenn dieser Dichteunterschied vernachlässigbar wird, etwa bei 2% oder weniger, breitet sich das Gas weiter als Neutral- oder Leichtgas aus.

Neutralgase neigen dazu, weder in die Höhe zu steigen noch zu Boden zu sinken, sondern sie bewegen sich mit der Umgebungsluft.

Leichtgase weisen zunächst einen positiven thermischen Auftrieb auf, während der Ausbreitung wird allerdings das Gas solange mit Umgebungsluft vermischt, bis es sich weiter als Neutralgas ausbreitet.

### **13.3.2 Gauß-Fahnenmodell**

Es beruht auf einer vereinfachten, analytischen Lösung der Diffusionsgleichung und ist für stationäre, kontinuierliche und strahlförmige Freisetzungen von leichten oder neutralen Gasen in ebenem Gelände geeignet.

Für spontane, schlagartige Freisetzungen ist dieses Modell nicht verwendbar.

---

---

### 13.3.3 Boxmodell

Für spontane Freisetzungen muß ein boxähnliches Modell verwendet werden, d.h. die Anfangsform der Gaswolke wird durch eine Kugel, ein Ellipsoid oder einen Zylinder beschrieben, mit einem je nach freigesetzter Stoffmenge gegebenen Anfangsdurchmesser und -volumen. Die Verteilung der Masse innerhalb der Box wird entweder durch eine konstante oder Gauß'sche Verteilung dargestellt. Letztere bilden eine Untergruppe der Boxmodelle und sind in der Literatur unter dem Begriff „Puff“-Modelle für spontane Freisetzung bekannt.

Die Flugbahn der Box wird durch das Windfeld definiert, die Umgebungsluft wird durch turbulente Prozesse in der Box hinein gemischt, wodurch eine Verdünnung der Konzentration und ein Zuwachs des Boxvolumens verursacht wird. Bei der Umströmung orographischer Hindernisse ist die Aufteilung in mehrere Boxen möglich.

Boxmodelle können durch Aufteilung in eine Folge von Boxen auch für kontinuierliche oder zeitlich variable Freisetzungen eingesetzt werden.

Ein Nachteil der Boxmodelle ist, daß sie aufgrund der Annahme einer kugel- oder zylindrischen Freisetzungsgeometrie die Feinstrukturen der Konzentrationswerte nicht so gut erfassen können, dafür aber zur Simulation von Auftriebseffekten entsprechend geeignet sind.

### 13.3.4 Lagrange-Partikelmodell

In diesem Modell wird die Abgasfahne oder -wolke in eine große Anzahl sogenannter Lagrange-Teilchen aufgeteilt. Die Teilchen werden unabhängig voneinander von der Luftströmung transportiert, wobei die Flugbahnen (Trajektorien) mit Hilfe des Wind- und Turbulenzfeldes definiert werden. Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse hängt von der Anzahl der Partikel ab, die Berechnungen sind sehr rechenzeitintensiv. Auftriebseffekte bei schweren und leichten Gasen sind schwierig zu beschreiben, da die Partikel in diesem Modell weder Masse noch Volumen besitzen. Besonders gut geeignet ist diese Methode zur Berechnung der Feinstrukturen eines Konzentrationsfeldes.

### 13.3.5 Euler-Modell

Bei Euler-Modellen wird die Transportgleichung mit teilweise sehr komplexen numerischen Verfahren gelöst, die Methode ist dementsprechend rechenzeitintensiv und setzt den Einsatz von Großrechnern voraus. Ein Vorteil des Euler-Modelles ist die Flexibilität, d.h. die Methode ist für sämtliche Freisetzungs- und Gasarten (leicht, neutral, schwer) verwendbar.

## 13.4 Modellvergleiche - Evaluierungen

Seit den letzten 10 Jahren werden in Europa und USA zunehmend Studien über chemische Ausbreitungsmodelle durchgeführt, wobei die Ergebnisse sowohl

---

miteinander als auch mit Feldexperimenten verglichen werden. Der Grund sind einerseits die gesetzlichen Regelungen hinsichtlich der Vermeidung von schweren industriellen Unfällen und das ständig zunehmende und umfangreiche Angebot an Ausbreitungsmodellen (weltweit über 100 verschiedene Modelle!).

Im folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse von Evaluierungen in den USA und in der EU auszugsweise angeführt.

### **13.4.1 Modellunsicherheiten (Hanna et al., 1993)**

Im allgemeinen können Ausbreitungsmodelle nur eine gewisse Genauigkeit erreichen. Der Grund dafür ist nicht nur die Unvollständigkeit der physikalischen Formulierungen und Annahmen im Modell selbst sondern auch die Unsicherheiten der emissionsseitigen und meteorologischen Eingangsdaten und der stochastische Charakter der Atmosphäre (Turbulenz).

Es wurden die maximal zu erwartenden Genauigkeiten mit Feldexperimenten für 21 verschiedene Ausbreitungsmodelle verglichen, darunter auch 14 Schwergasmodelle und 7 Neutralgasmodelle.

Der Autor weist u.a. auf die Gefahr hin, Daten eines einzigen Meßortes für die Durchführung einer Modellevaluierung zu verwenden, da festgestellt wurde, daß dasselbe Modell die Ergebnisse an einem Meßort bis zu 40% überschätzt und an einem anderen Meßort bis zu 40% unterschätzt. Der Autor kommt aufgrund der Modellvergleiche zum Schluß, daß es für die Modellgenauigkeiten gewisse Mindestgrenzen gibt, die kaum noch verbessert werden können, d.h. Modelle mit relativen Abweichungen des Mittelwertes um 20% und mittleren quadratischen Fehlern um 0,5 können kaum mehr verbessert werden (Meßfehler, stochastische Variation der Atmosphäre).

### **13.4.2 EPA-Evaluierungsstudie (Touma et al., 1995)**

Die US-Umweltbehörde hat eine Vergleichsstudie, in der 7 Ausbreitungsmodelle mit 3 verschiedenen Feldexperimenten verglichen wurden, durchgeführt. Die Feldmessungen wurden für Entfernungen bis zu 1 km von der Quelle durchgeführt.

Die Studie kommt zum Schluß, daß keines der 7 untersuchten Modelle durchgehend eine befriedigende Genauigkeit für die verschiedenen Experimente und Entfernungen von der Quelle aufweist, im Gesamtbild liegen die meisten Ergebnisse innerhalb eines Faktors zwei !

### **13.4.3 Sigma Research Corporation-Studie (Hanna et al., 1993)**

In dieser Studie wurden 15 Ausbreitungsmodelle mit Messungen von 8 verschiedenen Feldexperimenten verglichen. Wie in der EPA-Studie kommt man zum Schluß, daß keines der untersuchten Modelle durchgehend eine befriedigende Genauigkeit für die verschiedenen Experimente und Entfernungen von der Quelle aufweist und daß im Gesamtbild die Ergebnisse innerhalb eines Faktors zwei liegen.

---

---

### **13.4.4 American Institute of Chemical Engineers (AIChE, 1996)**

Dieses Institut veröffentlichte 1996 ein Buch über Richtlinien bei der Verwendung von Ausbreitungsmodellen bei Freisetzungen gefährlicher Stoffe. Es wurde eine Modellumfrage für 22 Ausbreitungsmodelle durchgeführt mit dem Ziel, die verschiedenen Modelle mit ihren Modulen zu katalogisieren. Spezifische Empfehlungen für Modelle scheinen nicht auf.

### **13.4.5 U.S. Department of Energy (US DOE, 1997a,b)**

Im Rahmen des APAC-Programmes (Accident Phenomenology and Consequence Methodology Evaluation) wurden weltweit etwa 142 Modelle identifiziert, die für Ausbreitungsrechnungen in Frage kommen. Es wurden keine Vergleiche der Modellergebnisse mit experimentellen Daten durchgeführt. Das übergreifende Ziel der Studie war, unter Anwendung definierter Kriterien Modelle zu identifizieren, die für Gefahrenabschätzungen empfohlen werden können. Aus einer Liste von insgesamt 24 untersuchten nicht-kommerziellen Modellen wurden dabei 4 für die Berechnung von Szenarien empfohlen.

### **13.4.6 Europäische Union**

In der EU begannen die Aktivitäten hinsichtlich der Evaluierung von Modellen zur Ausbreitung von Schwergasen im Jahre 1992 als die Model Evaluation Group (MEG) vom Directorate General XII gegründet wurde. Diese veröffentlichte im Jahre 1994 die „Guidelines for Model Developers“ und das „Model Evaluation Protocol“. Von der MEG wurde im Jahre 1993 eine Expertengruppe ernannt, die „Heavy Gas Dispersion Expert Group“ (HGDEG), die in den Jahren 1993-1995 die REDIPHEM-Studie durchführte (Review and Dissemination of Physical Effect Models). Dabei wurden die aktuellen europäischen Ausbreitungsmodelle untersucht. Neben allgemeinen Aspekten und einer detaillierten Beschreibung dieser Modelle erstellt die Studie ein Evaluierungsprotokoll, in dem die Grundzüge jedes Modelles dargestellt werden. Es werden jedoch keine konkreten Empfehlungen für irgendein Modell ausgesprochen.

Um zukünftige Vergleiche von Modellen mit Feldmessungen durchführen zu können, wurde aus insgesamt 10 unabhängigen, verschiedenen Feldexperimenten die REDIPHEM-Datenbank erstellt.

Im Anschluß an das REDIPHEM-Projekt läuft seit 1996 in der EU die bisher größte Studie hinsichtlich Evaluierung von Schwergasmodellen, das SMEDIS-Projekt (Scientific Model Evaluation of Dense Gas Dispersion Models), unter Koordination des UK Health and Safety Executive und Electricité de France. Dabei werden sämtliche aktuelle Modelle aus Europa, insgesamt 25, anhand des allgemeinen Evaluierungsprotokolls HGDEP (Heavy Gas Dispersion Evaluation Protocol) überprüft. Die Arbeiten zu diesem Projekt werden voraussichtlich 1999 abgeschlossen und veröffentlicht werden.

### **13.4.7 Resümee**

---

Die US-Studien haben bis jetzt gezeigt, daß bei US-Modellvergleichen zwischen Rechnungen und Experimenten Abweichungen bis zu einem Faktor 2 festgestellt wurden. Hinsichtlich der Modellgenauigkeit kam man zum Schluß, daß dieser aufgrund von Meßfehlern und der stochastischen Variation der Atmosphäre gewisse Grenzen gesetzt sind, die kaum noch verbessert werden können, nämlich Abweichungen von den Mittelwerten in beiden Richtungen in der Größenordnung von 20%.

Die Ergebnisse der SMEDIS-Studie hinsichtlich der Genauigkeit der europäischen Modelle liegen zu dem Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht vor, die Aussagen dürften jedoch mit denen der US-Studien vergleichbar sein.

Aus diesen Gründen ist es naheliegend, vorerst einen genaueren Blick auf die in unseren Nachbarländern Deutschland und Schweiz in Verwendung stehenden Modelle zu werfen.

### **13.5 Modellvergleiche BRD, Schweiz**

In der BRD werden für Schwergasausbreitung die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 2 als Stand der Technik und das Modell DEGADIS (anerkannt lt. Beschluß des Länderausschusses Immissionsschutz LAI, 1987) verwendet. DEGADIS schneidet bei den US-Evaluierungsstudien recht gut ab und wird von vielen Organisationen zur Ermittlung des Konzentrationsverlaufes nach Freisetzung von Schwergasen herangezogen.

In der Schweiz wird seit mehr als 10 Jahren das sogenannte MET-Modell (Modell für Effekte mit toxischen Gasen) zur Abschätzung der Auswirkungen nach Freisetzung toxischer Schwergase verwendet. Die Anwendung wird insofern erleichtert, als daß die Ergebnisse einerseits in Form von Tabellen vorliegen und dort bequem abgelesen werden können, andererseits auch mittels eines Computerprogrammes ermittelt werden können.

### **13.6 Empfehlungen zur Anwendung**

#### **13.6.1 VDI-Richtlinie 3783**

Die VDI-Richtlinie ist einfach und benutzerfreundlich gestaltet und bietet eine einfache Modellanwendung, d.h. es gibt nur wenige Fehlerquellen bei der Eingabe und der Interpretation der Ergebnisse. Sie ermöglicht eine Grobabschätzung der Ausbreitung schwerer Gase, da sie teilweise von starken Vereinfachungen ausgeht (z.B. werden thermodynamische Vorgänge bei der Entstehung der Schwergaswolke nicht berücksichtigt). Die Vereinfachungen haben zur Folge, daß Details der Quellkonfiguration nur noch über die freigesetzte Masse, die Freisetzungszeit sowie die Dichte des Gases in die Betrachtung eingehen, wodurch an quellnahen Aufpunkten Fehler auftreten können.

Wenn eine Kopplung zwischen Blatt 1 und Blatt 2 erforderlich ist, sollten die Ergebnisse kritisch betrachtet werden, da bedingt durch die Unterschiede

---

(Windkanalversuche, Ausbreitungsformalismus nach Gauß) in beiden Berechnungsmodellen eine Ausbreitungssituation angenommen wird, die physikalisch nicht möglich ist.

Vergleiche mit schweren Unfällen zeigen, daß mit der VDI-Richtlinie sowohl Überschätzungen als auch Unterschätzungen bezüglich der Konzentrationen festgestellt wurden.

### 13.6.2 DEGADIS

DEGADIS (**DE**nse **GA**s **DIS**ersion) ist ein Schwergasausbreitungsmodell, das im Auftrag der US Coast Guard an der Universität von Arkansas für die Anwendung bei Ausbreitungsprozessen über flachen, hindernisfreien Oberflächen entwickelt wurde.

Es erfaßt die wichtigsten Phasen der Schwergasausbreitung, nämlich

- Formation der Schwergaswolke nach der Freisetzung
- Gravitationsausbreitung mit Lufteinmischung durch die Eigendynamik der Wolke
- Schwergasausbreitungsphase mit Lufteinmischung durch die atmosphärische Strömung und die damit verbundene Turbulenz
- Übergänge der Ausbreitung als Spurenstoff (kontinuierlicher Übergang zwischen Schwergas und Spurengas).

Die Berechnung des Ausbreitungsverhaltens eignet sich für nahe, mittlere und weite Entfernungsbereiche. DEGADIS kann weiters mit Online gemessenen meteorologischen Daten gekoppelt werden.

Vergleiche mit schweren Unfällen zeigen, daß mit diesem Modell eine realistische Ermittlung des tatsächlich zu erwartenden Konzentrationsverlaufes möglich ist.

### 13.6.3 MET-Modell

Das Modell beschreibt Freisetzungen von Gasen und Gasgemischen. Brand und Aerosolprozesse in Quellnähe werden berücksichtigt. Die Ausbreitung wird mit einem Boxmodell berechnet, wobei schwere, neutrale und leichte Gase behandelt werden. Konzentrationen in Innenräumen werden abgeschätzt. Als Ergebnis wird die Toxizität geliefert. Die Datenbank der Computerversion enthält Angaben über 480 chemische Stoffe. Das Windfeld ist horizontal konstant. Die Turbulenz wird durch 7 Stabilitätsklassen (Ausbreitungsklassen A-G) berücksichtigt. Komplexes Gelände kann wie bei allen anderen Modellen nicht in Rechnung gestellt werden.

