

### **Anhang 3      Methodische Hinweise zur Abschätzung von Auswirkungen**

3.1	Bodenbelastung durch Gefahrstoffe .....	3
3.2	Grundwasserbelastung durch Gefahrstoffe.....	4
3.3	Belastung von Oberflächengewässern durch Gefahrstoffe .....	5
3.4	Belastungen infolge luftgetragener Gefahrstoffe .....	7
3.4.1	Modell Konzentrationsmaximum .....	7
3.4.2	Modell Dosis.....	7
3.4.3	Modelle mit gewichteter Dosis .....	8
3.4.3.1	Modell Probit Functions .....	8
3.4.3.2	Modell AEGL-Werte .....	9
3.4.3.3	Modell mit Wichtungsfaktor .....	10
3.4.4	Schutzwirkung von Häusern gegen luftgetragene Gefahrstoffe .....	11
3.5	Belastungen durch Wärmestrahlung.....	13
3.6	Belastungen durch Druckwirkungen .....	15



### 3.1 Bodenbelastung durch Gefahrstoffe

In den Bundesländern sind Richtwerte für die Beurteilung der Böden durch Gefahrstoffe in Listen festgelegt (Beispiele: Berliner Liste, Brandenburger Liste). Darin sind für verschiedene Kategorien, wie Wasserschutzgebiet, Flächen mit sensibler Nutzung, auch Eingreifwerte für einzelne Stoffe und Stoffgruppen festgelegt. Die Eingreifwerte eignen sich als Beurteilungsmaßstab für die Bodenbelastung mit Gefahrstoffen.

Die Eingreifwerte  $C_{EB}$  sind auf die Masse an Trockensubstanz des Bodens bezogen und werden in mg/kg angegeben.

Es soll angenommen werden, daß pro Quadratmeter Boden anfangs 20 kg Trockensubstanz kontaminiert werden. Damit können Beurteilungswerte für die flächenspezifische Belastung  $m''_B$  durch Multiplikation gewonnen werden.

$$m''_B = 20 \cdot C_{EB} \quad \text{in} \quad \text{mg/m}^2 \quad (1)$$

Die folgende Tabelle enthält einige Beispiele für die flächenspezifische Belastung auf der Basis Kategorie Wasserschutzgebiet nach der Berliner Liste:

Gefahrstoff	flächenspezifische Belastung (mg/m <sup>2</sup> )
2.3.7.8-TCDD-Äquivalent	nutzungsabhängig: 0,002 bis 0,02
Arsen	200
Benzol	10
Cadmium	40
Cyanide, ges.	500
Diesel/Heizöl	6000
Fluoride	2000
Monochlorethen	20
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAK	200
Quecksilber	10
Toluol/Xylol	100
Wassergefährdende Stoffe WGK 1	10000
Wassergefährdende Stoffe WGK 2	4000
Wassergefährdende Stoffe WGK 3	1000

Für den Fall der Ausbreitung der Gefahrstoffe als luftgetragene Aerosole oder Stäube können die Sinkgeschwindigkeit der Partikel  $u_{\text{part}}$  und der zeitliche Konzentrationsverlauf am Boden  $C(t)$  für den betrachteten Ort abgeschätzt werden.

Mit diesen Angaben kann die flächenspezifische Belastung des Bodens  $m''_{\text{Boden}}$  bestimmt und mit einem Beurteilungswert verglichen werden.

### Benötigte Angaben

Sinkgeschwindigkeit der Partikel:	$u_{\text{part}}$	in	m/s
Zeitlicher Konzentrationsverlauf am Boden:	$C(t)$	in	mg/m <sup>3</sup>
Zeitpunkt des Beginns des Auftretens erhöhter Konzentration:	$t_{\text{beginn}}$	in	s
Zeitpunkt des Endes des Auftretens erhöhter Konzentration:	$t_{\text{ende}}$	in	s
$m''_{\text{Boden}} = u_{\text{part}} \cdot \int_{t_{\text{beginn}}}^{t_{\text{ende}}} C(t) \cdot dt$			
		in	mg/m <sup>2</sup> (2)

In diesem Zusammenhang spielt auch die mögliche Kontamination von Vegetation, die für den menschlichen Verzehr bestimmt ist, eine Rolle. Darüberhinaus können die Gefahrstoffe auch in die Nahrungskette von Tieren gelangen.

### 3.2 Grundwasserbelastung durch Gefahrstoffe

In den Bundesländern sind Richtwerte für die Beurteilung der Böden durch Gefahrstoffe in Listen festgelegt (Beispiele: Berliner Liste, Brandenburger Liste). Darin sind für verschiedene Kategorien, wie Wasserschutzgebiet, Flächen mit sensibler Nutzung, auch Eingreifwerte für einzelne Stoffe und Stoffgruppen festgelegt. Die Eingreifwerte eignen sich als Beurteilungsmaßstab für die Grundwasserbelastung mit Gefahrstoffen. Die Eingreifwerte  $C_{\text{EG}}$  sind auf das Grundwasservolumen bezogen und werden in µg/l angegeben. Die folgende Tabelle enthält einige Beispiele für Eingreifwerte auf der Basis Kategorie Wasserschutzgebiet nach der Berliner Liste.

