

Grundlagen der technischen Risikoanalytik

Konsequenzenanalyse



Inhalt

- Charakterisierung der Freisetzung („Quellterm“)
- Atmosphärische Stoffausbreitung und Transportvorgänge
- Einbezug von Schutz- und Gegenmassnahmen
- Belastungspfade
- Gesundheitliche Auswirkungen toxischer und energetischer Freisetzungen (Dosis-Risiko-Modelle)
- Berechnungsmethoden, Schadensermittlung

Vorgehensweise bei der Erfassung der Konsequenzen

- Herleitung des „Quellterms“ (Anteile des freigesetzten Stoffinventars, Stoffzusammensetzung und andere Randbedingungen, wie Emissionshöhe, Energie, Zeitangaben)
- Modellierung von Transport, Verteilung und Verweilzeit der Stoffe in der Umgebung; Wirkung energetischer Freisetzungen.
- Für radiotoxische Stoffe: Bestimmung der zunächst potentiell durch externe Strahlung bedingten Strahlendosis, danach Berücksichtigung von Notfallmassnahmen wie Alarmierung und Evakuierung.
- Bestimmung der durch interne Strahlung bedingten Strahlendosis unter Berücksichtigung von Nahrungsmittelverboten und Präventivmassnahmen (Schutz der Schilddrüse v.a. bei Kindern durch Abgabe von Jodtabletten).
- Ableitung des **individuellen** Todesrisikos.
- Bestimmung der Exposition der Bevölkerung und Ausweisung der **Kollektivdosis** unter Berücksichtigung der Bevölkerungsdichte.
- Für chemische Stoffe: Anwendung des „Probit“-Ansatzes

Ausgewählte Freisetzungskategorien

Release Category, Description and Frequency	Release Characteristics					Release Fractions of Core Inventory			
	Release starts [hrs]	Duration [hrs]	Warning time [hrs]	Energy [MBTu/hr]	Height [m]	Xe-Kr	I	Cs-Rb	Ba-Sr
UK-1 Containment bypass 2.4 (-9)	1	3	0	0.3	10	9(-1)	7(-1)	5(-1)	6(-2)
UK-2 Early containment faie Steam explosion 4.0 (-10)	1	0.5	0	20	10	9(-1)	7(-1)	4(-1)	5(-2)
UK-5 Late containment faie Vaporisation release 8.0 (-9)	8	0.5	4	20	10	1 (0)	6(-2)	3(-1)	4(-2)
UK-6 Late containment faie No vaporisation release 4.2 (-9)	12	0.5	8	20	10	9(-1)	9(-3)	2(-1)	2(-2)

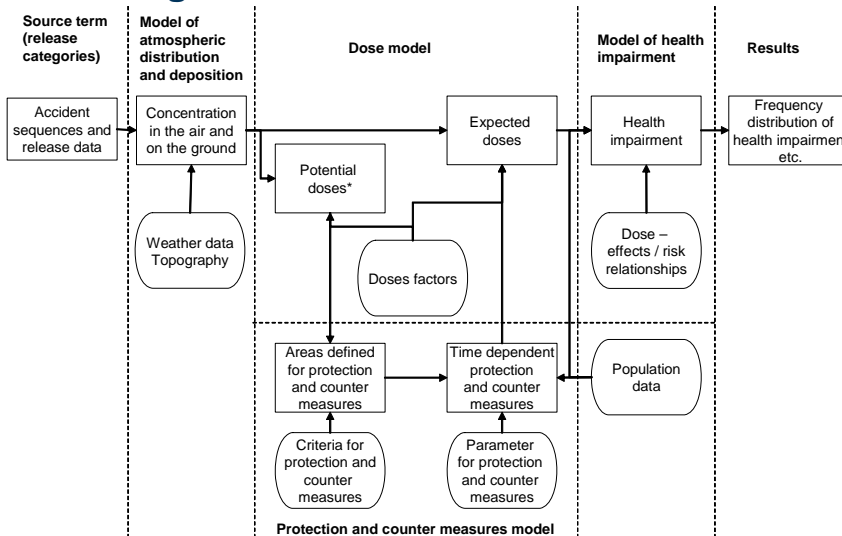
Note: 1 Btu/hr = 0.29 watts; 2.4(-9) means 2.4 x 10⁻⁹ per reactor year