Das Modell berechnet die Toxizität (IDLH-Wert, MAK-Wert, LC<sub>50</sub>, LD<sub>50</sub>) als Funktion der freigesetzten Menge für Entfernungen bis zu ca. 20 km.

Das Modell ist vor allem für die Einsatzkräfte und den Katastrophenschutz konzipiert worden und ist für Abschätzungen sehr gut geeignet. Die Tauglichkeit wurde anhand von mehr als 20 Ereignissen in chemischen Anlagen, die in der Praxis vorgekommen und entsprechend dokumentiert sind, überprüft.

---

## 13.6.4 Resümees

Aufgrund der Tatsache, daß

- das MET-Modell seit mehr als 10 Jahren in der Schweiz erfolgreich im Einsatz ist,
- die für die Ausbreitungsrechnungen berücksichtigten Geländeformen den österreichischen Verhältnissen sehr nahe kommen und
- die Ergebnisse in Form von Tabellen für den Anwender sehr praxisgerecht vorliegen,

wird empfohlen, zunächst das MET-Modell zu verwenden und bei Vorliegen der Ergebnisse der europäischen SMEDIS-Studie gegebenenfalls den Umstieg auf andere Modelle zu prüfen und eingehend zu überlegen.

## 13.7 Ausbreitung nach MET-Modell und Auswirkungen

Grundlage für die in den Tabellen 10 - 13 aufgelisteten Wirkdistanzen und Wirkflächen ist der „Technische Behelf für den Schutz bei C-Ereignissen“, MET-Modell für Effekte mit toxischen Gasen, Zentralstelle für Gesamtverteidigung, Bern.

Als Vereinfachung wird bei Ereignissen dieser Art spontane Freisetzung angenommen (Puff-Modell), d.h. daß die Freisetzung nicht in einem zeitlich länger dauernden Prozeß kontinuierlich verläuft.

Als konservative Annahme wurde für die Freisetzung ohne Brand die Ausbreitungsklasse D (kein Nebel, Wind mehr als 5 m/s) und für die Freisetzung mit Brand die Ausbreitungsklasse C (kein Nebel, Wind mehr als 5 m/s, Brand) gewählt. Für beide Tabellen gilt ein Ausbreitungswinkel von 60°.

Für die Anwendung der Tabellen sind lediglich zwei Größen erforderlich, und zwar die freigesetzte Menge (unter Beachtung von Kap. 7.2 und 7.3) und der Toxizitätswert (IDLH-Wert, Kap. 13.2.3). Zwischenwerte können linear interpoliert werden.

Die Wirkdistanzen gelten für Personen im Freien und stellen die Entfernung [m] vom Ursprung des Ereignisses dar, bei denen noch 10% der Bevölkerung mit gesundheitlichen Auswirkungen durch die freigesetzte Substanz rechnen müssen. Sie gelten nicht für Geruchsbelästigungen, die oft weitaus größere Entfernungen erreichen können.

Zur Abschätzung des Schadens für die betroffene Bevölkerung ist eine Wirkfläche erforderlich, die in Tabelle 11 und Tabelle 13 enthalten sind. Vereinfachend wird dabei die Wirkfläche als Kreissektor mit 60° Winkel und Radius = Wirkdistanz dargestellt.

Zur Abschätzung des Schadens wird diese Wirkfläche [km<sup>2</sup>] mit der entsprechenden Siedlungsdichte [Einwohner/km<sup>2</sup>] des betroffenen Gebietes multipliziert, um daraus

---

eine quantitative Angabe der Zahl der betroffenen Personen zu bekommen (Gesundheitsschäden bei 10% der Bevölkerung).

Wirkdistanzen und Wirkflächen sind in Abb. 12 - 15 graphisch dargestellt.

**Beispiel:**

Abschätzung der Folgen einer Freisetzung von 60 kg Chlor (flüssig):

Lt. Kap. 7.2 verdampfen ca. 20%, also 12 kg spontan und schätzungsweise 50% der spontan verdampften Menge, also 6 kg, als Aerosol. Die Restmenge von 42 kg breitet sich am Boden aus und bildet eine Flüssigkeitslache.

Der IDLH-Wert von Chlor beträgt 30 ppm. Die Umrechnung auf  $[\text{mg}/\text{m}^3]$  gemäß Kap. 13.2.4 ergibt für eine Molmasse von 70 g/mol für Chlor den IDLH-Wert  $\approx 85 \text{ mg}/\text{m}^3$ .

Aus Tabelle 10 abgelesen ergibt für eine aufgerundete Menge von 20 kg und einen abgerundeten IDLH-Wert von  $20 \text{ mg}/\text{m}^3$  (pessimistische Annahme) eine Wirkdistanz von 245 m und gemäß Tabelle 11 eine Wirkfläche von  $0,03 \text{ km}^2$ .

Bei einer mittleren Siedlungsdichte von ca. 1300 Einwohner/ $\text{km}^2$  (entspricht etwa Stadtgebiet) ergibt dies  $1300 \cdot 0,03 = 39$  betroffene Personen, d.h. es ist mit 4 Verletzten (10%) zu rechnen.

**Beispiel:**

Abschätzung der Folgen einer Freisetzung von 60 kg Ammoniak (flüssig):

Lt. Kap. 7.2 verdampfen ca. 20%, also 12 kg spontan und schätzungsweise 50% der spontan verdampften Menge, also 6 kg, als Aerosol. Die Restmenge von 42 kg breitet sich am Boden aus und bildet eine Flüssigkeitslache.

Der IDLH-Wert von Ammoniak beträgt 500 ppm. Die Umrechnung auf  $[\text{mg}/\text{m}^3]$  gemäß Kap. 13.2.4 ergibt für eine Molmasse von 17 g/mol für Ammoniak den IDLH-Wert  $\approx 350 \text{ mg}/\text{m}^3$ .

Aus Tabelle 10 abgelesen ergibt für eine aufgerundete Menge von 20 kg und einen IDLH-Wert von  $350 \text{ mg}/\text{m}^3$  eine Wirkdistanz von etwa 100 m und aus Tabelle 11 eine Wirkfläche von ca.  $0,005 \text{ km}^2$ .

Bei einer mittleren Siedlungsdichte von ca. 1300 Einwohner/ $\text{km}^2$  (entspricht etwa Stadtgebiet) ergibt dies  $1300 \cdot 0,005 = 7$  betroffene Personen, d.h. es ist mit einem Verletzten (10%) zu rechnen.

---

---

## 14. LITERATUR

Richtlinie 96/82/EG des Rates vom 9. Dezember 1996 zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen

Smeder, M., Christou, M., Besi, S., Land Use Planning in the Context of Major Accident Hazards - An Analysis of Procedures and Criteria in Selected EU Member States, Report EUR 16452 EN, 1996 (mit weiter führender Literatur)

Schadenausmaß-Einschätzung, Direktion des Innern des Kantons Zürich, Koordinationsstelle für Störfallvorsorge, 8090 Zürich, Juni 1992

Hazard Analysis Course Notes, ICI Engineering Australia, Melbourne, 1987

Methods for the Calculation of Physical Effects (resulting from releases of hazardous materials-liquids and gases), CPR 14E, Committee for the Prevention of Disasters, The Netherlands, Second Edition 1992

„EFFECTS“, Computerprogramm zur Berechnung der physikalischen Effekte bei der Freisetzung von Flüssigkeiten und Gasen (Version 1.4, 1989), TNO Institute of Environmental and Energy Technology, P.O. Box 342, 7300 AH Apeldoorn, The Netherlands

Technischer Behelf für den Schutz bei C-Ereignissen, „MET“ (Modell für Effekte mit toxischen Gasen), Ausgabe 1991, Zentralstelle für Gesamtverteidigung, 3003 Bern

MET-Version 2.0, Computermodell für Effekte mit toxischen Gasen, ISI Technologie GmbH, Schweiz

Pechinger, U. et al., Voruntersuchungen zur Anwendung eines Schwergasmodells bei Industrieunfällen, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien, 1998

Daish, N.C., Britter, R.E., Linden, P.F., Jagger, S.F., Carissimo, B., SMEDIS: Scientific Model Evaluation of Dense Gas Dispersion Models, 5th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 18-21 May 1998, Rhodes, Greece

Lees, F.P., Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 1,2, Reprint 1991, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford

Störfallauswirkungsbetrachtungen im Rahmen der Störfall-VO, Seminarveranstaltung, Haus der Technik, Essen, 1995

Wefers, H., Deuster, B., Die neue Störfallverordnung, WEKA-Verlag, Stand März 1999

Lemke, E., Polthier, K., Abwehr betrieblicher Störfälle, Erich Schmidt-Verlag, Stand März 1999



---

---

**ANHANG (TABELLEN UND ABBILDUNGEN)**

**Tabelle 1: Hitzestrahlung durch Feuerbälle: Wirkdistanzen [m] vom Zentrum des Feuerballes für ausgewählte Wärmestromdichten, Referenzstoff Propan („EFFECTS“-TNO)**

Menge des brennenden Produktes [kg]	100	36	25	15	12,5	8	6,5	4,5	1,5	1	Wärmestromdichte [kW/m²]	Feuerballdurchmesser [m] (Lebensdauer [s])
10	9	14	17	22	24	29	31	37	64	80		14 (1,6)
20	11	18	21	26	29	36	40	48	80	95		17 (1,9)
50	15	24	28	35	38	48	53	64	106	125		23 (2,4)
100	18	30	35	44	48	59	65	78	131	156		29 (2,8)
200	23	37	43	54	59	73	81	97	164	196		36 (3,4)
500	30	49	57	72	78	97	108	130	220	264		49 (4,3)
1000	38	60	71	91	99	122	134	159	264	321		61 (5,1)
2000	48	75	88	112	122	151	166	197	330	402		77 (6,1)
5000	64	99	117	149	162	200	221	263	443	541		103 (7,8)
10000	78	121	144	183	199	246	271	322	537	646		129 (9,3)
20000	98	153	181	230	250	309	340	404	673	810		162 (11)
50000	131	203	240	305	332	410	453	539	905	1090		218 (14)
100000	162	254	300	379	412	509	561	670	1132	1366		273 (17)
200000	201	315	372	468	509	628	694	830	1414	1710		342 (20)
500000	268	421	496	624	678	837	925	1107	1900	2302		461 (26)
<b>Mensch:</b> [kW/m²]	<b>Materialien:</b> [kW/m²]										<b>Einsatzdienste:</b> [kW/m²]	
1	Maximale Sonneneinstrahlung										4,5	Bersten von Glasscheiben nach 10 min
1,5	Längere Exposition möglich										15	Zündung Holz mit Zündquelle
4,5	Nachtteilige Wirkungen nach 20 s										15	Schmelzen von Kunststoffen
6,5	Schmerzschwelle										25	Zündgrenze Holz ohne Zündquelle
12,5	Verbrennungen 1. Grades nach 10 s										36	Spontanzündung Holz
25	Verbrennungen 2. Grades nach 10 s										36	Schaden an Anlagenteilen
36	Verbrennungen 3. Grades nach 10 s										100	Versagen tragender Stahlprofile nach 20 min
												1,5 Längerer Einsatz Feuerwehr möglich
												4,5 Feuerwehrereinsatz ohne gekühlte Anzüge
												8 Kurzzeitiger Einsatz in spezial gekühlten Anzügen
												12,5 Tanks können bei ausreichender Kühlung gehalten werden
												36 Tanks können bei genügend Kühlwasser nur ungenügend gekühlt werden

Tabelle 2: **Hitzeabstrahlung durch Feuerbälle: Wirkflächen [km<sup>2</sup>] für ausgewählte Wärmestromdichten, Referenzstoff Propan (,EFFECS“-TNO)**

Menge des brennenden Produktes [kg]	100	36	25	15	12,5	8	6,5	4,5	1,5	1	Wärmestromdichte [kW/m <sup>2</sup> ] Feuerballdurchmesser [m] (Lebensdauer [s])			
10	0,0003	0,0006	0,0009	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	0,01	0,02	14 (1,6)			
20	0,0004	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,01	0,01	0,02	0,03	17 (1,9)			
50	0,0007	0,002	0,002	0,004	0,005	0,01	0,01	0,01	0,04	0,05	23 (2,4)			
100	0,001	0,003	0,004	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,05	0,08	29 (2,8)			
200	0,002	0,004	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,08	0,12	36 (3,4)			
500	0,003	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,15	0,22	49 (4,3)			
1000	0,005	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06	0,08	0,22	0,32	61 (5,1)			
2000	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,07	0,09	0,12	0,34	0,51	77 (6,1)			
5000	0,01	0,03	0,04	0,07	0,08	0,13	0,15	0,22	0,62	0,92	103 (7,8)			
10000	0,02	0,05	0,07	0,11	0,13	0,20	0,24	0,33	0,95	1,5	129 (9,3)			
20000	0,03	0,07	0,10	0,17	0,20	0,30	0,36	0,51	1,4	2,1	162 (11)			
50000	0,05	0,13	0,18	0,29	0,35	0,53	0,64	0,91	2,6	3,7	218 (14)			
100000	0,08	0,20	0,28	0,45	0,53	0,81	0,99	1,4	4,0	5,9	273 (17)			
200000	0,13	0,31	0,43	0,69	0,81	1,2	1,5	2,2	6,3	9,2	342 (20)			
500000	0,23	0,56	0,77	1,2	1,4	2,2	2,7	3,8	11,0	17,0	461 (26)			
Mensch: [kW/m <sup>2</sup> ]	Materialien: [kW/m <sup>2</sup> ]										Einsatzdienste: [kW/m <sup>2</sup> ]			
1	Maximale Sonneneinstrahlung										4,5	Bersten von Glasscheiben nach 10 min	1,5	Längerer Einsatz Feuerwehr möglich
1,5	Längere Exposition möglich										15	Zündung Holz mit Zündquelle	4,5	Feuerwehreinsatz ohne gekühlte Anzüge
4,5	Nachteilige Wirkungen nach 20 s										15	Schmelzen von Kunststoffen	8	Kurzzeitiger Einsatz in spezial gekühlten Anzügen
6,5	Schmerzschwelle										25	Zündgrenze Holz ohne Zündquelle	12,5	Tanks können bei ausreichender Kühlung gehalten werden
12,5	Verbrennungen 1. Grades nach 10 s										36	Spontanzündung Holz	36	Tanks können bei genügend Kühlwasser gehalten werden
25	Verbrennungen 2. Grades nach 10 s										36	Schaden an Anlagenteilen	36	Tanks können bei genügend Kühlwasser nur ungenügend gekühlt werden
36	Verbrennungen 3. Grades nach 10 s										100	Versagen tragender Stahlprofile nach 20 min		

**Tabelle 3: Hitzestrahlung durch Lachenbrand (Flächenbrand): Wirkdistanzen [m] vom Rand der Lache für ausgewählte Wärmestromdichten, Referenzstoff Isobutylen („EFFECTS“-TNO)**

