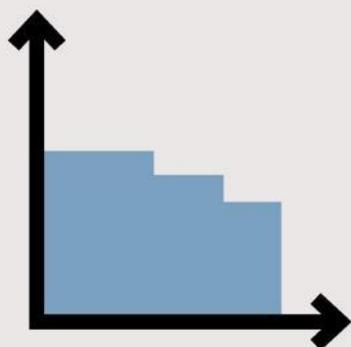
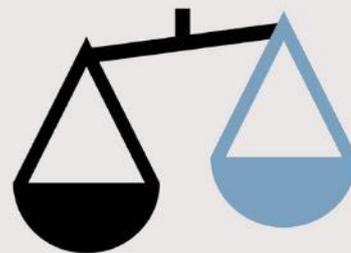
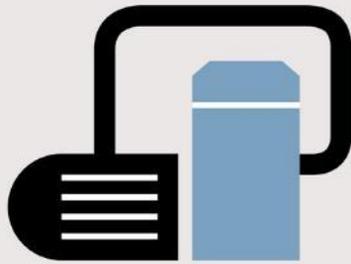


Störfallvorsorge bei Kälteanlagen

Welche Abklärungen sind wann zwingend? Was ist der Stand der Sicherheitstechnik? Wie werden Schadenausmass und Risiken korrekt ermittelt?

3. Juli 2023



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, FR, LU, ZH

Auftragnehmer

EBP Schweiz AG
Mühlebachstrasse 11
8032 Zürich
Schweiz
Telefon +41 44 395 16 16
info@ebp.ch
www.ebp.ch

Projektteam und Autoren

EBP Schweiz AG

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

Version: Juli 2023

Expertengruppe 2023

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Dr. M. Merkofer

M. Hösli

SSP Kälteplaner AG, Vertretung Schweizerischer Verein für Kältetechnik (SVK)

M. Bernhofen

B. Schmutz

Schweizerische Gesellschaft für Kunsteisbahnen (GSK)

M. Bertozzi

Amt für Umwelt und Energie des Kantons Luzern, Risikoversorgung und Tankanlagen

D. Burkart

Kantonales Laboratorium Basel-Stadt, Chemie- und Biosicherheit

T. Christen

Amt für Natur und Umwelt des Kantons Graubünden

A. Degonda

Amt für Verbraucherschutz des Kantons Aargau, Chemiesicherheit

A. Feurer

Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich (AWEL)

Dr. D. Huber

suva

Dr. M. Juch

Kantonales Laboratorium Bern, Umweltsicherheit

Dr. Ph. Kindler

Association Suisse du Froid (ASF) / Schweizerischer Verband für Kältetechnik

P. Chatelan

P.-A. Giroud

Roche AG

C. Stirnimann

Vorwort

Die Störfallverordnung (StFV) soll die Bevölkerung und die Umwelt vor schweren Schädigungen infolge von Störfällen schützen. 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.

Ab dem 1. Dezember 2013 wurden in der Chemikalienrisikoreduktionsverordnung (ChemRRV) die Herstellung und das Inverkehrbringen von Anlagen mit gewissen synthetischen Kältemitteln ab einer gewissen Kälteleistung verboten. Als Konsequenz davon werden die für den Vollzug der StFV relevanten natürlichen Kältemittel Ammoniak und Kohlenwasserstoffe (KW) vermehrt verwendet werden.

Da Betriebe mit 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 StFV 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)**

Inhaltsverzeichnis

Änderungsverzeichnis	7
Einleitung	8
Zielsetzung und Aufgabenstellung	8
Verschiedene Kältemittel	9
Fokus	11
Vollzug der StFV bei Ammoniak-Kälteanlagen und -Wärmepumpen: genereller Ablauf	12
1. Anlagenbeschreibung	16
1.1 Bauformen	16
1.2 Typische Anwendungsgebiete von Kälteanlagen	23
2. Unterstellung unterhalb der Mengenschwelle	25
2.1 Einleitung	25
2.2 Kälteanlagen unterhalb der Mengenschwelle: störfallrelevant oder nicht?	26
3. Regeln der Technik / Stand der Sicherheitstechnik	39
3.1 Einleitung	39
3.2 Anlagen mit Ammoniak als Kältemittel	40
3.3 Zusätzliche Sicherheitsmassnahmen	47
4. Kurzbericht: Schadensausmass einschätzen	50
4.1 Zweck und Umfang	50
4.2 Zu untersuchende Ereignisse	51
4.3 Das Vorgehen im Überblick	52
4.4 Freisetzung von Ammoniak	54
4.5 Ausbreitung der toxischen Wolke	64
4.6 Einschätzung des Schadensausmasses	66
5. Systemvergleich von Kälteanlagen	69
5.1 Wann ist ein Systemvergleich sinnvoll?	69
5.2 Umfang: Kurzüberblick ermöglichen	70
5.3 Schematisches Beispiel	72
5.4 Interpretation: Anpassungen zielführend, wirtschaftlich tragbar und verhältnismässig?	72

6. Risikoermittlung	73
6.1 Zweck und Umfang	73
6.2 Methodik	73
6.3 Zu untersuchende Ereignisse	73
6.4 Grundlagen zur Häufigkeitsermittlung	74
6.5 Freisetzungsmenge bzw. -rate	77
6.6 Ausbreitung der toxischen Wolke	78
6.7 Ausmasseinschätzung	78
Glossar	81
Literaturverzeichnis	86
Weitere relevante Quellen	89

Anhänge

A1 Auswertungen von Störungen und Störfällen	90
A2 Auswertung bestehender Risikoermittlungen und Kurzberichte	91
A3 Herleitung der Unterstellungskriterien	93
A3.1 Ammoniak-Ausbreitung	93
A3.2 Ausbreitungs- und Wirkungsmodellierung	97
A3.3 Ermittlung des Schwellenwertes für das Personenaufkommen im Gefährdungsbereich	103
A3.4 Anwendungsbeispiel der Unterstellungskriterien	106
A4 Gebäudeschutz	109
A5 Ausbreitung toxische Wolke: Annahmen auf Stufe Kurzbericht	113
A5.1 Ammoniak-Ausbreitung	113
A5.2 Festlegung der vereinfachten Gefährdungsbereiche	120
A5.3 Ausbreitungs- und Wirkungsmodellierung	121
A6 Personenaufkommen bei Spezialsituationen	136

Änderungsverzeichnis

In der vorliegenden, aktualisierten Version des Berichts (Stand Juli 2023) wurden die folgenden inhaltlichen Änderungen vorgenommen. Redaktionelle Änderungen werden nicht explizit aufgeführt.

- Zusätzlich zu Kälteanlagen werden im gesamten Bericht gewerbliche und industrielle Wärmepumpen berücksichtigt.
- In Kapitel 2 wurde für Personen, die nicht der Arbeits- oder Wohnbevölkerung zugeordnet werden können und nur sporadisch anwesend sind (Spezialsituationen), ein pragmatisches Vorgehen ergänzt (inkl. der Herleitung in dem neu angefügten Anhang 6). Das Vorgehen ermöglicht es zu beurteilen, wann diese Spezialsituationen bei der Ausmasseinschätzung zu berücksichtigen sind.
- Kapitel 3 wurde umfassend überarbeitet und erweitert, bspw. hinsichtlich des Sicherheitskonzepts inkl. Detektion, Alarmierung, Lüftung und Not-Halt-Vorrichtung.
- Das Glossar wurde erweitert und Beschreibungen von Begriffen ergänzt.
- Die verwendeten Quellen und Referenzen wurden aktualisiert.

Einleitung

Zielsetzung und Aufgabenstellung

In der Schweiz existieren zahlreiche Kälteanlagen in unterschiedlichen Dimensionen und Bauarten. Ein Teil dieser Kälteanlagen überschreitet die Mengenschwelle für Ammoniak und untersteht deshalb der Störfallverordnung (StFV), [Lit. 1]. Der vorliegende Bericht dient als Grundlage für einen zielgerichteten Vollzug der StFV bei diesen Anlagen. Er basiert dabei auf den bestehenden Normen, Richtlinien und Vorgaben bzgl. des Baus von Kälteanlagen, des Arbeits- und Explosionsschutzes, des Brandschutzes und weiterer relevanter Sicherheitsthemen.

Im Bericht wird aufgezeigt, welche Annahmen für die Abklärungen im Rahmen des Vollzuges der StFV bei Kälteanlagen sinnvoll sind. Weiter wird thematisiert, wann es zweckmässig ist, Betriebe mit Kälteanlagen unterhalb der Mengenschwelle der StFV zu unterstellen. Insgesamt soll der Bericht zu einer Harmonisierung des Vollzuges der StFV bei Kälteanlagen beitragen und das Bewusstsein in der Branche für die Problematik schärfen. Dazu hat eine breit abgestützte Arbeitsgruppe Grundlagen zu den folgenden Themen erarbeitet:



Kapitel 1 – Anlagenbeschreibung

Kälteanlagen sind unterschiedlich gebaut und ihr Anwendungsspektrum ist breit. Dieses Kapitel klärt die wichtigsten Grundlagen hinsichtlich der allgemeinen Typen von Kälteanlagen und deren Einsatzgebiete. Auch wird auf den Stellenwert der jeweiligen Anlagen im Rahmen der Störfallvorsorge eingegangen.



Kapitel 2 – Unterstellung unterhalb der Mengenschwelle

Soll ein Betrieb mit einer 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 – Regeln der Technik / Stand der Sicherheitstechnik

Die anerkannten Regeln der Technik und der Stand der Sicherheitstechnik entwickeln sich stetig weiter. Dieses Kapitel fasst die für die Störfallvorsorge wichtigsten Aspekte 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.



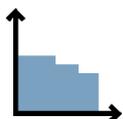
Kapitel 4 – Kurzbericht: Schadensausmass einschätzen

Auf Stufe Kurzbericht muss das maximal zu erwartende Schadensausmass ermittelt werden. Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehen dazu. Grafiken und Tabellen helfen, das Schadensausmass mit einfachen Mitteln abzuschätzen. Inhaber und Fachplaner sollten damit in der Lage sein, die Einschätzung in den meisten Fällen ohne externe Unterstützung durchzuführen. Mit der Dokumentation technischer Grundannahmen können auch Spezialfälle in angemessener Tiefe angegangen werden.



Kapitel 5 – Systemvergleich von Kälteanlagen

Weist eine Anlage ein hohes Risiko auf, sind 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 dienen dazu, die Sicherheit mit verhältnismässigen Anpassungen an der Anlage zu erhöhen.



Kapitel 6 – Risikoermittlung

Wie ist beim Erarbeiten einer Risikoermittlung gemäss StFV grundsätzlich vorzugehen? Dieses Kapitel erläutert, welche Ereignisse berücksichtigt werden müssen, wo methodische und Datengrundlagen zur Ausmass- und Wahrscheinlichkeitsabschätzung zu finden sind und welche Aspekte gegenüber dem Kurzbericht genauer untersucht werden müssen.

Verschiedene Kältemittel

Für den Betrieb von Kälteanlagen werden verschiedene Kältemittel mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen eingesetzt. Die häufigsten fünf Kältemittel werden im Folgenden kurz beschrieben:

Ammoniak (R-717, NH₃)

Ammoniak ist das in der Schweiz am meisten eingesetzte Kältemittel und kommt insbesondere bei grösseren Anlagen zum Einsatz. Schätzungsweise 90 bis 95 % der Industrieanlagen mit Leistungen ab 400 kW werden damit betrieben. Wegen seiner Toxizität birgt Ammoniak ein Gefahrenpotential für Mensch und Umwelt.

Gemäss einer Auswertung des eidgenössischen Risikokatasters (ERKAS) von 2021 gibt es in der Schweiz ca. 150 Kälteanlagen, welche die Mengenschwelle gemäss StFV für Ammoniak (2'000 kg) überschreiten und ca. 10 Betriebe, die nach Art. 1 Abs. 3 der StFV unterstellt worden sind.

Mit der revidierten Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) wurden ab dem 1. Dezember 2013 teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) als Kältemittel weitestgehend verboten [Lit. 2]. Ammoniak hat seitdem weiter an Bedeutung gewonnen.

Kohlenstoffdioxid (R-744, CO₂)

CO₂ findet sowohl als Kältemittel wie auch als Kälteüberträger Anwendung.

Die Kälteleistung der Anlagen, die damit betrieben werden, bewegt sich hauptsächlich zwischen 5 bis 100 kW. CO₂ wird insbesondere zur Tiefkühlung eingesetzt. Da CO₂ keine Mengenschwelle aufweist, sind solche Anlagen für den Vollzug der StfV nicht relevant.

Aus Sicht des Arbeitsschutzes ist CO₂ nicht in jedem Fall ein geeigneter Ersatz für Ammoniak. Insbesondere Personen in Gebäuden können einer Gefährdung ausgesetzt sein, weil CO₂ in der Luft erstickend wirkt. Bereits bei Konzentrationen ab 6 Volumenprozent muss innerhalb kurzer Zeit mit Bewusstlosigkeit und irreversiblen Schäden bis hin zum Tod gerechnet werden. Da das Gas eine höhere Dichte als Luft aufweist und geruchlos ist, kann es sich unbemerkt an Tiefpunkten ansammeln. Eine gefährliche Situation wird von Menschen in der Regel nicht, bzw. zu spät wahrgenommen. Alle Versuche CO₂ wirkungsvoll und kosteneffizient zu odorieren sind bisher fehlgeschlagen. Der Gehalt von CO₂ in der Raumluft kann mit Gassensoren überwacht werden.

Propan (R-290, C₃H₈)

Seit einigen Jahren wird Propan in der Schweiz in Kälteanlagen häufiger eingesetzt. Der Hauptgrund hierfür sind die in der ChemRRV geforderten tieferen Werte in Bezug auf das *Global Warming Potential* (GWP-Werte)¹, sodass natürliche Kältemittel im Vordergrund stehen. Die Anlagen sind üblicherweise Kompaktanlagen mit sekundären Kreisläufen und weisen Mengen von rund 30 kg Propan auf. Somit sind solche Anlagen für den Vollzug der StfV (Mengenschwelle Propan gemäss StfV: 20'000 kg) nicht relevant.

Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW)

Anlagen mit teilhalogenierten Fluorkohlenwasserstoffen (HFKW) sind wie Anlagen mit Propan, nicht im grösseren Leistungsbereich vertreten, da sie nach der Inkraftsetzung der revidierten ChemRRV seit 2013 nur noch in Ausnahmefällen und im Bereich tiefer Leistung bewilligungsfähig sind.

Teilhalogenierte Fluor-Olefine (HFO)

Hydrofluorolefine (HFO) werden heute in Kaltwasserkompaktanlagen und Wärmepumpen eingesetzt. Diese Kältemittel weisen tiefe GWP-Werte auf und erfüllen somit eine Anforderung aus der ChemRRV. Wichtig ist zu erwähnen, dass aus diesen Kältemitteln Trifluoressigsäure (TFA) gebildet werden kann, womit diese für entsprechende Umweltbelastungen mitverantwortlich sind. Natürliche Kältemittel werden, wenn möglich, bevorzugt eingesetzt.

¹ Das Potenzial zur Erderwärmung, das von Treibhausgasen ausgeht, wird durch das sogenannte Global Warming Potential (GWP) definiert. Die Richtgrösse bildet die Klimawirksamkeit von CO₂, dem ein GWP-Wert von 1 zugeordnet ist.

Fokus

In der Schweiz hat Ammoniak unter den Kältemitteln aufgrund seines Gefahrenpotenzials und der häufigen Anwendungen zurzeit die grösste Relevanz für die Störfallvorsorge. Deshalb wird in diesem Bericht der Fokus auf Ammoniak gerichtet, wobei Schädigungen der Bevölkerung vertieft thematisiert werden, da diese in aller Regel das Störfallrisiko dominieren. Schädigungen der Umwelt werden punktuell thematisiert.

Hinsichtlich des Schutzobjekts «Bevölkerung» werden in der Störfallvorsorge grundsätzlich nur sogenannte «Drittpersonen» berücksichtigt. Dies sind Personen, die nicht als Mitarbeitende des jeweiligen Betriebs gelten. Betriebsmitarbeitende fallen in den Bereich des Arbeitnehmerschutzes. Drittpersonen können ausserhalb oder innerhalb des Betriebsareals von einem Störfall betroffen sein. Ausserhalb sind dies beispielsweise Anwohnende oder Mitarbeitende von benachbarten Betrieben. Auf dem Betriebsareal können dies Personen sein, die Veranstaltungen besuchen (Sportstadien, Kunsteisbahnen, Museen) oder selbst als Aktive vor Ort sind (Sportstätten und Freizeiteinrichtungen).

Der Bericht bezieht sich sowohl auf Kälteanlagen als auch auf Wärmepumpen. Im Vergleich zu Kälteanlagen werden Wärmepumpen in der Regel bei höheren Drücken zwischen 40 bis rund 70 bar betrieben und finden häufig Verwendung in einem personenintensiven Umfeld, wie z.B. in der Nähe von Wohnanlagen oder empfindlichen Einrichtungen wie Spitälern oder Altersheimen. Wärmepumpen weisen üblicherweise eine wesentlich geringere Leistung als Kälteanlagen auf und enthalten somit weniger Kältemittel, meist weit unterhalb der Mengenschwelle. Es ist nur in Einzelfällen, bei gewerblich oder industriell genutzten Wärmepumpen in personenintensivem Umfeld angezeigt, solche Betriebe der StFV zu unterstellen.

Vollzug der StFV bei Ammoniak-Kälteanlagen und -Wärmepumpen: genereller Ablauf

Betriebe mit ≤ 2 t Ammoniak

Betriebe, auf deren Areal die ammoniakführenden Anlagen die Menge von 2 t Ammoniak gesamthaft nicht überschreiten, fallen grundsätzlich nicht in den Geltungsbereich der StFV. Wenn die Vollzugsbehörde aufzeigen kann, dass eine Anlage die Bevölkerung (oder die Umwelt) bei ausserordentlichen Ereignissen dennoch schwer schädigen könnte, kann sie den Betrieb nach Art. 1 Abs. 3 Bst. a StFV dem Geltungsbereich der Verordnung unterstellen. Abbildung 1 zeigt das Vorgehen, wie die Vollzugsbehörde beurteilen kann, ob dies angebracht ist. Im Folgenden wird das Vorgehen kurz beschrieben:

Für Anlagen gilt unabhängig von deren Füllmenge, dass die Regeln der Technik eingehalten werden müssen (beschrieben in Kapitel 3).

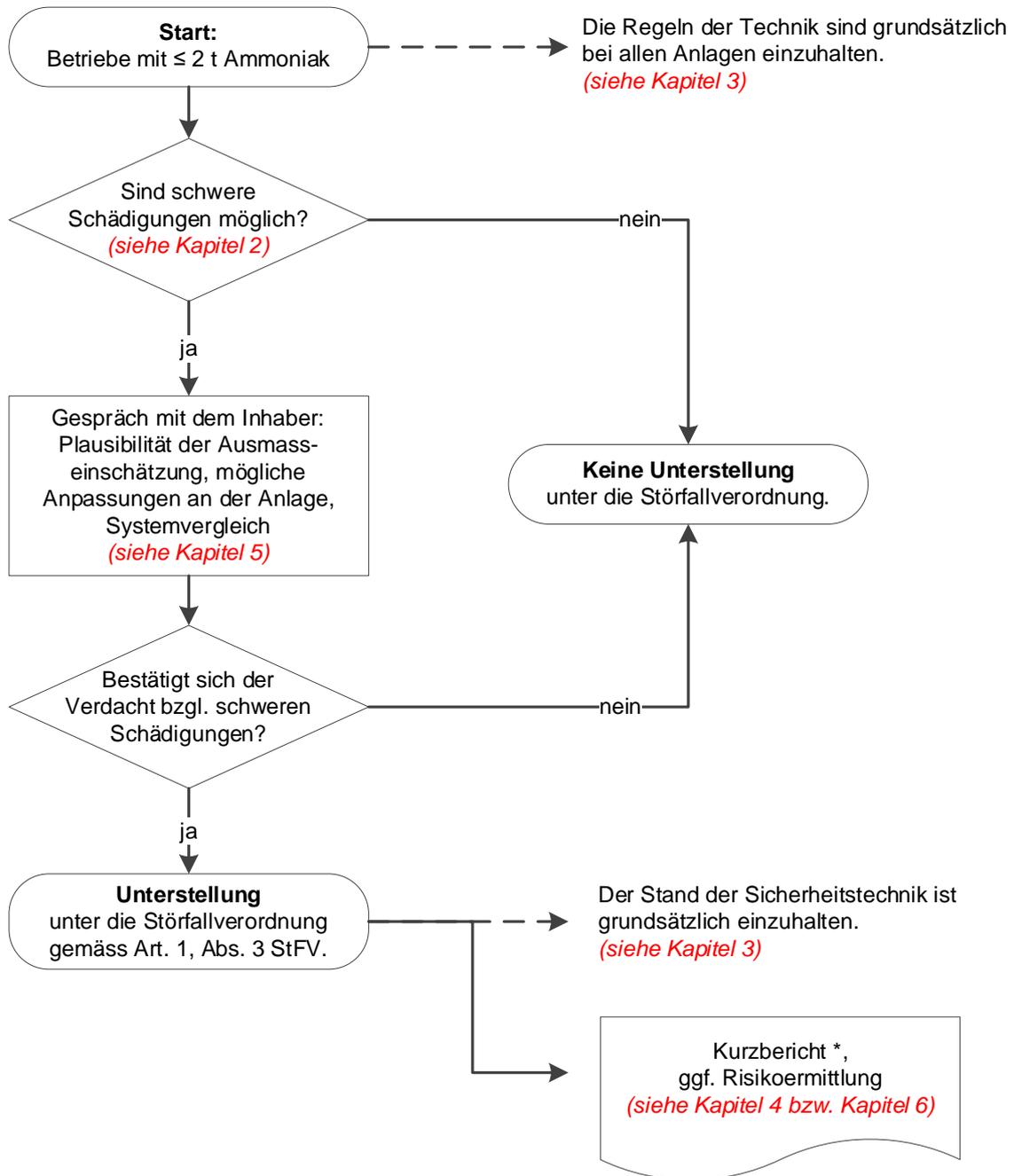
Um zu prüfen, ob schwere Schädigungen bei Anlagen mit bis zu 2 t Ammoniak möglich sind, kann das einfache Modell in Kapitel 2 angewendet werden. Zeigt das Ergebnis, dass nicht mit schweren Schädigungen zu rechnen ist, wird der Betrieb aufgrund der Kälteanlage nicht unterstellt. Ergeben die Abklärungen anhand des Modells, dass schwere Schädigungen grundsätzlich möglich sind, klärt die Vollzugsbehörde in Gesprächen mit dem Inhaber, ob die getroffenen Annahmen plausibel sind. Ausserdem wird geprüft, ob allenfalls einfache Massnahmen getroffen werden können, um schwere Schädigungen ausschliessen zu können.

Bestätigt sich, dass schwere Schädigungen plausibel sind, kann der Inhaber nach Absprache mit der Vollzugsbehörde gegebenenfalls auf das Erstellen eines Kurzberichts verzichten, wenn durch diesen keine neuen Erkenntnisse zu erwarten sind. Er kann dann direkt eine Risikoermittlung erstellen.

Für der StFV unterstellte Betriebe gilt, dass diese alle zur Verminderung des Risikos geeigneten Sicherheitsmassnahmen nach Art. 3 StFV umzusetzen haben (beschrieben in Kapitel 3).

Die Anlageninhaber und Anlagenplaner sind angehalten, mit den im Bericht beschriebenen Modellen Neubauprojekte proaktiv zu bewerten. Gegebenenfalls sollten Inhaber frühzeitig Kontakt mit der Vollzugsbehörde der StFV aufnehmen, um unnötigen Projektverzögerungen vorzubeugen und den planerischen und baulichen Mehraufwand zu minimieren.

Abbildung 1: Vorgehen in der Störfallvorsorge für Betriebe (Kälteanlagen und Wärmepumpen) bis 2 t Ammoniak.



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

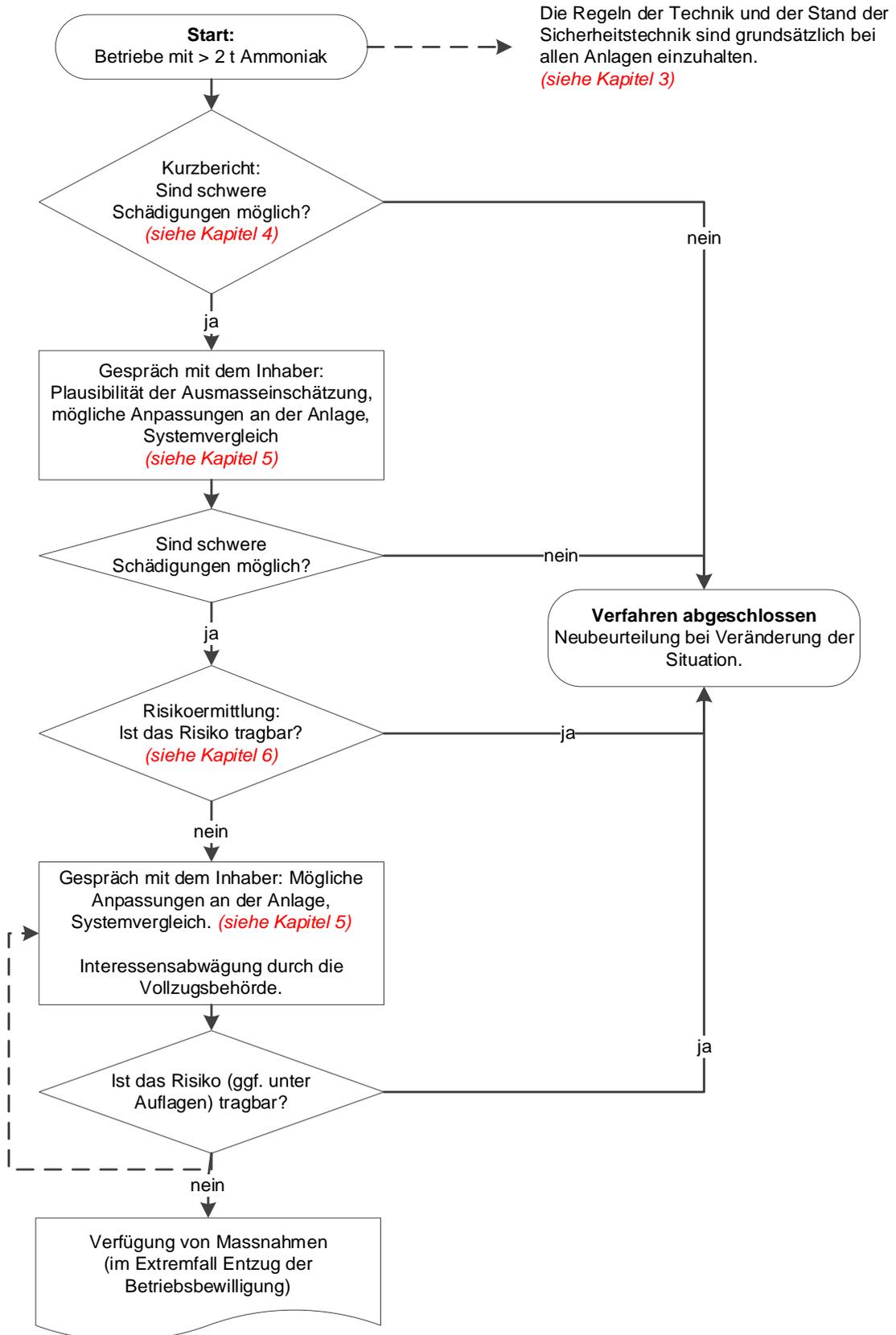
Betriebe mit mehr als 2 t Ammoniak

Betriebe, auf deren Areal gesamthaft mehr als 2 t Ammoniak vorhanden ist, fallen in den Geltungsbereich der StFV, da die Mengenschwelle überschritten wird. Das damit einhergehende Kontroll- und Beurteilungsverfahren nach StFV sieht verschiedene Aufgaben für Inhaber und Vollzugsbehörden vor, das allgemeine Vorgehen ist in Abbildung 2 dargestellt.

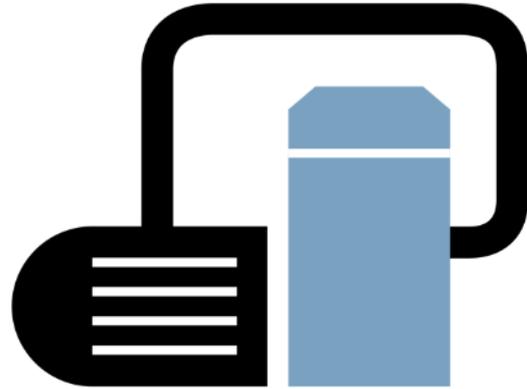
Grundsätzlich gilt, dass diese Anlagen die Regeln der Technik und die geeigneten Sicherheitsmassnahmen nach Art. 3 StFV einhalten müssen.