Dispersion

	Dispersion		Measures
Air	Fast, depending on Wind speed / direction Atmospheric conditions Topography	Mean wind speeds ¹ in Zürich SMA: 2.35m/s Jungfrau Joch: 8.34m/s	Staying indoors Keeping windows and doors shut Nourishment control
Flowing water	Moderate, depending on Flow speed River bed profile	Mean flow speed of Rhine ² : 1.1m/s Elbe ³ : 0.8m/s	Stopping ground water enrichment
Groundwater	Slow, depending on Porosity	Flow speed ⁴ : 1m/day	Stopping ground water pumps
Standing water	Slow, depending on • Inflow / outflow rate • Depth, size	Water renewable time Lake Konstanz ⁵ : 4.5 years Lake Sempach ⁶ : 15 years	Stopping ground water enrichment
Soil	Slow, depending on Porosity Soil horizons	Diffusion	Soil decontamination, disposal

Source: http://stratus.meteotest.ch/mme/a_meanwind1983_97.asp?lang=d
 Source: http://www.hochwasserkarte.de/Seiten/der_Rhein.htm
 Source: <http://de.wikipedia.org/wiki/Elbe>
 Source: http://www.ifu.ethz.ch/GWH/education/graduate/Grundwasser1/Script_GW_1.pdf
 Source: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/3603/>
 Source: <http://www.lu.ch/download/afu/ap/9/SeZu9297.pdf>

Unfallfolgenmodell



Gauss'sches Fahren-Modell

$$C(x, y, z) = \frac{Q'}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left(\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right)$$

$C(x, y, z)$ = Immissionskonzentration am betrachteten Ort

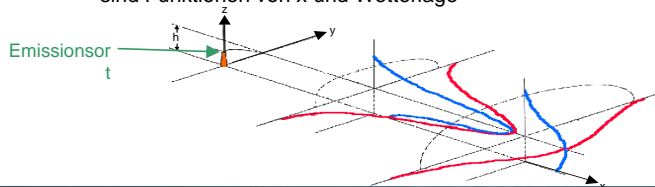
Q' = Emissionsrate, d.h. pro Zeiteinheit freigesetzte Schadstoffmenge

u = gemittelte Geschwindigkeit

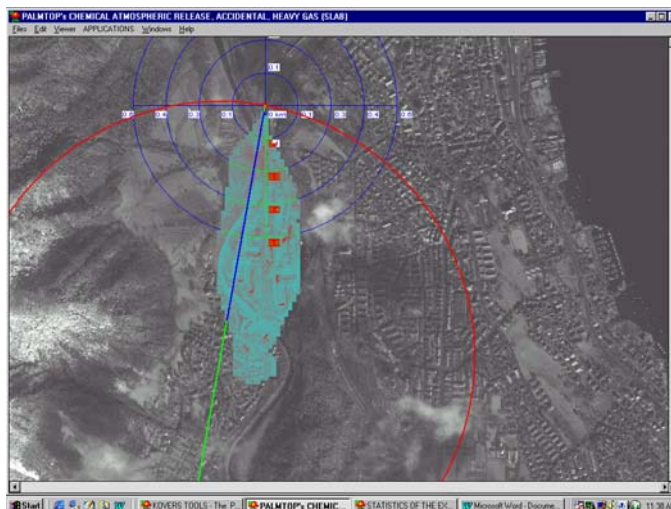
h = effektive Quellenhöhe

x, y, z = Abstände des Bezugspunktes vom Koordinatenursprung, wobei x der Windrichtung entspricht

σ_y, σ_z = Streuparameter der Konzentrationsverteilung in y - bzw. z -Richtung sind Funktionen von x und Wetterlage