Menge des brennenden Produktes [kg]	100	36	25	15	12,5	8	6,5	4,5	1,5	1	Wärmestromdichte [kW/m <sup>2</sup> ] Lachendurchmesser [m] Lachentiefe = 3 cm
10		0,1	0,3	0,8	1,1	1,9	2,4	3,3	7,1	9,1	0,9
20		0,1	0,4	1,1	1,5	2,5	3,1	4,2	9,1	11	1,2
50		0,2	0,7	1,9	2,4	3,9	4,7	6,4	14	17	2,0
100		0,3	1,0	2,5	3,1	5,2	6,4	8,7	18	23	2,8
200		0,4	1,4	3,4	4,3	6,9	8,5	12	24	30	3,9
500		0,6	2,1	4,9	6,3	10	13	17	35	43	6,2
1000		0,9	3,0	6,9	8,6	14	17	23	47	58	8,8
2000		1,2	3,9	9,4	12	19	23	30	62	78	12
5000		1,8	5,5	14	18	28	33	44	88	112	20
10000		2,4	7,4	18	23	37	44	59	120	150	28
20000		2,9	10	23	30	49	59	80	157	153	39
50000		3,9	14	36	45	72	87	115	226	279	62
100000		5,8	17	49	63	98	116	151	295	374	88
200000		6,1	23	66	84	129	152	197	413	516	124
500000		7,8	32	97	124	190	222	286	602	765	197

Mensch: [kW/m <sup>2</sup> ]	Materialien: [kW/m <sup>2</sup> ]	Einsatzdienste: [kW/m <sup>2</sup> ]
1	Maximale Sonneneinstrahlung	1,5
1,5	Längere Exposition möglich	4,5
4,5	Nachteilige Wirkungen nach 20 s	8
6,5	Schmerzschwelle	12,5
12,5	Verbrennungen 1. Grades nach 10 s	36
25	Verbrennungen 2. Grades nach 10 s	36
36	Verbrennungen 3. Grades nach 10 s	36
		100
		100
		20 min
		20 min

**Tabelle 4: Hitzeabstrahlung durch Lachenbrand (Flächenbrand): Wirkflächen [km<sup>2</sup>] für ausgewählte Wärmestromdichten, Referenzstoff Isobutylen („EFFECTS“-TNO)**

Menge des brennenden Produktes [kg]	100	36	25	15	12,5	8	6,5	4,5	1,5	1	Wärmestromdichte [kW/m <sup>2</sup> ]
											Lachendurchmesser [m] Lachentiefe = 3 cm
10	0,000001	0,000002	0,000005	0,00001	0,00001	0,00002	0,00002	0,00004	0,0002	0,0002	0,9
20	0,000002	0,000003	0,000009	0,000009	0,00002	0,00003	0,00004	0,00007	0,0002	0,0003	1,2
50	0,000004	0,000008	0,000008	0,00002	0,00003	0,00006	0,00008	0,0002	0,0005	0,0007	2,0
100	0,000008	0,00002	0,00004	0,00004	0,00006	0,0001	0,0001	0,0003	0,0008	0,001	2,8
200	0,00002	0,00003	0,00003	0,00008	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,002	0,002	3,9
500	0,00004	0,00008	0,00008	0,0002	0,0002	0,0004	0,0006	0,001	0,003	0,005	6,2
1000	0,00009	0,0002	0,0002	0,0003	0,0005	0,0009	0,001	0,002	0,01	0,01	8,8
2000	0,0002	0,0003	0,0003	0,0006	0,0009	0,002	0,002	0,003	0,01	0,02	12
5000	0,0004	0,0007	0,0007	0,002	0,002	0,004	0,005	0,01	0,02	0,03	20
10000	0,0007	0,001	0,001	0,003	0,004	0,01	0,01	0,01	0,04	0,05	28
20000	0,001	0,003	0,003	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,07	0,11	39
50000	0,003	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,05	0,15	0,22	62
100000	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,05	0,06	0,09	0,28	0,41	88
200000	0,01	0,02	0,02	0,04	0,05	0,09	0,11	0,16	0,47	0,71	124
500000	0,03	0,04	0,04	0,10	0,12	0,19	0,24	0,35	1,0	1,5	197

Mensch:	Materialien:	Einsatzdienste:
[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]	[kW/m <sup>2</sup> ]
1 Maximale Sonneneinstrahlung	4,5 Bersten von Glasscheiben nach 10 min	1,5 Längerer Einsatz Feuerwehr möglich
1,5 Längere Exposition möglich	15 Zündung Holz mit Zündquelle	4,5 Feuerwehrinsatz ohne gekühlte Anzüge
4,5 Nachteile Wirkung nach 20 s	15 Schmelzen von Kunststoffen	8 Kurzzeitiger Einsatz in speziell gekühlten Anzügen
6,5 Schmerzschwelle	25 Zündgrenze Holz ohne Zündquelle	12,5 Tanks können bei ausreichender Kühlung gehalten werden
12,5 Verbrennungen 1. Grades nach 10 s	36 Spontanzündung Holz	Tanks können bei genügend Kühlwasser gehalten werden
25 Verbrennungen 2. Grades nach 10 s	36 Schaden an Anlagenteilen	Tanks können bei genügend Kühlwasser gehalten werden
36 Verbrennungen 3. Grades nach 10 s	100 Versagen tragender Stahlprofile nach 20 min	36 nur ungenügend gekühlt werden

**Tabelle 5: Druckwellen von Gaswolkenexplosionen im Freien: Maximale Wirkdistanzen [m] vom Zentrum der Gaswolke für ausgewählte Überdrücke, Referenzstoff Propan („EFFECTS“-TNO)**

Menge des explodierenden Produktes [kg]	1	0,48	0,41	0,34	0,3	0,21	0,14	0,10	0,07	0,03	Überdruck [bar] 1kPa=0,01 bar	
10					9	13	19	26	37	85		
20					11	15	23	32	46	108		
50					15	21	32	44	63	146		
100					18	26	39	55	79	183		
200					23	33	50	69	99	231		
500					31	44	67	94	134	314		
1000					40	56	85	119	169	395		
2000					50	71	106	149	214	498		
5000					68	100	136	203	293	676		
10000					85	122	183	255	365	852		
20000					107	152	230	322	460	1073		
50000					146	208	310	437	625	1456		
100000					183	262	393	550	786	1835		
200000					231	329	494	694	991	2312		
500000					314	419	629	941	1369	3137		
Mensch:	0,03 bar	Verletzungen durch Glassplitter möglich				Bauten und Anlagenteile						
	0,07 bar	0% Tote und Verletzte im Freien				0,01 bar						
	0,21 bar	10% Tote und Verletzte im Freien				0,03 bar						
	0,30 bar	Betroffene durch Einsturz von Bauten				0,07 bar						
	0,34 bar	25% Tote und Verletzte im Freien				0,10 bar						
	0,48 bar	70% Tote und Verletzte im Freien				0,14 bar						
	1,00 bar	95% Tote und Verletzte im Freien				0,21 bar						
						0,30 bar						
						0,34 bar						
						0,41 bar						
						80% Zerstörungsgrad						
						Verstärkte Wände brechen zusammen						
						Schwere Gebäudeschäden						
						Leichte Strukturen fallen zusammen, Druckbehälter intakt						
						5% Zerstörungsgrad						
						Bersten von Glasscheiben, Glassplitter						
						80% Zerstörungsgrad						



**Tabelle 7: Ursachen und schädigende Auswirkungen (qualitativ) von Chemikalien auf Lebewesen in Gewässern**

Ursache	Auswirkung
pH-Verschiebung durch Säuren und Laugen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Freisetzung von CO<sub>2</sub> aus Karbonaten und Bikarbonaten im sauren Bereich</li> <li>• Verringerung oder Stillstand des Algenwachstums</li> <li>• Sauerstoffmangel</li> <li>• Allgemeiner Zusammenbruch des Zellstoffwechsels, Fermente reagieren nicht</li> </ul>
Direkte Giftwirkung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH = 4,8 - Tödliche Grenze für Fische im sauren Bereich</li> <li>• pH = 9,2 - Toleranzgrenze im alkalischen Bereich</li> </ul> <p>Störung des Zellstoffwechsels von tierischem und pflanzlichem Plankton, Bakterien und Fischen führt zum Tod. Bei Fischen können auch Nerven- und Schleimhautschädigungen auftreten.</p>
Anreicherung der Schadstoffe in den Organismen	<p>Aufnahme von Schadstoffen in den Zellen bzw. Speicherung im Gewebe führen zu einer (verzögerten) Giftwirkung. Fische als Bestandteil der Nahrungskette des Menschen können beim Verzehr gefährlich werden oder werden durch Geschmacksveränderungen ungenießbar.</p>
Schädigung der Organismen	<p>Schäden ohne direkte Todesfolge bei Fischen und Fischnährtieren führen zu einer erhöhten Anfälligkeit der Organismen für Krankheiten anderen Ursprungs (sekundäre Todesfolge).</p>
Düngewirkung	<p>Starke Förderung des Wachstums von Algen durch Stickstoff- und Phosphorverbindungen. Beim Absterben der Algenmasse wird viel Sauerstoff verbraucht, Erstickungsgefahr für Wasserlebewesen. Durch schwimmende, fäulende Algenmasse keine Sauerstoffdiffusion aus der Luft ins Wasser möglich.</p>
Schadstoffeintrag in Grundwasser	<p>Störung der Trinkwasserversorgung durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigungen</li> <li>• Direkte Gifteinwirkung auf den Menschen</li> <li>• Giftwirkung auf bestimmte Bevölkerungsgruppen (Säuglinge, Kranke)</li> <li>• Auftreten unerwünschter Eigenschaften (Färbung, Korrosion, Härte)</li> <li>• Überschreitung der Grenzwerte</li> </ul>
Schadstoffeintrag in den Boden	<p>Schädigung von Bodenorganismen führen zur Beeinträchtigung des biologischen Reinigungsvermögens des Bodens. Änderung der Filtrationsleistung durch Veränderung des physikalisch-chemischen Zustandes der Bodenkolloide.</p>

**Tabelle 8: Wassergefährdung durch verschiedene Stoffgruppen und mögliche Gegenmaßnahmen**

Stoffgruppe	Typische Vertreter	Verhalten im Wasser	Schädigende Wirkung	Maßnahmen nach einer Freisetzung in Wasser F - Fließgewässer G - Grundwasser
Mineralöle	Benzine Heizöle Motorenöle Isolieröle Hydrauliköle	Schwimmen auf der Oberfläche  Vermischung unbedeutend	Direkte Giftwirkung	F Ölsperren, Preßluftsperrern, Abschöpfen, Abpumpen, spezielle Ölbinden  G Abpumpen, Strippen
Säuren und Laugen	Salzsäure, Salpetersäure, Schwefelsäure, Phosphorsäure, Natronlauge, Kalilauge, Javellewasser, Ammoniak	Vollständige Vermischung Wärmetönung	pH-Verschiebung (Zelltod) Verätzung	F Verdünnen, Neutralisieren  G Keine Eingriffsmöglichkeit
CKW	Trichlorethan, Trichlorethen, Methylenchlorid, Tetrachlorethen	Geringe Vermischung, relevant hinsichtlich Giftwirkung. Sinkt ab.	Direkte Giftwirkung, mutagen/karzinogen, schlechte Abbaubarkeit, giftige Abbauprodukte	F Keine Eingriffsmöglichkeit  G Abpumpen, Aktivkohle, Strippen
Organische Lösungsmittel	Aceton, Ethanol, Methanol, Methylethylketon, Isopropylalkohol	Vollständige Vermischung, z. T. Wärmetönung	Geringe Giftwirkung	F Keine Eingriffsmöglichkeit  G Keine Eingriffsmöglichkeit
Aromaten	Benzol, Styrol, Xylenol, Ethylbenzol, Toluol, Xylol	Schwimmen auf der Oberfläche, geringe Vermischung	Direkte Giftwirkung	F Ölsperren G Abpumpen, Strippen
Pflanzenschutzmittel, Schädlings- bekämpfungsmittel	Atrazin, Aldicarb, Endosulfan, Lindan, Propazin, Disulfoton, Thiometon, Etrimpfos	Schwache Vermischung, relevant hinsichtlich Giftwirkung	Schwer abbaubar, toxisch hohe Akkumulation, giftige Abbauprodukte	F Keine Eingriffsmöglichkeit  G Abpumpen
Schwermetalle	Arsen, Blei, Cadmium, Nickel, Quecksilber, Selen, Chrom	Wasserlöslich (Salze)	Nicht abbaubar, toxisch hohe Akkumulation	
Cyanide	Kaliumcyanid, Natriumcyanid	Wasserlöslich, direkte Giftwirkung auf Lebewesen	Direkte Giftwirkung	F Keine Eingriffsmöglichkeit G Natronlauge, Eisensulfat

**Tabelle 9: Quantitative Angaben zum kontaminierten Wasservolumen [m<sup>3</sup>] als Funktion der freigesetzten Produktmenge [kg], der Wassergefährdungsklasse und der Toxizität für Wasserlebewesen (LC<sub>50</sub> - Werte).  
Volumen, in dem 50% der Wasserlebewesen nach 30 Minuten sterben.**

Menge des freigesetzten Produktes [kg]	3			2				1				0	← LC <sub>50</sub> [mg/l] 30 min ← WGK
10	0,8	1,6	4	8	14	32	64	64	320	640	6400		
20	1,6	3,2	8	16	28	64	132	640	640	1280	12800		
50	4	8	20	40	70	160	320	1600	1600	3200	32000		
100	8	16	40	80	140	320	640	3200	3200	6400	64000		
200	16	32	80	160	280	640	1280	6400	6400	12800	128000		
500	40	80	200	400	700	1600	3200	16000	16000	32000	320000		
1000	80	160	400	800	1400	3200	6400	32000	32000	64000	640000		
2000	160	320	800	1600	2800	6400	12800	64000	64000	128000	1280000		
5000	400	800	2000	4000	7000	16000	32000	160000	160000	320000	3200000		
10000	800	1600	4000	8000	14000	32000	64000	320000	320000	640000	6400000		
20000	1600	3200	8000	16000	28000	64000	128000	640000	640000	1280000	12800000		
50000	4000	8000	20000	40000	70000	160000	320000	1600000	1600000	3200000	32000000		
100000	8000	16000	40000	80000	140000	320000	640000	3200000	3200000	6400000	64000000		
200000	16000	32000	80000	160000	280000	640000	1280000	6400000	6400000	12800000	128000000		
500000	40000	80000	200000	400000	700000	1600000	3200000	10600000	21200000	212000000	2120000000		

**Annahmen:**

- **Homogene Verteilung des freigesetzten Stoffes im Wasser**
- **Konzentration des freigesetzten, im Wasser gelösten Stoffes entspricht dem jeweiligen LC<sub>50</sub> - Wert**

**Tabelle 10: Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien: Wirkdistanzen [m] vom Ort der Freisetzung, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse D, Ausbreitungswinkel 60°)**

