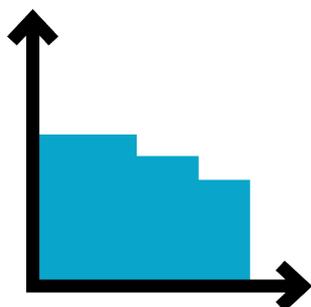
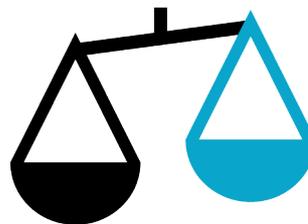
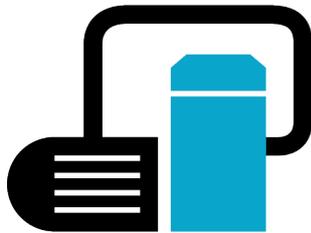


# Störfallvorsorge bei Kälteanlagen

Welche Abklärungen sind wann zwingend?

Was ist der Stand der Sicherheitstechnik?

Wie werden Schadenausmass und Risiken korrekt ermittelt?



## Impressum

### Auftraggeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)  
Abteilung Gefahrenprävention  
Sektion Störfall- und Erdbebenvorsorge  
3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt,  
Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)

Kantone AG, BE, BS, LU, ZH

### Auftragnehmer

Ernst Basler + Partner AG  
Zollikerstrasse 65  
8702 Zollikon  
Telefon +41 44 395 11 11  
info@ebp.ch  
www.ebp.ch

### Projektteam und Autoren

Ernst Basler + Partner AG:  
Armin Feurer  
Peter Christen  
Peter Locher

Walter Wettstein AG Kältetechnik,  
Vertreter Schweizerischer  
Verein für Kältetechnik (SVK):  
N. Heinemann

Stand: Mai 2015

## Expertengruppe

Bundesamt für Umwelt (BAFU)  
**Dr. M. Merkofer (Projektleitung)**  
**M. Hösli**  
**B. Horisberger**

Amt für Verbraucherschutz des Kantons Aargau,  
Chemiesicherheit  
**Dr. R. Dumont**

Kantonales Laboratorium Basel-Stadt,  
Chemie- und Biosicherheit  
**B. Grenacher**

beco Berner Wirtschaft  
**A. Sopranetti**

Service de l'environnement Fribourg  
**A. M. Fasel**

Amt für Umwelt und Energie des Kantons Luzern,  
Risikoversorge und Tankanlagen  
**D. Burkart**

Amt für Umwelt des Kantons Solothurn,  
Abteilung Stoffe  
**R. Burren**

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft  
des Kantons Zürich (AWEL)  
**Dr. J. Hansen**

Schweizerischer Verein für Kältetechnik (SVK)  
**R. Dumortier**

SSP Kälteplaner AG,  
Vertretung Schweizerischer  
Verein für Kältetechnik (SVK)  
**B. Schmutz**

Swiss TS  
**F. Knecht**

Schweizerische Gesellschaft  
für Kunsteisbahnen (GSK)  
**A. Ayer**

## Vorwort

Die Störfallverordnung (StFV) bezweckt den Schutz der Bevölkerung und der Umwelt vor schweren Schädigungen durch Störfälle, die beim Betrieb von Anlagen entstehen können. Zu den inhaltlichen Schwerpunkten der StFV zählt unter anderem das Erfassen möglicher Risiken für Bevölkerung und Umwelt im Umgang mit Stoffen, Zubereitungen oder Sonderabfällen. Die Oberaufsicht beim Vollzug der StFV hat das BAFU. In dieser Funktion beobachtet es die Entwicklungen im Bereich der chemischen Risiken, wirkt auf einen gesamtschweizerisch einheitlichen Vollzug der StFV hin und erarbeitet in Zusammenarbeit mit Vertreterinnen und Vertretern der zuständigen kantonalen Vollzugsbehörden, der Industrie und der Wissenschaft Grundlagen zur Harmonisierung des Vollzuges.

Auf den 1.12.2013 wurden in der Chemikalienrisikoreduktionsverordnung (ChemRRV) die Herstellung und das Inverkehrbringen von Anlagen mit synthetischen Kältemitteln ab einer gewissen Kälteleistung verboten. Als Konsequenz davon werden die aus Störfallsicht relevanten natürlichen Kältemittel Ammoniak und Kohlenwasserstoffe (KW) vermehrt verwendet werden.

Da Kälteanlagen bereits heute in grösserer Zahl der StFV unterstehen und die Anzahl solcher Anlagen in Zukunft weiter zunehmen wird, hat das BAFU mit den im Impressum erwähnten Vollzugsstellen und der Industrie beschlossen, zusammen einen Bericht zu erstellen, welcher den Vollzug der StFV bei Kälteanlagen regelt. Dieser Bericht trägt ebenfalls dem Wunsch der kantonalen Vollzugsstellen Rechnung, den Vollzug der Störfallvorsorge in diesem Bereich zu harmonisieren.

Ich danke allen, die bei der Erarbeitung mitgewirkt haben, und hoffe, dass dieser Bericht einen wesentlichen Beitrag zu einer fundierten Beurteilung bei Kälteanlagen und zu einem optimalen Schutz der Bevölkerung und der Umwelt leisten kann.

**Josef Hess, Vizedirektor  
Bundesamt für Umwelt (BAFU)**

# Inhalt

	<b>Einleitung</b>	
	Zielsetzung und Aufgabenstellung	6
	Verschiedene Kältemittel	7
	Fokus	8
	Vollzug der StFV bei Ammoniak-Kälteanlagen: genereller Ablauf	3
	<b>1 <u>Anlagentypen</u></b>	
	1.1 Bauformen	11
	1.2 Typische Anwendungsgebiete von Kälteanlagen	16
	<b>2 <u>Unterstellung unterhalb der Mengenschwelle</u></b>	
	2.1 Einleitung	17
	2.2 Kälteanlagen unterhalb der Mengenschwelle: störfallrelevant oder nicht?	18
	2.3 Kälteanlagen in öffentlich zugänglichen Gebäuden	27
	2.4 Kunsteisbahnen	28
	<b>3 <u>Stand der Sicherheitstechnik</u></b>	
	3.1 Einleitung	30
	3.2 Anlagen mit Ammoniak als Kältemittel	31
	3.3 Anlagen mit Kohlendioxid und HFKW als Kältemittel	37
	3.4 Regeln der Technik und Stand der Sicherheitstechnik richtig umsetzen	38
	3.5 Weiterführende Sicherheitsmassnahmen	38
	<b>4 <u>Kurzbericht: Schadensausmass abschätzen</u></b>	
	4.1 Zweck und Umfang	40
	4.2 Zu untersuchende Ereignistypen	41
	4.3 Das Vorgehen im Überblick	43
	4.4 Freisetzung von Ammoniak	44
	4.5 Ausbreitung der toxischen Wolke	54
	4.6 Einschätzung des Schadensausmasses	55



## **5 Systemvergleich von Kälteanlagen**

- 5.1 Wann ist das sinnvoll? 59
- 5.2 Umfang: Kurzüberblick ermöglichen 60
- 5.3 Schematisches Beispiel 62
- 5.4 Interpretation: Anpassungen zielführend,  
wirtschaftlich tragbar und verhältnismässig? 63



## **6 Risikoermittlung**

- 6.1 Zweck und Umfang 64
- 6.2 Methodik 64
- 6.3 Zu untersuchende Ereignistypen 65
- 6.4 Grundlagen zur Häufigkeitsermittlung 65
- 6.5 Freisetzungsmenge bzw. -rate 68
- 6.6 Ausbreitung der Gaswolke 69
- 6.7 Ausmasseinschätzung 69

**Glossar** 73

Literaturverzeichnis 75

## **Anhänge**

- A1 Unfallbeispiele 78
- A2 Auswertung bestehender Risikoermittlungen  
und Kurzberichte 79
- A3 Herleitung der Unterstellungskriterien 82
- A4 Gebäudeschutz 97
- A5 Ausbreitung einer toxischen Wolke:  
Annahmen auf Stufe Kurzbericht 101

# Einleitung

## Zielsetzung und Aufgabenstellung

Welche Annahmen sind für die Abklärungen im Rahmen des Störfallvollzuges bei Kälteanlagen sinnvoll? Und wann ist es angebracht, Kälteanlagen auch unterhalb der Mengenschwelle der StfV zu unterstellen bzw. wann nicht? Bisher fehlten praxisgerechte Kriterien, welche die kantonalen Störfachstellen und die Verfasser entsprechender Berichte bei diesen Entscheidungen unterstützen. Hier setzt dieser Bericht an: Er soll zu einer Harmonisierung der Störfallvorsorge bei Kälteanlagen beitragen und das Bewusstsein in der Branche für die Störfall-Problematik schärfen. Dazu hat eine breit abgestützte Arbeitsgruppe Grundlagen zu folgenden Themen erarbeitet:



### **Kapitel 1 – Anlagentypen**

Kälteanlagen sind unterschiedlich gebaut und ihr Anwendungsspektrum ist breit. Dieses Kapitel klärt die wichtigsten Grundlagen: Welche allgemeinen Typen von Kälteanlagen gibt es und wo werden diese eingesetzt? Zudem wird auf deren Stellenwert im Rahmen der Störfallvorsorge eingegangen.



### **Kapitel 2 – Unterstellung unterhalb der Mengenschwelle**

Soll eine Ammoniak-Kälteanlage der StfV unterstellt werden, obwohl die Mengenschwelle nicht überschritten wird? Dieses Kapitel zeigt ein pragmatisches Vorgehen für eine differenzierte Beurteilung auf.



### **Kapitel 3 – Stand der Sicherheitstechnik**

Die Regeln der Technik und der Stand der Sicherheitstechnik entwickeln sich stetig weiter. Dieses Kapitel fasst die für die Störfallvorsorge wichtigsten Punkte zusammen und zeigt auf, in welchen Dokumenten die ausführlichen Anforderungen für Kälteanlagen zu finden sind und wie diese Anforderungen bei bestehenden und neuen Anlagen umzusetzen sind.



### **Kapitel 4 – Kurzbericht: Schadensausmass abschätzen**

Auf Stufe Kurzbericht muss das maximal zu erwartende Schadensausmass ermittelt werden. Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehen dazu. Grafiken und Tabellen helfen, das Ausmass mit einfachen Mitteln richtig abzuschätzen. Betreiber und Fachplaner sollten damit in der Lage sein, die Einschätzung in den meisten Fällen ohne externe Unterstützung durchzuführen. Die Dokumentation technischer Grundannahmen zeigt auf, wie auch Spezialfälle in angemessener Tiefe zu beurteilen sind.



### **Kapitel 5 – Systemvergleich von Kälteanlagen**

Weist eine Anlage ein grosses Störfallpotenzial auf, sind auch Anpassungen am Anlagenlayout zur Erhöhung der Sicherheit zu prüfen. Als Grundlage zur Abwägung der Verhältnismässigkeit solcher Massnahmen wird hier eine einfache Gegenüberstellung der infrage kommenden Varianten anhand von verschiedenen Parametern angeregt. Diese Angaben sollen ebenfalls einen Denkprozess anregen, ob die Störfallsicherheit mit verhältnismässigen Anpassungen an der Anlage erhöht werden kann.



## **Kapitel 6 – Risikoermittlung**

Wie ist beim Erarbeiten einer Risikoermittlung gemäss StFV grundsätzlich vorzugehen? Dieses Kapitel erläutert das generelle Vorgehen, welche Ereignisse berücksichtigt werden müssen, wo man methodische und Datengrundlagen zur Ausmass- und Wahrscheinlichkeitsberechnung findet und welche Aspekte gegenüber dem Kurzbericht genauer zu untersuchen sind.

## Verschiedene Kältemittel

Für den Betrieb von Kälteanlagen werden verschiedene Kältemittel mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen eingesetzt. Die häufigsten Kältemittel sind:

### **Ammoniak**

Dies ist in der Schweiz das am meisten eingesetzte Kältemittel und kommt insbesondere auch bei grösseren Anlagen zur Anwendung. Schätzungsweise 90 bis 95 % der Industrieanlagen (mit Leistungen ab 400 kW) werden damit betrieben. Wegen seiner Toxizität birgt Ammoniak ein Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt.

Gemäss einer Auswertung des eidgenössischen Risikokatasters (ERKAS) von 2009 gibt es in der Schweiz heute ca. 150 Kälteanlagen, welche die Mengenschwelle gemäss StFV für Ammoniak (2000 kg) überschreiten und ca. 10 Betriebe, die nach Art. 1 Abs. 3 der StFV unterstellt worden sind. Neue Anlagen enthalten heutzutage nur selten über 2000 kg Ammoniak.

Aufgrund des Verbots von HFKW als Kältemittel in der revidierten ChemRRV (Inkraftsetzung auf den 1.12.2013, Lit. [2]) ist zu erwarten, dass zukünftig bei noch mehr Anlagen Ammoniak als Kältemittel eingesetzt werden wird.

### **CO<sub>2</sub>**

Die Anwendung von CO<sub>2</sub> als Kältemittel ist tendenziell steigend. Die Kälteleistung der Anlagen, die damit betrieben werden, bewegt sich hauptsächlich zwischen 5 bis 100 kW. CO<sub>2</sub> wird insbesondere auch zur Tiefkühlung eingesetzt.

CO<sub>2</sub> als Kältemittel ist aus Sicht des Arbeitnehmerschutzes nicht in jedem Fall ein geeigneter Ersatzstoff für Ammoniak. Insbesondere Personen in Gebäuden können einer Gefährdung ausgesetzt sein: Es kann in hohen Konzentrationen erstickend wirken. Da es geruchlos ist, wird eine gefährliche Situation aber nicht wahrgenommen. Alle Versuche für eine wirkungsvolle und kosteneffiziente Odorierung von CO<sub>2</sub> sind bisher fehlgeschlagen.

### **Propan**

Propan ist in der Schweiz in Kälteanlagen nicht nennenswert verbreitet. Die hierzulande installierten Anlagen weisen Mengen von maximal ca. 30 kg Propan auf und sind somit nicht relevant für die Störfallvorsorge. Es werden kaum neue Anlagen mit Propan gebaut.

### **HFKW**

Anlagen mit HFKW (teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe) werden zukünftig nicht im grösseren Leistungsbereich vertreten sein, da sie nach der Inkraftsetzung der revidierten ChemRRV (auf den 1.12.2013, Lit. [2]) nur noch in Ausnahmefällen und im Bereich tiefer Leistung bewilligungsfähig sind.

## **Fokus**

Ammoniak hat aufgrund des Gefahrenpotenzials und der Anzahl Anlagen, die dieses Kältemittel enthalten, zurzeit die grösste Störfallrelevanz. Deshalb wird in diesem Dokument der Fokus auf dieses Kältemittel gerichtet. Auch eine signifikante Gefährdung der Umwelt im Sinne der StFV (d.h. ohne Treibhausgasproblematik) geht nur von Ammoniak aus. Da eine schwere Schädigung der Umwelt jedoch in der Regel nur bei wassergekühlten Anlagen möglich ist, werden die Umweltrisiken nur am Rande thematisiert.

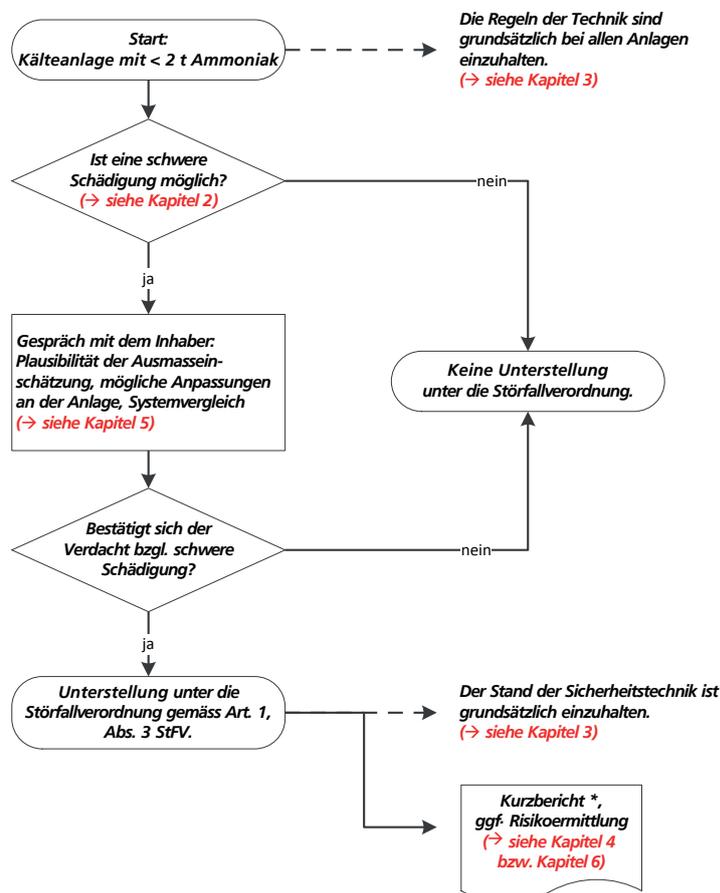
Die Störfallvorsorge berücksichtigt grundsätzlich nur Personen, welche nicht für das jeweilige Unternehmen arbeiten, denn Betriebsmitarbeitende fallen in den Bereich des Arbeitnehmerschutzes. Sind Drittpersonen innerhalb des Betriebsareals von einem Störfall betroffen, so sind diese in der Einschätzung des Schadenausmasses zu berücksichtigen, z.B. Sporttreibende oder Zuschauer in Kunsteisbahnen und Eisstadien oder Patienten in Spitälern mit Kälteanlagen oder Wärmepumpen. Der vorliegende Bericht trägt diesem Umstand Rechnung.

## **Vollzug der StFV bei Ammoniak-Kälteanlagen: genereller Ablauf**

### **Anlagen mit weniger als 2 t Ammoniak**

Kälteanlagen mit Ammoniakfüllmengen von weniger als 2 t unterstehen grundsätzlich nicht der StFV. Wenn die Behörde aufzeigen kann, dass eine solche Anlage ihre Umgebung im Ereignisfall dennoch schwer schädigen könnte, muss sie den Betrieb nach Art. 1, Abs. 3 StFV unterstellen. Abbildung 1 zeigt wie die Behörde beurteilen kann, ob dies angebracht ist.

Abbildung 1: Anlagen mit weniger als 2 t Ammoniak: Vorgehen in der Störfallvorsorge.



\* In Absprache mit der Behörde kann auch direkt eine Risikoermittlung durchgeführt werden, wenn durch den Kurzbericht keine zusätzlichen Erkenntnisse zu erwarten sind.

Ob eine schwere Schädigung auch bei Anlagen mit weniger als 2 t Ammoniak möglich ist, kann anhand des einfachen Modells in [Kapitel 2](#) beurteilt werden. Ist dies der Fall, kann der Inhaber nach Absprache mit der zuständigen Behörde gegebenenfalls auf das Erstellen eines Kurzberichts verzichten, wenn durch diesen keine neuen Erkenntnisse zu erwarten sind. Er kann dann direkt eine Risikoermittlung erstellen.

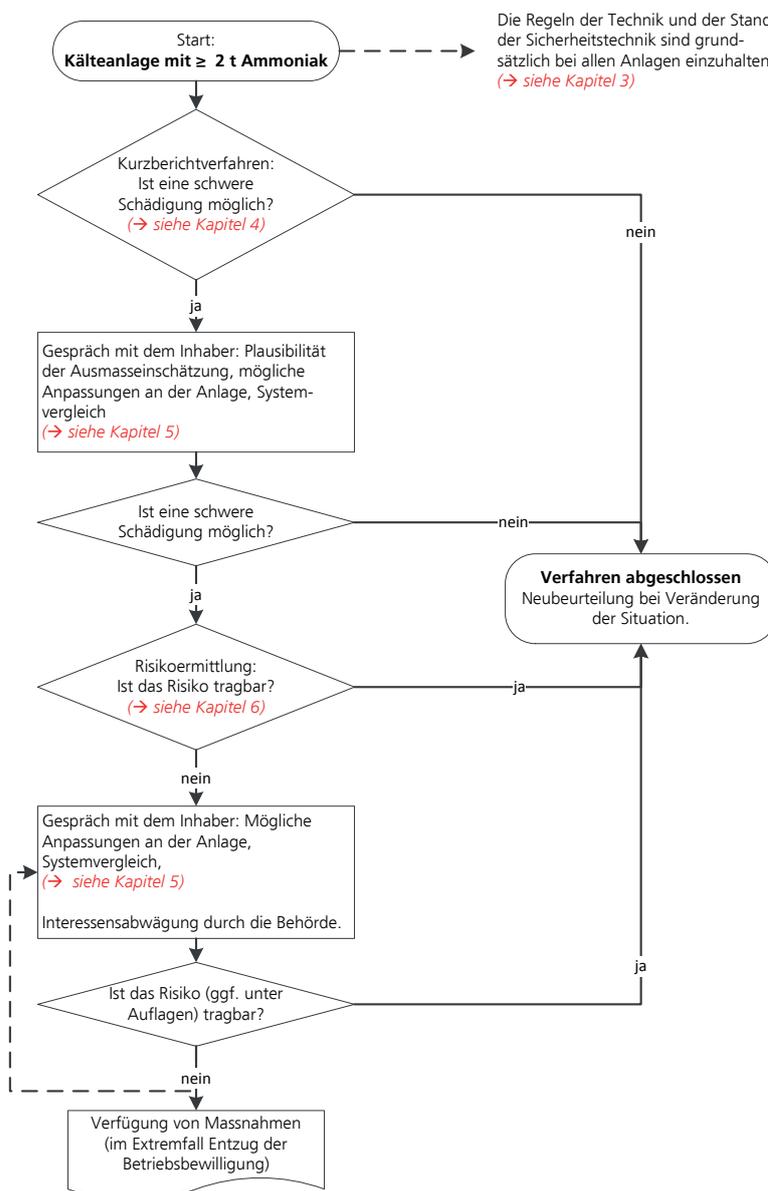
Damit die Störfallvorsorge frühzeitig in Planungsprozesse von Kälteanlagen einfließen kann, sollten die Vollzugsstellen einen internen Prozess entwickeln, welcher die Prüfung der Baugesuche von Anlagen mit weniger als 2 t Ammoniak ermöglicht. Im Weiteren sind auch die Anlagenbetreiber und Anlagenplaner angehalten, mit den in

Abbildung 1 genannten Hilfsmitteln Neubauprojekte proaktiv zu bewerten. Gegebenenfalls sollten sie frühzeitig Kontakt mit den Vollzugstellen zur Störfallvorsorge aufnehmen, um unnötigen Projektverzögerungen vorzubeugen und den planerischen und baulichen Mehraufwand zu minimieren.

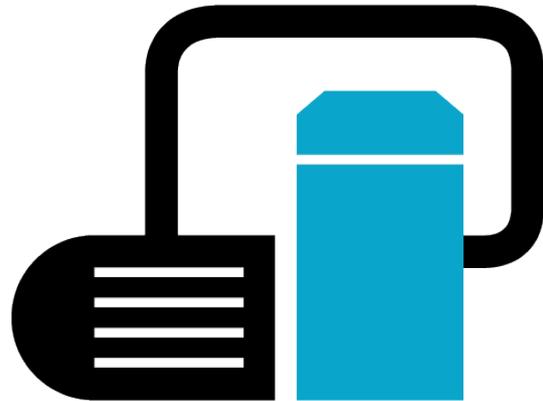
### Anlagen mit über 2 t Ammoniak

Betriebe, auf deren Areal gesamthaft über 2 t Ammoniak gelagert wird, unterstehen der StfV, da die Mengenschwelle überschritten wird. Das allgemeine Vorgehen ist in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2: Anlagen mit über 2 t Ammoniak: Vorgehen in der Störfallvorsorge.



# 1 Anlagentypen



Kälteanlagen unterscheiden sich nicht nur in ihrer Bauform voneinander, sondern auch in ihrer Anwendung. Dieses Kapitel zeigt die grundlegenden Kreislauftypen, wo sie zum Einsatz kommen und was dies für die Störfallvorsorge heisst.

## 1.1 Bauformen

Die wichtigsten Kreislauftypen sind in der Wegleitung des BAFU zur «Bewilligung von Anlagen mit in der Luft stabilen Kältemitteln» zusammengefasst (Lit. [7]). Im Folgenden sind die Kreislauftypen für Ammoniak-Kälteanlagen wiedergegeben.

### Legende

- Kältemittelkreislauf (Ammoniak)  
mit Kälteerzeugung
- Kältemittelkreislauf (CO<sub>2</sub>)  
mit Kälteerzeugung
- Kälteträgerkreislauf  
(z.B. Ethylenglykol/Wasser/CO<sub>2</sub>)
- Wärmeträgerkreislauf  
(z.B. Ethylenglykol/Wasser)



Abbildung 3: Der gesamte Kreislauf ist mit Ammoniak gefüllt. (Typ 1)

Typ 1

Direktverflüssigung

Direktverdampfung

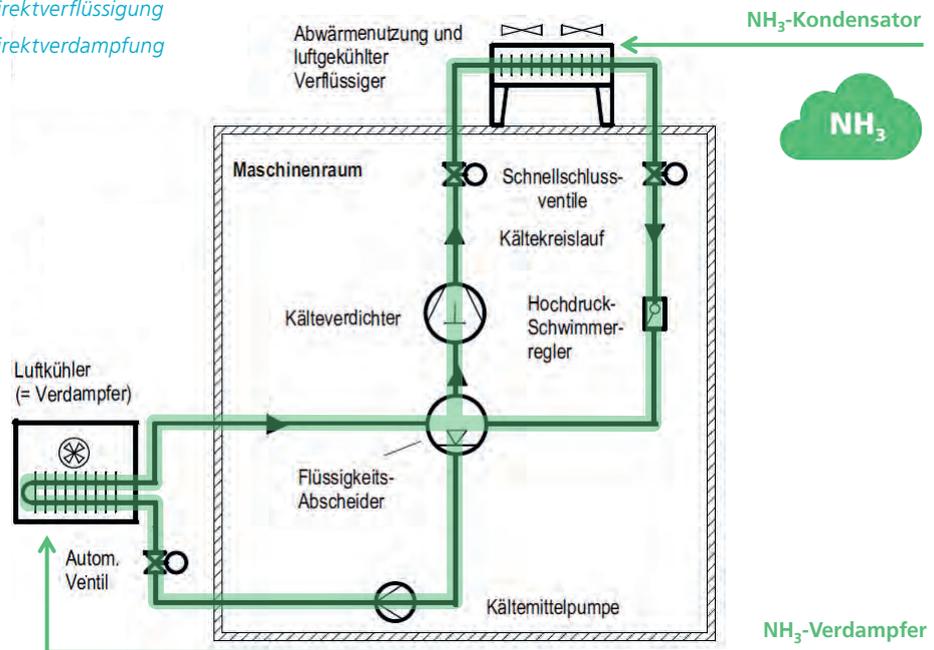


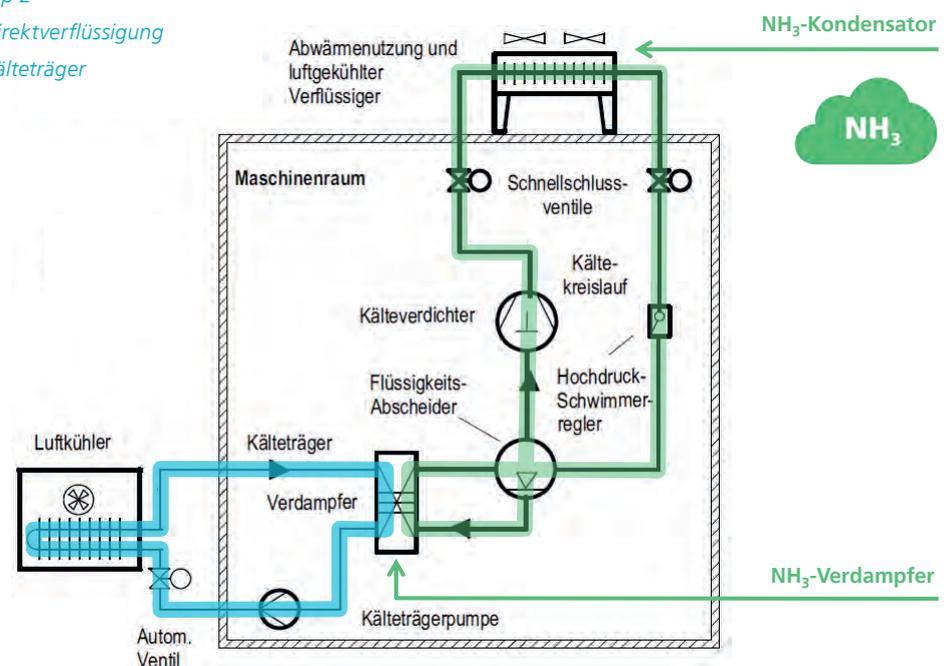
Abbildung 4: Die Kälteabgabe erfolgt über einen sekundären Kälte-träger-Kreislauf.

Die Rückkühlung des Ammoniak-Kreislaufs erfolgt direkt mit Luft bzw. Wasser. (Typ 2)

Typ 2

Direktverflüssigung

Kälte-träger



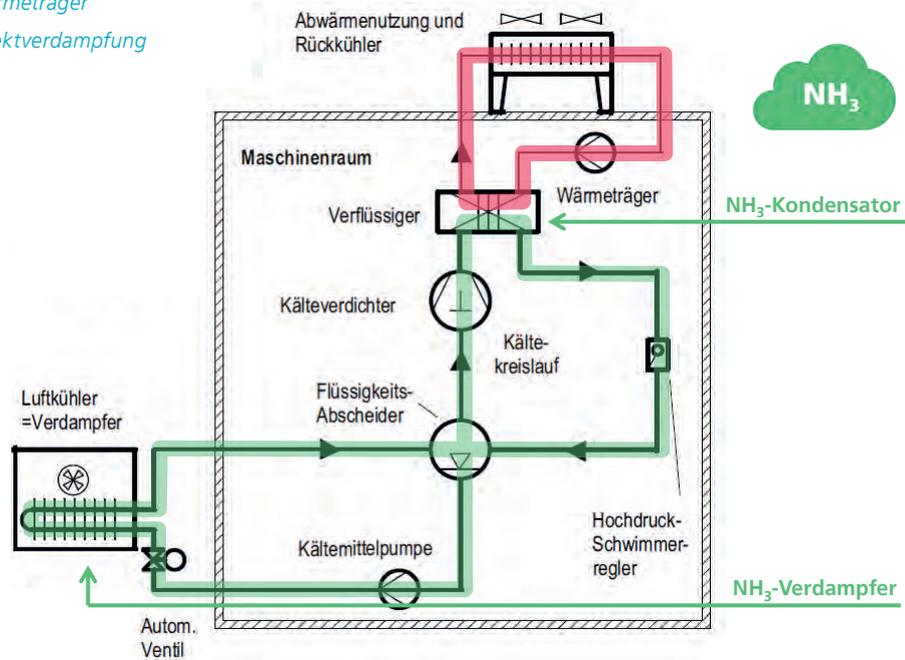


**Abbildung 5:** Die Kälteabgabe erfolgt direkt über den Ammoniak-Kreislauf. Dessen Rückkühlung erfolgt über einen sekundären Wärmeträger-Kreislauf. (Typ 3)

Typ 3

Wärmeträger

Direktverdampfung

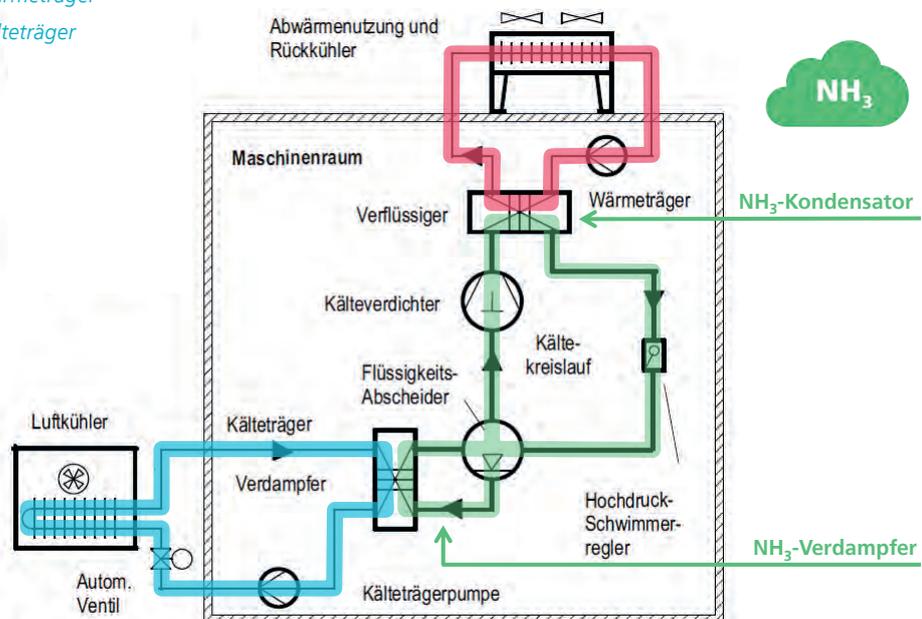


**Abbildung 6:** Nur die Kältemaschine selbst ist mit Ammoniak gefüllt. Sowohl die Kälte als auch die Wärmeabgabe erfolgen jeweils über einen sekundären Kreislauf. (Typ 4)

Typ 4

Wärmeträger

Kälteträger



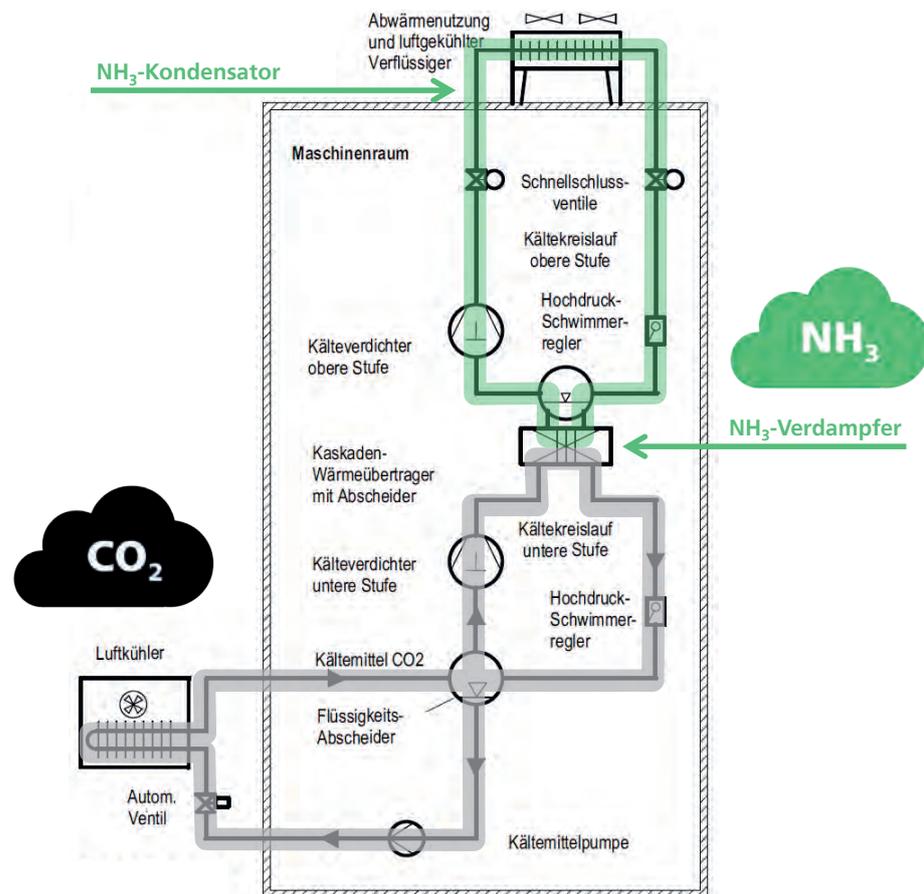


**Abbildung 7: Die untere Stufe der Anlage wird mit CO<sub>2</sub> als verdampfendes Kältemittel betrieben. Die Abwärme dieser Stufe wird mit einer Ammoniak-Anlage abgeführt. (Typ 5)**

Typ 5

Direktverflüssigung

Direktverdampfung CO<sub>2</sub>



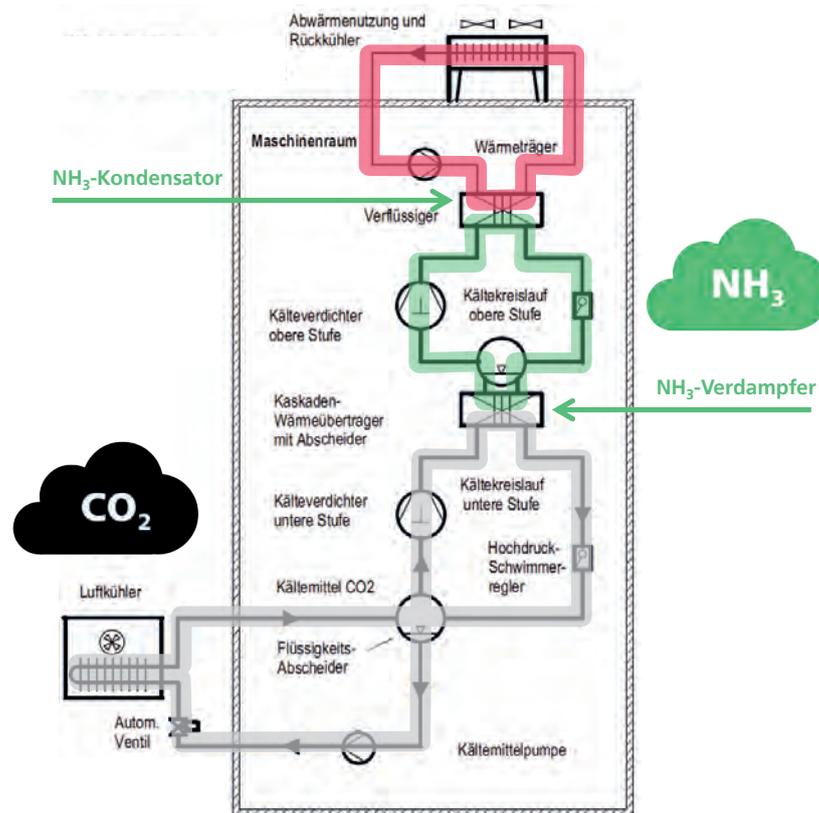


**Abbildung 8:** Die untere Stufe der Anlage wird mit  $\text{CO}_2$  als verdampfendes Kältemittel betrieben. Die Abwärme dieser Stufe wird mit einer Ammoniak-Anlage abgeführt. Die Wärmeabgabe erfolgt wiederum über einen sekundären Wärmeträger-Kreislauf. (Typ 6)

*Typ 6*

*Wärmeträger*

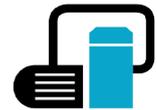
*Direktverdampfung  $\text{CO}_2$*



Luftgekühlte Kälteanlagen, vollständig im Freien aufgestellt: entspricht in der Regel einem Typ 2 oder 4 (kein separates Schema vorhanden – vgl. Grafiken zu diesen Typen).

*Typ 7*

*Luftgekühlte Kälteanlagen,  
vollständig im Freien aufgestellt  
(Keine schematische Darstellung)*



## 1.2 Typische Anwendungsgebiete von Kälteanlagen

Das Anwendungsspektrum von Kälteanlagen ist gross. Der Übersicht halber unterscheidet dieser Bericht zwischen denselben Anwendungsgebieten wie die revidierte Chem-RRV (Inkraftsetzung auf den 1.12.2013, Lit. [2]).

### **Klimakälteanlagen**

Klimakälteanlagen werden zur Klimatisierung von Räumen eingesetzt; zum Beispiel in grossen Bürogebäuden, Einkaufszentren, Rechenzentren, etc. Sie weisen in der Regel eine relativ geringe Leistung auf. Die Standardbauweise für derartige Anlagen in Europa und in der Schweiz ist der Kreislauf-Typ 2. Gelegentlich ist auch der Typ 4 anzutreffen. Die Typen 1 und 3 kommen nur in Einzelfällen zur Anwendung.

### **Gewerbekälteanlagen**

Als Gewerbe bezeichnet man Betriebe, deren Kundschaft Endverbraucher sind. Typische Vertreter dieser Gruppe sind kleine Metzgereien, Lebensmittelgeschäfte, etc. In Gewerbebetrieben werden meist Direktverdampfungsanlagen eingesetzt (Typ 1 oder 3). In der Regel handelt es sich um Anlagen mit einer sehr geringen Leistung (1 bis max. 200 kW) und entsprechend kleinen Mengen an Kältemittel (< 1 t). Diese Anlagen werden zunehmend mit CO<sub>2</sub> betrieben.

### **Industriekälteanlagen**

Das Leistungsspektrum von industriell eingesetzten Kälteanlagen ist sehr breit. Sie werden sowohl im Bereich der Pluskühlung (über 0°C) als auch in der Minuskühlung (unter 0°C) eingesetzt. Typische Anwendungsgebiete für diese Anlagen sind Grossmetzgereien, grosse Lebensmittel-Verteilzentren, der Zwischenhandel, etc. Anlagen in diesem Bereich entsprechen meist dem Kreislauftyp 2 für Plusanlagen bzw. Typ 5 für Minusanlagen. Die Ammoniak-Mengen im Kreislauf können 2t erreichen und in Einzelfällen auch überschreiten. Meist liegen die Mengen allerdings etwas tiefer.

### **Kunsteisbahnen**

Bei Kunsteisbahnen beträgt die Kälteleistung je überdachtes Eisfeld (40 x 60 m) in der Regel ca. 400 kW. Bei Indirektsystemen mit CO<sub>2</sub> oder Ethylenglykol/Wassergemisch als Kälte-träger und Evaporativkondensatoren (Typ 2 oder 5) beträgt die Füllmenge ca. 300 bis 500 kg Ammoniak pro Feld.