Gefahrstoff	flächenspezifische Belastung (µg/l)
2.3.7.8-TCDD-Äquivalent	0
Arsen	40
Benzol	5
Cadmium	5
Cyanide, ges.	50
Diesel/Heizöl	500
Fluoride	1500
Monochlorethen	1
Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe PAK (EPA)	0,2
Quecksilber	1
Toluol/Xylol	20
Wassergefährdende Stoffe WGK 1	100
Wassergefährdende Stoffe WGK 2	40
Wassergefährdende Stoffe WGK 3	20

Es soll angenommen werden, daß infolge der Niederschläge jährlich pro Quadratmeter Boden 200 l Wasser ins Grundwasser versickern. Mit diesem Zufluß wird nur ein Teil der gesamten Gefahrstofflast mitgenommen.

Wenn  $m''_{\text{Boden}}$  die flächenspezifische Belastung des Bodens mit Gefahrstoffen nach Abschnitt 3.1 ist, wird der Anteil  $\eta \cdot m''_{\text{Boden}}$  mit Werten zwischen 0 und 1 für  $\eta$  in das Grundwasser gelangen. Die Konzentration im zufließenden Wasser  $C_G$  können nach der folgenden Gleichung berechnet und mit den Eingreifwerten  $C_{EG}$  verglichen werden.

$$C_G = 5 \cdot \eta \cdot m''_{\text{Boden}} \quad \text{in } \mu\text{g/l} \quad (3)$$

Über die Vegetation können die Gefahrstoffe auch in die Nahrungskette von Tieren und Menschen gelangen.

### 3.3 Belastung von Oberflächengewässern durch Gefahrstoffe

Für die Beurteilung der Belastung von Oberflächengewässern durch Gefahrstoffe dienen neben ihren toxischen Eigenschaften deren Konzentration und die Dauer des Auftretens der Konzentration. Angaben zu den Stoffeigenschaften und den Wassergefährdungsklassen sind im vom UBA herausgegebenen "Katalog<sup>1</sup> wassergefährdender Stoffe zusammengestellt".

Die Stoffeigenschaften werden zu Wassergefährdungsklassen (WGK 0 bis WGK 3) aggregiert. Die Stoffe werden dementsprechend eingestuft:

- WGK 0: Im allgemeinen nicht wassergefährdend
- WGK 1: Schwach wassergefährdend
- WGK 2: Wassergefährdend
- WGK 3: Stark wassergefährdend

Im genannten Katalog findet man Angaben zur Wasserlöslichkeit, Bewertungszahlen für die akute Toxizität zu Säugetieren, Fischen und Bakterien sowie Hinweise zur biologischen Abbaubarkeit.

Weiterhin wird das Hazard-Profil mit folgenden Angaben für die Stoffe angegeben.

#### **Bioakkumulation und nachteilige Wirkung**

- |   |  |
|---|--|
| + | signifikant bioakkumulierend, stellt ein nachgewiesenes Risiko für das aquatische Leben oder die menschliche Gesundheit dar  |
| Z | Bioakkumulierend, verbunden mit zusätzlichen Gefährdungen für aquatische Organismen oder die menschliche Gesundheit, jedoch mit kurzer Retentionszeit von einer Woche oder weniger |
| T | Mögliche nachteilige Wirkungen in Meeresfrüchten   |
| 0 | Kein Hinweis, der eine der oben genannten Bewertungen rechtfertigt   |

<sup>1</sup> vgl. auch: VwV wassergefährdende Stoffe (VwVwS)

**Schädigung der lebenden Ressourcen**

(96 h andauernde Konzentration, die in 50 % der Fälle zum Tod führt)

		<b>LC<sub>50</sub> in mg/l</b>
5	extrem toxisch	kleiner 0,01
4	hoch toxisch	kleiner 1
3	mäßig toxisch	1 bis 10
2	leicht toxisch	10 bis 100
1	praktisch nicht toxisch	100 bis 1000
D	Stoff setzt sich wahrscheinlich auf dem Meeresboden ab	
BOD	BSB, Stoff mit biologischem Sauerstoffbedarf	

**Gefährdung für die menschliche Gesundheit bei oraler Aufnahme**

(Auf das Körpergewicht bezogene Dosis, die in 50 % der Fälle zum Tod führt)

		<b>LD<sub>50</sub> in mg/kg (Versuchstiere)</b>
4	stark gefährdend	kleiner 5
3	mäßig gefährdend	5 bis 50
2	leicht gefährdend	50 bis 500
1	praktisch nicht gefährdend	500 bis 5000
0	nicht gefährdend	größer 5000