Menge des freigesetzten Produktes [kg]	8000	4500	2000	1000	500	200	100	20	10	1	IDLH [mg/m <sup>3</sup> ]
10	20	20	30	40	60	85	110	190	240	550	
20	20	30	40	60	80	110	140	245	310	700	
50	30	35	55	80	110	160	200	340	430	1000	
100	40	45	70	100	140	195	250	435	550	1250	
200	50	55	90	130	180	260	330	560	700	1550	
500	70	80	130	190	260	370	460	760	950	2100	
1000	90	100	170	250	345	480	600	970	1200	2650	
2000	110	140	230	320	430	600	750	1245	1550	3350	
5000	160	200	330	460	615	850	1050	1700	2100	4550	
10000	220	265	430	600	800	1100	1350	2150	2650	5750	
20000	290	380	590	800	1040	1390	1700	2710	3350	7250	
50000	420	505	800	1100	1440	1930	2350	3660	4500	9850	
100000	560	650	1015	1400	1835	2460	2970	4570	5600	12330	
200000	730	815	1280	1770	2320	3100	3730	5670	6920	15370	
500000	1020	1080	1690	2370	3130	4170	4990	7440	9050	20360	

**Tabelle 11: Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien: Wirkflächen [km<sup>2</sup>], bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse D, Ausbreitungswinkel 60°)**

Menge des freigesetzten Produktes [kg]	8000	4500	2000	1000	500	200	100	20	10	1	IDLH [mg/m <sup>3</sup> ]
<b>10</b>	0,0002	0,0002	0,0004	0,0008	0,002	0,004	0,006	0,02	0,03	0,16	
<b>20</b>	0,0002	0,0005	0,0008	0,002	0,003	0,006	0,01	0,03	0,05	0,26	
<b>50</b>	0,0005	0,0006	0,002	0,003	0,006	0,01	0,02	0,06	0,10	0,52	
<b>100</b>	0,0008	0,001	0,004	0,01	0,01	0,02	0,03	0,10	0,16	0,82	
<b>200</b>	0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,04	0,06	0,16	0,26	1,3	
<b>500</b>	0,003	0,003	0,01	0,02	0,04	0,07	0,11	0,30	0,47	2,3	
<b>1000</b>	0,004	0,005	0,02	0,03	0,06	0,12	0,19	0,49	0,75	3,7	
<b>2000</b>	0,006	0,01	0,03	0,05	0,10	0,19	0,29	0,81	1,30	5,9	
<b>5000</b>	0,01	0,02	0,06	0,11	0,20	0,38	0,58	1,5	2,3	11,0	
<b>10000</b>	0,03	0,04	0,10	0,19	0,34	0,63	0,95	2,4	3,7	17,0	
<b>20000</b>	0,04	0,08	0,18	0,34	0,57	1,0	1,5	3,8	5,9	28,0	
<b>50000</b>	0,09	0,13	0,34	0,63	1,1	2,0	2,9	7,0	11,0	51,0	
<b>100000</b>	0,16	0,22	0,54	1,0	1,8	3,2	4,6	11,0	16,0	80,0	
<b>200000</b>	0,28	0,35	0,86	1,6	2,8	5,0	7,3	17,0	25,0	124,0	
<b>500000</b>	0,54	0,61	1,5	2,9	5,1	9,1	13,0	29,0	43,0	217,0	

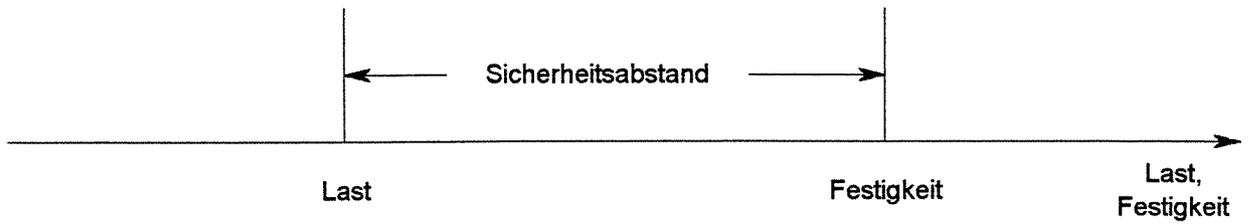
**Tabelle 12: Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien mit Brand: Wirkdistanzen [m] vom Ort der Freisetzung, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist; (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse C, Ausbreitungswinkel 60°)**

Menge des freigesetzten Produktes [kg]	8000	4500	2000	1000	500	200	100	20	10	1	IDLH [mg/m <sup>3</sup> ]
10	20	20	23	30	40	55	70	119	150	340	
20	20	20	30	40	52	72	90	151	190	430	
50	20	20	40	50	67	95	120	205	260	600	
100	20	20	50	60	87	126	160	264	330	750	
200	30	32	60	80	111	158	200	334	420	950	
500	40	55	87	120	159	221	280	476	600	1300	
1000	50	62	105	150	203	286	360	599	750	1650	
2000	70	90	144	200	265	368	460	761	950	2050	
5000	100	120	197	280	377	523	650	1050	1300	2800	
10000	130	136	240	360	497	692	850	1311	1600	3500	
20000	180	212	337	470	624	853	1050	1665	2050	4400	
50000	260	311	478	650	847	1143	1400	2223	2750	6000	
100000	350	420	620	819	1043	1392	1703	2746	3421	7556	
200000	470	550	790	1017	1270	1677	2050	3360	4220	9486	
500000	665	761	1060	1326	1617	2112	2577	4327	5494	12692	

**Tabelle 13: Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien mit Brand: Wirkflächen [km<sup>2</sup>], bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist;  
(Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse C, Ausbreitungswinkel 60°)**

Menge des freigesetzten Produktes [kg]	8000	4500	2000	1000	500	200	100	20	10	1	IDLH [mg/m <sup>3</sup> ]
<b>10</b>	0,0002	0,0002	0,0002	0,0005	0,0008	0,002	0,003	0,007	0,01	0,06	
<b>20</b>	0,0002	0,0002	0,0004	0,0008	0,001	0,003	0,004	0,01	0,02	0,10	
<b>50</b>	0,0002	0,0002	0,0007	0,001	0,002	0,005	0,008	0,02	0,04	0,19	
<b>100</b>	0,0002	0,0002	0,001	0,002	0,004	0,008	0,01	0,04	0,06	0,29	
<b>200</b>	0,0005	0,0005	0,002	0,003	0,006	0,01	0,02	0,06	0,09	0,47	
<b>500</b>	0,0008	0,002	0,004	0,008	0,01	0,03	0,04	0,12	0,19	0,88	
<b>1000</b>	0,001	0,002	0,006	0,01	0,02	0,04	0,07	0,19	0,29	1,4	
<b>2000</b>	0,003	0,004	0,01	0,02	0,04	0,07	0,11	0,30	0,47	2,2	
<b>5000</b>	0,005	0,008	0,02	0,04	0,07	0,14	0,22	0,58	0,88	4,1	
<b>10000</b>	0,009	0,01	0,03	0,07	0,13	0,25	0,38	0,90	1,3	6,4	
<b>20000</b>	0,02	0,02	0,06	0,12	0,20	0,38	0,58	1,5	2,2	10,0	
<b>50000</b>	0,04	0,05	0,12	0,22	0,38	0,68	1,0	2,6	4,0	19,0	
<b>100000</b>	0,06	0,09	0,20	0,35	0,57	1,0	1,5	3,9	6,1	30,0	
<b>200000</b>	0,12	0,16	0,33	0,54	0,84	1,5	2,2	5,9	9,3	47,0	
<b>500000</b>	0,23	0,30	0,59	0,92	1,4	2,3	3,5	9,8	16,0	84,0	

### Deterministischer Ansatz



$$\text{Sicherheit} = \text{Festigkeit} / \text{Last}$$

### Probabilistischer Ansatz

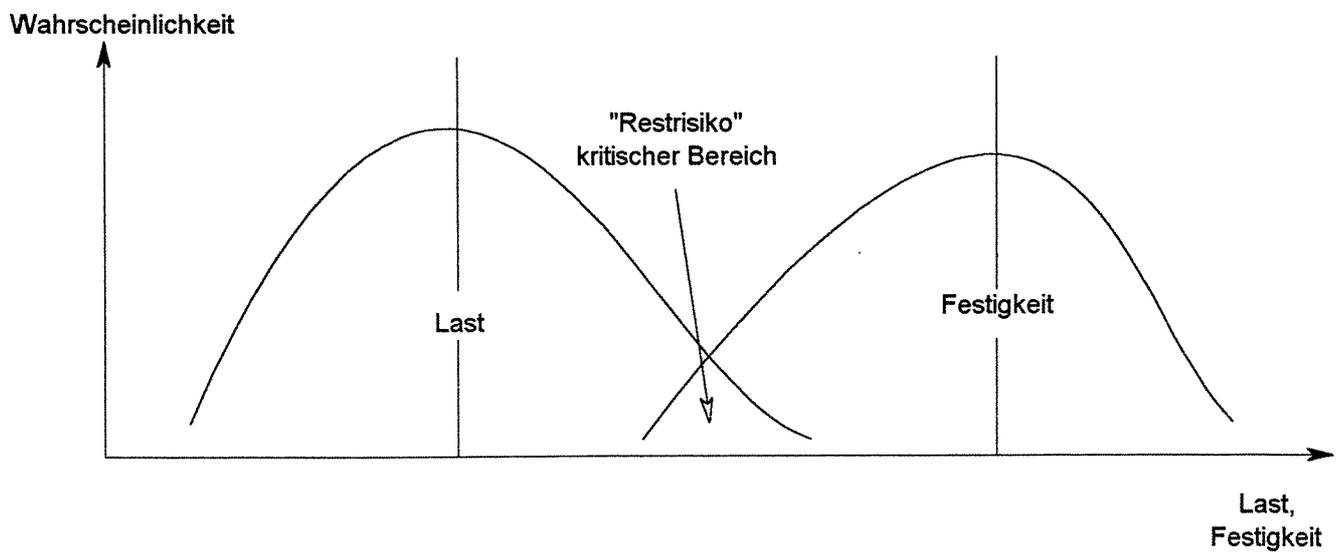


Abb. 1: Vergleich des deterministischen mit dem probabilistischen Ansatz

Abb. 2: Durchmesser des Feuerballes in Abhängigkeit von der Menge des brennenden Produktes, Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

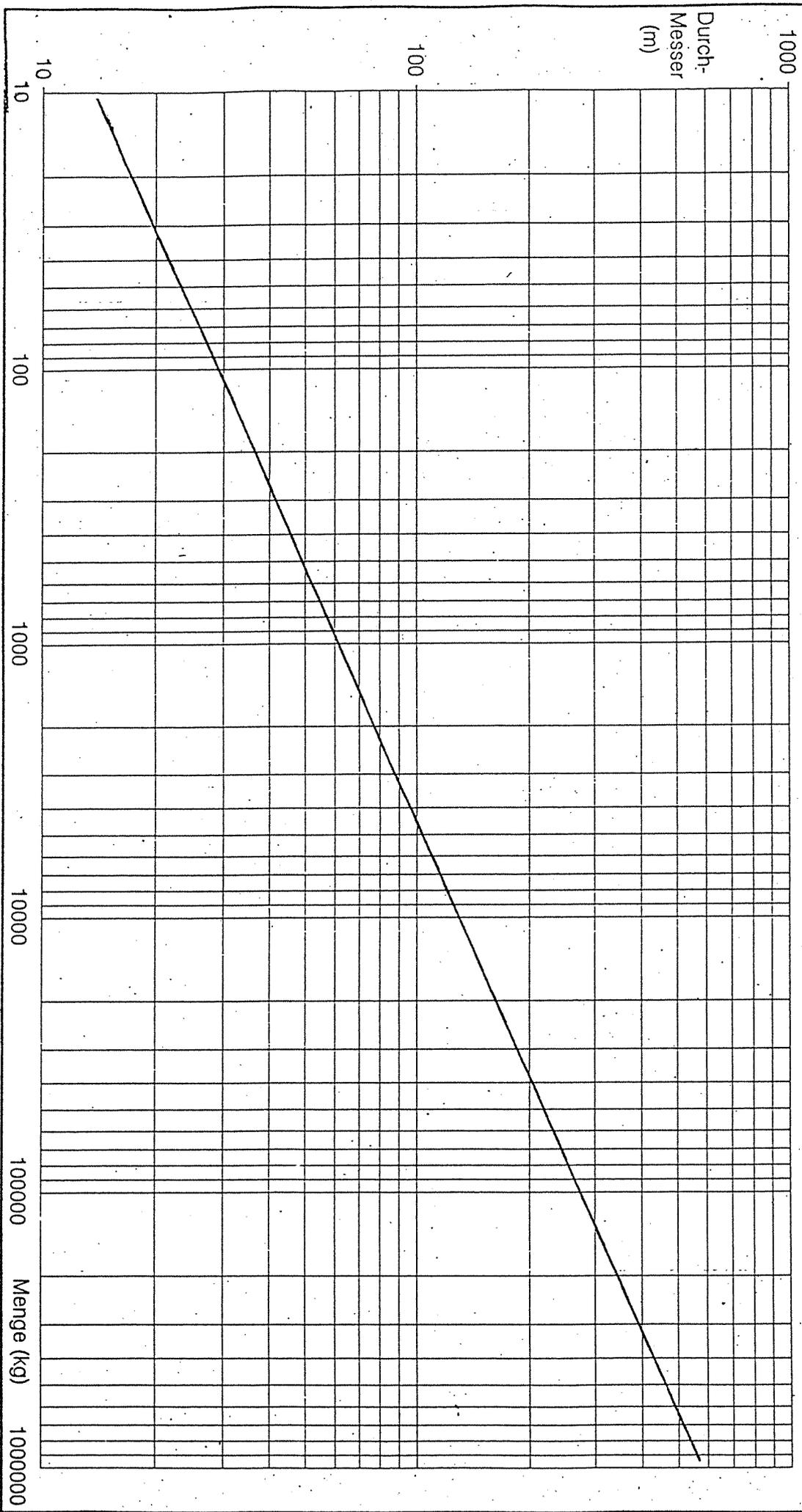


Abb. 3: Lebensdauer des Feuerballes in Abhängigkeit von der Menge des brennenden Produktes.