### **Wärmepumpen**

Für die Störfallvorsorge sind nur grössere Wärmepumpen relevant, welche beispielsweise zur Versorgung von Grossüberbauungen eingesetzt werden. Ammoniak-Wärmepumpen dieser Kategorie weisen eine Wärmeleistung von 500 bis 10000 kW auf. Sie sind fast ausnahmslos wassergekühlt. Für eine Anlage mit 500 kW Leistung liegt die Ammoniak-Füllmenge im Bereich von 50 bis 100 kg, für 1000 kW Leistung bei rund 300 bis 500 kg. Diese Füllmengen können je nach Bauart des Wärmetauschers und dessen Grädigkeit variieren. Für Wärmepumpen wird in der Regel ein Kreislauftyp 4 realisiert, teilweise auch die Typen 1, 2 oder 3. Es sind aber auch Kombianlagen mit den Kreislauf-typen 5 und 6 gebräuchlich.

## 2 Unterstellung unterhalb der Mengenschwelle



### 2.1 Einleitung

Gemäss den geltenden Mengenschwellen (Lit. [5]) unterstehen Betriebe mit einer gesamthaften Lagermenge von  $\geq 2000$  kg Ammoniak der StfV, auch wenn diese Menge über verschiedene Betriebsbereiche verteilt ist. Wird die Mengenschwelle überschritten, ist in jedem Fall das ordentliche Verfahren gemäss StfV einzuleiten. Nach Art. 1 Abs. 3 StfV können aber auch Betriebe mit einer Lagermenge von weniger als 2000 kg Ammoniak der StfV unterstellt werden, wenn sie auf Grund ihres Gefahrenpotenzials die Bevölkerung oder die Umwelt schwer schädigen können. Derzeit gibt es keine praxisgerechten Kriterien zur Unterstützung der kantonalen Störfachstellen bei ihrer Entscheidung, in welchen Fällen eine Unterstellung von Kälteanlagen mit geringen Ammoniak-Mengen unter die StfV zweckmässig ist. Dieser Bericht schliesst diese Lücke. Er beschreibt die Beurteilungskriterien, welche die folgenden Anforderungen erfüllen sollen:

- Sie sind in der Praxis, z.B. bei der Prüfung eines Baugesuches, einfach anwendbar.
- Es sollen nur Anlagen unterstellt werden, bei denen eine schwere Schädigung der Bevölkerung bei typischen Störfallszenarien möglich ist. D.h. bei Szenarien, wie sie auf Stufe Kurzbericht untersucht werden und welche unter den typischerweise zu erwartenden Randbedingungen möglich sind (z. B. bezüglich Meteorologie, Personenexposition<sup>1</sup>).

Um den kantonalen Vollzug bezüglich Unterstellung von Ammoniak-Kälteanlagen unterhalb der Mengenschwelle zu harmonisieren, wird im Folgenden ein Vorgehen mit einfachen Kriterien zur Beurteilung der Unterstellungsfrage vorgeschlagen.

<sup>1</sup> Es soll grundsätzlich vermieden werden, dass durch zu konservative Annahmen, die den Kriterien hinterlegt werden, Anlagen unterstellt werden, bei welchen eine schwere Schädigung nicht zu erwarten ist (Stufe Kurzbericht), oder so selten auftritt, dass die Risiken klar als tragbar zu beurteilen sind (Stufe Risikoermittlung).



## 2.2 Kälteanlagen unterhalb der Mengenschwelle: störfallrelevant oder nicht?

### 2.2.1 Das Vorgehen im Überblick

Der Ansatz beinhaltet drei massgebliche Schritte:

#### **Schritt 1: Bestimmung der Freisetzungsrate**

Für die Anlage wird nach einfachen Regeln ein realistisches «worst case» Freisetzungsszenario identifiziert. Die Freisetzungsrate als zentrales Merkmal und die darauf folgende Gasausbreitung hängen von der vorhandenen Ammoniakmenge sowie dem betroffenen Anlagenteil bzw. dem Ort der Freisetzung ab.

#### **Schritt 2: Ermittlung des Gefährdungsbereiches und des darin vorhandenen Personenaufkommens.**

Abhängig von der Freisetzungsrate, die in Schritt 1 ermittelt wurde, wird anhand einer Tabelle der Ausbreitungsbereich der toxischen Wolke bestimmt. Anschliessend wird innerhalb des Gefährdungsbereiches das maximale Personenaufkommen im Freien abgeschätzt.

#### **Schritt 3: Entscheid bzgl. Unterstellungunter die StFV**

Liegt das Personenaufkommen über dem Grenzwert, ist unter realistischen Randbedingungen eine schwere Schädigung möglich. In diesem Fall wird eine Unterstellung der Anlage unter die StFV empfohlen.

### 2.2.2 Notwendige Daten

Für den Entscheid, ob eine Unterstellung einer Ammoniak-Kälteanlage unter die StFV vorgenommen werden soll oder nicht, müssen folgende Angaben bekannt sein:<sup>2)</sup>

- Gesamtmenge Ammoniak in der Anlage  
Für die Beurteilung ausschlaggebend ist die grösste zusammenhängende Menge; separate Kältemittel-Kreisläufe bzw. Kälteanlagen werden getrennt voneinander betrachtet.
- Bauform bzw. Anlagentyp (vgl. Kapitel 1.1)

<sup>2)</sup> Mehrere getrennte Kälteanlagen innerhalb eines Betriebs sind einzeln zu beurteilen (evtl. Beschränkung auf kritischste Anlage, falls diese einfach zu identifizieren ist). Eine gleichzeitige Freisetzung von Ammoniak aus mehreren Anlagen wird auf dieser Stufe nicht berücksichtigt.



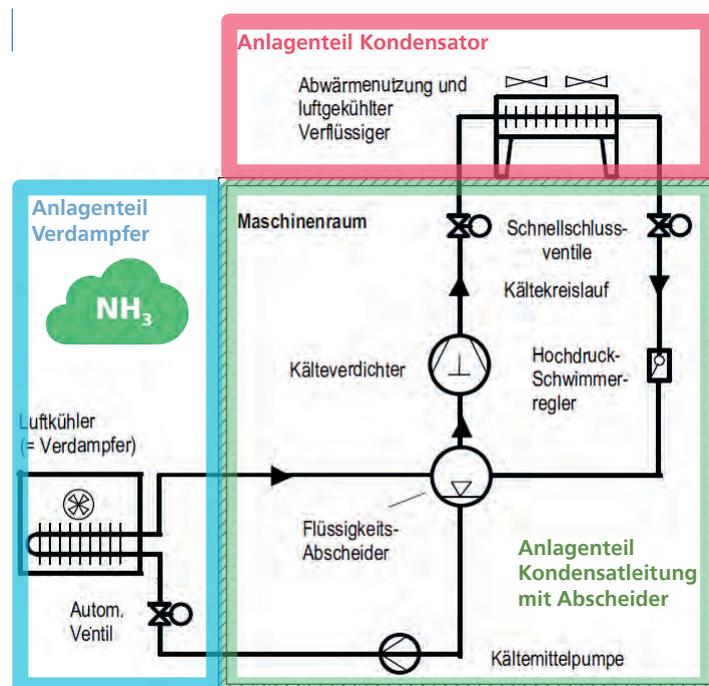
- Platzierung von Verdampfer, Kondensatleitung mit Abscheider und Kondensator auf dem Gelände (vgl. Abbildung 9). Es muss sowohl der Standort bekannt sein als auch unterschieden werden, ob sich der Anlagenteil im Freien, in einem an die Aussenfassade angrenzenden Raum oder in einem gefangenen Raum befindet; vgl. hierzu Kapitel 2.2.3 und Abbildung 10.<sup>3)</sup>
- Standort der Entlüftungsöffnung, über welche allenfalls Ammoniak aus dem Maschinenraum ins Freie gelangt.
- Zahl der Anwohner sowie Arbeitsplätze (ohne Betriebsmitarbeitende des Kälteanlagenbetreibers) im Umkreis von bis zu 140 m um die untersuchte Kälteanlage, evtl. Angaben zu weiteren Nutzungen (Einkaufscenter, Schulen, etc.).

### 2.2.3 Schritt 1: Bestimmung der Freisetzungsrate

#### Verteilung des Ammoniaks in der Anlage

Vollständig getrennte Ammoniak-Kreisläufe bzw. eigenständige Anlagen werden gesondert voneinander betrachtet. Für einen in sich geschlossenen Ammoniak-Kreislauf werden drei Anlagenteile unterschieden, aus denen eine Freisetzung untersucht wird: Verdampfer, Kondensatleitung mit Abscheider sowie Kondensator. Die Abgrenzung dieser Anlagenteile ist in Abbildung 9 dargestellt.

Abbildung 9: Ammoniak kann aus verschiedenen Anlagenteilen austreten.



<sup>3)</sup> Im Verlauf der Projektierung einer Anlage kann sich der vorgesehene Standort noch ändern. In solchen Fällen sollte geprüft werden, ob sich die Umplatzierung auf das Risiko auswirkt.



Eine Begrenzung der Freisetzungsmenge auf einzelne Kompartimente ist nur möglich, wenn diese Anlagenteile durch Schnellschlussventile voneinander abgetrennt werden können. Falls keine Schnellschlussventile geplant bzw. verbaut sind, muss mit einer Freisetzung der gesamten Ammoniakmenge gerechnet werden.

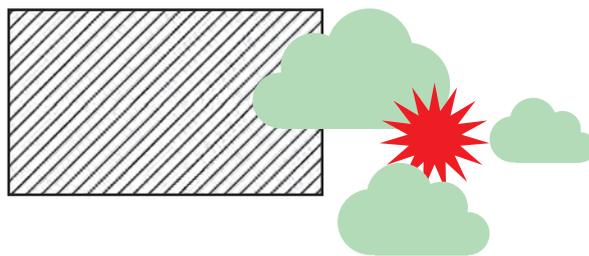
### Freisetzungsort

Die in Abbildung 9 dargestellten Anlagenteile befinden sich je nach Anlage an unterschiedlichen Orten im Gebäude. Je nach Ort der Leckage kann ein Teil des Ammoniaks durch die Gebäudehülle zurückgehalten werden. Dies hat Auswirkungen darauf, welcher Anteil des freigesetzten Ammoniaks sich wolkenförmig in der Umgebung ausbreitet und welcher Anteil als Flüssigkeitslache zurückbleibt. Vereinfachend wird zwischen drei verschiedenen Freisetzungsorten unterschieden:

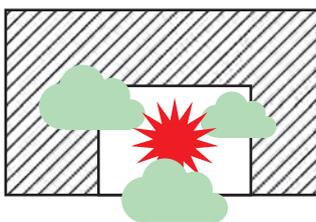
- im Freien
- in einem an der Fassade gelegenen Raum (mit Öffnungen, die direkt ins Freie führen, insbesondere Türen oder Fenster).
- in einem gefangenen Raum (ohne Öffnungen, die direkt ins Freie führen)

**Abbildung 10: Je nach Ort der Leckage gelangt mehr oder weniger Ammoniak ins Freie und breitet sich dort wolkenförmig aus.**

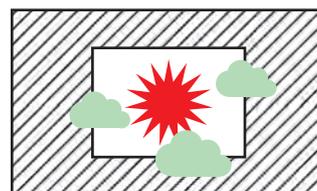
FREISETZUNG  
IM FREIEN



FREISETZUNG IN AN DER  
FASSADE GELEGENEM RAUM



FREISETZUNG  
IN GEFANGENEM RAUM





Je nach Anlagentyp können sich die betrachteten Anlagenteile an unterschiedlichen Orten befinden. Um die Störfallrelevanz zu beurteilen sollen daher Freisetzungen aus allen drei Anlageteilen am jeweiligen Standort betrachtet werden. Massgebend ist diejenige Freisetzung, welche zu den grössten Personenschäden führt. Je nach Verteilung des Personenaufkommens in der Nachbarschaft handelt es sich hierbei nicht zwingend um diejenige Situation mit der grössten, ins Freie gelangenden Ammoniakmenge.

### **Anteil freigesetztes Ammoniak**

Je nach Konstruktion werden Kälteanlagen teilweise mit Schnellschlussventilen ausgerüstet, um einzelne Bereiche des Kältemittelkreislaufes bei Bedarf voneinander zu trennen. Ist dies der Fall, kann diese Unterteilung für die Bestimmung der maximal freigesetzten Ammoniak-Menge berücksichtigt werden<sup>4</sup>). Die Kältemittelverteilung innerhalb der Anlage kann je nach Konstruktion variieren und ist stark abhängig von der Bauart des Wärmetauschers und dessen Grädigkeit. Folgende Punkte sind für eine allfällige Reduktion der freigesetzten Ammoniak-Menge zu berücksichtigen:

- Sind keine Schnellschlussventile vorhanden, wird von einer vollständigen Freisetzung des gesamten Ammoniakinhalts der Anlage am jeweiligen Freisetzungsort ausgegangen.
- Wenn Schnellschlussventile vorhanden sind:
  - Sofern anlagenspezifische Zahlenwerte für die Verteilung des Ammoniaks auf die drei zu beurteilenden Anlagenteile verfügbar sind, sollen diese Werte berücksichtigt werden. Die Menge des freigesetzten Ammoniaks kann auf den Inhalt des jeweiligen Anlagenteils reduziert werden.
  - Sind die entsprechenden Werte unbekannt, können in Abhängigkeit des Anlagentyps die Werte gemäss Tabelle 1 verwendet werden. Es wird nur der Ammoniak-Anteil im jeweiligen Anlagenteil freigesetzt.

<sup>4</sup> Auf Stufe Kurzbericht dürfen aktive Sicherheitsmassnahmen, wie z.B. Schnellschlussventile, bei der Bestimmung des maximalen Schadenausmasses nicht berücksichtigt werden. Für die Prüfung einer Unterstellung gemäss Art.1, Abs. 3 StFV wird es dennoch als zweckmässig erachtet, die Schnellschlussventile zu berücksichtigen. Durch diese Regelung soll vermieden werden, unnötigerweise Anlagen der StFV zu unterstellen. Im Beurteilungsmodell sind bereits viele Annahmen hinterlegt, die eine ausreichende Konservativität gewährleisten. Da die betreffenden Anlagen zum Beurteilungszeitpunkt (noch) nicht der StFV unterstehen, ist es zulässig, zu einem gewissen Grad auch Wahrscheinlichkeitsüberlegungen zu berücksichtigen.



**Tabelle 1: Die Ammoniakmenge in den einzelnen Anlagenteilen variiert je nach Anlagentyp**

Achtung: Je nach Anlagenkonfiguration kann die Ammoniakverteilung in realen Anlagen markant von den Angaben in Tabelle 1 abweichen.

RELATIVE VERTEILUNG DES AMMONIAKS	$K_V$	$K_A$	$K_K$
	Verdampfer	Abscheider und Kondensatleitung	Kondensator
<i>Anlagentyp</i>			
Typ 1: Direktverdampfung Direktverflüssigung	0.4	0.2	0.4
Typ 2: Kälte­träger Direktverflüssigung	0.25	0.15	0.6
Typ 3: Direktverdampfung Wärmeträger	0.6	0.2	0.2
Typ 4: Kälte­träger Wärmeträger	0.6	0.1	0.3
Typ 5: Direktverflüssigung Direktverdampfung CO <sub>2</sub>	0.25	0.15	0.6
Typ 6: Wärmeträger Direktverdampfung CO <sub>2</sub>	0.6	0.1	0.3
Typ 7: Luftgekühlte Kälte­trägeranlage, vollständig im Freien aufgestellt			1.0 <sup>5</sup>

(Bsp.: 0.4 entspricht 40 %; Quelle: Expertenschätzung; *Bezeichnung gemäss Wegleitung zur ChemRRV (Lit. [7])*)

### Anteil Ammoniak, der sich wolkenförmig ausbreitet

Wird flüssiges, unter Druck stehendes Ammoniak freigesetzt, verdampft ein Teil davon sofort. Durch die kinetische Energie des expandierenden Gases wird ein Teil der Flüssigkeit fein versprüht und als Aerosol mit dem Gas mitgerissen. Die restliche Flüssigkeit sammelt sich in einer Lache am Boden und verdampft nur langsam, abhängig von der Wärmezufuhr von aussen.

Im Sinne einer einfachen Beurteilung werden für eine Unterstellung unterhalb der Mengenschwelle nur Ausbreitungen mit kontinuierlichem Quellterm betrachtet. Vereinfachend wird dabei angenommen, dass die gesamthaft ins Freie gelangende Gasmenge (Maximum in Bezug auf mögliche Kombination von Anlagenteilen und Freisetzungsorten) sich innert 5 Min. mit einer konstanten Rate ausbreitet. Eine spontane Ausbreitung des gesamten Inhalts eines Anlagenteils innert weniger Sekunden wird aus folgenden Gründen nicht berücksichtigt:

- Bei einer Freisetzung in der Gasphase fällt der Druck und damit die Freisetzungsrates rasch ab (entsprechend der pro Zeiteinheit nachströmenden bzw. im Anlageinnern verdampfenden Ammoniakmenge)
- Bei einer Freisetzung in flüssiger Phase verdampft nur ein beschränkter Teil des Ammoniaks spontan. Der Rest bildet eine Lache, welche nur allmählich verdampft. Die Menge Ammoniak, die sich pro Zeiteinheit in der Gasphase als Wolke

<sup>5</sup> Aufgrund der kompakten Bauart wird bei diesen Anlagen davon ausgegangen, dass immer der gesamte Kältemittelinhalt freigesetzt wird, unabhängig vom Ort der Leckstelle. Entsprechend wird die Verteilung des Ammoniaks innerhalb der Anlage nicht genauer differenziert.



ausbreitet, ist daher bei spontanen Freisetzungen nicht a priori höher als bei kontinuierlichen. Gemäss Angaben in Lit. [6] ist der Anteil des Ammoniaks, welcher in der Lache verbleibt, bei spontanen Freisetzungen grösser als bei kontinuierlichen.

- Bei einer Freisetzung im Gebäudeinnern bewirkt die Gebäudehülle eine Verzögerung der Ausbreitung von Gasen ins Freie (oder ermöglicht in Kombination mit aktiven Massnahmen einen dauerhaften Rückhalt).
- Weiter ist davon auszugehen, dass spontane Freisetzungen deutlich seltener sind als kontinuierliche und sich ein solches Ereignis aufgrund der Verteilung des Ammoniaks in der Anlage nur im Maschinenraum zutragen kann. Die Ausbreitung aus dem Maschinenraum ins Freie würde dabei so verzögert, dass die Ausbreitung im Freien wieder kontinuierlich erfolgen würde.

Für die Wirkung ausserhalb des Betriebsareals ist derjenige Anteil des freigesetzten Ammoniaks massgeblich, welcher in Gas- oder Aerosolform ins Freie gelangt. Dieser Anteil hängt von verschiedenen Faktoren ab: Die wichtigsten davon sind die Freisetzungsgeschwindigkeit mit dem damit verbundenen Aerosolanteil (mitgerissene Flüssigkeitstropfen) sowie die lokale Situation bzgl. physischen Hindernissen, an denen sich die Aerosol-Tröpfchen niederschlagen können. Es wird vorgeschlagen, die in Tabelle 2 aufgeführten Werte zu verwenden, um den Anteil des ins Freien gelangenden Ammoniaks zu bestimmen. Die angegebenen Korrekturfaktoren basieren auf Angaben in Lit. [6].

**Tabelle 2: Korrekturfaktoren für den Anteil ins Freie gelangenden Ammoniaks (gas- und aerosolförmig) bezüglich des Orts der Freisetzung**

<b>KORREKTURFAKTOREN</b>	Korrekturfaktor $K_{\text{Ort}}$
<i>Freisetzungsort</i>	
Die Freisetzung findet im Freien statt	1.0
Die Freisetzung findet in einem Raum statt, der direkt an die Aussenfassade grenzt (mit Öffnungen, die direkt ins Freie führen)	0.6
Die Freisetzung findet in einem gefangenen Raum statt (keine Öffnungen, welche direkt ins Freie führen)	0.2



### Massgebende Freisetzungsrate $\dot{m}_{max}$

Als «worst case» wird davon ausgegangen, dass innerhalb von 5 Minuten das gesamte Ammoniak im entsprechenden Anlagenteil freigesetzt wird. Unter Berücksichtigung der Gesamtmenge an Ammoniak innerhalb der Anlage ( $m_{NH_3}$ ) werden die Freisetzungsraten aus den drei betrachteten Anlageteilen unter Berücksichtigung der oben diskutierten Einflussfaktoren einzeln wie folgt berechnet:

#### FORMEL FREISETZUNGSRATE

Freisetzungsrate aus Verdampfer

$$\dot{m}_V = m_{NH_3} \times K_V \times K_{Ort} \div 300s \quad [kg/s]$$

Freisetzungsrate aus Abscheider

$$\dot{m}_A = m_{NH_3} \times K_A \times K_{Ort} \div 300s \quad [kg/s]$$

Freisetzungsrate aus Kondensator

$$\dot{m}_K = m_{NH_3} \times K_K \times K_{Ort} \div 300s \quad [kg/s]$$

$K_V$  = Relative Verteilung des Ammoniaks Anlage/Verdampfer

$K_A$  = Relative Verteilung des Ammoniaks Anlage/Abscheider

$K_K$  = Relative Verteilung des Ammoniaks Anlage/Kondensator

$K_{Ort}$  = Korrekturfaktor bez. Ort der Freisetzung

Zur Bestimmung der massgebenden Freisetzungsrate  $\dot{m}_{max}$  wird der grösste dieser drei Werte mathematisch auf einen ganzzahligen Wert gerundet.<sup>6)</sup>

#### 2.2.4 Schritt 2: Ermittlung des Gefährdungsbereiches und des effektiven Personenaufkommens $P_{eff}$

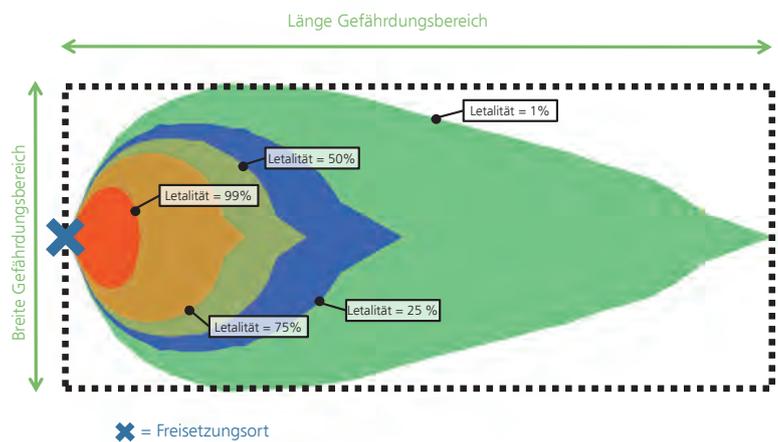
Die räumliche Ausdehnung der toxischen Wolke sowie des entsprechenden Gefährdungsbereichs kann mit physikalischen Modellen berechnet werden (siehe Abbildung 11: tropfenförmige, farbige Flächen<sup>7)</sup>). Im Sinne einer einfachen Beurteilung werden diese Gefährdungsbereiche auf eine einzige, rechteckige Fläche mit mittlerer Letalität reduziert. Abbildung 11 stellt dies bildlich dar.

<sup>6)</sup> Hinweis: Bei Anlagen mit grosser räumlicher Ausdehnung kann die Situation auftreten, dass die grösste Personengefährdung von einem Anlagenteil mit einer kleineren Freisetzungsrate ausgeht, wenn sich in deren Gefährdungsbereich deutlich mehr Personen aufhalten. Es ist situativ zu prüfen, ob beim Anlagenteil mit der grössten Freisetzungsrate auch der grösste Personenschaden zu erwarten ist.

<sup>7)</sup> In der roten Fläche herrscht die höchste Konzentration und somit die grösste Gefahr für Personen, in der grünen Fläche die kleinste.



**Abbildung 11: Berechneter Ausbreitungsbereich der Ammoniakwolke (tropfenförmige Flächen) und konservative Vereinfachung des Bereiches, in dem Personen gefährdet sind (rechteckige Fläche).**



Der Gefährdungsbereich für verschiedene Freisetzungsraten  $m_{max}$  kann aus Tabelle 3 abgelesen werden. Die Herleitung der angegebenen Werte ist in [Anhang A3](#) dokumentiert.

**Tabelle 3: Ausbreitungsbereich der toxischen Wolke gemäss Berechnungen mit Effects (Lit. [15]): Letalität  $\geq 1\%$**

#### GEFÄHRDUNGSBEREICH

Freisetzungsrates	0.5 kg/s	1 kg/s	2 kg/s	3 kg/s	4 kg/s	5 kg/s	6 kg/s
Länge [m]	45	48	75	100	120	130	140
Breite [m]	10	25	35	50	50	60	60

Für den ganzen rechteckigen Gefährdungsbereich muss anschliessend das effektive Personenaufkommen abgeschätzt werden. Dazu werden folgende Randbedingungen empfohlen:

- Berücksichtigung der kritischsten Windrichtung (konservative Betrachtung, die sich am maximalen Personenaufkommen orientiert).
- Das maximale Personenaufkommen ist aufgrund der bestmöglichen verfügbaren Daten zur Wohnbevölkerung und zu den Arbeitsplätzen abzuschätzen<sup>8)</sup>.

<sup>8)</sup> Z.B. die Katasterdaten des Bundesamtes für Statistik (für die Wohnbevölkerung jährlich per Ende Jahr aktualisiert, für Arbeitsplätze gemäss letzter Betriebszählung, derzeit 2008).



Die Werte für die Wohn- und Arbeitsbevölkerung sollen dabei addiert werden. Es wird konservativ angenommen, dass alle Personen gleichzeitig anwesend sind.

- Als Faustregel kann angenommen werden, dass sich ca. 10 bis 30 %<sup>9)</sup> der Wohn- und Arbeitsbevölkerung im Freien aufhält<sup>10)</sup>. Das so abgeleitete Personenaufkommen im Freien innerhalb des Gefährdungsbereiches ist in jedem Fall situativ auf seine Plausibilität hin zu prüfen.
- Es ist situativ zu prüfen, ob weitere, regelmässige Nutzungen im Gefährdungsbereich vorliegen, welche in den georeferenzierten Daten nicht berücksichtigt werden (z.B. Besucher von Einkaufszentren, Schüler, wartende Personen an Bahnhöfen, viel Fremdpersonal auf dem Betriebsgelände, etc.). Dabei ist zu berücksichtigen, ob die gleichzeitige Anwesenheit dieser Personen plausibel ist.
- Es sollten lediglich Personenansammlungen berücksichtigt werden, die mindestens einmal jährlich auftreten. Eine Risikoermittlung sollte zudem nur dann gefordert werden, wenn die schwere Schädigung durch Situationen entsteht, welche mindestens während durchschnittlich einer Stunde pro Woche auftreten. Bei selteneren Anlässen kann davon ausgegangen werden, dass deren Risiko im akzeptablen Bereich liegt.
- Ebenfalls nicht berücksichtigt werden sollen Insassen in fahrenden Autos oder Zügen<sup>11)</sup>.
- Falls eine Strasse mit täglichem Verkehrsstau im Gefährdungsbereich liegt, können Personen im Stau berücksichtigt werden. Dies sollte situativ beurteilt werden.

### 2.2.5 Schritt 3: Entscheid zur Unterstellung unter die StFV

Um zu entscheiden, ob eine Unterstellung gemäss Art. 1, Absatz 3 StFV vorgenommen werden muss, ist zu prüfen, ob eine Freisetzung von Ammoniak aus der Anlage zu einer schweren Schädigung führen kann. In Tabelle 4 ist zusammengestellt, ab welchem Personenaufkommen im Freien (im Gefährdungsbereich) sich für die jeweilige Freisetzungsrates mit verschiedenen konservativen Annahmen eine schwere Schädigung ergibt. Die Herleitung des Grenzwertes und die Rahmenbedingungen sind in [Anhang A3](#) genauer erläutert.

<sup>9)</sup> Der erhöhte Anteil von 30 % der Personen im Freien sollte für Gebäude verwendet werden, die sich sehr nah am Freisetzungsort befinden und gleichzeitig eine hohe Luftwechselrate aufweisen, typischerweise z.B. industriell genutzte Gebäude die schwer evakuierbar sind.

<sup>10)</sup> Dabei wird angenommen, dass Personen, welche sich in Gebäuden aufhalten, gut geschützt sind und nicht zu Schaden kommen. Die Verifizierung der Unterstellungskriterien anhand verschiedener realer Anlagen hat gezeigt, dass auch mit dieser Vereinfachung plausible Resultate bzgl. Unterstellung erhalten werden.

<sup>11)</sup> Ein fahrendes Auto bzw. ein fahrender Zug befindet sich meist nur wenige Sekunden in der Gaswolke. Da die Fenster normalerweise geschlossen sind, stellt die Fahrzeughülle einen gewissen Schutz dar: Ammoniak gelangt lediglich in beschränkter Menge über die Lüftung ins Fahrzeuginnere. Verkehrsunfälle infolge des starken Ammoniak-Geruchs können nicht völlig ausgeschlossen werden. Es ist aber davon auszugehen, dass diese eine untergeordnete Rolle spielen.



**Tabelle 4: Gefährdungsbereich und Grenzwert für das Personenaufkommen.**

Wird diese Anzahl Personen überschritten, kann eine schwere Schädigung im Sinne der StFV nicht ausgeschlossen werden.

GRENZWERT PERSONENAUFKOMMEN	Gefährdungsbereich		Grenzwert für Personenaufkommen $P_{ref}$ im Gefährdungsbereich
	Freisetzungsrate [kg/s]	Länge [m]	
6	140	60	35 Personen im Freien
5	130	60	
4	120	50	
3	100	50	
2	75	35	
1	48	25	
0.5	45	10	100 Personen im Freien

Eine Unterstellung unter die StFV sollte erfolgen, falls für die Freisetzungsrate gemäss der kritischsten Kombination aus Anlageteil und Freisetzungsort Folgendes gilt:

$$\text{Effektives Personenaufkommen } P_{eff} > \text{Grenzwert Personenaufkommen } P_{ref}$$

In diesem Fall kann eine schwere Schädigung im Sinne der StFV nicht ausgeschlossen werden.

### 2.3 Kälteanlagen in öffentlich zugänglichen Gebäuden

Für die Gasausbreitung im Gebäudeinneren kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass keine schwere Schädigung im Sinne der StFV zu erwarten ist. Nicht zuletzt deshalb, weil sich im Gebäude mehrheitlich betriebseigenes Personal aufhält. Ausnahmen können öffentlich zugängliche Gebäude bilden. Die Ausbreitung von Ammoniak innerhalb des Gebäudes ist dabei nur für Anlagen relevant, die Räume mit öffentlicher Nutzung und grossen Personenaufkommen gefährden (z.B. Einkaufszentren, Parkhäuser, Eishallen, etc.).

Für folgende Situationen ist davon auszugehen, dass eine schwere Schädigung im Sinne der StFV möglich ist (sofern der Inhaber nicht das Gegenteil nachweisen kann):



- Wenn sich ammoniakführende Anlageteile in Räumen mit grossem Personenaufkommen befinden (z.B. bei Kunsteisbahnen mit Ammoniak-Kreislauf im Eisfeld).
- Wenn der Maschinenraum unmittelbar an einen Raum mit öffentlicher Nutzung angrenzt und Öffnungen in diesen aufweist und sich in diesem Raum regelmässig<sup>12)</sup> mehr als zehn Personen gleichzeitig aufhalten (z.B. in Spitälern oder Einkaufszentren).
- Bei einem Gebäude mit Innenhof (z.B. Stadion mit offenem Dach), bei dem aus einem Kondensator auf dem Dach freigesetztes Ammoniak wieder in den öffentlich zugänglichen Bereich gelangen könnte, wenn sich dort regelmässig<sup>12)</sup> mehr als 10 Personen gleichzeitig aufhalten.

Keine schwere Schädigung ist für folgende Situationen zu erwarten:

- Wenn sich alle ammoniakführenden Anlagenteile in Bereichen des Gebäudes befinden, die nur betriebsinternem Personal zugänglich sind
- und diese Bereiche nicht direkt an den öffentlichen Bereich angrenzen bzw. über keine Öffnungen zum öffentlichen Bereich hin verfügen (z.B. Türen oder Fenster)
- und die Regeln der Technik eingehalten sind.

## 2.4 Kunsteisbahnen

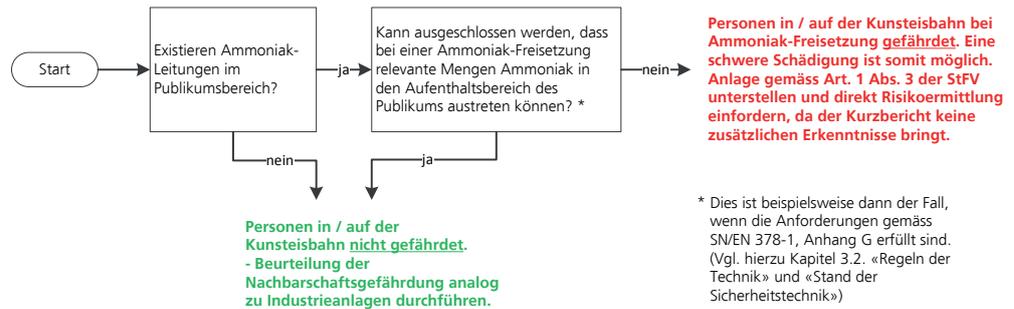
Grundsätzlich ist für Kunsteisbahnen dasselbe Verfahren wie in Kapitel 2.2 anzuwenden. Aufgrund des potenziell hohen Aufkommens betriebsfremder Personen auf der Kunsteisbahn muss aber zusätzlich überprüft werden, ob diese bei einer Ammoniak-Freisetzung besonders gefährdet sind. Dazu sind die verschiedenen Anlagenteile nach den Entscheidungshilfen in Abbildung 12 zu beurteilen. Wenn durch einen der Anlagenteile eine Gefährdung des Publikums besteht, ist eine schwere Schädigung möglich und die Anlage sollte der StFV unterstellt werden. Besteht keine besondere Gefährdung der Fremdpersonen auf der Anlage, ist bei der Beurteilung der Kunsteisbahn analog zu den Industrieanlagen vorzugehen (Kapitel 2.2) und lediglich die Gefährdung der Nachbarschaft zu berücksichtigen.

<sup>12)</sup> Regelmässig bedeutet hier mindestens einmal jährlich. Eine Risikoermittlung sollte allerdings nur dann gefordert werden, wenn die schwere Schädigung durch Situationen entsteht, die mindestens während durchschnittlich einer Stunde pro Woche auftreten. Bei selteneren Anlässen kann davon ausgegangen werden, dass deren Risiko im akzeptablen Bereich liegt.

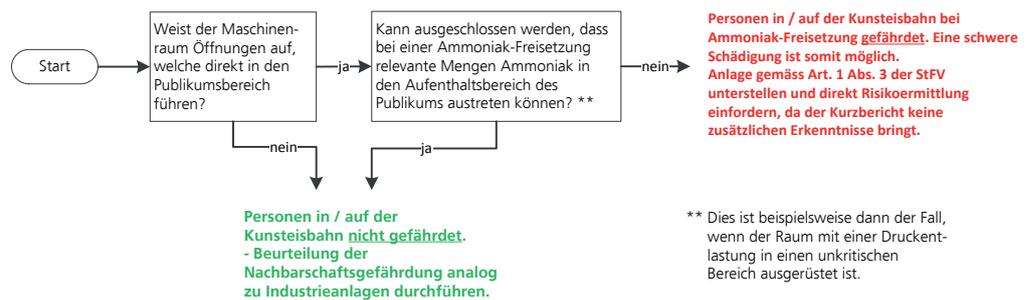


Abbildung 12: Ammoniak-Freisetzung auf Kunsteisbahnen: Entscheidungshilfe zur Einschätzung der Personengefährdung

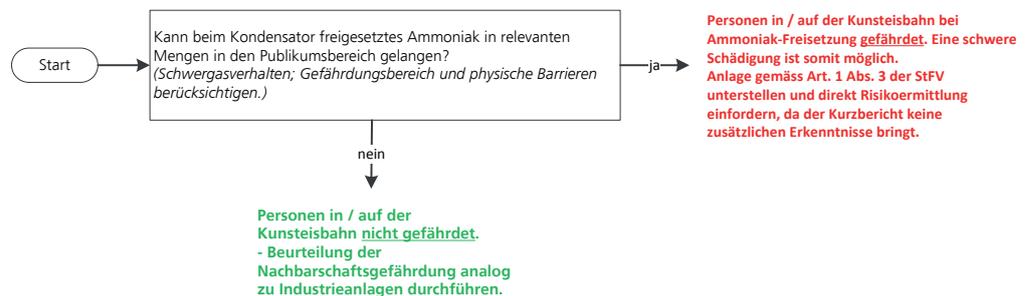
### Anlagenteil Verdampfer



### Anlagenteil Kondensatleitung und Abscheider



### Anlagenteil Kondensator



## 3 Stand der Sicherheitstechnik



### 3.1 Einleitung

Bei allen Kälteanlagen sind generell die Regeln der Technik umzusetzen. Für Anlagen, die der StfV unterstehen, ist darüber hinaus der Stand der Sicherheitstechnik einzuhalten (Art. 3 StfV). Die Regeln der Technik und der Stand der Sicherheitstechnik entwickeln sich stetig weiter. Oft ist deshalb unklar, welche Dokumente den aktuellen Stand wiedergeben. Folgende Kapitel fassen deshalb die für die Störfallvorsorge wichtigsten Anforderungen aus den Regeln der Technik und dem Stand der Sicherheitstechnik für Kälteanlagen zusammen, ohne Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Für weiterführende Anforderungen wird zudem auf die relevanten Dokumente verwiesen.

Die Regeln der Technik für den Bau von Kälteanlagen sind in der schweizerisch harmonisierten Europeanorm SN EN378 (Teil 1 bis 4) beschrieben (Lit. [21], Lit. [22], Lit. [23], Lit. [24]). Ergänzend dazu gilt in der Schweiz die EKAS-Richtlinie 6507 als Regel der Technik (Lit. [25]).

Der Stand der Sicherheitstechnik definiert das BAFU folgendermassen: «Nach dem Stand der Sicherheitstechnik verfügbar sind Sicherheitsmassnahmen, die bei vergleichbaren Betrieben und Anlagen im In- und Ausland erfolgreich eingesetzt oder bei Versuchen mit Erfolg erprobt worden sind und auf andere Betriebe übertragen werden können. Der Stand der Sicherheitstechnik umfasst somit mehr als die anerkannten Regeln der Technik. Er beinhaltet das aktuelle, in der Fachwelt vorhandene und objektiv zugängliche technische Wissen über Sicherheitsmassnahmen. Informationen zum Stand der Sicherheitstechnik sind in der Regel in der einschlägigen Literatur oder bei den entsprechenden Fach- und Branchenverbänden vorhanden.» Lit. [3]



In Deutschland gilt für Anlagen mit einem Gehalt an Kältemittel von über 3000 kg Ammoniak<sup>13)</sup> zusätzlich die Richtlinie TRAS 110 (Lit. [20]). Sie enthält Anforderungen zum Stand der Sicherheitstechnik, die über die Regeln der Technik nach SN EN378 hinausgehen, insbesondere auch Vorgaben bzgl. Dokumentation und organisatorischen Massnahmen. Zudem beinhaltet sie eine Auswertung von Unfällen bei Kälteanlagen mit Ammoniak zwischen 1994 und 2004. Im Gegensatz zur schweizerischen StFV mit ihrem risikoorientierten Beurteilungsansatz basiert die TRAS 110 auf einem massnahmenorientierten Ansatz. D.h. eine Anlage wird als hinreichend sicher beurteilt, wenn die darin geforderten Massnahmen umgesetzt sind (unabhängig vom verbleibenden Risiko, welches je nach Umgebung variieren kann). Aufgrund dieses Unterschiedes sind die in der TRAS 110 vorgegebenen Massnahmen nicht 1:1 auf die Schweiz übertragbar. Die Arbeitsgruppe empfiehlt daher, nur diejenigen Massnahmen der TRAS 110 als Stand der Sicherheitstechnik in der Schweiz anzusehen, welche in Kapitel 3.2.2 erläutert werden.

## 3.2 Anlagen mit Ammoniak als Kältemittel

Im Folgenden werden die für die Störfallvorsorge wichtigsten Sicherheitsmassnahmen bei Anlagen mit Ammoniak als Kältemittel zusammengefasst. Im Sinne der Übersichtlichkeit wird bewusst auf Vollständigkeit verzichtet.

### 3.2.1 Regeln der Technik nach SN EN378 und EKAS 6507

#### Allgemeine Massnahmen

- Brandschutz-Anforderungen an die Fluchtwege aus dem Maschinenraum müssen eingehalten sein.
- Insbesondere müssen sich Fluchttüren aus dem Maschinenraum nach aussen öffnen lassen. (Lit. [25], Kapitel 4.2)
- Generelle Instandhaltungsmassnahmen an der Anlage sind durch den Inhaber oder dessen Bevollmächtigten zu planen und regelmässig durchzuführen. Umfang und Zeitplan sind im Bedienungshandbuch ausführlich zu beschreiben. (Lit. [24], Kapitel 5.2.2)
- Der Inhaber oder dessen Bevollmächtigte müssen in regelmässigen Abständen (mindestens einmal jährlich) die Alarmeinrichtungen, die mechanische Lüftung und Detektoren überprüfen, um deren einwandfreie Funktion sicherzustellen. Die Ergebnisse müssen in das Anlagenprotokoll eingetragen werden (SN EN378-3 (Lit. [24]), Anhang D). (Lit. [23], Kapitel 9.4)

<sup>13)</sup> Innerhalb der Richtlinie wird empfohlen, sie bereits für Anlagen ab 300 kg Ammoniak anzuwenden, wenn diese in der Nähe von Schutzobjekten betrieben wird.