In einem ersten Schritt reicht der Inhaber einen Kurzbericht ein, in dem geklärt wird, ob schwere Schädigungen möglich sind oder nicht (beschrieben in Kapitel 4). Sind keine schweren Schädigungen zu erwarten, wird das Kontroll- und Beurteilungsverfahren abgeschlossen. Der Inhaber muss den Kurzbericht ergänzen und der Vollzugsbehörde erneut einreichen, wenn sich die Verhältnisse wesentlich ändern oder relevante neue Erkenntnisse vorliegen (Art. 8a StFV). Im Falle schwerer Schädigungen wird in einem zweiten Schritt eine Risikoermittlung verfügt und ggf. die Prüfung zusätzlicher Sicherheitsmassnahmen gem. Art. 8 StFV veranlasst.

Abbildung 2: Vorgehen in der Störfallvorsorge für Betriebe mit mehr als 2 t Ammoniak.



1. Anlagenbeschreibung



Kälteanlagen und Wärmepumpen unterscheiden sich nicht nur in ihrer Bauform (Kältemittel-, Kälte­träger- und Wärmeträgerkreisläufe) voneinander, sondern auch in ihrer Anwendung. Dieses Kapitel zeigt die grundlegenden Kreislauftypen und ihre Anwendungsbereiche.

1.1 Bauformen

Die wichtigsten Kreislauftypen sind in der Wegleitung des BAFU zur «Bewilligung von Anlagen mit in der Luft stabilen Kältemitteln» und in der Vollzugshilfe «Anlagen mit Kältemitteln: vom Konzept bis zum Inverkehrbringen» zusammengefasst (siehe [Lit. 3], [Lit. 4]). Im Folgenden sind die Kreislauftypen für Ammoniak-Kälteanlagen und Wärmepumpen wiedergegeben.

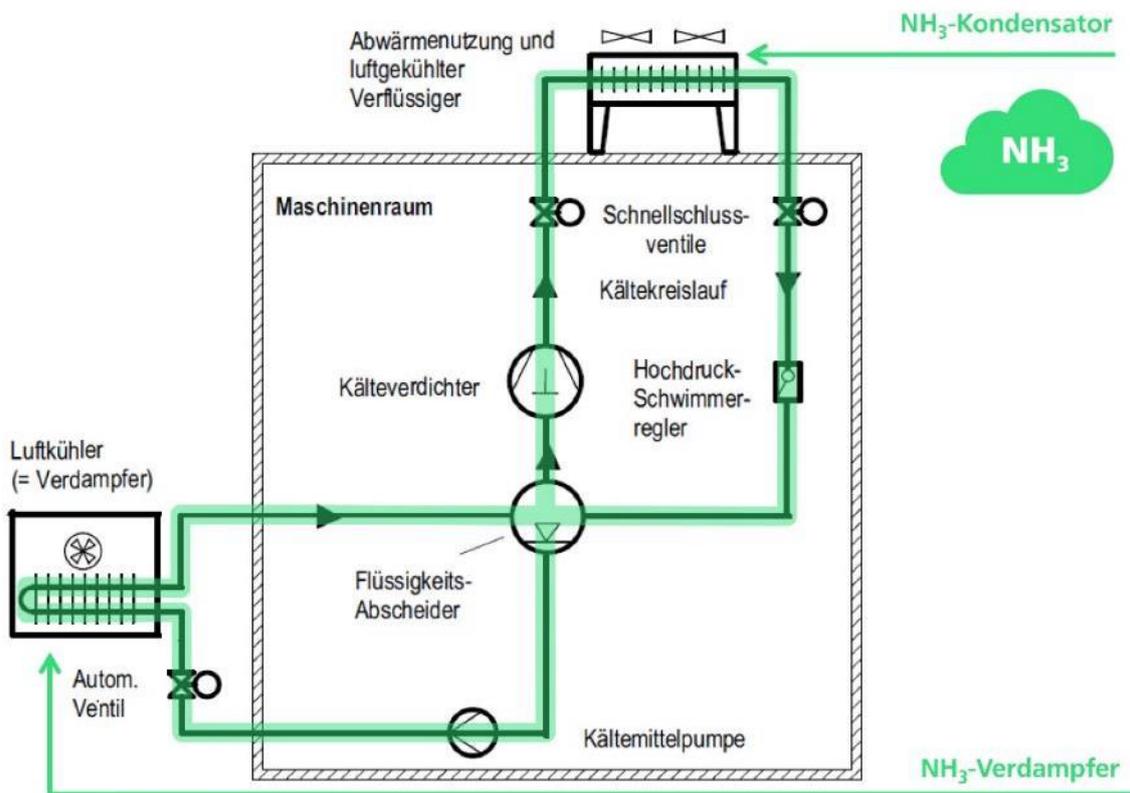
[Zurück zum Inhalt](#)

Legende

- Kältemittelkreislauf (Ammoniak)
mit Kälteerzeugung
- Kältemittelkreislauf (CO₂)
mit Kälteerzeugung
- Kälte­träger­kreislauf
(z.B. Ethylenglykol / Wasser / CO₂)
- Wärmeträgerkreislauf
(z.B. Ethylenglykol / Wasser)

Abbildung 3: Der gesamte Kreislauf ist mit Ammoniak gefüllt. (Typ 1)
Hier: der Kondensator wird als Verflüssiger bezeichnet.

Typ 1 (FL-D gemäss [Lit. 3], Anhang A4)
Direktverflüssigung
Direktverdampfung

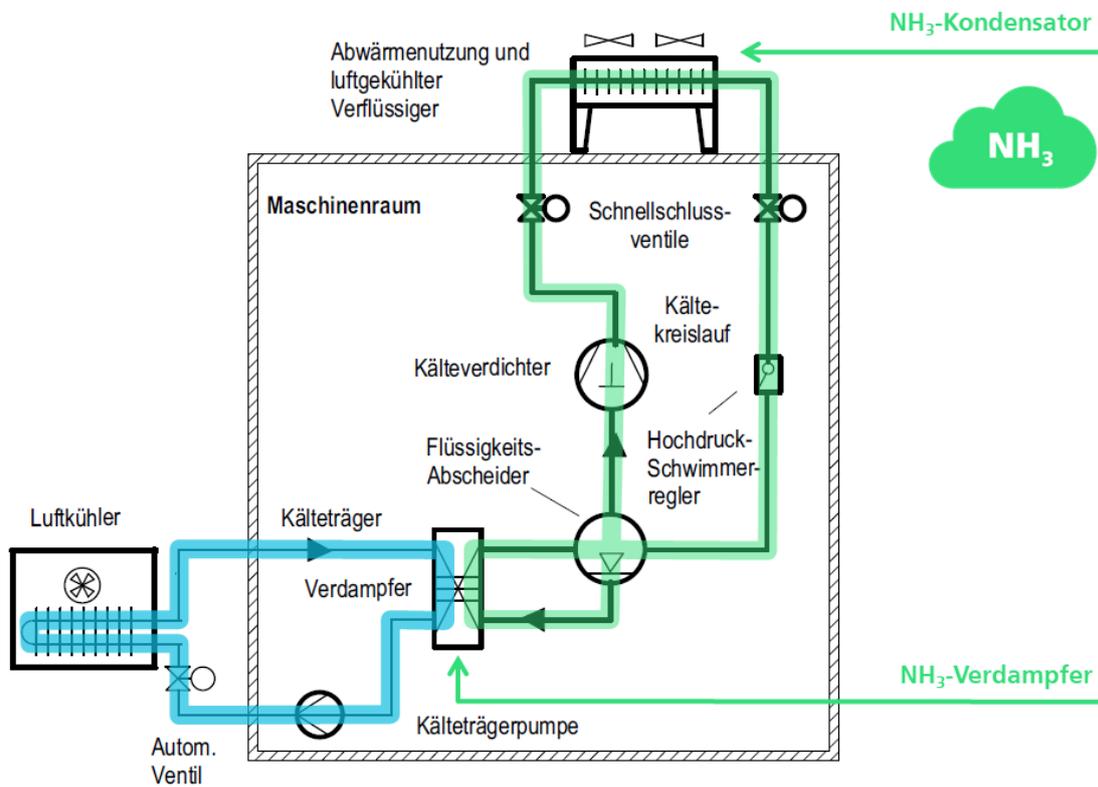


[Zurück zum Inhalt](#)



**Abbildung 4: Die Kälteabgabe erfolgt über einen sekundären Kälte-träger-Kreislauf. Die Rückkühlung des Ammoniak-Kreislaufs erfolgt direkt mit Luft bzw. Wasser. (Typ 2)
Hier: der Kondensator wird als Verflüssiger bezeichnet.**

*Typ 2 (FL-K gemäss [Lit. 3], Anhang A4)
Direktverflüssigung
Kälte-träger*



[Zurück zum Inhalt](#)

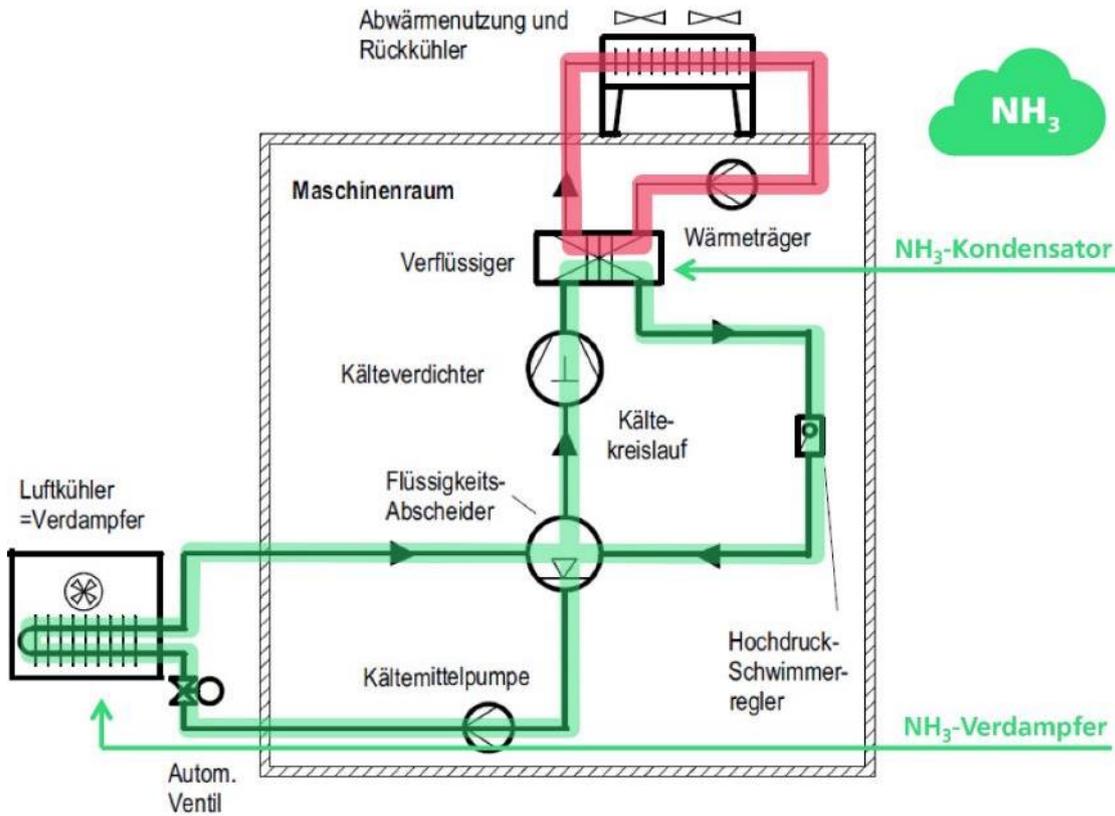


**Abbildung 5: Die Kälteabgabe erfolgt direkt über den Ammoniak-Kreislauf. Dessen Rückkühlung erfolgt über einen sekundären Wärmeträger-Kreislauf. (Typ 3)
Hier: der Kondensator wird als Verflüssiger bezeichnet.**

Typ 3 (FL-W gemäss [Lit. 3], Anhang A4)

Wärmeträger

Direktverdampfung

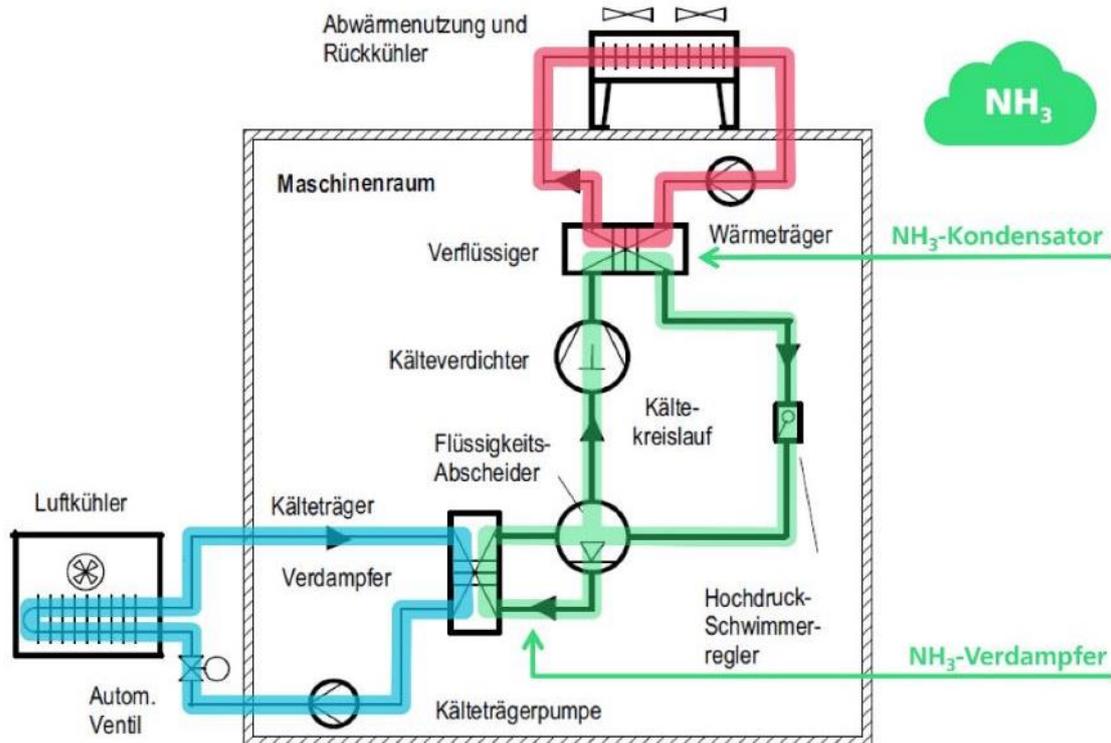


[Zurück zum Inhalt](#)



**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)
Hier: der Kondensator wird als Verflüssiger bezeichnet.**

*Typ 4 (FL-KW gemäss [Lit. 3], Anhang A4)
Wärmeträger
Kälteträger*

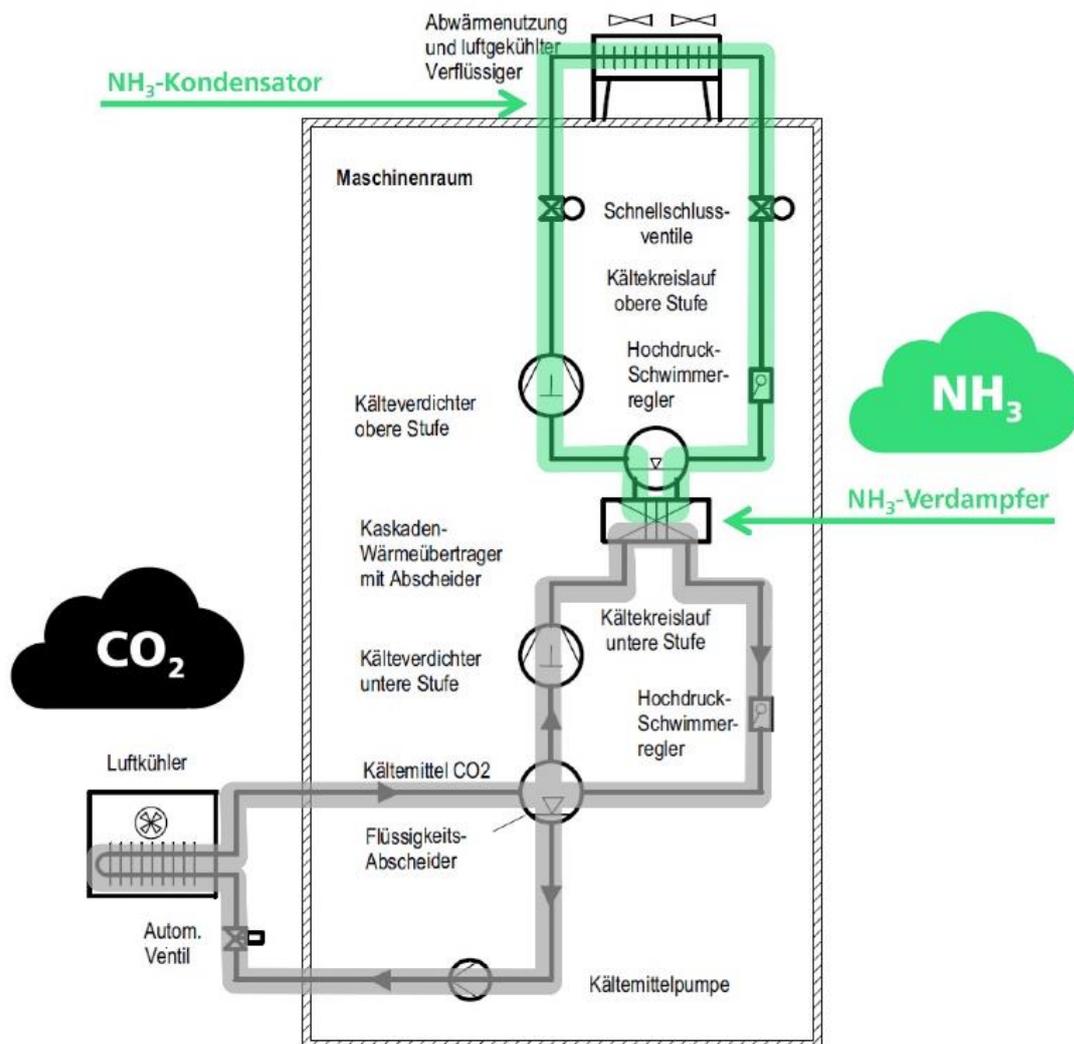


[Zurück zum Inhalt](#)



**Abbildung 7: Die untere Stufe der Anlage wird mit CO₂ als verdampfendes Kältemittel betrieben. Die Abwärme dieser Stufe wird mit einer Ammoniak-Anlage abgeführt. (Typ 5)
Hier: der Kondensator wird als Verflüssiger bezeichnet.**

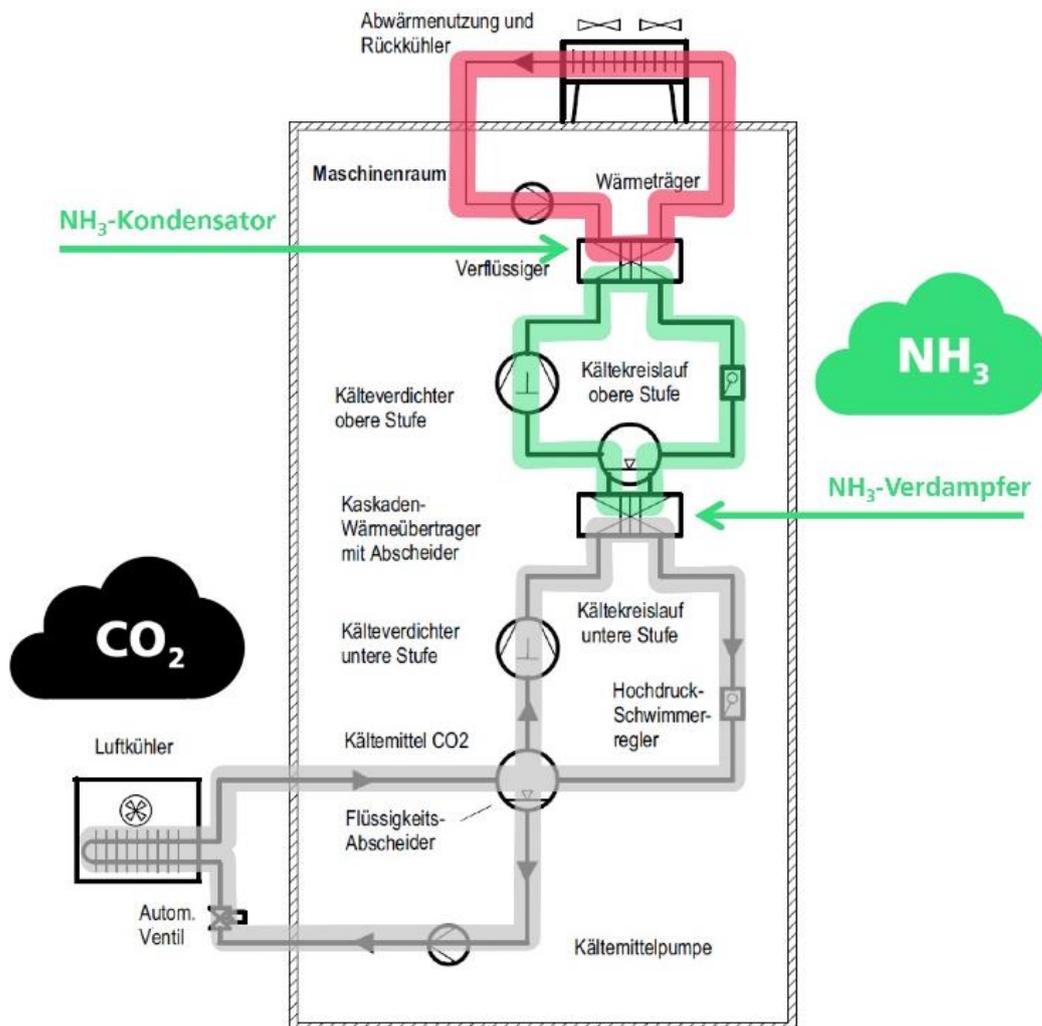
Typ 5 (CA-FL-D gemäss [Lit. 3], Anhang A4)
Direktverflüssigung
Direktverdampfung CO₂



[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 8: Die untere Stufe der Anlage wird mit CO₂ 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)
 Hier: der Kondensator wird als Verflüssiger bezeichnet.

Typ 6 (CA-FL-W gemäss [Lit. 3], Anhang A4)
 Wärmeträger
 Direktverdampfung CO₂



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

Es gibt ein grosses Spektrum der Anwendungsbereiche bei Kälteanlagen. Im Folgenden werden die gängigen Anwendungsgebiete kurz beschrieben.

Klimakälteanlagen

Klimakälteanlagen werden zur Klimatisierung von Räumen eingesetzt: z. B. in grossen Bürogebäuden, Einkaufszentren oder Rechenzentren usw. Sie weisen in der Regel eine relativ geringe Leistung auf. Die Standardbauweise für derartige Anlagen in der Schweiz ist der Kreislauftyp 2. Gelegentlich ist auch der Kreislauftyp 4 anzutreffen. Die Kreislauftypen 1 und 3 kommen nur in Einzelfällen zur Anwendung.

Gewerbekälte

Als Gewerbe bezeichnet man Betriebe, deren Kundschaft Endverbraucher sind. Typische Vertreter dieser Gruppe sind beispielsweise Lebensmittelgeschäfte. In Gewerbebetrieben werden meist Direktverdampfungsanlagen der Kreislauftypen 1 oder 3 eingesetzt. In der Regel handelt es sich um Anlagen mit einer sehr geringen Leistung von 1 bis max. 200 kW und entsprechend kleinen Mengen an Kältemittel unter einer Tonne. Diese Anlagen werden zunehmend mit CO₂ betrieben.

Industriekälte

Das Leistungsspektrum von industriell eingesetzten Kälteanlagen ist sehr breit. Es wird zwischen Industriekälte I (Nahrungsmittelindustrie) und Industriekälte II (Chemische und übrige Industrie) unterschieden. Sie werden sowohl im Bereich der Pluskühlung (über 0 °C), als auch in der Minuskühlung (unter 0 °C) eingesetzt. Typische Anwendungsbereiche für diese Anlagen sind Schlachtbetriebe, Grossmetzgereien, grosse Lebensmittel-Verteilzentren der Zwischenhandel oder Chemiebetriebe. Anlagen in diesem Bereich entsprechen meist dem Kreislauftyp 2 für Plusanlagen bzw. Kreislauftyp 5 für Minusanlagen. Die Ammoniakmengen im Kreislauf können 2 t 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 rund 400 kW. Bei Indirektsystemen der Kreislauftypen 2 oder 5 mit CO₂ oder Ethylenglykol/Wassergemisch als Kälte Träger und Evaporativkondensatoren beträgt die Füllmenge rund 300 bis 500 kg Ammoniak pro Feld.

Gewerbliche oder industrielle Wärmepumpen

Für die Störfallvorsorge sind nur grössere Wärmepumpen relevant, die im Rahmen gewerblicher oder industrieller Nutzungen eingesetzt werden². Ammoniak-Wärmepumpen dieser Kategorie weisen eine Wärmeleistung ab ca. 1'000 kW auf und sind nach oben kaum beschränkt. Leistungen im Bereich von 10 MW und höher sind in der Schweiz bereits gebaut. Für eine Anlage mit 1'000 kW Leistung liegt die

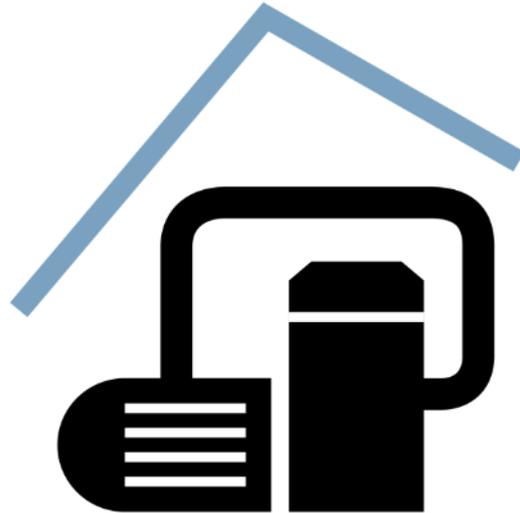
² Mit «gewerbliche oder industrielle Wärmepumpen» sind Grosswärmepumpen in Betrieben angesprochen. Ein Betrieb im Sinne von Art. 2 Abs. 1 StFV ist eine Wirtschaftsgüter produzierende oder Dienstleistungen erbringende wirtschaftliche Einrichtung. Sie dient gewerblichen, industriellen o.ä. Zwecken und ist in einer bestimmten Weise organisiert. Eine Heizungsgemeinschaft eines Mehrfamilienhauses, welches eine Wärmepumpe nutzt, ist kein Betrieb im Sinne der StFV und kann dieser folglich nicht unterstehen. Eine grosse Energiezentrale in einer Wohnüberbauung, welche durch eine gewerbliche Einrichtung professionell betrieben wird, erfüllt obige Definition hingegen und kann den Bestimmungen der StFV unterstellt werden, wenn die Vollzugsbehörde nachweisen kann, dass die Anlage bei ausserordentlichen Ereignissen schwere Schädigungen verursachen kann.

[Zurück zum Inhalt](#)

Füllmenge bei rund 500 kg. Die Füllmengen können je nach Bauart des Wärmetauschers und dessen Grädigkeit variieren. Für Wärmepumpen wird in der Regel der Kreislauftyp 4 realisiert. Im Unterschied zu klassischen Kälteanlagen weisen Wärmepumpen einen höheren Druck auf, der sich in der Regel zwischen 40 bis rund 70 bar bewegt.

Die Unterstellungskriterien gemäss Kapitel 2 eignen sich auch für Wärmepumpen. Bei Wärmepumpen mit weniger als 500 kg Ammoniak, die nach den gültigen Regeln der Technik erstellt wurden, sind schwere Schädigungen in der Regel auszuschliessen.

2. Unterstellung unterhalb der Mengenschwelle



2.1 Einleitung

Gemäss den geltenden Mengenschwellen (siehe [Lit. 5]) unterstehen Betriebe mit einer gesamthaften Lagermenge von mehr als 2'000 kg Ammoniak der StFV, auch wenn diese Menge über verschiedene Betriebseinheiten verteilt ist. Wird die Mengenschwelle überschritten, ist in jedem Fall das ordentliche Kontroll- und Beurteilungsverfahren gemäss StFV einzuleiten.