**Gefährdung für die menschliche Gesundheit bei Haut- oder Augenkontakt oder durch Einatmen**

II	gefährdend	Schwere Reizungen, Auslösen starker Empfindlichkeiten, Lungenverletzung, Giftigkeit durch die Haut hindurch, krebserzeugend, oder andere spezifische, langfristig schädliche Effekte für die Gesundheit
I	leicht gefährdend,	Leichte Reizung, Auslösen schwacher Empfindlichkeiten
0	nicht gefährdend,	Nicht reizend, keine Auslösung von Empfindlichkeiten

**Verringerung von Annehmlichkeiten**

XXX	<i>Sehr zu beanstanden</i> , wegen Eigenschaften wie Geruch, Giftigkeit, oder Reizauslösen. Als Ergebnis einer Verunreinigung müßten Strände gesperrt werden. Wenn sich klar erwiesen hat, daß der Stoff für Menschen krebserzeugend ist oder ein Potential besitzt, andere ernsthafte, spezifische, langfristig schädliche Effekte beim Menschen hervorzurufen.
XX	<i>Zu beanstanden</i> wegen der oben genannten Eigenschaften, aber wegen kurzfristiger Effekte, die lediglich zu zeitlichen Beeinträchtigungen der Strand/Küstennutzung führen. Wenn zwar plausible wissenschaftliche Erkenntnisse vorliegen, daß der Stoff für Tiere krebserzeugend ist, aber keine eindeutigen Erkenntnisse vorliegen, daß der Stoff Krebs beim Menschen verursacht hat, oder wenn Erkenntnisse aus Laborun-

	tersuchungen vorliegen, daß der Stoff andere, ernsthafte, spezifische, langfristig schädliche Effekte für die Gesundheit hervorrufen könnte.
X	<i>leicht zu beanstanden</i> , keine Beeinträchtigung der Strandbenutzung
0	<i>Kein Problem</i>

### 3.4 Belastungen infolge luftgetragener Gefahrstoffe

#### 3.4.1 Modell Konzentrationsmaximum

Für die Bewertung toxischer Wirkungen von Schadstoffen beim Einatmen werden üblicherweise Grenzwerte für Konzentrationen (Referenzwerte)  $C_R$  angegeben, die sich auf eine definierte Wirkungsdauer  $t_R$  beziehen. Beispielsweise könnte die Referenzkonzentration der ERPG2-Wert<sup>2</sup> und die Referenzdauer  $t_R$  die zugehörige Einwirkungsdauer von 60 min sein.

Zur Verfahrensweise für Fälle, in denen für den in Frage stehenden Stoff in der Literatur keine Referenzkonzentrationen beschrieben sind, wird auf den Abschnitt 16 im Anhang 4 verwiesen.

In praktischen Fällen stimmen weder die reale Wirkungsdauer noch die reale Konzentration mit den definierten Werten  $C_R$  und  $t_R$  überein, und in vielen Fällen ist die Schadstoffkonzentration eine Funktion der Zeit  $C = C(t)$ .

Bei dem einfachsten sehr häufig verwendeten Modell werden die Grenzen von Gefahrenfeldern dadurch bestimmt, daß ein bestimmter Konzentrationswert, z. B. eine Referenzkonzentration zu keinem Zeitpunkt im Verlauf des Auftretens erhöhter Konzentrationen überschritten wird.

Es ist offensichtlich, daß die Größe der Gefahrenfelder bei kurzen Einwirkungsauern überschätzt und bei langen Einwirkungsauern unterschätzt wird, weil die wirkliche Dauer  $t$  kleiner oder größer als  $t_R$  wäre.

#### 3.4.2 Modell Dosis

Ein erster verbesserter Ansatz ist der Vergleich der Produkte aus einer konstanten real auftretenden Konzentration und der real auftretenden Einwirkungsdauer  $T$  mit dem entsprechenden Produkt aus einer Referenzkonzentration  $C_R$  und der zugehörigen Referenzdauer  $t_R$ . Gleiche toxische Wirkungen würden auftreten, wenn gelten würde:

$$C \cdot t = C_R \cdot t_R = D_R \quad (4)$$

Das ist das schon von Haber eingeführte Wirkungsprodukt. Es liefert aber nur für enge Bereiche der Konzentration und Wirkungsdauer plausible Ergebnisse.

<sup>2</sup> ERPG ist eine Abkürzung für Emergency Response Planning Guidelines. Zahlenwerte können bei der Störfallkommission beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (SFK) erfragt werden.