### Detektion, Alarmierung und Notaus-Vorrichtung

- Der Maschinenraum muss mit Ammoniak-Sensoren überwacht werden (Lit. [23], Kapitel 8.7). Die Arbeitsgruppe empfiehlt die Anwendung der folgenden Alarmgrenzwerte<sup>15)</sup>:
  - Unterer Alarmwert (Voralarm): 200 ppm  
Technischer Alarm (nur interner Alarm); mechanische Lüftung einschalten.
  - Oberer Alarmwert (Interventionswert): 2 000 ppm  
Der Maschinenraum wird stromlos geschaltet, d. h. die Kälteanlage und die mechanische Lüftung werden ausgeschaltet (Nachströmöffnungen werden geschlossen, die Entlüftungsklappe bleibt zur Druckentlastung offen); Schnellschlussventile werden geschlossen; automatische Alarmierung der Einsatzkräfte.<sup>16) 17)</sup>
- Wird die Kälteanlage zur Prozesskühlung eingesetzt und resultieren durch deren Abschaltung sofort sicherheitsrelevante oder grosse wirtschaftliche Konsequenzen, kann ein zusätzlicher Alarmwert bei 30 000 ppm gesetzt werden. Die Kälteanlage kann in diesem Fall auch erst beim Erreichen dieses Alarmwertes ausgeschaltet werden. Aus Gründen des Explosionsschutzes muss der Maschinenraum bei Erreichen von 30 000 ppm Ammoniak stromlos geschaltet werden.
- Tiefere Alarmwerte als oben angegeben sind generell zulässig.
- Zum Abschalten der Kälteanlage ist ausserhalb des Maschinenraums und in der Nähe seiner Tür eine Fernabschaltung vorzusehen (Lit. [23]), Kapitel 5.1).
- Bei mehr als 500 kg Ammoniak müssen bei indirekten Systemen im Wärmeträgerkreislauf (z.B. Wasser oder Glykolkreislauf) Sensoren angeordnet werden, um das Eindringen von Kältemittel in den Kreislauf zu detektieren (z.B. via pH-Wert). Diese Sensoren müssen im Maschinenraum und ggf. an der Bedienerschnittstelle des Steuersystems einen Alarm auslösen. (Lit. [23]), Kapitel 8.7)
- Bei Hybrid- und Evaporativ-Kondensatoren ist der pH-Wert des Kühlwassers zu überwachen, um einen allfälligen Austritt von Ammoniak rasch zu entdecken: «Ammoniakdetektoren müssen bei indirekten Systemen im Wärmeträgerkreislauf, z. B. Wasser- oder Glykolkreislauf, zur Feststellung von Kältemittel im Kreislauf

<sup>15)</sup> Die SN EN378 und die EKAS-Richtlinie geben unterschiedliche Bereiche für die Alarmgrenzwerte vor. Diese widersprechen sich zwar nicht, führen aber in der Umsetzung immer wieder zu Klärungsbedarf, welche konkreten Werte hinterlegt werden sollen.

<sup>16)</sup> Während der Arbeitszeit von entsprechend geschultem Personal ist eine Erkundungsverzögerung zulässig.

<sup>17)</sup> In den Kantonen bestehen unterschiedliche Regelungen, in welchen Fällen Alarmer direkt an die Alarmzentrale der Einsatzkräfte gemeldet werden sollen, und welche Organisation für die entsprechenden Bewilligungen zuständig ist. Es sind in jedem Fall die Vorgaben der lokal zuständigen Behörde einzuhalten.



angeordnet werden, wenn die Ammoniak-Füllmenge mehr als 500 kg beträgt. Diese Detektoren müssen im Maschinenraum und gegebenenfalls an der Bedienerschnittstelle des Steuersystems einen Alarm auslösen [...]» (Lit. [23]), Kapitel 8.7)

- Anlagen mit Ammoniak-Füllmengen über 2 000 kg sind mit einem Notaus-System auszurüsten, das die jeweiligen Antriebe und Stellglieder betätigt. «Nach Aktivierung der Notsteuerung muss die Kälteanlage in einen sicheren Betriebszustand versetzt werden» (Lit. [22], Anhang A, Absatz A.4). Hinweis: gem. SN EN 378, ist dies erst ab 3 000 kg gefordert. Zur hier angegebenen tieferen Schwelle vgl. Kapitel 3.2.2 «Stand der Sicherheitstechnik».
- Bei Kälteanlagen mit Ammoniak-Füllmengen über 2 000 kg muss der Betreiber/Eigentümer zudem sicherstellen, «dass ein als zentrale Alarmstation vorgesehener Raum ständig besetzt ist. Ausgebildetes Personal muss bei einem Alarm innerhalb von 60 min vor Ort sein. Das Personal darf vom Alarm auch mittels technischer Einrichtungen, z. B. Mobiltelefon, Funkruf usw., verständigt werden.» (Lit. [23], Kapitel 7.4). Hinweis: gem. SN EN 378, ist dies erst ab 3 000 kg gefordert. Zur hier angegebenen tieferen Schwelle vgl. Kapitel 3.2.2 «Stand der Sicherheitstechnik».

### Lüftung

- Es muss eine mechanische Lüftung im Maschinenraum mit unabhängiger Notsteuerung ausserhalb des Raumes vorhanden sein. (Lit. [23], Kapitel 5.16.1; Kapitel 5.16.3). Diese muss durch Gassensoren automatisch aktiviert werden. (Lit. [23], Kapitel 8.7)
- Das Abblasen von freigesetztem Ammoniak «(...) muss so erfolgen, dass durch das freigesetzte Kältemittel Personen und Sachen nicht gefährdet werden» (Lit. [22], Kapitel 6.2.6.6). Dies gilt sinngemäss auch für die Anordnung von Entlüftungsöffnungen aus dem Maschinenraum: «Kältemittel, das aus Maschinenräumen entweicht, muss gefahrlos abgeführt werden.» (Lit. [23], Kapitel 5.1) «Wartungschächte, einschließlich Laufstegen und Kriechgängen (Hohlräumen), die Rohrleitungen für brennbare oder giftige Kältemittel enthalten, müssen zu einem sicheren Ort entlüftet werden, damit bei einer Leckage eine gefährliche Ansammlung von Gasen verhindert wird.» (Lit. [23], Kapitel 5.15.3)
- Wenn in der Entlüftungsleitung eine Klappe eingebaut ist, muss diese bei Gasalarm offen bleiben, um eine Druckentlastung in einen sicheren Bereich zuzulassen. «Die Frischluft- und Abluftöffnungen (im Maschinenraum) müssen so angeordnet sein, dass das Kältemittel bei einer Leckage unter allen Bedingungen abgeleitet wird.» (Lit. [23], Kapitel 5.16.5). Hinweis: diese Anforderung steht im Widerspruch zur Anforderung der EKAS-Richtlinie, dass die Klappe bei Erreichen des Interventionswertes geschlossen werden soll, um einen Gasaustritt ins Freie zu verhindern (Lit. [25], Anhang B, Anmerkung zu 4.3.6). Die Arbeitsgruppe geht davon aus, dass bei einer für die Störfallvorsorge relevanten Freisetzungsmenge ein derart hoher Druck entsteht, dass das Gas nicht im Maschinenraum zurückgehalten werden



kann. Es wird daher angestrebt, das Gas möglichst über den Entlüftungskanal ins Freie zu führen, um eine unkontrollierte Freisetzung über andere Schwachstellen der Gebäudehülle zu verhindern. Die Anordnung der Entlüftungsöffnung muss gemäss Regeln der Technik so gewählt werden, dass keine Gefährdung von Personen resultiert. Vgl. hierzu Lit. [23], Kapitel 5.1: «Kältemittelgas, das aus Maschinenräumen entweicht (...) muss gefahrlos abgeführt werden.»

### Rückhaltmassnahmen

- Bei Ammoniak-Direktverdampfungsanlagen (Kreislauftyp 1 und 3 gemäss Kapitel 1.1) mit Füllmengen über 2 000 kg sind vor der Ammoniak-Pumpe im Flüssigbereich Schnellschlussventile zu installieren. Diese sind von der Ammoniak-Überwachungsanlage anzusteuern (Lit. [22], Anhang A, Absatz A.2). Hinweis: gem. SN EN 378, ist dies erst ab 3 000 kg gefordert. Zur hier angegebenen tieferen Schwelle vgl. Kapitel 3.2.2 «Stand der Sicherheitstechnik».
- Der Boden im Maschinenraum muss so beschaffen sein, dass kein flüssiges Ammoniak aus dem Raum auslaufen kann. «Der Ablauf des Auffangsystems muss in der Regel verschlossen sein.» (Lit. [23], Kapitel 5.17.2.1)
  - Im Maschinenraum ist entweder unter den entsprechenden Anlageteilen eine Auffangwanne zu platzieren, oder der gesamte Raum ist als Auffangwanne zu konzipieren.
  - Im Maschinenraum dürfen sich keine offenen Wasserabläufe befinden (Umweltschutz).

### Kunsteisbahnen

Die SN EN 378-1, Anhang G (Lit. [21]) beschreibt eine besondere Regelung für Kunsteisbahnen. Weisen diese im Publikumsbereich Leitungen mit Kältemittel der Sicherheitsklassen A1, B1 oder B2<sup>18)</sup> auf, können diese unter Umständen dennoch als indirekte Systeme<sup>19)</sup> eingestuft werden. Voraussetzung dafür ist, dass die kältemittelführenden Teile vom öffentlich zugänglichen Bereich durch einen geeigneten, dichten Stahlbetonboden abgetrennt sind. In diesem Fall sind die folgenden Anforderungen zu erfüllen:

- Es müssen Kältemittelsammler zur Aufnahme der gesamten Kältemittelmenge vorhanden sein.
- Rohre und Sammelstücke (der Eissportpiste) müssen ohne Flansch geschweisst oder hartgelötet und in den Boden einbetoniert sein.
- Zuleitungs- und Rückleitungsrohre müssen in einem getrennten Verteilerkanal angeordnet sein, der mit dem Maschinenraum verbunden ist.

<sup>18)</sup> CO<sub>2</sub> entspricht beispielsweise der Sicherheitsklasse A1, Ammoniak der Klasse B2.

<sup>19)</sup> D.h. die Anlage ist so zu beurteilen, als ob die Kühlung des Eisfeldes mit einem unkritischen Kälte-träger erfolgen würde.



### 3.2.2 Stand der Sicherheitstechnik

Die im Folgenden aufgeführten Massnahmen beschreiben den Stand der Sicherheitstechnik für Kälteanlagen mit Ammoniak. Sie gelten für alle neuen Anlagen im Geltungsbereich der StFV. Aus Sicht der Arbeitsgruppe wirken sich diese Massnahmen positiv auf die Anlagensicherheit aus und sind für Neuanlagen wirtschaftlich tragbar. Bei bestehenden Anlagen ist durch die Behörde und den Inhaber gemeinsam zu beurteilen, welche der aufgeführten Massnahmen wirtschaftlich tragbar sind. Die Auswahl von Sicherheitsmassnahmen hat sich immer an den Grundsätzen gemäss Anhang 2 der StFV zu orientieren.

- Wenn immer möglich, sollen bauliche, technische und organisatorische Sicherheitsmassnahmen kombiniert eingesetzt werden. Das Zusammenspiel dieser Massnahmen ist aufeinander abzustimmen.
- Die SN EN 378 fordert verschiedene Massnahmen erst ab einer Ammoniakmenge von 3 000 kg. Diese Anforderungen sind in der Schweiz bereits bei Inhaltsmengen ab 2 000 kg (Mengenschwelle StFV) umzusetzen, z.B.:
  - Ständig besetzte Alarmzentrale (Lit. [23], Kapitel 7.4)
  - Ferngesteuerte Absperrereinrichtung in der Flüssigkeitsleitung (Lit. [22], Anhang A)
  - Notaussystem (Lit. [22], Anhang A)
- Bei im Freien aufgestellten Anlagen ist unter dem Abscheider eine Auffangwanne vorzusehen, so dass im Fall einer Freisetzung die Lachenfläche und somit die Verdampfungsrate begrenzt wird.
- Ammoniak enthaltende Kondensatoren sind möglichst abseits von Orten mit grossem Personenaufkommen anzuordnen.
- Elektrotechnische Schaltschränke müssen sich ausserhalb des Maschinenraums befinden, um im Fall einer Leckage die Bedienung von aussen zu gewährleisten. Hinweis: Können bei bestehenden Anlagen aus baulichen bzw. technischen Gründen nicht die gesamten Schaltschränke aus dem Maschinenraum entfernt werden, sind minimal die Notabschaltungseinrichtungen ausserhalb des Maschinenraumes zu gewährleisten (vgl. Kapitel 3.2.1 «Regeln der Technik»).
- Für Kunsteisbahnen gelten folgende Vorgaben:
  - Bei einem Einkreisssystem<sup>20)</sup>, welches nicht den Vorgaben von Anhang G der SN EN 378-1 entspricht, sind die kältemittelführenden Leitungen im



Publikumsbereich mit massiven Platten (Stahl, Beton, o.Ä.) und Gummimatten zu bedecken. Dabei ist zu gewährleisten, dass die Kanäle Kaltrauch- oder CO<sub>2</sub> dicht<sup>21)</sup> sind. Die Dichtigkeit ist periodisch zu prüfen.

- Die Kanäle sind mit einer ausreichenden Anzahl Sensoren zu überwachen. (Minimal zwei Ammoniak-Sensoren).
- Alarmwerte für die Ammoniakwarnanlage der Kollektorkanäle:

Unterer Alarmwert 200 ppm;

Oberer Alarmwert 1 000 ppm mit automatischer Abschaltung der Anlage (Tieferer Wert als in der EKAS-Richtlinie, weil sich Personen sehr nahe am potenziellen Freisetzungsort aufhalten).

- Auf die Überwachung von Ammoniak in den Leitungskanälen kann verzichtet werden, wenn die Vorgaben gemäss SN EN 378-1, Anhang G (Lit. [21]), eingehalten sind (siehe Regeln der Technik).
- Die Beton-Überdeckung von Ammoniakleitungen im Eisfeld muss mindestens 2 cm betragen<sup>22)</sup>.

Sind diese Vorgaben eingehalten, so kann das Risiko für die Nutzer der Kunsteisbahnen bei der Beurteilung gemäss Abbildung 12 ([Kapitel 2.4](#)) als hinreichend klein angesehen werden, so dass aufgrund der Exposition dieser Personengruppe keine Risikoermittlung notwendig ist.

### 3.3 Anlagen mit Kohlendioxid und HFKW als Kältemittel

#### 3.3.1 Regeln der Technik nach SN EN378

- Die SN EN378, Teile 1 bis 4, beschreibt die Regeln der Technik für alle Arten von Kälteanlagen mit allen gebräuchlichen Kältemitteln. (Lit. [21], Lit. [22], Lit. [23], Lit. [24])
- Brandschutz-Anforderungen an die Fluchtwege aus dem Maschinenraum müssen eingehalten sein.
- Insbesondere müssen sich Fluchttüren aus dem Maschinenraum nach aussen öffnen lassen.

<sup>20</sup> Hier bezeichnet der Begriff Einkreisystem eine Anlage, bei welcher das Eisfeld durch Direktverdampfung von Ammoniak gekühlt wird.

<sup>21</sup> Der Begriff «Kaltrauchdicht» stammt aus der Bauteilprüfung im Brandschutz. Z.B. mittels einer Rauchpetarde wird dabei geprüft, ob kalter Rauch (d.h. Raumtemperatur) ohne Druckdifferenz aus dem zu prüfenden Gehäuse austritt.

<sup>22</sup> Primär aus Gründen des Korrosionsschutzes



### 3.3.2 Stand der Sicherheitstechnik

Es gelten die analogen Anforderungen wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Im Folgenden sind nur Abweichungen davon aufgeführt.

- Die Leitungskanäle im Publikumsbereich von Kunsteisbahnen sind mit einer ausreichenden Anzahl CO<sub>2</sub>-Sensoren zu überwachen. (Minimal zwei Sensoren). Dieses Gaswarnsystem ist getrennt von der Überwachung des Maschinenraumes.
- Folgende Alarmwerte für die CO<sub>2</sub>-Warnanlage der Feldkanäle haben sich in der Vergangenheit bewährt:
  - Unterer Alarmwert (Voralarm): 1.5 %
  - Oberer Alarmwert (Hauptalarm): 3.0 %
- Auf die CO<sub>2</sub>-Überwachung in den Leitungskanälen kann verzichtet werden, wenn die Vorgaben gemäss SN EN 378-1, Anhang G, eingehalten sind (siehe Regeln der Technik bei Anlagen mit Ammoniak als Kältemittel, Kapitel 3.2.1).

## 3.4 Regeln der Technik und Stand der Sicherheitstechnik richtig umsetzen

- Die Regeln der Technik sind sowohl bei Neuanlagen als auch bei bestehenden Anlagen umzusetzen.
- Für Neuanlagen sind zudem alle Massnahmen nach dem Stand der Sicherheitstechnik gemäss Kapitel 3.2.2 bzw. 3.3.2 umzusetzen. Die aufgeführten Massnahmen werden als wirtschaftlich tragbar erachtet.
- Bei bestehenden Anlagen ist gemeinsam durch die Behörde und den Inhaber zu beurteilen, welche der aufgeführten Massnahmen zum Stand der Sicherheitstechnik auch wirtschaftlich tragbar sind. In Absprache mit dem Inhaber liegt es im Ermessen der Vollzugsbehörde festzulegen, welche dieser Massnahmen bis wann umgesetzt werden müssen.



## 3.5 Weiterführende Sicherheitsmassnahmen

Für Anlagen, deren Risikosummenkurve im Übergangsbereich oder im inakzeptablen Bereich liegt, sind weiterführende Massnahmen zur Risikoreduktion zu prüfen und umzusetzen. Beispielhaft sind im Folgenden verschiedene Sicherheitsmassnahmen aufgeführt, welche über den Stand der Sicherheitstechnik hinausgehen, aber in der Vergangenheit bei einzelnen Anlagen bereits umgesetzt wurden. Es ist situativ zu prüfen, ob diese Massnahmen auch für die Risikoreduktion bei der betrachteten Anlage zielführend sind.

### 3.5.1 Massnahmen zum Schutz der Bevölkerung

- Die Leistung der mechanischen Lüftung aus dem Maschinenraum und die Höhe der Abblasöffnung können so ausgelegt werden, dass eine Druckentlastung bzw. Abführung des Ammoniaks über die Lüftung erfolgt und in der Umgebung keine kritischen Ammoniak-Konzentrationen mehr erreicht werden.
- Überwachen der Kondensatleitung im Freien durch Ammoniak-Sensoren. Um zu gewährleisten, dass austretendes Ammoniak zeitnah zu den Sensoren gelangt und nicht verweht wird, ist eine Leichtbauumhüllung der Leitung zweckmässig. Diese muss nicht vollständig dicht sein. Je nach Situation kann auch eine massive Umhüllung sinnvoll sein.
- Installation eines Luftwäschers im Maschinenraum, der Luft aus dem Raum ansaugt, wäscht und wieder an den Raum abgibt. Die Absorptionskapazität eines derartigen Wäschers hängt primär vom zugeführten Frischwasser und dem Schmutzwasserrückhalt ab. Die bewältigbare Freisetzungsmenge bzw. -rate ist dadurch limitiert. Typisches Einsatzgebiet sind Anlagen mit kleiner Füllmenge (bis ca. 300 kg – für grössere Mengen reicht die Absorptionskapazität häufig nicht aus). Dabei handelt es sich meist um Wärmepumpen oder Kälteanlagen mit sensibler Umgebung, also Anlagen des Typs 4. Ein solcher Wäscher kann auch bei der Behebung kleinerer Betriebsstörungen mit Ammoniak-Austritt hilfreich sein, wenn keine Gefährdung der Bevölkerung besteht. Entsprechend sollte die Anlage von einem Ort aus aktiviert werden können, der bei einer Leckage gefahrlos betreten werden kann.
- Befinden sich in der näheren Umgebung sensitive Objekte (z. B. Altersheim, Schule, Einkaufszentrum) und sind keine verhältnismässigen Massnahmen möglich, die eine Freisetzung bzw. eine Ausbreitung ins Freie verhindern, kann die Umgebung mit Ammoniak-Sensoren überwacht und mit einem entsprechenden Alarmierungssystem gekoppelt werden. Diese Massnahme ist nur in Rücksprache mit dem Besitzer und /oder dem Betreiber des sensitiven Objektes möglich. Achtung: Eine Detektion im Freien ist technisch anspruchsvoll und muss mit entsprechender Fachkenntnis und Sorgfalt geplant werden.

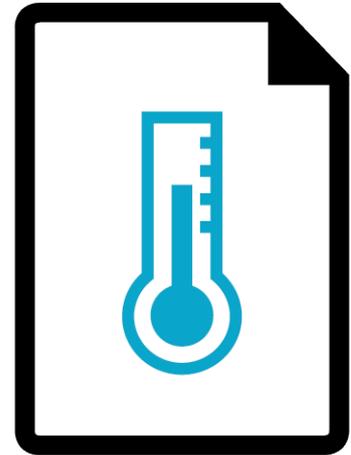


- Bei Inbetriebnahme, sind alle Schweissnähte von flüssigkeitsführenden Leitungen im Freien zu überprüfen. Gemäss Regeln der Technik werden standardmässig 10 % der Schweissnähte geprüft (basierend auf der EU Pressure Equipment Directive PED 97/23).
- Wahl eines Anlagentyps ohne ammoniakführende Teile im Freien.
- Bei Neuanlagen ist der Hochdruckschwimmer möglichst nah am Kondensator zu platzieren, so dass die Kondensatleitung (Hochdruckflüssigkeitsleitung nach dem Kondensator) möglichst kurz ist.

### 3.5.2 Massnahmen zum Schutz der Umwelt

- Rückkühlung von Ammoniak-Kreisläufen mit Wasser nur über einen Sekundärkreis (d.h. keine Direktkühlung mit Grund- oder Oberflächenwasser), wenn auch mit pH-Überwachung noch ein zu grosses Umweltrisiko besteht.
- Rückhalt von Löschwasser sicherstellen:
  - Installation von Schiebern in der Kanalisation. Diese müssen im Falle einer Freisetzung sicher betätigt werden können.
  - Asphaltierung von Plätzen rund um die Kälteanlage, um das Abwasser von Hydroschilden zurückhalten zu können.

## 4 Kurzbericht: Schadensausmass abschätzen



### 4.1 Zweck und Umfang

Der Kurzbericht ermöglicht der Vollzugsbehörde eine Beurteilung der möglichen Auswirkungen von Störfällen und verschafft ihr zusammen mit einer Besichtigung vor Ort die nötigen Grundlagen für den Entscheid, ob der Inhaber den Pflichten nach Artikel 3 StFV nachkommt und ob er eine Risikoermittlung zu erstellen hat (Lit. [3]).

Im Kern muss der Kurzbericht darlegen, ob die Annahme zulässig ist, dass «eine schwere Schädigung für die Bevölkerung oder die Umwelt infolge von Störfällen nicht zu erwarten ist» (Lit. [1]). Dazu sind realistische, schlimmstmögliche Szenarien («worst cases») zu untersuchen (Lit. [3]). Ein Kurzbericht beinhaltet gemäss Art. 5 StFV folgende Angaben:

- eine knappe Beschreibung des Betriebs mit Übersichtsplan und Angaben zur Umgebung
- eine Liste der Höchstmengen der im Betrieb vorhandenen Stoffe, Zubereitungen oder Sonderabfällen, welche die Mengenschwellen überschreiten, sowie die anwendbaren Mengenschwellen
- die Grundlagen allfälliger Sach- und Betriebshaftpflichtversicherungsverträge
- Angaben über die Sicherheitsmassnahmen
- eine Einschätzung des Ausmasses einer möglichen Schädigung der Bevölkerung oder der Umwelt infolge von Störfällen



Weitere Hinweise zum Erstellen eines Kurzberichtes finden sich im Handbuch I zur StFV in Anhang A3 (Lit. [3]). Verschiedene Kantone bieten zudem ein Formular zur Erstellung von Kurzberichten an. Mit diesem wird gewährleistet, dass die kantonale Vollzugsstelle alle relevanten Informationen erhält.

## 4.2 Zu untersuchende Ereignistypen

Wie bei anderen Industrieanlagen können auch bei Kälteanlagen mit Ammoniak eine Vielzahl verschiedener, unerwünschter Ereignisse auftreten. Für die Störfallvorsorge ist aus verschiedenen Gründen nur ein kleiner Teil relevant. Im Folgenden wird daher darauf eingegangen, welche Ereignistypen auf Stufe Kurzbericht berücksichtigt werden müssen bzw. aus welchen Gründen gewisse Ereignistypen nicht relevant sind.

### 4.2.1 Ausbreitung einer toxischen Wolke

Die Ausbreitung der Ammoniakwolke (Ammoniakgas + Aerosol) ist die massgebende Gefährdung, die von Kälteanlagen mit Ammoniak ausgeht. Entsprechende Szenarien sind daher näher zu untersuchen.

Als Hilfsmittel werden in den Kapiteln 4.3 bis 4.6 Anforderungen an die Ausmasseschätzung auf Stufe Kurzbericht formuliert. Diese gelten unabhängig davon, ob die entsprechende Kälteanlage der StFV unterstellt wurde, weil die Mengenschwelle überschritten wird oder weil andere in [Kapitel 2](#) aufgeführte Kriterien erfüllt sind.

### 4.2.2 Gewässerverschmutzung

Gewässerverschmutzungen in störfallrelevantem Ausmass stehen bei Kälteanlagen mit Ammoniak in der Regel nicht im Vordergrund. Im Kurzbericht muss beschrieben werden, ob im Falle einer Ammoniakfreisetzung eine Gewässerverschmutzung auftreten kann. Zur Berechnung des Schadensausmasses wird der Indikator «Verunreinigte Oberirdische Gewässer (Volumen)» gemäss Lit. [4] herangezogen. Für die Ökotoxizität von Ammoniak wird die  $LC_{50}$  für Fische von 27,1 mg/l (96 Stunden) eingesetzt (Lit. [20]). Gründe für eine Nichtbehandlung könnten sein, dass;

- sich das gas- bzw. aerosolförmig freigesetzte Ammoniak über die Luft verflüchtigt und zu keiner relevanten Gewässerverschmutzung führt. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass im Rahmen einer Intervention der Einsatzkräfte anfallendes Abwasser (z.B. Niederschlagen von Ammoniak mittels Hydroschild) zurückgehalten werden kann.
- gemäss heutigen Regeln der Technik und Stand der Sicherheitstechnik das als Flüssigkeitslache anfallende Ammoniak vor Ort zurückgehalten werden muss.

Erfolgt die Rückkühlung direkt über Grund- oder ein Oberflächengewässer oder ist der Rückhalt von flüssig anfallendem Ammoniak nicht gewährleistet, ist die Situation jedoch genauer zu prüfen.



### 4.2.3 Explosion

Explosionsszenarien sind gegenüber den toxischen Wirkungen für die Störfallvorsorge bei Ammoniak-Kälteanlagen aus folgenden Gründen von untergeordneter Bedeutung und müssen nur in begründeten Fällen berücksichtigt werden:

- Bei Konzentrationen zwischen 15.4 bis 33.6 % (entspricht 108 bis 240 g/m<sup>3</sup>; Lit. [19]) bildet Ammoniak mit Luft ein explosionsfähiges Gemisch. Dennoch liegt die Konzentration im Freien auch bei sehr grossen Mengen, die insgesamt freigesetzt werden (10 bis 40 t), rasch unter 5 bis 10 %. Es besteht daher keine signifikante Wahrscheinlichkeit für eine Zündung bzw. Explosion im Freien (Lit. [16], S. 31/32).
- Innerhalb des Maschinenraumes bzw. der Lüftungsanlage können hingegen explosionsfähige Ammoniak-Konzentrationen auftreten. Um Explosionsereignisse zu vermeiden, müssen in den entsprechenden Gebäudeteilen angemessene Explosionsschutzmassnahmen getroffen werden. Beispielsweise wird der Maschinenraum gemäss Stand der Sicherheitstechnik (vgl. Kapitel 3) spätestens beim Erreichen von 30 000 ppm Ammoniak stromlos geschaltet.
- Sollte es dennoch zu einer Explosion kommen, bleibt deren Wirkung, verglichen mit der Ausbreitung einer toxischen Wolke, räumlich stark begrenzt. Es handelt sich primär um ein Thema der Arbeitssicherheit.

Betriebsinterne Explosionsschutzmassnahmen haben somit dennoch ihre Berechtigung und werden hierdurch nicht in Frage gestellt.



### 4.3 Das Vorgehen im Überblick

Eine Freisetzung von Ammoniak bei einer Kälteanlage läuft in drei Phasen ab: Freisetzung, Ausbreitung und Schadenswirkung bei Personen. Das Vorgehen zur Einschätzung des möglichen Schadenausmasses orientiert sich an diesen Phasen und ist in Abbildung 13 dargestellt. Diese verweist zudem auf die jeweiligen Kapitel bzw. Abbildungen, die unterstützend beigezogen werden können.

**Abbildung 13: Schadenausmass auf Stufe Kurzbericht beurteilen: Vorgehen im Überblick.**

#### PHASE 1: FREISETZUNG

**Abhängig vom Anlagentyp die relevanten Szenarien bestimmen**

> gemäss Abbildung 14 bis Abbildung 20

**Für jedes zu betrachtende Szenario die Freisetzungsmenge bzw. -rate bestimmen, abhängig vom Freisetzungsort**

> gemäss Kapitel 4.4.2 «Freisetzungsmenge bzw -rate»



#### PHASE 2: AUSBREITUNG

**Ausdehnung (Länge und Breite) der Gefährdungsbereiche  $R_{99}$ ,  $R_{50}$  und  $R_1$  bestimmen**

> gemäss Kapitel 4.5.1 «Berechnung der Ausbreitung im Freien»

bzw. ausgehend vom vorliegenden Anlagentyp aus der zutreffenden > Abbildung 14 bis 20 herauslesen, anhand welcher > Abbildungen im Anhang A5 die Gefährdungsdistanzen für die massgebenden Freisetzungsmengen/-raten bestimmt werden können.



#### PHASE 3: SCHÄDIGUNG

**Maximales Personenaufkommen im Freien innerhalb der 3 Gefährdungsbereiche  $R_{99}$ ,  $R_{50}$  und  $R_1$  bestimmen**

(in kritischster Windrichtung, zur kritischsten Tageszeit)

> gemäss Kapitel 4.6.2 «Personenaufkommen»

**Maximales Schadenausmass berechnen**

Anhand des maximalen Personenaufkommens

und den mittleren Letalitätswerten innerhalb  $R_{99}$ ,  $R_{50}$  und  $R_1$

> gemäss Kapitel 4.6.3 «Bestimmung des Schadenausmasses»



### **Phase 1: Freisetzung**

Zunächst erfolgt die Freisetzung von Ammoniak aus der Anlage in deren Umgebung. In vielen Fällen erfolgt diese Freisetzung innerhalb eines Gebäudes: Das Ammoniak breitet sich innerhalb des betroffenen Raumes aus und gelangt über das Lüftungssystem oder über allfällige Raumöffnungen (z.B. Türen, Fenster) ins Freie. Im Rahmen des Kurzberichtes sollen verschiedene Szenarien untersucht werden, um die ungünstigste Kombination von Freisetzungsort und -menge zu ermitteln. Die Grundlagen dazu sind in Kapitel 4.4 beschrieben.

### **Phase 2: Ausbreitung**

Nach seiner Freisetzung breitet sich das Ammoniak-Gas in der Umgebung aus. Für die Störfallvorsorge relevant ist primär die Ausbreitung im Freien. Dazu muss das freigesetzte Ammoniak zunächst aus dem Gebäude ins Freie gelangen. In der Regel erfolgt dies über die Lüftungskanäle. In Ausnahmefällen auch über Schwachstellen in der Gebäudehülle (z.B. Türen, Fenster; siehe hierzu auch Kapitel 4.4.1).

### **Phase 3: Schädigung**

Ein Schaden tritt dann ein, wenn Menschen über eine gewisse Zeit einer akut toxischen Konzentration von Ammoniak ausgesetzt sind. Für den Kurzbericht muss daher abgeschätzt werden, wie viele Personen sich im ungünstigsten Fall gleichzeitig im Gefährdungsbereich aufhalten.

## 4.4 Freisetzung von Ammoniak

### **4.4.1 Szenarienbildung: Freisetzungswege und Gasausbreitung**

Für die Ausmasseinschätzung auf Stufe Kurzbericht werden voneinander getrennte Kältemittel-Kreisläufe separat beurteilt. Es wird empfohlen, für die Beurteilung auf dieser Stufe von folgenden vier Freisetzungsszenarien (je Anlage) auszugehen und aus diesen den «worst-case» abzuleiten:

- Kontinuierliche Freisetzung beim Verdampfer
- Kontinuierliche Freisetzung beim Abscheider
- Kontinuierliche Freisetzung beim Kondensator
- Spontane Freisetzung im Bereich des Abscheiders  
(Je nach Situation mit spontanem oder kontinuierlichem Quellterm für die anschließende Ausbreitung. – Vgl. Kapitel 4.4.2.)



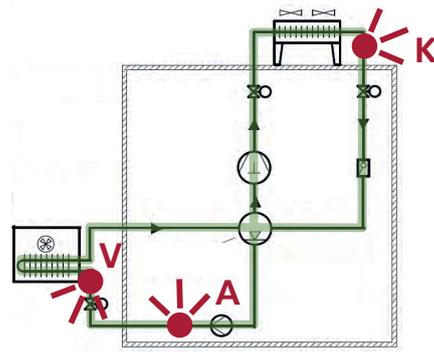
Bei gewissen Anlagentypen befinden sich verschiedene Anlagenteile im selben Raum und werden daher gemeinsam betrachtet. Abbildung 14 bis Abbildung 20 illustrieren die Freisetzungsorte, die je nach Anlagentyp zu betrachten sind. Zudem ist dort jeweils angegeben, mit Hilfe welcher zusätzlichen Abbildungen die Ausdehnung des Gefährdungsbereiches ermittelt werden soll (vgl. dazu Kapitel 4.5.1 sowie [Anhang A5](#)).

Bei einer aussergewöhnlichen Anlagenkonfiguration können möglicherweise auch andere Freisetzungsorte zum «worst-case» Szenario führen. Ist dies der Fall, sollten im Kurzbericht entsprechende Freisetzungsszenarien untersucht werden.

**Abbildung 14: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.**

#### FREISETZUNGSSZENARIOEN UND GASAUSBREITUNGSMODELL

Typ 1  
Direktverflüssigung  
Direktverdampfung



Zu untersuchende Szenarien:

#### Kontinuierliche Freisetzung

- V: Aus Flüssigkeitsleitung vor dem Verdampfer direkt ins Freie, wenn sich dieser im Freien befindet;  
bzw. via Lüftung ins Freie wenn sich dieser im Gebäude befindet
- A: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem Abscheider via Lüftung ins Freie
- K: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem Kondensator direkt ins Freie

Art der Gasausbreitung und zu verwendendes Ausbreitungsmodell

- V: Kontinuierlich, Schwergas, 80 % Aerosol in der Wolke ([Abbildung 43 bis Abbildung 45](#))  
Kontinuierlich, Neutralgas ([Abbildung 46 bis Abbildung 51](#))
- A: Kontinuierlich, Neutralgas ([Abbildung 46 bis Abbildung 51](#))
- K: Kontinuierlich, Schwergas, 80 % Aerosol in der Wolke ([Abbildung 43 bis Abbildung 45](#))

#### Spontane Freisetzung

Freisetzung aus dem Abscheider:

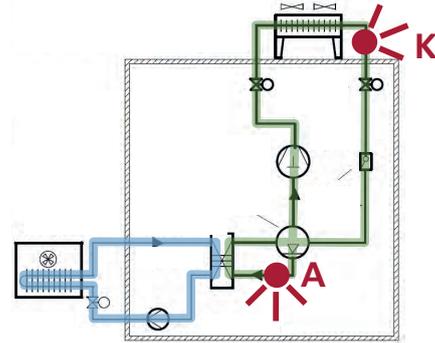
- Via Lüftung ins Freie, wenn in gefangenem Raum
  - bzw. via Fassadenöffnung(en) ins Freie, wenn in an Aussenfassade angrenzendem Raum
- Kontinuierlich, Neutralgas ([Abbildung 46 bis Abbildung 51](#))
  - Spontan, Schwergas 50 % Aerosol in der Wolke ([Abbildung 40 bis Abbildung 42](#))



**Abbildung 15: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.**

#### FREISETZUNGSSZENARIOEN UND GASAUSSBREITUNGSMODELL

Typ 2  
Direktverflüssigung  
Kälteträger



Zu untersuchende Szenarien:

#### Kontinuierliche Freisetzung

- A: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem Abscheider via Lüftung ins Freie
- K: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem Kondensator direkt ins Freie

Art der Gasausbreitung und zu verwendendes Ausbreitungsmodell

- A: Kontinuierlich, Neutralgas (Abbildung 46 bis Abbildung 51)
- K: Kontinuierlich, Schwergas, 80 % Aerosol in der Wolke (Abbildung 43 bis Abbildung 45)

#### Spontane Freisetzung

Freisetzung aus dem Abscheider:

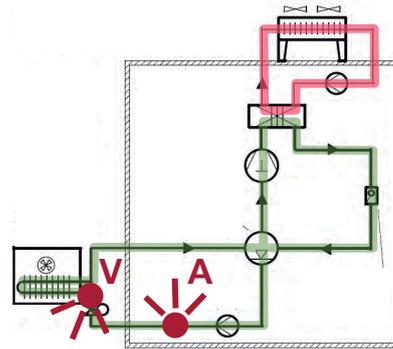
- Via Lüftung ins Freie, wenn in gefangenem Raum
- bzw. via Fassadenöffnung(en) ins Freie, wenn in an Aussenfassade angrenzendem Raum
- Kontinuierlich, Neutralgas (Abbildung 46 bis Abbildung 51)
- Spontan, Schwergas 50 % Aerosol in der Wolke (Abbildung 40 bis Abbildung 42)



**Abbildung 16: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind**

### FREISETZUNGSSZENARIOEN UND GASAUSSBREITUNGSMODELL

Typ 3  
Wärmeträger  
Direktverdampfung



Zu untersuchende Szenarien:

#### Kontinuierliche Freisetzung

V: Aus Flüssigkeitsleitung vor dem Verdampfer direkt ins Freie, wenn sich dieser im Freien befindet;

bzw. via Lüftung ins Freie, wenn sich dieser im Gebäude befindet

A: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem Abscheider via Lüftung ins Freie

Art der Gasausbreitung und zu verwendendes Ausbreitungsmodell

V: Kontinuierlich, Schwergas, 80% Aerosol in der Wolke  
(Abbildung 43 bis Abbildung 45)

Kontinuierlich, Neutralgas  
(Abbildung 46 bis Abbildung 51)

A: Kontinuierlich, Neutralgas  
(Abbildung 46 bis Abbildung 51)

#### Spontane Freisetzung

Freisetzung aus dem Abscheider:

- Via Lüftung ins Freie, wenn in gefangenem Raum
- bzw. via Fassadenöffnung(en) ins Freie, wenn in an Aussenfassade angrenzendem Raum

– Kontinuierlich, Neutralgas  
(Abbildung 46 bis Abbildung 51)

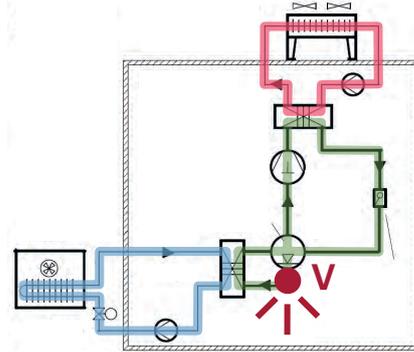
– Spontan, Schwergas  
50 % Aerosol in der Wolke  
(Abbildung 40 bis Abbildung 42)



Abbildung 17: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.