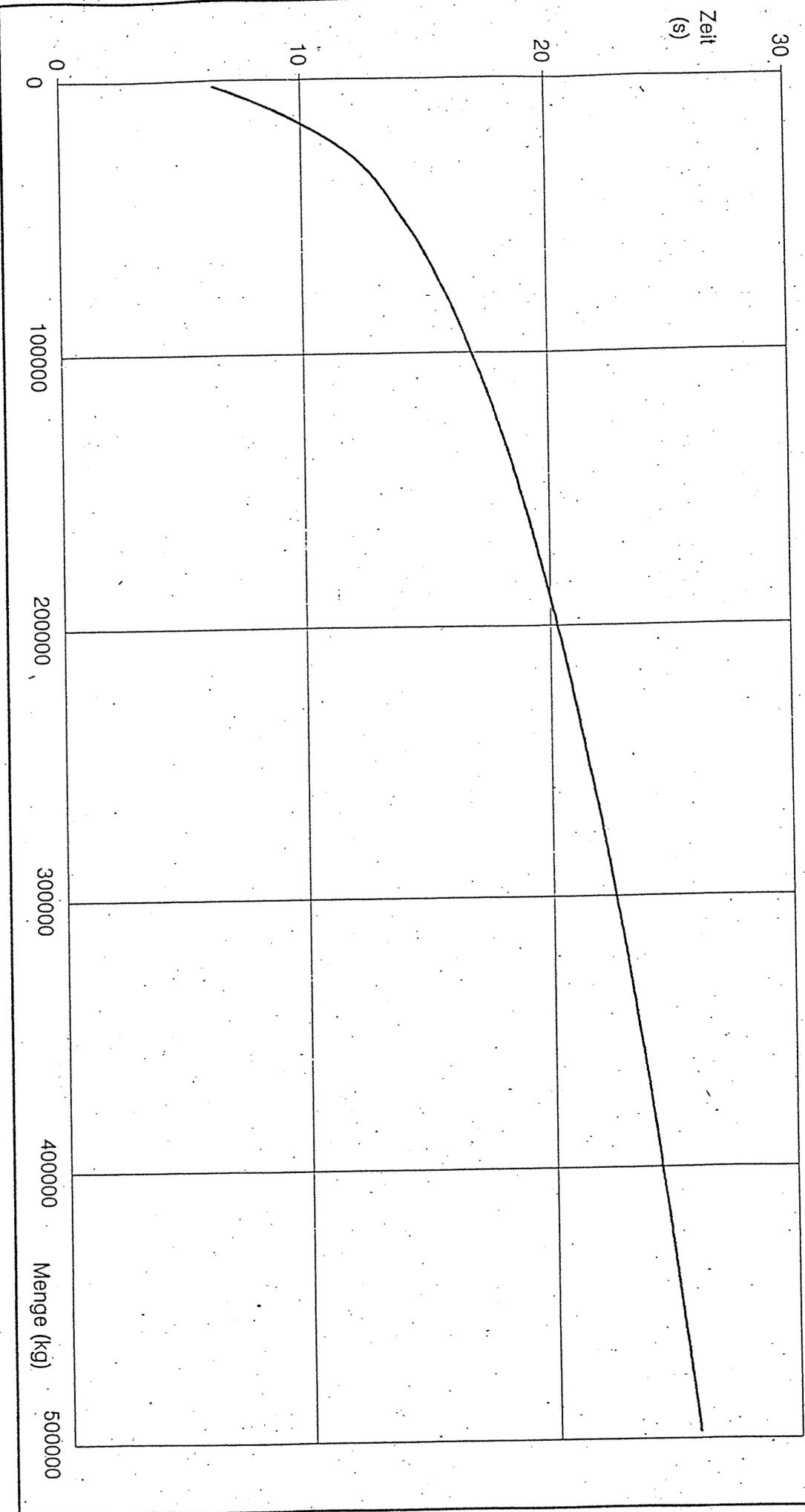


Abb. 4: Hitzestrahlung durch Feuerbälle: Wirkdistanzen vom Zentrum des Feuerballes in Abhängigkeit von der Menge des brennenden Produktes, Entfernungen für verschiedene Wärmestromdichten [kW/m<sup>2</sup>], Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

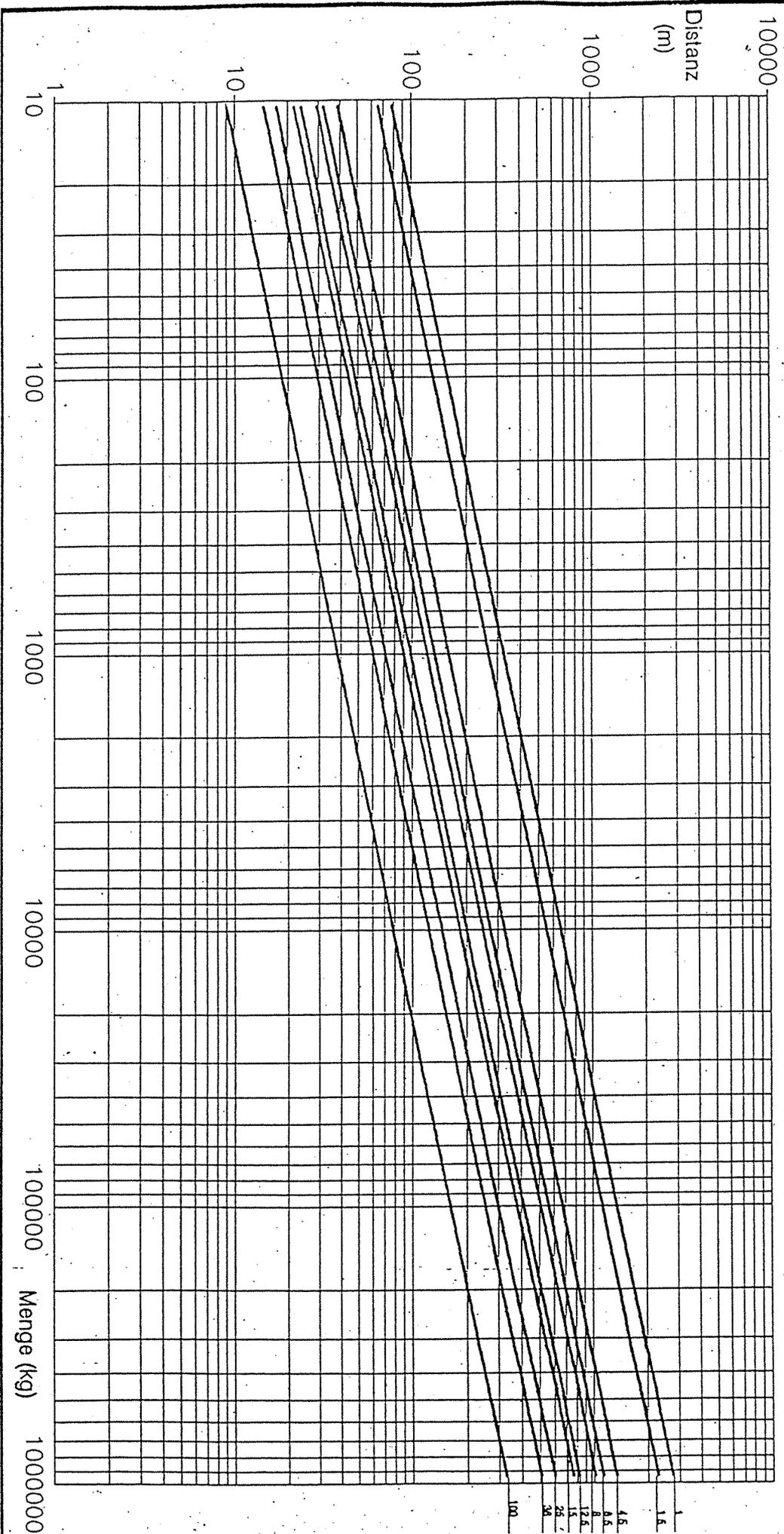


Abb. 5: Heizstrahlung durch Feuerbälle: Wirkflächen in Abhängigkeit von der Menge des brennenden Produktes, Flächen für verschiedene Wärmeströmdichten [kW/m<sup>2</sup>], Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

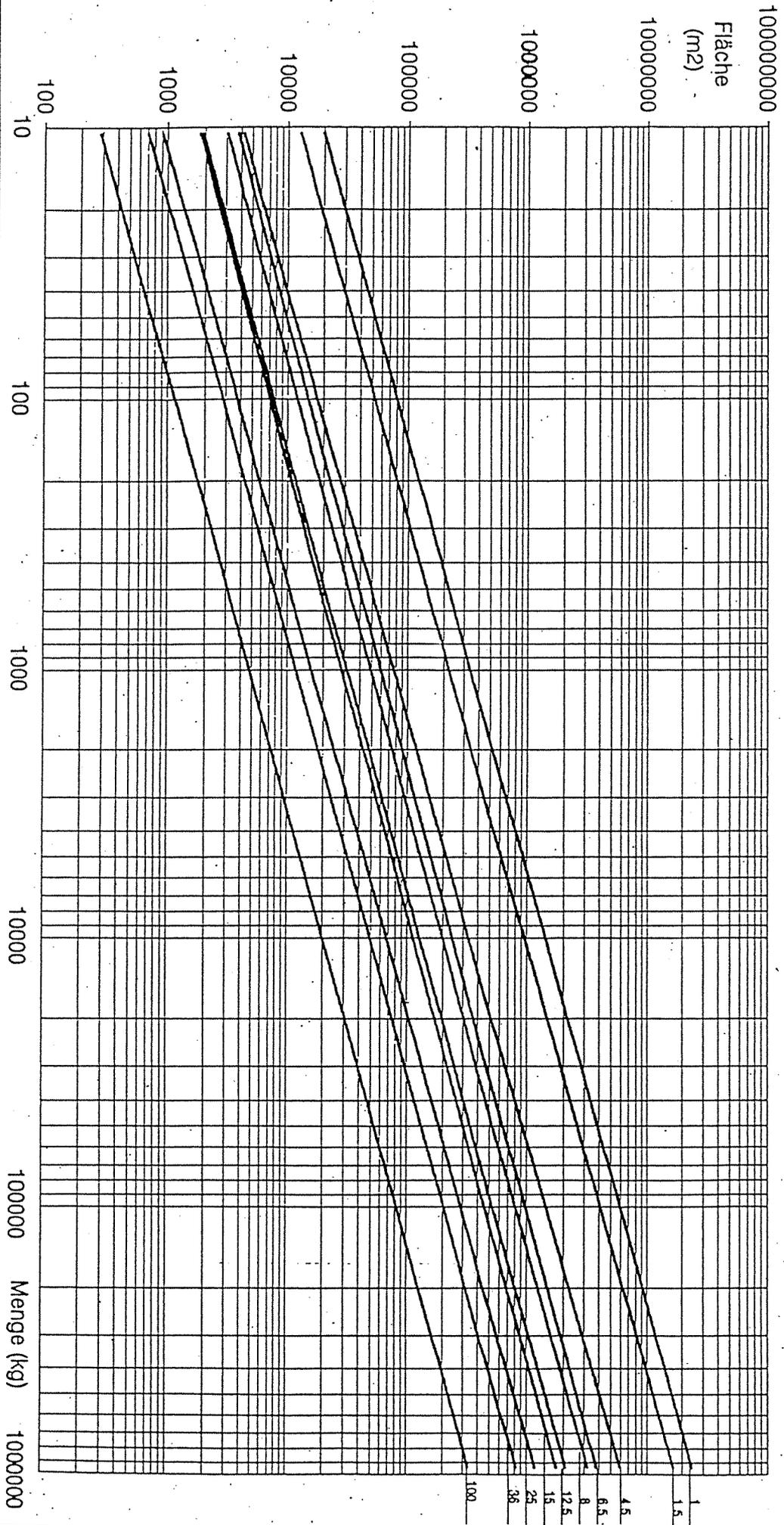




Abb. 6: Darstellung der Beziehung zwischen Probit und Prozent

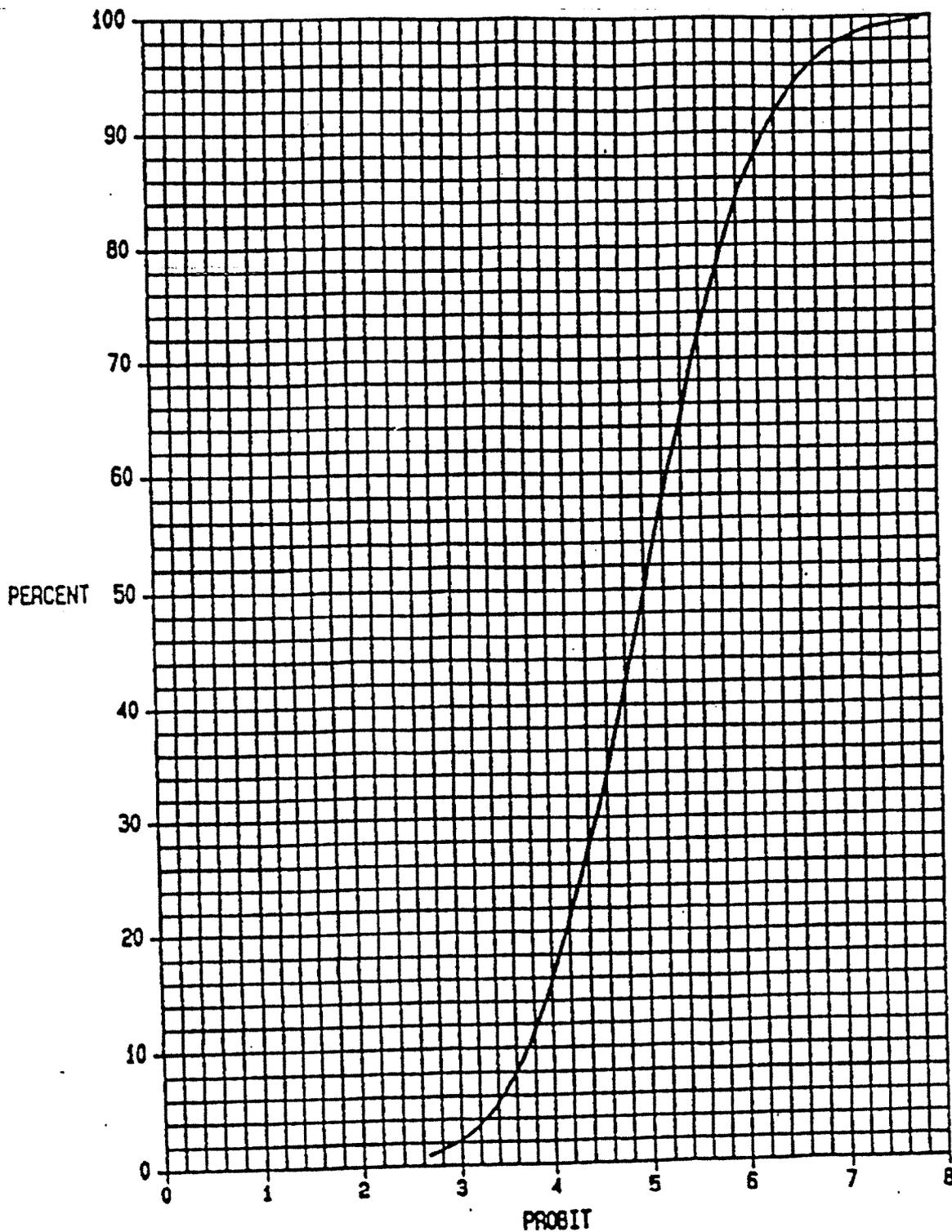


Abb. 7: Hitzestrahlung durch Lachenbrand (Flächenbrand): Wirkdistanzen vom Rand der Lache für ausgewählte Wärmestromdichten [kW/m<sup>2</sup>], Referenzstoff Isobutylene (EFFECTS-TNO), Lachentiefe 3 cm. Punktierte Linie = Durchmesser der Lache [m].