Nach Art. 1 Abs. 3 Bst. a StFV können aber auch Betriebe mit einer Höchstmenge von bis zu 2'000 kg Ammoniak der StFV unterstellt werden, wenn sie auf Grund ihres Gefahrenpotenzials die Bevölkerung oder die Umwelt schwer schädigen könnten. Dieses Kapitel beschreibt ein Vorgehen mit praxisgerechten Kriterien, die den Vollzugsbehörden als Entscheidungsgrundlage dienen sollen. So kann ermittelt werden, ob die Unterstellung von Betrieben mit industriell oder gewerblich genutzten Kälteanlagen und Wärmepumpen zweckmässig ist, auch wenn die enthaltene Menge an Ammoniak die Mengenschwelle nicht überschreitet.

Die Unterstellungskriterien sind in der Praxis, z.B. bei der Prüfung eines Baugesuches, einfach anwendbar. Es sollen nur Betriebe mit Anlagen unterstellt werden, bei denen schwere Schädigungen der Bevölkerung bei typischen Störfallszenarien möglich sind, 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, Personenexposition³).

³ Es soll grundsätzlich vermieden werden, dass durch zu konservative Annahmen, die den Kriterien hinterlegt werden, Betriebe mit Anlagen unterstellt werden, bei welchen schwere Schädigungen nicht zu erwarten sind (Stufe Kurzbericht), oder so selten auftreten, dass die Risiken klar als tragbar zu beurteilen sind (Stufe Risikoermittlung).



2.2 Kälteanlagen unterhalb der Mengenschwelle: störfallrelevant oder nicht?

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.

2.2.1 Das Vorgehen im Überblick

Der Ansatz beinhaltet drei Schritte:

Schritt 1: Bestimmung der Freisetzungsrate

Für die Anlage wird nach einfachen Regeln ein realistisches «worst case» Freisetzungsszenario identifiziert (massgebende Freisetzung). Die Freisetzungsrate und die darauffolgende Ausbreitung der toxischen Wolke hängen von der vorhandenen Ammoniakmenge, dem betroffenen Anlagenteil und dem Ort der Freisetzung ab.

Schritt 2: Ermittlung des Gefährdungsbereiches und des darin vorhandenen Personenaufkommens

Abhängig von der in Schritt 1 ermittelten Freisetzungsrate wird anhand einer Tabelle der Gefährdungsbereich der toxischen Wolke bestimmt. Anschliessend wird das maximale Personenaufkommen im Freien innerhalb des Gefährdungsbereichs abgeschätzt. Welche Personenaufkommen zu berücksichtigen sind, wird in Kapitel 4.6.2 im Detail beschrieben.

Schritt 3: Entscheid bzgl. Unterstellung unter die StFV

Liegt das Personenaufkommen innerhalb des Gefährdungsbereichs über dem Schwellenwert von 35 Personen bzw. 100 Personen, sind unter realistischen Randbedingungen schwere Schädigungen möglich (Vorgehen siehe Kapitel 2.2.5). In diesem Fall wird eine Unterstellung der Anlage unter die StFV empfohlen.

2.2.2 Notwendige Daten

Für den Entscheid, ob eine Unterstellung eines Betriebs mit einer Kälteanlage oder Wärmepumpe mit Ammoniak unter die StFV vorgenommen werden soll oder nicht, müssen folgende Angaben bekannt sein.⁴

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

⁴ 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 nicht berücksichtigt.



- Platzierung von Verdampfer, Kondensatleitung mit Abscheider und Kondensator auf dem Betriebsareal (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. Im Verlauf der Projektierung einer Anlage kann sich der vorgesehene Standort noch ändern. In solchen Fällen sollte geprüft werden, ob und wie sich verschiedene Standortvarianten für Anlagenteile auf das Schadensausmass auswirken.
- Standort der Entlüftungsöffnung, über welche Ammoniak allenfalls aus dem Maschinenraum ins Freie gelangen kann.

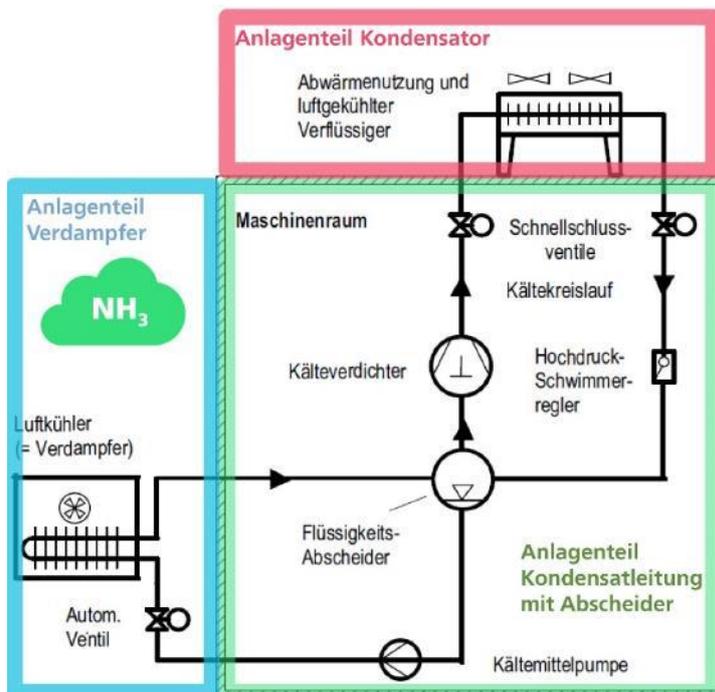
Zahl der Anwohner sowie Arbeitsplätze, ohne Betriebsmitarbeitende des Kälteanlagenbetreibers, im Umkreis von bis zu 140 m um die zu untersuchende Kälteanlage; evtl. Angaben zu weiteren Nutzungen, deren Personen berücksichtigt werden müssen (Einkaufszentren, Schulen etc.).

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



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



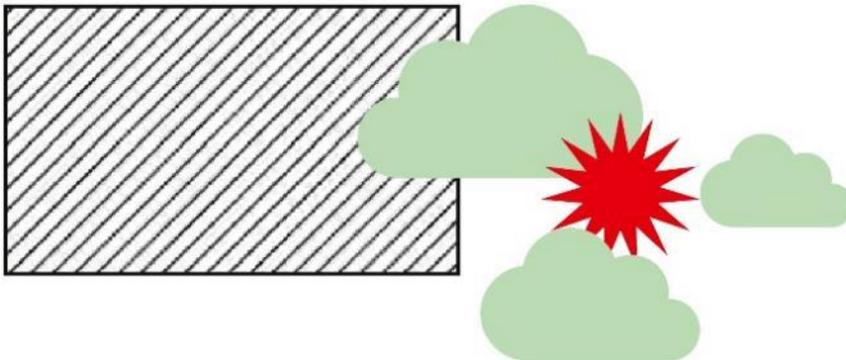
Freisetzungsort

Die in Abbildung 9 dargestellten Anlagenteile Abscheider und Kondensatleitung, Kondensator und Verdampfer befinden sich je nach Anlage an unterschiedlichen Orten im Gebäude oder im Freien. 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 der Anlage ausbreitet und welcher Anteil als Flüssigkeitslache im Gebäude zurückbleibt. Vereinfachend wird zwischen drei möglichen verschiedenen Freisetzungsorten unterschieden:

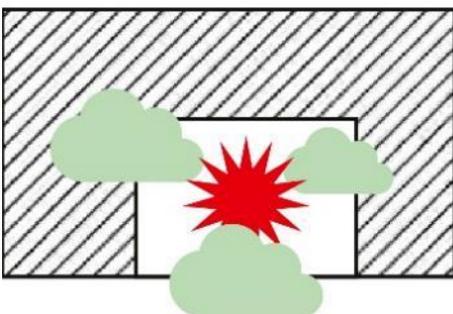
- im Freien;
- in einem an der Fassade gelegenen Raum
(mit Öffnungen, die direkt ins Freie führen, insbesondere Türen oder Fenster);
- in einem gefangenen Raum (ohne Öffnungen, die direkt ins Freie führen – Lüftungskanäle sind nicht als Öffnungen zu verstehen).

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

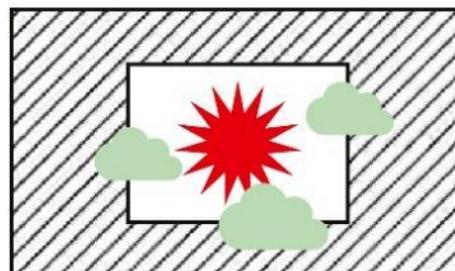
FREISETZUNG
IM FREIEN



FREISETZUNG IN AN DER
FASSADE GELEGENEM RAUM



FREISETZUNG
IN GEFANGENEM RAUM





Um die Relevanz im Sinne der Störfallvorsorge zu beurteilen, werden Freisetzen aus den drei Anlagenteilen Abscheider und Kondensatleitung, Kondensator und Verdampfer für deren jeweiligen Standort betrachtet. Massgebend ist diejenige Freisetzung, welche zum grössten Schadensausmass führt. Je nach Verteilung des Personenaufkommens in der Umgebung der Anlage handelt es sich dabei nicht zwingend um diejenige Freisetzung mit der grössten, ins Freie gelangenden Ammoniakmenge.

Maximal freigesetztes Ammoniak aus der Anlage

Je nach Konstruktion werden Kälteanlagen und Wärmepumpen 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 Ammoniakmenge berücksichtigt werden⁵. Die Kältemittelverteilung innerhalb einer Anlage kann je nach Konstruktion variieren und hängt stark von der Bauart des Wärmetauschers und dessen Grädigkeit ab. Folgende Punkte sind bei einer Ausrüstung mit Schnellschlussventilen zu berücksichtigen:

- 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, sind in Abhängigkeit des Anlagentyps die Werte gemäss Tabelle 1 zu verwenden. Es wird nur der Ammoniak-Anteil im jeweiligen Anlagenteil freigesetzt.
- Sind keine Schnellschlussventile vorhanden, wird von einer vollständigen Freisetzung des gesamten Ammoniakinhalts der Anlage am massgebenden Freisetzungsort ausgegangen.

⁵ Auf Stufe Kurzbericht dürfen aktive Sicherheitsmassnahmen, wie z.B. Schnellschlussventile, bei der Bestimmung des maximalen Schadensausmasses 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 Betriebe der StFV zu unterstellen. Im Modell sind bereits viele Annahmen hinterlegt, die eine ausreichende Konservativität gewährleisten. Da die betreffenden Anlagen zum Beurteilungszeitpunkt (noch) nicht der StFV unterstehen, sind zu einem gewissen Grad Wahrscheinlichkeitsüberlegungen zulässig und sinnvoll.

[Zurück zum Inhalt](#)

Tabelle 1: Die Ammoniakmenge in den einzelnen Anlagenteilen variiert je nach Anlagentyp
 Je nach Anlagenkonfiguration kann die Ammoniakverteilung in realen Anlagen markant von den Angaben in Tabelle 1 abweichen.

Relative Verteilung des Ammoniaks	K_A Abscheider und Kondensatleitung	K_K Kondensator	K_V Verdampfer
<i>Kreislaufotyp</i>			
Typ 1: Direktverdampfung / Direktverflüssigung	0.2	0.4	0.4
Typ 2: Kälteträger / Direktverflüssigung	0.15	0.6	0.25
Typ 3: Direktverdampfung / Wärmeträger	0.2	0.2	0.6
Typ 4: Kälteträger/ Wärmeträger	0.1	0.3	0.6
Typ 5: Direktverflüssigung / Direktverdampfung CO ₂	0.15	0.6	0.25
Typ 6: Wärmeträger / Direktverdampfung CO ₂	0.1	0.3	0.6
Typ 7: Luftgekühlte Kälteträgeranlage, vollständig im Freien aufgestellt		1.0 ⁶	

Quelle: Expertenschätzung

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 Betrachtung werden für eine Unterstellung unterhalb der Mengenschwelle nur Ausbreitungen mit kontinuierlichem Quellterm behandelt. 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 den 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 Anlageneinnern verdampfenden Ammoniakmenge).

⁶ 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.



- 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 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.
- Spontane Freisetzungen treten deutlich seltener auf als kontinuierliche.
- Wird angenommen, dass eine spontane Freisetzung aufgrund der Verteilung des Ammoniaks in der Anlage nur im Maschinenraum eintritt, verzögert sich die Ausbreitung aus dem Maschinenraum ins Freie so, 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 (mitgerissene Flüssigkeitstropfen) ins Freie gelangt. Dieser Anteil hängt von verschiedenen Faktoren ab: Die wichtigsten davon sind die Freisetzungsgeschwindigkeit mit dem damit verbundenen Aerosolanteil sowie die lokale Situation bzgl. physischer Hindernisse, an denen sich die Aerosol-Tröpfchen niederschlagen können. Es wird vorgeschlagen, die in Tabelle 2 aufgeführten Werte zu verwenden, um den Anteil des ins Freie gelangenden Ammoniaks zu bestimmen. Die angegebenen Korrekturfaktoren basieren auf Angaben in [Lit. 6]. Beim Korrekturfaktor K_{Ort} bedeutet der Index K «Kälteanlage» und der Index WP «Wärmepumpe». Für kombinierte Anlagen ist jeweils der konservativere Faktor anzunehmen.

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

Korrekturfaktoren	Korrekturfaktor K_{Ort}	
	Kälteanlage $K_{Ort,K}$	Wärmepumpe $K_{Ort,WP}$
<i>Freisetzungsort</i>		
Die Freisetzung findet im Freien statt	1.0	1.0
Die Freisetzung findet in einem Raum statt, der direkt an die Aussenfassade grenzt (mit Öffnungen, die direkt ins Freie führen)	0.6	1.0
Die Freisetzung findet in einem gefangenen Raum statt (keine Öffnungen, welche direkt ins Freie führen)	0.2	0.4



Massgebende Freisetzungsrate \dot{m}_{max}

Konservativ wird davon ausgegangen, dass innerhalb von 5 min das gesamte Ammoniak aus dem entsprechenden Anlagenteil freigesetzt wird. Unter Berücksichtigung der Gesamtmenge an Ammoniak innerhalb der Anlage (m_{NH_3}) werden die Freisetzungsraten aus den drei betrachteten Anlagenteilen 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 im Anlagenteil Verdampfer

K_A = Relative Verteilung des Ammoniaks im Anlagenteil Abscheider

K_K = Relative Verteilung des Ammoniaks im Anlagenteil Kondensator

K_{Ort} = Korrekturfaktor bzgl. Ort der Freisetzung (Kälteanlage oder Wärmepumpe)

m_{NH_3} = Kilogramm Ammoniak innerhalb der Anlage

Zur Bestimmung der massgebenden Freisetzungsrate \dot{m}_{max} wird der grösste dieser drei Werte auf einen ganzzahligen Wert gerundet.⁷ Bei Freisetzungsraten von unter 0.5 kg/s wird grundsätzlich eine Freisetzungsrate von 0.5 kg/s angewendet, ausser schwere Schädigungen können in plausibler Weise direkt ausgeschlossen werden. Bei einer Anlage ohne Schnellschlussventile fällt der Korrekturfaktor für die relative Verteilung des Ammoniaks weg (d.h., $K_A = K_V = K_K = 1$).

⁷ 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 das grösste Schadensausmass zu erwarten ist.



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

Ermittlung des Gefährdungsbereiches

Die räumliche Ausdehnung einer toxischen Wolke sowie des zugehörigen Gefährdungsbereiches kann mit physikalischen Modellen berechnet werden. Im Sinne einer einfachen Betrachtung werden diese Gefährdungsbereiche auf eine einzige, rechteckige Fläche mit mittlerer Letalität von 28 % reduziert, siehe Abbildung 11.

Abbildung 11: Schematischer Gefährdungsbereich einer Ammoniakwolke mit einer mittleren Letalität von 28 % (gültig für Freisetzungsraten von 1 bis 6 kg/s).



Der Gefährdungsbereich für verschiedene Freisetzungsraten \dot{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 (siehe [Lit. 24]): 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 Personenaufkommens

Für den ermittelten rechteckigen Gefährdungsbereich wird anschliessend das effektive Personenaufkommen abgeschätzt. Dazu wird empfohlen, die folgenden Randbedingungen zu beachten:

- Berücksichtigung der kritischsten Windrichtung, die sich am maximalen Personenaufkommen orientiert (konservative Betrachtung).



- Das maximale Personenaufkommen ist aufgrund der bestmöglichen verfügbaren Daten zur Wohnbevölkerung und zu den Arbeitsplätzen abzuschätzen⁸. 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 %⁹ der Wohn- und Arbeitsbevölkerung im Freien aufhält. Das so abgeleitete Personenaufkommen im Freien innerhalb des Gefährdungsbereiches ist in jedem Fall situativ auf seine Plausibilität hin zu prüfen¹⁰.
- Es ist situativ zu prüfen, ob weitere, regelmässige Nutzungen neben der Wohn- oder Arbeitsbevölkerung im Gefährdungsbereich vorliegen (Personen in Einkaufszentren, Schulen).
- Personenansammlungen die selten und / oder unregelmässig um die Anlage herum stattfinden, sind Spezielsituationen. Beispielsweise kann es sich hierbei um Sportanlässe, Feste, (Weihnachts-) Märkte oder (Open-Air) Konzerte handeln.

Um zu entscheiden, ob eine Spezielsituation im Rahmen einer Abklärung zur Unterstellung in der Ausmasseinschätzung zu berücksichtigen ist, wird empfohlen, die Grafik gemäss Abbildung 12 als Entscheidungsgrundlage zu verwenden. Die Grafik ist wie folgt zu lesen:

y-Achse: Gesamtdauer der Situation pro Jahr

In aller Regel ist bekannt, wie häufig eine Spezielsituation durchschnittlich pro Jahr stattfindet und wie lange der jeweilige Anlass dauert (zum Beispiel Reitturniere an 5 Samstagen im Sommer, mit jeweils 8 Stunden Dauer; Chilbi einmal im Jahr an fünf Tagen jeweils 14 Stunden). Hierbei sollte als Dauer pro Tag diejenige Zeit gelten, die den offiziellen Öffnungszeiten entspricht bzw. dasjenige Zeitfenster, in dem die Mehrzahl der Besucher vor Ort sind (z.B. Openair, bei dem bereits 6 Stunden vor der offiziellen Öffnung viele Besucher vor Ort sind). Die Summe entspricht der Gesamtdauer pro Jahr (z.B. Reitturnier 5 x 8 h/Jahr = 40 h/Jahr).

x-Achse: Anzahl Personen innerhalb des Gefährdungsbereichs

Für die betrachtete Spezielsituation wird berücksichtigt, wie viele Personen sich tatsächlich innerhalb des Gefährdungsbereichs gemäss Abbildung 11 bzw. Tabelle 3 aufhalten. Hierfür wird abgeschätzt, wie viele Besucher im Mittel zu erwarten sind und welcher Anteil davon sich im Gefährdungsbereich aufhält. Zu beachten ist, dass die Flächenverhältnisse nicht dem Verhältnis des Personenaufkommens entsprechen müssen, z.B. können bei einer Chilbi mehr als die Hälfte der Besucher im Gefährdungsbereich erwartet werden, wenn dort die attraktiven Fahrgeschäfte aufgebaut sind, auch wenn der Gefährdungsbereich nur 30 % des Chilbiareals entspricht.

⁸ Z.B. die Katasterdaten des Bundesamtes für Statistik (für die Wohnbevölkerung jährlich per Ende Jahr aktualisiert, für Arbeitsplätze gemäss letzter Betriebszählung, derzeit 2018).

⁹ 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.

¹⁰ Bei der Festlegung der Unterstellungskriterien wurde eine Verifikation anhand verschiedener realer Anlagen durchgeführt. Diese hat gezeigt, dass auch mit dieser Vereinfachung plausible Resultate bzgl. Unterstellung erhalten werden.



In Abbildung 12 kann auf Basis der x- und y-Werte der zugehörige Punkt abgelesen werden. Befindet sich der Punkt innerhalb des grünen Bereichs, muss die Spezialsituation für die Unterstellung nicht berücksichtigt werden. Befindet sich der Punkt im roten Bereich oder auf der Grenze, muss die zugehörige Spezialsituation für die Unterstellung in Betracht gezogen werden, da die Wahrscheinlichkeit eines Störfalls mit schweren Schädigungen nicht hinreichend klein ist.

In Abbildung 12 sind zwei Beispiele für Spezialsituationen dargestellt. Zur Datengrundlage und Herleitung der Grafik siehe Anhang 6 (zur besseren Lesbarkeit ist Abbildung 12 dort vergrössert abgebildet).

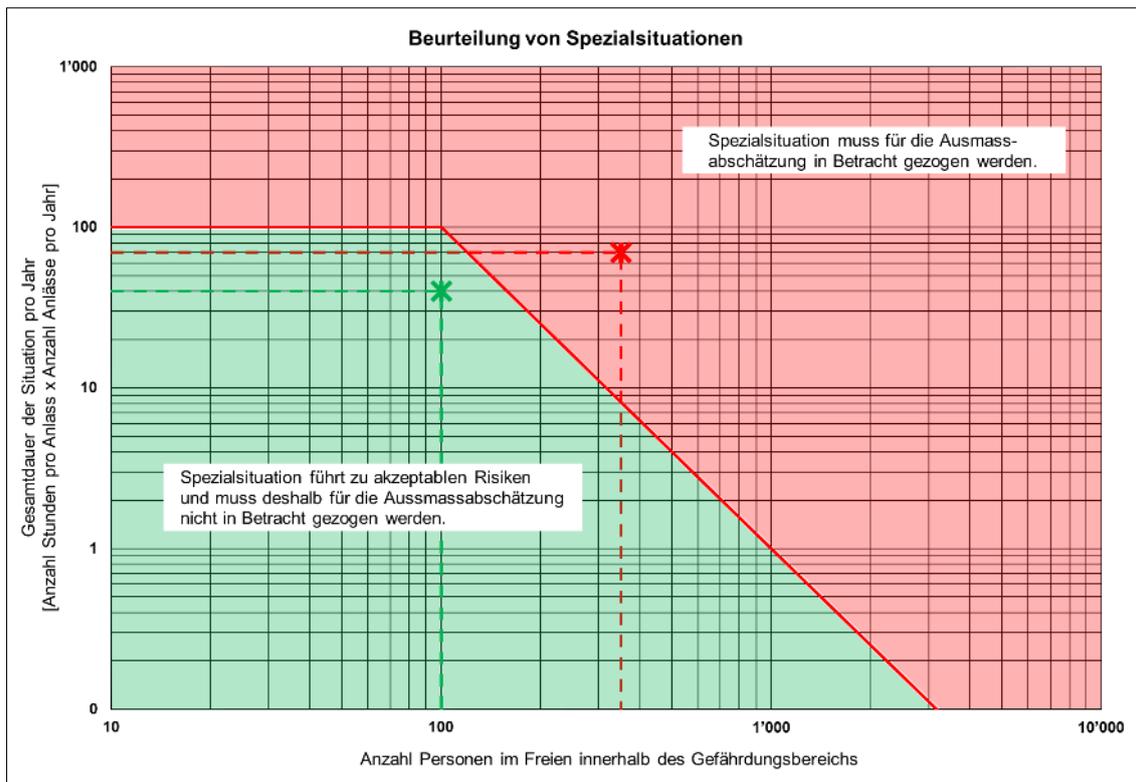


Abbildung 12: Grafik zur Entscheidung, ob eine Spezialsituation im Wirkungsbereich einer Ammoniakkälteanlage oder einer Wärmepumpe zu berücksichtigen ist.

(Vergrössert siehe Anhang A6)

Beispiel Grün: Reitturnier an insgesamt 40 h pro Jahr, mit jeweils rund 100 Personen im Gefährdungsbereich. Rot: Chilbi an insgesamt 70 h pro Jahr, mit rund 350 Personen im Gefährdungsbereich.

- Nicht berücksichtigt werden sollen Insassen in fahrenden Autos oder Zügen¹¹.
- Falls eine Strasse mit täglichem länger dauerndem Verkehrsstau im Gefährdungsbereich liegt, sollen Personen im Stau berücksichtigt werden (vergleiche auch Abbildung 12).

¹¹ Ein fahrendes Auto bzw. ein fahrender Zug befindet sich meist nur wenige Sekunden in der toxischen Wolke. Da die Fenster normalerweise geschlossen sind, stellt die Fahrzeughülle einen gewissen Schutz dar: Ammoniak gelangt lediglich in beschränkter Menge über die Lüftung ins Fahrzeuginnere.



2.2.5 Schritt 3: Entscheid zur Unterstellung unter die StfV

Um zu entscheiden, ob eine Unterstellung gemäss Art. 1 Abs. 3 Bst. a StfV vorgenommen werden sollte, ist zu prüfen, ob eine Freisetzung von Ammoniak aus der Anlage zu schweren Schädigungen führen kann. In Tabelle 4 ist für mehrere Freisetzungsraten zusammengestellt, ab welchem Personenaufkommen im Freien im Gefährdungsbereich sich schwere Schädigungen ergeben können. Die Herleitung des Schwellenwertes und die Rahmenbedingungen sind in Anhang A3 genauer erläutert.

Tabelle 4: Gefährdungsbereich und Schwellenwert für das Personenaufkommen. Wird diese Anzahl Personen überschritten, können schwere Schädigungen im Sinne der StfV nicht ausgeschlossen werden.

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

Wird der Schwellenwert überschritten, können schwere Schädigungen nicht ohne weitere Untersuchungen ausgeschlossen werden. Eine Unterstellung unter die StfV sollte erfolgen, falls für die Freisetzungsraten gemäss der kritischsten Kombination aus Anlagenteil und Freisetzungsort Folgendes gilt:

Effektives Personenaufkommen $P_{eff} >$ Schwellenwert Personenaufkommen P_{Ref}

2.2.6 Kälteanlagen in öffentlich zugänglichen Gebäuden

Für die Gasausbreitung im Gebäudeinneren kann in der Regel davon ausgegangen werden, dass keine schweren Schädigungen im Sinne der StfV zu erwarten sind, weil sich im Gebäude in der Regel nur betriebseigenes Personal aufhält. Ausnahmen können öffentlich zugängliche Gebäude bilden. Die Ausbreitung von Ammoniak innerhalb eines Gebäudes ist dabei nur für Anlagen relevant, die Räume mit öffentlicher Nutzung und grossen Personenaufkommen aufweisen (z.B. Einkaufszentren, Parkhäuser, Eishallen usw.).



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

- Wenn sich ammoniakführende Anlagenteile 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 zehn oder mehr Personen gleichzeitig aufhalten (z.B. 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 10 oder mehr Personen gleichzeitig aufhalten.

Keine schweren Schädigungen sind 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.

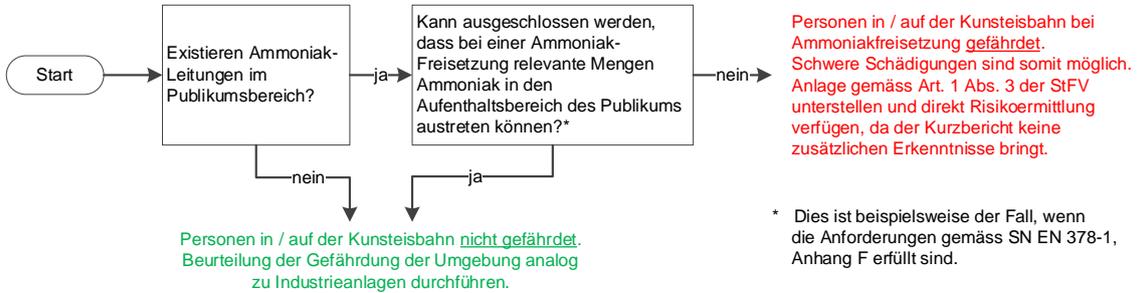
2.2.7 Kunsteisbahnen

Grundsätzlich ist für Kunsteisbahnen dasselbe Verfahren anzuwenden. Aufgrund des potenziell hohen Aufkommens an Drittpersonen auf der Kunsteisbahn muss aber zusätzlich überprüft werden, ob diese bei einer Ammoniak-Freisetzung 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, sind schwere Schädigungen möglich und die Anlage sollte der StFV unterstellt werden. Besteht keine Gefährdung des Publikums auf der Anlage, ist bei der Beurteilung der Kunsteisbahn analog zu den Industrieanlagen vorzugehen (Kapitel 2.2 und lediglich die Gefährdung der Umgebung berücksichtigen).