#### FREISETZUNGSSZENARIOEN UND GASAUSSBREITUNGSMODELL

Typ 4  
Wärmeträger  
Kälteträger



Zu untersuchende Szenarien:

#### Kontinuierliche Freisetzung

V: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem Abscheider  
via Lüftung ins Freie

Art der Gasausbreitung und  
zu verwendendes Ausbreitungsmodell

V: Kontinuierlich, Neutralgas  
(Abbildung 46 bis Abbildung 51)

#### Spontane Freisetzung

Freisetzung aus dem Abscheider:

- Via Lüftung ins Freie, wenn in gefangenem Raum
- bzw. via Fassadenöffnung(en) ins Freie, wenn in an Aussenfassade angrenzendem Raum

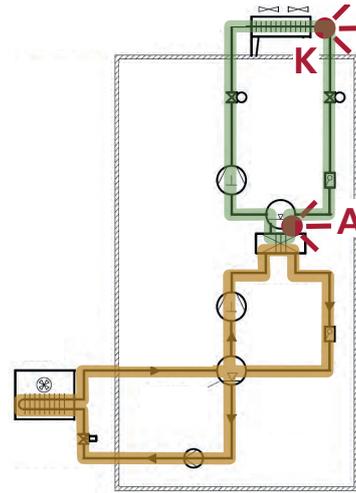
- Kontinuierlich, Neutralgas  
(Abbildung 46 bis Abbildung 51)
- Spontan, Schwergas  
50 % Aerosol in der Wolke  
(Abbildung 40 bis Abbildung 42)



**Abbildung 18: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.**

#### FREISETZUNGSSZENARIOEN UND GASAUSSBREITUNGSMODELL

Typ 5  
Direktverflüssigung  
Direktverdampfung CO<sub>2</sub>



Zu untersuchende Szenarien:

#### Kontinuierliche Freisetzung

- A: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem Abscheider via Lüftung ins Freie
- K: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem Kondensator direkt ins Freie

Art der Gasausbreitung und zu verwendendes Ausbreitungsmodell

- A: Kontinuierlich, Neutralgas (Abbildung 46 bis Abbildung 51)
- K: Kontinuierlich, Schwergas, 80% Aerosol in der Wolke (Abbildung 43 bis Abbildung 45)

#### Spontane Freisetzung

Freisetzung aus dem Abscheider:

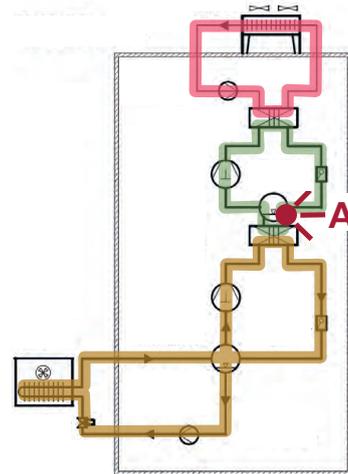
- Via Lüftung ins Freie, wenn in gefangenem Raum
- bzw. via Fassadenöffnung(en) ins Freie, wenn in an Aussenfassade angrenzendem Raum
- Kontinuierlich, Neutralgas (Abbildung 46 bis Abbildung 51)
- Spontan, Schwergas 50% Aerosol in der Wolke (Abbildung 40 bis Abbildung 42)



**Abbildung 19: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.**

#### FREISETZUNGSSZENARIOEN UND GASAUSSBREITUNGSMODELL

Typ 6  
Wärmeträger  
Direktverdampfung CO<sub>2</sub>



Zu untersuchende Szenarien:

#### Kontinuierliche Freisetzung

A: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem Abscheider via Lüftung ins Freie

Art der Gasausbreitung und zu verwendendes Ausbreitungsmodell

A: Kontinuierlich, Neutralgas (Abbildung 46 bis Abbildung 51)

#### Spontane Freisetzung

Freisetzung aus dem Abscheider:

- Via Lüftung ins Freie, wenn in gefangenem Raum
- bzw. via Fassadenöffnung(en) ins Freie, wenn in an Aussenfassade angrenzendem Raum

- Kontinuierlich, Neutralgas (Abbildung 46 bis Abbildung 51)
- Spontan, Schwergas 50% Aerosol in der Wolke (Abbildung 40 bis Abbildung 42)



**Abbildung 20: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.**

#### FREISETZUNGSSZENARIOEN UND GASAUSBREITUNGSMODELL

*Typ 7*

*Luftgekühlte Kälteanlagen,  
vollständig im Freien aufgestellt  
(Keine schematische Darstellung)*

*Zu untersuchende Szenarien:*

*Art der Gasausbreitung und  
zu verwendendes Ausbreitungsmodell*

##### **Kontinuierliche Freisetzung**

A: Aus Flüssigkeitsleitung nach Abscheider  
direkt ins Freie

A: Kontinuierlich, Schwergas  
80% Aerosol in der Wolke  
(Abbildung 43 bis Abbildung 45)

##### **Spontane Freisetzung**

– Gesamtinhalt direkt ins Freie

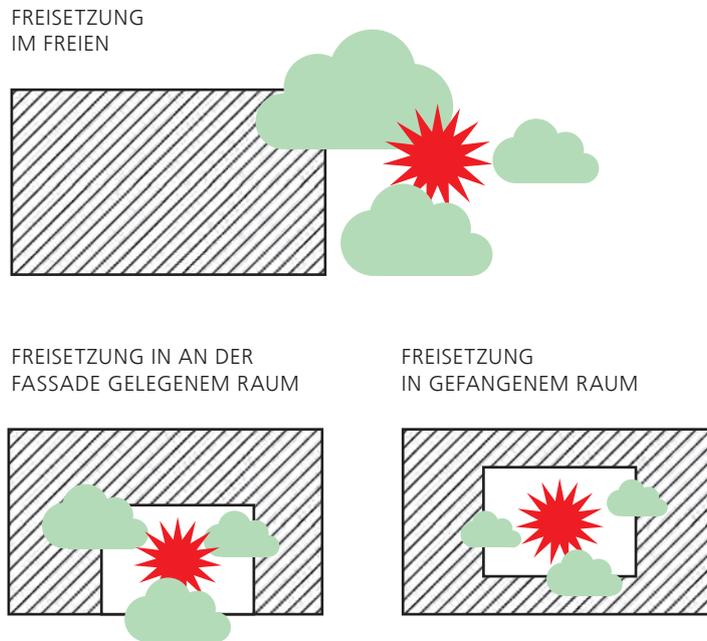
– Spontan, Schwergas  
50% Aerosol in der Wolke  
(Abbildung 40 bis Abbildung 42)

#### 4.4.2 Freisetzungsmenge bzw. -rate

Bei der Bestimmung des maximal möglichen Schadensausmasses muss eine Freisetzung des gesamten Inhalts aus einem in sich geschlossenen Ammoniak-Kreislauf betrachtet werden. Allenfalls vorhandene Schnellschlussventile werden dabei vernachlässigt, da auf Stufe Kurzbericht keine aktiven Sicherheitsmassnahmen berücksichtigt werden dürfen. Allerdings breitet sich nicht in jedem Fall die gesamte freigesetzte Ammoniak-Menge wolkenförmig in der Umgebung aus: Je nach Freisetzungsort sammelt sich ein Teil des Ammoniaks als Flüssigkeitslache am Boden und verdunstet nur sehr langsam. Vom freigesetzten Gas mitgerissene Aerosoltröpfchen schlagen sich zudem je nach Ausbreitungspfad mehr oder weniger an Hindernissen nieder und nehmen ebenfalls nur noch teilweise an der Wolkenausbreitung teil. Analog zu den Unterstellungskriterien wird dabei zwischen den drei Freisetzungsorten «im Freien», «in an Fassade angrenzendem Raum» und «in gefangenem Raum» unterschieden (siehe Abbildung 21 [bzw. Kapitel 2.2.3](#)).



**Abbildung 21: Je nach Ort der Leckage gelangt mehr oder weniger Ammoniak ins Freie und breitet sich dort wolkenförmig aus.**



Zur Bestimmung des an der Wolkenausbreitung teilnehmenden Ammoniak-Anteils werden dieselben Korrekturfaktoren wie bei den Unterstellungskriterien angewandt. Für spontane Freisetzungen wurden diese anhand analoger Überlegungen ergänzt. In Tabelle 5 sind die entsprechenden Werte nochmals aufgeführt. Zur Herleitung der entsprechenden Werte vgl. Anhang A5.

**Tabelle 5: Korrekturfaktoren für den an Ammoniak-Anteil, der sich wolkenförmig im Freien ausbreitet (Gas und Aerosol).**

Freisetzungsort	Korrekturfaktor $K_{Ort}$ <sup>24)</sup>	
	Kontinuierliche Freisetzung	Spontane Freisetzung
Die Freisetzung findet im Freien statt	1.0	0.4
Die Freisetzung findet in einem Raum statt, der direkt an die Aussenfassade grenzt (mit Öffnungen, die direkt ins Freie führen)	0.2 (oder 0.6; vgl. Tabelle 16, Anhang A5)	0.4 (oder 0.2; vgl. Tabelle 17, Anhang A5)
Die Freisetzung findet in einem gefangenen Raum statt > Kontinuierlicher Quellterm, Freisetzung via Entlüftungsschächte über 10 min.	0.2	0.2 <sup>25)</sup>

<sup>24)</sup> Die Korrekturfaktoren leiten sich aus den Annahmen ab, welcher Anteil des Ammoniaks spontan verdunstet und wie viel flüssiges Ammoniak vom ausströmenden Gas als Aerosol mitgerissen wird. Die angegebenen Korrekturfaktoren basieren auf Angaben in Lit. [6]. Zur Herleitung vgl. auch Anhang A5.

<sup>25)</sup> Es wird davon ausgegangen, dass das Ammoniak nach einer spontanen Freisetzung in einem gefangenen Raum über die Lüftungsanlage ins Freie gelangt. Der Ausbreitung im Freien wird dabei ein kontinuierlicher Quellterm zugrunde gelegt, wobei von einer Freisetzungsdauer von 10 Min. ausgegangen wird.



Die Gesamtmasse des sich wolkenförmig im Freien ausbreitenden Ammoniaks lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$m_{(\text{Ammoniak, Wolke})} = m_{(\text{Ammoniak in der Anlage})} \times K_{\text{Ort}}$$

Für kontinuierliche bzw. spontane Freisetzungen sind neben der gesamten Freisetzungsmenge weitere Aspekte zu berücksichtigen, die im Folgenden beschrieben werden.

### **Kontinuierliche Freisetzungen beim Verdampfer, Abscheider und Kondensator**

Für kontinuierliche Freisetzungen ist nicht nur die absolute Freisetzungsmenge ausschlaggebend, sondern ebenfalls, innerhalb welcher Zeit diese stattfindet. Zur Ermittlung der Freisetzungsrates ist auf Stufe Kurzbericht davon auszugehen, dass sich die Anlage innerhalb von 10 Min. vollständig entleert (Lit. [18], Anhang E)<sup>26)</sup>.

Ergibt die obige Berechnung eine Freisetzungsrates von über 10 kg/s, so ist als maximale Freisetzungsrates 10 kg/s zugrunde zu legen<sup>27)</sup>, und die Freisetzungsdauer muss anlagen-spezifisch anhand der gesamten Ammoniakmenge in der Anlage berechnet werden. In diesem Fall können nicht mehr die vorausberechneten Gefährdungsbereiche gemäss dem vereinfachten Modell in [Kapitel 4.5.1](#) bzw. [Anhang A5](#) verwendet werden. Es sind dann eigene Ausbreitungsrechnungen durchzuführen, die diesen Gegebenheiten gerecht werden.

### **Spontane Freisetzungen im Bereich des Abscheiders**

Für eine spontane Freisetzung ist das vollständige Versagen eines Behälters erforderlich. Dabei wird dessen Inhalt schlagartig freigesetzt. Der restliche Anlageninhalt strömt kontinuierlich durch die entstandene Öffnung nach. Als Quellterm für eine spontane Freisetzung sollten daher nur grössere, zusammenhängende Ammoniakmengen zugrunde gelegt werden, z.B. der Inhalt eines Kondensatsammlers, nicht der gesamte Anlageninhalt.

Bei spontanen Freisetzungen verbleibt ein grosser Teil des freigesetzten Ammoniaks in der Flüssigkeitslache und nimmt nicht an der Wolkenausbreitung teil. Für die «worst case» Betrachtungen auf Stufe Kurzbericht sind spontane Freisetzungen daher erst bei grossen Freisetzungsmengen relevant. Für Anlagen mit weniger als 2000 kg

<sup>26)</sup> Die Abweichung von den Vorgaben für die Unterstellungskriterien ist bewusst gewählt. Dies ist dadurch begründet, dass sich kleinere Anlagen schneller entleeren. Die Freisetzungsdauer von 5 Min. bei den Unterstellungskriterien wird für störfallrelevante Ereignisse bei Kleinanlagen unter 2 t Inhalt als realistisch beurteilt. Eine Sensitivitätsanalyse der Ausbreitungsberechnungen bzgl. dieses Parameters ergab zudem, dass bei gleicher freigesetzten Ammoniak-Menge die Entleerungszeiten zwischen 2 – 10 Min. nur einen geringen Einfluss auf die Ausdehnung des Gefährdungsbereiches haben.

<sup>27)</sup> Die Freisetzungsrates ist durch den maximalen Leitungsquerschnitt limitiert. Mit steigendem Ammoniakinhalt nehmen die Leitungsquerschnitte allerdings unterproportional zu, da grössere Füllmengen nur teilweise durch höhere Kälteleistung begründet sind. Einen mindestens ebenso grossen Einfluss haben Art und Anzahl der Verbraucher, die Dimensionierung der Wärmetauscher sowie die Leitungslänge zwischen Maschinenraum und Kälteverbraucher. Die Auswertung von diesbezüglichen Risikoermittlungen hat gezeigt, dass Freisetzungsrates über 10 kg/s die Ausnahme bilden (vgl. Anhang A2).



Ammoniak, die aufgrund Art. 1 Abs. 3 StFV unterstellt wurden, sind daher keine spontanen Freisetzungen zu berücksichtigen (vgl. hierzu Kapitel 2.2.3).

Auch bei einer spontanen Freisetzung kann die anschliessende Ausbreitung anhand der Retentionswirkung der Gebäudehülle mit einem kontinuierlichen Quellterm erfolgen (vgl. Kapitel 4.5).

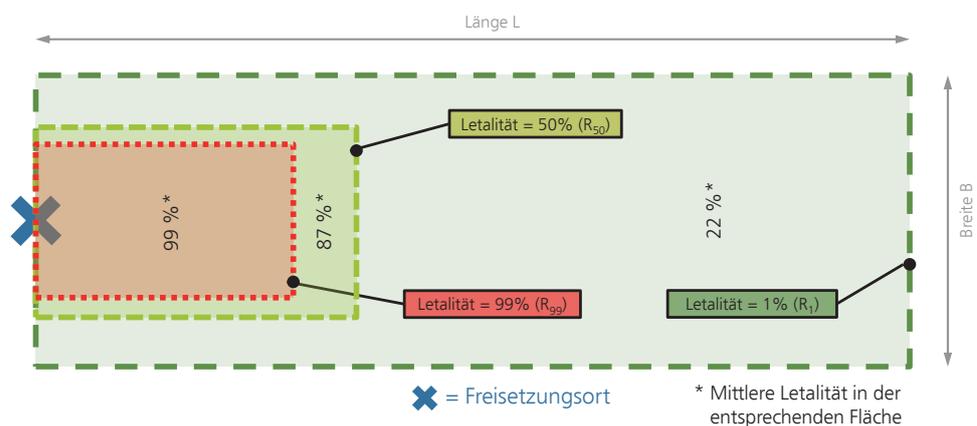
## 4.5 Ausbreitung der toxischen Wolke

Um die Ausmasseneinschätzung auf Stufe Kurzbericht in einfachen Fällen auch ohne eigene Ausbreitungsmodellierungen zu ermöglichen, wurde ein vereinfachtes Modell zur Abschätzung der Wolkenausbreitung erarbeitet. Dieses basiert auf konservativen Annahmen, welche in Anhang A5 dokumentiert sind. Dem Inhaber der Anlage bzw. dem Verfasser des Kurzberichtes steht es frei, von diesen Vorgaben abzuweichen und stattdessen eigene Ausbreitungsrechnungen durchzuführen. Dies kann insbesondere dann sinnvoll sein, wenn mit dem hier beschriebenen Modell nur knapp eine schwere Schädigung erreicht wird. In diesem Fall soll er sich im Sinne eines einheitlichen Vollzuges dennoch soweit wie möglich an die in Anhang A5 beschriebenen Grundannahmen halten. Abweichungen sind zu begründen.

### 4.5.1 Berechnung der Ausbreitung im Freien: vereinfachtes Modell

Wird die Ausbreitung von Gasen mit entsprechenden Softwarehilfsmitteln berechnet, ergeben sich in der Regel tropfenförmige Flächen. An deren Rand herrscht eine definierte, mittlere Letalität für Personen, welche sich während einer bestimmten Zeitdauer dort aufhalten. Im vereinfachten Modell werden die Flächen dieser Gefährdungsbereiche als rechteckig angenommen (vgl. Abbildung 22), Grundlagen und Berechnungen dazu sind in Anhang A5 erläutert. Als Basis für die Ausmasseneinschätzung werden dabei diejenigen Gefährdungsbereiche berücksichtigt, an deren Rand eine Letalität von 99 % (=R<sub>99</sub>), 50 % (=R<sub>50</sub>) bzw. 1 % (=R<sub>1</sub>) vorliegt (in Anlehnung an Lit. [9]). Innerhalb dieser Bereiche wird mit mittleren Letalitäten von 22 %, 87 % und 99 % gerechnet.

Abbildung 22: Diese Gefährdungsbereiche müssen berücksichtigt werden (vereinfachte Form).





Länge und Breite der entsprechenden Gefährdungsbereiche werden durch verschiedene Parameter beeinflusst. Basierend auf den zu berücksichtigenden Szenarien ist zwischen folgenden Varianten zu unterscheiden:

- Freisetzung mit spontanem Quellterm, Ausbreitung als Schwergas (siehe [Abbildung 40 bis Abbildung 42, Anhang A5](#))
- Freisetzungen mit kontinuierlichem Quellterm:
  - Ausbreitung als Schwergas, Aerosolanteil in der Wolke 80 % (siehe [Abbildung 43 bis Abbildung 45, Anhang A5](#))
  - Ausbreitung als Neutralgas (kein Aerosol in der Wolke) (siehe [Abbildung 46 bis Abbildung 51, Anhang A5](#))

Je nach Anlagentyp ist ein bestimmtes Set an Szenarien zu beurteilen (siehe Kapitel 4.4.1). Die zugehörige Länge und Breite der Gefährdungsbereiche ( $R_1$ ,  $R_{50}$ ,  $R_{99}$ ) können anhand der gemäss Kapitel 4.4.2 ermittelten Freisetzungsmenge bzw. -rate aus den genannten Abbildungen ermittelt werden.

#### **4.5.2 Ausbreitung in Gebäuden mit grossem Personenaufkommen**

Es gelten die selben Annahmen, wie bereits in [Kapitel 2.3](#) aufgeführt.

## 4.6 Einschätzung des Schadensausmasses

### **4.6.1 Schadenindikatoren**

Für Ammoniak wird lediglich der Indikator  $n_1$  «Todesopfer» gemäss Beurteilungskriterien zur StfV (Lit. [4]) berücksichtigt.

### **4.6.2 Personenaufkommen**

Für die verschiedenen Gefährdungsbereiche ist das maximale Personenaufkommen zu bestimmen. Dabei sind die folgenden Rahmenbedingungen zu beachten:

- Im Rahmen der Störfallvorsorge sind zur Ermittlung von Personenschäden nur betriebsfremde Personen zu berücksichtigen.
- Für bereits eingezonte, aber noch nicht bebaute Flächen ist das zukünftige Personenaufkommen zu berücksichtigen. Grundlagen für entsprechende Abschätzungen finden sich in Lit. [9] (Kapitel 7).



- Das für die «worst-case» Betrachtungen relevante, maximale Personenaufkommen ist aufgrund der bestmöglichen verfügbaren Daten zur Wohnbevölkerung und zu den Arbeitsplätzen abzuschätzen.<sup>28)</sup> Dabei ist situativ zu prüfen, ob neben der Wohn- und Arbeitsbevölkerung weitere, regelmässige Nutzungen im Gefährdungsbereich zu berücksichtigen sind (z.B. bei Einkaufszentren, Schulen, Sportplätzen, Bahnhöfen, etc.). Das zugrunde gelegte Personenaufkommen ist anhand einer Begehung vor Ort und / oder in Absprache mit dem Betreiber bzw. der Gemeinde zu verifizieren.
- Grundsätzlich ist derjenige Zeitpunkt für die Freisetzung zu wählen, bei dem die grösste Personenexposition vorliegt. Bei zeitlich beschränkten Nutzungen mit wesentlich höherer Personenexposition (z.B. bei Kunsteisbahnen während Sportveranstaltungen mit Zuschauern) ist ein solches Szenario zugrunde zu legen, falls das zugehörige Schadenausmass a priori höher ist als ausserhalb dieser Zeiten.
- Bezüglich der Anwesenheit der Wohn- und Arbeitsbevölkerung nach Tageszeit und Aufenthalt im Freien haben sich in der Vergangenheit folgende Annahmen etabliert (Lit. [9]):

**Tabelle 6: Präsenzfaktoren für Wohn- und Arbeitsbevölkerung, abhängig von der Tageszeit**

PRÄSENZFAKTOREN	Wohnbevölkerung	Arbeitsbevölkerung
<i>Tageszeit</i>		
Wochentag (7 bis 19 Uhr)	30 % anwesend, davon 10 % im Freien	80 % anwesend, davon 10% (bis 30% <sup>29)</sup> im Freien
Nacht während Woche (19 bis 7 Uhr)	90 % anwesend, davon 1% im Freien	5 % anwesend, davon 5 % (bis 30% <sup>28)</sup> im Freien
Wochenende, Tag (7 bis 19 Uhr)	60 % anwesend, davon 10% im Freien	5 % anwesend, davon 10 % (bis 30% <sup>28)</sup> im Freien
Wochenende, Nacht (19 bis 7 Uhr)	100 % anwesend, davon 1% im Freien	0 % anwesend

<sup>28)</sup> Z.B. die geocodierten Katasterdaten des Bundesamtes für Statistik (für die Wohnbevölkerung jährlich per Ende Jahr aktualisiert, für Arbeitsplätze gemäss letzter Betriebszählung, derzeit 2008)

<sup>29)</sup> Der erhöhte Anteil von 30% der Personen im Freien sollte für Gebäude verwendet werden, die sich sehr nah am Freisetzungsort befinden (Distanz bis  $R_{50}$ ) und gleichzeitig eine hohe Luftwechselrate aufweisen, typischerweise z.B. industriell genutzte Gebäude.



Befinden sich in der Nachbarschaft Betriebe mit stark abweichenden Präsenzfaktoren, müssen diese Werte fallweise angepasst werden (z.B. bei Firmen mit regelmäßiger Nachtarbeit, Schichtbetrieb, etc. während 24 Stunden pro Tag und 7 Tagen pro Woche: je 20 % der Schichtarbeitenden Tag und Nacht anwesend). (Lit. [9]).

Das so abgeleitete Personenaufkommen im Freien innerhalb des Gefährdungsbereiches ist in jedem Fall auf seine Plausibilität hin zu prüfen.

- Für Sondernutzungen mit zeitlich sehr variablem Personenaufkommen wird empfohlen, lediglich dasjenige Personenaufkommen zu berücksichtigen, das durchschnittlich mindestens einmal pro Woche während jeweils mindestens 1 Stunde<sup>30)</sup> auftritt. Es kann angenommen werden, dass Expositionsmaxima, die seltener auftreten, im Rahmen einer Risikoermittlung mit grosser Wahrscheinlichkeit nicht massgeblich zum Gesamtrisiko beitragen, so dass solche Fälle auch auf Stufe Kurzbericht nicht betrachtet werden sollten.
- Nicht berücksichtigt werden sollen Insassen in fahrenden Autos oder fahrenden Zügen.<sup>31)</sup> Falls eine Strasse mit täglichem Verkehrsstau im Gefährdungsbereich liegt, können Personen in diesen Fahrzeugen berücksichtigt werden. Dies ist situativ zu beurteilen. Zu berücksichtigen sind hingegen wartende Personen an Bahnhöfen.
- Es ist von derjenigen Windrichtung auszugehen, welche das höchste Personenaufkommen im zugehörigen Gefährdungsbereich ergibt.
- Auf Stufe Kurzbericht soll die Möglichkeit, dass sich exponierte Personen durch Flucht in Sicherheit bringen, aus Gründen der Einfachheit nicht berücksichtigt werden. Im Gegenzug dazu wird eine hohe Schutzwirkung beim Aufenthalt in Gebäuden zugrunde gelegt (vgl. unten).
- Für benachbarte Wohn- und Bürogebäude kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass in diesen keine Todesfälle infolge von Ammoniak-Freisetzungen zu erwarten sind (d.h. 100 % Gebäudeschutz aufgrund der typischerweise sehr tiefen Luftwechselrate; vgl. hierzu [Anhang A4](#)). Für andere Nutzungen sind Abweichungen möglich:
  - Industriegebäude bieten einen weniger guten Schutz gegenüber einer Gaswolke im Freien, da diese Gebäude in der Regel höhere Luftwechselraten aufweisen. Dadurch würde das Schadenausmass unter den genannten Annahmen für diese

<sup>30)</sup> Über das ganze Jahr entspricht dies einer relativen Häufigkeit von rund 0.6 %.

<sup>31)</sup> Personen in fahrenden Verkehrsmitteln sind in der Regel nur kurzfristig tiefen Ammoniak-Konzentrationen ausgesetzt. Ein fahrendes Auto bzw. ein fahrender Zug befindet sich meist nur wenige Sekunden in der Gaswolke. Da die Fenster normalerweise geschlossen sind, stellt die Fahrzeughülle einen gewissen Schutz dar: Ammoniak gelangt lediglich in beschränkter Menge über die Lüftung ins Fahrzeuginnere. Verkehrsunfälle infolge des starken Ammoniak-Geruchs können jedoch nicht völlig ausgeschlossen werden. Es ist aber davon auszugehen, dass diese eine untergeordnete Rolle spielen.



Gebäude unterschätzt. Um dies zu kompensieren, kann bei Industriegebäuden nahe am Freisetzungsort angenommen werden, dass sich ein höherer Anteil der Belegschaft «im Freien» aufhält, sprich nicht geschützt ist (vgl. hierzu Tabelle 6). Berechnungen haben gezeigt, dass in diesen Fällen eine Erhöhung des Personenanteils im Freien auf 30 % bis zu einer Distanz von  $R_{50}$  zu einem vergleichbaren Schadenausmass führt, wie wenn ein reduzierter Gebäudeschutz berücksichtigt würde.<sup>32)</sup>

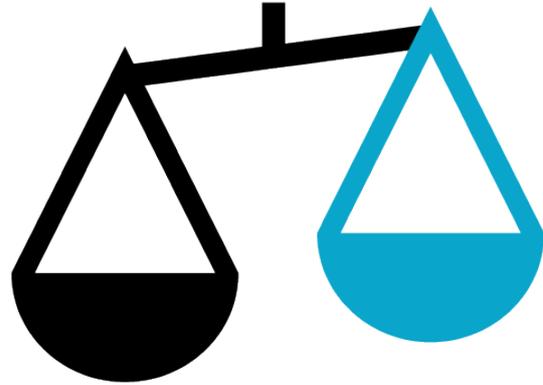
- Die Gültigkeit dieser Annahmen ist situativ zu prüfen; aussergewöhnliche Nutzungen können davon abweichen (z.B. Werkhallen mit permanent offenen Toren). Werden Personen in Gebäuden berücksichtigt, ist die Höhe deren Aufenthaltsortes über Boden in die Überlegungen einzubeziehen: Bei Szenarien mit Ausbreitung von Ammoniak als Schwergas sind Personen an erhöhten Standorten deutlich weniger stark betroffen.
- Weist das Gelände grosse Höhenunterschiede auf, so kann dies in geeigneter Weise berücksichtigt werden (insbesondere bei Szenarien mit Ausbreitung von Ammoniak als Schwergas).
- Sind bei einer Ausbreitung der Ammoniakwolke im Gebäudeinneren Personen gefährdet (Einkaufszentren, Spitäler etc.), so sind diese Personen in der Ausmass-einschätzung analog zum [Kapitel 2.3](#) zu berücksichtigen.

### 4.6.3 Bestimmung des Schadenausmasses

Das maximale Schadenausmass ist für die in [Kapitel 4.4.1](#) identifizierten Szenarien separat auszuweisen. Dazu ist das maximale, gleichzeitige Personenaufkommen im Gefährdungsbereich (vgl. [Kapitel 4.5.1](#)) mit der jeweils zugehörigen mittleren Letalität zu multiplizieren und die Werte über den gesamten Gefährdungsbereich zu addieren.

<sup>32)</sup> Annahme: Die Personen sind gleichmässig über den Gefährdungsbereich verteilt. Befindet sich die Mehrheit der Personen sehr nahe an der Anlage, wird das Ausmass mit dieser Annahme unterschätzt. Sind sie weiter entfernt, wird dieses überschätzt.

## 5 Systemvergleich von Kälteanlagen



### 5.1 Wann ist das sinnvoll?

Ist eine Ammoniak-Kälteanlage der StfV unterstellt, muss die zuständige Vollzugsbehörde das Schadensausmass beurteilen (Kurzbericht) und allenfalls eine genauere Abklärung des von der Anlage ausgehenden Risikos verlangen (Risikoermittlung). Wird das Risiko als zu hoch beurteilt, nimmt die Behörde eine Interessensabwägung vor. In deren Rahmen kann auch überprüft werden, ob das Risiko durch den Umbau zu einem anderen Anlagentyp (vgl. Kapitel 1.1) weiter reduziert werden kann. Neben dem von Grossereignissen ausgehenden Risiko sind auch verschiedene andere Kriterien zu berücksichtigen, die für die Planung einer neuen sowie die Sanierung einer bestehenden Kälteanlage relevant sind.

Eine systematische Gegenüberstellung verschiedener Anlagenvarianten ermöglicht den Behörden in entsprechenden Situationen eine für alle Seiten transparente und faire Beurteilung der Sachlage. Aus diesem Grund wird empfohlen, der Störfallvollzugsstelle einen einfachen, übersichtlichen Systemvergleich verschiedener Anlagevarianten einzureichen. Dieser soll als Hilfsmittel für die sachliche Diskussion zwischen Behörden und Betreiber dienen. In folgenden Fällen soll deshalb der Vollzugsstelle ein Systemvergleich eingereicht werden:

- Wenn eine schwere Schädigung möglich ist und eine Risikoermittlung erarbeitet werden müsste. Evtl. kann diese durch die Wahl eines anderen Anlagentyps (mit geringerem Störfallpotential) überflüssig werden.
- Wenn die Risikoermittlung ein Risiko im Übergangsbereich ergibt, als Basis für die Interessensabwägung durch die Behörde.
- Beim Einreichen von Baugesuchen als Diskussionsbasis für Behörde und Gesuchsteller.



Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung wäre es falsch, einzelne Anlagentypen generell zu verbieten. Die risikobasierte Herangehensweise gemäss StFV unter Berücksichtigung des Standes der Sicherheitstechnik, der standortspezifischen Risiken (Stufe KB bzw. RE) und weiteren Randbedingungen ist auch hier sinnvoll.

## 5.2 Umfang: Kurzüberblick ermöglichen

Ein Systemvergleich soll den Behörden einen raschen Überblick über die wichtigsten Aspekte zur ganzheitlichen Beurteilung einer Kälteanlage bieten. Das entsprechende Dokument ist daher kurz zu halten, z.B. in Form einiger einleitender Bemerkungen und einer Tabelle. Wo für das allgemeine Verständnis erforderlich, sollten die wichtigsten Angaben zur Herleitung der jeweiligen Angaben ebenfalls stichwortartig dokumentiert werden.

Einleitend sind zunächst die situativen Randbedingungen darzulegen, z.B.:

- Anwendungsgebiet
- Temperaturbereich
- Notwendige Kühlleistung
- Verfügbarer bzw. notwendiger Platz für die vorgesehenen Anlageteile (insbesondere bei Umbauten innerhalb bestehender Gebäudestrukturen)

Weiter sind mögliche Varianten bzw. Anlagentypen gegenüberzustellen und bezüglich der folgenden Kriterien zu beurteilen:

1. Störfall (Schadensausmass)
2. Arbeitssicherheit
3. Investitions- und Betriebskosten
4. Energieeffizienz

Im Folgenden wird auf die einzelnen Punkte näher eingegangen.

### **Situative Randbedingungen**

Es sprengt den Rahmen dieses Berichts, auf die situativen Randbedingungen (siehe oben: Anwendungsgebiet, Temperaturbereich etc.) detailliert einzugehen. Denn diese sind je nach Anlage sehr unterschiedlich und lassen sich nicht über einfach fassbare Regeln bzw. Kennwerte abbilden. Es ist die Aufgabe der Fachplaner, im Rahmen konkreter Planungen gemeinsam mit dem Anlageninhaber eine situationspezifische Bestvariante auszuarbeiten, die auch den anderen Aspekten hinreichend Rechnung trägt.



### **Störfall (Schadensausmass)**

Es ist anlagenspezifisch qualitativ zu beschreiben, wie sich die Wahl anderer, technisch umsetzbarer Anlagentypen (vgl. Kapitel 1.1 sowie «situative Randbedingungen») auf die Störfallvorsorge auswirken würden. Befinden sich im Nahbereich der Anlage sensitive Objekte mit hohem Personenaufkommen, können Anlagentypen mit Sekundärkreisläufen (je nach Anwendungsgebiet Anlagentypen 2 bis 6) aus Störfallsicht vorteilhaft sein.

Entsprechend soll der Einfluss verschiedener möglicher Anlagentypen auf das Schadensausmass qualitativ beschrieben werden, z.B. «deutliche Verringerung des potentiellen Schadensausmasses, da Schule bei Variante X im Gefährdungsbereich, bei Variante Y ausserhalb» oder «geringer Einfluss auf Schadensausmass wegen sehr geringem Personenaufkommen im Gefährdungsbereich». Basis für diese Beurteilung kann eine einfache Abschätzung gemäss Unterstellungskriterien (vgl. Kapitel 2) oder gemäss Ausmassabschätzung auf Stufe Kurzbericht (vgl. Kapitel 4) bilden.

### **Arbeitssicherheit**

Unterschiede bezüglich Arbeitssicherheit sind qualitativ zu beschreiben. Generell ist zu berücksichtigen, ob in Räumen mit kältemittelführenden Anlagenteilen regelmässig Betriebspersonal anwesend ist. Für Ammoniak ist neben der toxischen Wirkung auch die Warnwirkung bei kleinen Leckagen infolge des intensiven Geruchs zu berücksichtigen, bei CO<sub>2</sub> die mögliche erstickende Wirkung ohne sinnliche Vorwarnung.

### **Investitions- und Betriebskosten**

Unter diesem Punkt soll abgeschätzt werden, wie stark sich die Wahl eines anderen Anlagentyps auf die Investitions- und Betriebskosten auswirken würde. Die Energiekosten sind hierbei nicht zu berücksichtigen, da sie unter dem Punkt Energieeffizienz separat ausgewiesen werden.

Die Unterhaltskosten sind in der Regel für die Wahl des Anlagentyps vernachlässigbar, da deren Höhe praktisch unabhängig vom eingesetzten Kältemittel bzw. Anlagentyp ist. Der Grund liegt darin, dass die Hauptkosten in der Regel durch die Verdichterpflege anfallen.

Basierend auf den Abklärungen zum Kriterium Störfall (Schadensausmass) sollen die Investitions- und Betriebskosten in Relation zu den Gesamtkosten des zugehörigen Bauprojektes oder allenfalls des Jahresumsatzes am Anlagenstandort gesetzt werden. In letzterem Fall sind die Investitionskosten basierend auf der erwarteten Lebensdauer in mittlere Jahreskosten umzurechnen.

### **Energieeffizienz**

Die Energieeffizienz einer Kälteanlage wirkt sich direkt auf den Energieverbrauch einer Anlage zur Kälteerzeugung aus. Sie schlägt sich direkt auf die Energiekosten nieder, die einen signifikanten Anteil an den Betriebskosten ausmachen. Die Energieeffizienz verschiedener Varianten einer Kälteanlage soll deshalb über die Leistung sowie über die jährlichen Energiekosten dargestellt werden. Ergänzend dazu sollte auch der Energiebedarf pro erzeugte Kälteleistung angegeben werden (Wirkungsgrad).



### 5.3 Schematisches Beispiel

Tabelle 7 zeigt, wie z.B. verschiedene Anlagevarianten einer Kunsteisbahn für einen Systemvergleich gegenübergestellt werden können. Die situativen Rahmenbedingungen sind gesondert zu erläutern.

**Tabelle 7: Schematisches Beispiel eines Systemvergleichs: So lassen sich verschiedene Anlagevarianten einer offenen Kunsteisbahn gegenüberstellen**

(Beispiel ohne anlagenspezifische Inhalte).

FREISETZUNGSRATE	Vorschlag Inhaber	Variante A	Variante B
	<i>Feldkühlung direkt mit NH<sub>3</sub></i>	<i>Feldkühlung indirekt mit Glykol 35%</i>	<i>Feldkühlung indirekt mit CO<sub>2</sub></i>
Störfall (Schadensaumass)	(Qualitative Angabe)		
Arbeitssicherheit			
Erstellungskosten je Piste [CHF]			
Erstellungskosten insgesamt [CHF]			
* Gesamtinvestitionskosten laufendes Projekt [CHF]			
* Jahresumsatz am Standort [CHF]	(Quantitative Angabe)		
* Anzahl Arbeitsplätze am Standort			
Energiebedarf [MWh/Jahr]			
Energiekosten [CHF/Jahr] (Basis: x Rp/kWh)			
Wirkungsgrad [%] <sup>33)</sup>			
Relativer Energieverbrauch offenes Eisfeld	100 %	X %	Y %

Die mit \* versehenen Punkte helfen der Behörde abzuschätzen, ob die Kosten für allfällige Massnahmen verhältnismässig sind. Es ist projekt- bzw. anlagenspezifisch abzuschätzen, welche dieser Angaben im konkreten Fall hilfreich sind und daher ausgewiesen werden. Wenn sinnvoll, können auch andere Kennwerte angegeben werden.

Wenn die Angaben zu einem Punkt beim aktuellen Projektstand noch nicht bekannt sind, kann dieser mit einer kurzen Begründung offen gelassen werden.

<sup>33</sup> Energiebedarf pro Kälteleistung

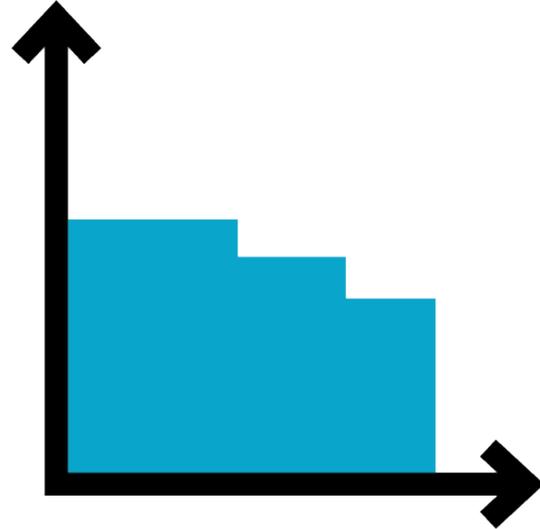


#### 5.4 Interpretation: Anpassungen zielführend, wirtschaftlich tragbar und verhältnismässig?

Der Systemvergleich dient der Beurteilung, ob Anpassungen am Anlagenlayout im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung zielführend, wirtschaftlich tragbar und verhältnismässig sind. Er fördert eine differenzierte Auseinandersetzung mit möglichen Alternativen im Layout sowie deren Auswirkungen auf verschiedene Aspekte, die für die Planung und den Betrieb einer Anlage relevant sind.

Jede Anlage ist ein Unikat und muss zusammen mit ihrer Umgebung individuell beurteilt werden. Entsprechend lässt sich nicht pauschal sagen, dass einzelne Beurteilungskriterien wichtiger sind als andere. Ein Systemvergleich lässt daher keine allgemein gültige, schematische Beurteilung im Sinn von «wenn ... dann ...» zu. Stattdessen ist er als Hilfsmittel zu verstehen, das eine einheitliche, transparente Diskussionsbasis zwischen Planer/ Inhaber und der Behörde bietet und zu einer ausgewogenen Urteilsfindung seitens der Behörde beitragen soll.

# 6 Risikoermittlung



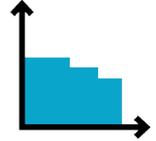
## 6.1 Zweck und Umfang

Ziel einer Risikoermittlung ist es zu überprüfen, ob die von einer Anlage ausgehenden Risiken tragbar sind. Grundlage für diese Risikobeurteilung bilden die Beurteilungskriterien des BAFU (Lit. [4]). Die inhaltlichen Anforderungen an eine Risikoermittlung sind im [Anhang 4](#) der StFV summarisch aufgeführt. Weitere Erläuterungen dazu finden sich im Anhang A4 des Handbuch I zur StFV (Lit. [3]). Es wird unterschieden zwischen vier Bereichen der Risikoermittlung: Grunddaten, Analyse pro Untersuchungseinheit, Schlussfolgerungen und Zusammenfassung. Im Sinne eines effizienten Vollzugs hat es sich bewährt, vorgängig mit der Behörde ein Pflichtenheft zu erarbeiten, das die Anforderungen an die Analyse sowie den Umfang und Detaillierungsgrad der Risikoermittlung festhält. Grundsätzlich gilt, dass das Vorgehen, die zugrunde gelegten Daten und Annahmen sowie das Ergebnis der Risikoermittlung nachvollziehbar dokumentiert werden müssen.

Die Zusammenfassung dient der Information der Öffentlichkeit und wird von der Vollzugsbehörde auf Anfrage bekannt gegeben. Sie ist deshalb in einer auch für Aussenstehende verständlichen Form abzufassen.

## 6.2 Methodik

Für Risikoermittlungen im Bereich der Störfallvorsorge hat sich in den vergangenen Jahren die Methode der Fehler- und Ereignisbaumanalyse bewährt. Das Ergebnis ist in Form einer Risikosummenkurve darzustellen. Das Vorgehen dazu ist im Handbuch I zur StFV, [Anhang A4](#) (Lit. [3]) beschrieben.



## 6.3 Zu untersuchende Ereignistypen

### 6.3.1 Ausbreitung einer toxischen Wolke

Für die toxische Wirkung von Ammoniak sind der Risikoermittlung dieselben Szenarien zugrunde zu legen wie bereits in [Kapitel 4.4.1](#) für den Kurzbericht beschrieben.

Ergänzend sollen auf Stufe Risikoermittlung verschiedene Zeitpunkte des Ereigniseintritts berücksichtigt werden, zu denen sich unterschiedlich viele Personen im Gefährdungsbereich aufhalten. Z.B. Tag/Nacht, Wochentag/Wochenende, Stossverkehr, Sonderanlässe, etc.

### 6.3.2 Gewässerverschmutzung

Gewässerverschmutzungen in störfallrelevantem Ausmass stehen bei Kälteanlagen mit Ammoniak in der Regel nicht im Vordergrund ([vgl. Kapitel 4.2.2](#)).

### 6.3.3 Explosion

Explosionsszenarien werden für die Störfallvorsorge von Ammoniak-Kälteanlagen nur in begründeten Fällen berücksichtigt ([vgl. Kapitel 4.2.3](#)).

## 6.4 Grundlagen zur Häufigkeitsermittlung

Die im Folgenden aufgeführten Grundlagen können für die Ermittlung von Basishäufigkeiten verschiedener Einwirkungen und Versagensraten verwendet werden. Die Auflistung ist nicht abschliessend.

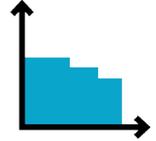
### Versagen verfahrenstechnischer Komponenten

- Center for Chemical Process Safety (1989): Guidelines for Process Equipment Reliability Data. With Data Tables. American Institute of Chemical Engineers.
- VROM (2005): «Red Book». Methods for determining and processing probabilities. Den Haag.