Der nächste Schritt ist die Verwendung eines Zeitintegrals. Gleiche toxische Wirkungen würden bei diesem Modell auftreten, wenn gelten würde:

$$D_R = \int_{t_{1S}}^{t_{2S}} C(t) \cdot dt \quad (5)$$

Das Zeitintegral wird als Dosis bezeichnet, obwohl die Bezeichnung wegen der unterschiedlichen Atemrate nicht ganz korrekt ist. Es liefert aber auch nur für begrenzte Bereiche der Konzentration und Wirkungsdauer plausible Ergebnisse. Das wird durch die folgenden Überlegungen gezeigt.

Bei sehr kleinen Schadstoffkonzentrationen und sehr langen Einwirkungsauern kann das Zeitintegral aus Gleichung (5) recht große Werte annehmen, während gar keine toxischen Wirkungen auftreten. So kann die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert<sup>3</sup>) über 8 h täglich, ohne Schäden zu verursachen, auftreten. P. Bützer hat daher im Modell für Effekte mit toxischen Gasen (MET) eine Schwellenkonzentration  $C_S$  eingeführt.

$$D_R = \int_{t_{1S}}^{t_{2S}} w \cdot C(t) \cdot dt \quad \text{mit } w = 0 \text{ für } C \leq C_S \text{ und } w = 1 \text{ für } C > C_S \quad (6)$$

Dabei werden nur Konzentrationen  $C(t)$  berücksichtigt, die größer als die Schwellenkonzentration  $C_S$  sind.

Als Schwellenwert  $C_S$  wird in der Regel der MAK-Wert verwendet. Als Referenzwert  $C_R$  kommen die ERPG-Werte über eine Stunde, die IDLH-Werte über eine halbe Stunde oder AEGL-Werte in Frage.

Für die praktische Handhabung wird ein Dosisfaktor  $d_{\text{fak}}$  verwendet, beispielsweise:

$$d_{\text{fak}} = \frac{D_S}{D_R} \quad (7)$$

Für Konzentrationen unter dem Schwellenwert bleibt der Dosisfaktor  $d_{\text{fak}} = 0$ .

Für Konzentrationen gleich dem Referenzwert  $C_R$  und einer Belastungsdauer gleich der Referenzdauer wird der Belastungsfaktor  $d_{\text{fak}} = 1$ .

### 3.4.3 Modelle mit gewichteter Dosis

#### 3.4.3.1 Modell Probit Functions

Das ungewichtete Zeitintegral aus Gleichung (5) führt bei großen Werten der Konzentration nicht zu plausiblen Ergebnissen, weil unter Umständen ein einziger Atemzug tödlich sein kann und das ungewichtete Zeitintegral wegen der kurzen Integrationszeit nur

---

<sup>3</sup> siehe auch TRGS 900



geringe Werte annimmt. Aus diesem Grunde werden für den Bereich **letal** Konzentrationen Potenzansätze verwendet.

$$D_n = \int_{t_{1s}}^{t_{2s}} C^n(t) \cdot dt \quad (8)$$

Der Exponent  $n$  wird zur Bestimmung des Prozentsatzes der wahrscheinlich tödlich betroffenen Personen mit der sogenannten Probit Function verwendet. Mit den Stoffwerten  $a_{\text{probit}}$ ,  $b_{\text{probit}}$  und  $n$  berechnet man:

$$y_{\text{probit}} = a_{\text{probit}} + b_{\text{probit}} \cdot \ln \left[ \int_{t_{1s}}^{t_{2s}} C^n(t) \cdot dt \right] \quad (9)$$

Die Konzentration  $C$  ist in ppm und die Zeit ist in min einzusetzen.

Die Stoffwerte  $a_{\text{probit}}$ ,  $b_{\text{probit}}$ ,  $n$  werden so gewählt, daß bei  $y_{\text{probit}} = 5$  nach Gleichung (9) gerade 50 % der betroffenen Personen sterben. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Todesfällen bei bekanntem  $y_{\text{probit}}$  wird numerisch berechnet oder tabellarisch bestimmt.

$$W(y_{\text{probit}}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{y_{\text{probit}}-5} e^{-\frac{\bar{y}^2}{2}} \cdot d\bar{y} \quad (10)$$

Der prozentuale Anteil der betroffenen Personen ergibt sich durch eine Multiplikation mit 100 %.

Für einige Stoffe sind die Stoffwerte  $a_{\text{probit}}$ ,  $b_{\text{probit}}$  und  $n$  bekannt<sup>4</sup>.

### 3.4.3.2 Modell AEGL-Werte

Für wichtige Gefahrstoffe werden für drei Stufen möglicher Gesundheitsschäden jeweils für vier Belastungszeiten - 1/2 h, 1 h, 4 h und 8 h - Konzentrationswerte - AEGL1-Wert, AEGL2-Wert und AEGL3-Wert - festgelegt.