Darstellung Cl_2 -Ausbreitung



Grundlagen: Einheiten

Grundlagen: Einheiten

Aktivität Anzahl radioaktiver Kernumwandlungen pro Zeiteinheit

SI-Einheit: 1 Becquerel (Bq) = 1 s^{-1}

Historisch: Curie (Ci) $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$

Energiedosis durch die Materie absorbierte Strahlungseinheit pro Masseneinheit

SI-Einheit: 1 Gray (Gy) = $1 \text{ J kg}^{-1} = 100 \text{ rad}$

Historisch: $\text{rad} = 100 \text{ erg g}^{-1}$

$1 \text{ erg} = 1 \text{ g} \times 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-2} = 10^{-7} \text{ J}$

Äquivalenzdosis Die biologische Wirkung der absorbierten Dosis hängt von der Art der Strahlung ab. Die Äquivalenzdosis ist die mit einem Faktor (relative biological effectiveness, RBE) gewichtete absorbierte Dosis.

SI-Einheit: 1 Sievert (Sv) = $1 \text{ Gy} \times \text{RBE}$

Historisch: rem = radiation equivalent man

$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \times \text{RBE} = 0.01 \text{ Sv}$

Strahlung	RBE
Röntgen-, Gamma-, Elektronenstrahlung	1
Alphateilchen	20
Neutronen < 10 keV	5
10-100 keV	10
100-2000 keV	20

Grundlagen: Schadentypen

Deterministische Strahlenschäden (Frühschäden)

weisen Schwellendosis auf, da der Körper nur eine bestimmte Zelltötungsrate durch Bildung neuer Zellen verkraften kann. Das Ausmass des Schadens ist bei gleicher Dosis bei einer Teilkörperbestrahlung geringer als bei einer Ganzkörperbestrahlung.

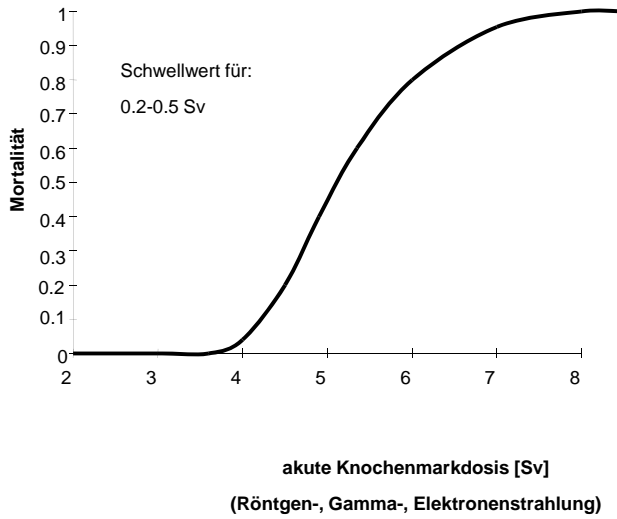
Typische nichtstochastische Strahlenschäden sind Hautverbrennungen, Strahlenkrankheit und Strahlenstar.

Die **LD₅₀** letale, also tödliche Dosis, bei der 50 Prozent der einer Wirkung ausgesetzten Individuen zu Tode kommen, beträgt ungefähr **4 bis 5 Sv** (400-500 rem). Der Schwellenwert liegt bei **0.2 bis 0.5 Sv** (20-50 rem)

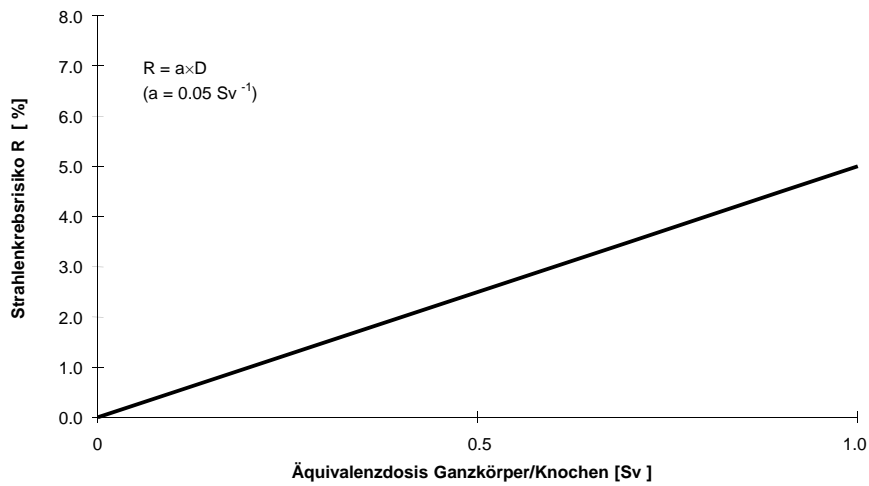
Stochastische Strahlenschäden (Spätschäden):