### Fehlhandlungen

Die Häufigkeit menschlicher Fehlhandlungen auf einen allgemein gültigen Zahlenwert herunter zu brechen ist grundsätzlich heikel: Diese hängt sehr stark vom konkreten Arbeitsumfeld ab (organisatorische Vorgaben, Sicherheitskultur, technische Voraussetzungen, etc.). Dennoch gibt es Modelle, die eine entsprechende Quantifizierung versuchen, beispielsweise:

- F.P. Lees (1996): Loss Prevention in the Process Industries. Hazard Identification, Assessment and Control. Volume 1. Butterworth Heinemann.



- VROM (2005): «Red Book». Methods for determining and processing probabilities. Den Haag. (Kapitel 14)

### Flugzeugabsturz

Der Absturz eines Grossraumflugzeuges ist mit so hohen Schäden verbunden, dass eine dadurch verursachte Freisetzung von Ammoniak das Schadensausmass nur unwesentlich beeinflusst. Als auslösendes Ereignis sollen daher nur Abstürze von Kleinflugzeugen, Helikoptern und Militärmaschinen berücksichtigt werden.

Gemäss dem Sicherheitskonzept der Zivilen Bundesverwaltung von 1996 kann die mittlere Absturzwahrscheinlichkeit in der Schweiz zu ca.  $3 \times 10^{-10}/(\text{m}^2 \times \text{Jahr})$  abgeschätzt werden. In der Verlängerung der Start und Landebahn bis ca. 3 km Entfernung ist die Auftreffwahrscheinlichkeit rund 100 Mal grösser als im Durchschnitt. Die zugrundeliegende Untersuchung (Lit. [28]) ist allerdings schon relativ alt und die Anzahl Flugunfälle gemäss Bundesamt für Statistik leicht rückläufig. Entsprechend ist davon auszugehen, dass diese Werte eher konservativ sind. Bei der Beurteilung spezifischer Anlagen sind zudem verschiedene weitere Aspekte zu berücksichtigen:

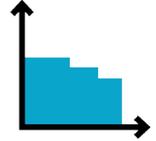
- Die genannte Studie umfasst alle Arten von Luftfahrtobjekten, also z.B. auch Heissluftballone. Je nach Gebäudestruktur um die Kälteanlage ist daher die Aufprallenergie nicht in jedem Fall ausreichend, um eine Freisetzung von Ammoniak zu bewirken. Diesem Umstand sollte mit einem der Anlagenkonstruktion angemessenen Korrekturfaktor Rechnung getragen werden.
- Im Nahbereich grosser Flughäfen bestehen teilweise Flugverbote für Kleinflugzeuge.
- Bei einem bevorstehenden Absturz wird der Pilot immer eine Notlandung auf verhältnismässig sicherem Grund versuchen, z.B. auf einer grossen Strasse, Wiese oder Agrarfläche. Solange das Flugzeug manövrierfähig ist, wird er in jedem Fall versuchen, eine Kollision mit Gebäuden zu verhindern. Die Basisrate der Absturzwahrscheinlichkeit muss situativ an diesen Umstand angepasst werden.

Generelle Angaben zum Flugverkehr und Flugunfällen in der Schweiz:

- Bundesamt für Statistik (BfS) (2013): Mobility and Transport. Swiss Civil Aviation 2012. Neuchâtel.

Absturzhäufigkeit:

- Bundesamt für Statistik, diverse e-Dossiers unter dem Stichwort «Luftverkehr» <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/11/06/blank/01/luftverkehr.html>
- Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL), Bundesamt für Militärflugplätze (BAMF) (1993): Die Auswirkungen der Luftfahrt auf die Umwelt – Teilbericht Absturzrisiken. Erarbeitet durch Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Zürich.



### Erdbeben

Wichtigste Basis für die Beurteilung der Erdbebensicherheit in der Schweiz bildet die entsprechende Bemessungsnorm SIA 261/1.

- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2003):  
Einwirkung auf Tragwerke. Schweizer Norm SN 505 261.

Als Bemessungserdbeben für Bauwerke wird darin ein Ereignis mit 475-jähriger Wiederkehrperiode definiert. Für verschiedene Erdbebenzonen in der Schweiz sind darin die entsprechenden Bodenbeschleunigungswerte vorgegeben:

Z1:  $a_{gd} = 0.6 \text{ m/s}^2$

Z2:  $a_{gd} = 1.0 \text{ m/s}^2$

Z3a:  $a_{gd} = 1.3 \text{ m/s}^2$

Z3b:  $a_{gd} = 1.6 \text{ m/s}^2$

Der lokale Untergrund kann einen markanten Einfluss auf die Erdbebenstärke haben. Dieser wird daher über Korrekturfaktoren berücksichtigt. Für einige Regionen sind zudem sogenannte Mikrozonierungen verfügbar, die eine genauere Abschätzung der örtlichen Gefährdung zulassen. Wo vorhanden, können auch diese Angaben berücksichtigt werden.

Der räumliche Verlauf der genannten Erdbebenzonen kann über die Karten von Swisstopo eingesehen werden:

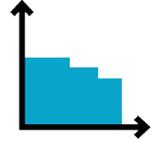
- <http://map.geo.admin.ch/>; Layer «Gefährdungszonen für Erdbeben»

Allgemeine Angaben zur Stärke von Erdbeben in der Schweiz in Abhängigkeit verschiedener statistischer Wiederkehrperioden wurden zudem durch den Schweizerischen Erdbebendienst dokumentiert:

- Schweizerischer Erdbebendienst (SED) (2004):  
Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2004. Zürich.

Nicht jedes (schwache) Erdbeben führt automatisch zu einer Stofffreisetzung aus verfahrenstechnischen Anlagen. Verschiedene Dokumente bieten eine Hilfestellung zur Abschätzung, wie wahrscheinlich eine Freisetzung aus einer Anlage infolge unterschiedlich starker Erdbeben ist:

- H.A. Seligson, R.T. Eguchi, K.J. Tierney, K. Richmond (1996): Chemical Hazards, Mitigation and Preparedness in Areas of High Seismic Risk: A Methodology for Estimation the Risk of Post-Earthquake Hazardous Materials Release, Technical Report NCEER-96-0013, Buffalo NY, USA.
- Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2012): Leitfaden.  
Der Lastfall Erdbeben im Anlagenbau. Frankfurt.



- Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2012):  
Erläuterungen zum Leitfaden. Der Lastfall Erdbeben im Anlagenbau.  
Frankfurt.

### Andere Naturgefahren

Anhand der kantonalen Gefährdungskarten kann abgeschätzt werden, ob für den betroffenen Standort weitere Naturgefahren relevant sind. Für viele Kantone sind die Gefährdungskarten über deren jeweiliges GIS-Portal online abrufbar. Eine Zusammenstellung der Links zu den einzelnen Portalen findet sich auf der Website der Konferenz der Kantonalen Geodaten-Koordinationsstellen und GIS-Fachstellen.

- <http://www.kkgeo.ch/geodatenportale.html>

## 6.5 Freisetzungsmenge bzw. -rate

### Kontinuierliche Freisetzungen

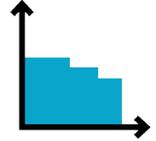
Auf Stufe Risikoermittlung sollen die Freisetzungsraten anhand der realen Betriebsbedingungen berechnet werden (Temperatur, Druck, Leitungsquerschnitt). Dabei sollen Szenarien zu 2 bis 3 unterschiedlichen Leckgrößen gebildet werden (z.B. Vollbruch, kleinere Lecks gemäss einem Modell in Lit. [27] (Kapitel 2.3.3)). Die Wahl der Leckgrößen ist zu begründen. Vereinfachend wird jeweils eine zeitlich konstante Freisetzungsraten angenommen. Auf Stufe Risikoermittlung kann dabei berücksichtigt werden, dass die Freisetzungsmenge durch aktive Sicherheitsmassnahmen reduziert wird, z.B. durch Schnellschlussventile. Entsprechende Annahmen sind zu dokumentieren und zu begründen.

Die Freisetzungsraten  $Q_t$  aus einer flüssigkeitsführenden Leitung kann beispielsweise anhand folgender Formel berechnet werden (Lit. [26], S. 31 und S. 8; zweiphasiges Ausströmen):

$$Q_t = F \times \left( \frac{A \times A}{\frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_l}} \right) \times (T_s \times c_{pl})^{-\frac{1}{2}}$$

### BEDEUTUNG

A	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche des Lecks bei einem Vollbruch einer Leitung.
A	1.17 × 10 <sup>6</sup> J/kg	Latente Verdampfungswärme von Ammoniak.
p <sub>g</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	Gasdichte in der Anlage (abhängig von Druck und Temperatur).
p <sub>l</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	Flüssigkeitsdichte in der Anlage (abhängig von Druck und Temperatur).
T <sub>s</sub>	[K]	Temperatur des flüssigen Ammoniaks
c <sub>pl</sub>	4.49 × 10 <sup>3</sup> J/(kg K)	Spezifische Wärmekapazität von Ammoniak



### KORREKTURFAKTOR

F	[ ]	Korrekturfaktor, welcher das Verhältnis zwischen dem Leitungsquerschnitt $D$ [m] und der Leitungslänge bis zum Leck $L_p$ [m] berücksichtigt. Grössere Distanzen ergeben einen tieferen Korrekturfaktor und somit kleinere Freisetzungsraten.				
---	-----	---	--	--	--	--

Variation des Faktors F in Abhängigkeit vom Verhältnis $L_p/D$ :	$L_p/D$	0	50	100	200	400
	F	1	0.85	0.75	0.65	0.55

Weitere Grundlagen zur Berechnung der Freisetzungsraten finden sich beispielsweise in Lit. [26] (S. 29 ff.) oder Lit. [27] (S. 3 bis 6 ff.).

#### Spontane Freisetzungen im Bereich des Abscheiders

Für eine spontane Freisetzung ist das vollständige Versagen eines Behälters erforderlich. Dabei wird dessen Inhalt schlagartig freigesetzt. Der restliche Anlageninhalt strömt kontinuierlich durch die entstandene Öffnung nach. Als Quellterm für eine spontane Freisetzung sollten daher nur grössere, zusammenhängende Ammoniakmengen zugrunde gelegt werden, z.B. der Inhalt eines Kondensatsammlers, nicht der gesamte Anlageninhalt.

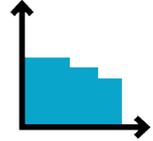
## 6.6 Ausbreitung der Gaswolke

Die Ausbreitung des freigesetzten Ammoniaks soll anhand etablierter Modelle ermittelt werden. Dazu sind verschiedene Software-Lösungen verfügbar, z.B. EFFECTS von TNO, Trace von SAFER System, SLAB View von Lakes Environmental, HGSYSTEM von Shell Research Thornton, FDS, etc.

Die Parameterwerte für die Ausbreitungsberechnungen sind aufgrund der örtlichen Gegebenheiten festzulegen. Grundsätzlich ist es sinnvoll, dieselben Parameter wie auf Stufe Kurzbericht anzuwenden (siehe Anhang A5). Es ist situativ zu prüfen, ob diese auch für die Anwendung auf Stufe Risikoermittlung angemessen sind. Abweichungen davon sollten dokumentiert und begründet werden.

## 6.7 Ausmassschätzung

Bezüglich Schadenindikatoren, Letalitätsmodell und Personenaufkommen gelten grundsätzlich dieselben Angaben wie bereits in [Kapitel 4](#) zum Kurzbericht erläutert. Im Folgenden wird nur auf Ergänzungen und Abweichungen davon auf Stufe Risikoermittlung eingegangen.



### 6.7.1 Mittlere Letalitäten

Es gelten dieselben Vorgaben wie auf Stufe Kurzbericht (vgl. Kapitel 4.5).

### 6.7.2 Personenaufkommen

Auf Stufe Risikoermittlung sind verschiedene Zeitfenster mit unterschiedlichen Personenaufkommen zu unterscheiden, wobei auch die Häufigkeit deren Auftretens zu berücksichtigen ist, z.B. Tag/Nacht, Wochentag/Wochenende, Stossverkehr, Sonderanlässe, etc. – vgl. hierzu auch die Angaben in Kapitel 4.6.

### 6.7.3 Fluchtrate für Personen im Freien

Auf Stufe Risikoermittlung kann das Fluchtverhalten von Personen in angemessenem Rahmen berücksichtigt werden. Gemäss Lit. [10] gelten für die Fluchtrate folgende Grundsätze:

- Aufgrund seiner niedrigen Geruchsschwelle von 5 ppm ist Ammoniak bereits unter der toxischen Schwelle wahrnehmbar. Betroffene Personen können sich in der Regel schneller aus der Gefahrenzone entfernen, als sich das Ammoniakgas ausbreitet.
- Gewisse Personen sind in ihrer Mobilität eingeschränkt (alte, körperlich eingeschränkte, Kleinkinder). Diesen gelingt die Flucht möglicherweise nicht rechtzeitig.
- Je mehr Ammoniak pro Zeiteinheit freigesetzt wird, desto kleiner ist die Fluchtrate. Deshalb sind die Fluchtraten bei Freisetzungen mit spontanem Quellterm tendenziell kleiner als bei Freisetzungen mit kontinuierlichem Quellterm.

Aus diesen Gründen können für Personen im Freien folgende Fluchtraten angenommen werden:

- Spontaner Quellterm: 60 % der betroffenen Personen können rechtzeitig flüchten.
- Kontinuierlicher Quellterm: 80 % der betroffenen Personen können rechtzeitig flüchten.

Es ist situativ zu beurteilen, ob diese Personen aus dem Gefährdungsbereich hinaus flüchten oder lediglich in benachbarte Gebäude hinein, in denen ebenfalls Personenschäden auftreten können (vgl. Kapitel 6.7.5).



#### 6.7.4 Personenschäden im Gebäude mit einer Kälteanlage

In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass Personenschäden im Gebäude mit einer Kälteanlage keinen wesentlichen Betrag zum Schadensausmass leisten<sup>34</sup>. Kälteanlagen im Inneren eines Gebäudes sind zudem räumlich getrennt von grossen Personenansammlungen. Ausnahmen hiervon können öffentlich zugängliche Gebäude wie z.B. Eishallen, Parkhäuser etc. sein. Anhand der folgenden Überlegungen soll geprüft werden, ob und in welchem Ausmass betriebsfremde Personen im Gebäude geschädigt werden können.

- Ist eine Ausbreitung in Gebäudebereiche mit erhöhtem Personenaufkommen plausibel?
- Halten sich die Personen stationär im gefährdeten Raum auf oder bewegen sie sich zeitlich gestaffelt durch diesen hindurch, so dass sie vor dem Eintreten in den Raum durch den starken Geruch gewarnt würden?
- Bei grossen Hallen mit Tribüne/Galerien: Ist zu erwarten, dass sich das Ammoniak als Schwergas verhält und den Raum von unten nach oben langsam auffüllt?
- Wie schnell wird der entsprechende Raum mit Ammoniak gefüllt?
- Wie lange dauert es, bis alle betroffenen Personen den Raum verlassen haben?
- Existiert ein Alarmierungssystem, mit dem zeitnah eine Gebäudeevakuierung ausgelöst werden kann?
- Sind die Fluchtwege und Notausgänge so platziert, dass flüchtende Personen dem Ort ausweichen können, von dem her das Ammoniak in den Raum dringt und sich ausbreitet, oder müssen sie durch die Ammoniak-Wolke hindurch flüchten?
- Etc.

#### 6.7.5 Gebäudeschutz für Personen in Nachbargebäuden

Die Schutzwirkung der Gebäudehülle für Personen in benachbarten Gebäuden soll auf Stufe Risikoermittlung genauer untersucht werden als auf Stufe Kurzbericht. Die Schutzwirkung von Gebäuden ist insbesondere von folgenden Faktoren abhängig:

- Natürliche oder mechanische Lüftung im Gebäude
- Luftaustauschrate (natürliche Durchlässigkeit der Gebäudehülle, mechanische Ventilation, passive Ventilation durch Öffnen von Fenstern; vgl. hierzu auch [Anhang A4](#))

<sup>34</sup> Betriebsinternes Personal wird in der Störfallvorsorge nicht berücksichtigt. Die Sicherheit dieser Personen wird durch den Arbeitnehmerschutz abgedeckt.



- Höhe des Gebäudes (insbesondere bei natürlicher Belüftung und Ausbreitung von Ammoniak als Schwergas)
- Höhe und Platzierung der Luftansaugöffnung bei mechanischer Lüftung
- Durchgangszeit der Wolke
- Aufenthaltszeit der Person im Gebäude<sup>35)</sup>

Grundsätzlich wird angenommen, dass Personen in benachbarten Gebäuden nicht ins Freie flüchten: Die Ammoniak-Wolke ist gut sichtbar und der Geruch im Freien (bei kritischen Konzentrationen) markant beissender als im Gebäude.

Da die Letalitätsrate nicht linear von der Konzentration abhängt, ist der Gebäudeschutz in grösserer Distanz vom Freisetzungsort höher. Der Gebäudeschutz kann in Abhängigkeit der Ammoniak-Konzentration im Freien und der Luftwechselrate des Gebäudes abgeschätzt werden (vgl. [Anhang A4](#)). Dazu kann beispielsweise wie in [Tabelle 14](#) (Anhang A4) skizziert vorgegangen werden. Alternativ kann der Gebäudeschutz auch ortsspezifisch hergeleitet werden, wobei auch weitere Aspekte wie z.B. die Gebäudehöhe etc. berücksichtigt werden können. Die Herleitung der zugrunde gelegten Werte ist in jedem Fall nachvollziehbar zu dokumentieren.

<sup>35)</sup> Der Aufenthalt im Gebäude während des Wolkenvorbeizugs bietet einen guten Schutz im Vergleich zum Aufenthalt im Freien. Nach dem Vorbeizug sollte allerdings das Gebäude verlassen und gründlich durchgelüftet werden.

## Glossar

- Grädigkeit** Die Grädigkeit ist ein Kennwert für die Dimensionierung von Wärmetauschern. Sie beschreibt den Temperaturunterschied zwischen Kälteübertragungsmedium und verdampfendem Kältemittel bzw. zwischen Wärmeträgeraustritt und Kondensationstemperatur. Je kleiner dieser Temperaturunterschied ist, desto höher ist die Energieeffizienz der Anlage, weil weniger Energie für den Verdichter erforderlich ist. Andererseits muss ein kleinerer Temperaturunterschied durch grössere Wärmetauscherflächen kompensiert werden, wodurch mehr Kältemittel erforderlich wird.
- Kältemittel** Bezeichnet den chemischen Stoff bzw. das Gemisch, mit dessen gezielter Kompression (Erwärmung) und Entspannung (Abkühlung) eine Wärmeleistung erzeugt wird. Im vorliegenden Bericht bezeichnet der Begriff Kältemittel in der Regel Ammoniak oder CO<sub>2</sub>.
- Einkreisystem** Bezeichnet eine Kältemaschine, bei welcher sowohl Kälteerzeugung, Kälteverbrauch als auch die Rückkühlung mit einem einzigen Kreislauf von Kältemittel erbracht wird (Typ 1 gemäss Kapitel 1.1).
- Zweikreisystem** Bezeichnet eine Kältemaschine, bei welcher entweder der Kälteverbrauch, die Rückkühlung oder beide nicht direkt über das Kältemittel erfolgen, sondern über einen sekundären Kälte- bzw. Wärmeträger (Typen 2, 3 und 5 gemäss Kapitel 1.1).
- Primärkreis** Bezeichnet denjenigen Teil der Kältemaschine, welcher das Kältemittel enthält. Bei den für die Störfallvorsorge relevanten Anlagen ist dies in der Regel der Ammoniak enthaltende Teil der Anlage.
- Sekundärkreis** Bezeichnet denjenigen Teil der Kältemaschine, welcher mit einem anderen Kälte- bzw. Wärmeträger betrieben wird als das eigentliche Kältemittel, z.B. ein Glykol-Wasser-Gemisch oder CO<sub>2</sub>. Der Energieaustausch des Sekundärkreises mit dem Primärkreis erfolgt über Wärmetauscher.
- Rückkühlung** Beim Betrieb einer Kältemaschine wird einerseits systembedingt und andererseits aufgrund von Energieverlusten Wärme erzeugt. Diese wird über die Rückkühlung in der Regel an die Umwelt abgegeben. Entsprechend befindet sich die Rückkühlanlage meist auf dem Dach oder an der Aussenfassade. Es bestehen verschiedene technische Möglichkeiten für Rückkühlssysteme. (Vgl. beispielhaft «Hybridkondensator» oder «Evaporativkondensator»)
- Teilweise erfolgt die Rückkühlung auch mit Grund- oder Oberflächenwasser. Dies kann entweder direkt oder über einen Sekundärkreis geschehen.
- Evaporativkondensator** Bezeichnet einen spezifischen Kondensatortyp. Bei diesem wird die Oberfläche des Wärmetauscherregisters mit Wasser besprüht. Dadurch wird die Aussenluft adiabatisch abgekühlt und somit die Kondensationstemperatur minimiert.

- Hybridkondensator** Bezeichnet einen spezifischen Kondensatortyp. Bei tiefer Umgebungstemperatur kann dieser direkt durch die Umgebungsluft gekühlt werden. Bei höheren Temperaturen wird die Oberfläche des Wärmetauscherregisters zusätzlich mit Wasser besprüht (analog zum Evaporativkondensator).
- Quellterm** Der Quellterm ist ein Parameter, welcher zur Durchführung von Ausbreitungsberechnungen benötigt wird. Im Wesentlichen beschreibt er die Menge des freigesetzten Stoffes und über welchen Zeitraum die Freisetzung erfolgt.

### Wichtige Abkürzungen

- BAFU** Bundesamt für Umwelt
- StFV** Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung) (Lit. [1]). Diese basiert auf dem schweizerischen Umweltschutzgesetz.
- ERKAS** Eidgenössischen Risikokataster gemäss StFV. Darin erfasst das BAFU alle der StFV unterstellten Betriebe sowie ausgewählte Informationen zu diesen.
- HFKW** Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe. Diese werden unter anderem als Kältemittel eingesetzt. Nach Inkraftsetzung der revidierten ChemRRV dürfen HFKW allerdings nur noch für Anlagen mit kleiner Kälteleistung eingesetzt werden.
- ChemRRV** Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (Lit. [2])).

## Literaturverzeichnis

- Lit. [1] **Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung, StFV)**  
SR 814.012  
27.02.1991
- Lit. [2] **Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV)**  
SR 814.81  
18. Mai 2005 (Stand 3. Januar 2013)
- Lit. [3] Bundesamt für Umwelt (BAFU)  
**Handbuch I zur Störfallverordnung StFV**  
2008
- Lit. [4] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, heute BAFU)  
**Beurteilungskriterien I zur Störfallverordnung StFV**  
1996
- Lit. [5] Bundesamt für Umwelt BAFU  
**Mengenschwellen gemäss Störfallverordnung (StFV)**  
Liste mit Stoffen und Zubereitungen.  
2006
- Lit. [6] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL, heute BAFU)  
**Ausmasseneinschätzung von Ammoniak-Freisetzungen. Grundlagen und Annahmen.**  
Erstellt durch Ernst Basler + Partner AG, 2003
- Lit. [7] Bundesamt für Umwelt BAFU  
**Bewilligung von Anlagen mit in der Luft stabilen Kältemitteln.**  
Wegleitung betreffend Bewilligungspflicht bei mehr als 3 kg in der Luft stabilen Kältemitteln.  
2009
- Lit. [8] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL,  
Arbeitsgruppe Flüssiggas-Tankanlagen  
**Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen zum Kurzbericht und zur Risikoermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge**  
Erstellt durch Basler & Hofmann AG, 1992
- Lit. [9] Schweizerische Erdgaswirtschaft  
**Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen. Rahmenbericht zur standardisierten Ausmasseneinschätzung und Risikoermittlung**  
Revision 2010

- Lit. [10] BUWAL, Arbeitsgruppe Ammoniak  
**Methodikbeispiel einer Risikoermittlung für die Ammoniak-Kälteanlage einer Kunsteisbahn**  
Erstellt durch Basler & Hofmann AG, 1999 (Entwurf / unveröffentlicht)
- Lit. [11] Sanitätsdepartement des Kantons Basel-Stadt,  
Kontrollstelle für Chemie- und Biosicherheit (KCB)  
**Leitfaden für die Beurteilung von Ammoniak-Kälteanlagen. Methodik und Fallbeispiel.**  
Ernst Basler + Partner AG, zweite überarbeitete Ausgabe Juli 2000
- Lit. [12] Schweizerische Rückversicherungsgesellschaft  
**DispTool**  
Handbuch, Zürich, 1990
- Lit. [13] Dr. B. Covelli, Prof. Ph. Rudolf von Rohr  
**NH<sub>3</sub>-Unfall im Bevorratungsraum**  
ETH Zürich, Institut für Verfahrenstechnik, April 1998
- Lit. [14] TNO – The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research  
**Methods for the determination of possible damage, CPR 16E**  
1992
- Lit. [15] TNO – The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research  
**EFFECTS. Modelling the effects of accidental release of hazardous substances**  
Version 8.1.6, 2011
- Lit. [16] Ineris  
**Ammonia. Large -scale atmospheric dispersion tests**  
Work Study. 20.12.2005
- Lit. [17] Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie (BMUJF, Österreich)  
**Referenzszenarien zur Richtlinie 96/82/EG**  
1999
- Lit. [18] U.S. Environmental Protection Agency,  
Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office  
**Technical Background Document for Offsite Consequence Analysis for Anhydrous Aqueous Ammonia, Chlorine, and Sulfur Dioxide. Appendix E: Supplemental Risk Management Program Guidance for Ammonia Refrigeration Facilities.**  
1999
- Lit. [19] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung IFA  
**GESTIS-Stoffdatenbank**  
<http://www.dguv.de/ifa/Gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index.jsp>

- Lit. [20] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
**TRAS 110 – Sicherheitstechnische Anforderungen an Ammoniak-Kälteanlagen**  
Ausgabe: November 2014
- Lit. [21] SNV Schweizerische Normenvereinigung  
**SN EN 378-1. Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Begriffe, Klassifikationen und Auswahlkriterien**  
Ausgabe / Edition: 2012-10
- Lit. [22] SNV Schweizerische Normenvereinigung  
**SN EN 378-2. Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 2: Konstruktion, Herstellung, Prüfung, Kennzeichnung und Dokumentation**  
Ausgabe / Edition: 2012-08
- Lit. [23] SNV Schweizerische Normenvereinigung  
**SN EN 378-3. Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 3: Aufstellungsort und Schutz von Personen**  
Ausgabe / Edition: 2012-08
- Lit. [24] SNV Schweizerische Normenvereinigung  
**SN EN 378-4. Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 4: Betrieb, Instandhaltung, Instandsetzung und Rückgewinnung**  
Ausgabe / Edition: 2012-08
- Lit. [25] Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit EKAS  
**EKAS-Richtlinie 6507. Ammoniak, Lagerung und Umgang.**  
Ausgabe August 1995
- Lit. [26] American Institute of Chemical Engineers (AIChE), Center for Chemical Process Safety  
**Workbook of Test Cases for Vapor Cloud Source Dispersion Models.**  
1989.
- Lit. [27] Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA)  
**Statuspapier Quelltermberechnung bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzungen in der Prozessindustrie – Methodenübersicht und industrielle Anwendung.**  
2012
- Lit. [28] H.P. Balfanz, M. Hein, P. Wietfeldt  
**Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit durch abstürzende Flugzeuge**  
in «Technische Überwachung» TÜ 23, Nr. 3, März 1982.

## A1 Unfallbeispiele

Die Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen (ZEMA) des Umweltbundesamtes Deutschland hat 29 meldepflichtige Ereignisse zwischen 1993 und 2013 analysiert.

### **Ursachen**

Gemäss dieser Untersuchung traten 59 % der Stofffreisetzungen im Maschinenraum auf, wovon 28 % bei Wartungs- und Reparaturarbeiten erfolgten. Dabei waren 28 % der gestörten Anlageteile die Verdichter. Während 41 % der Ereignisse eine Folge von technischem Versagen von Apparaten und Armaturen waren, konnten 38 % auf menschliche Fehler zurückgeführt werden (Bedienfehler, organisatorische Fehler, unsachgemässe Reparaturarbeiten). Fremdfirmen waren dabei in 28 % der Ereignisse beteiligt. Korrosion war in 10 % der Ereignisse die Ursache.

### **Schäden**

Bei keinem der Ereignisse waren Todesopfer zu beklagen. Allerdings wurden über alle Ereignisse insgesamt 51 Personen innerhalb der Anlagen und 54 Personen ausserhalb verletzt. Über 1130 Personen beklagten sich über Geruchsbelästigungen.

### **Fazit**

Generell sind die Anlagen auf dem Stand der Sicherheitstechnik zu halten, regelmässig zu kontrollieren und kritische Systemkomponenten regelmässig zu revidieren. Für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten muss immer qualifiziertes Fachpersonal eingesetzt werden und die Anlagendokumentation sowie Arbeitsanweisungen sind aktuell zu halten. Ausserdem sollen Notaus-Schalter ausserhalb des Gefahrenbereiches verfügbar sein. Für sicherheitsrelevante Komponenten sind regelmässige Funktionskontrollen durchzuführen.

Quelle: ZEMA-Auswertung für Ammoniak-Kälteanlagen, Stand November 2013 (Anhang zu Lit. [20]).

## A2 Auswertung bestehender Risikoermittlungen und Kurzberichte

In den vergangenen Jahren wurden bereits verschiedene Kurzberichte und Risikoermittlungen zu Ammoniak-Kälteanlagen erarbeitet. Um einen Eindruck der gängigen Praxis zur Erstellung dieser Dokumente zu gewinnen, wurde eine Auswahl dieser Berichte ausgewertet. Dabei wurden verschiedene Anwendungsbereiche, Kantone und Verfasser berücksichtigt.

### Grundlagen

- Insgesamt 11 Risikoermittlungen von Industrie-Kälteanlagen (7) und Kunsteisbahnen (4) aus verschiedenen Kantonen mit Ammoniak-Mengen zwischen 1 200 bis 16 000 kg, erstellt zwischen 1995 bis 2012.
- Insgesamt 4 Kurzberichte von Industrie-Kälteanlagen (2), einer Kunsteisbahn und einer Wärmepumpe aus verschiedenen Kantonen mit Ammoniak-Mengen zwischen 800 bis 1 900 kg, erstellt zwischen 2001 bis 2013.

### Auswertung der wichtigsten Parameter

Generell zeigt sich, dass der Differenzierungsgrad in den untersuchten Berichten stark variiert. Einige Verfasser halten sich stark an den (nicht in Kraft gesetzten) Entwurf des «Methodikbeispiels einer Risikoermittlung für die Ammoniak-Kälteanlage einer Kunsteisbahn» von 1999 (Lit. [10]). Andere gehen von anderen Grundlagen aus. Im Folgenden sind die wichtigsten Grundannahmen zusammengefasst, wie sie in den ausgewerteten Dokumenten anzutreffen sind.

**Tabelle 8: Ausgewertete Risikoermittlungen und Kurzberichte:  
angewandte Parameterbereiche für Freisetzung, Ausbreitung und Wirkung auf Personen**

#### ANNAHMEN IN AUSGEWERTETEN RISIKOERMITTLUNGEN UND KURZBERICHTEN

##### Freisetzung

Anlageninhalt	Zwischen 800 bis 2 000 kg (Kurzberichte) bzw. 1 200 bis 16 000 kg (Risikoermittlungen), wobei die Mehrheit der berücksichtigten Anlagen zwischen 2 000 bis 10 000 kg Ammoniak beinhaltet.
Freisetzungsort	Sehr unterschiedlicher Differenzierungsgrad zwischen den ausgewerteten Dokumenten. Teilweise je ein Szenario zu spontaner Freisetzung, grosser kontinuierlicher Freisetzung und kleiner kontinuierlicher Freisetzung, teilweise sehr viele verschiedene Szenarien mit Freisetzungen aus Rohrleitungen bei unterschiedlichen Druck- und Temperaturverhältnissen, flüssig vs. gasförmig, etc.
Freisetzungsort	Unterscheidung zwischen kontinuierlichen und spontanen Freisetzungen.
Freisetzungsmenge	Abhängig von der Anlage und dem untersuchten Szenario. Maximal ausgewiesene Gesamtmenge ca. 2 400 kg, in der Regel im Bereich einiger 100 kg. Auch für spontane Freisetzungen teilweise kontinuierliche Quellterme für die Ausbreitung im Freien verwendet. Teilweise auch Szenarien mit sehr geringen Freisetzungsmengen berücksichtigt.
Freisetzungsrage	Mehrheitlich zwischen 1 bis 5 kg/s. Vereinzelt Extremwerte bis 14 kg/s.
Flash-Anteil <sup>36)</sup>	Szenarioabhängig zwischen 0 bis 100 %.
Freisetzungsdauer	Mehrheitlich 3 bis 5 Min. Teilweise bis 30 Min.

##### Ausbreitung

Software für Ausbreitungsrechnungen	Es werden sehr unterschiedliche Berechnungshilfsmittel eingesetzt. Unter anderem widerspiegelt dies auch die technologische Entwicklung der letzten 15 Jahre. z.B. EFFECTS von TNO, Trace von SAFER System, SLAB View von Lakes Environmental, HGSYSYSTEM von Shell Research Thornton, FDS.
Meteorologische Stabilitätsklasse	Generell wird den Ausbreitungsberechnungen die Stabilitätsklasse D (neutral) gemäss der Skala von Pasquill-Gifford zugrunde gelegt, in vielen Fällen zusätzlich auch Klasse F (sehr stabil).
Windgeschwindigkeit	Die verwendeten Werte bewegen sich zwischen 0.5 bis 5 m/s. Nur in einem Extremfall wurde für ein Szenario eine höhere Windgeschwindigkeit von 16 m/s verwendet.

<sup>36)</sup> Der Flash-Anteil bezeichnet denjenigen Anteil des Ammoniaks, der bei seiner Freisetzung spontan verdampft und sich anschliessend gasförmig ausbreitet.

Ausbreitungsmodell	Das Schwergas und das Neutralgasmodell werden in etwa gleich häufig verwendet.
Luftfeuchtigkeit	Wo der eingesetzte Wert dokumentiert ist, wird nahezu durchgehend 70 % eingesetzt. Nur in einem Fall wird davon abgewichen und ein lokal ermittelter, statistischer Wert von 79.3 % verwendet.
<b>Wirkung auf Personen</b>	
Schadenindikator	Praktisch durchgängig $n_1$ «Todesopfer», $n_2$ «Verletzte» nur in Ausnahmefällen.
Datenherkunft Personenaufkommen	Wo die Datenherkunft explizit dokumentiert ist, basieren diese Angaben häufig auf einer Schätzung anhand einer Begehung vor Ort und Angaben des Anlagenbetreibers sowie der Gemeinde
Fluchtrate	Häufig Werte um 70 % <sup>37)</sup> , (Bereich 50 bis 90 %). Allerdings stark situations- bzw. nutzungsabhängige Unterschiede mit Extremwerten zwischen 0 bis 100 %.
Gebäudeschutz	Wo explizit ausgewiesen, Gebäudeschutz zwischen 50 bis 100 % <sup>38)</sup>
Konzentration für Gesundheitsschädigung	Sehr unterschiedliche Werte verwendet. Teilweise abgeleitet aus Probit-Berechnungen (Probit-Parameter durchgehend gemäss TNO), teilweise AEGL-2 und AEGL-3 Werte verwendet..

<sup>37</sup> Eine Fluchtrate von beispielsweise 70 % bedeutet, dass sich 70 % der exponierten Personen retten können, d.h. die Zahl der erwarteten Todesopfer reduziert sich durch Berücksichtigung von Fluchtmöglichkeiten um einen Faktor 0.3 (=1 – 0.7).

<sup>38</sup> Ein Gebäudeschutz von beispielsweise 70 % bedeutet, dass die Letalität für Personen, die sich gemäss Modell im Zeitpunkt des Ereignisses in Gebäuden aufhalten, gegenüber der Freifeldletalität um einen Faktor 0.3 (=1 – 0.7) reduziert wird.

## A3 Herleitung der Unterstellungskriterien

Im Folgenden ist dokumentiert, welche Grundlagen, Annahmen und Berechnungen zur Herleitung der Unterstellungskriterien verwendet wurden.

### Ammoniak-Ausbreitung

#### Freisetzungs- und Ausbreitungsparameter

In [Kapitel 2](#) wird ein Verfahren vorgeschlagen, nach dem beurteilt werden kann, ob eine ausgewählte Ammoniak-Kälteanlage der StFV unterstellt werden soll, obwohl sie die Mengenschwelle von 2 t nicht überschreitet. Dieses basiert auf Ausbreitungsberechnungen für definierte Freisetzungsszenarien. Nachfolgend werden die zugrunde gelegten Annahmen und Parameter beschrieben (einzelne beziehen sich spezifisch auf das verwendete Modell «Effects»; Lit. [15]).

**Tabelle 9: Die Ausbreitungsrechnungen für die Unterstellungskriterien basieren auf diesen Parametern.**

AUSBREITUNGSBERECHNUNGEN	Begründung
<i>Parameter</i>	
Ausbreitungsmodell Schwergas	Die Ausbreitungsversuche durch INERIS (Lit. [16]) mit Freisetzungsmengen von 1400 bis 3500 kg Ammoniak und mit Freisetzungsraten zwischen 0.65 bis 4.2 kg/s haben gezeigt, dass sich dieses in einer ersten Phase bzw. im Konzentrationsbereich letaler Wirkungen als <b>Schwergas</b> ausbreitet (vor allem bei Freisetzungen als zweiphasiges Gemisch): «Liquefied ammonia releases behave like heavy gas releases» (p. 86) „the ammonia cloud formed behaves like a heavy gas, and no rise in the cloud is observed» (p. 103).
Freisetzungsart kontinuierlich	Für die Frage der Unterstellung unter die StFV werden nur <b>kontinuierliche Freisetzungen</b> berücksichtigt (vgl. <a href="#">Aussagen in Kapitel 2.2.3</a> ). Modellrechnungen zeigen, dass bei einer spontanen Freisetzung ein Teil des Ammoniaks eine Lache bildet, die nur langsam verdampft. Die Menge an Ammoniak, die sich pro Zeiteinheit in der Gasphase als Wolke ausbreitet, ist daher bei spontanen Freisetzungen nicht a priori höher als bei kontinuierlichen. Weiter ist davon auszugehen, dass spontane Freisetzungen deutlich seltener sind als kontinuierliche und sich ein solches Ereignis aufgrund der Verteilung des Ammoniaks in der Anlage nur im Maschinenraum zutragen kann. Die Ausbreitung aus dem Maschinenraum ins Freie würde dabei so verzögert, dass die Ausbreitung im Freien wieder kontinuierlich erfolgen würde.
Richtung der Freisetzung	Effects bietet als Auswahlmöglichkeiten für kontinuierliche Freisetzungen einen «Horizontal Jet Release» oder den «Vertical Jet Release». Eine Sensitivitätsprüfung dieses Parameters ergab, dass sich die Auswahl gemäss Effects praktisch nicht auf die Letalitätsradien auswirkt. Beim «Vertical Jet Release» beginnt die toxische Wolke allerdings erst in einiger Distanz zum Freisetzungsort, da sich die Wolke zuerst setzen muss. Den Unterstellungskriterien wurde die Freisetzungsrichtung <b>«Horizontal Jet Release»</b> zugrunde gelegt.

Freisetzungsdauer	<p>Die reale Freisetzungsdauer hängt stark von der Leckgrösse bzw. vom betroffenen Leitungsquerschnitt ab. Es wurde angenommen, dass die Freisetzungsdauer unabhängig von der Anlagengrösse <b>5 Min.</b> beträgt.</p> <p>Zur Verifizierung dieser Annahme wurde die Sensitivität der Letalitätsradien bzgl. der Freisetzungsdauer bzw. -rate bei konstanter Freisetzungsmenge ermittelt. Für die Freisetzungsdauer wurde der Bereich zwischen 2 bis 10 Min. überprüft. Dabei zeigte sich, dass die Freisetzungsdauer (im untersuchten Bereich) nur einen geringfügigen Einfluss auf die Letalitätsradien hat, wenn die gesamte freigesetzte Menge Ammoniak konstant gehalten wird.</p>																								
Freisetzungsrate	<p>Die Freisetzungsraten werden anlagenspezifisch abgeschätzt (vgl. Kapitel 2.2.3).</p>																								
Korrekturfaktor $K_{Ort}$	<p>Die Korrekturfaktoren für den Freisetzungsort leiten sich aus folgenden Überlegungen ab:</p> <p>Jede unter Druck stehende Flüssigkeit mit einer Temperatur oberhalb ihres Siedepunkts beginnt bei einer Entspannung zu siedeln. Dabei tritt das sogenannte «flashing» auf, d.h. ein Teil der Flüssigkeit verdampft sofort und kühlt dadurch die verbleibende Flüssigkeit auf ihren Siedepunkt ab. Da dieser Vorgang sehr rasch abläuft, kann er als adiabatisch angenommen werden. Damit kann der Verdampfungsanteil aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften theoretisch berechnet werden. Für Ammoniak, das bei Raumtemperatur gelagert wird, liegt der Verdampfungsanteil bei rund 20 % (bei ungehinderter Verdampfung). Bei Versuchen wurde festgestellt, dass deutlich mehr verdampft, als aufgrund des «flashing» zu erwarten wäre. Grund dafür ist die sehr rasche Verdampfung, die einen Teil der Flüssigkeit in Form von feinen Tröpfchen mitreisst und einen Spray bildet.</p> <p>Bei einer Freisetzung von druckverflüssigtem Ammoniak teilt sich dieses daher in drei Phasen auf: gasförmiges Ammoniak, Aerosol-Tröpfchen sowie eine Flüssigkeitslache, die je nach Wärmeeintrag langsam verdampft. Basierend auf den Angaben in Lit. [6] wurde für die Unterstellungskriterien folgender Zusammenhang zwischen Freisetzungsort und Verteilung des Ammoniaks auf die einzelnen dieser Phasen angenommen:</p>																								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th><i>Im Freien</i></th> <th><i>Im Gebäude, angrenzend an Fassade</i></th> <th><i>Im Gebäude, gefangener Raum</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gas</td> <td>20 %</td> <td>20 %</td> <td>20 %</td> </tr> <tr> <td>Aerosol</td> <td>80 %</td> <td>40 %</td> <td>40 %</td> </tr> <tr> <td>Lache</td> <td>0 %</td> <td>40 %</td> <td>40 %</td> </tr> <tr> <td>Wolkenanteil<sup>39)</sup></td> <td>100 % (Gas + Aerosol)</td> <td>60 % (Gas + Aerosol)</td> <td>20 % (nur Gas)</td> </tr> <tr> <td><b><math>K_{Ort}</math></b></td> <td><b>1.0</b></td> <td><b>0.6</b></td> <td><b>0.2</b></td> </tr> </tbody> </table>		<i>Im Freien</i>	<i>Im Gebäude, angrenzend an Fassade</i>	<i>Im Gebäude, gefangener Raum</i>	Gas	20 %	20 %	20 %	Aerosol	80 %	40 %	40 %	Lache	0 %	40 %	40 %	Wolkenanteil <sup>39)</sup>	100 % (Gas + Aerosol)	60 % (Gas + Aerosol)	20 % (nur Gas)	<b><math>K_{Ort}</math></b>	<b>1.0</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>
	<i>Im Freien</i>	<i>Im Gebäude, angrenzend an Fassade</i>	<i>Im Gebäude, gefangener Raum</i>																						
Gas	20 %	20 %	20 %																						
Aerosol	80 %	40 %	40 %																						
Lache	0 %	40 %	40 %																						
Wolkenanteil <sup>39)</sup>	100 % (Gas + Aerosol)	60 % (Gas + Aerosol)	20 % (nur Gas)																						
<b><math>K_{Ort}</math></b>	<b>1.0</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>																						
	<p>Hintergrund der unterschiedlichen Werte bildet die Tatsache, dass sich die Flüssigkeitströpfchen auf Hindernissen im Ausbreitungspfad niederschlagen (Lit. [16]) und daher nach einer Freisetzung im Gebäude nur teilweise ins Freie gelangen.</p>																								

<sup>39)</sup> «Wolkenanteil» bezeichnet denjenigen Anteil des freigesetzten Ammoniaks, der in Form von Gas oder Aerosoltröpfchen an der Ausbreitung im Freien teilnimmt. Dieser Anteil hängt davon ab, auf welchem Pfad das Ammoniak ins Freie gelangt.