Für die Festlegung der AEGL2- und AEGL3-Werte wird der schon in Gleichung (8) im Abschnitt 3.4.3.1 genutzte Potenzansatz zur Skalierung in Abhängigkeit von der Belastungszeit genutzt. Für jeden Gefahrstoff wird dazu ein spezieller Exponent  $n$  verwendet. Damit gilt:

$$B_{R,AEGL} = C_{AEGL;0,5h}^n \cdot 0,5 \cdot h = C_{AEGL;1h}^n \cdot 1 \cdot h = C_{AEGL;4h}^n \cdot 4 \cdot h = C_{AEGL;8h}^n \cdot 8 \cdot h \quad (11)$$

<sup>4</sup> Center for chemical process safety of the American Institute of chemical engineers: Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. 345 EAST 47 th Street, New York, NY 10017

Dieses Verfahren ermöglicht es, die Belastung bei zeitlich veränderlichen Konzentrationen in Beziehung zur Belastung bei konstanten Konzentrationen entsprechend dem AEGL-Wert und damit zu den zugeordneten möglichen Gesundheitsschäden zu setzen.

$$b_{\text{fak,AEGL}} = \frac{\int C^n(t) \cdot dt}{B_{\text{R,AEGL}}} \quad (12)$$

Wenn der Belastungsfaktor nach Gleichung (12) den Wert 1 annimmt, kann man von einer Belastung ausgehen, die derjenigen des zugrunde gelegten AEGL-Werte entspricht. Bei Werten unter 1 ist die Belastung geringer und bei Werten über 1 ist sie höher.

### 3.4.3.3 Modell mit Wichtungsfaktor

Für die Anwendung in dem Konzentrationsbereich um eine Referenzkonzentration wird auch ein anderes Modell<sup>5</sup> für die Belastung durch Wirkung luftgetragener toxischer Stoffe auf Menschen verwendet, insbesondere wenn keine AEGL-Werte festgelegt sind. Dazu wird ein gewichtetes Zeitintegral mit der konzentrationsabhängigen Wichtungsfunktion  $w(C)$  benutzt. Der Integralwert wird Belastung  $B_w$  genannt.

$$B_w = \int_0^{t_c} w[C(t)] \cdot C(t) \cdot dt \quad (13)$$

Die Wichtungsfunktion  $w(C)$  ist folgendermaßen definiert:

#### Punkt A:

Für Konzentrationswerte kleiner gleich dem Schwellenwert  $C_S$  gilt:  $w(C_S) = 0$

#### Punkt B:

Für den Referenzwert  $C_R$  gilt:  $w(C_R) = 1$

#### Verbindungsgerade:

Für andere Werte der Konzentration werden die Werte, die auf einer Geraden durch die beiden Punkte A und B liegen, verwendet.

---

<sup>5</sup> Programmsystem DISMA<sup>®</sup>, TÜV Rheinland/Berlin-Brandenburg

Für Konzentrationen  $C(t)$  ab der Schwellenkonzentration gilt dann auf der Verbindungsgeraden:

$$w[C(t)] = \frac{C(t) - C_S}{C_R - C_S} \quad (14)$$

$$B_w = \int_0^{t_g} \frac{C(t) - C_S}{C_R - C_S} \cdot C(t) \cdot dt \quad (15)$$

Als Schwellenwert  $C_S$  wird in der Regel der MAK-Wert verwendet. Als Referenzwert  $C_R$  kommen der ERPG2-Wert über eine Stunde, der IDLH-Wert über eine halbe Stunde oder andere in Frage.

Für den Fall konstanter Konzentration gleich der Referenzkonzentration und einer Belastungszeit gleich der für die Referenzkonzentration zugrundeliegenden Referenzbelastungszeit gilt dann definitionsgemäß:

$$B_R = C_R \cdot t_R \quad (16)$$

Für die praktische Handhabung wird ein Belastungsfaktor  $b_w$  verwendet, beispielsweise:

$$b_w = \frac{1}{C_{\text{ERPG2}} \cdot 60 \text{ min}} \cdot \int_0^{t_g} \frac{C(t) - C_{\text{MAK}}}{C_{\text{ERPG2}} - C_{\text{MAK}}} \cdot C(t) \cdot dt \quad (17)$$

Damit kann man für das gewichtete Zeitintegral schreiben:

Damit kann man für das gewichtete Zeitintegral schreiben:

$$B_w = b_w \cdot B_R \quad (18)$$

Für Konzentrationen unter dem Schwellenwert bleibt der Belastungsfaktor  $b_w = 0$ .

Für Konzentrationen gleich dem Referenzwert  $C_R$  und einer Belastungsdauer gleich der Referenzdauer von 60 min wird der Belastungsfaktor  $b_w = 1$ .

### 3.4.4 Schutzwirkung von Häusern gegen luftgetragene Gefahrstoffe

Bei der **natürlichen Lüftung** von Räumen in Häusern kann man Luftwechselraten von  $n_{\text{Luft}} = 0,4/\text{h}$  für Kellerräume bis  $n_{\text{Luft}} = 2$  für andere Räume annehmen. Bei der **technischen Lüftung** werden erheblich höhere Luftwechselraten erreicht.