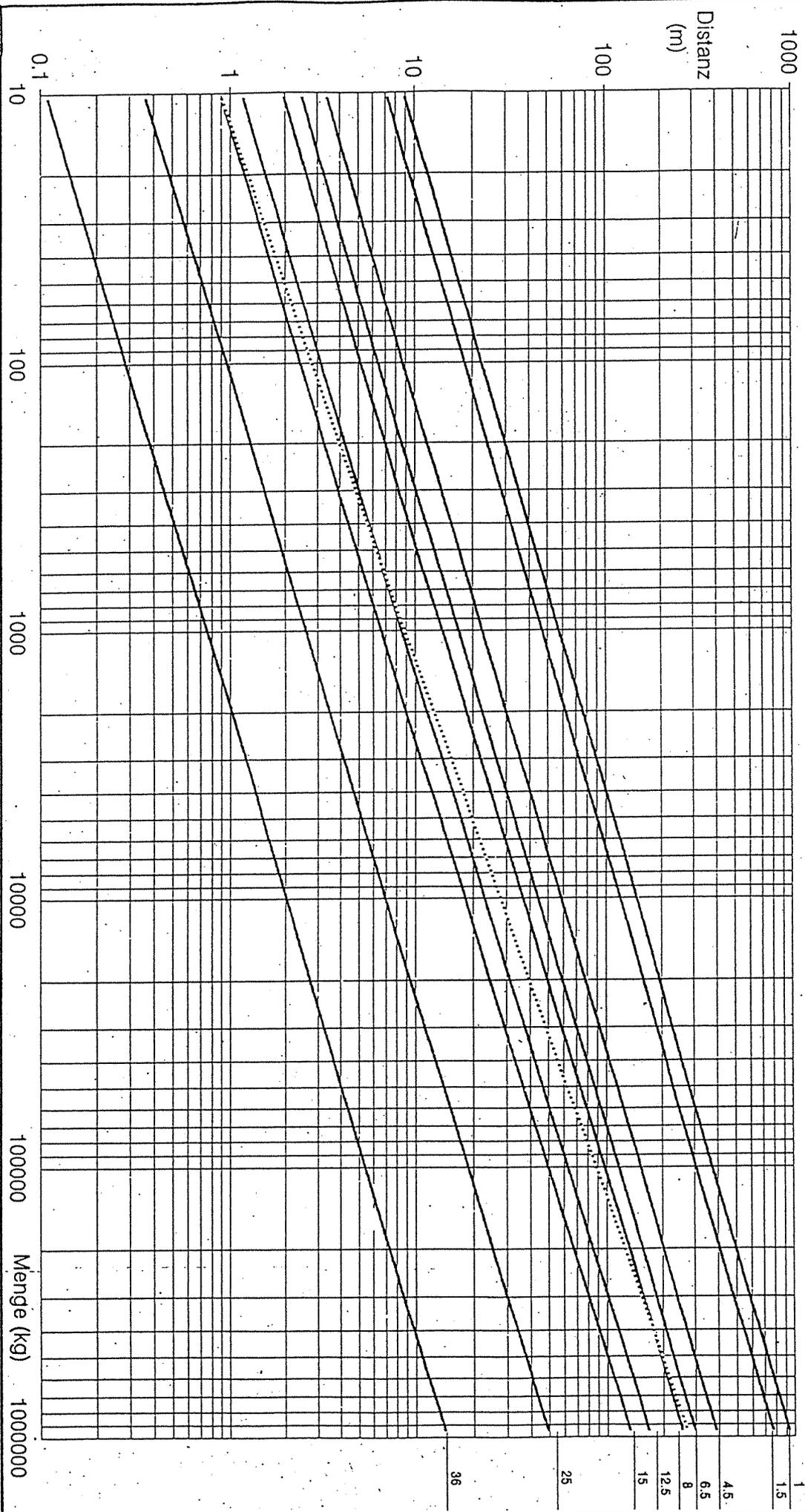


Abb. 8: Hitzestrahlung durch Lachenbrand (Flächenbrand): Wirkflächen für ausgewählte Wärmestromdichten [kW/m<sup>2</sup>], Referenzstoff Isobutylene (EFFECTS-TNO), Lachentiefe 3 cm.

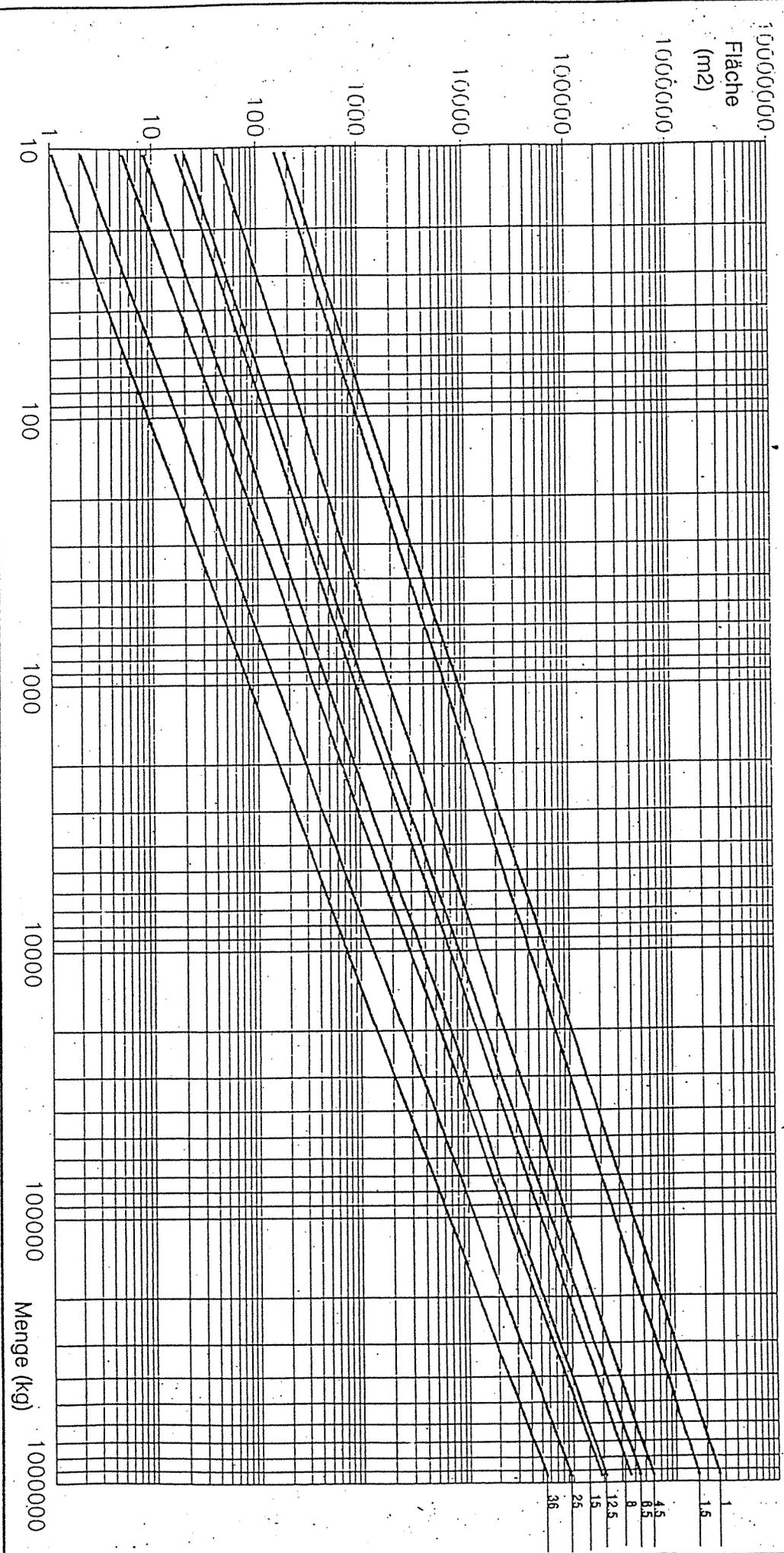


Abb. 9: Druckwellen von Gaswolkenexplosionen im Freien: Maximale Wirkdistanzen vom Zentrum der Gaswolke für ausgewählte Überdrücke [bar], Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

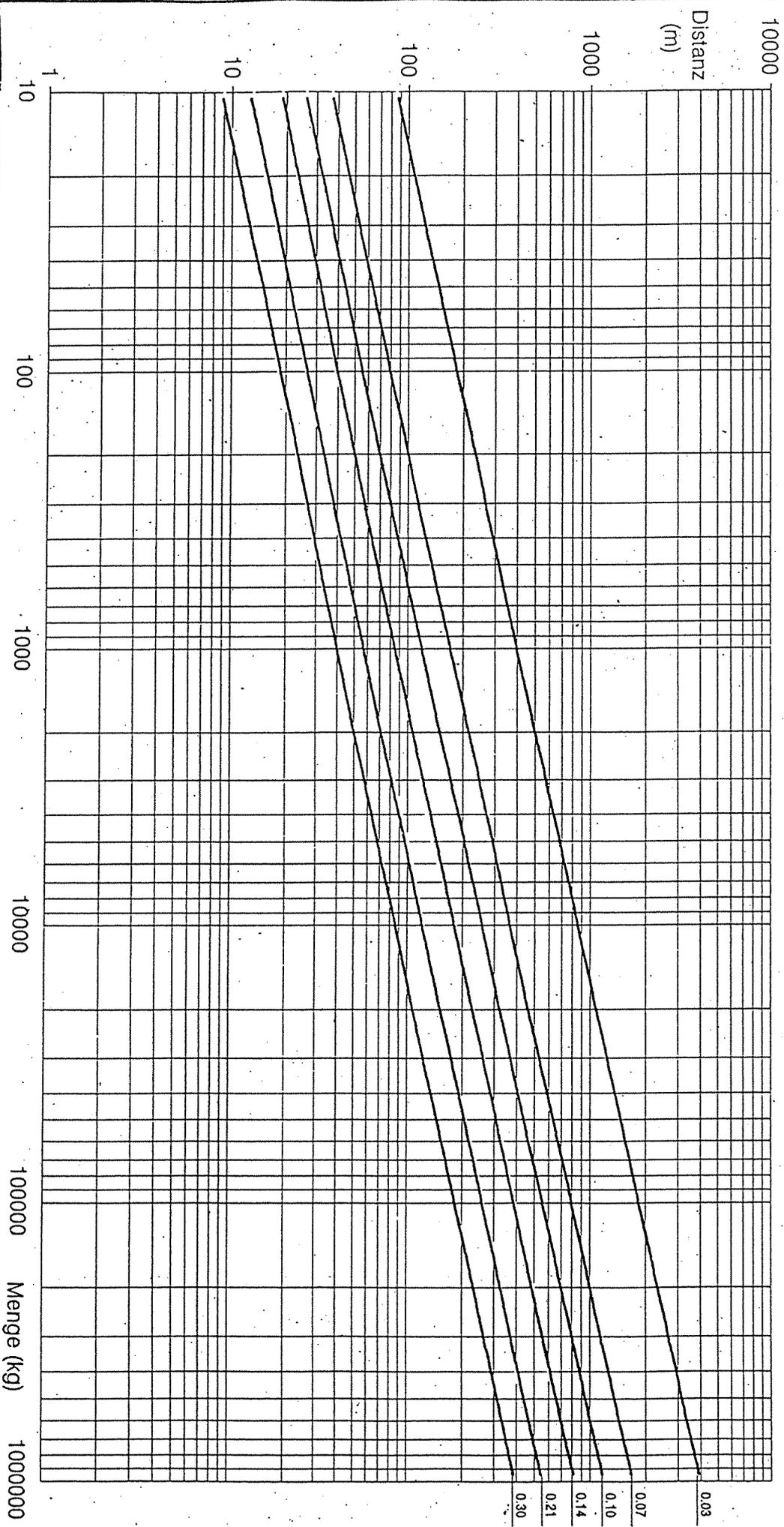


Abb. 10: Druckwellen von Gaswolkenexplosionen im Freien: Maximale Wirkflächen für ausgewählte Überdrücke [bar], Referenzstoff Propan (EFFECTS-TNO).

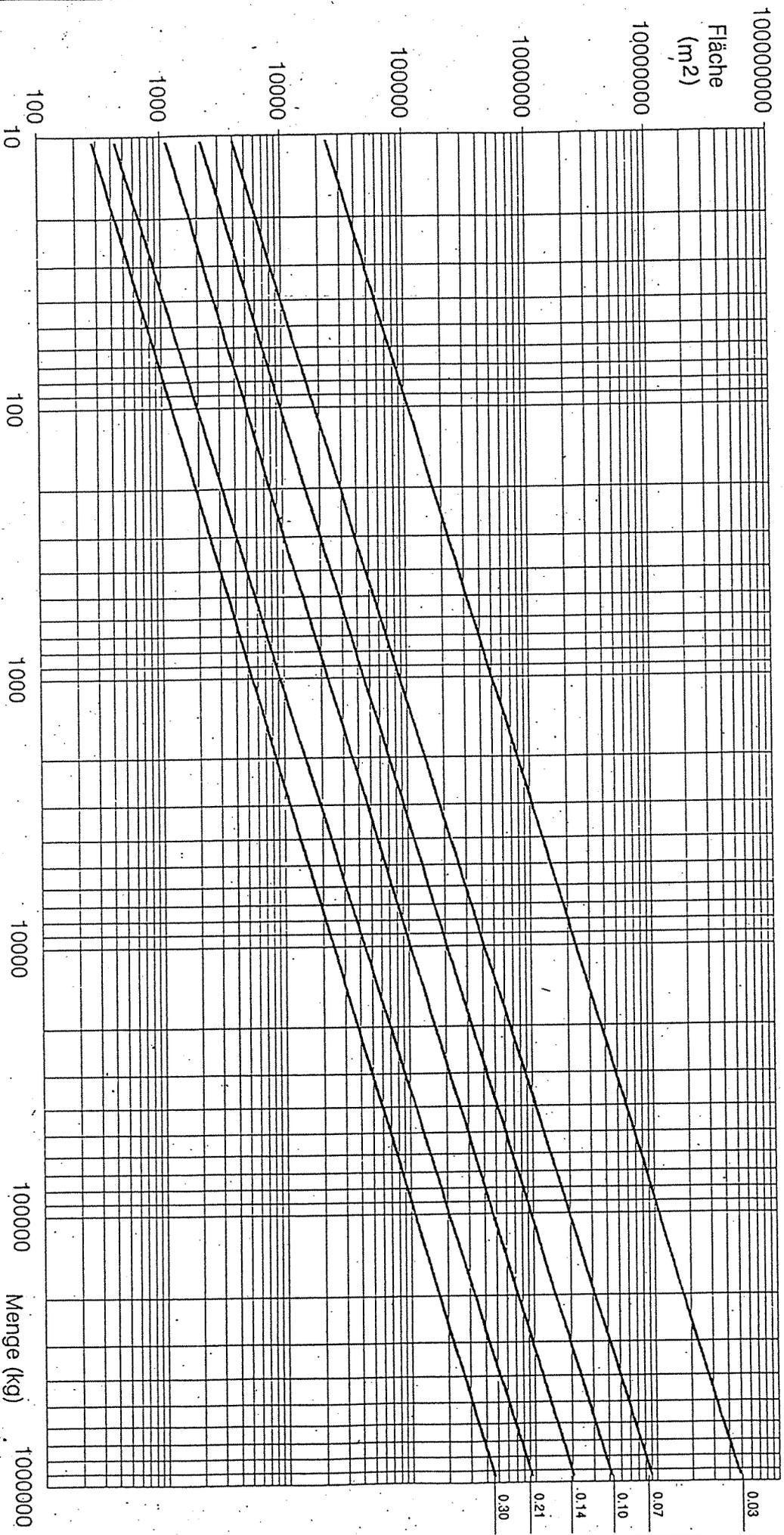


Abb. 11: Überdruck einer Gaswolkenexplosion im Freien in Abhängigkeit vom skalierten Abstand vom Zentrum der Gaswolke