Typische stochastische Schäden sind Spätschäden wie v.a. Leukämie, Tumorbildung und genetische Schäden. Strahlenkrebs lässt sich nicht von normalen Krebserkrankungen, welche sehr häufig auftreten, unterscheiden.

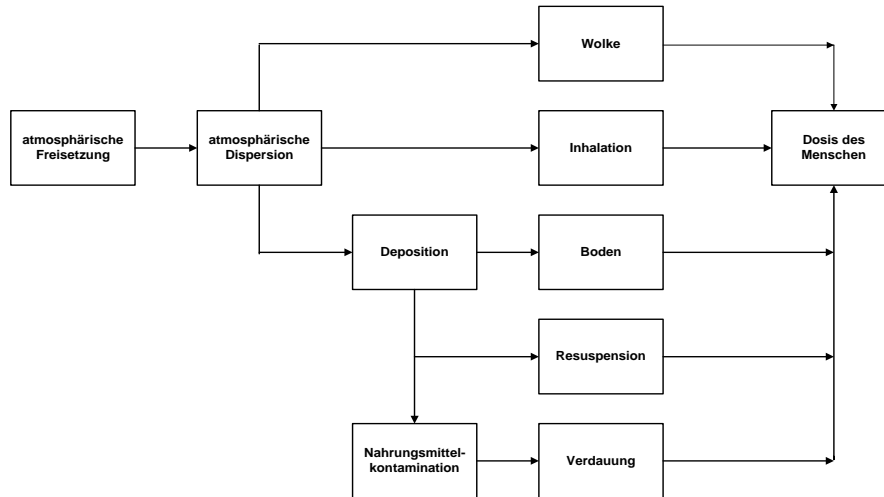
Letalität durch akute Strahlendosis



langfristige Effekte der Strahlendosis [Quelle BEIR V, gilt als sehr konservativ]



Prinzipielle Expositionspfade des Menschen nach atmosphärischen Freisetzungen



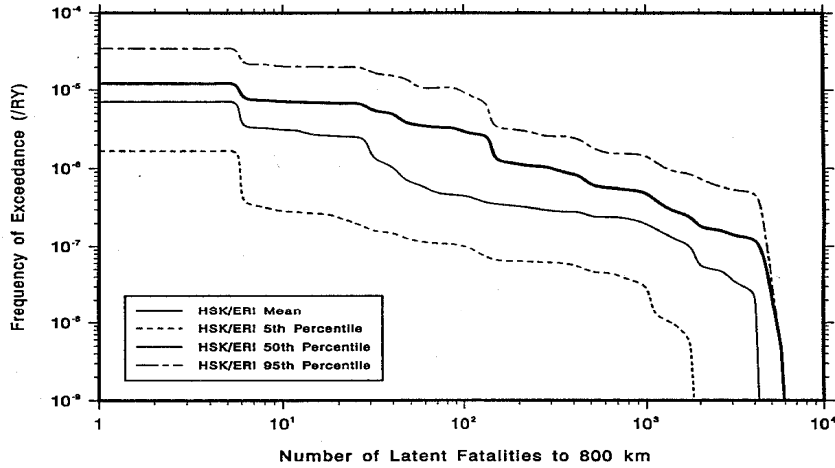
Die Resultate aus den Modellierungen zur Gefährdungsabschätzung werden häufig in Eintrittshäufigkeits-Ausmass-Diagrammen (Frequency-Consequence, FC) dargestellt. Dabei werden die kumulierten Eintrittshäufigkeiten gegen das Ausmass eingetragen. Das heisst, dass für ein gegebenes Ausmass aus der Kurve die Häufigkeit eines Ereignisses, welches das Ausmass hervorruft beziehungsweise übersteigt, herausgelesen werden kann.