Eine Luftwechselrate von  $n_{\text{Luft}} = 1/\text{h}$  bedeutet, daß innerhalb einer Stunde das Luftvolumen einmal ausgetauscht wird.

Angaben aus Meßergebnissen zur Luftwechselrate in Wohngebäuden können der Literatur entnommen werden<sup>6</sup>. Bei den Messungen waren Fenster und Türen geschlossen. Der Einfluß der Windgeschwindigkeit (unter 4,5 m/s) auf die Luftwechselrate war gering.

Beispiele für Luftwechselraten:

Altbau	Massivhaus	Energiesparhaus
$n_{\text{Luft}} \leq 0,24 \text{ h}$	$n_{\text{Luft}} \leq 0,14 \text{ h}$	$n_{\text{Luft}} \leq 0,11 \text{ h}$

Durch den geringen Luftaustausch mit der Umgebung nimmt die Konzentration in Innenräumen gegenüber derjenigen außerhalb verzögert zu. Daraus ergibt sich insbesondere bei kurzfristigen äußeren Belastungen mit luftgetragenen, toxischen Gefahrstoffen eine bemerkenswerte Schutzwirkung. Sie ist um so besser, je geringer die Luftwechselrate ist. Insofern sind das Aufsuchen von Häusern, Abstellen von Belüftungs- und Klimaanlage sowie das Verschließen von Türen und Fenstern wirksame Schutzmaßnahmen bei Störfällen mit der Ausbreitung toxischer Stoffe über die Atmosphäre.

Für den Fall einer mit der Zeitkonstanten  $\tau$  ansteigenden äußeren Konzentration kann man das Verhältnis der Innenraumkonzentration  $C_i$  zur maximalen äußeren Konzentration  $C_a$  abschätzen.

Für den Zeitverlauf der äußeren Konzentration wird angenommen:

$$C_a(t) = C_{a\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (19)$$

Daraus ergibt sich für das Verhältnis der Innenraumkonzentration  $C_i$  zur maximalen äußeren Konzentration  $C_a$  (siehe auch Nr. 12 im Anhang 4):

$$\frac{C_i}{C_{a\infty}} = 1 - e^{-n_{\text{Luft}} \cdot t} + \frac{1}{1 - \frac{1}{n_{\text{Luft}} \cdot \tau}} \cdot \left(e^{-n_{\text{Luft}} \cdot t} - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (20)$$

Die Zeit  $t$  und die Zeitkonstante sind in Stunden einzusetzen. Die Luftwechselrate ist pro Stunde einzusetzen.

Die folgende Tabelle enthält einige Zahlenwerte für das Verhältnis der Innenraumkonzentration  $C_i$  zur maximalen äußeren Konzentration  $C_a$  im Fall  $n_{\text{Luft}} = 1/\text{h}$ .

<sup>6</sup> Zivilschutzforschung Projekt Nr. 940001266: Optimierung des Schutzes vor luftgetragenen Schadstoffen in Wohngebäuden. Februar 1997

Zeitkonstante $\tau$ in Stunden	Zeit $t$ in Stunden			
	0,25	0,5	0,75	1,00
0,1	0,144	0,327	0,475	0,591
0,2	0,098	0,262	0,415	0,542
0,3	0,074	0,214	0,360	0,490
0,4	0,059	0,180	0,315	0,442
0,5	0,049	0,155	0,278	0,400

Die Zeitkonstante  $\tau$  nimmt mit der Entfernung zur Quelle zu. Sie kann aus dem Zeitverlauf der Konzentration grob abgeschätzt werden. Sie ist in etwa der Zeitpunkt, bei dem die Konzentration 37 % ihres Maximalwertes erreicht hat. Auf den Abschnitt 12 im Anhang 4 wird verwiesen.

### 3.5 Belastungen durch Wärmestrahlung

#### Benötigte Angaben

Auftreffende flächenspezifische

Wärmeleistung (Bestrahlungsstärke):

$P''_{\text{Str}}$  in kW/m<sup>2</sup>

Dauer der Einwirkung:

$t_{\text{Str}}$  in s

Durch die auftreffende Wärmestrahlung kommt es zur Erwärmung der Oberflächen. Bei ausreichender Intensität und Dauer kann es bei brennbaren Stoffen zur Erwärmung der Oberflächen und in der Folge zur Selbstentzündung und zu Bränden kommen. Die Intensität der Wärmestrahlung (flächenspezifische Leistung) wird als Bestrahlungsstärke bezeichnet.