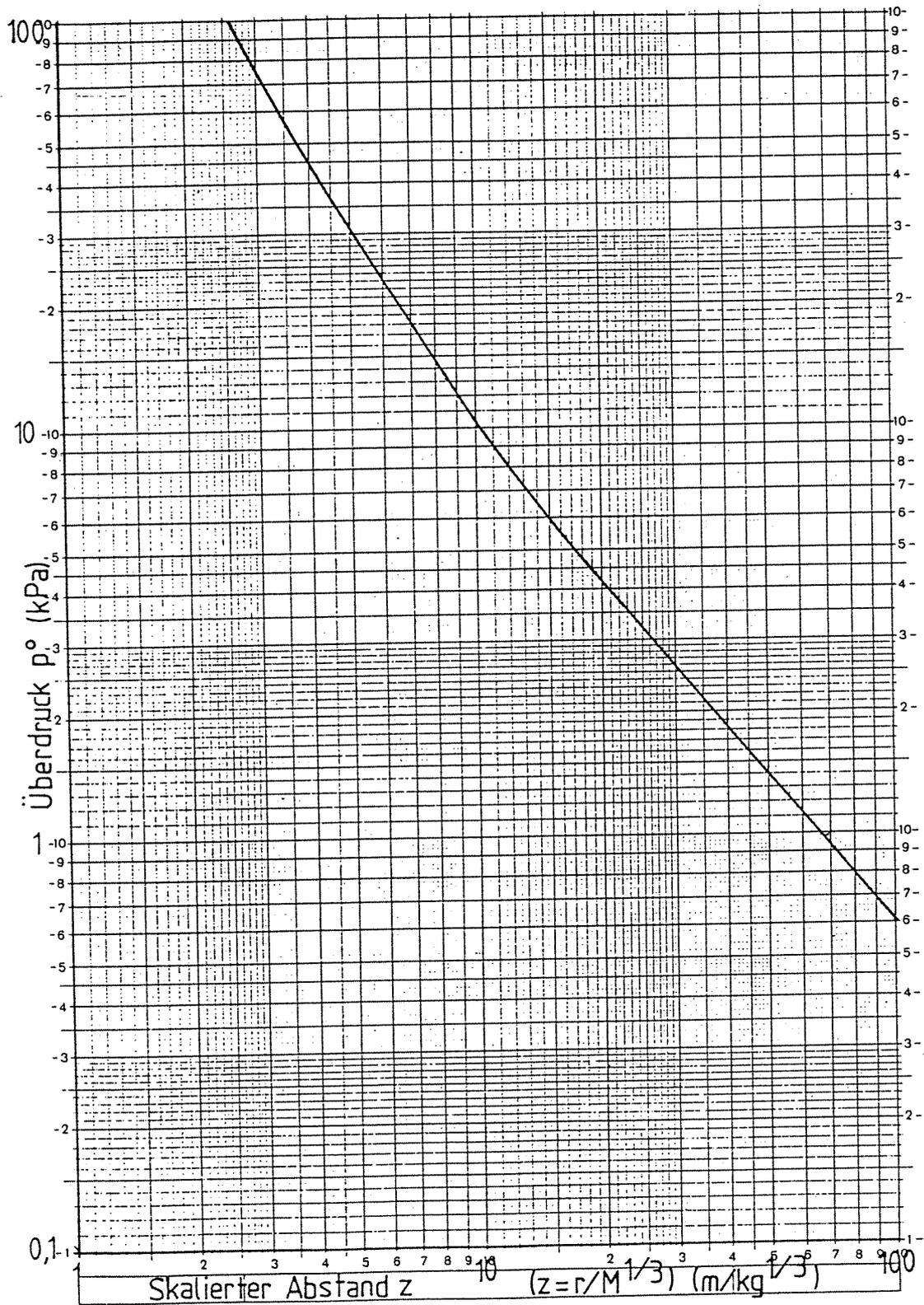




Abb. 13: Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien. Wirkflächen in Abhängigkeit von der freigesetzten Menge, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist, für verschiedene IDLH-Werte (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse D, Ausbreitungswinkel 60°).

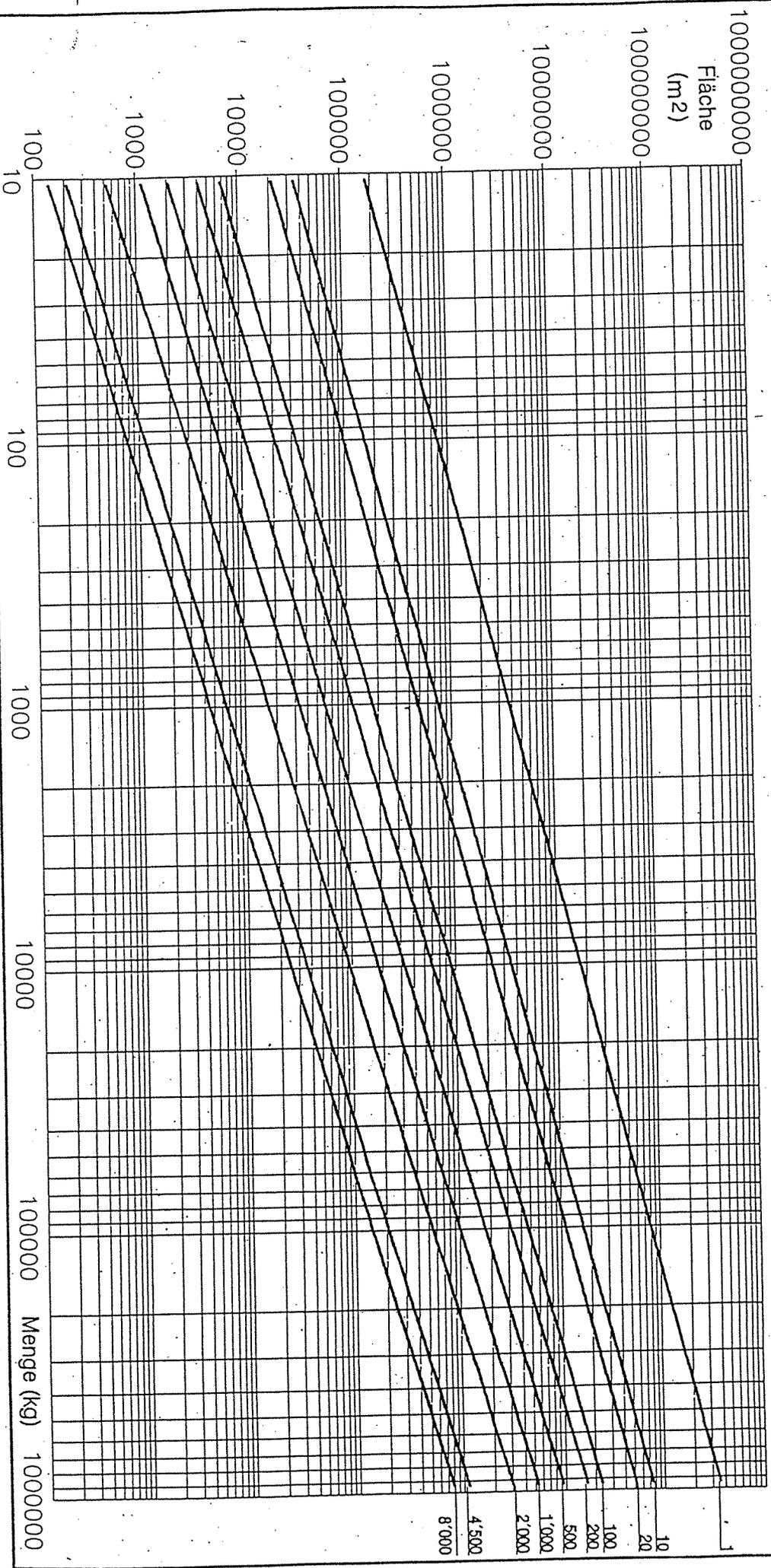


Abb. 14: Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien mit Brand: Wirkdistanzen in Abhängigkeit von der freigesetzten Menge, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist, für verschiedene IDLH-Werte [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ] (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse C, Ausbreitungswinkel  $60^\circ$ ).

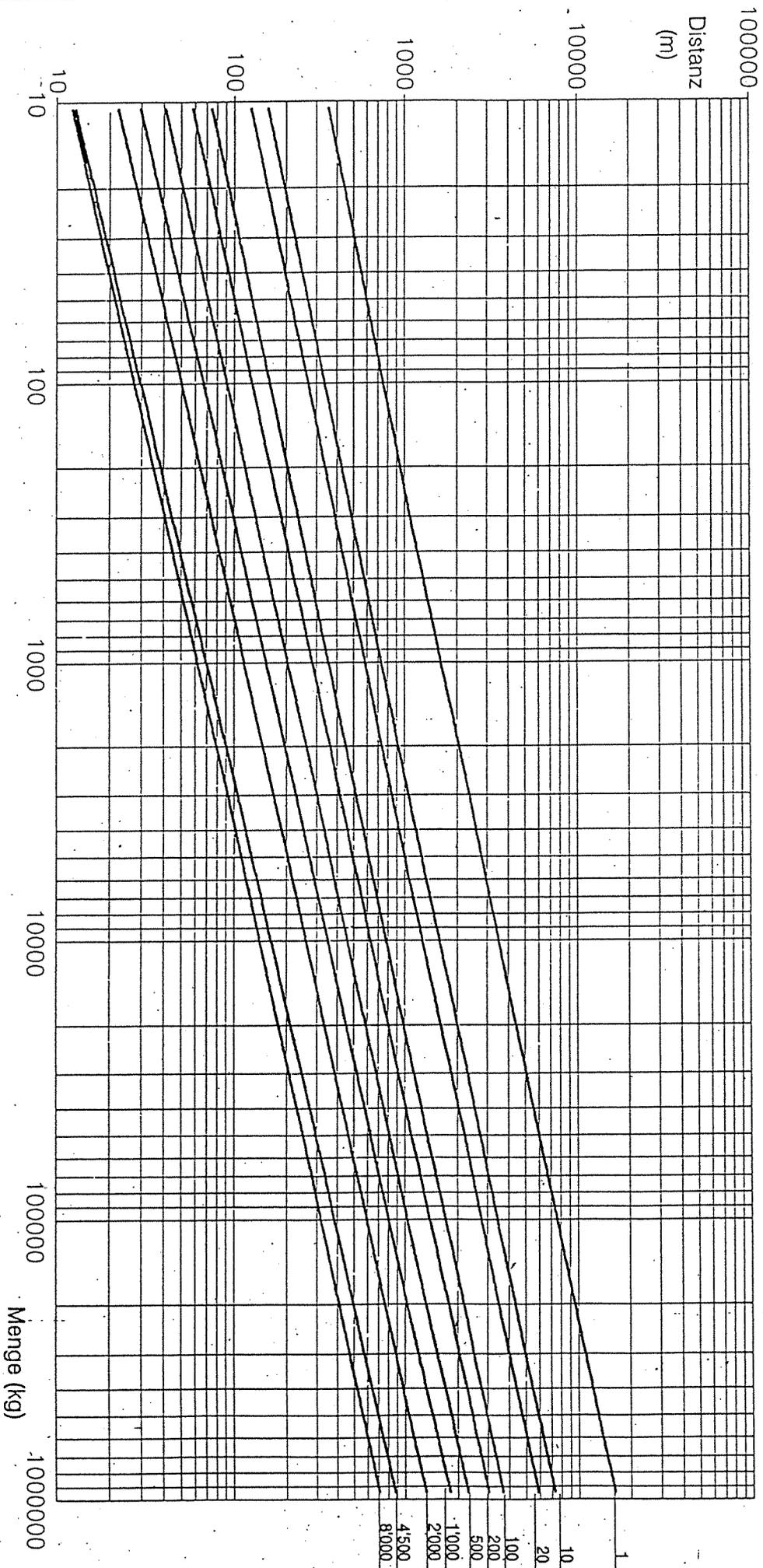


Abb. 15: Ausbreitung von toxischen schweren Gasen im Freien mit Brand: Wirkflächen in Abhängigkeit von der freigesetzten Menge, bei denen 10% der Bevölkerung Gesundheitsschäden aufweist, für verschiedene IDLH-Werte [mg/m<sup>3</sup>] (Grundlage MET-Modell, Ausbreitungsklasse C, Ausbreitungswinkel 60°).

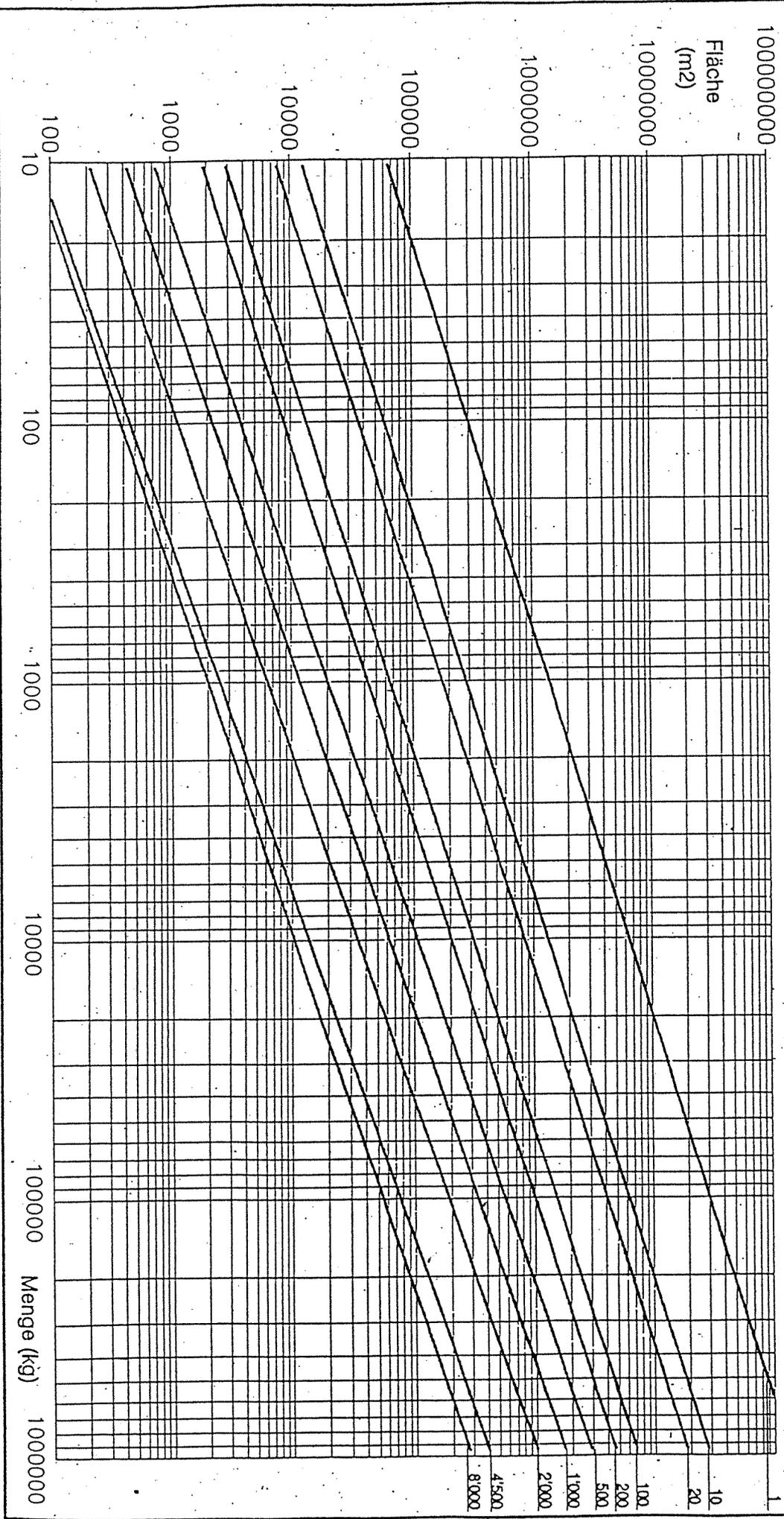


Table 1: Heat radiation from fire balls; impact distances [m] from the centre of the fire ball for specified heat flux densities and the reference substance propane ("EFFECTS"-TNO).