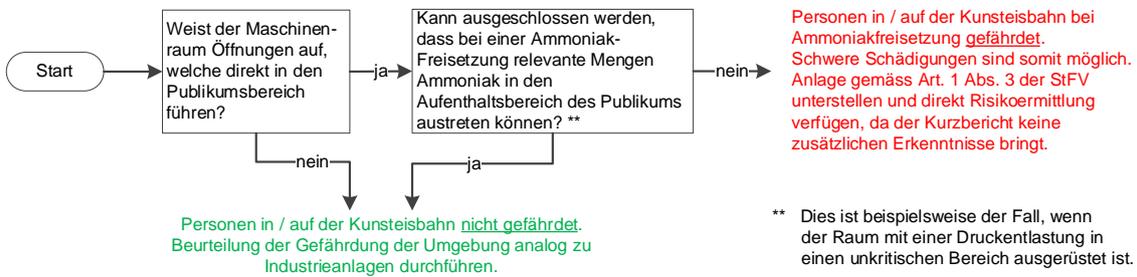


Abbildung 13: Ammoniak-Freisetzung bei Kunsteisbahnen: Entscheidungshilfe zur Einschätzung der Personengefährdung

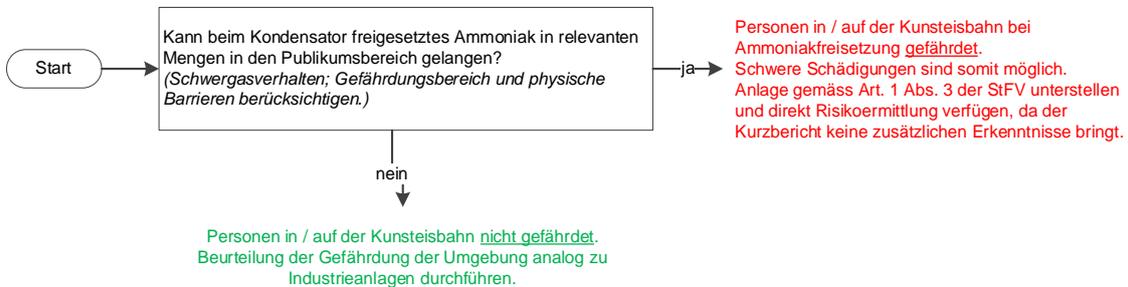
Anlagenteil Verdampfer



Anlagenteil Kondensatleitung und Abscheider



Anlagenteil Kondensator



3. Regeln der Technik / Stand der Sicherheitstechnik



3.1 Einleitung

Bei allen Kälteanlagen sind die anerkannten Regeln der Technik umzusetzen. Die anerkannten Regeln der Technik umfassen das allgemein eingeführte und bewährte Fachwissen, wie es in Regelwerken, Normen und Handbüchern festgehalten ist, siehe [Lit. 7]. Für Anlagen, die der StfV unterstehen, sind darüber hinaus die Sicherheitsmassnahmen gemäss Art. 3 StfV einzuhalten. Die Regeln der Technik und der Stand der Sicherheitstechnik entwickeln sich stetig weiter. Oft ist deshalb unklar, welche Dokumente den aktuellen Stand wiedergeben. Im folgenden Kapitel werden deshalb die für die Störfallvorsorge wichtigsten Anforderungen aus den anerkannten Regeln der Technik und dem Stand der Sicherheitstechnik für Kälteanlagen und Wärmepumpen zusammengefasst, ohne dabei Anspruch auf Vollständigkeit zu erheben. Für weiterführende Anforderungen wird auf die jeweils relevanten Dokumente verwiesen.

Die Regeln der Technik für den Bau von Kälteanlagen sind in der schweizerisch harmonisierten Europeanorm SN EN 378, Teil 1 bis 4, beschrieben (siehe [Lit. 8], [Lit. 9], [Lit. 10], [Lit. 11]). Ergänzend dazu gilt in der Schweiz die EKAS-Richtlinie 6507, in der ebenfalls die Regeln der Technik beschrieben sind, siehe [Lit. 12].

Den Stand der Sicherheitstechnik definiert das BAFU gemäss [Lit. 7] folgendermassen: «Der Stand der Sicherheitstechnik geht meist über die anerkannten Regeln der Technik hinaus. Er umfasst zusätzlich das aktuell in der Fachwelt vorhandene und objektiv zugängliche Wissen über Sicherheitsmassnahmen, die bei vergleichbaren Betrieben im In- oder Ausland erfolgreich eingesetzt werden und auf andere Betriebe übertragen werden können». Informationen zum Stand der Sicherheitstechnik sind in der einschlägigen Fachliteratur oder bei den entsprechenden Fach- und Branchenverbänden vorhanden.



In Deutschland gilt für Anlagen mit einem Gehalt von über 3'000 kg Ammoniak¹² die Richtlinie TRAS 110 (siehe [Lit. 13]). Sie enthält Anforderungen zum Stand der Sicherheitstechnik, die über die Regeln der Technik nach SN EN 378 hinausgehen, insbesondere auch Vorgaben bzgl. Dokumentation und organisatorischer Massnahmen. Im Gegensatz zur schweizerischen StFV mit ihrem risikoorientierten Ansatz basiert die TRAS 110 auf einem massnahmenorientierten Ansatz. Das heisst, 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. Es wird daher empfohlen, 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 wichtigen Sicherheitsmassnahmen bei Anlagen mit Ammoniak als Kältemittel zusammengefasst. Im Sinne der Übersichtlichkeit wird bewusst auf die wesentlichen und in der Praxis gängigsten Aspekte fokussiert.

Grundsätzlich gilt:

- 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 umzusetzen. Die aufgeführten Massnahmen werden als wirtschaftlich tragbar erachtet.
- Bei bestehenden Anlagen legt der Inhaber eigenverantwortlich fest, welche der aufgeführten Massnahmen zum Stand der Sicherheitstechnik wirtschaftlich tragbar sind.

3.2.1 Regeln der Technik nach SN EN 378 und EKAS 6507

Allgemeine Massnahmen

- Generelle Instandhaltungsmassnahmen an der Anlage sind durch den Inhaber oder dessen Bevollmächtigten zu planen und regelmässig durchzuführen. Gemäss [Lit. 11], Kapitel 5.2.2 gilt: «Umfang und Zeitplan der Instandhaltung müssen im Bedienungshandbuch ausführlich beschrieben werden».
- Testen der Sicherheitskette: gemäss den Vorgaben des Inverkehrbringers bzw. des Betreibers, wird das Zusammenspiel aller sicherheitsrelevanten Systeme von Sensoren über Aktoren bis hin zur Alarmierung, welche im Störfall relevant sind, auf deren Funktionsfähigkeit getestet.
- Der Inhaber oder dessen Bevollmächtigte müssen in regelmässigen Abständen, mindestens einmal jährlich, die Alarmeinrichtungen, die Notlüftung und Gasensoren überprüfen, um deren einwandfreie Funktion sicherzustellen. Die

¹² Innerhalb der Richtlinie wird empfohlen, sie bereits für Anlagen ab 300 kg Ammoniak anzuwenden, wenn diese in der Nähe von Schutzobjekten nach TRAS 110 betrieben wird.



Ergebnisse müssen in das Anlagenprotokoll eingetragen werden (SN EN 378-3, [Lit. 10], Kapitel 10.4).

- Gemäss [Lit. 10], Kapitel 9.2 ist die Vorgabe hinsichtlich der Anbringung von Gassensoren wie folgt:
«Mindestens ein Detektor muss in jedem Maschinenraum bzw. jedem in Frage kommenden Personen-Aufenthaltsbereich und/oder im untersten Raum in Untergeschossen bei Kältemitteln, die schwerer sind als Luft, und an der höchsten Stelle bei Kältemitteln angebracht werden, die leichter sind als Luft.» Zu den Alarmwerten, vergleiche Kap. 3.2.2.
- Fluchttüren aus dem Maschinenraum müssen sich nach aussen öffnen lassen. (siehe [Lit. 12], Kapitel 4.2).
- Brandabschnitte sind nach Brandschutzkonzept auszuführen. Der Maschinenraum muss einen Feuerwiderstand von mind. EI 60 und Brandschutztüren müssen einen Feuerwiderstand von mind. EI 30-CS¹³ aufweisen.
- Zum Abschalten der Kälteanlage ist ausserhalb des Maschinenraums und in der Nähe seiner Tür eine Fernabschaltung vorzusehen (Not-Fernabschaltung). Ein Schalter mit vergleichbarer Funktion muss an einer geeigneten Stelle innerhalb des Raumes vorgesehen werden ([Lit. 10], Kapitel 5.6).
- Kälteanlagen sind mit einem Not-Halt-System auszurüsten (SN EN ISO 13850:2016 «Sicherheit von Maschinen - Not-Halt-Funktion – Gestaltungsleit-sätze»), das die jeweiligen Antriebe und Stellglieder betätigt.
- Bei Hybrid- und Evaporativ-Kondensatoren ist das Kühlwasser mittels pH-Messung oder ionenselektiv zu überwachen, um einen allfälligen Austritt von Ammoniak rasch zu entdecken: «R-717-Detektoren müssen bei indirekten Systemen im Wärmeträgerkreislauf, z.B. Wasser- oder Glykolkreislauf, angeordnet werden, wenn die R-717-Füllmenge mehr als 500 kg beträgt [...]. Diese Detektoren müssen im Maschinenraum und, sofern praktikabel, an der Bedienerschnittstelle des Steuersystems einen Alarm initiieren [...].» ([Lit. 10], Kapitel 9.3.3)

Explosionsschutz

Für die folgenden Elemente sind Explosionsschutzmassnahmen auf Basis ATEX 137 [Lit. 14] und dem SUVA Merkblatt Explosionsschutz erforderlich:

- Lüftungsanlage (Ventilator, Zu- und Fortluft-Klappen),
- Notbeleuchtung,
- Gasmelder resp. Kältemitteldetektor,
- Optischer / akustischer Alarm.

Lüftung

- Die normale Lüftung (Lüftung für übliche Betriebsbedingungen) muss für Maschinenräume mit Personenaufenthalt mindestens vier Luftwechsel pro Stunde gewährleisten, ([Lit. 10], Kapitel 5.13.2).

¹³ C – «closing», selbstschliessende Eigenschaft; S – «smoke», Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit.



- Für die mechanische Notlüftung - ausgelegt nach Kältemittelmasse - sind 15 Luftwechsel pro Stunde ausreichend. Die Notlüftung muss mit zwei voneinander unabhängigen Schaltern ausgerüstet sein, von denen sich einer ausserhalb und der andere innerhalb des Maschinenraums befindet.
([Lit. 10], Kapitel 5.13.3). Die Notlüftung muss jederzeit funktionstüchtig sein und durch Gassensoren aktiviert werden ([Lit. 10], Kapitel 6.3.3.3).
- Das Abblasen von freigesetztem Ammoniak «[...] sollte auf eine Weise erfolgen, durch die Personen und Eigentum nicht gefährdet werden» ([Lit. 10], Kapitel 5.8). Dies gilt sinngemäss auch für die Anordnung von Entlüftungsöffnungen aus dem Maschinenraum: «Kältemittel darf nicht in benachbarte Räume, Treppenaufgänge, Höfe, Gänge oder Entwässerungssysteme des Gebäudes gelangen und entweichendes Gas muss nach aussen abgeführt werden. Eine Luftführung durch den Maschinenraum in einen Personen-Aufenthaltsbereich ist nicht zugelassen, es sei denn, sie erfolgt durch einen abgedichteten Kanal, sodass ggf. austretendes Kältemittel nicht in diesen Luftstrom gelangen kann.» ([Lit. 10], Kapitel 5.2).
- «Wartungskanäle, einschliesslich Laufstegen und Kriechgängen, die Rohrleitungen für Kältemittel enthalten, müssen an einen sicheren Ort entlüftet werden, damit bei einer Leckage eine gefährliche Ansammlung von Kältemittel verhindert wird. Wartungskanäle dürfen nicht für die Lüftung oder für klimatisierte Luft genutzt werden.» ([Lit. 10], Kapitel 5.12.4)
- Wenn in der Entlüftungsleitung eine Klappe eingebaut ist, muss diese bei Gasalarm offenbleiben, um eine Druckentlastung in einen sicheren Bereich zuzulassen. «Die Frischluft- und Abluftöffnungen müssen so angeordnet sein, dass das Kältemittel bei einer Leckage unter allen Bedingungen abgeleitet wird.» ([Lit. 10], Kapitel 5.13.5). 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. 12], Anhang B, und Kapitel 4.3.6). Es ist davon auszugehen, dass bei einer 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.

Rückhaltmassnahmen

- 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. 10], Kapitel 5.14.3.1)
 - Im Maschinenraum ist entweder unter den entsprechenden Anlagenteilen 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 F (siehe [Lit. 8]) beschreibt eine besondere Regelung für Kunsteisbahnen. Weisen diese im Publikumsbereich Leitungen mit Kältemittel der Sicherheitsklassen A1, A2L, B1 oder B2L¹⁴ auf, können diese unter Umständen dennoch als indirekte Systeme¹⁵ eingestuft werden. Voraussetzung dafür ist, dass die kältemittelführenden Teile im Publikumsbereich sowie in regelmässig durch Drittpersonen genutzten Personen-Aufenthaltsbereiche durch einen geeigneten, verstärkten und dichten Stahlbetonboden abgetrennt sind. In diesem Fall sind die folgenden Anforderungen zu erfüllen:

- Es müssen Kältemittel-Sammler zur Aufnahme der gesamten Kältemittel-Füllmenge vorhanden sein.
- Rohre und Sammelstücke müssen ohne Flansch geschweisst oder hartgelötet und in den Boden einbetoniert sein.
- Zuleitungs- und Rückleitungsrohre müssen in einem speziell dafür vorgesehenen dichten Kanal verlegt sein, der in den Maschinenraum entlüftet, sodass kein Kältemittel in Publikumsbereiche und/oder regelmässig durch Drittpersonen genutzte Personen-Aufenthaltsbereiche gelangen kann.

3.2.2 Stand der Sicherheitstechnik

Die im Folgenden aufgeführten Massnahmen sind nach dem Stand der Sicherheitstechnik für Kälteanlagen mit Ammoniak verfügbar. Sie gelten für alle neuen Anlagen, die der StFV unterstehen, wirken sich risikomindernd aus und sind für Neuanlagen wirtschaftlich tragbar. Bei bestehenden Anlagen ist durch den Inhaber festzulegen, welche der aufgeführten Massnahmen wirtschaftlich tragbar sind. Die Auswahl von Sicherheitsmassnahmen hat sich immer am Vorgehen gemäss Anhang 2 der StFV zu orientieren.

Allgemeine Massnahmen

- Wenn immer möglich sollen bauliche, technische und organisatorische Sicherheitsmassnahmen kombiniert eingesetzt werden. Das Zusammenspiel dieser Massnahmen ist aufeinander abzustimmen.
- Bei Ammoniak-Direktverdampfungsanlagen (Kreislauftyp 1 und 3 gemäss Kapitel 1.1), die der StFV unterstehen, sind vor der Ammoniak-Pumpe im Flüssigbereich ferngesteuerte Absperreinrichtung (Schnellschlussventile) zu installieren. Diese sind von der Ammoniak-Überwachungsanlage anzusteuern ([Lit. 9], Anhang A, Absatz A.2).
- Die Dichtheit¹⁶ des Maschinenraums soll so ausgeführt werden, dass bei einem Test (z. B. Kaltrauchversuch) kein kalter Rauch ohne Druckdifferenz aus dem zu prüfenden Raum austritt. Die Überprüfung erfolgt optisch.
- Zusätzlicher Ammoniak-Gassensor im Maschinenraum mit Messbereich bis 40'000 ppm (Messung 20% untere Explosionsgrenze).

¹⁴ Ammoniak entspricht der Sicherheitsklasse B2L.

¹⁵ D.h. die Anlage ist so zu beurteilen, als ob die Kühlung des Eisfeldes mit einem unkritischen Kälteüberträger erfolgen würde.

¹⁶ Da Brandschutztüren häufig erst unter Wärme durch Ausdehnung der Dichtungen einen Raumabschluss sicherstellen, ist dieser zusätzliche Test an den Brandschutztüren zum Maschinenraum wichtig.



- Begrenzung der Verdampfung und Lachengrösse im Maschinenraum, durch Auffangwannen mit möglichst kleiner Grundfläche.
- Die SN EN 378 fordert einen als zentrale Alarmstation vorgesehenen Raum, der ständig besetzt ist, ab Ammoniakfüllmengen von 3'000 kg. Diese Anforderung ist in der Schweiz bereits bei Füllmengen ab 2'000 kg umzusetzen. «Speziell 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. 10], Kapitel 8.4).
- Bei im Freien aufgestellten Anlagen ist unter dem Abscheider eine Auffangwanne (aktives oder passives Rückhaltevolumen) 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 Einrichtungen für den Not-Aus (Spannungsfreischaltung) ausserhalb des Maschinenraumes zu gewährleisten (vgl. Kapitel 3.2.1 «Regeln der Technik»).
- Lüftungskanäle sind auf der Druckseite in der Dichtheitsklasse ATC2 gemäss SN EN 16798-3 auszuführen.
- Für die Gestaltung der elektrischen Ausrüstung sind folgende Vorkehrungen zu treffen und das erforderliche Sicherheitsniveau muss den Anforderungen der Risikobeurteilung nach SN EN ISO 12100:2011 genügen:

	SIL1 / PL c	SIL2 / PL d
Not-Halt		X
Not-Aus	X	
Gaswarnanlage		
– Erfassung (Gassensoren)		X
– Auslösung (PLT ¹⁷)	X	
Lüftungssteuerung		
– Auslösung (PLT)	X	

¹⁷ PLT: prozessleittechnische Einrichtung



Ammoniak-Sicherheitskonzept - Detektion, Lüftung, Alarmierung und Not-Halt-Vorrichtung

Es ist ein Ammoniak-Sicherheitskonzept sowie eine darauf abgestimmte Einsatzplanung für Störfälle zu erstellen. Die Einsatzplanung legt fest, welche Massnahmen zur Einwirkungsbegrenzung vom Inhaber (z.B. Evakuationen) mit eigenem Personal und eigenen Mitteln ergriffen werden und welche Massnahmen seitens der öffentlichen Ereignisdienste erforderlich sind [Lit. 10]. Im Ammoniak-Sicherheitskonzept sollen die baulichen, technischen und organisatorischen Massnahmen beschrieben werden.

Für Anlagen, die der StFV unterstehen, können beispielsweise die folgenden Alarmgrenzwerte¹⁸ und Massnahmen bzgl. Alarmierung und Lüftung empfohlen werden. Andere Alarmwerte und Massnahmen sind in Absprache mit den Vollzugsbehörden generell zulässig.

Warnwert

- 50 ppm
- optischer / akustischer Alarm
- nur intern (mindestens Pikettorganisation)

Voralarm

- 200 ppm
- optischer / akustischer Alarm
- nur intern (mindestens Pikettorganisation)
- Notlüftung wird aktiviert

Hauptalarm

- 1'000 ppm
- optischer / akustischer Alarm
- nur intern (mindestens Pikettorganisation)
- Notlüftung läuft weiter (Hinweis: Bei empfindlichen Einrichtungen in der nahen Umgebung ist die technische Ausgestaltung der Lüftung darauf abzustimmen, bspw. mit einer Aussenluftbeimischung)

Prozesskälteanlagen

- Kälteanlage läuft weiter (Sicherheitskonzept zeigt Vorgehen bei der Prozessanlage auf, z.B. kontrolliertes Herunterfahren).

Übrige Kälteanlagen u. Wärmepumpen

- Kälteanlage wird heruntergefahren und ausgeschaltet.
- Schnellschlussventile werden geschlossen, die Entlastung wird mittels Überströmventilen sichergestellt.

¹⁸ Die SN EN 378 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.



Interventionsalarm

- 30'000 ppm
- optischer / akustischer Alarm
- interne und ständig besetzte Stelle (Werkschutz/Pförtner oder externe Einsatzkräfte): automatische Alarmierung. *Während der Arbeitszeit ist von entsprechend geschultem Personal eine Erkundungsverzögerung zulässig.*
- Lüftung wird ausgeschaltet (Nachströmöffnungen werden geschlossen, die Entlüftungsklappe bleibt zur Druckentlastung offen)

Prozesskälteanlagen

- Kälteanlage wird gesichert heruntergefahren und ausgeschaltet (Schnellschlussventile werden geschlossen, die Entlastung wird mittels Überströmventile sichergestellt)
- Maschinenraum wird spannungsfrei geschaltet

Übrige Kälteanlagen u. Wärmepumpen

- Der Maschinenraum wird spannungsfrei geschaltet.



Für Kunsteisbahnen gelten folgende Vorgaben:

- Bei einem Einkreisssystem¹⁹, welches nicht den Vorgaben von Anhang F 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 CO₂ dicht²⁰ sind. Die Dichtigkeit ist periodisch zu prüfen.
- Bei neu geplanten und installierten Kälteanlagen gilt gemäss TRAS 110 «Maschinenräume müssen durch bauliche Massnahmen öffnungslos ohne Türen, Tore oder sonstige Öffnungen (ohne Luftverbund) von Bereichen, in denen sich nicht unterwiesene Personen (z. B. Besucher) aufhalten, getrennt werden.» Die Verteiler- /Kollektorkanäle sind mit einer ausreichenden Anzahl Gassensoren zu überwachen
- Alarmwerte für die Ammoniakwarnanlage der Verteiler- /Kollektorkanäle:
 Voralarm 200 ppm;
 Hauptalarm 1'000 ppm mit automatischer Abschaltung der Anlage, d.h. Herunterfahren und Ausschalten (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 F eingehalten werden, siehe [Lit. 8].
- Die Beton-Überdeckung von Ammoniakleitungen im Eisfeld muss mindestens 2cm betragen²¹.

Sind diese Vorgaben eingehalten, so sind Personen in bzw. auf der Kunsteisbahn gemäss Abbildung 13 (Kapitel 2.2.7) nicht gefährdet.

3.3 Zusätzliche Sicherheitsmassnahmen

Für Anlagen, deren Risikosummenkurve im W/A-Diagramm im Übergangsbereich oder im nicht akzeptablen Bereich liegt, sind zusätzliche 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 umgesetzt wurden. Es ist situativ zu prüfen, ob diese Massnahmen auch für die Risikoreduktion bei der betrachteten Anlage zielführend sind.

¹⁹ Hier bezeichnet der Begriff Einkreisystem eine Anlage, bei welcher das Eisfeld durch Direktverdampfung von Ammoniak gekühlt wird.

²⁰ Der Begriff «kaltrauchdicht» stammt aus der Bauteilprüfung im Brandschutz. Dabei wird z. B. mittels eines Kaltrauchversuchs (Rauchpetarde) geprüft, ob kalter Rauch (d.h. Raumtemperatur) ohne Druckdifferenz aus dem zu prüfenden Gehäuse austritt.

²¹ Primär aus Gründen des Korrosionsschutzes



3.3.1 Massnahmen zum Schutz der Bevölkerung

- Die Leistung der mechanischen Notlüftung aus dem Maschinenraum und die Höhe der Abblasleitung 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.
- Aussenluftbeimischung in den Lüftungskanal.
- Höhe des Abluftkamins aus dem Maschinenraum:
 - Mindestens zwei Meter über oberer Dachkante;
 - Wenn möglich, auf höchster Dachfläche anbringen;
 - Umgebung beachten: bei Hanglage, hoher Personendichte in der Umgebung oder sensiblen Personen in der Umgebung, muss die Höhe des Kamins mit Ausbreitungs-Berechnungen ermittelt werden (maximale Konzentration in der Umgebung < AEGL-2 / 1 h).
- Die Höhe des Abluftkamins gilt auch für weitere Abblasleitungen, über welche Ammoniak im Fall eines Überdrucks abgeleitet wird.
- Weiterer Gassensor zur Unterstützung der Intervention, mit dem Messbereich von 40'000 bis zu 150'000 ppm (Messung 20% bis 100% untere Explosionsgrenze).
- Überwachen der Kondensatleitung im Freien durch Ammoniak-Gassensoren. Um zu gewährleisten, dass austretendes Ammoniak zeitnah zu den Gassensoren 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. Die Absorptionskapazität eines derartigen Wäschers hängt primär vom zugeführten Frischwasser und dem Schmutzwasser-rückhalt ab. Die bewältigbare Freisetzungsmenge bzw. -rate ist dadurch limitiert.
- Interventionsanschluss am Maschinenraum für Entlüftungsmassnahmen der Feuerwehr (Aueranschluss).
- Befinden sich in der näheren Umgebung empfindliche Einrichtungen (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-Gassensoren überwacht und mit einem entsprechenden Alarmierungssystem gekoppelt werden. Diese Massnahme ist nur in Rücksprache mit dem Besitzer und / oder dem Betreiber der empfindlichen Einrichtung 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 den Regeln der Technik werden standardmässig 10 % der Schweissnähte geprüft (basierend auf der EU Pressure Equipment Directive PED 2014/68EU).
- Wahl eines Anlagentyps ohne ammoniakführende Teile im Freien.



- Thermische Isolation der Auffangwanne unter dem Abscheider.
- Bei Neuanlagen ist der Hochdruckschwimmer möglichst nah am Kondensator zu platzieren, so dass die Kondensatleitung (Hochdruckflüssigkeitsleitung nach dem Kondensator) möglichst kurz ist.
- Zum Schutz von Personen-Aufenthaltsbereichen neben Maschinenräumen, in welchen sich regelmässig Drittpersonen aufhalten können Schleusen installiert werden. Diese sind technisch wie folgt auszurüsten:
 - Türen vom Maschinenraum in die Schleuse: EI 30 – CS²²
 - Türen von Schleuse gegen aussen öffnend: EI 30 – C²³
 - Belüftung (Abströmöffnung aus der Schleuse über vertikalen Schacht ins Freie)
 - Öffnungskontakt mit Alarm an eine ständig besetzte Stelle
 - Notbeleuchtung
- Kunsteisbahnen: Aktive Mediumkühlung für den Fall, dass das gesamte Ammoniak im Abscheider gelagert wird und die Anlage ausgeschaltet ist. Zum Beispiel wenn im Sommer der Eisbetrieb eingestellt ist.

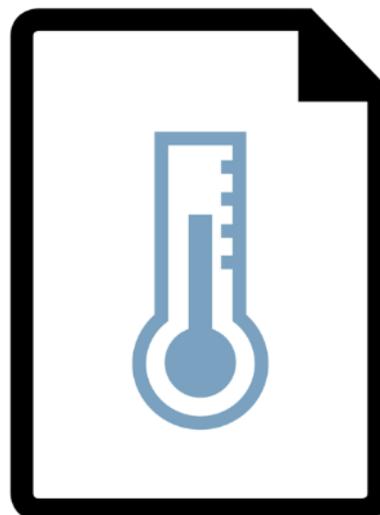
3.3.2 Massnahmen zum Schutz der Umwelt

- 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 und fehlerfrei betätigt werden können.
 - Asphaltierung von Plätzen rund um die Kälteanlage, um das Abwasser von Hydroschilden zurückhalten zu können.
 - Ammoniakführende Anlagenteile im Freien über Auffangwannen führen.

²² C – «closing», selbstschliessende Eigenschaft.

²³ C – «closing», selbstschliessende Eigenschaft; S – «smoke», Begrenzung der Rauchdurchlässigkeit.

4. Kurzbericht: Schadensausmass einschätzen



4.1 Zweck und Umfang

Der Kurzbericht ermöglicht der Vollzugsbehörde eine Beurteilung der möglichen Auswirkungen von Störfällen und verschafft ihr zusammen mit einer allfälligen Besichtigung vor Ort die nötigen Grundlagen für den Entscheid, ob der Inhaber den Pflichten nach Artikel 3 StFV nachgekommen ist und ob er eine Risikoermittlung zu erstellen hat (siehe [Lit. 7]).

Im Kern muss der Kurzbericht darlegen, ob die Annahme zulässig ist, dass «schwere Schädigungen für die Bevölkerung oder die Umwelt infolge von Störfällen nicht zu erwarten sind» (siehe [Lit. 1]). Dazu sind realistische, schlimmstmögliche Störfallszenarien («worst cases») zu untersuchen (siehe [Lit. 7]). 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 der möglichen Schädigungen der Bevölkerung oder der Umwelt infolge von Störfällen.

Weitere Hinweise zum Erstellen eines Kurzberichtes finden sich im Handbuch zur StFV, siehe [Lit. 7]. Verschiedene Kantone bieten zudem Formulare zur Erstellung von Kurzberichten an. Mit diesem wird gewährleistet, dass die kantonale Vollzugsbehörde alle relevanten Informationen erhält.



4.2 Zu untersuchende Ereignisse

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 Ereignisse auf Stufe Kurzbericht berücksichtigt werden müssen bzw. aus welchen Gründen gewisse Ereignisse nicht relevant sind.

4.2.1 Ausbreitung einer toxischen Wolke

Die Ausbreitung der Ammoniakwolke (Ammoniakgas + Aerosol) ist das massgebende Ereignis, das bei Kälteanlagen mit Ammoniak zu betrachten ist. Entsprechende Störfallszenarien 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 untersteht, weil die Mengenschwelle überschritten wird oder weil andere in Kapitel 2 aufgeführte Kriterien erfüllt sind.