Dabei stellt die fett hervorgehobene Linie den Mittelwert des zu erwarteten Ausmasses dar. Die anderen Linien repräsentieren die jeweiligen Perzentile mit den zugehörigen Vertrauensbereichen.

Als Schadensmessgrösse dienen üblicherweise:

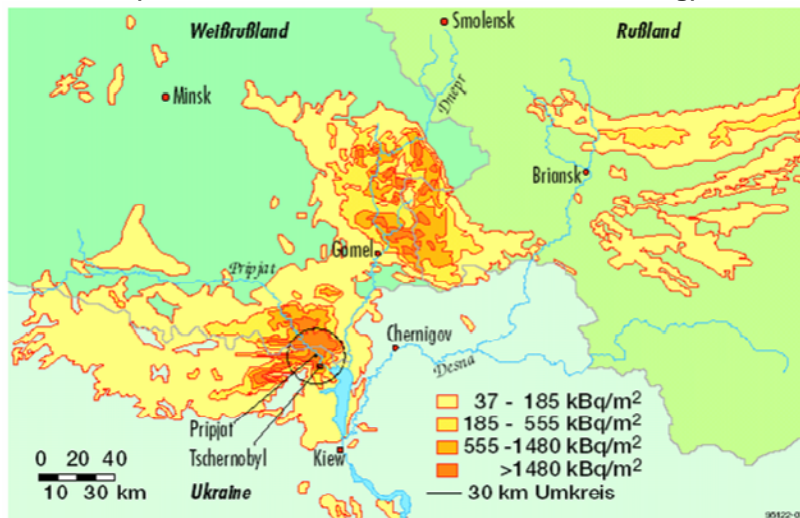
- Anzahl Früh- und Spätschäden
- Anteil von Schutz- und Gegenmassnahmen Betroffener
- Grösse unzulässig hoch kontaminierter Flächen u.a.

Kumulierte Eintretenshäufigkeiten für krebsbedingte Todesfälle infolge von Spätschäden (Studie Kernkraftwerk Mühleberg)

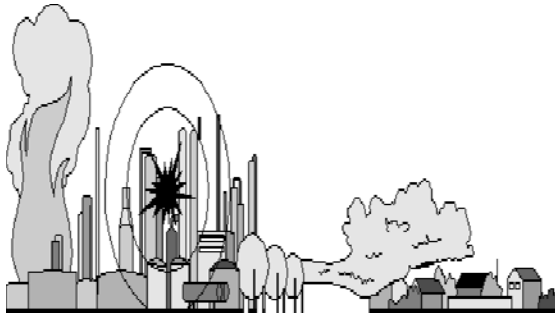


Quelle: Cazzoli et al. (1993), A Regulatory Evaluation of the Mühleberg Probabilistic Safety Assessment, Volume II: Level 2. ERI/HSK 93-304, HSK 11/356

Kontamination durch Cäsium 137 in der Ukraine, in Weissrussland und Russland (in den ersten Monaten nach der Feisetzung)



Störfallszenarien bei der Freisetzung von Chemikalien



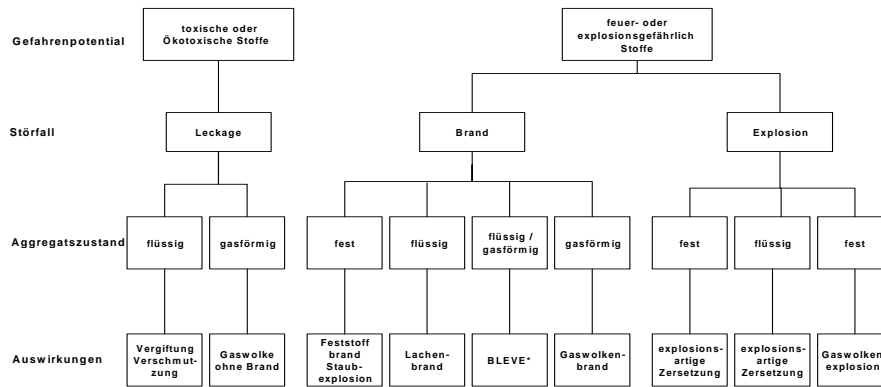
Schrittweises
Vorgehen durch
Modellierung von:

1. Freisetzung
2. Ausbreitung
3. Wirkung
4. Exposition

Elemente zur Beschreibung von Störfallszenarien

	Bestimmungsgrößen	Einflussparameter
Freisetzung	<ul style="list-style-type: none"> • Leckart/-grösse • Leckmenge/-rate • Lachengrösse • Verdampfungsrate 	<ul style="list-style-type: none"> • Ursache der Leckage • Aggregatzustand des freigesetzten Stoffes - gasförmig, flüssig, zweiphasig • total freigesetzte minus spontan verdampfende und aerosolbildende Menge • Verdampfungsmechanismus (Wärmeeintrag)
Ausbreitung	<ul style="list-style-type: none"> • Schadstoffkonzentration am Ort X 	<ul style="list-style-type: none"> • Freisetzungsort/Quelle - spontan, kontinuierlich • Dichte der Gaswolke > Luft (dense cloud) = Luft (neutral cloud) < Luft (buoyant cloud) • Bodenbeschaffenheit • Windverhältnisse • atmosphärische Bedingungen
Wirkung	<ul style="list-style-type: none"> • Wirkung am Ort X 	<ul style="list-style-type: none"> • akute Toxizität (IDLH) • Brand/Hitzeabstrahlung • Explosion/Druckwelle
Exposition	<ul style="list-style-type: none"> • Exposition 	<ul style="list-style-type: none"> • Bevölkerungsdichte • Verweilzeit • Schutzgrad (Aufenthalt im Freien)

Auswahlmatrix für Störfallszenarien



*BLEVE: Boiling Liquid Expanding Vapour Cloud Explosion

Bewertung toxischer Wirkungen einer Freisetzung (Dosisberechnung)

Im Gegensatz zu den USA gibt es in Europa noch keine Richtwerte für Chemikalien, die auf den Ereignisfall zugeschnitten sind. Ein gängiger Bewertungsansatz greift dennoch auf Grenzwerte zurück:

- Wenn keine Überschreitung des **MAK** (max. Arbeitsplatzkonzentration) zu erwarten ist, kann man eine Gefährdung der Bevölkerung als nicht gegeben betrachten.
- Vorsicht ist jedoch bei der Verwendung des **IDLH** (immediately dangerous to life and health) angezeigt. Oft wird vergessen, dass diese Werte (30 min) für gesunde männliche Erwachsene gelten, die nicht vollständig die Gesellschaft repräsentieren.
- In den USA gibt es Emergency Response Planning Guidelines (**ERPG's**). Diese Werte repräsentieren Konzentrationen, die während einer festgelegten Zeitdauer einen bestimmten Schweregrad der Exposition für eine normal heterogene Bevölkerung definieren und bei Erreichen Schutzmassnahmen auslösen.

Besonders zu beachten ist, ob eine freigesetzte Substanz **mutagene**, **kancerogene** oder **teratogene** Eigenschaften hat.

Bei übel riechenden oder reizenden Substanzen erlaubt auch das Verhältnis von **Geruchsschwelle** zu toxischer Konzentration Rückschlüsse auf die Gefährdung.

Die Definition einer Dosis lautet

$$D = \text{Konstante} \cdot \text{Konzentration} \cdot \text{Expositionszeit.}$$

Die Konstante steht für den Übergang von der Luft ins Blut und wird meist gleich 1 gesetzt. Zwar kann das Integral der Dosis leicht diskret numerisch gelöst werden, doch ist die Interpretation der Dosis schwierig.