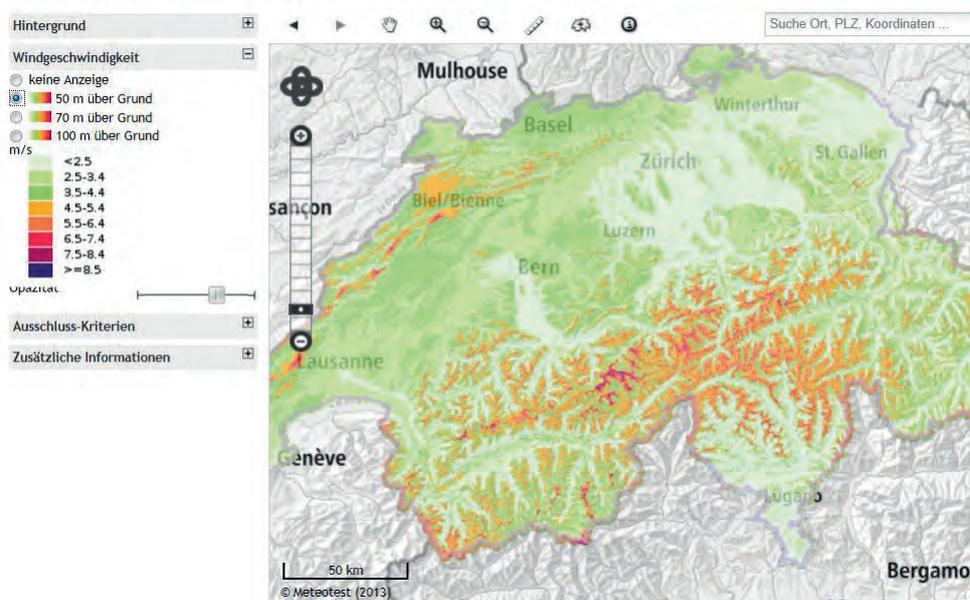
Aerosolanteil in der Wolke	<p>Das Effects-Modell fordert für seine Berechnungen die Angabe, welcher Anteil der sich ausbreitenden Ammoniak-Wolke aus Aerosoltröpfchen besteht («Initial Liquid Mass Fraction»). Die Gesamtmasse von Ammoniak in der sich ausbreitenden Wolke wird durch diesen Faktor nicht nochmals reduziert!</p> <p>Um die Unterstellungskriterien einfach zu halten, wird für die Ausbreitungsrechnungen generell von einem <b>Aerosolanteil von 80%</b> ausgegangen (&gt; «Initial Liquid Mass Fraction» = 0.8), und nicht zwischen verschiedenen Aerosolanteilen für unterschiedliche Freisetzungsorte (im Freien, in an Aussenfassade angrenzenden Räumen oder in gefangenen Räumen) differenziert. Eine entsprechende Sensitivitätsanalyse zeigte, dass die Letalitätsradien mit zunehmendem Aerosolanteil grösser werden und der gewählte Wert konservative Resultate ergibt.</p>
Diameter of expanded Jet	<p>Es wird ein Wert von <b>1 m</b> zugrunde gelegt.</p> <p>Eine Sensitivitätsanalyse für diesen Parameter zwischen 0.1 m bis 5 m zeigt, dass dieser Wert konservative Resultate ergibt.</p>
Temperatur nach Freisetzung	<p>Gemäss Angaben in Effects (Lit. [15]) soll für kontinuierliche Freisetzungen die Temperatur des Materials nach der Entspannung auf Atmosphärendruck eingegeben werden. Es wurde daher ein Wert von <b>-33 °C</b> eingesetzt.</p> <p>Eine durchgeführte Sensitivitätsanalyse ergab, dass dieser Parameter praktisch keinen Einfluss auf die Letalitätsradien hat.</p>
Höhe der Freisetzung	<p>Es wird ein (leicht konservativer) Wert von <b>0 m</b> zugrunde gelegt.</p> <p>Eine Sensitivitätsanalyse für diesen Parameter ergab, dass die maximale Ausdehnung der Gaswolke bei Schwergasverhalten nur geringfügig von der Freisetzungshöhe abhängt. Allerdings werden Konzentrationsgrenzwerte mit zunehmender Freisetzungshöhe erst in grösserer Distanz erreicht, da sich die Gaswolke zuerst auf die Umgebungshöhe absenken muss.</p>
Umgebungstemperatur	<p>Es wurde eine Temperatur von <b>20 °C</b> zugrunde gelegt.</p> <p>Eine Sensitivitätsprüfung dieses Parameters ergab, dass sich abweichende Werte gemäss Effects praktisch nicht auf die Letalitätsradien auswirken. Tiefere Temperaturen führen zu leicht kleineren Letalitätsradien. Eine Temperatur von 20 °C liegt über dem Jahresmittel und ist daher leicht konservativ.</p>
Meteorologische Stabilitätsklasse	<p>Für die Ausbreitungsberechnungen auf Stufe Unterstellungskriterien wurde die meteorologische <b>Stabilitätsklasse D (neutral)</b> gemäss der Skala von Pasquill-Gifford zugrunde gelegt.</p> <p>Für Kurzberichte und Risikoermittlungen im Rahmen der Störfallvorsorge wird auch immer wieder die Stabilitätsklasse F (sehr stabil) herangezogen, was zu grösseren Letalitätsradien führt. Ein derart konservativer Ansatz hätte zur Folge, dass mehr Anlagen der StfV unterstellt würden, da eine schwere Schädigung als möglich ausgewiesen wird. Auf Stufe Risikoermittlung würde sich dann in den meisten Fällen zeigen, dass diese Szenarien zu selten sind, als dass sie die Beurteilung der Risiken massgeblich beeinflussen. Für die Prüfung der Unterstellung unter die StfV sollte deshalb vermieden werden, systematisch und wiederholt sehr konservative Annahmen zu treffen. Die Stabilitätsklasse D wird dabei als vernünftiger Kompromiss zwischen Eintretenshäufigkeit und Ausbreitungsdistanz angesehen.</p>
Windgeschwindigkeit	<p>Den Ausbreitungsrechnungen zur Festlegung der Unterstellungskriterien wurde eine Windgeschwindigkeit von <b>2 m/s</b> zugrunde gelegt (Hinweis: Dies entspricht ebenfalls der Annahme im nicht publizierten Methodikbeispiel). Die effektiven Werte liegen für das Mittelland meist höher (vgl. Abbildung 23).</p>

Die in den untersuchten Risikoermittlungen zugrunde gelegten Windgeschwindigkeiten liegen zwischen 0.5 bis 4.6 m/s. Eine Sensitivitätsprüfung dieses Parameters ergab, dass sowohl grössere als auch kleinere Windgeschwindigkeiten gemäss Effects kleinere Letalitätsradien ergeben. Basierend auf der Windenergie-Karte (Abbildung 23) wird davon ausgegangen, dass eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2 m/s zweckmässig ist.

Luftfeuchtigkeit	Den Ausbreitungsrechnungen zur Festlegung der Unterstellungskriterien wurde eine relative Luftfeuchtigkeit von <b>70 %</b> zugrunde gelegt (dies entspricht ebenfalls der Annahme im nicht publizierten Methodikbeispiel). Eine Sensitivitätsprüfung dieses Parameters ergab, dass die Luftfeuchtigkeit gemäss Effects nur einen geringfügigen Einfluss auf die Letalitätsradien hat.
Oberflächenrauigkeit	Für die Oberflächenrauigkeit wurde die Kategorie <b>«Regular large obstacle coverage (suburb or forest)»</b> eingesetzt. Diese Oberflächenrauigkeit wird als typisch für die Umgebung von relevanten Anlagen innerhalb der betrachteten Distanzen erachtet (überbaute Gebiete).
Messhöhe Personenexposition	Es wurde eine Höhe von <b>1.50 m</b> zugrunde gelegt. Eine Sensitivitätsprüfung dieses Parameters ergab, dass sich Abweichungen in der Höhe zwischen 0.2 bis 2.0 m gemäss Effects nicht nennenswert auf die Letalitätsradien auswirken.
Expositionsdauer	Es wurde eine Expositionsdauer von <b>30 Min.</b> zugrunde gelegt. Solange dieser Wert grösser gewählt wird als die angenommene Freisetzungsdauer von 5 Min., hat er praktisch keinen Einfluss auf die Ergebnisse.

**Abbildung 23: Mittlere Windgeschwindigkeit in der Schweiz.**

© 2013 Meteotest; Quelle: <http://wind-data.ch/windkarte>



## Ausbreitungs- und Wirkungsmodellierung

Für eine kontinuierliche Freisetzung während 5 Min. mit fixer Rate wurden anhand des Ausbreitungsmodells «Effects» (Lit. [15]) die Zonen bestimmt, in welchen für eine Person im Freien unterschiedliche mittlere Letalitätsraten gelten (keine Flucht, d.h. Exposition während > 5 Min.). Die Dosis-Wirkungsbeziehung wurde dabei anhand der Probitfunktion ermittelt<sup>40</sup>. Für die Ausbreitungsberechnung wurden die oben beschriebenen Annahmen getroffen.

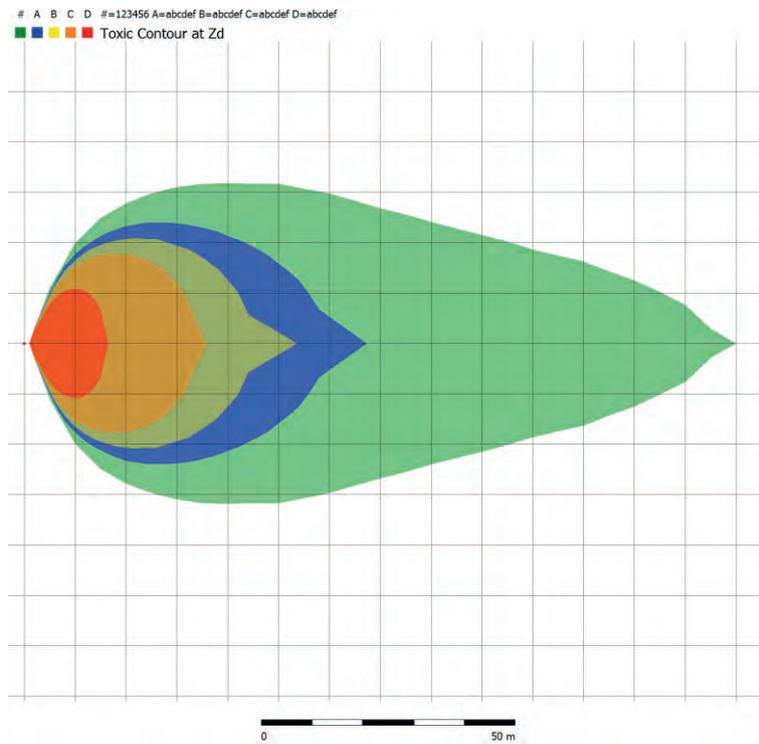
Unter diesen Randbedingungen wurde für verschiedene Freisetzungsraten (Wertespektrum aus Schritt 1: 0.5 bis 6 kg/s) die Ausdehnung der Bereiche für verschiedene Letalitätswerte berechnet. Die Ergebnisse dieser Ausbreitungsmodellierungen sind in den Abbildungen 24 bis 30 dargestellt. Die hinterlegte Farbskala für Bereiche mit unterschiedlichen Letalitäten ist in Tabelle 10 zusammengefasst.

**Tabelle 10: Farblegende für die Darstellung der Wolkenausbreitung gemäss Effects (Lit. [15])**

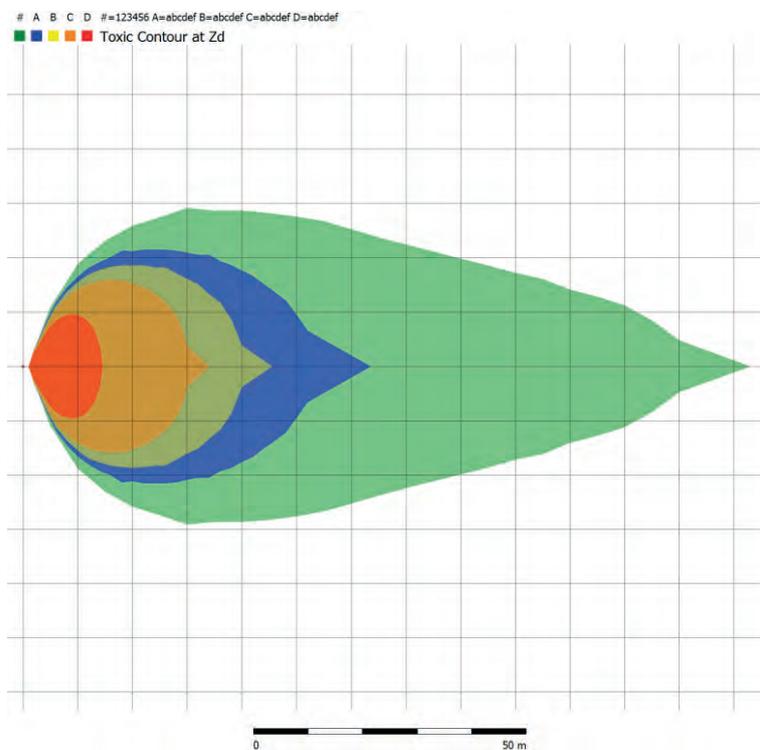
<b>FARBLEGENDE</b>	Letalität am äusseren Rand (in %)
<i>Farbbereich</i>	
Rot	99
Orange	75
Olivegrün	50
Blau	25
Grün	1

<sup>40</sup> Die Probitfunktion sowie die zugehörigen Parameter sind in der Effects-Software integriert. Es werden die Probitparameter gemäss TNO verwendet (Lit. [15]). Eine Plausibilitätsüberprüfung mit den AEGL-3 Werten hat gezeigt, dass diese mit der TNO Probitfunktion im entsprechenden tiefen Letalitätsbereich gut korrelieren.

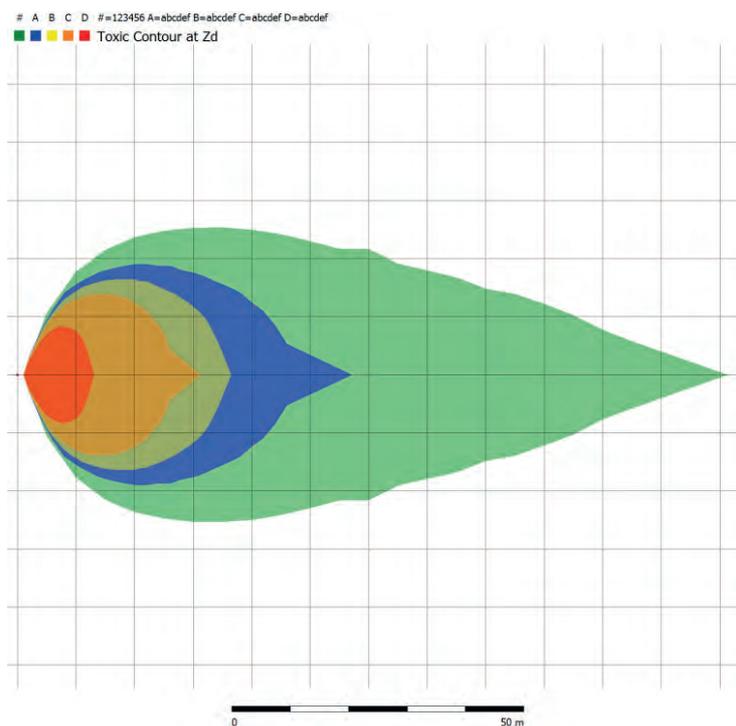
**Abbildung 24: Ausbreitung der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 6 kg/s Ammoniak**



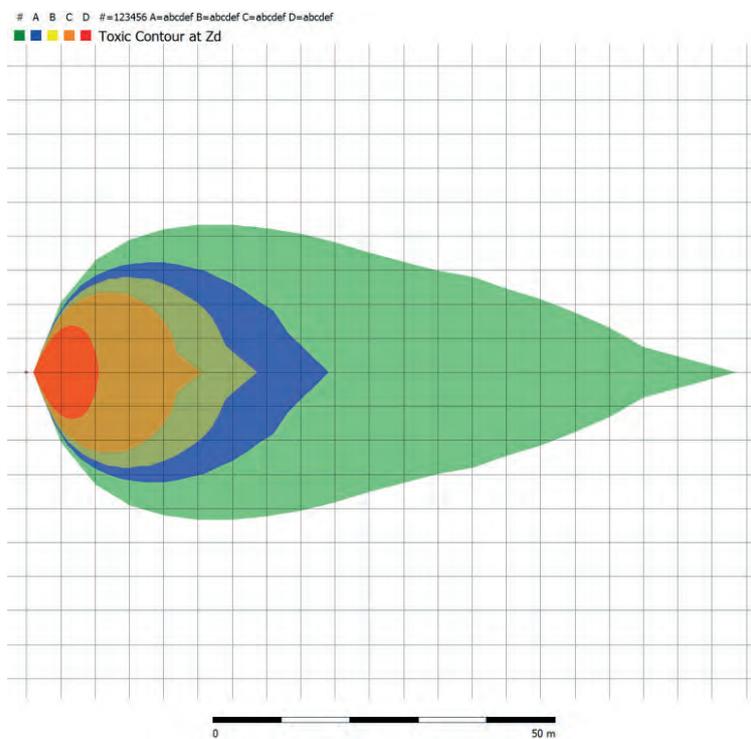
**Abbildung 25: Ausbreitung der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 5 kg/s Ammoniak**



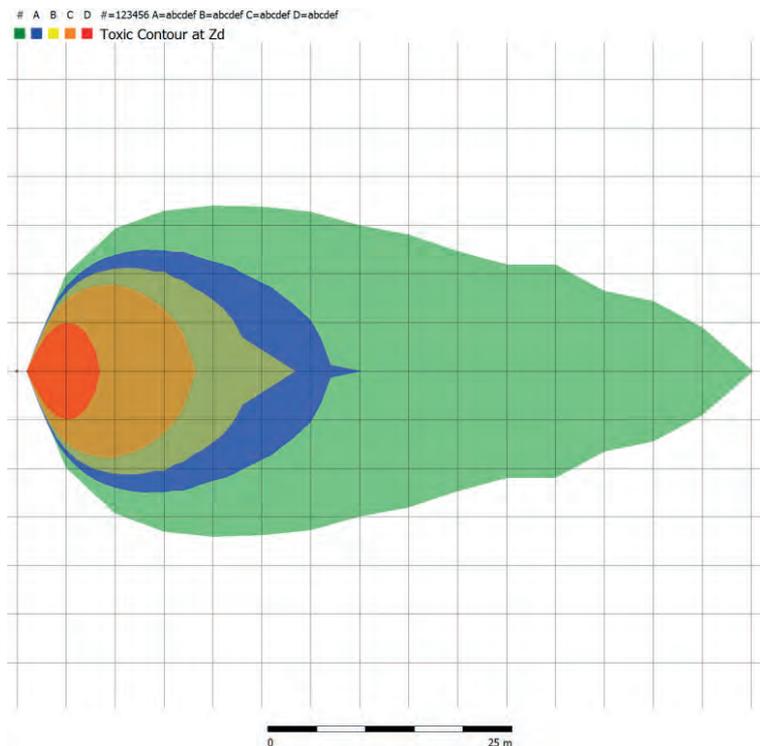
**Abbildung 26: Ausbreitung der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 4 kg/s Ammoniak**



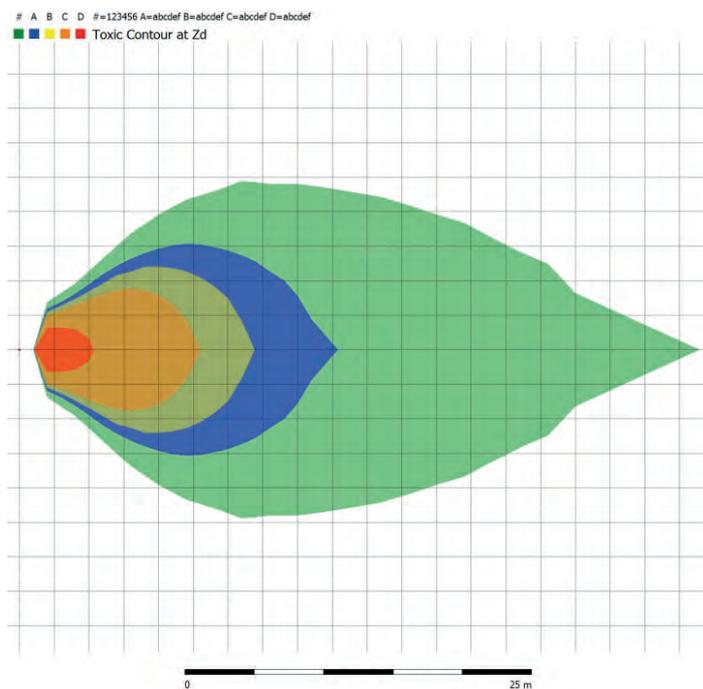
**Abbildung 27: Ausbreitung der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 3 kg/s Ammoniak**



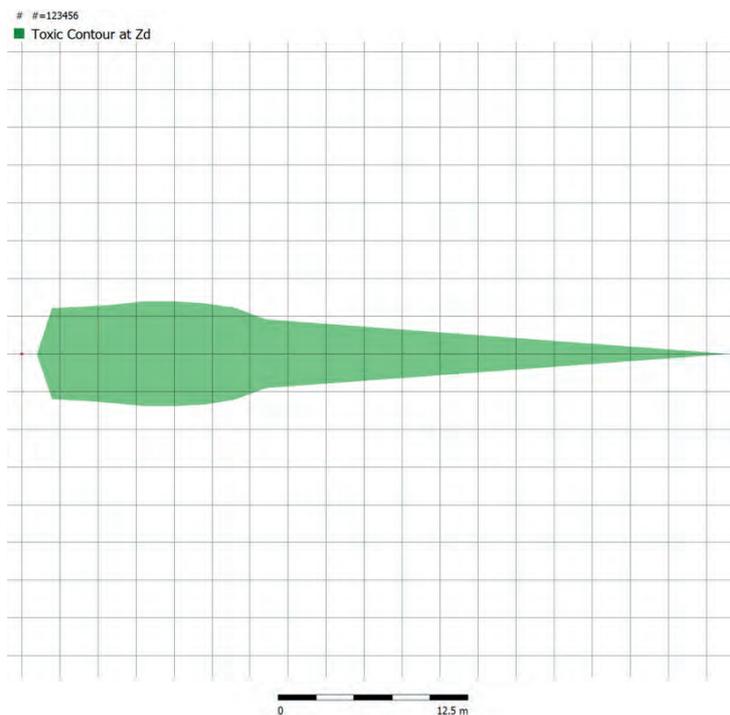
**Abbildung 28: Ausbreitung der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 2 kg/s Ammoniak**



**Abbildung 29: Ausbreitung der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 1 kg/s Ammoniak**



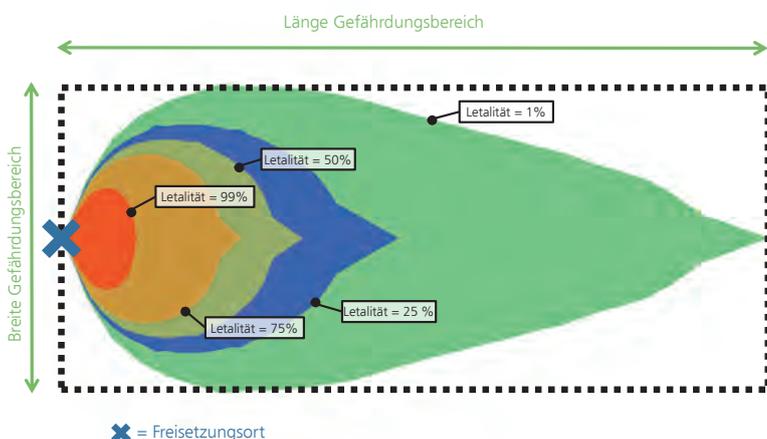
**Abbildung 30: Ausbreitung der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 0.5 kg/s Ammoniak**



**Festlegung des Gefährdungsbereiches**

Für eine einfachere Handhabung der Unterstellungskriterien wurde entschieden, den modellierten Gefährdungsbereich im Folgenden konservativ als Rechteck anzunehmen. Ausschlaggebend für die maximale Ausdehnung des Gefährdungsbereiches ist diejenige Zone, in der für Personen im Freien eine Letalität von 1 % erwartet wird (keine Flucht, d.h. Exposition während > 5 Min.). Abbildung 31 zeigt eine bildliche Darstellung dieser Vereinfachung.

**Abbildung 31: Vereinfachter Ausbreitungsbereich der Ammoniakwolke, in welchem für Personen potenziell tödliche Konzentrationen auftreten können (gepunktete Linie)**



Eine Zusammenfassung der Ausbreitungsdistanzen in Bezug auf einen Letalitätswert von 1 % ist in Tabelle 11 aufgeführt. Dabei ist die typische Ausdehnung in Windrichtung sowie senkrecht dazu angegeben.

**Tabelle 11: Ausbreitungsbereich der toxischen Wolke gemäss Berechnungen mit Effects (Lit. [15]): Letalität ≥ 1 %**

**GEFÄHRDUNGSBEREICH**

Freisetzungsrate	0.5 kg/s	1 kg/s	2 kg/s	3 kg/s	4 kg/s	5 kg/s	6 kg/s
Länge [m]	45	48	75	100	120	130	140
Breite [m]	10	25	35	50	50	60	60

## Ermittlung des Grenzwertes für das Personenaufkommen im Gefährdungsbereich

### Berechnung der mittleren Letalität über den Ausbreitungsbereich der toxischen Wolke

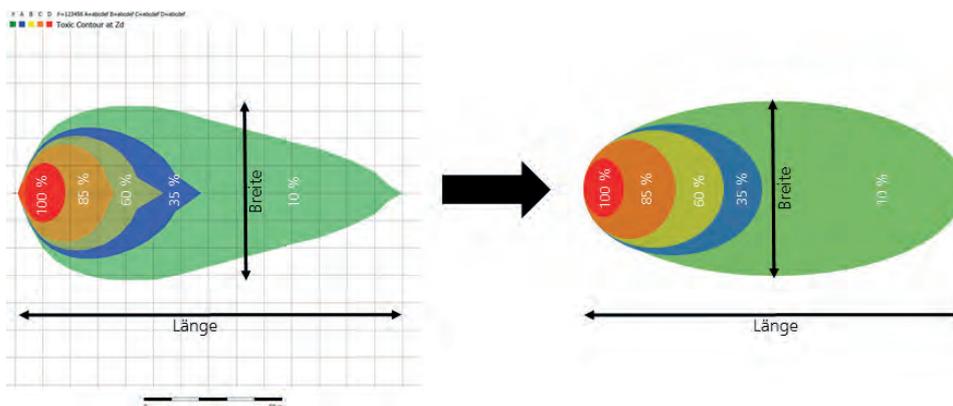
Für die mittleren Letalitätswerte im Freien innerhalb der einzelnen Letalitätsbereiche werden die im Rahmenbericht Erdgashochdruckanlagen (Lit. [9]) vorgeschlagenen Werte übernommen.

**Tabelle 12: Mittlere Letalitätswerte für Personen im Freien in den Letalitätsbereichen der Ammoniakausbreitung (Lit. [9]).**

BERECHUNGSTABELLE	Mittlere Letalität (in %)
<i>Bereich</i>	
Innerhalb R <sub>99</sub>	100
R <sub>99</sub> bis R <sub>75</sub>	85
R <sub>75</sub> bis R <sub>50</sub>	60
R <sub>50</sub> bis R <sub>25</sub>	35
R <sub>25</sub> bis R <sub>1</sub>	10
Ausserhalb R <sub>1</sub>	0

Vereinfachend wurde angenommen, dass die einzelnen Letalitätsbereiche ellipsenförmig sind. Zur Berechnung der jeweiligen Ellipsenfläche muss deren Länge und Breite bekannt sein. Dazu wurden die jeweiligen Längen und Breiten der entsprechenden Gefährdungszone aus den Ausbreitungsrechnungen übernommen.

**Abbildung 32: Vereinfachte Flächenberechnung der einzelnen Letalitätsbereiche als Ellipsen**



Zur Berechnung der mittleren Letalität über den gesamten Gefährdungsbereich wurde der flächenkorrigierte Mittelwert über alle Letalitätsbereiche berechnet. Für die berücksichtigten Freisetzungsraten zwischen 0.5 bis 6.0 kg/s ergibt sich so durchgehend eine mittlere Letalität um 28 %.

#### **Grenzwert Personenaufkommen $P_{ref}$**

Für jede der betrachteten Freisetzungsraten wurde anhand der oben beschriebenen Modellierung die notwendige Zahl der Personen  $P_{ref}$  innerhalb des Bereiches mit Letalität > 1 % ermittelt, die gerade zu einem Ausmass von 10 Todesopfern führt. Dazu wurde die mittlere Letalität über die gesamte Zone mit Letalität > 1 % ermittelt (vgl. oben). Es wurde angenommen, dass sich die Personen gleichmässig über diesen Gefährdungsbereich verteilen. Dabei zeigte sich, dass die mittlere Letalität über die betrachteten Freisetzungsraten von 0.5 bis 6 kg/s nahezu konstant sind, während die Ausdehnung der Wolke mit zunehmender Freisetzungsrates zunimmt. Für die beurteilten Freisetzungsraten ergibt sich daher ein einheitlicher Grenzwert für das Personenaufkommen von 35 Personen im Freien.

**$P_{ref} = 35$  Personen im Freien**

Eine Ausnahme ist die Freisetzungsrates von 0.5 kg/s. Gemäss Effects-Berechnungen treten dabei keine Letalitäten von über 25 % auf. Die mittlere Letalität im Gefährdungsbereich fällt dadurch deutlich tiefer aus, so dass sich dort ein Grenzwert für das Personenaufkommen von 100 Personen im Freien ergibt.

## Anwendungsbeispiel der Unterstellungskriterien

Ein Logistikunternehmen will ein neues Kühllager erstellen und befindet sich derzeit in der Projektierungsphase. Im Rahmen des Baubewilligungsverfahrens ist die Kälteanlage mit Ammoniak gemäss StFV zu beurteilen.

#### **Anlagedaten**

- Nutzung: Logistikgebäude mit Kühllager
- Gesamtmenge Ammoniak: 1 650 kg
- Angaben zur Verteilung des Ammoniaks in der Anlage sind vorhanden. Da sich Abscheider und Verdampfer im selben Raum befinden, fasst der Gesuchsteller die Mengen allerdings zusammen.
- Anlage Typ 5 (Direktverflüssigung – Direktverdampfung CO<sub>2</sub>)

- Maschinen- und Kühlraum angrenzend an Aussenfassade

Hinweis: Anhand der eingereichten Unterlagen ist nicht klar, ob der Maschinenraum wirklich an die Aussenfassade angrenzt und Öffnungen ins Freie aufweist oder ob es sich um einen gefangenen Raum handelt. Konservativ wird für eine erste Beurteilung von einem an die Aussenfassade angrenzenden Raum ausgegangen.

**Schritt 1: Bestimmung der Freisetzungsrates**

Die Freisetzungsrates wird anhand der verfügbaren Daten, der oben genannten Annahmen sowie der in [Kapitel 2.2.3](#) beschriebenen Grundlagen bestimmt. Das Vorgehen ist in [Abbildung 33](#) schematisch dargestellt. Für die Anlage ergibt sich eine maximale Freisetzungsrates von 3.0 kg/s.

**Abbildung 33: Vorgehen zur Bestimmung der maximalen Freisetzungsrates im Anwendungsbeispiel (schematische Darstellung)**

Ammoniak total	1'650 kg		
Verteilung in der Anlage (Typ 5)	Verdampfer	Abscheider	Kondensator
Angaben aus Projekt <i>(gemäss Tabelle 1, Kap. 2.2)</i>	n.A.	84% <i>40% (25% + 15%)</i>	16% <i>60%</i>
Freisetzungsort	n.A.	An Fassade grenzend	Im Freien
Gas- und Aerosolanteil	---	0.6	1.0
Entleerungsdauer	5 min	5 min	5 min
Freisetzungsrates	---	<b>2.8 kg/s</b> <b>(rund 3.0 kg/s)</b>	0.9 kg/s (rund 1.0 kg/s)

Hinweis: In diesem Fallbeispiel wurden die Angaben des Inhabers zur Verteilung des Ammoniaks in der Anlage verwendet. Hier zeigt sich, dass die Verteilung des Ammoniaks in einer realen Anlagen teilweise erheblich von den Angaben in [Tabelle 1](#) abweichen kann. Die dortigen Angaben sind daher mit Vorsicht zu verwenden.

**Schritt 2: Ermittlung des Grenzwertes für die Personenexposition**

Basierend auf der maximalen Freisetzungsrate von 3 kg/s ergibt sich gemäss Tabelle 3 bzw. Tabelle 4 ein Gefährdungsbereich von 100 m Länge und 50 m Breite, in dem sich maximal 35 Personen im Freien aufhalten dürfen.

**Abbildung 34: Bestimmung des Gefährdungsbereiches und des maximalen Personenaufkommens anhand der maximalen Freisetzungsrate gemäss Tabelle 4.**

GRENZWERT PERSONENAUFKOMMEN	Gefährdungsbereich		Grenzwert für Personenaufkommen $P_{ref}$ im Gefährdungsbereich
	Länge [m]	Breite [m]	
Freisetzungsrate [kg/s]	Länge [m]	Breite [m]	
6	140	60	35 Personen im Freien
5	130	60	
4	120	50	
3	100	50	
2	75	35	
1	48	25	
0.5	45	10	100 Personen im Freien

**Schritt 3: Entscheid zur Unterstellung unter die StfV**

Das effektive Personenaufkommen im Nahbereich um den vorgesehenen Standort wird abgeklärt und der Gefährdungsbereich (in ungünstigster Windrichtung) darüber gelegt.

**Abbildung 35: Personenaufkommen (Arbeitsbevölkerung) bei den Nachbarbetrieben und Gefährdungsbereich bei der kritischsten Windrichtung.**

Zugrunde gelegte Karte: © 2014 swisstopo (BA140279)



Basierend auf der Anzahl Arbeitsplätze im Nachbarbetrieb sowie anhand von Luftaufnahmen des Geländes wird geschätzt, dass sich von den 80 Mitarbeitenden maximal 5 bis 10 Personen gleichzeitig im Freien im Gefährdungsbereich aufhalten.

**Fazit**

Das maximal zu erwartende Personenaufkommen im Freien im Gefährdungsbereich (5 bis 10 Personen) ist kleiner als das maximal zulässige Personenaufkommen, welches zu einer schweren Schädigung führen würde (35 Personen). Eine Unterstellung der Anlage gemäss Art. 1 Abs. 3 StFV wird daher nicht empfohlen.

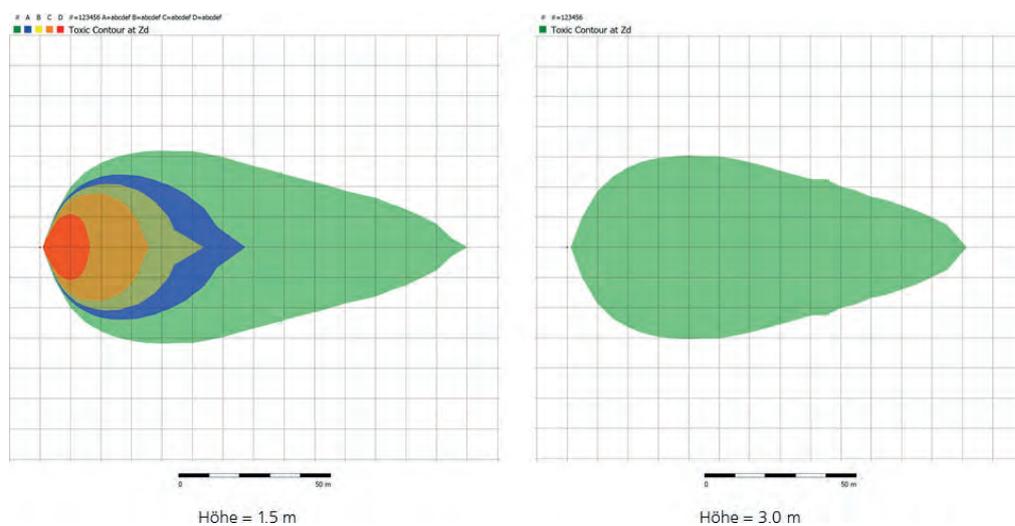
## A4 Gebäudeschutz

### Durchzugszeit der toxischen Wolke und Abhängigkeit der Konzentration von der Höhe

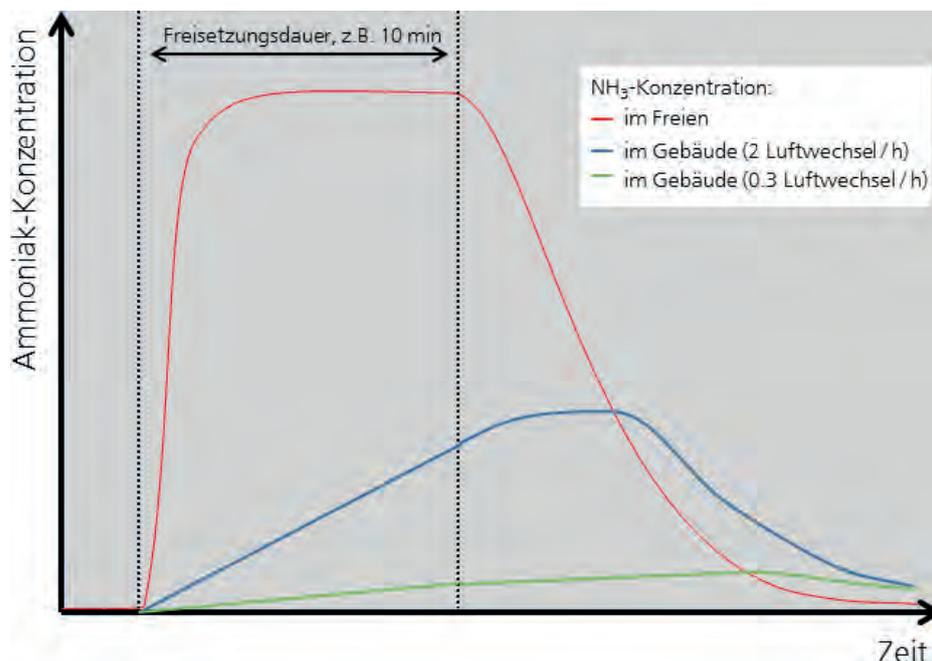
Für die betrachteten Störfallszenarien liegt eine möglicherweise letale Ammoniakkonzentration während etwa 5 bis 10 Min. vor. Nach beendeter Freisetzung verflüchtigt sich die Ammoniak-Wolke rasch. Die Ammoniak-Konzentration nimmt zudem mit zunehmender Höhe rasch ab (Schwergasmodell).

Befindet sich die Luftansaugöffnung des Gebäudes in der Ammoniak-Wolke, steigt die Ammoniak-Konzentration im Gebäude kontinuierlich an, bis sie gleich hoch wie die Aussenkonzentration ist. Abbildung 37 zeigt für eine kontinuierliche, zeitlich begrenzte Freisetzung schematisch den Konzentrationsverlauf ausserhalb und im Gebäude, abhängig von der Luftwechselrate.

**Abbildung 36: Letalitätsbereiche der Ammoniak-Wolke in unterschiedlichen Höhen für eine Freisetzungsrate von 6 kg/s bei Schwergasverhalten (Lit. [15])**



**Abbildung 37: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Konzentrationsverlauf von Ammoniak im Freien und im Gebäude sowie dessen Abhängigkeit von der Luftwechselrate**



### Platzierung der Luftansaugöffnung von Gebäuden

In städtischen Gebieten erfolgt die Luftansaugung immer auf einer Höhe von minimal 3 m über Boden (Schutz vor Abgasen und Vandalismus). In der Regel wird die Ansaugöffnung auf dieser Höhe angeordnet oder aber auf dem Dach.