Die **Selbstentzündungsbedingungen ohne Schutzmaßnahmen und andere Effekte** sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Wirkung/Entzündung	Bestrahlungsstärke (kW/m <sup>2</sup> )	Einwirkungsdauer (s)
Maximale Sonneneinstrahlung	1,3	-
Platzen von Fensterscheiben	5,0	6
Kunstfaser	7,0	sofort
Papier	8,0 13,0	5 8
Schmieröl an Maschinen	9,2	-
Anstrichfarbe an Anlagenteilen	12,2	-
Baumwollgewebe	24,0	900
Ungestrichene Holzfaserplatte	25,0	900
Ungestrichenes Holz	32,0	900
Stahlkonstruktionen versagen	42,0	900
Duroplastischer Kunststoff	84,0	900

Die **hinsichtlich der Zulässigkeit kritischen Bestrahlungsstärken beliebiger Dauer**  $P''_{\infty}$  sind in der folgenden Tabelle angegeben.

<b>Zu schützendes Objekt</b>	<b>Kritische Bestrahlungsstärke (kW/m<sup>2</sup>)</b>
Grenze für nachteilige Wirkungen	1,6
Empfindliche Gebäude: Krankenhäuser, Altenheime, Schulen, Wohnhäuser	2,0
Öffentliche Straßen	4,5
<b>Grenze für wahrscheinliche Feuerübertragung</b>	<b>8,0</b>
Ungekühlte Lagertanks	10,0
Fabrikgebäude: Leitwarten, Werkstätten	12,6
Gekühlte Lagertanks	37,8

Bei Explosionen liegt die Dauer der Einwirkung der Strahlung im Bereich von 0,5 bis 15 s. Deshalb ist es von Interesse, wie die für beliebig lange Einwirkungsauern angegebenen kritischen Bestrahlungsstärken zur Beurteilung der Belastungen durch die Strahlung bei Explosionen herangezogen werden können.

Wenn man annimmt, daß die Selbstentzündung beim Erreichen einer bestimmten Temperatur der Oberfläche stattfindet und daß der Zeitverlauf annähernd eine Exponentialfunktion mit einer Zeitkonstanten  $\tau$  beschrieben werden kann, gilt auch:

$$P''_{\text{Str}}(t) = P''_{\infty, \text{zul}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (21)$$

Einen Anhaltspunkt für die Bestimmung der Zeitkonstanten kann aus der weiter obenstehenden Tabelle für die Selbstentzündung von Papier gewonnen werden.

Die Bestrahlungsstärke  $P''_{\infty}$  wird gleich derjenigen bei  $t = 540$  s gesetzt. Da die Bestrahlungsstärke bei 8 s bekannt ist, erhält man eine Bestimmungsgleichung für die Zeitkonstante:

$$8 = 13 \cdot \left(1 - e^{-\frac{8}{\tau}}\right)$$

Daraus ergibt sich  $\tau = 8,37$  s. Deshalb wird vorsichtig  $\tau = 8$  s festgelegt.

$$P''_{\text{Str}}(t) = P''_{\infty, \text{zul}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{8}}\right) \quad (22)$$

Im allgemeinen kann man für  $t$  die Dauer des Feuerballs einer Explosion  $t_{\text{fire}}$  einsetzen.

$$P''_{\infty, \text{ver}} = P''_{\infty, \text{zul}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t_{\text{fire}}}{8}} \right)^{-1} \quad (23)$$

### Warnung

Bei Explosionen von Freistrahlen und Schwergaswolken (UVCE) ist diese Abschätzung nicht plausibel, weil nach der Explosion mindestens die restliche Stoffmenge oberhalb der oberen Explosionsgrenze verbrennt und in Fällen mit kontinuierlicher Stofffreisetzung ein Folgebrand entsteht.

Falls die ungeschützte menschliche Haut betroffen ist, können unterschiedlich schwere Verletzungen (Verbrennungen) bis zum Tod bewirkt werden.

Die **Abhängigkeit der Zeitdauer  $t_{\text{Sch}}$  bis zum Erreichen der Schmerzgrenze von der Bestrahlungstärke  $P''_{\text{Str}}$**  ist in der folgenden Tabelle enthalten.

$P''_{\text{Str}}$ in kW/m <sup>2</sup>	1,7	2,3	2,9	4,7	6,9	9,5	11,7	19,9
$t_{\text{Str}}$ in s	60	40	30	16	9	6	4	2

Bei einer Bestrahlungstärke von 10,5 kW/m<sup>2</sup> kommt es nach 10 bis 12 s zur Blasenbildung auf der Haut. Der Tod tritt bei dieser Bestrahlungsstärke nach etwa 40 s ein.

Bis zu einer Bestrahlungstärke von 5 kW/m<sup>2</sup> ist ein kurzfristiger Feuerwehreinsatz möglich. In besonderen Schutzanzügen sind auch noch Belastungen mit 8 kW/m<sup>2</sup> zulässig.