4.2.2 Gewässerverunreinigungen

Gewässerverunreinigungen in störfallrelevantem Ausmass stehen bei Kälteanlagen mit Ammoniak in der Regel nicht im Vordergrund. Im Kurzbericht muss jedoch beschrieben werden, ob im Falle einer Ammoniakfreisetzung eine Gewässerverunreinigung auftreten kann. Zur Berechnung des Schadensausmasses wird der Indikator «Volumen verunreinigter oberirdischer Gewässer» gemäss [Lit. 15] herangezogen. Für die Ökotoxizität von Ammoniak wird eine LC50 für Fische von 27,1 mg/l (96 h) verwendet, siehe [Lit. 13]. 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 ist die Situation jedoch genauer zu prüfen.



4.2.3 Explosion

Explosionsszenarien sind gegenüber den toxischen Wirkungen für die Störfallvorsorge bei Ammoniak-Kälteanlagen aus den 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/m³; [Lit. 16]) bildet Ammoniak mit Luft ein explosionsfähiges Gemisch. Dennoch liegt die Konzentration im Freien auch bei sehr grossen Freisetzungsmengen (10 bis 40 t) rasch unter 5 bis 10 %. Es besteht daher keine signifikante Wahrscheinlichkeit für eine Zündung bzw. Explosion im Freien ([Lit. 17], 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 einer Konzentration 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

Ein Störfallszenario mit Ammoniak bei einer Kälteanlage läuft in drei Phasen ab: Freisetzung, Ausbreitung und Schädigung von Personen. Das Vorgehen zur Einschätzung des möglichen Schadensausmasses 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 14: Schadensausmass auf Stufe Kurzbericht einschätzen: Vorgehen im Überblick.

PHASE 1: FREISETZUNG

Abhängig vom Anlagentyp die relevanten Szenarien bestimmen

gemäss Abbildung 15 bis Abbildung 21

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: vereinfachtes Modell»

bzw. ausgehend vom vorliegenden Anlagentyp aus der zutreffenden Abbildung 15 bis Abbildung 21 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 kritischer Windrichtung, zur kritischen Tageszeit)

Gemäss Kapitel 4.6.2 «Personenaufkommen»

Maximales Schadensausmass berechnen

Anhang 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 resp. den Abluftkamin. In Ausnahmefällen auch über Schwachstellen in der Gebäudehülle (z.B. Türen, Fenster; siehe hierzu auch Kapitel 4.4.1).

Phase 3: Schädigung

Eine Schädigung tritt dann ein, wenn Personen 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 Ausbreitung der toxischen Wolke

Für die Ausmassschätzung auf Stufe Kurzbericht werden voneinander getrennte Kältemittel-Kreisläufe separat betrachtet. Es wird empfohlen, 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 15 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 grössten Ausmass führen. Ist dies der Fall, sollten im Kurzbericht entsprechende Freisetzungsszenarien untersucht werden.

[Zurück zum Inhalt](#)

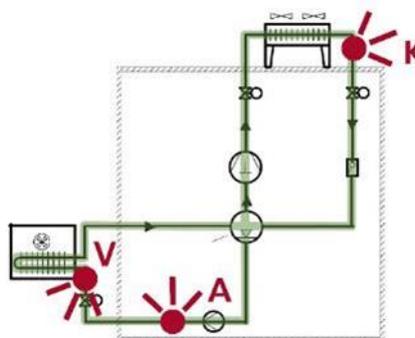
Abbildung 15: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.

Freisetzungsszenarien und Gasausbreitungsmodell

Typ 1

Direktverflüssigung

Direktverdampfung



Zu untersuchende Szenarien:

Art der Gasausbreitung und
zu verwendendes Ausbreitungsmodell

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

Kontinuierliche Freisetzung

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

[Zurück zum Inhalt](#)

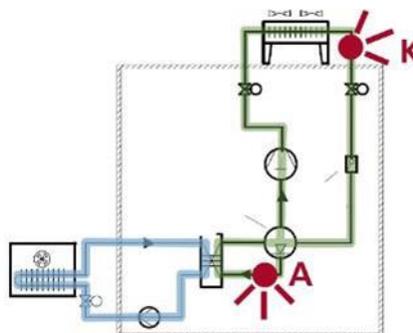
Abbildung 16: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.

Freisetzungsszenarien und Gasausbreitungsmodell

Typ 2

Direktverflüssigung

Kälteträger



Zu untersuchende Szenarien:

Art der Gasausbreitung und
zu verwendendes Ausbreitungsmodell

Kontinuierliche Freisetzung

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

Kontinuierliche Freisetzung

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

[Zurück zum Inhalt](#)

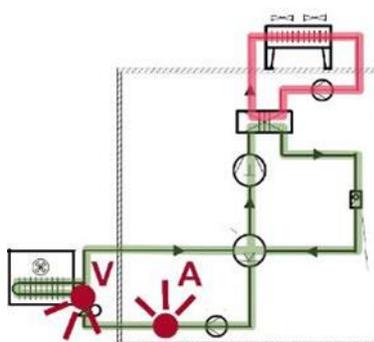
Abbildung 17: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.

Freisetzungsszenarien und Gasausbreitungsmodell

Typ 3

Wärmeträger

Direktverdampfung



Zu untersuchende Szenarien:

Art der Gasausbreitung und zu verwendendes Ausbreitungsmodell

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

Kontinuierliche Freisetzung

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

[Zurück zum Inhalt](#)

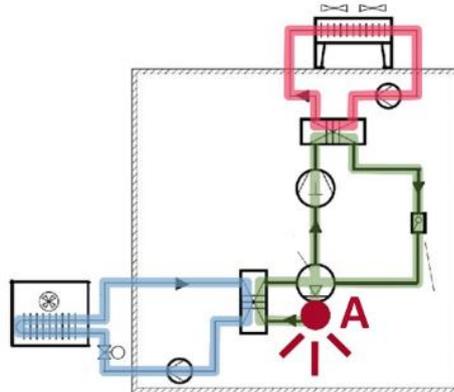
Abbildung 18: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.

Freisetzungsszenarien und Gasausbreitungsmodell

Typ 4

Wärmeträger

Kälteträger



Zu untersuchende Szenarien:

Art der Gasausbreitung und
zu verwendendes Ausbreitungsmodell

Kontinuierliche Freisetzung

A: Aus Flüssigkeitsleitung nach dem
Abscheider via Lüftung ins Freie

Kontinuierliche Freisetzung

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

Spontane Freisetzung

Freisetzung aus dem Abscheider:

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

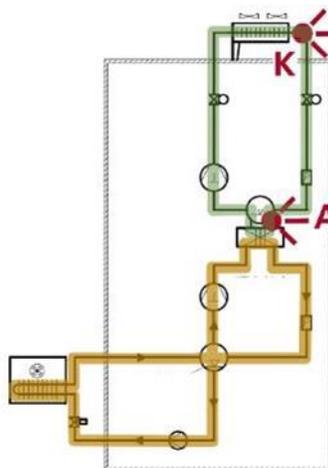
[Zurück zum Inhalt](#)

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

Freisetzungsszenarien und Gasausbreitungsmodell

Typ 5

Direktverflüssigung
Direktverdampfung CO₂



Zu untersuchende Szenarien:

Art der Gasausbreitung und
zu verwendendes Ausbreitungsmodell

Kontinuierliche Freisetzung

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

Kontinuierliche Freisetzung

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

[Zurück zum Inhalt](#)

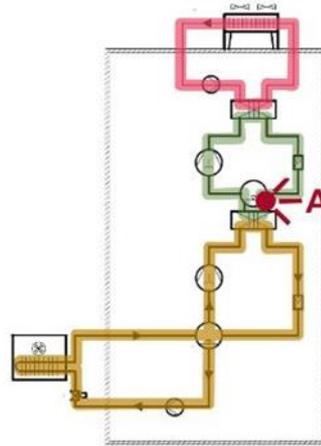
Abbildung 20: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.

Freisetzungsszenarien und Gasausbreitungsmodell

Typ 6

Wärmeträger

Direktverdampfung CO₂



Zu untersuchende Szenarien:

Art der Gasausbreitung und
zu verwendendes Ausbreitungsmodell

Kontinuierliche Freisetzung

A: Aus Flüssigkeitsleitung nach
dem Abscheider via Lüftung ins Freie

Kontinuierliche Freisetzung

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

Spontane Freisetzung

Freisetzung aus dem Abscheider:

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

[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 21: Freisetzungsszenarien, die für die Einschätzung des Schadensausmasses zu berücksichtigen sind.

Freisetzungsszenarien und Gasausbreitungsmodell

Typ 7

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

Zu untersuchende Szenarien:

Art der Gasausbreitung und
zu verwendendes Ausbreitungsmodell

Kontinuierliche Freisetzung

A: Aus Flüssigkeitsleitung nach
dem Abscheider direkt ins Freie

Kontinuierliche Freisetzung

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)

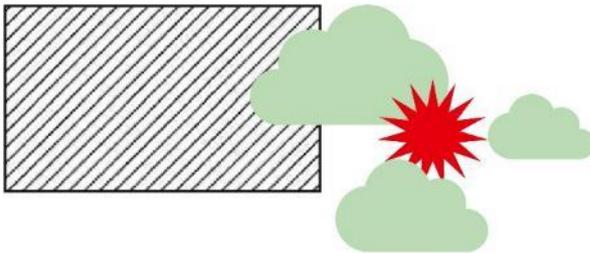


4.4.2 Freisetzungsmenge bzw. -rate

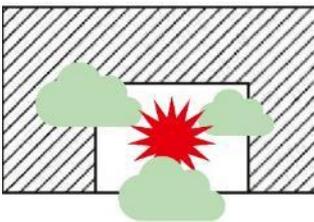
Bei der Bestimmung des maximal möglichen Schadensausmasses muss eine Freisetzung des gesamten Inhalts aus einem in sich geschlossenen Ammoniak-Kreislauf betrachtet werden. Allenfalls vorhandene Schnellschlussventile werden dabei vernachlässigt, da auf Stufe Kurzbericht keine aktiven Sicherheitsmassnahmen berücksichtigt werden dürfen. Allerdings breitet sich nicht in jedem Fall die gesamte freigesetzte Ammoniakmenge 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 22 bzw. Kapitel 2.2.3).

Abbildung 22: Je nach Ort der Leckage gelangt mehr oder weniger Ammoniak ins Freie und breitet sich dort wolkenförmig aus.

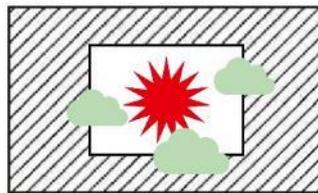
FREISETZUNG
IM FREIEN



FREISETZUNG IN AN DER
FASSADE GELEGENEM RAUM



FREISETZUNG
IN GEFANGENEM RAUM



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

[Zurück zum Inhalt](#)**Tabelle 5: Korrekturfaktoren für den Ammoniak-Anteil, der sich wolkenförmig im Freien ausbreitet (Gas und Aerosol).**

Freisetzungsort	Korrekturfaktor K_{Ort} ²⁴			
	Kontinuierliche Freisetzung		Spontane Freisetzung	
	Kälteanlage	Wärmepumpe	Kälteanlage	Wärmepumpe
Die Freisetzung findet im Freien statt	1.0	1.0	0.4	1
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)	1.0	0.4 (oder 0.2; vgl. Tabelle 17, Anhang A5)	1
Die Freisetzung findet in einem gefangenen Raum statt. Kontinuierlicher Quellterm, Freisetzung via Entlüftungsschächte über 10 min	0.2	0.4	0.2 ²⁵	0.4

Die Gesamtmasse des sich wolkenförmig im Freien ausbreitenden Ammoniaks lässt sich nach der folgenden 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)²⁶.

²⁴ Die Korrekturfaktoren leiten sich aus den Annahmen ab, welcher Anteil des Ammoniaks spontan verdampft und wie viel flüssiges Ammoniak vom ausströmenden Gas als Aerosol mitgerissen wird. Die angegebenen Korrekturfaktoren basieren auf Angaben in [Lit. 15][Lit. 6]. Zur Herleitung vgl. auch Anhang A5.

²⁵ 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.

²⁶ 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 mit bis zu 2 t Inhalt als realistisch beurteilt. Eine Sensitivitätsanalyse der Ausbreitungsrechnungen 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.



Ergibt die obige Berechnung eine Freisetzungsrate von über 10 kg/s, so ist als maximale Freisetzungsrate 10 kg/s zugrunde zu legen²⁷ 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 Abscheiders, 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 bis zu 2'000 kg Ammoniak, die aufgrund Art. 1 Abs. 3 Bst. a 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 Ausmasseinschätzung 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 schwere Schädigungen erreicht werden. In diesem Fall soll er sich im Sinne eines einheitlichen Vollzuges dennoch so weit wie möglich an die in Anhang A5 beschriebenen Grundannahmen halten. Abweichungen sind zu begründen.

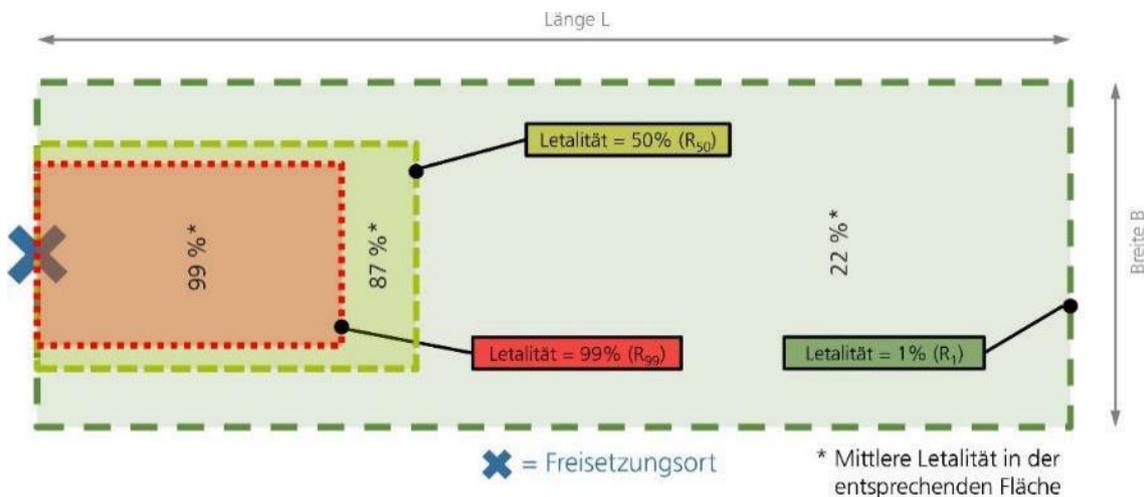
²⁷ Die Freisetzungsrate ist durch den maximalen Leitungsquerschnitt limitiert. Mit steigendem Ammoniakinhalt nehmen die Leitungsquerschnitte allerdings unterproportional zu, da grössere Füllmengen nur teilweise durch höhere Kälteleistungen begründet sind. Einen mindestens ebenso grossen Einfluss haben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



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 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 Ausmassschätzung werden dabei diejenigen Gefährdungsbereiche berücksichtigt, an deren Rand eine Letalität von 99 % (=R₉₉), 50 % (=R₅₀) bzw. 1 % (=R₁) vorliegt (in Anlehnung an [Lit. 19]). Innerhalb dieser Bereiche wird mit mittleren Letalitäten von 22 %, 87 % und 99 % gerechnet.

Abbildung 23: 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 betrachten (siehe Kapitel 4.4.1). Die zugehörige Länge und Breite der Gefährdungsbereiche (R₁, R₅₀, R₉₉) 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 dieselben Annahmen, wie bereits in Kapitel 2.2.6 aufgeführt.



4.6 Einschätzung des Schadensausmasses

4.6.1 Schadensindikatoren

Für Ammoniak wird lediglich der Schadensindikator «Anzahl Todesopfer» gemäss Beurteilungskriterien zur StFV (siehe [Lit. 15]) 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 Drittpersonen zu berücksichtigen.
- Für bereits eingezonte, aber noch nicht bebaute Flächen ist das zukünftige Personenaufkommen zu berücksichtigen. Grundlagen für entsprechende Abschätzungen finden sich in [Lit. 19] (Kapitel 7).
- Das für die «worst-case» Betrachtungen relevante, maximale Personenaufkommen ist aufgrund der bestmöglichen verfügbaren Daten zur Wohnbevölkerung und zu den Arbeitsplätzen abzuschätzen.²⁸ 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 Inhaber bzw. der Gemeinde durch den Verfasser des Kurzberichts 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 Schadensausmass a priori höher ist als ausserhalb dieser Zeiten.
- Bezüglich der Anwesenheit der Wohn- und Arbeitsbevölkerung nach Tageszeit und Aufenthalt im Freien haben sich folgende Annahmen etabliert (siehe [Lit. 19]):

²⁸ Z.B. geocodierte Katasterdaten des Bundesamtes für Statistik (für die Wohnbevölkerung jährlich per Ende Jahr aktualisiert, für Arbeitsplätze gemäss letzter Betriebszählung, derzeit 2018).

**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% ²⁹) im Freien
Nacht während Woche (19 bis 7 Uhr)	90 % anwesend, davon 1 % im Freien	5 % anwesend, davon 5 % (bis 30% ²⁹) im Freien
Wochenende, Tag (7 bis 19 Uhr)	60 % anwesend, davon 10 % im Freien	5 % anwesend, davon 10 % (bis 30% ²⁹) im Freien
Wochenende, Nacht (19 bis 7 Uhr)	100 % anwesend, davon 1 % im Freien	0 % anwesend

- Befinden sich in der Nachbarschaft Betriebe mit stark abweichenden Präsenzfaktoren, müssen diese Werte fallweise angepasst werden. Beispielsweise wird bei Firmen mit regelmässiger Nachtarbeit oder Schichtbetrieb während 24 Stunden pro Tag und 7 Tagen pro Woche angenommen, dass je 20 % der Schichtarbeitenden Tag und Nacht anwesend sind (siehe [Lit. 19]). Das so abgeleitete Personenaufkommen im Freien innerhalb des Gefährdungsbereiches ist in jedem Fall auf seine Plausibilität hin zu prüfen.
- Personenaufkommen, die selten, unregelmässig oder im öffentlichen Raum um die Anlage herum stattfinden, sind gemäss Kapitel 2.2.4 und Abbildung 12 zu berücksichtigen.
- Nicht berücksichtigt werden sollen Insassen in fahrenden Autos oder fahrenden Zügen.³⁰ Falls eine Strasse mit täglichem Verkehrsstau im Gefährdungsbereich liegt, sollen 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).

²⁹ Der erhöhte Anteil von 30% der Personen im Freien sollte für Gebäude verwendet werden, die sich sehr nah am Freisetzungsort befinden (Distanz bis R50) und gleichzeitig eine hohe Luftwechselrate aufweisen, typischerweise z.B. industriell genutzte Gebäude.

³⁰ 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.



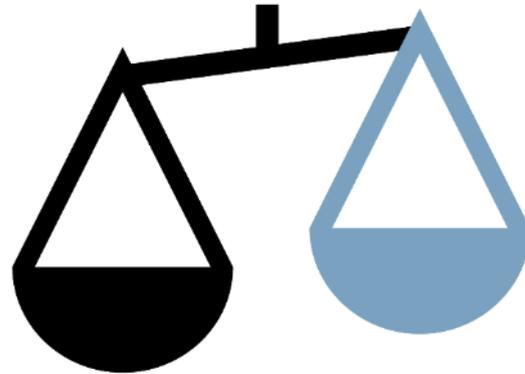
- Für benachbarte Wohn- und Bürogebäude kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass in diesen keine Todesfälle infolge von Ammoniakfreisetzungen zu erwarten sind (d.h. 100 % Gebäudeschutz aufgrund der typischerweise sehr tiefen Luftwechselrate; vgl. hierzu Anhang A4). Für andere Nutzungen sind Abweichungen möglich:
 - Industriegebäude bieten einen weniger guten Schutz gegenüber toxischen Wolken im Freien, da diese Gebäude in der Regel höhere Luftwechselraten aufweisen. Dadurch würde das Schadensausmass unter den genannten Annahmen für diese 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 Schadensausmass führt, wie wenn ein reduzierter Gebäudeschutz berücksichtigt würde.³¹
 - 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 Ausmassschätzung analog zum Kapitel 2.2.6 zu berücksichtigen.

4.6.3 Bestimmung des Schadensausmasses

Das maximale Schadensausmass 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.

³¹ 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 ein Systemvergleich sinnvoll?

Untersteht ein Betrieb mit Ammoniak-Kälteanlagen der StFV oder wurde dieser der StFV unterstellt, muss die Vollzugsbehörde prüfen, ob die Einschätzung des Ausmasses der möglichen Schädigungen plausibel ist (Kurzbericht) und allenfalls eine genauere Abklärung des von der Anlage ausgehenden Risikos verlangen (Risikoermittlung). Liegt dabei die Summenkurve im Übergangsbereich des W/A-Diagramms, nimmt die Vollzugsbehörde eine Interessensabwägung vor. In deren Rahmen kann auch überprüft werden, ob das Risiko durch den Umbau zu einem anderen Anlagentyp (vgl. Kapitel 1.1) reduziert werden kann. Neben dem 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 Vollzugsbehörden in entsprechenden Situationen eine für alle Seiten transparente und faire Beurteilung der Sachlage. Aus diesem Grund wird empfohlen, den Vollzugsbehörden einen einfachen, übersichtlichen Systemvergleich verschiedener Anlagevarianten einzureichen. Dieser soll als Hilfsmittel für die sachliche Diskussion zwischen Vollzugsbehörde und Inhaber dienen. In folgenden Fällen soll deshalb ein Systemvergleich eingereicht werden:

- Beim Einreichen von Baugesuchen (grössere Sanierung einer bestehenden oder Bau einer neuen Anlage) als Diskussionsbasis für Behörden bzw. die Vollzugsbehörde und Gesuchsteller.
- Wenn schwere Schädigungen möglich sind und eine Risikoermittlung erarbeitet werden müsste. Evtl. kann diese durch die Wahl eines anderen Anlagentyps (mit geringerem Gefahrenpotential) überflüssig werden.



- Wenn die Risikoermittlung eine Summenkurve im Übergangsbereich ergibt, als Basis für die Interessensabwägung durch die Behörden bzw. die Vollzugsbehörde.

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 (Vollzugs-)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 Anlagenteile (insbesondere bei Umbauten innerhalb bestehender Gebäudestrukturen)

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

1. Störfallvorsorge (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.



Störfallvorsorge (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 empfindliche Einrichtungen mit hohem Personenaufkommen, können Anlagentypen mit Sekundärkreisläufen (je nach Anwendungsgebiet Anlagentypen 2 bis 6) aus Sicht der Störfallvorsorge vorteilhaft sein.

Entsprechend soll der Einfluss verschiedener möglicher Anlagentypen auf das Schadensausmass qualitativ beschrieben werden, z.B. «deutliche Verringerung des potenziellen 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 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 CO₂ 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 Aspekt der Störfallvorsorge (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).

Aspekte	Vorschlag Inhaber	Variante A	Variante B
	<i>Feldkühlung direkt mit NH₃</i>	<i>Feldkühlung indirekt mit Glykol 35%</i>	<i>Feldkühlung indirekt mit CO₂</i>
Störfallvorsorge (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 [%] ³²			
Relativer Energieverbrauch offenes Eisfeld	100 %	X %	Y %

Die mit * versehenen Punkte helfen den (Vollzugs-)Behörden 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 resp. Aspekte angegeben werden.

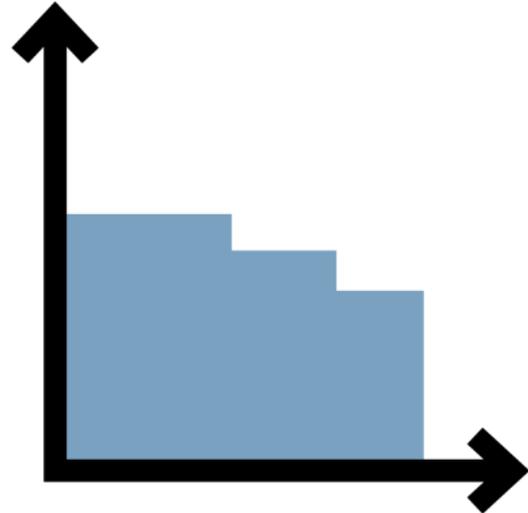
Wenn die Angaben zu einem Punkt beim aktuellen Projektstand noch nicht bekannt sind, kann dieser mit einer kurzen Begründung offengelassen werden.

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 ist als Hilfsmittel zu verstehen, das eine einheitliche, transparente Diskussionsbasis zwischen Planer / Inhaber und den (Vollzugs-)Behörden bietet und zu einer ausgewogenen Urteilsfindung Behörden beitragen soll.

³² Energiebedarf pro Kälteleistung

6. Risikoermittlung



6.1 Zweck und Umfang

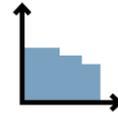
Ziel einer Risikoermittlung ist es zu überprüfen, ob das von einer Anlage ausgehende Risiko tragbar ist. Grundlage für diese Risikobeurteilung bilden die Beurteilungskriterien zur StFV, siehe [Lit. 15]. Die inhaltlichen Anforderungen an eine Risikoermittlung sind im Anhang 4.1 der StFV summarisch aufgeführt. Weitere Erläuterungen dazu finden sich im allgemeinen Teil des Handbuchs zur StFV, siehe [Lit. 7]. 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 Vollzugsbehörde 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 und plausibel dokumentiert werden müssen.

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 zur StFV, siehe [Lit. 7]), beschrieben.

6.3 Zu untersuchende Ereignisse

Auf Stufe Risikoermittlung ist unabhängig von den Inhalten des Kurzberichts zu überprüfen, welche Szenarien realistisch sind und beurteilt werden müssen. Dies betrifft den Freisetzungsort, die Freisetzungsmenge und weitere Parameter. Die Szenarien gemäss Kapitel 5 für den Kurzbericht sind konservativ und müssen auf Stufe Risikoermittlung angepasst werden (z.B. bzgl. Freisetzungsraten und ortsspezifischer Parameter).



6.3.1 Ausbreitung einer toxischen Wolke

Hinsichtlich der toxischen Wirkung von Ammoniak sind der Risikoermittlung dieselben Parameter zugrunde zu legen wie bereits in Kapitel 4.4.1 für den Kurzbericht beschrieben. Ergänzend werden auf Stufe Risikoermittlung verschiedene Zeitpunkte des Ereigniseintritts berücksichtigt, zu denen sich unterschiedlich viele Personen im Gefährdungsbereich aufhalten, z.B. Tag / Nacht, Wochentag / Wochenende, Stossverkehr oder Sonderanlässe.

6.3.2 Gewässerverunreinigung

Gewässerverunreinigungen in relevantem 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 für Versagensraten resp. Störfallursachen verwendet werden. Die Auflistung ist nicht abschliessend, bei Bedarf sind Daten aus der Literatur oder Praxis zu verwenden.

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.

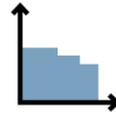
Fehlhandlungen

Die Häufigkeit menschlicher Fehlhandlungen auf einen allgemein gültigen Zahlenwert herunterzubrechen 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 (2005): 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 mit ca. 3×10^{-10} (m^{-2} pro 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 (siehe [Lit. 20]) ist allerdings relativ alt. Bei der Beurteilung spezifischer Anlagen sind zudem weitere Aspekte zu berücksichtigen:

- Die genannte Studie [Lit. 20] umfasst alle Arten von Luftfahrtobjekten, inkl. z.B. 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, wenn in der Umgebung der Kälteanlage Freiflächen vorhanden sind.

Generelle Angaben zum Flugverkehr und Flugunfällen in der Schweiz:

- Bundesamt für Statistik (BfS) (2022): Schweizerische Zivilluftfahrt 2021. Neuchâtel.

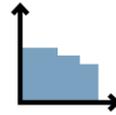
Absturzhäufigkeit:

- Bundesamt für Statistik, diverse e-Dossiers <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/querschnittsthemen/zivilluftfahrt.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 Bemessungsnorm SIA 261/1.

- Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (2020): 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 Referenzwerte der Bodenbeschleunigung auf Fels (a_{gd}) vorgegeben:

- Erdbebenzone 1a: $a_{gd} = 0.6 \text{ m/s}^2$
- Erdbebenzone 1b: $a_{gd} = 0.8 \text{ m/s}^2$
- Erdbebenzone 2: $a_{gd} = 1.0 \text{ m/s}^2$
- Erdbebenzone 3a: $a_{gd} = 1.3 \text{ m/s}^2$
- Erdbebenzone 3b: $a_{gd} = 1.6 \text{ m/s}^2$

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) (2015): Seismic Hazard Assessment of Switzerland, 2015. Zürich.

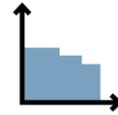
Nicht jedes (schwache) Erdbeben führt automatisch zu einer Stofffreisetzung aus verfahrenstechnischen Anlagen. Verschiedene Dokumente bieten eine Hilfestellung zur Abschätzung, wie wahrscheinlich eine Freisetzung aus einer Anlage infolge unterschiedlich starker Erdbeben ist:

- 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) (2022): Leitfaden. Der Lastfall Erdbeben im Anlagenbau. Frankfurt.
- Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) (2022): Erläuterungen zum Leitfaden. Der Lastfall Erdbeben im Anlagenbau. Frankfurt.