Quantity of the burning substance [kg]								Heat flux density [kW/m <sup>2</sup> ] Fire ball diameter [m] (Fire ball life [s])
10								
20								
50								
100								
200								
500								
1000								
2000								
5000								
10,000								
20,000								
50,000								
100,000								
200,000								
500,000								
<b>People:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Maximum sun radiation Longer exposure possible Detrimental effects after 20 s Threshold of pain First degree burns after 10 s Second degree burns after 10 s Third degree burns after 10 s	<b>Materials:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Broken glass panes after 10 min Source of ignition ignites wood Melting of plastics Without-source-ignition limit for wood Spontaneous ignition of wood Damage to installation equipment Failure of load-bearing steel sections after 20 minutes	<b>Task forces:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Longer fire fighting actions possible Fire brigades without cooled clothing Short term fire fighting actions with specially cooled clothing Saving of tanks through sufficient cooling Despite adequate cooling water adequate tank cooling not possible			

Table 2: Heat radiation from fire balls; impact areas [km<sup>2</sup>] for specified heat flux densities and the reference substance propane ("EFFECTS"-TNO).

Quantity of the burning substance [kg]									Heat flux density [kW/m <sup>2</sup> ] Fire ball diameter [m] (Fire ball life [s])
10									
20									
50									
100									
200									
500									
1000									
2000									
5000									
10,000									
20,000									
50,000									
100,000									
200,000									
500,000									
<b>People:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Maximum sun radiation Longer exposure possible Detrimental effects after 20 s Threshold of pain First degree burns after 10 s Second degree burns after 10 s Third degree burns after 10 s	<b>Materials:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Broken glass panes after 10 min Source of ignition ignites wood Melting of plastics Without-source-ignition limit for wood Spontaneous ignition of wood Damage to installation equipment Failure of load-bearing steel sections after 20 minutes	<b>Task forces:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Longer fire fighting actions possible Fire brigades without cooled clothing Short term fire fighting actions with specially cooled clothing Saving of tanks through sufficient cooling Despite adequate cooling water adequate tank cooling not possible				

Table 3: Heat radiation from puddle fire (surface fire); impact distances [m] from the edge of the puddle for specified heat flux densities and the reference substance propane ("EFFECTS"-TNO).

Quantity of the burning substance [kg]									Heat flux density [kW/m <sup>2</sup> ] Puddle diameter [m] Puddle depth = 3 cm
10									
20									
50									
100									
200									
500									
1000									
2000									
5000									
10,000									
20,000									
50,000									
100,000									
200,000									
500,000									
<b>People:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Maximum sun radiation Longer exposure possible Detrimental effects after 20 s Threshold of pain First degree burns after 10 s Second degree burns after 10 s Third degree burns after 10 s	<b>Materials:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Broken glass panes after 10 min Source of ignition ignites wood Melting of plastics Without-source-ignition limit for wood Spontaneous ignition of wood Damage to installation equipment Failure of load-bearing steel sections after 20 minutes	<b>Task forces:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Longer fire fighting actions possible Fire brigades without cooled clothing Short term fire fighting actions with specially cooled clothing Saving of tanks through sufficient cooling Despite adequate cooling water adequate tank cooling not possible				

Table 4: Heat radiation from puddle fire (surface fire); impact areas [km<sup>2</sup>] for specified heat flux densities and the reference substance propane ("EFFECTS"-TNO).

Quantity of the burning substance [kg]									Heat flux density [kW/m <sup>2</sup> ] Puddle diameter [m] Puddle depth = 3 cm
10									
20									
50									
100									
200									
500									
1000									
2000									
5000									
10,000									
20,000									
50,000									
100,000									
200,000									
500,000									
<b>People:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Maximum sun radiation Longer exposure possible Detrimental effects after 20 s Threshold of pain First degree burns after 10 s Second degree burns after 10 s Third degree burns after 10 s	<b>Materials:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Broken glass panes after 10 min Source of ignition ignites wood Melting of plastics Without-source-ignition limit for wood Spontaneous ignition of wood Damage to installation equipment Failure of load-bearing steel sections after 20 minutes	<b>Task forces:</b> [kW/m <sup>2</sup> ]	Longer fire fighting actions possible Fire brigades without cooled clothing Short term fire fighting actions with specially cooled clothing Saving of tanks through sufficient cooling Despite adequate cooling water adequate tank cooling not possible				

Table 5: Pressure waves from gas cloud explosions in the open air: maximum impact distances [m] from the centre of the gas cloud, for specified excess pressures and the reference substance propane ("EFFECTS"-TNO).

Quantity of the burning substance [kg]										Excess pressure in [bar] 1 kPa = 0.01 bar
10										
20										
50										
100										
200										
500										
1000										
2000										
5000										
10,000										
20,000										
50,000										
100,000										
200,000										
500,000										

People:	Buildings and plant equipment:
0.03 bar injuries possible from broken glass	0.01 bar broken windows
0.07 bar 0% casualties and injured people in open air	0.03 bar breaking of window panes,
0.21 bar 10% casualties and injured people in open air	0.07 bar 5%-destruction
0.30 bar people hurt by collapse of buildings	0.10 bar light structures collapse, pressurised containers stay intact
0.34 bar 25% casualties and injured people in open air	0.14 bar walls collapse
0.48 bar 70% casualties and injured people in open air	0.21 bar 40%-destruction
1.00 bar 95% casualties and injured people in open air	0.30 bar Severely damaged buildings
	0.34 bar Reinforced walls break
	0.41 bar 80%-damage

Table 6: Pressure waves from gas cloud explosions in the open air; maximum impact areas [km<sup>2</sup>] for specified excess pressures and the reference substance propane ("EFFECTS"-TNO).

Quantity of the burning substance [kg]																		Excess pressure in [bar] 1 kPa = 0.01 bar
10																		
20																		
50																		
100																		
200																		
500																		
1000																		
2000																		
5000																		
10,000																		
20,000																		
50,000																		
100,000																		
200,000																		
500,000																		
<b>People:</b>																		
0.03 bar	injuries possible from broken glass																	
0.07 bar	0% casualties and injured people in open air																	
0.21 bar	10% casualties and injured people in open air																	
0.30 bar	people hurt by collapse of buildings																	
0.34 bar	25% casualties and injured people in open air																	
0.48 bar	70% casualties and injured people in open air																	
1.00 bar	95% casualties and injured people in open air																	
<b>Buildings and plant equipment:</b>																		
0.01 bar	broken windows																	
0.03 bar	breaking of window panes,																	
0.07 bar	5%-destruction																	
0.10 bar	light structures collapse, pressurised containers stay intact																	
0.14 bar	walls collapse																	
0.21 bar	40%-destruction																	
0.30 bar	Severely damaged buildings																	
0.34 bar	Reinforced walls break																	
0.41 bar	80%-damage																	

Table 7: Chemical damage to aquatic life; reasons and effects.

Reason	Effect
Change of pH-value by acids and alkaline solutions	<p>Release of CO<sub>2</sub> from carbonates and bicarbonates in the acid range</p> <p>Reduced or stopped growth of algae</p> <p>Oxygen deficiency</p> <p>General breakdown of cell metabolism, inactivity of ferments</p> <p>pH value of 4.8 = lethal acid limit value for fish life</p> <p>pH value of 9.2 = lethal alkaline limit value for fish life</p>
Direct toxication	Disturbed cell metabolism of animal and vegetable plankton, bacteria and fish is lethal. Fish may also suffer from nerve and mucosal damage.
Accumulation of pollutants in organism	Accumulation of pollutants in cells or tissue leads to (retarded) toxication. Fish in the food-chain, when eaten, can become dangerous to the people, or inedible due to bad taste.
Damage to organisms	Damage without immediate lethal effect to fish and animals eaten by fish leads to increased susceptibility of organisms to diseases with other causes (secondary lethality).
Fertilisation	Enhanced growth of algae due to nitrogen and phosphor compounds. Dying algae require increased volumes of oxygen, danger of suffocation for aquatic life. Floating dying algae block oxygen diffusion from air to water.
Entrance of pollutants into groundwater	<p>Drinking water supply affected by:</p> <p>Bad smell and bad taste</p> <p>Direct toxication of people</p> <p>Toxication of specific groups of people (babies, sick people).</p> <p>Undesired properties (colour, corrosion, hardness)</p> <p>Exceeded limit values</p>
Entrance of pollutants into soil	Damage to soil organisms deteriorates biological purification capacity of the soil. Changed filtering performance due to changed physico-chemical conditions of the soil.

Table 8: Water pollution by various substance categories and possible response

Substance category	Typical representative	Property in water	Damaging effect	Measures after release into the water. F = Flowing waters G = Groundwater
Mineral oils	benzines fuel oil, engine oils insulation oils	floating on the surface	direct poisoning	F oil traps, compressed air locks skimming, evacuation, oil-binding agents
	hydraulic oils	negligible mixing		G pumping, stripping
Acids and alkaline solutions	hydrochloric acid nitric acid, potash lye sulphuric acid	thorough mixing	pH-change (cell death)	F dilution, neutralisation
	phosphoric acid sodium hydroxide solution Javel water, ammonia	heat tone		G no countermeasures possible
Chlorinated hydrocarbons	trichloroethane trichlorothene dichloromethane tetrachloroethylene	moderate mixing toxicity relevance sinks to bottom	direct poisoning mutagenic cancerogenic poor degradability toxic catabolic products	F no countermeasures possible
				G pumping, activated carbon, stripping
Organic solvents	acetone, ethanol, methanol methyl ethyl ketone propan-2-ol	thorough mixing some, with heat of reaction	slightly poisoning	F no countermeasures possible
				G no countermeasures possible oil locks
Aromatics	benzole, styrene, xylenol, ethyl benzole, toluene xylene	floating on surface slight mixing	direct poisoning	F oil locks
				G pumping off, stripping
Pesticides, biocides	Atrazin, Aldicarb, Endosulfan, Lindan, Propazin, Disulfoton, Thiometon, Erimphos	slight mixing toxicity relevance	very low degradability high accumulation of toxins toxic catabolic products	F no counter measures possible
				G pumping off
Heavy metals	arsenic, lead, cadmium, nickel, mercury, selenium, chromium	water soluble (salt)	non-degradable	
Cyanides		water soluble directly toxic to life	direct poisoning	F no countermeasures possible G soda lye, iron sulphate







Table 12: Propagation of heavy toxic gases in the open air; impact distances [m] from place of release where 10% of the population suffer damage to their health (on the basis of the MET model, propagation class C, diffusion angle 60°).

Quantity of released substance [kg]																				IDLH [mg/m <sup>3</sup> ]
10																				
20																				
50																				
100																				
200																				
500																				
1,000																				
2,000																				
5,000																				
10,000																				
20,000																				
50,000																				
100,000																				
200,000																				
500,000																				



Figure 1 : Comparison between deterministic and probabilistic approaches



Figure 2: Diameter of the fire ball as function of the amount of burning substance; reference substance propane (EFFECTS-TNO)

*Ordinate:* Diameter (m)

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 3: Life of the fire ball as function of the amount of burning substance

*Ordinate:* Time (s)

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 4: Heat radiation from fire balls; impact distances from centre of the fire ball as function of the amount of burning substance and various heat flux densities [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]; reference substance propane (EFFECTS-TNO).

*Ordinate:* Distance (m)

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 5: Heat radiation from fire balls; impact areas as function of the amount of burning substance and various heat flux densities [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]; reference substance propane (EFFECTS-TNO).

*Ordinate:* Area ( $\text{m}^2$ )

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 6: Relationship between probit and percentage

*Ordinate:* Percentage

*Abscissa:* Probit

Figure 7: Heat radiation from puddle fires (surface fires); impact distances from the edge of the puddle for specified heat flux densities [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]; reference substance isobutylene (EFFECTS-TNO). Puddle depth = 3 cm, dotted line = diameter of the puddle [m].

*Ordinate:* Distance (m)

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 8: Heat radiation from puddle fires (surface fires); impact areas for specified heat flux densities [ $\text{kW}/\text{m}^2$ ]; reference substance isobutylene (EFFECTS-TNO); puddle depth = 3 cm.

*Ordinate:* Area ( $\text{m}^2$ )

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 9: Pressure waves from gas cloud explosions in the open air; maximum impact distances from the centre of the gas cloud, for specified excess pressures [bar]; reference substance propane (EFFECTS-TNO).

*Ordinate:* Distance (m)

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 10: Pressure waves from gas cloud explosions in the open air; maximum impact areas for specified excess pressures [bar]; reference substance propane (EFFECTS-TNO).

*Ordinate:* Area (m<sup>2</sup>)

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 11: Excess pressure from a gas cloud explosion in the open air as function of a scaled distance from the centre of the gas cloud.

*Ordinate:* Excess pressure [kPa]

*Abscissa:* Scaled distance “z”

Figure 12: Propagation of heavy toxic gases in the open air; impact distances as function of the amount of released substance at which 10% of the population suffer damage to their health, for specified IDLH values [mg/m<sup>3</sup>]; (based on MET model, propagation class D and 60° angle of diffusion).

*Ordinate:* Distance (m)

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 13: Propagation of heavy toxic gases in the open air; impact areas as function of the amount of released substance at which 10% of the population suffer damage to their health, for specified IDLH values [mg/m<sup>3</sup>]; (based on MET model, propagation class D and 60° angle of diffusion).

*Ordinate:* Area (m<sup>2</sup>)

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 14: Propagation of ignited heavy toxic gases in the open air; impact distances as function of the amount of released substance at which 10% of the population suffer damage to their health, for specified IDLH values [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]; (based on MET model, propagation class C and  $60^\circ$  angle of diffusion).

*Ordinate:* Distance (m)

*Abscissa:* Amount (kg)

Figure 15: Propagation of ignited heavy toxic gases in the open air; impact areas as function of the amount of released substance at which 10% of the population suffer damage to their health, for specified IDLH values [ $\text{mg}/\text{m}^3$ ]; (based on MET model, propagation class C and  $60^\circ$  angle of diffusion).

*Ordinate:* Area ( $\text{m}^2$ )

*Abscissa:* Amount (kg)