Ansaugöffnungen liegen häufig an der Nordfassade des Gebäudes, um im Sommer nicht bereits vorgewärmte Luft anzusaugen. Wenn möglich befindet sich die Öffnung auf der von der Strasse abgewandten Gebäudeseite. Die genaue Platzierung erfolgt anhand einer Abwägung zwischen diesen und weiteren Faktoren.

### Luftwechselraten in Gebäuden

Es muss unterschieden werden zwischen Gebäuden mit mechanischer Lüftung und solcher mit natürlicher Lüftung. Die Luftwechselrate bei mechanischer Lüftung ist nutzungsabhängig. Für eine Büronutzung kann eine mittlere Rate von ca. 2 Luftwechseln pro Stunde angenommen werden. Es ist zu beachten, dass zur Einhaltung von Minergiestandards zunehmend auch Wohngebäude mit mechanischen Lüftungen ausgestattet werden.

Bei natürlicher Lüftung über die Fenster bestehen jahreszeitliche Unterschiede. Aufgrund des grösseren Temperaturgefälles sind die Luftwechselraten im Winter generell höher als im Sommer. Die in Tabelle 13 aufgeführten Werte gelten als Faustregel.

**Tabelle 13: Typische Luftwechselraten in natürlich gelüfteten Wohn- und Bürogebäuden.**

<b>LUFTWECHSELRATEN</b>		
	<i>Winter</i>	<i>Sommer</i>
Fenster geschlossen	Ca. 0.1 Luftwechsel pro Stunde (neue Gebäude)	Nahezu kein Luftwechsel
	Ca. 0.3 Luftwechsel pro Stunde (alte Gebäude)	
Fenster offen	8 bis 10 Luftwechsel pro Stunde	Ca. 1 Luftwechsel pro Stunde

(Im Jahresmittel ca. 4 Luftwechsel pro Stunde)

### **Herleitung von Gebäudeschutzraten**

Basierend auf der Luftwechselrate im Gebäude und der Distanz der Luftansaugöffnung zum Freisetzungsort kann abgeschätzt werden, welche Ammoniak-Konzentration bei einer bestimmten Freisetzung in einem Gebäude erreicht wird. Ein pragmatischer Ansatz zur Herleitung des Gebäudeschutzes ist in Tabelle 14 dargestellt. Vereinfachend wird dabei angenommen, dass die Personen im Gebäude während der gleichen Zeitdauer, welche der Freisetzungzeit entspricht, gegen Ammoniak exponiert sind.

**Tabelle 14: Gebäudeschutz in Abhängigkeit der Distanz zum Freisetzungsort und der Nutzung bzw. Luftwechselrate**

<b>LETALITÄTSZONE</b>	Innerhalb R <sub>99</sub>	Zwischen R <sub>50</sub> – R <sub>99</sub>	Zwischen R <sub>1</sub> – R <sub>50</sub>
Mittlere Letalität im Freien in diesem Bereich	99 %	87 %	22 %
Mittlere Ammoniak-Konzentration (Expositionsdauer 10 min)	30 500 mg/m <sup>3</sup>	16 500 mg/m <sup>3</sup>	6 390 mg/m <sup>3</sup>
<b>Natürliche Lüftung</b> ca. 0,3 Luftwechsel pro Stunde			
Mittlere Konzentration im Gebäude nach 10 min <sup>41)</sup>	1 525 mg/m <sup>3</sup>	825 mg/m <sup>3</sup>	320 mg/m <sup>3</sup>
Mittlere Letalität im Gebäude	0 %	0 %	0 %
<b>Gebäudeschutz<sup>42)</sup> Büros, Schulen</b>		<b>95 %<sup>43)</sup></b>	
<b>Ca. 50 % mit natürliche Lüftung und 50 % mit mechanischer Lüftung</b> ca. 1 Luftwechsel pro Stunde			
Mittlere Konzentration im Gebäude nach 10 min <sup>40)</sup>	5 080 mg/m <sup>3</sup>	2 750 mg/m <sup>3</sup>	1 065 mg/m <sup>3</sup>
Mittlere Letalität im Gebäude	11 %	0.7 %	0 %
<b>Gebäudeschutz<sup>41)</sup> Industrie</b>	<b>90 %</b>	<b>90 %<sup>42)</sup></b>	<b>95 %<sup>42)</sup></b>
<b>100 % mechanische Lüftung (z.B. industrielle Nutzung)</b> ca. 2 Luftwechsel pro Stunde			
Mittlere Konzentration im Gebäude nach 10 min <sup>40)</sup>	10 170 mg/m <sup>3</sup>	5 500 mg/m <sup>3</sup>	2 130 mg/m <sup>3</sup>
Mittlere Letalität im Gebäude	56 %	14 %	0.1 %
<b>Gebäudeschutz<sup>41)</sup> Industrie</b>	<b>45 %</b>	<b>85 %</b>	<b>95 %<sup>42)</sup></b>

### Fazit zu den Gebäudeschutzraten

Generell steigt der Gebäudeschutz mit zunehmender Distanz vom Freisetzungsort, weil mit der Distanz die Ammoniak-Konzentration im Freien abnimmt. Höhere Luftwechselraten führen zudem zu einer Reduktion des Gebäudeschutzes. Daher ist insbesondere im Nahbereich von Kälteanlagen mit Ammoniak zu berücksichtigen, dass auch Personen in Gebäuden gefährdet sein können.

<sup>41</sup> Die Ammoniak-Konzentration im Gebäude steigt langsam an. Die über die 10 Min. gemittelte Konzentration würde daher tiefer ausfallen. Dies wird dadurch kompensiert, dass für die Letalität im Gebäude ebenfalls eine Expositionsdauer von 10 Min. angesetzt wird, obwohl diese etwas höher ausfällt. D.h. vereinfachend wird die mittlere Konzentration etwas überschätzt und dafür die Expositionsdauer reduziert.

<sup>42</sup> Ein Gebäudeschutz von beispielsweise 70 % bedeutet, dass die Letalität für Personen, die sich gemäss Modell zum Zeitpunkt des Ereignisses in Gebäuden aufhalten, gegenüber der Freifeldletalität um einen Faktor 0.3 (=1 – 0.7) reduziert wird.

<sup>43</sup> Rechnerisch ergibt sich ein Gebäudeschutz von 100 %. Konservativ wird aber angenommen, dass 5 % der Personen in Gebäuden aufgrund offener Fenster nicht geschützt sind.

## A5 Ausbreitung toxische Wolke: Annahmen auf Stufe Kurzbericht

In [Kapitel 4.5](#) ist vorgegeben, welche räumliche Ausdehnung des Gefährdungsbereiches den Ausmassberechnungen auf Stufe Kurzbericht für verschiedene Szenarien und Freisetzungsmengen bzw. -raten zugrunde gelegt werden soll. Im Folgenden ist dokumentiert, welche Grundlagen, Annahmen und Berechnungen zur Herleitung dieser Gefährdungsbereiche verwendet wurden.

Führt der Ersteller des Kurzberichtes eigene Ausbreitungsberechnungen durch, soll er sich im Sinne eines einheitlichen Vollzuges ebenfalls soweit wie möglich an die folgenden Vorgaben halten. Abweichungen sind zu begründen.

### Ammoniak-Ausbreitung

#### Freisetzungs- und Ausbreitungsparameter für Kurzberichte

Nachfolgend werden die Annahmen beschrieben. Einzelne beziehen sich spezifisch auf das verwendete Modell «Effects» (Lit. [15]). Werden eigene Ausbreitungsberechnungen durchgeführt, können auch andere Modelle verwendet werden. Je nach Möglichkeiten des jeweiligen Modells sind in diesem Fall die Vorgaben sinngemäss anzupassen bzw. zu ergänzen.

**Tabelle 15: Ausbreitungsrechnungen auf Stufe Kurzbericht:  
Herleitung der allgemeinen Parameterwerte**

GENERELLE PARAMETER	Begründung
<i>Parameter</i>	
Freisetzungsmenge/ -rate	Auf Stufe Kurzbericht wird als Freisetzungsmenge generell der <b>gesamte Ammoniak-Inhalt der Anlage</b> angenommen, sofern sich dieser im selben Kreislauf befindet. Bei Anlagen mit mehreren getrennten Ammoniak-kreisläufen werden diese separat beurteilt.  Die für die Wolkenausbreitung relevante Ammoniak-Menge hängt davon ab, welcher Anteil des freigesetzten Ammoniaks direkt verdampft und wieviel flüssiges Ammoniak bei der Freisetzung des Gases in Tröpfchenform mitgerissen wird. Die Freisetzungsmenge wird daher über einen entsprechenden Faktor korrigiert.
Höhe der Freisetzung	Anlagenspezifische Angabe (Höhe der Abluftöffnung ins Freie bei Freisetzung im Gebäudeinnern bzw. des von einem Leck betroffenen Anlageteils im Freien).
Ausbreitungsmodell	Für Freisetzungen im Freien und via aufgedrückte Fenster und Türen soll ein Schwergasmodell zugrunde gelegt werden, da in diesen Fällen ein relevanter Aerosolanteil in der Wolke zu erwarten ist. Für Freisetzungen über die Lüftungskanäle wird hingegen die Verwendung eines Neutralgasmodells empfohlen, da sich die Tröpfchen in den Lüftungskanälen weitgehend abscheiden.

Die Ausbreitungsversuche durch INERIS (Lit. [16]) mit Freisetzungsmengen von 1 400 bis 3 500 kg Ammoniak und mit Freisetzungsraten zwischen 0.65 bis 4.2 kg/s haben gezeigt, dass sich dieses in einer ersten Phase bzw. im Konzentrationsbereich letaler Wirkungen als Schwergas ausbreitet (vor allem bei Freisetzungen als zweiphasiges Gemisch).

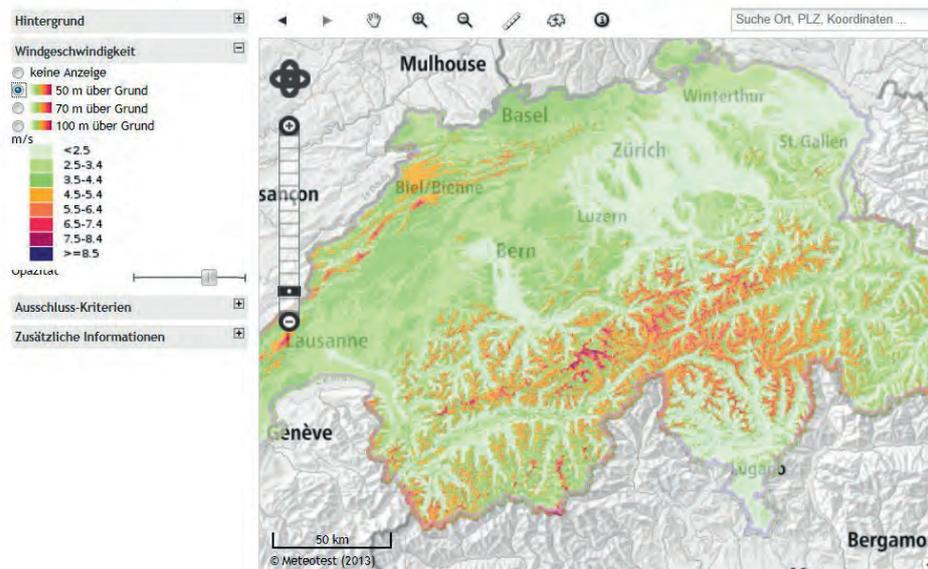
Zitate: «Liquefied ammonia releases behave like heavy gas releases» (p. 86)  
 «the ammonia cloud formed behaves like a heavy gas, and no rise in the cloud is observed» (p. 103).

Freisetzungsort	Im Freien	Im Gebäude, angrenzend an Fassade	Im Gebäude, gefangener Raum
Weg ins Freie		via Fassadenöffnung	via Lüftung über Dach
Ausbreitungsmodell	<b>Schwergas</b>	<b>Schwergas</b>	<b>Neutralgas</b>

Meteorologische Stabilitätsklasse	Es wird die meteorologische <b>Stabilitätsklasse D (neutral)</b> gemäss der Skala von Pasquill-Gifford zugrunde gelegt.
Oberflächenrauigkeit	Standortspezifische Angabe.
Windgeschwindigkeit	Den Ausbreitungsrechnungen soll eine Windgeschwindigkeit von <b>2 m/s</b> zugrunde gelegt werden. Die effektiven Werte liegen für das Mittelland meist höher (vgl. Abbildung 38). Die vorgeschlagene Windgeschwindigkeit ergibt jedoch konservative Resultate. Ein noch tieferer Wert wäre hingegen nicht sinnvoll, da die verwendeten Ausbreitungsmodelle nur gültig sind, wenn die Windgeschwindigkeit nicht zu tief liegt; insgesamt wird ein Wert von 2 m/s als zweckmässig erachtet.
Umgebungstemperatur	Den Ausbreitungsrechnungen soll eine Umgebungstemperatur von <b>20 °C</b> zugrunde gelegt werden. Eine Sensitivitätsprüfung dieses Parameters ergab, dass sich abweichende Werte gemäss Effects praktisch nicht auf die Letalitätsradien auswirken. Tiefere Temperaturen führen zu leicht kleineren Letalitätsradien. Eine Temperatur von 20 °C liegt über dem Jahresmittel und ist daher leicht konservativ.
Luftfeuchtigkeit	Es soll eine relative Luftfeuchtigkeit von <b>70 %</b> zugrunde gelegt werden. Eine Sensitivitätsprüfung dieses Parameters ergab, dass die Luftfeuchtigkeit gemäss Effects nur einen geringfügigen Einfluss auf die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung sowie die resultierenden Letalitätsradien hat.

**Abbildung 38: Mittlere Windgeschwindigkeit in der Schweiz.**

© 2013 Meteotest; Quelle: <http://wind-data.ch/windkarte>



**Tabelle 16: Parameter für Ausbreitungsrechnungen bei Freisetzungen mit kontinuierlichem Quellterm (Stufe Kurzbericht)**

KONTINUIERLICHE FREISETZUNG	Begründung																																
<i>Parameter</i>																																	
Austrittspunkt ins Freie	Kontinuierliche Freisetzungen: Bei kontinuierlichen Freisetzungen im Gebäude ist als Austrittspunkt ins Freie grundsätzlich die <b>Austrittsöffnung der entsprechenden Lüftungsanlage</b> zu wählen. In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass Türen und Fenster der geringen Druckentwicklung einer kontinuierlichen Freisetzung standhalten (sofortiger Druckabbau durch Entlastung via Abluftkanal) und nur vernachlässigbare Gasmengen durch Ritzen austreten. Grenzt der entsprechende Raum an die Aussenfassade an und weist Öffnungen direkt ins Freie auf (z.B. Türen, Fenster), dann können diese Öffnungen in Ausnahmefällen als Austrittspunkt angenommen werden. In diesem Fall ist zu begründen, weshalb relevante Gasmengen eher über diese Öffnung entweichen als über die Lüftungskanäle.																																
Freisetzungsdauer	Die reale Freisetzungsdauer hängt stark von der Leckgrösse bzw. vom betroffenen Leitungsquerschnitt ab. Auf Stufe Kurzbericht wird pauschal angenommen, dass die Freisetzungsdauer unabhängig von der Anlagengrösse <b>10 Min.</b> beträgt. Zur Verifizierung dieser Annahme wurde die Sensitivität der Letalitätsradien bzgl. der Freisetzungsdauer bzw. -rate bei konstanter Freisetzungsmenge ermittelt. Für die Freisetzungsdauer wurde der Bereich zwischen 2 bis 10 Min. überprüft. Dabei zeigte sich, dass die Freisetzungsdauer (im untersuchten Bereich) nur einen geringfügigen Einfluss auf die Letalitätsradien hat, wenn die gesamte freigesetzte Menge Ammoniak konstant gehalten wird.																																
Korrekturfaktor $K_{Ort}$	Bei einer Freisetzung von druckverflüssigtem Ammoniak teilt sich dieses in drei Phasen auf: gasförmiges Ammoniak, Aerosol-Tröpfchen sowie eine Flüssigkeitslache, die je nach Wärmeeintrag langsam verdampft. Basierend auf den Angaben in Lit. [6] wird für kontinuierliche Freisetzungen auf Stufe Kurzbericht folgender Zusammenhang zwischen Freisetzungsort und Verteilung des Ammoniaks auf die einzelnen dieser Phasen angenommen:																																
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;"><i>Freisetzungsort</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Im Freien</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Im Gebäude, angrenzend an Fassade</i></th> <th style="text-align: center;"><i>Im Gebäude, gefangener Raum</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">Weg ins Freie</td> <td></td> <td style="text-align: center;">via Fassadenöffnung <b>(Ausnahme)</b></td> <td style="text-align: center;">via Lüftung über Dach <b>(Regelfall)</b></td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Quellterm</td> <td style="text-align: center;">kontinuierlich</td> <td style="text-align: center;">kontinuierlich</td> <td style="text-align: center;">kontinuierlich</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Gas</td> <td style="text-align: center;">20 %</td> <td style="text-align: center;">20 %</td> <td style="text-align: center;">20 %</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Aerosol</td> <td style="text-align: center;">80 %</td> <td style="text-align: center;">40 %</td> <td style="text-align: center;">40 %</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Lache</td> <td style="text-align: center;">0 %</td> <td style="text-align: center;">40 %</td> <td style="text-align: center;">40 %</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Wolkenanteil<sup>44)</sup></td> <td style="text-align: center;">100 % (Gas + Aerosol)</td> <td style="text-align: center;">60 % (Gas + Aerosol)</td> <td style="text-align: center;">20 % (nur Gas)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;"><b><math>K_{Ort}</math></b></td> <td style="text-align: center;"><b>1.0</b></td> <td style="text-align: center;"><b>0.6</b></td> <td style="text-align: center;"><b>0.2</b></td> </tr> </tbody> </table>	<i>Freisetzungsort</i>	<i>Im Freien</i>	<i>Im Gebäude, angrenzend an Fassade</i>	<i>Im Gebäude, gefangener Raum</i>	Weg ins Freie		via Fassadenöffnung <b>(Ausnahme)</b>	via Lüftung über Dach <b>(Regelfall)</b>	Quellterm	kontinuierlich	kontinuierlich	kontinuierlich	Gas	20 %	20 %	20 %	Aerosol	80 %	40 %	40 %	Lache	0 %	40 %	40 %	Wolkenanteil <sup>44)</sup>	100 % (Gas + Aerosol)	60 % (Gas + Aerosol)	20 % (nur Gas)	<b><math>K_{Ort}</math></b>	<b>1.0</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>
<i>Freisetzungsort</i>	<i>Im Freien</i>	<i>Im Gebäude, angrenzend an Fassade</i>	<i>Im Gebäude, gefangener Raum</i>																														
Weg ins Freie		via Fassadenöffnung <b>(Ausnahme)</b>	via Lüftung über Dach <b>(Regelfall)</b>																														
Quellterm	kontinuierlich	kontinuierlich	kontinuierlich																														
Gas	20 %	20 %	20 %																														
Aerosol	80 %	40 %	40 %																														
Lache	0 %	40 %	40 %																														
Wolkenanteil <sup>44)</sup>	100 % (Gas + Aerosol)	60 % (Gas + Aerosol)	20 % (nur Gas)																														
<b><math>K_{Ort}</math></b>	<b>1.0</b>	<b>0.6</b>	<b>0.2</b>																														

<sup>44</sup> «Wolkenanteil» bezeichnet denjenigen Anteil des freigesetzten Ammoniaks, welcher in Form von Gas oder Aerosoltröpfchen an der Ausbreitung im Freien teilnimmt. Dieser Anteil hängt davon ab, auf welchem Pfad das Ammoniak ins Freie gelangt.

Beispiel: Bei einem Anlageninhalt von 5 000 kg und einer kontinuierlichen Freisetzung im Gebäude mit Ausbreitung via Lüftung ergibt sich ein Quellterm für die Ausbreitungsrechnungen von 1 000 kg über 10 Min.

Hintergrund der unterschiedlichen Werte bildet die Tatsache, dass sich die Flüssigkeitströpfchen auf Hindernissen im Ausbreitungspfad niederschlagen (Lit. [16]) und daher nach einer Freisetzung im Gebäude nur teilweise ins Freie gelangen. Derjenige Anteil des freigesetzten Ammoniaks, der sich in der Flüssigkeitslache sammelt, nimmt lediglich zeitlich verzögert an der Wolkenausbreitung teil und liefert einen untergeordneten Beitrag zur Wolkenausbreitung<sup>45)</sup>.

Aerosolanteil in der Wolke

Das Effects-Modell fordert für seine Berechnungen die Angabe, welcher Anteil der sich ausbreitenden Ammoniak-Wolke aus Aerosoltröpfchen besteht («Initial Liquid Mass Fraction»). Die Gesamtmenge Ammoniak in der sich ausbreitenden Wolke wird durch diesen Faktor nicht nochmals reduziert!  
 Basierend auf den vom Freisetzungsort abhängigen Anteilen an mitgerissenen Flüssigkeitströpfchen ergeben sich unterschiedliche Aerosolanteile in der Ammoniakwolke:

Freisetzungsort	Im Freien	Im Gebäude, angrenzend an Fassade		Im Gebäude, gefangener Raum
Weg ins Freie		via Fassadenöffnung <b>(Ausnahme)</b>	via Lüftung über Dach <b>(Regelfall)</b>	via Lüftung über Dach
Ausbreitungsmodell	Schwergas	Schwergas	Neutralgas	Neutralgas
Aerosolanteil in der Wolke	<b>80 %<sup>46)</sup></b>	<b>67 %<sup>47)</sup></b>	<b>0 %</b>	<b>0 %</b>

<sup>45)</sup> Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Lachenfläche begrenzt ist (Regeln der Technik gemäss SN/EN378-2 (Lit. [23]), Kapitel 5.17.2.1)

<sup>46)</sup> Es wird angenommen, dass 20 % des freigesetzten Ammoniaks spontan verdampfen und die restlichen 80% als Aerosol mitgerissen werden (gemäss Lit. [6], «kleine kontinuierliche Freisetzung im Freien»). Der Aerosolanteil in der Wolke beträgt daher 80 %.

<sup>47)</sup> Es wird angenommen, dass 20 % des freigesetzten Ammoniaks spontan verdampfen und weitere 40 % als Aerosol mitgerissen werden (gemäss Lit. [6], «kleine kontinuierliche Freisetzung im Gebäude»). Die restlichen 40 % bilden eine Flüssigkeitslache. Der Aerosolanteil in der Wolke beträgt daher 67 %.

### Spontane Freisetzung

Grundsätzlich gelten dieselben Vorgaben wie für kontinuierliche Freisetzungen. Im Folgenden werden nur Abweichungen und Ergänzungen dazu aufgeführt.

**Tabelle 17: Ausbreitungsrechnungen auf Stufe Kurzbericht für Freisetzungen mit spontanem Quellterm («Puff-Freisetzung»).**

SPONTANE FREISETZUNG	Begründung
<i>Parameter</i>	
Austrittspunkt ins Freie	Bei spontanen Freisetzungen ist der Standort der Anlage (im Freien) bzw. die <b>Schwachstelle des Maschinenraumes</b> (Türe oder Fenster ins Freie) als Austrittspunkt zu wählen. Bei Freisetzungen in gefangenen Räumen erfolgt die Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm über die Lüftungskanäle. In diesem Fall ist ebenfalls die Austrittsöffnung der entsprechenden Lüftungsanlage als Austrittspunkt zu wählen.
Freisetzungsdauer	Erfolgt eine spontane Freisetzung im Gebäude und gelangt das Ammoniak nur über die Lüftungskanäle ins Freie, wird die Freisetzung entsprechend verzögert. Trotz spontaner Freisetzung erfolgt die Gasausbreitung im Freien in der Folge mit einem kontinuierlichen Quellterm (> vgl. Angaben zur spontanen Freisetzung unter «Quellterm»). Für diesen Fall wird pauschal ebenfalls eine Freisetzungsdauer von <b>10 Min.</b> angenommen. Diese Annahme ist konservativ, da in Gebäuden üblicherweise eine Luftwechselrate von unter 6/h herrscht und die mechanische Lüftung bei Überschreiten des oberen Alarmwertes ausgeschaltet wird (vgl. <a href="#">Regeln der Technik, Kapitel 4.2.1</a> ). Zur Verifizierung dieser Annahme wurde die Sensitivität der Letalitätsradien bzgl. der Freisetzungsdauer bzw. -rate bei konstanter Freisetzungsmenge ermittelt. Für die Freisetzungsdauer wurde der Bereich zwischen 2 bis 10 Min. überprüft. Dabei zeigte sich, dass die Freisetzungsdauer (im untersuchten Bereich) nur einen geringfügigen Einfluss auf die Letalitätsradien hat, wenn die gesamte freigesetzte Ammoniak-Menge konstant gehalten wird.
Quellterm spontan vs. kontinuierlich	Nur wenige Ursachen können zu einem spontanen Behälterbersten des Abscheiders führen. Entsprechend sind spontane Freisetzungen um Größenordnungen seltener als kontinuierliche und in der Regel die Folge einer massiven physischen Einwirkung auf das Gebäude. Für die anschließende Ausbreitung im Freien ist entscheidend, wie stark die Gebäudehülle durch diese Einwirkung beschädigt wird. Je nach Rückhaltewirkung der Gebäudehülle kann nach einer spontanen Freisetzung im Gebäude die Ausbreitung von Ammoniak entweder mit einem spontanen oder mit einem kontinuierlichen Quellterm erfolgen. Vereinfachend werden dazu folgende Annahmen getroffen:

Freisetzungsort	Quellterm
Abscheider im Freien	spontaner Quellterm
Abscheider in einem an die Aussenfassade angrenzenden Raum <i>(mit Öffnungen, die direkt ins Freie bzw. bei Sportanlagen in den Publikumsbereich führen)<sup>48)</sup></i>	spontaner Quellterm  Bei sehr massiver Bauweise von Türe und Wänden kann in Ausnahmefällen auch ein kontinuierlicher Quellterm mit Entlastung über die Entlüftungsleitungen zugrunde gelegt werden. In diesem Fall sind die zu dieser Annahme führenden Überlegungen im Kurzbericht zu erläutern.
Abscheider in einem gefangenen Raum <i>(keine Öffnungen, die auf sehr kurzem Weg direkt ins Freie führen)</i>	kontinuierlicher Quellterm  (Ammoniak gelangt via Lüftungskanäle ins Freie)  Für diesen Fall wird pauschal angenommen, dass die Freisetzung aus dem Gebäude ins Freie über 10 Min. erfolgt.

Korrekturfaktor  $K_{Ort}$  Bei einer Freisetzung von druckverflüssigtem Ammoniak teilt sich dieses in drei Phasen auf: gasförmiges Ammoniak, Aerosol-Tröpfchen sowie eine Flüssigkeitslache, die je nach Wärmeeintrag langsam verdampft. Basierend auf den Angaben in Lit. [6] wird für spontane Freisetzungen auf Stufe Kurzbericht folgender Zusammenhang zwischen Freisetzungsort und Verteilung des Ammoniaks auf die einzelnen dieser Phasen angenommen:

Freisetzungsort	Im Freien	Im Gebäude, angrenzend an Fassade	Im Gebäude, gefangener Raum
Weg ins Freie		Weg ins Freie <b>(Regelfall)</b>	via Lüftung über Dach <b>(Ausnahme)</b>
Quellterm	spontan	spontan	kontinuierlich
Gas	20 %	20 %	20 %
Aerosol	20 %	20 %	20 %
Lache	60 %	60 %	60 %
Wolke <sup>49)</sup>	40 % (Gas + Aerosol)	40 % (Gas + Aerosol)	20 % (nur Gas)
<b><math>K_{Ort}</math></b>	<b>0.4</b>	<b>0.4</b>	<b>0.2</b>

Beispiel: Bei einem Anlageninhalt von 5 000 kg und einer spontanen Freisetzung im Gebäude mit Ausbreitung via Fassadenöffnungen ergibt sich ein (spontaner) Quellterm für die Ausbreitungsrechnungen von 2 000 kg.

<sup>48)</sup> Beträgt die Menge an freigesetztem Ammoniak mehr als 160 kg pro m<sup>3</sup> Raumvolumen, können infolge des Druckaufbaus je nach Bauweise auch die Wände versagen. Quelle: US EPA, Lit. [18], S. 5.

<sup>49)</sup> Grundannahme: Das freigesetzte Ammoniak verteilt sich folgendermassen über die verschiedenen Phasen: 20 % spontane Verdampfung, 20 % Aerosol, 60 % in der Flüssigkeitslache. Quelle: Lit. [6], S.3.

Hintergrund der unterschiedlichen Werte bildet die Tatsache, dass sich die Flüssigkeitströpfchen auf Hindernissen im Ausbreitungspfad niederschlagen (Lit. [16]) und daher nach einer Freisetzung im Gebäude nur teilweise ins Freie gelangen. Derjenige Anteil des freigesetzten Ammoniaks, welcher sich in der Flüssigkeitslache sammelt, nimmt lediglich zeitlich verzögert an der Wolkenausbreitung teil und liefert dabei einen untergeordneten Beitrag zur Wolkenausbreitung<sup>50)</sup>.

Aerosolanteil in der Wolke	Das Effects-Modell fordert für seine Berechnungen die Angabe, welcher Anteil der sich ausbreitenden Ammoniak-Wolke aus Aerosoltröpfchen besteht («Initial Liquid Mass Fraction»). Die Gesamtmasse von Ammoniak in der sich ausbreitenden Wolke wird durch diesen Faktor nicht nochmals reduziert!			
	Basierend auf den vom Freisetzungsort abhängigen Anteilen an mitgerissenen Flüssigkeitströpfchen ergeben sich unterschiedliche Aerosolanteile in der Ammoniakwolke:			
	<i>Freisetzungsort</i>	<i>Im Freien</i>	<i>Im Gebäude, angrenzend an Fassade</i>	<i>Im Gebäude, gefangener Raum</i>
	Weg ins Freie	via Fassadenöffnung <b>(Regelfall)</b>	via Lüftung über Dach <b>(Ausnahme)</b>	via Lüftung über Dach
Aerosolanteil in der Wolke	50 % <sup>51)</sup>	50 % <sup>52)</sup>	0 %	0 %

## Festlegung des Gefährdungsbereiches

### Methodik

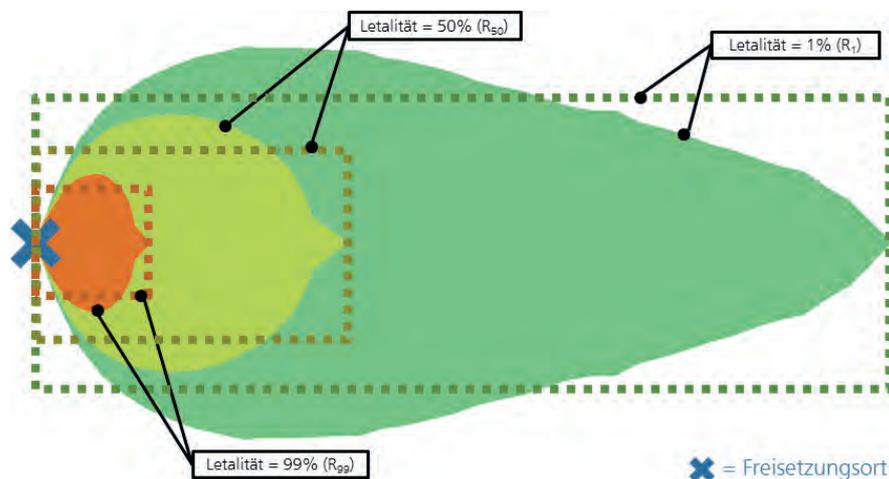
Wird die Ausbreitung von Gasen mit entsprechenden Software-Hilfsmitteln berechnet, ergeben sich in der Regel tropfenförmige Flächen. An deren Rand herrscht eine definierte, mittlere Letalität für Personen, welche sich während einer bestimmten Zeitdauer dort aufhalten. Als Basis für die Ausmasseneinschätzung werden diejenigen Gefährdungsbereiche berücksichtigt, an deren Rand die mittlere Letalität 99 %, 50 % bzw. 1 % beträgt. Vereinfachend werden die Flächen dieser Gefährdungsbereiche als rechteckig angenommen. Für die Umrechnung werden die Länge und die Fläche des jeweiligen Gefährdungsbereiches beibehalten und die Breite entsprechend angepasst (siehe Abbildung 39). Dies führt zu leichter Überschätzung des Gefährdungsbereiches im Nah- und Fernbereich und zu leichter Unterschätzung in mittlerer Distanz. Die Abweichung beläuft sich allerdings auf wenige Meter.

<sup>50)</sup> Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Lachenfläche begrenzt ist (Regeln der Technik gemäss SN EN378-2 (Lit. [23]), Kapitel 5.17.2.1.)

<sup>51)</sup> Es wird angenommen, dass 20 % des freigesetzten Ammoniaks spontan verdampfen, und weitere 20 % als Aerosol mitgerissen werden. (Gemäss Lit. [6], «grosse spontane Freisetzung im Freien»)

<sup>52)</sup> Spontane Freisetzungen aus dem Abscheider können nur infolge weniger, sehr heftiger Einwirkungen auftreten. Es wird daher davon ausgegangen, dass bei einem solchen Ereignis die Gebäudehülle ebenfalls stark beschädigt würde. Infolgedessen kann diese das Gas/Aerosol-Gemisch nur noch begrenzt zurückhalten.

**Abbildung 39: Die Flächen des Gefährdungsbereiches werden vereinfacht als gleichflächige Rechtecke angenommen.**



## Ausbreitungs- und Wirkungsmodellierung

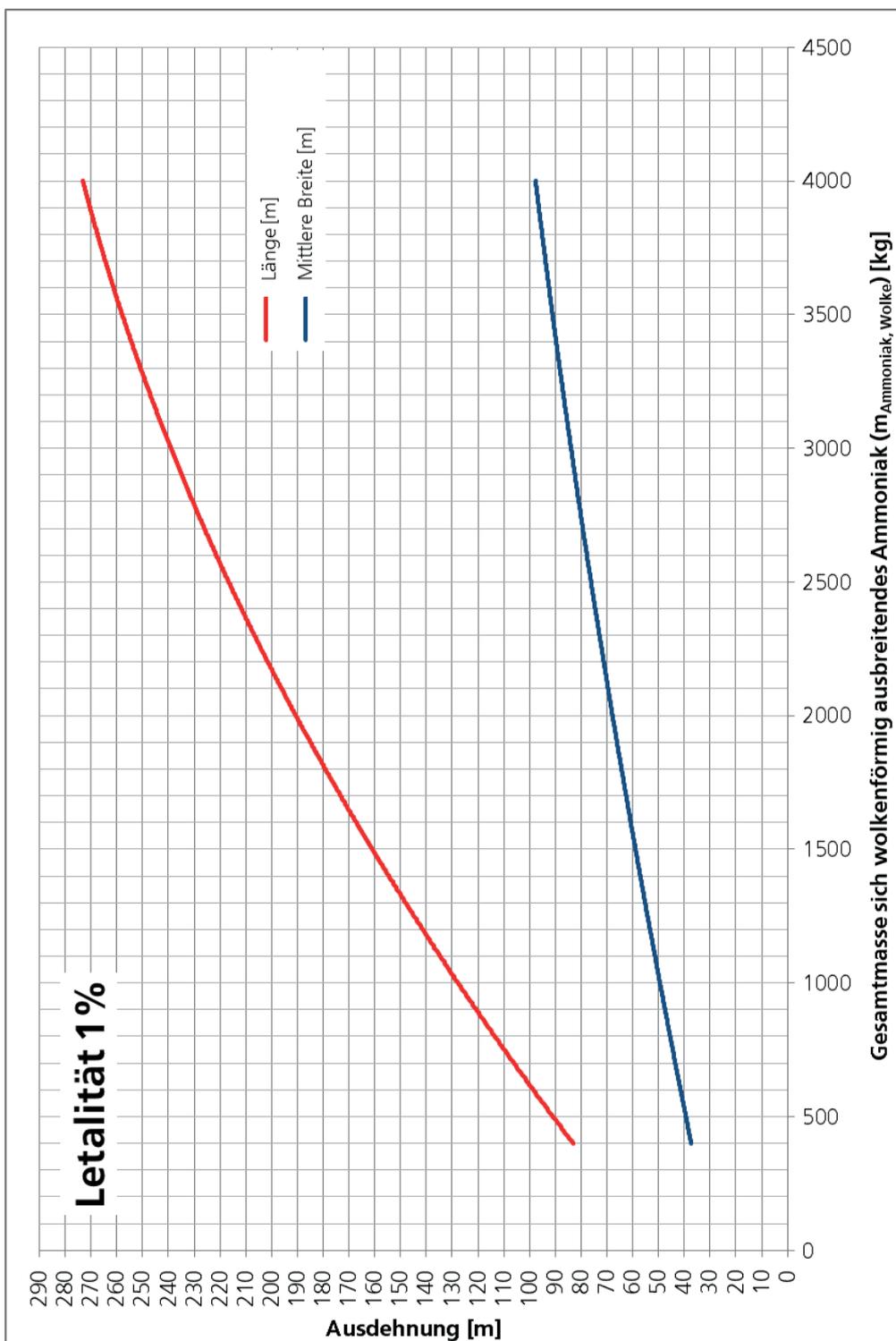
Als Hilfestellung für Verfasser von Kurzberichten wurden die Ausbreitungsmodellierungen für die auf Stufe Kurzbericht typischerweise zu berücksichtigenden Szenarien vorberechnet. Diese Berechnungen wurden mit der Software EFFECTS (Version 9) von TNO (Lit. [15]) durchgeführt und basieren auf den in diesem Anhang vorgegebenen Parametern. Aufgrund des grossen Umfangs der durchgeführten Berechnungen wird an dieser Stelle auf eine vollständige Dokumentation der Ergebnisse verzichtet. Eine Zusammenfassung der relevanten Ergebnisse findet sich weiter unten.

### **Gefährdungsbereiche für Ausmassabschätzungen auf Stufe Kurzbericht**

Aus den folgenden Grafiken kann die Ausdehnung der Gefährdungsbereiche für verschiedene Freisetzungsorten herausgelesen werden.

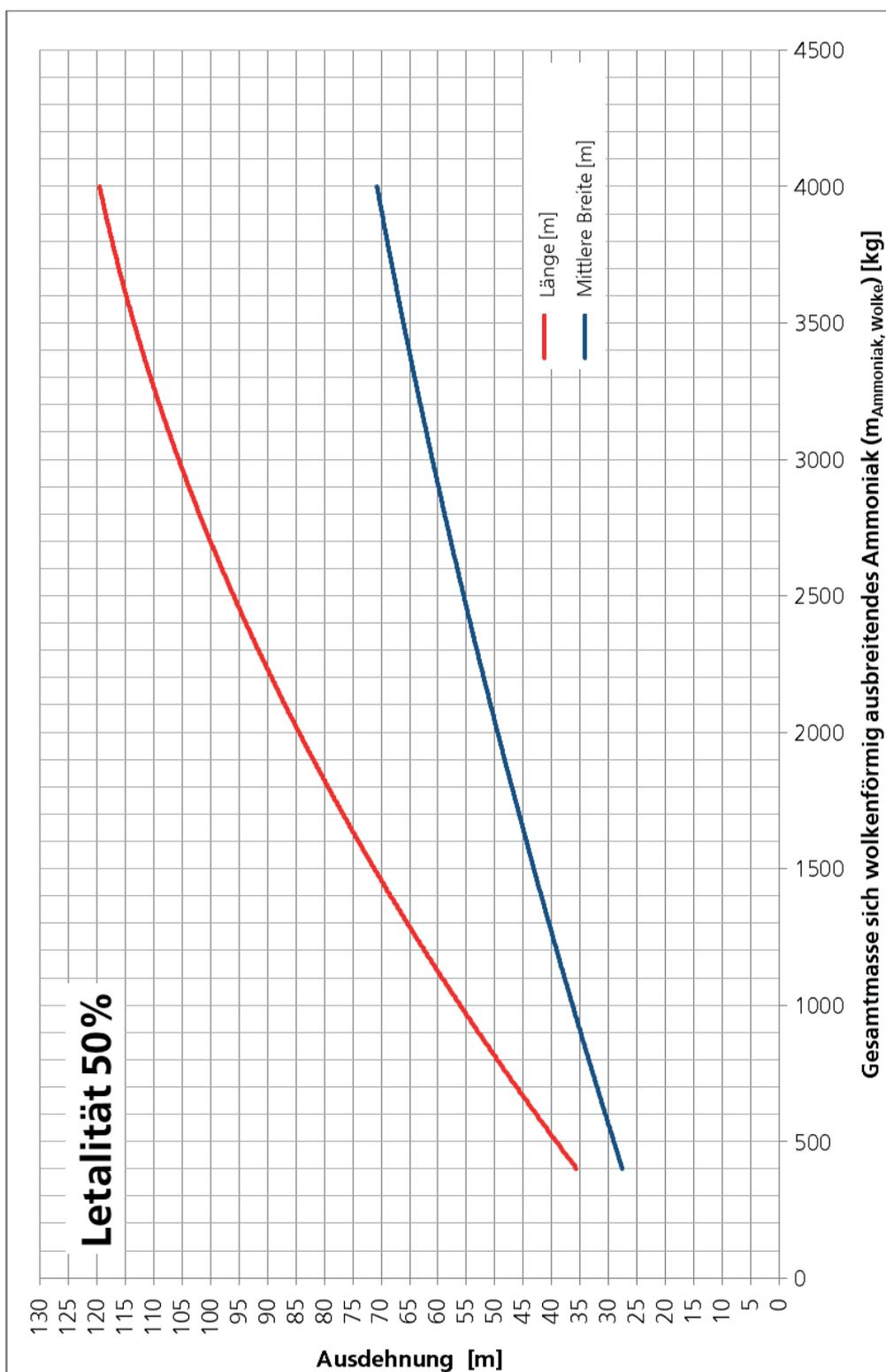
**Abbildung 40: Spontane Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 1%**

Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 1\%$  bei einer Freisetzung mit spontanem Quellterm; Aerosolanteil 50%.