Andere Naturgefahren

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

<https://www.kgk-cgc.ch/geodaten>



6.5 Freisetzungsmenge bzw. -rate

Kontinuierliche Freisetzungen

Auf Stufe Risikoermittlung werden die Freisetzungsraten anhand der realen Betriebsbedingungen berechnet (Temperatur, Druck, Leitungsquerschnitt). Dabei werden Szenarien zu zwei bis drei unterschiedlichen Leckgrössen gebildet, z.B. Vollbruch oder kleine Lecks gemäss einem Modell in [Lit. 21], Kapitel 2.3.3. Die Wahl der Leckgrössen ist zu begründen. Vereinfachend wird jeweils eine 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 (kg/s) aus einer flüssigkeitsführenden Leitung kann beispielsweise anhand folgender Formel berechnet werden ([Lit. 22], S. 8 und 31; zweiphasiges Ausströmen):

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

Bedeutung

A	[m ²]	Querschnittsfläche des Lecks bei einem Vollbruch einer Leitung.
Λ	1.17 x 10 ⁶ J/kg	Latente Verdampfungswärme von Ammoniak.
ρ_g	[kg/m ³]	Gasdichte in der Anlage (abhängig von Druck und Temperatur).
ρ_l	[kg/m ³]	Flüssigkeitsdichte in der Anlage (abhängig von Druck und Temperatur).
T_s	[K]	Temperatur des flüssigen Ammoniaks
c_{pl}	4.49 x 10 ³ J/(kg K)	Spezifische Wärmekapazität von Ammoniak

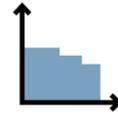
Korrekturfaktor

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 des Verhältnisses 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. 22], S. 29 ff. oder [Lit. 22], 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 Abscheiders, nicht der gesamte Anlageninhalt.



6.6 Ausbreitung der toxischen Wolke

Die Ausbreitung des freigesetzten Ammoniaks wird anhand etablierter Modelle ermittelt. Dazu sind verschiedene Software-Lösungen verfügbar, z.B. EFFECTS von Gexcon, Trace von SAFER System, SLAB View von Lakes Environmental, HGSYSTEM von Shell Research Thornton oder FDS des NIST (US National Institute of Standards and Technology).

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 allerdings situativ zu prüfen, ob diese auch für die Anwendung auf Stufe Risikoermittlung angemessen sind. Abweichungen davon sollten dokumentiert und begründet werden.

6.7 Ausmasseschätzung

Bezüglich Schadensindikatoren, 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.

Die Probitwerte des RIVM³³ werden als Datenbasis verwendet. Es ist grundsätzlich zu überprüfen, ob aktualisierte Toxizitätswerte veröffentlicht wurden.

6.7.1 Mittlere Letalitäten

Es kann dieselbe konservative Methodik zum Herleiten der mittleren Letalitäten wie auf Stufe Kurzbericht (vgl. Kapitel 4.5 für die Letalitätszonen 1 %, 50 % und 99 % gemäss Abbildung 23) inkl. den Letalitätszonen gemäss Abbildung 32 verwendet werden. Alternativ sind eigene Berechnungen möglich.

6.7.2 Personenaufkommen

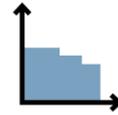
Auf Stufe Risikoermittlung sind verschiedene Situationen mit unterschiedlichen Personenaufkommen zu unterscheiden, wobei auch die Häufigkeit deren Auftretens zu berücksichtigen ist, z.B. Tag / Nacht, Wochentag / Wochenende, Stossverkehr oder Sonderanlässe, vgl. hierzu auch die Angaben in Kapitel 4.6.

6.7.3 Fluchrate für Personen im Freien

Auf Stufe Risikoermittlung kann das Fluchtverhalten von Personen detaillierter berücksichtigt werden. Gemäss [Lit. 23] gelten für die Fluchrate 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.

³³ RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), <https://www.rivm.nl/probitrelaties/ammoniak>



- Je mehr Ammoniak pro Zeiteinheit freigesetzt wird, desto kleiner ist die Fluchtrate. Deshalb sind die Fluchraten bei Freisetzungen mit spontanem Quellterm tendenziell kleiner als bei Freisetzungen mit kontinuierlichem Quellterm.

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

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

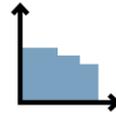
Es ist situativ zu beurteilen, ob diese Personen aus dem Gefährdungsbereich hinaus flüchten oder lediglich in benachbarte Gebäude hinein, in denen ebenfalls Personenschäden auftreten können (vgl. Kapitel 6.7.5).

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 leisten³⁴. Kälteanlagen im Inneren eines Gebäudes sind zudem räumlich getrennt von grossen Personenansammlungen. Ausnahmen hiervon können öffentlich zugängliche Gebäude wie z.B. Eishallen, Parkhäuser sein. Anhand der folgenden Überlegungen soll geprüft werden, ob und in welchem Ausmass Drittpersonen 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?
- Liegt ein Evakuierungskonzept für den Fall einer Freisetzung von Ammoniak vor?
- 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?

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



6.7.5 Gebäudeschutz für Personen in Nachbargebäuden

Die Schutzwirkung einer 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)
- 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 Gebäude³⁵

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 Letalitätssrate nicht linear von der Konzentration abhängt, ist der Gebäudeschutz in grösserer Distanz vom Freisetzungsort höher. Der Gebäudeschutz kann in Abhängigkeit der Ammoniakkonzentration 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 weitere Aspekte wie z.B. die Gebäudehöhe berücksichtigt werden können. Die Herleitung der zugrunde gelegten Werte ist in jedem Fall nachvollziehbar und plausibel zu dokumentieren.

³⁵ 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

Aussenluftbeimischung

Wenn die Abluft vor Austreten in die Umgebung maschinell mit Aussenluft vermischt wird, wird dies als Aussenluftbeimischung bezeichnet. Die Beimischung kann unterschiedliche Anteile betragen, sodass die Verdünnung der Abluft variabel sein kann.

Aufstellungsorte von Kälteanlagen

Gemäss [Lit. 8] wird zwischen den folgenden vier Klassen von Aufstellungsorten unterschieden:

- Klasse I — Mechanische Geräte im Personen-Aufenthaltsbereich
- Klasse II— Verdichter im Maschinenraum oder im Freien
- Klasse III— Maschinenraum oder im Freien
- Klasse IV — Belüftetes Gehäuse

Einkreissystem

Bezeichnet eine Kälteanlage, bei welcher sowohl Kälteerzeugung, Kälteverbrauch als auch die Rückkühlung mit einem einzigen Kreislauf von Kältemittel erbracht wird (Typ 1 gemäss Kapitel 1.1).

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.

Teilweise erfolgt die Rückkühlung auch mit Grund- oder Oberflächenwasser. Dies kann entweder direkt oder über einen Sekundärkreis geschehen.

Gassensor

Gassensoren dienen dem Aufspüren und Analysieren von Gasen. Sie sind in der Regel Chemosensoren, die Informationen aus ihrer Umgebungsatmosphäre in elektrisch nutzbare Signale umwandeln. In der SN EN 378 werden Gassensoren mit dem Begriff «Detektoren» benannt.

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.

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).

Kälteanlage

Eine Kälteanlage sorgt dafür, dass die Temperatur eines bestimmten Raumes oder einer bestimmten Zone unter die Umgebungstemperatur gesenkt wird. Die Kälteanlage entzieht dafür der zu kühlenden Stelle Wärme und gibt diese an einer anderen Stelle ausserhalb des Kühlraumes wieder ab. Dabei handelt es sich um einen permanenten Prozess. Die abzuführende Wärme wird von einem Arbeitsmedium aufgenommen, das von einer Kraftwärmemaschine gekühlt 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 CO₂.

Verteiler- /Kollektorkanäle

Kanal für die Zuleitungs- und Rückleitungsrohre im Publikumsbereich von Kunsteisbahnen.

Leitungskanal

Kanal für die Zuleitungs- und Rückleitungsrohre zwischen Maschinenraum und Verteiler- /Kollektorkanäle.

Lüftung

Eine Lüftungstechnische Anlage dient der Erneuerung bzw. Aufbereitung der Luft im (Maschinen-)Raum. Die dem Raum zugeführte Luft wird als Zuluft bezeichnet, unter Abluft wird abströmende Luft verstanden. Wird die Luft aufbereitet und wieder dem Raum zugeführt, wird dies als Umluft bezeichnet.

Neutralgas

Ein Neutralgas zeichnet sich dadurch aus, dass es im Vergleich zur Umgebungsluft dieselbe Dichte oder eine geringere Dichte hat. Ein Neutralgas wird im Vergleich zu einem Schwergas schneller durch die Bewegung der Luft verteilt. Es tritt ein Verdünnungsprozess der Wolke infolge turbulenter Diffusion ein. Durch die Zumischung von Luft wird die Wolke laufend verdünnt, wobei ihr Gesamtvolumen wächst und das Neutralgas in höhere Luftschichten aufsteigt.

Not-Aus

Not-Aus schaltet die gesamte elektrische Energieversorgung aus (inkl. Steuerung). Elektrische Gefährdungen werden beseitigt. Maschinenantriebe laufen ungesteuert aus.

Not-Halt

Not-Halt stoppt alle Gefährdungen (Bewegungen). Die Energie für die Steuerung bleibt, im Gegensatz zum Not-Aus, erhalten.

Notlüftung, mechanisch

Lüftung, die gemäss [Lit. 10], Kapitel 5.13.3 durch einen oder mehrere im Maschinenraum vorhandene Gassensoren aktiviert wird. Die mechanische Notlüftung muss mit zwei voneinander unabhängigen Notsteuerungen ausgerüstet sein, von denen sich eine ausserhalb und die andere innerhalb des Maschinenraums befindet.

Personen-Aufenthaltsbereich

Gemäss [Lit. 9] ist ein Personen-Aufenthaltsbereich ein von Wänden, Böden und Decken begrenzter Bereich in einem Gebäude, in dem sich Personen über einen längeren Zeitraum aufhalten. Im Sinne der Störfallvorsorge sind für die Ausmasseneinschätzung und in Bezug auf das Treffen der geeigneten Sicherheitsmassnahmen diejenigen Aufenthaltsbereiche von Relevanz, welche regelmässig durch Drittpersonen (z.B. Sporttreibende oder Zuschauer in Kunsteisbahnen und Eisstadion) genutzt werden. Dies betrifft nicht die Aufenthaltsbereiche, welche durch das Personal sowie andere Personen genutzt werden, die in einem Auftragsverhältnis zum Inhaber stehen und sich auf dem Betriebsareal der Anlage aufhalten (z.B. Bauarbeiter, Service-dienstleister etc.).

Performance Level (PL)

Je höher das Risiko, desto höher sind die Anforderungen an Steuerungssysteme. Die Gefährdungssituation wird dabei in fünf Stufen, sogenannte Performance Levels (PL), von PL «a» (niedrig) bis PL «e» (hoch) eingeteilt. Der erforderliche PL wird im Rahmen der Risikobeurteilung nach EN ISO 13849-1 bestimmt bzw. zugeordnet.

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.

Publikumsbereich

Unter Publikumsbereich versteht man eine Fläche, auf welcher sich betriebsfremde Personen bzw. Drittpersonen aufhalten können. Als Publikum gelten diejenigen Personen, welche nicht zum Betriebspersonal gehören. Die für das Publikum zugängliche Flächen sind klar begrenzt/gekennzeichnet. Die Flächen können sich im Freien oder im Gebäude befinden.

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.

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»).

Schwergas

Schwergase haben per Definition eine höhere Dichte als die umgebende Luft. Dies ist der Fall, wenn die Gase ein höheres Molekulargewicht als die Umgebungsluft aufweisen oder Aerosole enthalten, welche die Dichte erhöhen. Schwergase besitzen als Schwergaswolke oder -fahne eine ausgeprägte Eigendynamik. Bedingt durch negative Auftriebskräfte breitet sich die Schwergaswolke in einer flachen, bodennahen Schicht aus.

Sekundärkreis

Bezeichnet denjenigen Teil der Kältemaschine, der mit einem anderen Kälte- bzw. Wärmeträger betrieben wird als das eigentliche Kältemittel, z.B. ein Glykol-Wasser-Gemisch oder CO₂. Der Energieaustausch des Sekundärkreises mit dem Primärkreis erfolgt über Wärmetauscher.

Sicherheits-Integritätslevel (SIL)

Die Definition des Sicherheits-Integritätslevel erfolgt in der Sicherheitsnorm EN 61508, welche aus der internationalen Norm IEC 61508 entstanden ist. Sie definiert:

„Vier Stufen zur Spezifizierung der Anforderung für die Sicherheitsintegrität von Sicherheitsfunktionen, wobei der Sicherheits-Integritätslevel 4 die höchste Stufe der Sicherheitsintegrität und der Sicherheits-Integritätslevel 1 die niedrigste darstellt.“

Die Beurteilung des notwendigen SIL-Levels erfolgt durch die Gerätehersteller anhand der relevanten Normen.

Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist eine Kraftwärmemaschine, die unter Aufwendung mechanischer Arbeit thermische Energie aus einem Reservoir mit niedrigerer Temperatur aufnimmt und als Nutzwärme auf ein zu beheizendes System mit höherer Temperatur überträgt. Der verwendete Prozess ist die Umkehrung des Wärme-Kraft-Prozesses, bei einer Kälteanlage. Wärmepumpen werden u.a. für Heizzwecke eingesetzt.

Zugangsbereiche

Gemäss [Lit. 8] werden die drei folgenden Kategorien von Zugangsbereichen unterschieden. Angemerkt ist explizit in Kapitel 5.1.1, dass die Zugangsbereiche entsprechend den nationalen Anforderungen kategorisiert sein können.

1. Kategorie a — Räume, Gebäudeteile und Gebäude, in denen Schlafeinrichtungen vorhanden sind, Personen in ihrer Bewegung eingeschränkt sind, sich eine unkontrollierte Anzahl von Personen aufhält oder jede Person Zutritt hat, ohne persönlich mit den erforderlichen Sicherheitsvorkehrungen vertraut zu sein.
2. Kategorie b — Räume, Gebäudeteile, Gebäude, in denen sich nur eine begrenzte Anzahl von Personen aufhalten darf, von denen einige mit den allgemeinen Sicherheitsvorkehrungen der Einrichtung vertraut sein müssen.
3. Kategorie c — Räume, Gebäudeteile, Gebäude, zu denen nur befugte Personen Zutritt haben, die mit den allgemeinen und besonderen Sicherheitsvorkehrungen der Einrichtung vertraut sind, und in denen Materialien oder Güter hergestellt, verarbeitet oder gelagert werden.

Zweikreisssystem

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).

Wichtige Abkürzungen

BAFU

Bundesamt für Umwelt

StFV

Verordnung über den Schutz vor Störfällen (Störfallverordnung) (siehe [Lit. 1]). Diese basiert auf dem schweizerischen Umweltschutzgesetz.

ERKAS

Eidgenössischen Risikokataster gemäss StFV. Darin erfasst das BAFU alle der StFV unterstehenden Betriebe sowie ausgewählte Informationen zu diesen.

HFKW

Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe. Diese werden unter anderem als Kältemittel eingesetzt. Nach Inkraftsetzung der revidierten ChemRRV dürfen seit 2013 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 1. Dezember 2022)
- [Lit. 3] 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. – seit 2013 nicht mehr gültig –
2009
- [Lit. 4] Bundesamt für Umwelt BAFU
Anlagen mit Kältemitteln: vom Konzept bis zum Inverkehrbringen. Vollzugshilfe des BAFU zu den Regelungen über Kälteanlagen, Klimaanlagen und Wärmepumpen mit synthetischen Kältemitteln.
5. aktualisierte Auflage, 2022
- [Lit. 5] Bundesamt für Umwelt BAFU
Mengenschwellen gemäss Störfallverordnung (StFV)
Liste mit Stoffen und Zubereitungen.
2017
- [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)
Handbuch zur Störfallverordnung StFV, allgemeiner Teil
2018
- [Lit. 8] SNV Schweizerische Normenvereinigung
SN EN 378-1. Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 1: Grundlegende Anforderungen, Begriffe. Klassifikationen und Auswahlkriterien
Ausgabe / Edition: 2021-02
- [Lit. 9] SNV Schweizerische Normenvereinigung
SN EN 378-2. Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 2: Konstruktion, Herstellung, Prüfung, Kennzeichnung und Dokumentation
Ausgabe / Edition: 2017-45

[Zurück zum Inhalt](#)

- [Lit. 10] SNV Schweizerische Normenvereinigung
SN EN 378-3. Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 3: Aufstellungsort und Schutz von Personen
Ausgabe / Edition: 2021-02
- [Lit. 11] SNV Schweizerische Normenvereinigung
SN EN 378-4. Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen – Teil 4: Betrieb, Instandhaltung, Instandsetzung und Rückgewinnung
Ausgabe / Edition: 2020-04
- [Lit. 12] Eidgenössische Koordinationskommission für Arbeitssicherheit EKAS
EKAS-Richtlinie 6507. Ammoniak, Lagerung und Umgang.
Ausgabe August 1995
- [Lit. 13] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS 110), Neufassung September 2021, Sicherheitstechnische Anforderungen an Ammoniak-Kälteanlagen
Ausgabe: November 2021
- [Lit. 14] Kommission der Europäischen Gemeinschaften
Richtlinie 2014/34/EU (ATEX 137)
Deutsche Sprachfassung vom Mai 2020, 3. Ausgabe
- [Lit. 15] Bundesamt für Umwelt BAFU
Beurteilungskriterien zur Störfallverordnung StFV
2018
- [Lit. 16] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung IFA
GESTIS-Stoffdatenbank
<http://www.dguv.de/ifa/Gefahrstoffdatenbanken/GESTIS-Stoffdatenbank/index.jsp>
- [Lit. 17] Ineris
Ammonia. Large -scale atmospheric dispersion tests
Work Study. 20.12.2005

[Zurück zum Inhalt](#)

- [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] Schweizerische Erdgaswirtschaft
Sicherheit von Erdgashochdruckanlagen. Rahmenbericht zur standardisierten Ausmasseinschätzung und Risikoermittlung
Revision 2010
- [Lit. 20] H.P. Balfanz, M. Hein, P. Wietfeldt
Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit durch abstürzende Flugzeuge
in «Technische Überwachung» TÜ 23, Nr. 3, März 1982.
- [Lit. 21] Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (DECHEMA)
Statuspapier Quelltermberechnung bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzen in der Prozessindustrie – Methodenübersicht und industrielle Anwendung.
2012
- [Lit. 22] American Institute of Chemical Engineers (AIChE), Center for Chemical Process Safety
Workbook of Test Cases for Vapor Cloud Source Dispersion Models.
1989.
- [Lit. 23] BUWAL, Arbeitsgruppe Ammoniak
Methodikbeispiel einer Risikoermittlung für die Ammoniak-Kälteanlage einer Kunsteisbahn
Erstellt durch Basler & Hofmann AG, 1999 (Entwurf / unveröffentlicht)
- [Lit. 24] TNO – The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research
EFFECTS. Modelling the effects of accidental release of hazardous substances
Version 8.1.6, 2011
- [Lit. 25] Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Netherlands
Publication Series on Dangerous Substances (PGS 3), Guidelines for quantitative risk assessment *Purple Book*.
Dezember 2005

[Zurück zum Inhalt](#)

Weitere relevante Quellen

Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie (BMUJF, Österreich)

Referenzszenarien zur Richtlinie 96/82/EG

1999

Dr. B. Covelli, Prof. Ph. Rudolf von Rohr

NH₃-Unfall im Bevorratungsraum

ETH Zürich, Institut für Verfahrenstechnik, April 1998

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

Schweizerische Rückversicherungsgesellschaft

DispTool

Handbuch, Zürich, 1990

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Arbeitsgruppe Flüssiggas-Tankanlagen

Rahmenbericht Flüssiggas-Tankanlagen zum Kurzbericht und zur Risikoeermittlung im Hinblick auf die Störfallvorsorge

Erstellt durch Basler & Hofmann AG, 1992

TNO – The Netherlands Organisation of Applied Scientific Research

Methods for the determination of possible damage, CPR 16E, 1992

Suva Arbeitssicherheit

Merkblatt 2153: Explosionsschutz – Grundsätze, Mindestvorschriften, Zonen-

überarbeitete Ausgabe: Februar 2020

Europäische Kommission, GD Beschäftigung und Soziales

Nicht verbindlicher Leitfaden für bewährte Verfahren im Hinblick auf die Durchführung der Richtlinie 1999/92/EG über Mindestvorschriften zur Verbesserung des Gesundheitsschutzes und der Sicherheit der Arbeitnehmer, die durch explosionsfähige Atmosphären gefährdet werden können

April 2003

Bundesamt für Umwelt BAFU

Mindesthöhe von Kaminen über Dach. Kamin-Empfehlungen.

1. Aktualisierte Auflage, Dezember 2018. Erstausgabe 2013.

A1 Auswertungen von Störungen und Störfällen

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 Anlagenteile 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 Not-Halt-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. 13]).

A2 Auswertung bestehender Risikoermittlungen und Kurzberichte

Um einen Eindruck der gängigen Praxis zur Erstellung von Kurzberichten und Risikoermittlungen zu Ammoniak-Kälteanlagen 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 und 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 und 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 Berichts «Methodikbeispiel einer Risikoermittlung für die Ammoniak-Kälteanlage einer Kunsteisbahn» von 1999 (siehe [Lit. 23]). 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 und 2'000 kg (Kurzberichte) bzw. zwischen 1'200 und 16'000 kg (Risikoermittlungen), wobei die Mehrheit der berücksichtigten Anlagen zwischen 2'000 und 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.
Freisetzungsart	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.
Freisetzungsrate	Mehrheitlich zwischen 1 bis 5 kg/s. Vereinzelt Extremwerte bis 14 kg/s.
Flash-Anteil ³⁶	Szenarioabhängig zwischen 0 bis 100 %.

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

[Zurück zum Inhalt](#)

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 GEXCON, 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.

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.

WIRKUNG AUF PERSONEN

Schadensindikator Praktisch durchgängig «Anzahl Todesopfer», «Anzahl 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 % ³⁷, (Bereich 50 bis 90 %). Allerdings stark situations- bzw. nutzungabhängige Unterschiede mit Extremwerten zwischen 0 bis 100 %.

Gebäudeschutz Wo explizit ausgewiesen, Gebäudeschutz zwischen 50 bis 100 % ³⁸

Konzentration für Gesundheitsschädigung Sehr unterschiedliche Werte verwendet. Teilweise abgeleitet aus Probit-Berechnungen (Probit-Parameter durchgehend gemäss GEXCON), teilweise AEGL-2 und AEGL-3 Werte verwendet.

³⁷ 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 0.7.

³⁸ 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 0.7 reduziert.

A3 Herleitung der Unterstellungskriterien

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

A3.1 Ammoniak-Ausbreitung

Freisetzungs- und Ausbreitungsparameter

In Kapitel 2 wird ein Verfahren vorgeschlagen, nach dem beurteilt werden kann, ob die fragliche Ammoniak-Kälteanlage der StfV unterstellt werden soll, obwohl der Betrieb die Mengenschwelle von 2 t nicht überschreitet. Dieses basiert auf Ausbreitungsberechnungen für definierte Freisetzungsvorgänge. Nachfolgend werden die zugrunde gelegten Annahmen und Parameter beschrieben (einzelne beziehen sich spezifisch auf das verwendete Modell «Effects»; [Lit. 24]).

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

Ausbreitungsberechnungen

Parameter

Schwergasmodell	Die Ausbreitungsversuche durch INERIS (siehe [Lit. 17]) 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): «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 kontinuierliche Freisetzungen berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.2.3). 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 «Horizontal Jet Release» zugrunde gelegt.
Freisetzungsdauer	Die reale Freisetzungsdauer hängt stark von der Leckgrösse bzw. vom betroffenen Leitungsquerschnitt ab. Es wurde angenommen, dass die Freisetzungsdauer unabhängig von der Anlagengrösse 5 min 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.
Freisetzungsrate	Die Freisetzungsraten werden anlagenspezifisch abgeschätzt (vgl. Kapitel 2.2.3).

Korrekturfaktor K_{Ort} Die Korrekturfaktoren für den Freisetzungsort leiten sich aus den folgenden Überlegungen ab:

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 (und soll) 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 Ammoniak in die Ammoniakwolke übergeht, 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.

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. 15] wurde für die Unterstellungskriterien folgender Zusammenhang zwischen Freisetzungsort und Verteilung des Ammoniaks auf die einzelnen dieser Phasen angenommen (Werte für Kälteanlagen sind mit *KA*, Werte für Wärmepumpen sind mit *WP* gekennzeichnet):

	<i>Im Freien</i>		<i>Im Gebäude, angrenzend an Fassade</i>		<i>Im Gebäude, gefangener Raum</i>	
	KA	WP	KA	WP	KA	WP
Gas	20 %	40 %	20 %	40%	20 %	40 %
Aerosol	80 %	60 %	40 %	60 %	40 %	60 %
Lache	0 %	0 %	40 %	0 %	40 %	0 %
Wolkenteil ³⁹	100 % (Gas + Ae-rosol)	100 % (Gas + Ae-rosol)	60 % (Gas + Aero-sol)	100 % (Gas + Ae-rosol)	20 % (nur Gas)	40 % (nur Gas)
K_{Ort}	1.0	1.0	0.6	1.0	0.2	0.4

Hintergrund der unterschiedlichen Werte bildet die Tatsache, dass sich die Flüssigkeitströpfchen auf Hindernissen im Ausbreitungspfad niederschlagen (siehe [Lit. 17]) und daher nach einer Freisetzung im Gebäude nur teilweise ins Freie gelangen.

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.

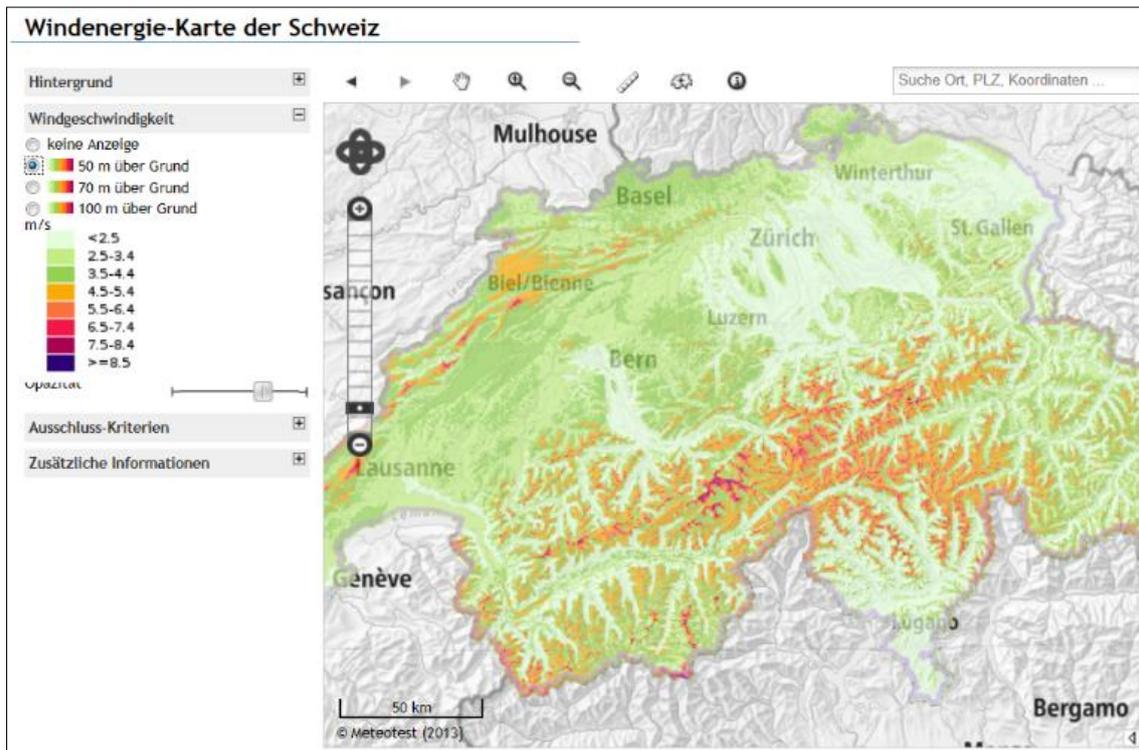
Um die Unterstellungskriterien einfach zu halten, wird für die Ausbreitungsrechnungen generell von einem Aerosolanteil von 80% ausgegangen («Initial Liquid Mass Fraction» = 0.8), und nicht zwischen verschiedenen Aerosolanteilen für unterschiedliche Freisetzungsorte (im Freien, in an Aussenfassade angrenzenden 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.