**Für Menschen kann ein Bestrahlungsstärke von 1,6 kW/m<sup>2</sup> als Grenze für nachteilige Wirkungen betrachtet werden.**

## 3.6 Belastungen durch Druckwirkungen

### Benötigte Angaben

Positiver Spitzenüberdruck der Stoßwelle in Ausbreitungsrichtung:  $\Delta p$  in bar

Die Schäden durch die Druckwirkungen können vereinfacht anhand des positiven Spitzenüberdrucks der Stoßwelle in Ausbreitungsrichtung abgeschätzt werden. Dabei wird außer Acht gelassen, daß auch die Dauer und Form des Druckimpulses im Zeitverlauf eine Rolle spielen und daß auch Schäden durch den dem Überdruck folgenden Unterdruck, der erheblich länger anhält, verursacht werden können.

Die folgenden Angaben zur Abhängigkeit zwischen Schäden und Spitzenüberdrücken sind hauptsächlich eine Auswahl aus der umfangreicheren Zusammenstellung in einem für das UBA von der BAM erarbeiteten Forschungsbericht<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> BAM: "Mustersicherheitsanalyse nach Störfall-Verordnung für ein Sprengstofffabrik. Forschungsbericht 104 09 211, UBA-FB 92-026, 1992

**Glasscheiben** werden schon bei geringen Spitzenüberdrücken zerstört. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick.

Schadensbild	$\Delta p$ in bar	Schadensbild	$\Delta p$ in bar
Gelegentlicher Bruch großer unter Spannung stehender Scheiben	0,002	Bruch von 10 % der Scheiben	0,01
Glasbruch durch Schallwellen	0,003	Bruch von 75 % der Scheiben	0,03
Bruch kleiner unter Spannung stehender Scheiben	0,005	Bruch von 100 % der Scheiben	0,05

Den Zusammenhang zwischen **Schäden an Häusern** und den Spitzenüberdrücken veranschaulicht die nächste Tabelle.

Schadensbild	$\Delta p$ in bar	Schadensbild	$\Delta p$ in bar
Schäden an Fensterahmen, Türen, Dächern	0,005	Zerstörung von Wänden aus Ziegel- und Schlackesteinen	0,13
Geringe Schäden an Dächern	0,020	Zerstörung von 20 bis 30 cm dicken Ziegelsteinausfachungen	0,15
Gelegentliche Beschädigung von Fensterrahmen, Risse im Mauerputz	0,035	Mittlere Schäden an Fachwerkgebäuden	0,20
Zerstörung der Dächer und Wände von Holzhäusern	0,06	Zerstörung 24er Mauerwerk	0,25
Zerstörung Seitenwandverkleidungen	0,075	Schwere Schäden an Fachwerkgebäuden	0,31
Beschädigung des Außenputzes	0,085	Nahezu vollständige Zerstörung üblicher Gebäude	0,40
Zerstörung gemauerter Wände	0,10	Zerstörung 50er Mauerwerk	0,50

---

**Anmerkung:** In der Zusammenstellung im Bericht wurden die senkrecht reflektierten Stoßdrücke angegeben. Davon abweichend werden hier zweckmäßigerweise die halben Werte, die etwa dem Spitzenüberdruck der ungestörten Stoßwelle in Ausbreitungsrichtung entsprechen, verwendet.



Den Zusammenhang zwischen **Schäden an Anlagenteilen** und den Spitzenüberdrücken zeigt eine weitere Tabelle.

Schadensbild	$\Delta p$ in bar	Schadensbild	$\Delta p$ in bar
Stahlblechplatten verbeult	0,075	Eisenbahnwagen umgeworfen	0,46
Stahlrahmen von Skelettgebäuden leicht verformt	0,095	99 % Schaden an Tanks mit konischem Dach	0,55
Öltanks aufgerissen	0,215	Beladene Güterwagen umgestürzt	0,60
Zerstörung von Stahlbetonwänden	0,35	Beladene Güterwagen zerstört, 99 % Schaden an horizontal gelagerten Druckkesseln, chemischen Reaktoren und Wärmetauschern	0,75

Den Zusammenhang zwischen **Personenschäden** und den Spitzenüberdrücken enthält die abschließende Tabelle.

Schadensbild	$\Delta p$ in bar	Schadensbild	$\Delta p$ in bar
Unangenehme Knallwirkung tiefer Frequenz	0,0015	Untere Grenze Trommelfellriß	0,175
Sehr lauter Knall	0,003	Untere Grenze für Lungenschäden	0,85
Umstoßen von Personen	0,010	Untere Grenze für ernste Lungenschäden	1,85
Druckbezogener Grenzwert für Schäden durch Spreng- und Wurfstücke	0,015	Untere Letalitätsgrenze	2,05

Im Zusammenhang mit Personenschäden ist zu beachten, daß auch Glassplitter, Sprengstücke, Wurfstücke und Trümmer schwere Verletzungen verursachen können.