- Deshalb orientiert man sich heute an der toxischen Last (**toxic load**)

$$V = \sum C_i^n \cdot t_i \quad C: \text{Konzentration}; t: \text{Expositionszeit}; n: \text{Stoffkonstante}$$

- Für eine begrenzte Anzahl chemischer Substanzen existieren Konstanten, die es erlauben, über einen Probit-Ansatz (Pr) aus der toxischen Last direkt auf den Prozentwert der Mortalität einer Population zu schliessen:

$$\bullet \text{Pr} = a + b \cdot \log_e (C^n \cdot t) \quad a, b, n: \text{Stoffkonstanten}$$

Substance	a	b	n
Acrolein	-4.1	1	1
Acrylonitrile	-8.6	1	1.3
Allyl alcohol	-11.7	1	2
Ammonia	-15.6	1	2
Azinphos-methyl	-4.8	1	2
Bromine	-12.4	1	2
Carbon monoxide	-7.4	1	1
Chlorine	-6.35	0.5	2.75
Ethylene oxide	-6.8	1	1
Hydrogen chloride	-37.3	3.69	1
Hydrogen cyanide	-9.8	1	2.4
Hydrogen fluoride	-8.4	1	1.5
Hydrogen sulfide	-11.5	1	1.9
Methyl bromide	-7.3	1	1.1
Methyl isocyanate	-1.2	1	0.7
Nitrogen dioxide	-18.6	1	3.7
Parathion	-6.6	1	2
Phosgene	-10.6	2	1
Phosphamidon	-2.8	1	0.7
Phosphine	-6.8	1	2
Sulfur dioxide	-19.2	1	2.4
Tetraethyllead	-9.8	1	2

Modeling Consequences and Damage (The Probit-Approach)

- Exposure and effects following release and dispersion of a dangerous substances into the environment
- Parameters used to express the lethal effects are:
 - The probability of death, P_E – of an individual dying from exposure used for Individual Risk contour.
 - The fraction of the population dying, F_E – the fraction of the population dying at a certain location due to a given exposure (indoors and outdoors fraction) – used in the calculation of the Societal Risk.
- The following approach is based on TNO methodology.

Probit Function

Probit: Number directly related of probability by a numerical transformation.

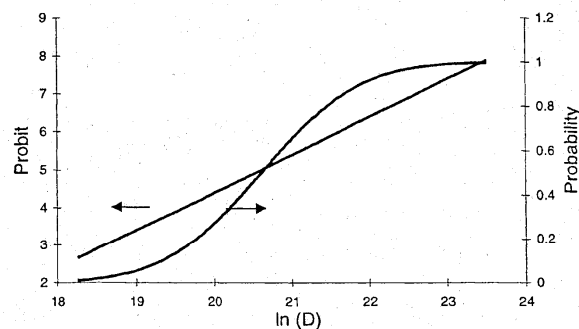
$$P_E = 0.5 \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\operatorname{Pr} - 5}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

where:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

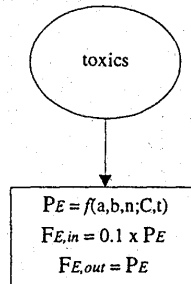
P_E is the probability of an effect (death)

Pr is probit value



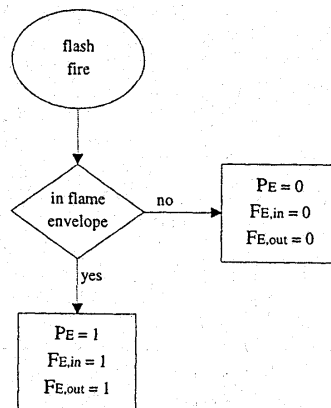
The probability, P , and the probit, Pr , as a function of exposure to ammonia. The exposure is represented by $\ln(D)$, with D the toxic dose. The figure shows how the sigmoid curve is replaced with a straight line if the probit is used.