Diameter of expanded Jet Es wird ein Wert von 1 m zugrunde gelegt.
Eine Sensitivitätsanalyse für diesen Parameter zwischen 0.1 m bis 5 m zeigt, dass dieser Wert konservative Resultate ergibt.

³⁹ «Wolkenteil» 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.

[Zurück zum Inhalt](#)

Temperatur nach Freisetzung	<p>Gemäss Angaben in Effects (siehe [Lit. 24]) soll für kontinuierliche Freisetzungen die Temperatur des Materials nach der Entspannung auf Atmosphärendruck eingegeben werden. Es wurde daher ein Wert von -33 °C 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 0 m 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 20 °C 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 Stabilitätsklasse D (neutral) 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 schwere Schädigungen als möglich ausgewiesen werden. 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 2 m/s zugrunde gelegt (Hinweis: Dies entspricht ebenfalls der Annahme im nicht publizierten Methodikbeispiel). Die effektiven Werte liegen für das Mittel-land meist höher (vgl. Abbildung 24). 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 24) wird davon ausgegangen, dass eine mittlere Windgeschwindigkeit von 2 m/s zweckmässig ist.</p>
Luftfeuchtigkeit	<p>Den Ausbreitungsrechnungen zur Festlegung der Unterstellungskriterien wurde eine relative Luftfeuchtigkeit von 70 % 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.</p>
Oberflächenrauigkeit	<p>Für die Oberflächenrauigkeit wurde die Kategorie «Regular large obstacle coverage (suburb or forest)» eingesetzt. Diese Oberflächenrauigkeit wird als typisch für die Umgebung von relevanten Anlagen innerhalb der betrachteten Distanzen erachtet (überbaute Gebiete).</p>
Messhöhe Personenexposition	<p>Es wurde eine Höhe von 1.50 m zugrunde gelegt.</p> <p>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.</p>
Expositionsdauer	<p>Es wurde eine Expositionsdauer von 30 min zugrunde gelegt. Solange dieser Wert grösser gewählt wird als die angenommene Freisetzungsdauer von 5 min, hat er praktisch keinen Einfluss auf die Ergebnisse.</p>

[Zurück zum Inhalt](#)**Abbildung 24: Mittlere Windgeschwindigkeiten in der Schweiz.**© 2013 Meteotest; Quelle: <http://wind-data.ch/windkarte>

A3.2 Ausbreitungs- und Wirkungsmodellierung

Für eine kontinuierliche Freisetzung während 5 min mit fixer Rate wurden anhand des Ausbreitungsmodells «Effects» 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 ermittelt⁴⁰. 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 Abbildung 25 bis Abbildung 31 dargestellt. Die hinterlegte Farbskala für Bereiche mit unterschiedlichen Letalitäten ist in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Farblegende für die Darstellung der Wolkenausbreitung gemäss Effects (siehe [Lit. 24])

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

⁴⁰ Die Probitfunktion sowie die zugehörigen Parameter sind in der Effects-Software integriert. Es werden die Probitparameter gemäss TNO verwendet (siehe [Lit. 24]). Eine Plausibilitätsüberprüfung mit den AEGL-3 Werten hat gezeigt, dass diese mit der TNO Probitfunktion im entsprechenden tiefen Letalitätsbereich gut korrelieren.

[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 25: Gefährdungsbereiche der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 6 kg/s Ammoniak

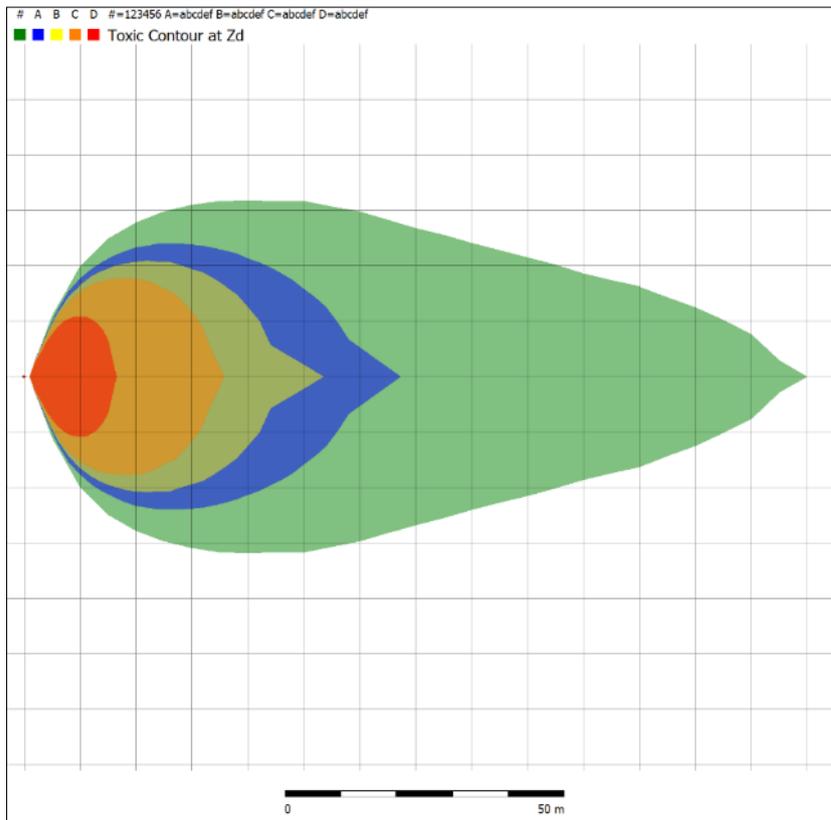
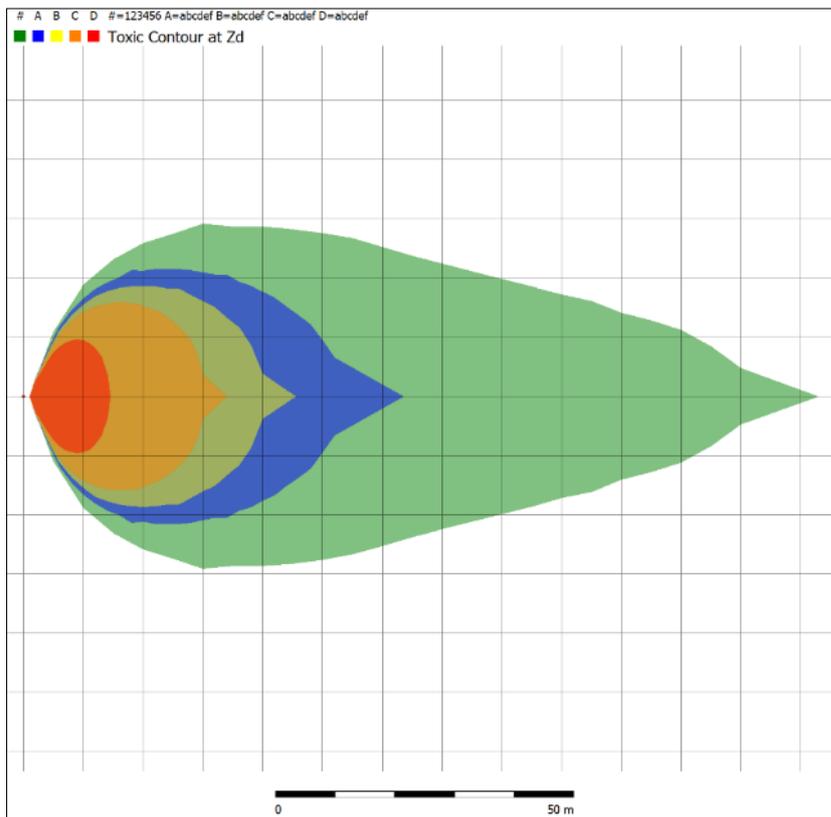


Abbildung 26: Gefährdungsbereiche der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 5 kg/s Ammoniak



[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 27: Gefährdungsbereiche der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 4 kg/s Ammoniak

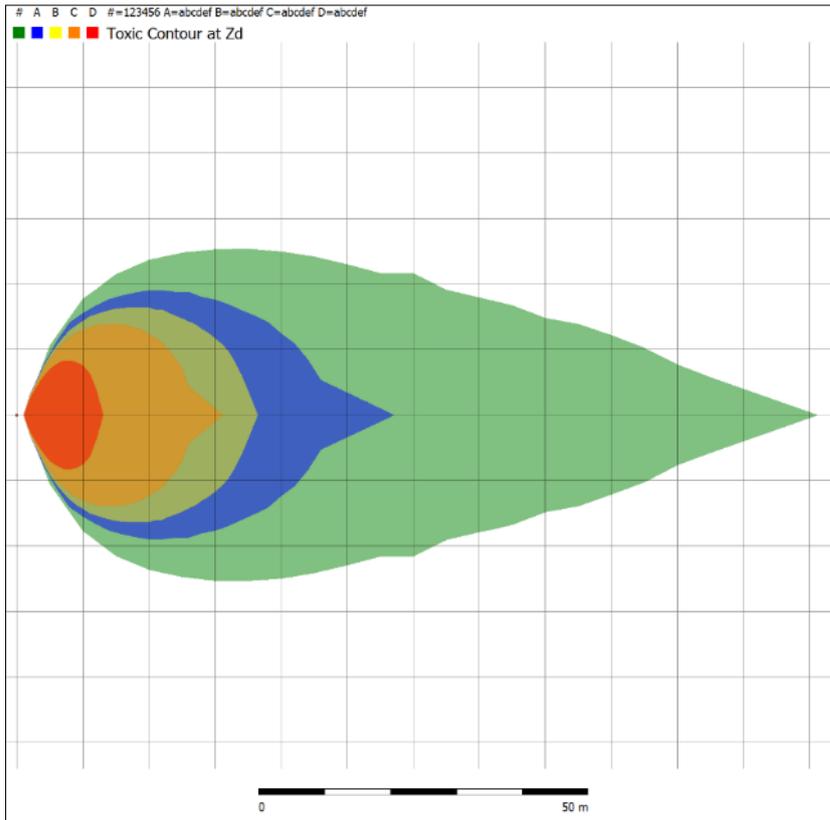
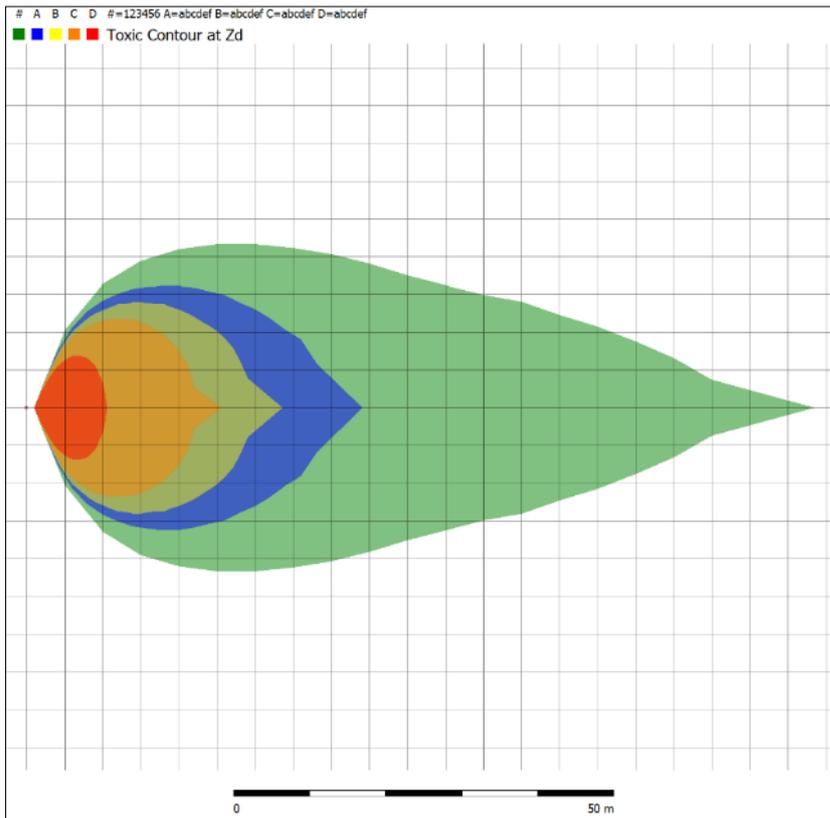


Abbildung 28: Gefährdungsbereiche der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 3 kg/s Ammoniak



[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 29: Gefährdungsbereiche der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 2 kg/s Ammoniak

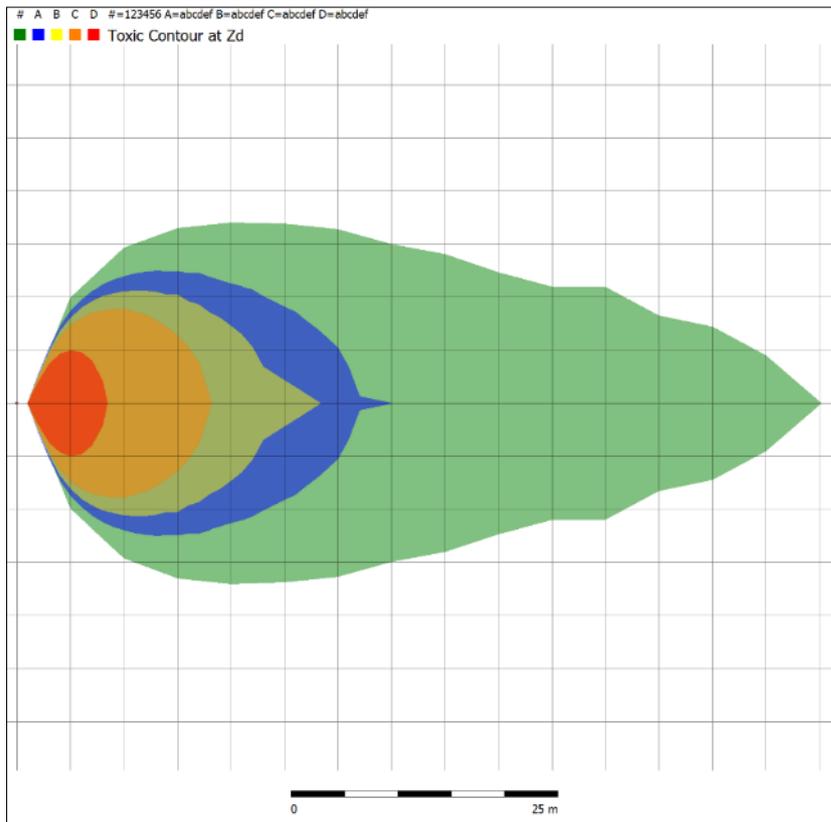
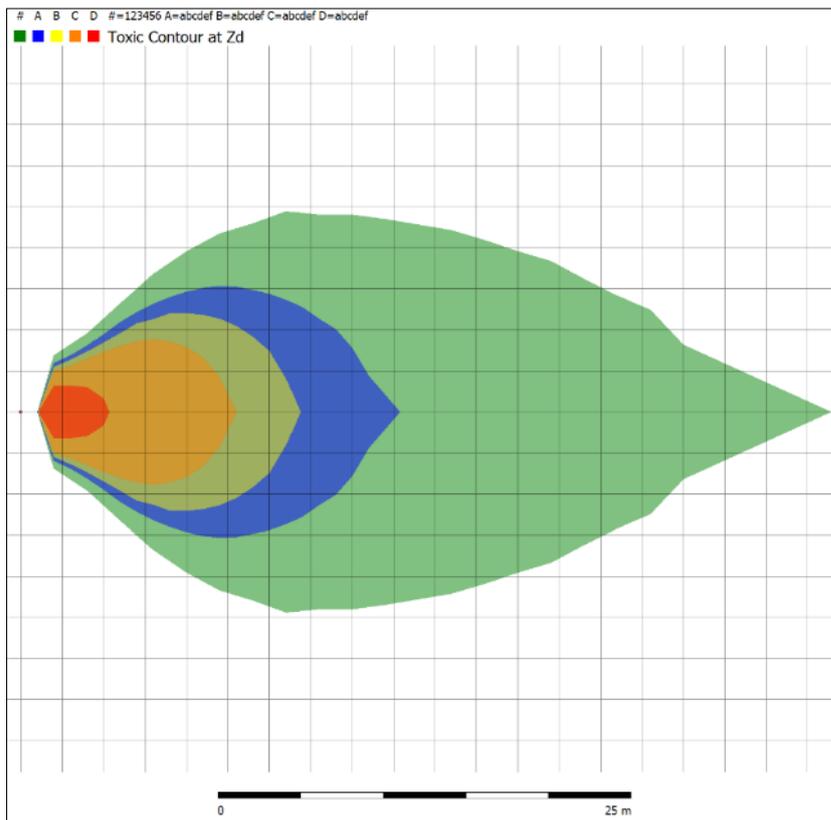
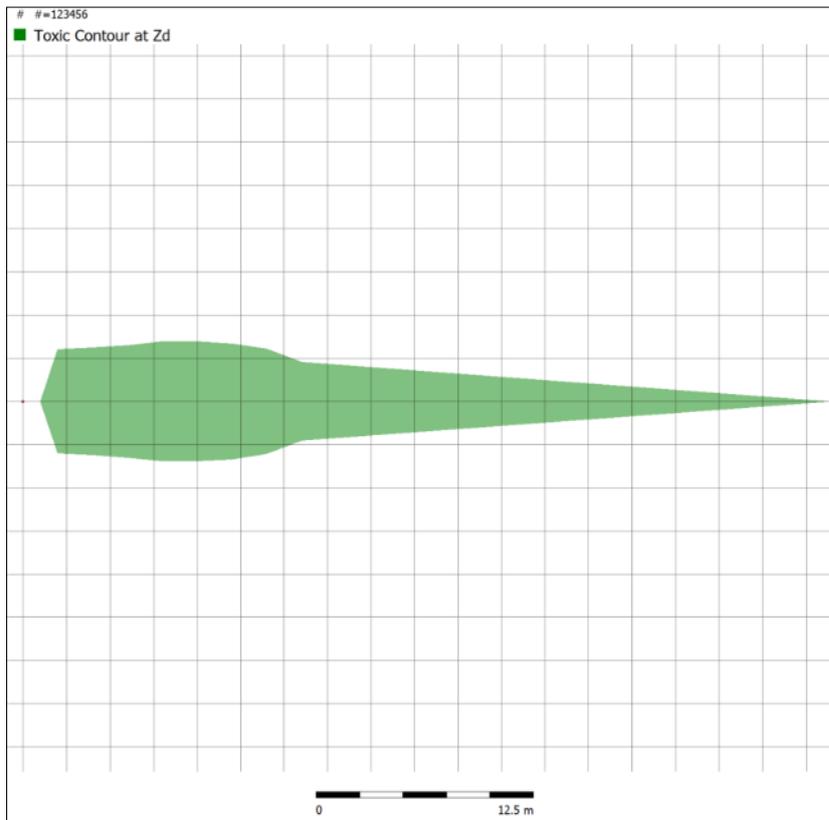


Abbildung 30: Gefährdungsbereiche der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 1 kg/s Ammoniak



[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 31: Gefährdungsbereiche der toxischen Wolke bei kontinuierlicher Freisetzung von 0.5 kg/s Ammoniak

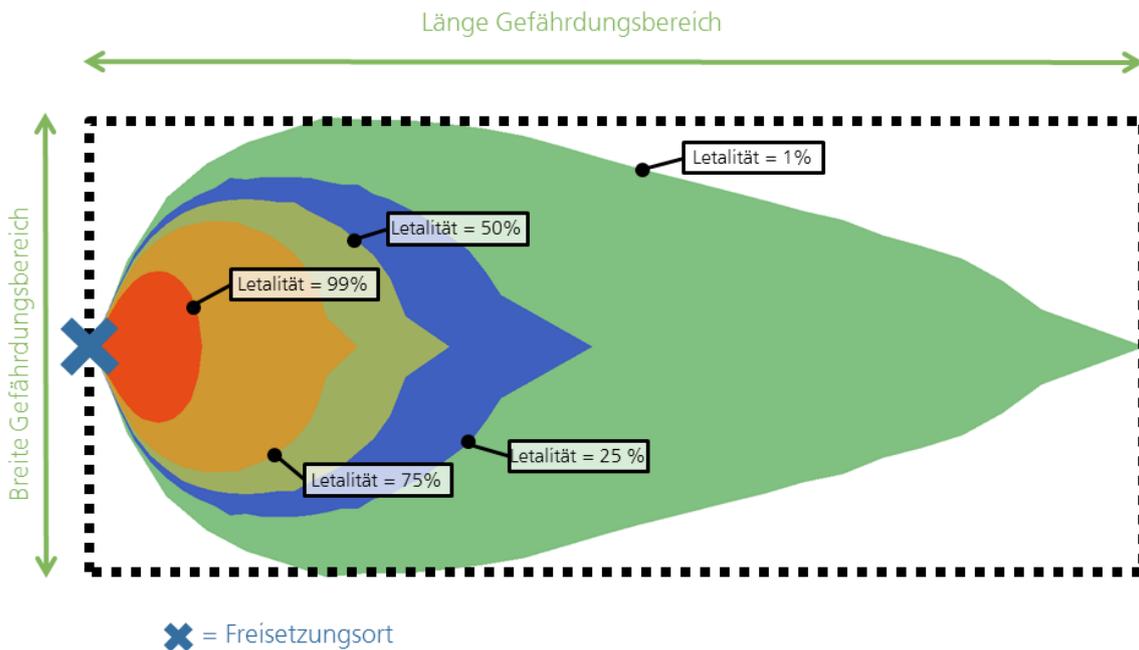


Festlegung der vereinfachten Gefährdungsbereiche

Für eine einfachere Handhabung der Unterstellungskriterien wurde entschieden, den modellierten Gefährdungsbereich im Folgenden konservativ als Rechteck anzunehmen. Ausschlaggebend für die maximale Ausdehnung des vereinfachten 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 32 zeigt eine bildliche Darstellung dieser Vereinfachung.

[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 32: Vereinfachter Gefährdungsbereich der Ammoniakwolke, in welchem für Personen potenziell tödliche Konzentrationen auftreten können (gepunktete Linie)



Eine Zusammenfassung der Gefährdungsbereiche 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: Vereinfachte Gefährdungsbereiche der toxischen Wolke gemäss Berechnungen mit Effects (siehe [Lit. 24]): Letalität \geq 1 %. Basis ist eine Freisetzung mit einer Dauer von 300 s.

Gefährdungsbereich

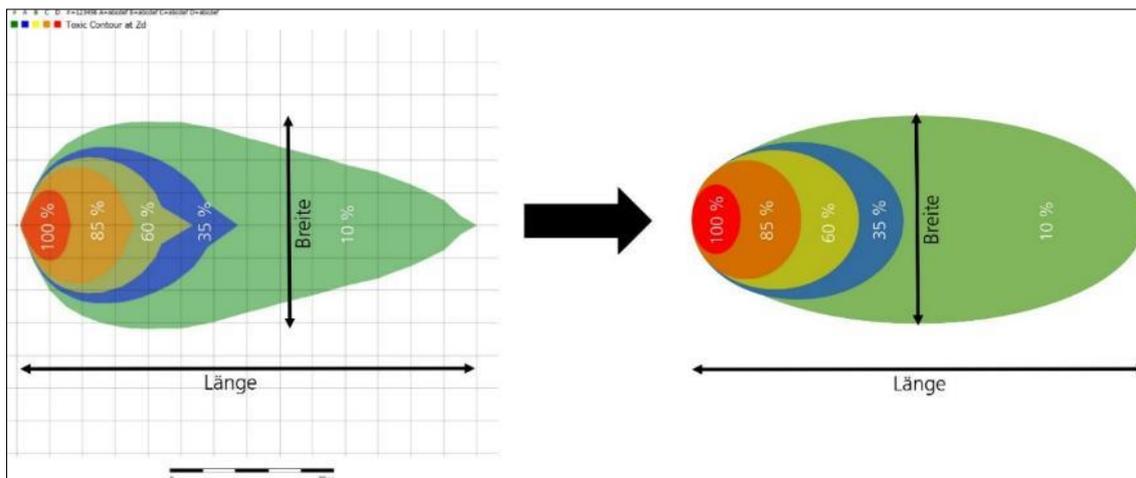
Freisetzungsrate	0.5 kg/s	1 kg/s	2 kg/s	3 kg/s	4 kg/s	5 kg/s	6 kg/s
Länge [m]	45	48	75	100	120	130	140
Breite [m]	10	25	35	50	50	60	60

A3.3 Ermittlung des Schwellenwertes für das Personenaufkommen im Gefährdungsbereich

Berechnung der mittleren Letalität über den Gefährdungsbereich der toxischen Wolke

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 33: 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 1 bis 6 kg/s ergibt sich so durchgehend eine mittlere Letalität von rund 28 %.

Es wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Berechnung der Letalitätsradien 1 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 % und 99 % für die Freisetzungsraten 1 bis 6 kg/s (siehe Beispiel in Abbildung 34);
- Berechnen der Ellipsen aus den berechneten Längen und Breiten der verschiedenen Letalitätsbereiche;
- Festlegen der mittleren Letalitäten pro Letalitätsbereiche:

▪ 1 bis 10 %: 5 %	▪ 60 bis 70 %: 65 %
▪ 10 bis 20 %: 15 %	▪ 70 bis 80 %: 75 %
▪ 20 bis 30 %: 25 %	▪ 80 bis 90 %: 85 %
▪ 30 bis 40 %: 35 %	▪ 90 bis 99 %: 97 %
▪ 40 bis 50 %: 45 %	▪ 99 bis 100 %: 100 %
▪ 50 bis 60 %: 55 %	

[Zurück zum Inhalt](#)

- Berechnen der resultierenden mittleren Letalität für den gesamten Gefährdungsbereich mit Hilfe der mit den Flächenanteilen gewichteten mittleren Letalitäten pro Letalitätsbereiche (siehe Beispiel in Abbildung 35);

Abbildung 34: Auszug der Berechnungen für die Letalitätsbereiche zur Bestimmung der mittleren Letalität

Model: Dense Gas Dispersion: Toxic			
version: 5.13 (21.03.2023)			
Reference: Yellow Book 3rd edition 1997 chapter 4; Ermak, D.L. User manual for SLAB Lawrence Livermore National Laboratory, June 1990			
Parameters			
Inputs	1 kgs-1 / 01%	1 kgs-1 / 10%	1 kgs-1 / 20%
Chemical name (YAWS)	AMMONIA (YAWS)	AMMONIA (YAWS)	AMMONIA (YAWS)
Type of release	Horizontal Jet release	Horizontal Jet release	Horizontal Jet release
Total mass released (kg)			
Mass flow rate of the source (kg/s)	1	1	1
Duration of the release (s)	300	300	300
Initial liquid mass fraction (%)	80	80	80
Fixed pool surface (m ²)			
Diameter of expanded jet (m)	1	1	1
Temperature after release (°C)	-33	-33	-33
X-coordinate of release (m)	0	0	0
Y-coordinate of release (m)	0	0	0
Z-coordinate (height) of release (m)	0	0	0
Ambient temperature (°C)	20	20	20
Meteorological data	Pasquill	Pasquill	Pasquill
Pasquill stability class	D (Neutral)	D (Neutral)	D (Neutral)
Wind speed at 10 m height (m/s)	2	2	2
Inverse Monin-Obukhov length (1/L) (1/m)			
Ambient relative humidity (%)	70	70	70
Roughness length description	Regular large obstacle coverage (suburb or forest).	Regular large obstacle coverage (suburb or forest).	Regular large obstacle coverage (suburb or forest).
Concentration averaging time (s)	300	300	300
Distance from release (Xd) (m)	1000	1000	1000
Distance perpendicular to wind direction (Yd) (m)	0	0	0
Height (Zd) (m)	1.5	1.5	1.5
Start of exposure (after moment of release) (s)	0	0	0
Exposure duration (s)	1800	1800	1800
Contour plot accuracy (%)	0.1	0.1	0.1
Calculate toxic contour by	Fraction of mortality	Fraction of mortality	Fraction of mortality
Threshold fraction of mortality F (%)	1	10	20
Threshold toxic dose D (s*(kg/m ³) ⁿ)			
Predefined wind direction	User defined	User defined	User defined
Wind comes from (North = 0 degrees) (deg)	270	270	270
Results	1 kgs-1 / 01%	1 kgs-1 / 10%	1 kgs-1 / 20%
Dose at (Xd, Yd, Zd) (min*(mg/m ³) ⁿ)	9057.9	9057.9	9057.9
Fraction of mortality at (Xd, Yd, Zd) (%)	0	0	0
Distance to toxic dose D or fraction of mortality F (m)	48.91	27.697	24.502
Length of toxic contour (m)	47.903	26.677	23.478
Width of toxic contour (m)	23.944	18.329	16.075
Inverse Monin-Obukhov length (1/L) used (1/m)	0	0	0

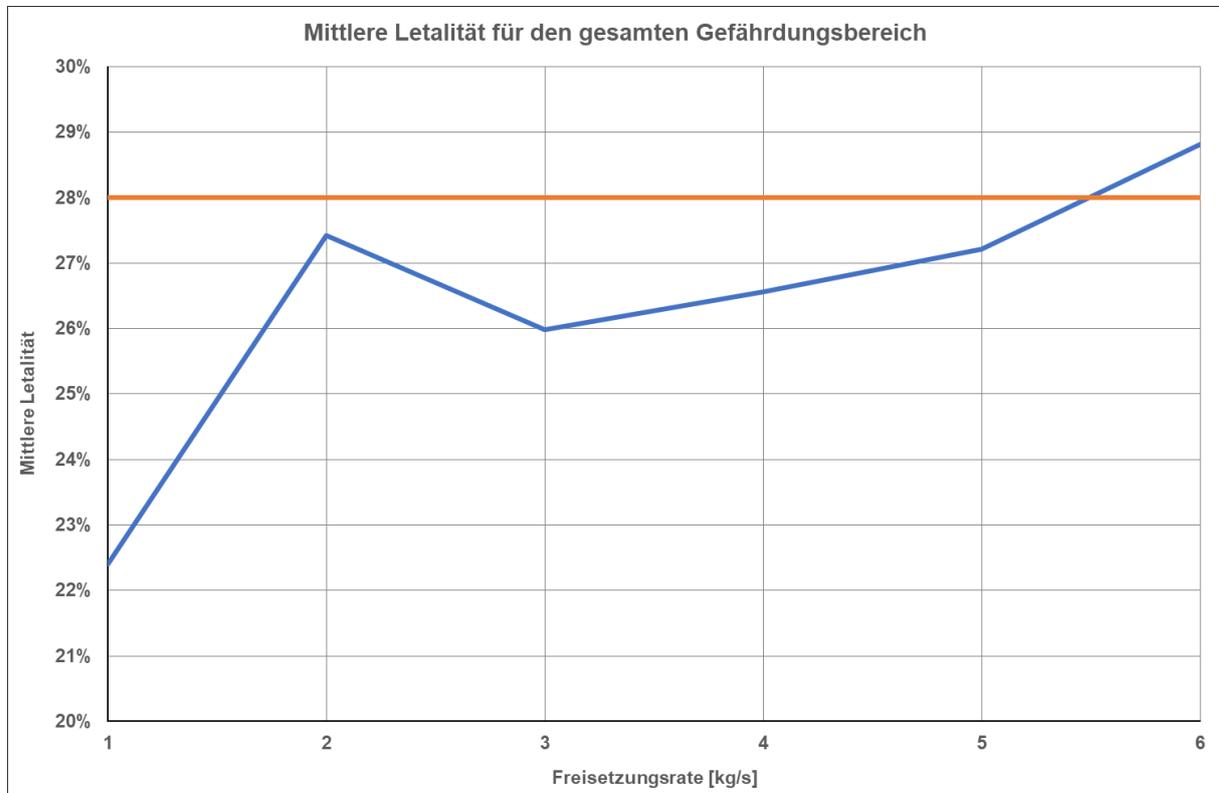
Abbildung 35: Berechnung der mittleren Letalität für den gesamten Gefährdungsbereich für die Freisetzungsrate 1 kg/s

1 kg/s											
Letalität	1%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	99%
L [m]	48	27	23	20	17	16	14	13	11	9	4
B [m]	24	18	16	14	13	12	11	9	8	6	3
F [m ²]	901	384	296	229	179	147	115	93	69	42	11
F' [m ²]	517	88	67	50	32	32	22	24	27	32	11
λ _m	5%	15%	25%	35%	45%	55%	65%	75%	85%	97%	100%
λ_{0, 1 kg/s}	22%										

[Zurück zum Inhalt](#)

Als Resultat ergab sich eine Streuung der mittleren Letalitäten für den gesamten Gefährdungsbereich von 22 bis 29 % (siehe Abbildung 36).