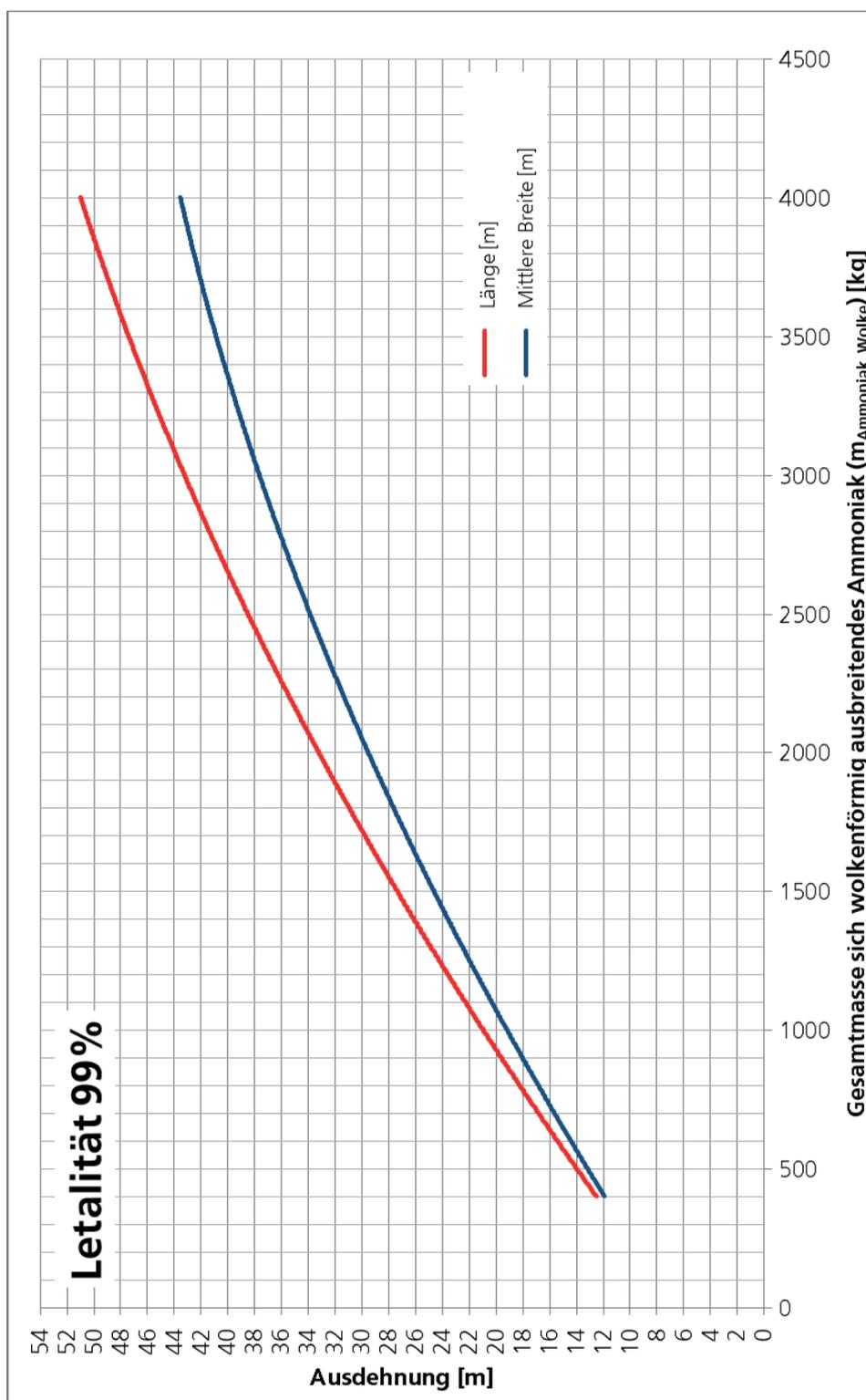
**Abbildung 41: Spontane Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 50%**

Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 50\%$  bei einer Freisetzung mit spontanem Quellterm; Aerosolanteil 50%.

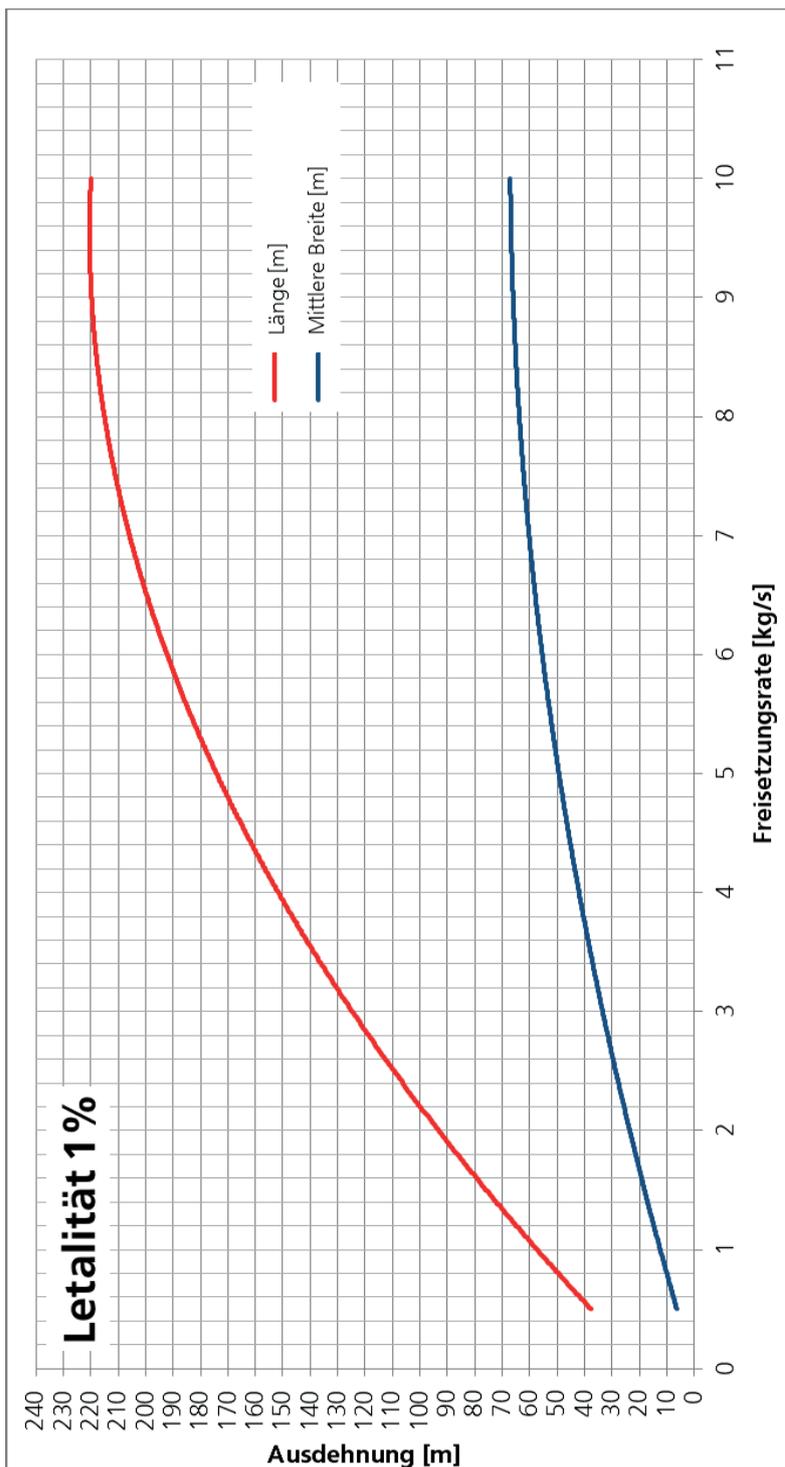


**Abbildung 42: Spontane Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 99%**

Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 99\%$  bei einer Freisetzung mit spontanem Quellterm; Aerosolanteil 50%.

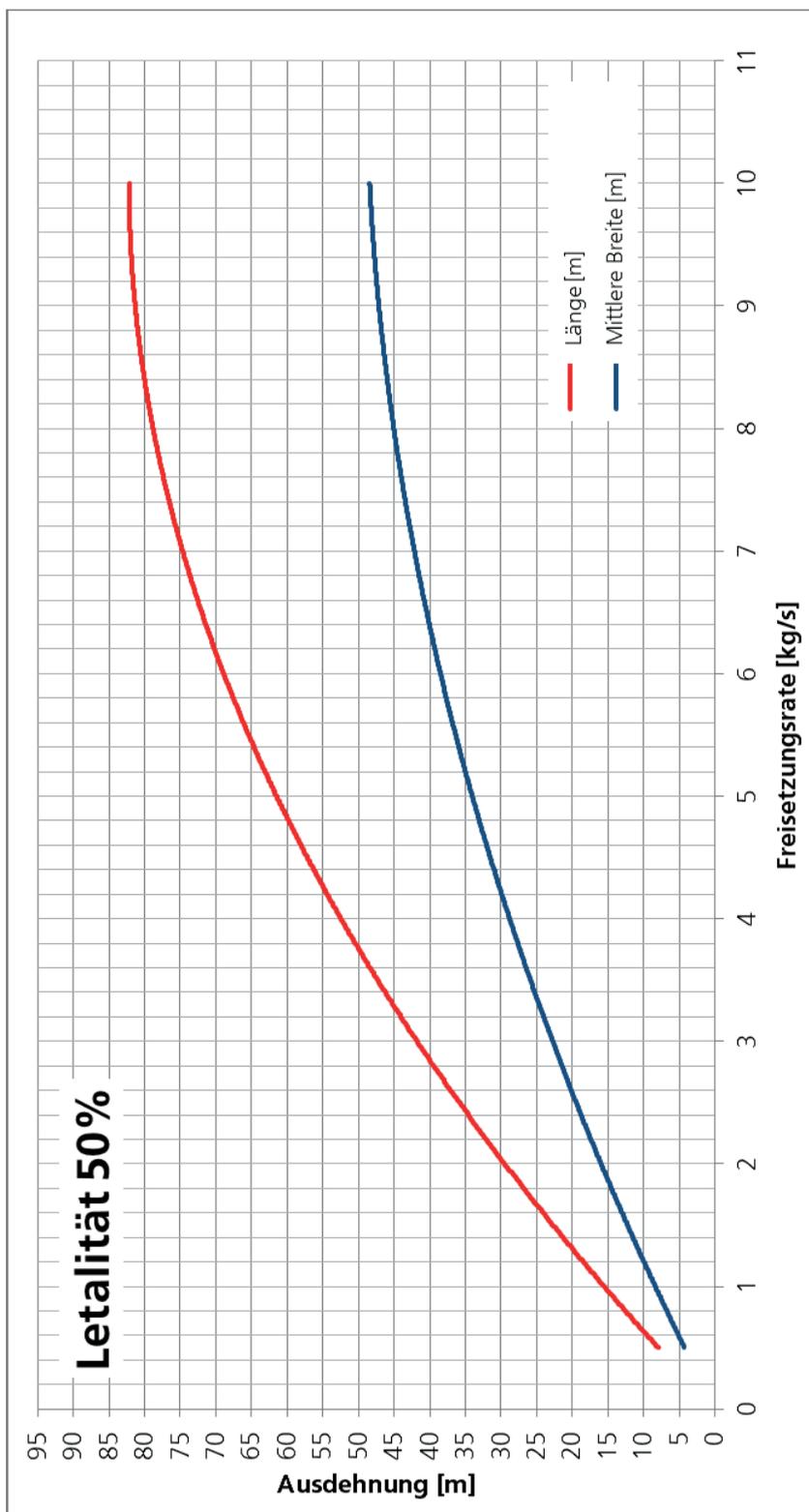


**Abbildung 43: Kontinuierliche Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 1%**  
**Freisetzung im Freien, Ausbreitung als Schwergas, Aerosolanteil in der Wolke = 80%**  
 Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 1\%$  bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm; Aerosolanteil 80%.



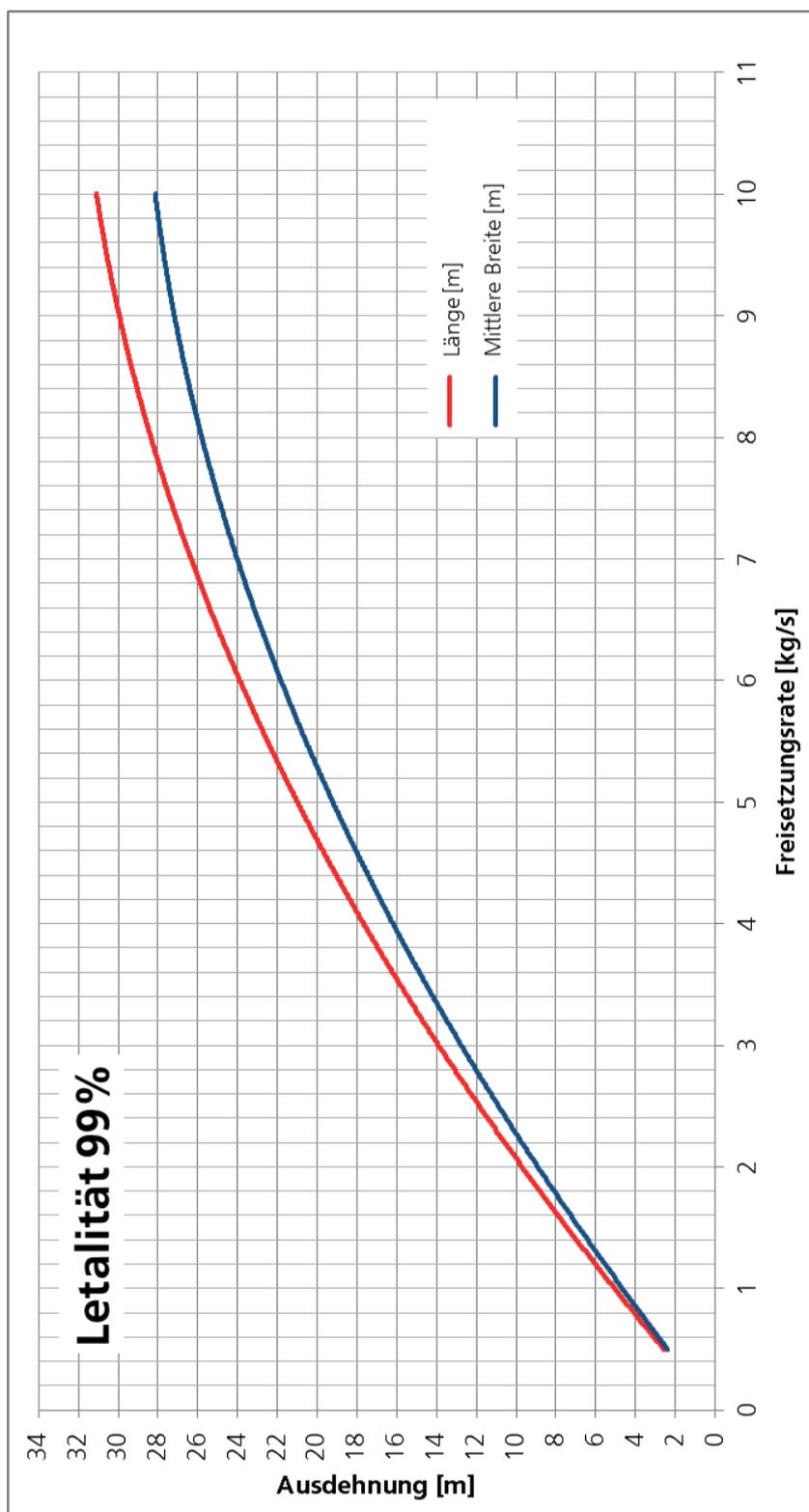
**Abbildung 44: Kontinuierliche Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 50%**

Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 50\%$  bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm; Aerosolanteil 80%.



**Abbildung 45: Kontinuierliche Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 99%**

Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 99\%$  bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm; Aerosolanteil 80%.



**Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell**

Freisetzung über die Lüftung, Ausbreitung als Neutralgas.

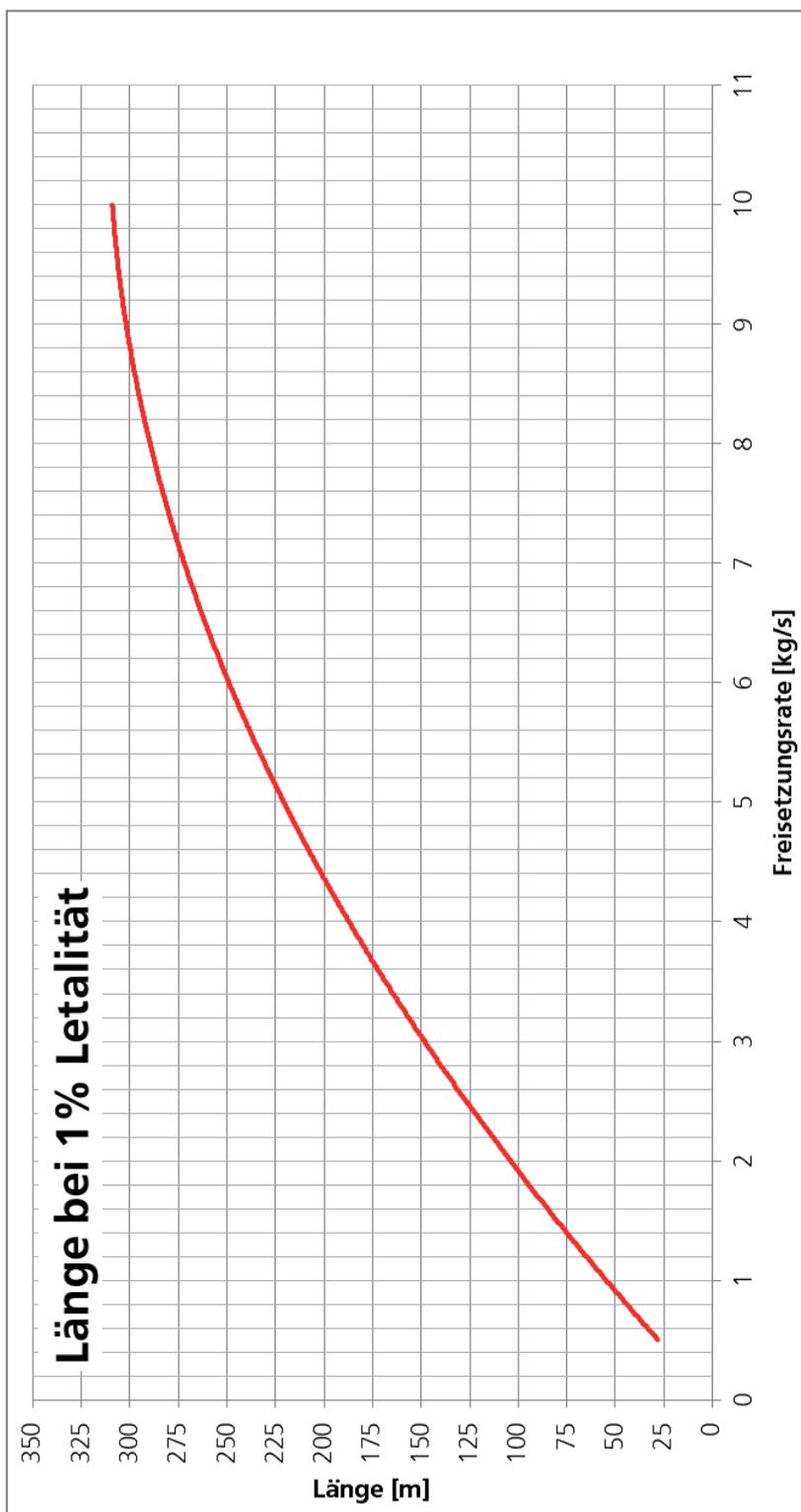
**Hinweis**

Der Gefährdungsbereich für Neutralgasausbreitungen hängt stark von der Freisetzungshöhe ab. Findet die Freisetzung in die Umgebung der betroffenen Anlage in sehr grosser Höhe statt, wird der Gefährdungsbereich mit den Angaben in Abbildung 46 bis Abbildung 51 stark überschätzt. Resultiert aus diesem Szenario das maximale Schadensausmass und eine schwere Schädigung auf Stufe Kurzbericht, sollten Ausbreitungsrechnungen mit der realen Freisetzungshöhe der Anlage durchgeführt werden.

**Abbildung 46: Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell:****Länge bei 1 % Letalität**

Länge des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 1\%$

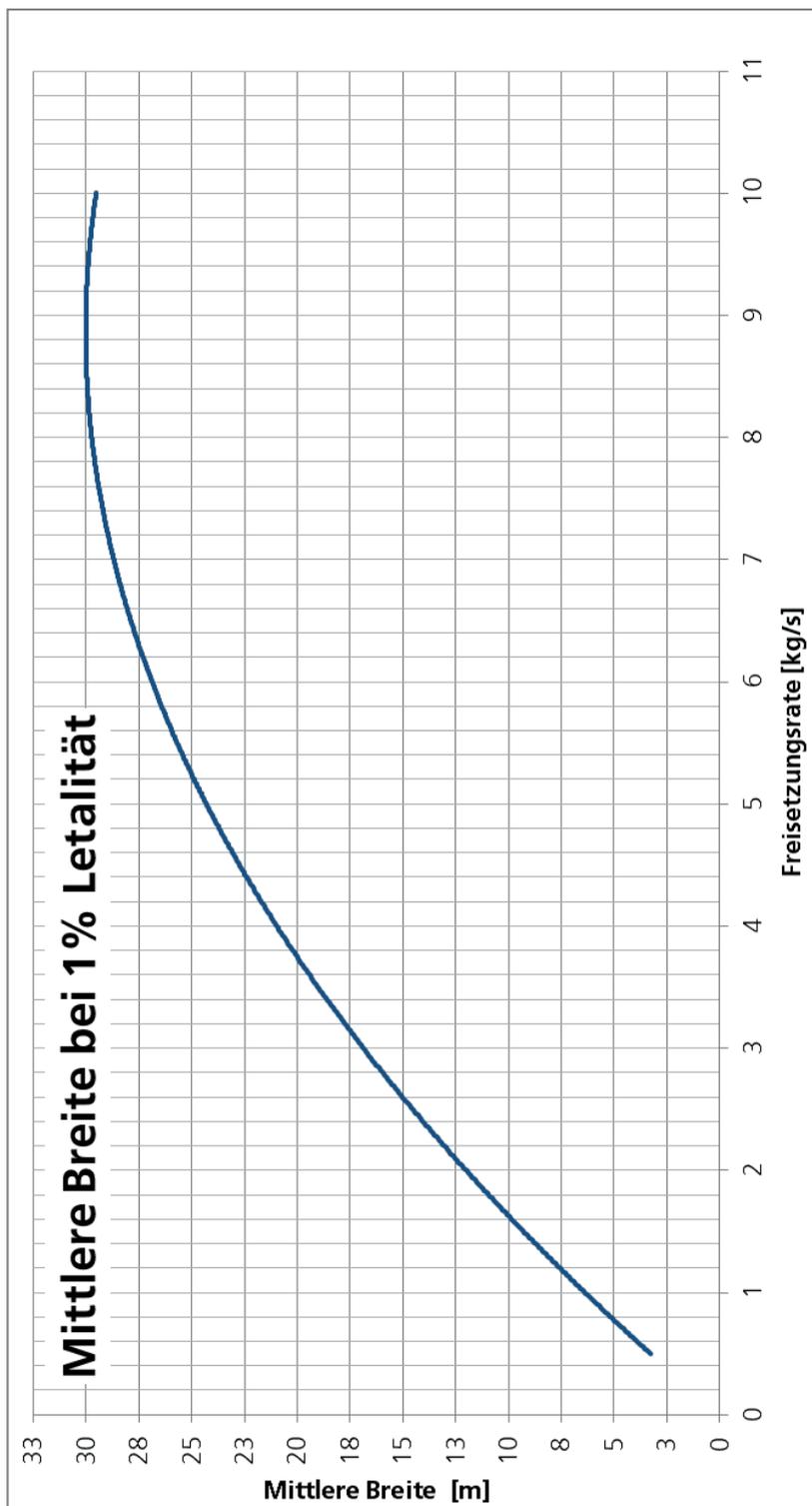
bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm und Ausbreitung als Neutralgas.



**Abbildung 47: Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell:****Mittlere Breite bei 1 % Letalität**

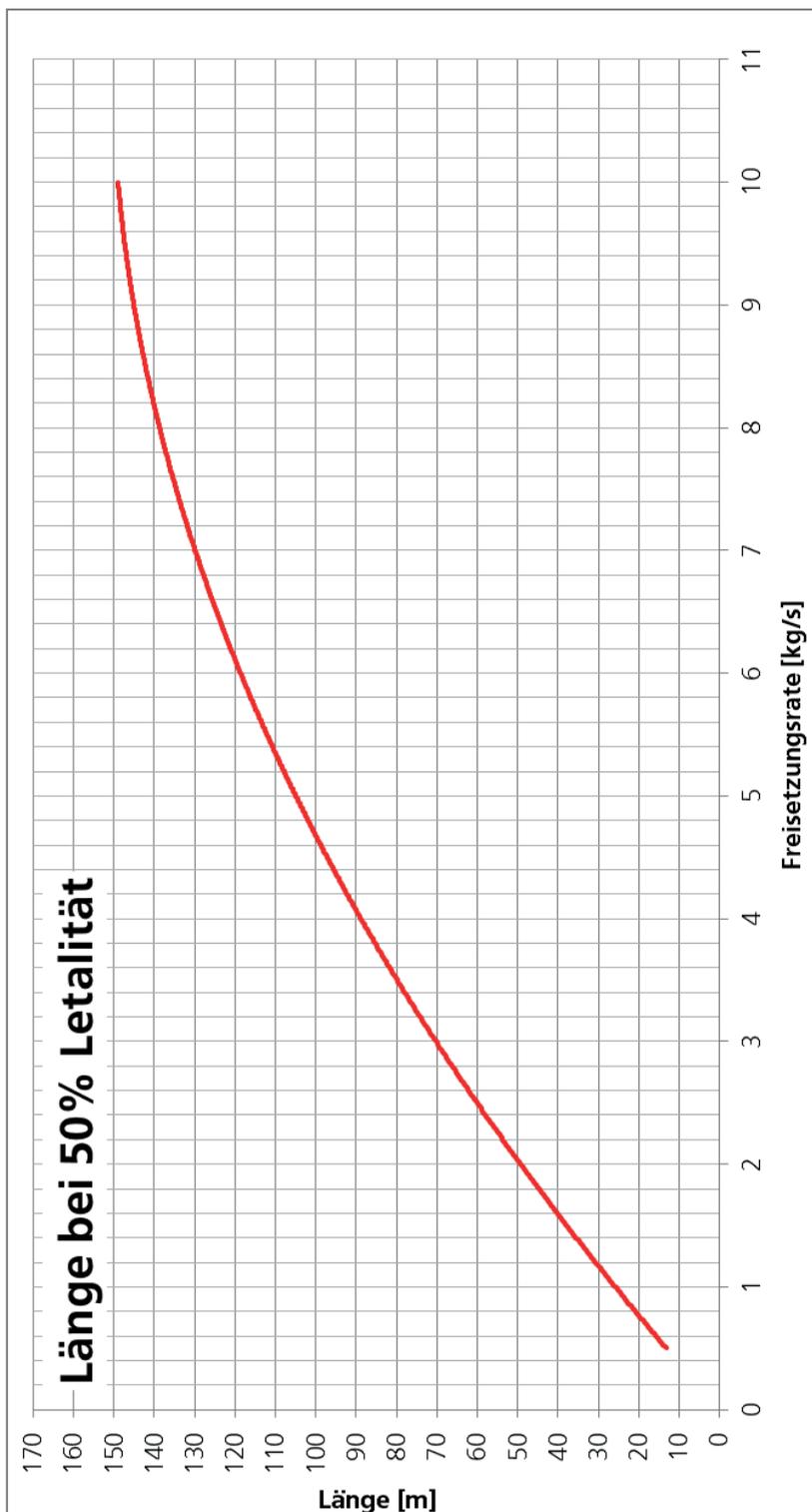
Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 1\%$

bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm und Ausbreitung als Neutralgas.



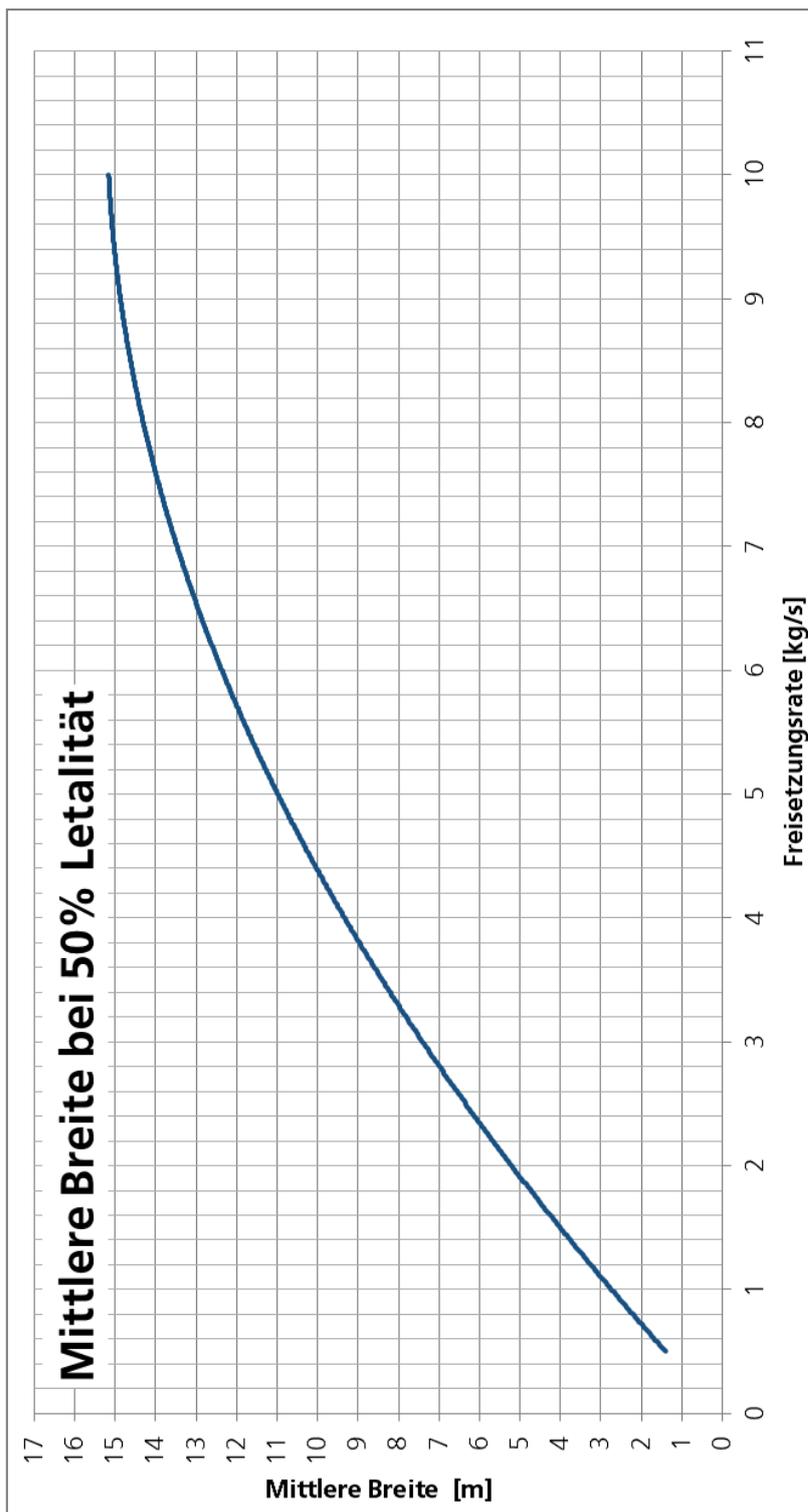
**Abbildung 48: Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell:  
Länge bei 50 % Letalität**

Länge des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 50\%$  bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm und Ausbreitung als Neutralgas.



**Abbildung 49: Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell:  
Mittlere Breite bei 50 % Letalität**

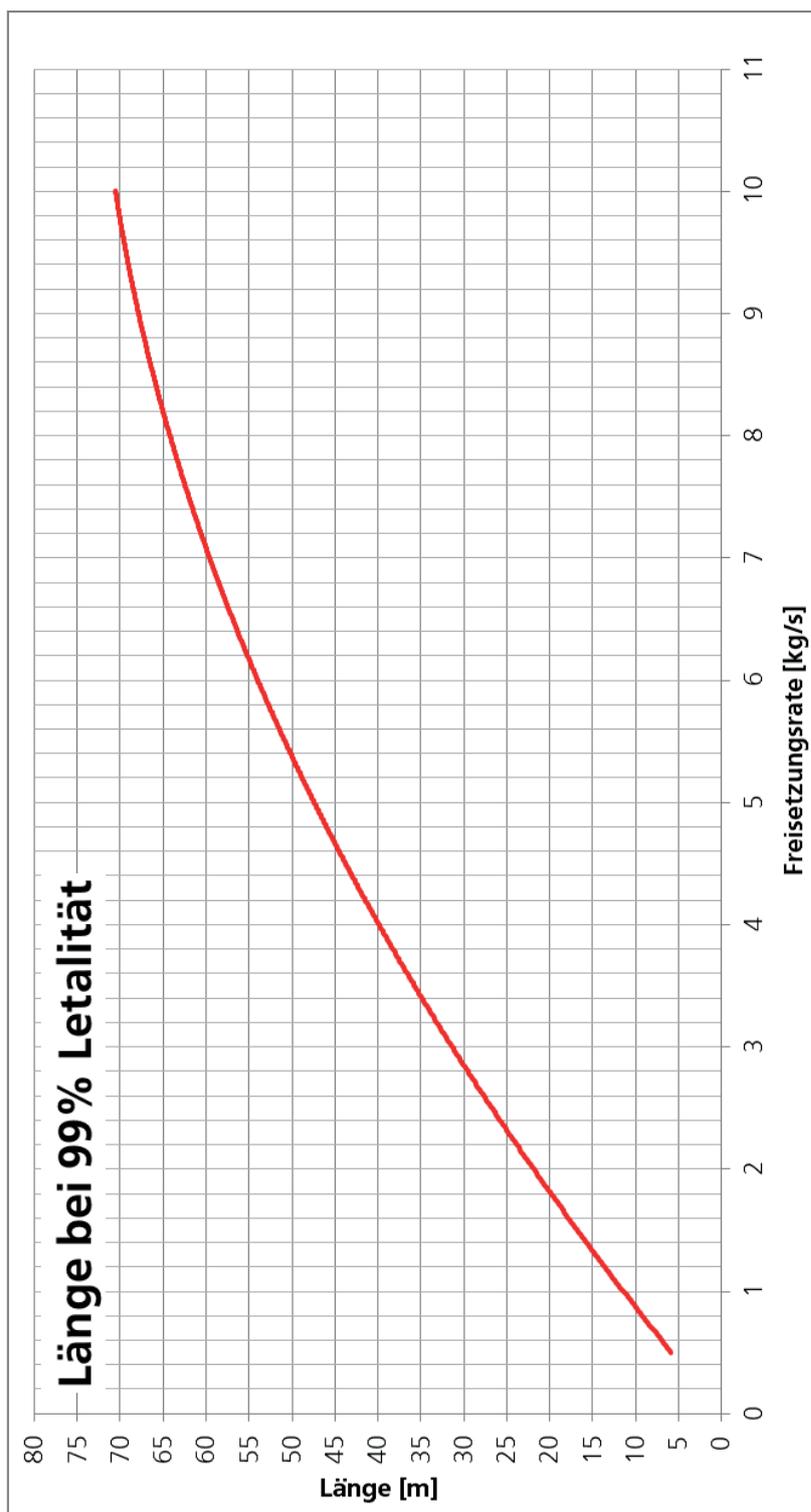
Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 50\%$   
bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm und Ausbreitung als Neutralgas.



**Abbildung 50: Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell:****Länge bei 99 % Letalität**

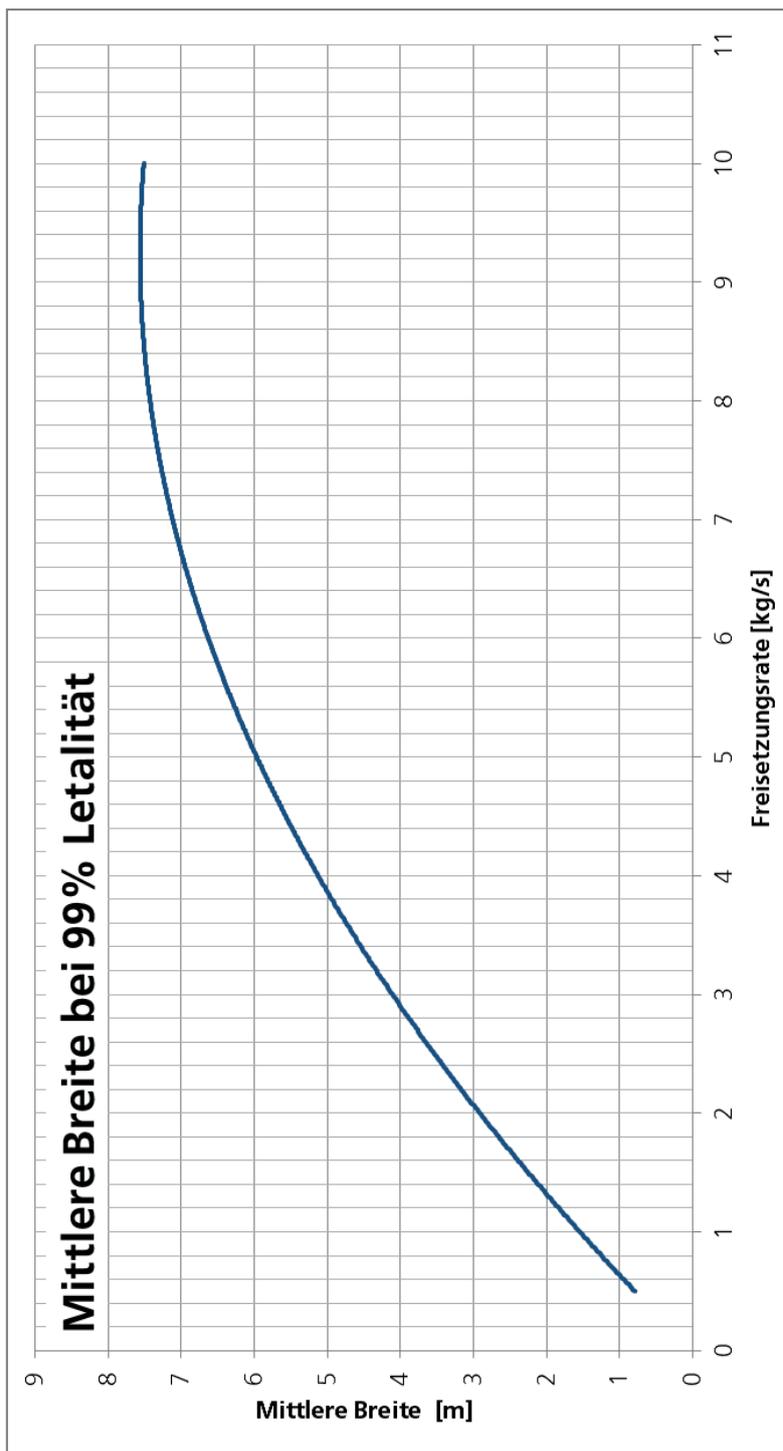
Länge des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 99\%$

bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm und Ausbreitung als Neutralgas.



**Abbildung 51: Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell:  
Mittlere Breite bei 99 % Letalität**

Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von  $\geq 99\%$  bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm und Ausbreitung als Neutralgas.



**Berechnung der mittleren Letalitätsraten**

Der Zusammenhang zwischen Ammoniak-Konzentration und Letalität exponierter Personen wird anhand von Probitberechnungen gemäss TNO ermittelt<sup>53</sup>. Falls möglich, sollte die Letalität über die akkumulierte Dosis bestimmt werden. Wenn die verwendete Software dies nicht zulässt, kann auch eine konstante Konzentration über eine definierte Zeit angenommen werden. In Tabelle 18 ist der Zusammenhang zwischen mittlerer Letalität und einer Exposition während 10 Min. bei konstanter Ammoniak-Konzentration aufgeführt.

**Tabelle 18: Zusammenhang zwischen Ammoniak-Konzentration und Letalität (Exposition während 10 Min. bei 20°C).**

ZUSAMMENHANG ZWISCHEN AMMONIAK-KONZENTRATION UND LETALITÄT	Ammoniak-Konzentration <sup>54</sup>
<i>Letalität</i>	
99 %	42 500 ppm (entspricht 30 500 mg/m <sup>3</sup> )
50 %	13 300 ppm (entspricht 9 400 mg/m <sup>3</sup> )
1 %	4 150 ppm (entspricht 2 940 mg/m <sup>3</sup> )

<sup>53</sup> Probitparameter a = 2.0, b = 1.0, n = -15.6 (Einheit min\*mg/m<sup>3</sup>; Quelle: TNO, Yellow Book, 2005)

<sup>54</sup> Falls die verwendete Software dies zulässt, sollten die Letalitätsbereiche über die akkumulierte Dosis bestimmt werden, nicht über die Konzentration. Die angegebenen Konzentrationen basieren auf Probit-Berechnungen mit folgenden Annahmen: Probitparameter a = 2.0, b = 1.0, n = -15.6 (Einheit min\*mg/m<sup>3</sup>; Quelle: TNO, Yellow Book, 2005); Expositionsdauer = 10 min; Temperatur = 293 K.

## Kontakt

Ernst Basler + Partner AG  
Zollikerstrasse 65  
8702 Zollikon  
Telefon +41 44 395 11 11  
[info@ebp.ch](mailto:info@ebp.ch)  
[www.ebp.ch](http://www.ebp.ch)