1. Toxic exposure

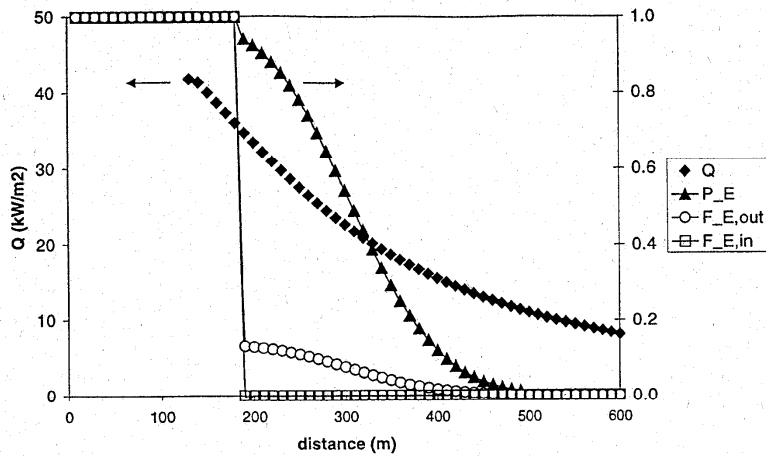


Calculation of the probability of death, P_E , and the respective fractions of the population dying indoors and outdoors, $F_{E,in}$ and $F_{E,out}$, due to exposure to a toxic cloud. The function $f(a,b,n;C,t)$ is the probit function for exposure to toxic substances (toxics).

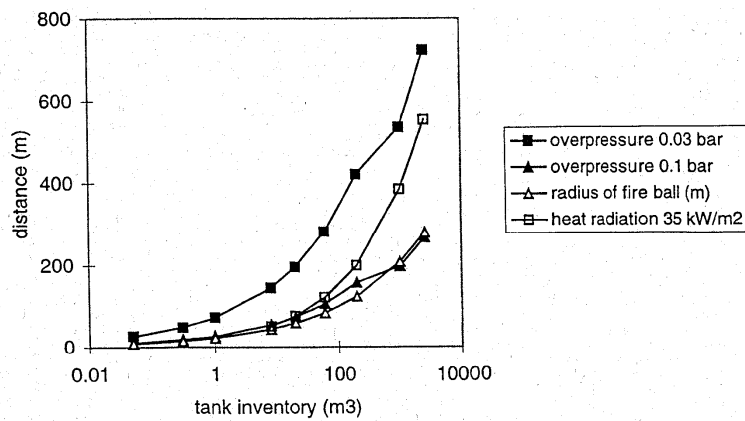
2. Fire



Calculation of the probability of death, P_E , where the respective fractions of the population dying indoors and outdoors are $F_{E,in}$ and $F_{E,out}$ on exposure to a flash fire.

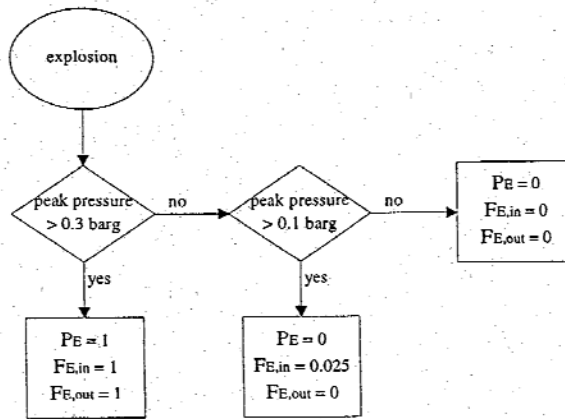


Example calculation of a BLEVE of 100 tonne propane (burst pressure 15 bar). The exposure time is set at the maximum value of 20 s. Indicated are heat radiation, Q , probability of death, P_E , fraction of people dying outdoors, $F_{E,out}$, and fraction of people dying indoors, $F_{E,in}$.



Distances to various effect levels of a BLEVE as a function of tank inventory [TNO98d]. Indicated effect levels are the radius of the fireball, heat radiation equal to 35 kW m^{-2} and overpressure levels of 0.1 bar and 0.03 bar.

4. Pressure effects for a vapour cloud explosion



Calculation of the probability of death, P_E , and the respective fractions of the population dying indoors and outdoors, $F_{E,in}$ and $F_{E,out}$ from exposure to a blast/explosion.

Population

- Presence of population in the environment should be surveyed
- In some cases it is considered that the density is of 2.4 persons per house
- Fractions indoors and outdoors:

	$f_{pop.in}$	$f_{pop.out}$
Daytime	0.93	0.07
Night – time	0.99	0.01