Abbildung 36: Mittlere Letalität für den gesamten Gefährdungsbereich für die verschiedenen Freisetzungsraten



Aufgrund dieser Streuung wurde ein eher konservativer Wert von 28 % gewählt.

Schwellenwert 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 $\geq 1\%$ ermittelt, die gerade zu einem Ausmass von 10 Todesopfern führt. Dazu wurde die mittlere Letalität über die gesamte Zone mit Letalität $\geq 1\%$ 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 mehr als 0.5 bis 6 kg/s nahezu konstant ist, während die Ausdehnung der Wolke mit zunehmender Freisetzungsrates zunimmt. Für die beurteilten Freisetzungsrates ergibt sich daher ein einheitlicher Schwellenwert 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 Schwellenwert für das Personenaufkommen von 100 Personen im Freien ergibt.

A3.4 Anwendungsbeispiel der Unterstellungskriterien

Ein Logistikunternehmen will ein neues Kühllager erstellen und befindet sich derzeit in der Projektierungsphase. Im Rahmen des Baubewilligungsverfahrens stellt sich die Frage, ob die Kälteanlage mit Ammoniak im Rahmen der StfV zu beurteilen ist.

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 CO₂)
- 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 37 schematisch dargestellt. Für die Anlage ergibt sich eine maximale Freisetzungsrates von 3.0 kg/s.

Abbildung 37: 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%	16%
		40% (25% + 15%)	60%
	↓	↓	↓
Freisetzungsort	n.A.	An Fassade grenzend	Im Freien
Gas- und Aerosolanteil	---	0.6	1.0
	↓	↓	↓
Entleerungsdauer	5 min	5 min	5 min
	↓	↓	↓
Freisetzungsrates	---	2.8 kg/s	0.9 kg/s
	---	(rund 3.0 kg/s)	(rund 1.0 kg/s)

[Zurück zum Inhalt](#)

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 Anlage teilweise erheblich von den Angaben in Tabelle 1 abweichen kann. Die dortigen Angaben sind daher mit Vorsicht zu verwenden.

Schritt 2: Ermittlung des Schwellenwertes 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.

Tabelle 12: Bestimmung des Gefährdungsbereiches und des maximalen Personenaufkommens anhand der maximalen Freisetzungsrates gemäss Tabelle 4.

Schwellenwert Personenaufkommen	Gefährdungsbereich		Schwellenwert für Personenaufkommen P_{Ref} im Gefährdungsbereich
Freisetzungsrates [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) darübergelegt.

Abbildung 38: 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 schweren Schädigungen 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, siehe Abbildung 36).

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

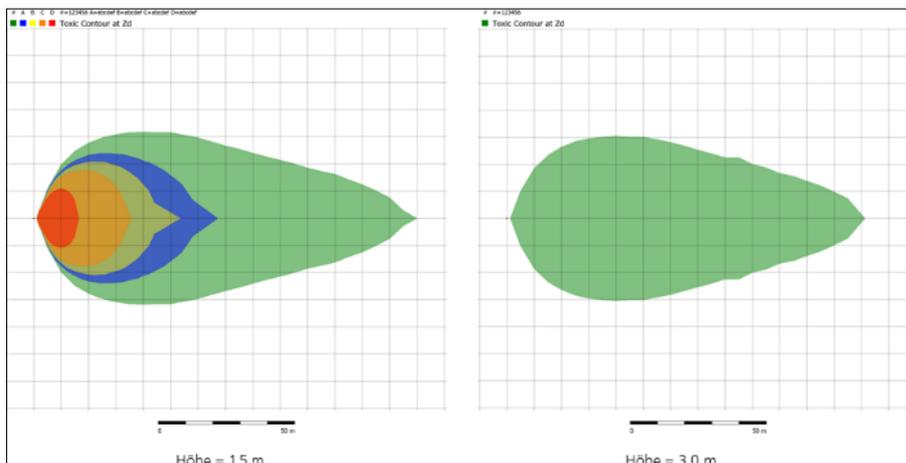
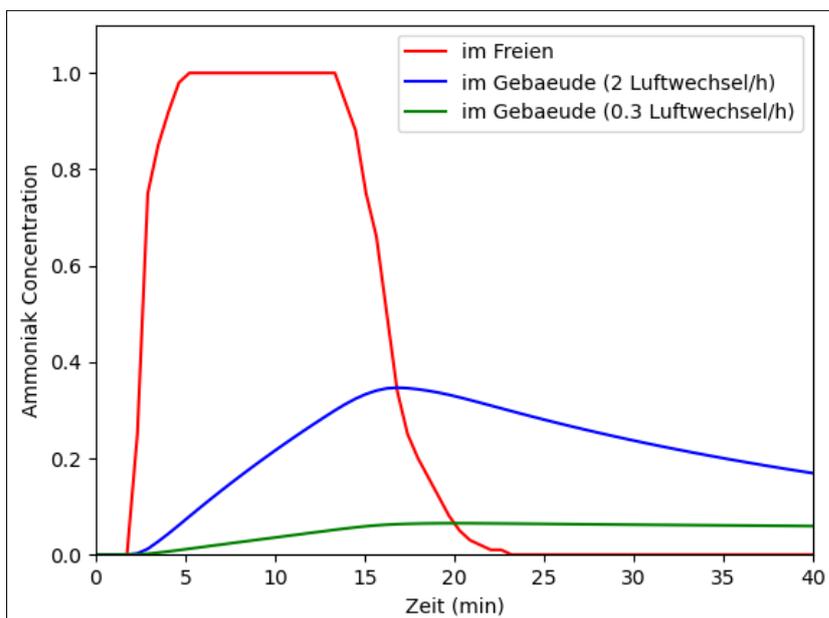


Abbildung 40: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem Konzentrationsverlauf von Ammoniak im Freien und im Gebäude sowie dessen Abhängigkeit von der Luftwechselrate



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.

Luftwechselraten

	<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)

[Zurück zum Inhalt](#)

Herleitung der Schutzwirkung von Gebäuden

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

Letalitätszone	Innerhalb R ₉₉	Zwischen R ₅₀ – R ₉₉	Zwischen R ₁ – R ₅₀
Mittlere Letalität im Freien in diesem Bereich	99 %	87 %	22 %
Mittlere Ammoniak-Konzentration (Expositionsdauer 10 min)	30'500 mg/m ³	16'500 mg/m ³	6'390 mg/m ³
Natürliche Lüftung			
ca. 0,3 Luftwechsel pro Stunde			
Mittlere Konzentration im Gebäude nach 10 min ⁴¹	1'525 mg/m ³	825 mg/m ³	320 mg/m ³
Mittlere Letalität im Gebäude	0 %	0 %	0 %
Gebäudeschutz⁴² Büros, Schulen		95 %⁴³	
Ca. 50 % mit natürlicher Lüftung und 50 % mit mechanischer Lüftung			
ca. 1 Luftwechsel pro Stunde			
Mittlere Konzentration im Gebäude nach 10 min ⁴¹	5'080 mg/m ³	2'750 mg/m ³	1'065 mg/m ³
Mittlere Letalität im Gebäude	11 %	0.7 %	0 %
Gebäudeschutz⁴² Industrie	90 %	90 %⁴³	95 %⁴³
100 % mechanische Lüftung (z.B. industrielle Nutzung)			
ca. 2 Luftwechsel pro Stunde			
Mittlere Konzentration im Gebäude nach 10 min ⁴¹	10'170 mg/m ³	5'500 mg/m ³	2'130 mg/m ³
Mittlere Letalität im Gebäude	56 %	14 %	0.1 %
Gebäudeschutz⁴² Industrie	45 %	85 %	95 %⁴³

⁴¹ 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.

⁴² Ein Gebäudeschutz von beispielsweise 70 % bedeutet, dass sich die Letalität für Personen, die sich gemäss Modell zum Zeitpunkt des Ereignisses in Gebäuden aufhalten, gegenüber der Freifeldletalität um 0.7 reduziert.

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

Fazit zur Schutzwirkung von Gebäuden

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.

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 so weit wie möglich an die folgenden Vorgaben halten. Abweichungen sind zu begründen.

A5.1 Ammoniak-Ausbreitung

Freisetzungs- und Ausbreitungsparameter für Kurzberichte

Nachfolgend werden die Annahmen beschrieben. Einzelne beziehen sich spezifisch auf das verwendete Modell «Effects» (siehe [Lit. 24]). 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	<p>Auf Stufe Kurzbericht wird als Freisetzungsmenge generell der gesamte Ammoniak-Inhalt der Anlage angenommen, sofern sich dieser im selben Kreislauf befindet. Bei Anlagen mit mehreren getrennten Ammoniakkreisläufen werden diese separat beurteilt.</p> <p>Die für die Wolkenausbreitung relevante Ammoniakmenge 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.</p>
Höhe der Freisetzung	Anlagenspezifische Angabe (Höhe der Abluftöffnung ins Freie bei Freisetzung im Gebäudeinnern bzw. des von einem Leck betroffenen Anlageteils im Freien).

[Zurück zum Inhalt](#)

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 (siehe [Lit. 17]) 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).

Freisetzungs-ort	Im Freien	Im Gebäude, angrenzend an Fassade	Im Gebäude, gefangener Raum
Weg ins Freie		via Fassaden- öffnung	via Lüftung über Dach
Ausbreitungsmodell	Schwergas	Schwergas	Neutralgas

Meteorologische Stabilitätsklasse Es wird die meteorologische **Stabilitätsklasse D (neutral)** gemäss der Skala von Pasquill-Gifford zugrunde gelegt.

Oberflächenrauigkeit Standortspezifische Angabe

Windgeschwindigkeit Den Ausbreitungsrechnungen soll eine Windgeschwindigkeit von **2 m/s** 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 **20 °C** 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 **70 %** 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.

[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 41: Mittlere Windgeschwindigkeiten in der Schweiz.

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

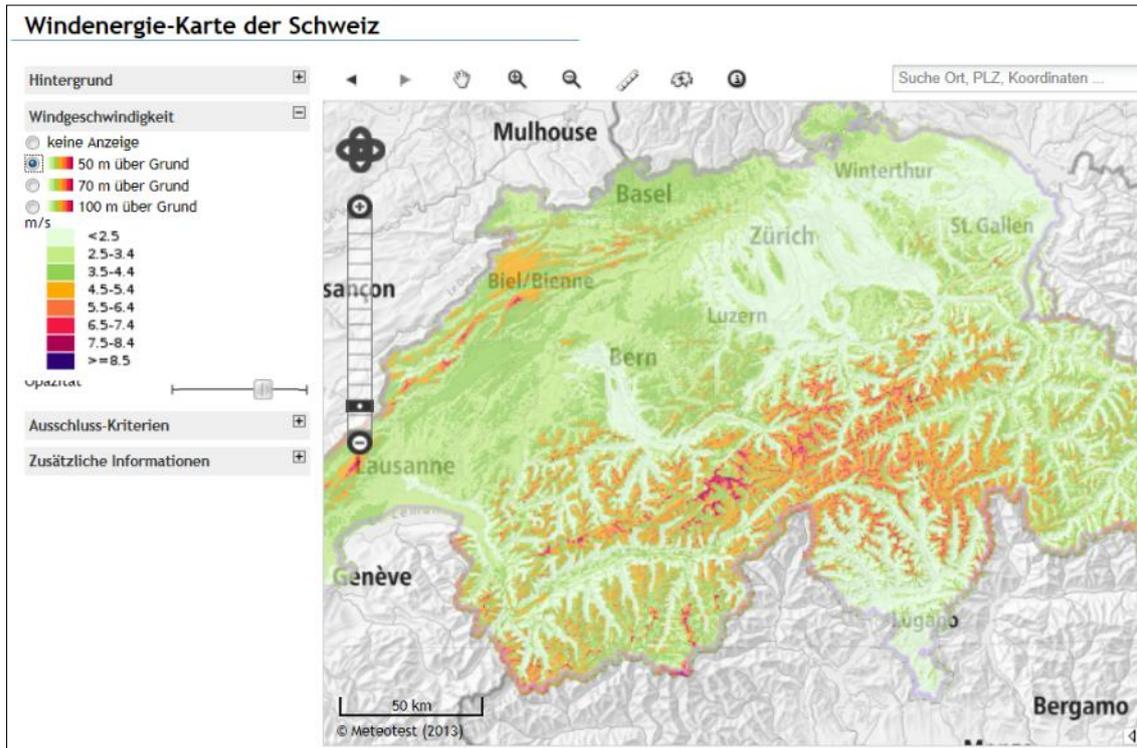


Tabelle 16: Parameter für Ausbreitungsrechnungen bei Freisetzungen mit kontinuierlichem Quellterm (Stufe Kurzbericht)

Kontinuierliche

Freisetzung

Begründung

Parameter

Austrittspunkt ins Freie Kontinuierliche Freisetzungen: Bei kontinuierlichen Freisetzungen im Gebäude ist als Austrittspunkt ins Freie grundsätzlich die **Austrittsöffnung der entsprechenden Lüftungsanlage** 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 10 min beträgt.

Zur Verifizierung dieser Annahme wurde die Sensitivität der Letalitätsradialen bzgl. der Freisetzungsdauer bzw. -rate bei konstanter Freisetzungsmenge ermittelt. Für die Freisetzungsdauer wurde der Bereich zwischen 2 und 10 min überprüft. Dabei zeigte sich, dass die Freisetzungsdauer (im untersuchten Bereich) nur einen geringfügigen Einfluss auf die Letalitätsradialen 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:

Freisetzungsort	Im Freien		Im Gebäude, angrenzend an Fassade				Im Gebäude, gefangener Raum	
	Weg ins Freie		via Fassadenöffnung (Ausnahme)		via Lüftung über Dach (Regelfall)		via Lüftung über Dach	
Quellterm	Kontinuierlich KA	WP	Kontinuierlich KA	WP	Kontinuierlich KA	WP	Kontinuierlich KA	WP
Gas	20 %	40 %	20 %	40 %	20 %	40 %	20 %	40 %
Aerosol	80 %	60 %	40 %	60 %	40 %	60 %	40 %	60 %
Lache	0 %	0 %	40 %	0 %	40 %	0 %	40 %	0 %
Wolken- teil ⁴⁴	100 % 100 % (Gas + Aerosol)		60 % 100 % (Gas + Aerosol)		20 % 40 % (nur Gas)		20 % 40 % (nur Gas)	
K_{Ort}	1.0	1.0	0.6	1.0	0.2	0.4	0.2	0.4

Beispiel: Bei einem Kälteanlageninhalt 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 (siehe [Lit. 17]) 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 Wolkenausbreitung⁴⁵.

⁴⁴ «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.

⁴⁵ Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Lachenfläche begrenzt ist (Regeln der Technik gemäss SN EN 378-3 (siehe [Lit. 10], Kapitel 5.14.3.1))

[Zurück zum Inhalt](#)

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:				
<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 (Ausnahme)	via Lüftung über Dach (Regelfall)	via Lüftung über Dach
Ausbreitungsmodell	Schwergas KA WP		Schwergas KA WP	Neutralgas	Neutralgas
Aerosolanteil in der Wolke	80 % ⁴⁶	60 %	67 % ⁴⁷	60 %	0 %

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

Spontane Freisetzung	Begründung
<i>Parameter</i>	
Austrittspunkt ins Freie	Bei spontanen Freisetzungen ist der Standort der Anlage (im Freien) bzw. die Schwachstelle des Maschinenraumes (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 10 min 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. Regeln der Technik, Kapitel 3.2.1). 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 Ammoniakmenge konstant gehalten wird.

⁴⁶ Es wird angenommen, dass 20 % des freigesetzten Ammoniaks spontan verdampfen und die restlichen 80% als Aerosol mitgerissen werden (gemäss [Lit. 15], «kleine kontinuierliche Freisetzung im Freien»). Der Aerosolanteil in der Wolke beträgt daher 80 %.

⁴⁷ Es wird angenommen, dass 20 % des freigesetzten Ammoniaks spontan verdampfen und weitere 40 % als Aerosol mitgerissen werden (gemäss [Lit. 15][Lit. 6], «kleine kontinuierliche Freisetzung im Gebäude»). Die restlichen 40 % bilden eine Flüssigkeitslache. Der Aerosolanteil in der Wolke beträgt daher 67 %.

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:

<i>Freisetzungsort</i>	<i>Quellterm</i>
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)⁴⁸</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.

⁴⁸ Beträgt die Menge an freigesetztem Ammoniak mehr als 160 kg pro m³ Raumvolumen, können infolge des Druckaufbaus je nach Bauweise auch die Wände versagen. Quelle: US EPA, [Lit. 18], S. 5.

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. 15] 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		via Fassadenöffnung (Regelfall)	via Lüftung über Dach (Ausnahme)	via Lüftung über Dach
Quellterm	spontan	spontan	kontinuierlich	kontinuierlich
Gas	20 %	20 %	20 %	20 %
Aerosol	20 %	20 %	20 %	20 %
Lache	60 %	60 %	60 %	60 %
Wolke ⁴⁹	40 % (Gas + Aerosol)	40 % (Gas + Aerosol)	20 % (nur Gas)	20 % (nur Gas)
K_{Ort}	0.4	0.4	0.2	0.2

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.

Hintergrund der unterschiedlichen Werte bildet die Tatsache, dass sich die Flüssigkeitströpfchen auf Hindernissen im Ausbreitungspfad niederschlagen (siehe [Lit. 17]) 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 Wolkenausbreitung⁵⁰.

⁴⁹ Grundannahme: Das freigesetzte Ammoniak verteilt sich folgendermassen über die verschiedenen Phasen: 20 % spontane Verdampfung, 20 % Aerosol, 60 % in der Flüssigkeitslache. Quelle: [Lit. 15], S.3.

⁵⁰ Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die Lachenfläche begrenzt ist (Regeln der Technik gemäss SN EN 378-3 (siehe [Lit. 10], Kapitel 5.14.3.1) halten

[Zurück zum Inhalt](#)

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:

Freisetzungsort	Im Freien	Im Gebäude, angrenzend an Fassade	Im Gebäude, gefangener Raum
Weg ins Freie		via Fassadenöffnung (Regelfall)	via Lüftung über Dach (Ausnahme)
Aerosolanteil in der Wolke	50 % ⁵¹	50 % ⁵²	0 %

A5.2 Festlegung der vereinfachten Gefährdungsbereiche

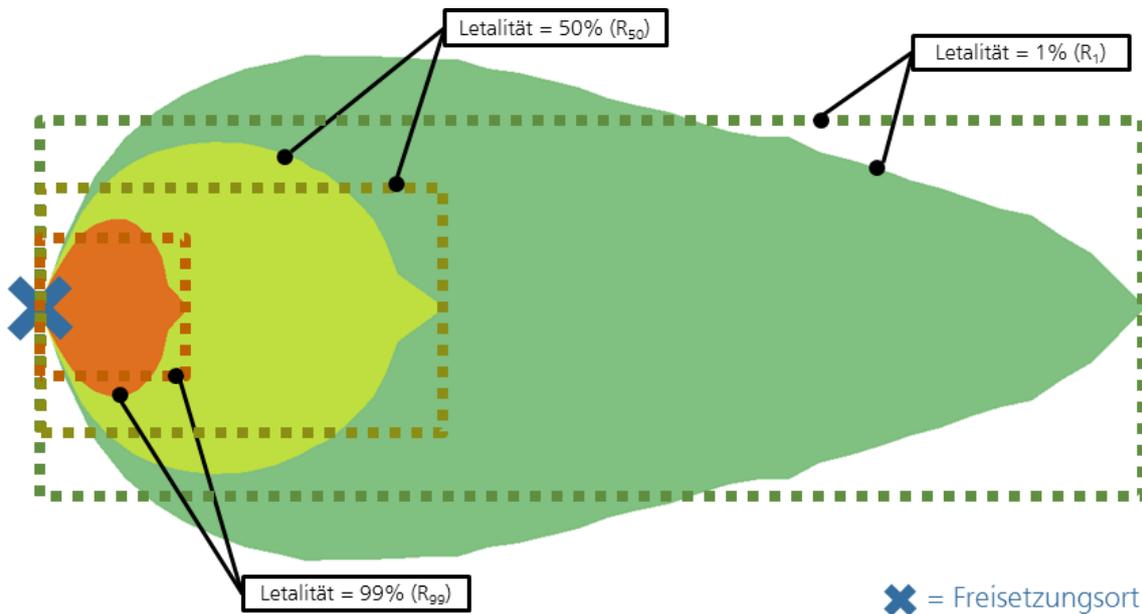
Methodik

Wird die Ausbreitung von Gasen mit entsprechenden Software-Hilfsmitteln berechnet, ergeben sich in der Regel tropfenförmige Flächen. An deren Rand herrscht eine definierte Letalität für Personen, welche sich während einer bestimmten Zeitdauer dort aufhalten. Als Basis für die Ausmasseinschätzung werden diejenigen Gefährdungsbereiche berücksichtigt, an deren Rand die 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 42). 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.

⁵¹ Es wird angenommen, dass 20 % des freigesetzten Ammoniaks spontan verdampfen, und weitere 20 % als Aerosol mitgerissen werden. (Gemäss [Lit. 15], «grosse spontane Freisetzung im Freien»)

⁵² 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 zurück.

Abbildung 42: Die Flächen des Gefährdungsbereiches werden vereinfacht als gleichflächige Rechtecke angenommen.



A5.3 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 GEXCON (siehe [Lit. 24]) 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.

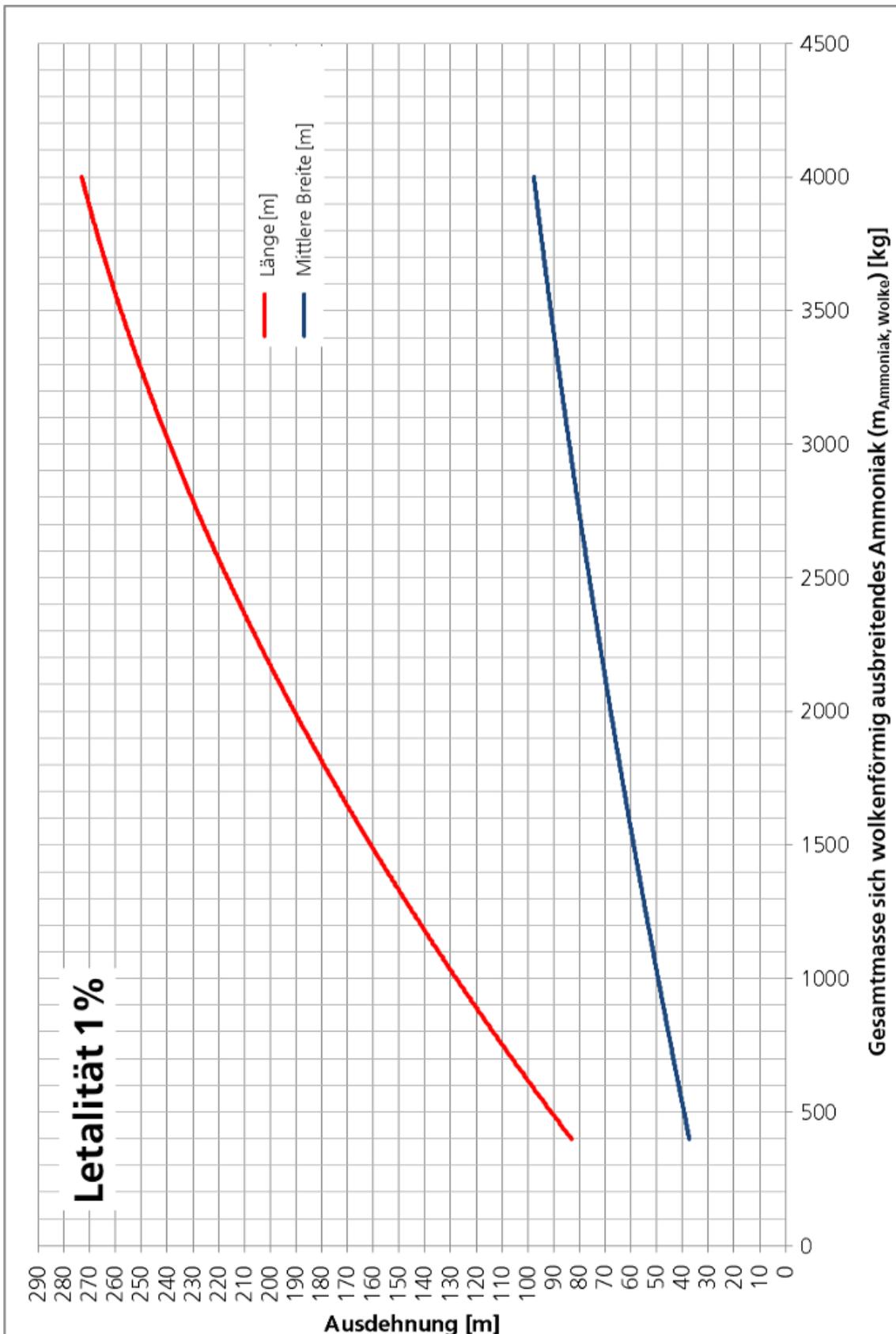
Vereinfachte Gefährdungsbereiche für Ausmassabschätzungen auf Stufe Kurzbericht

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

[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 43: Spontane Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 1 %

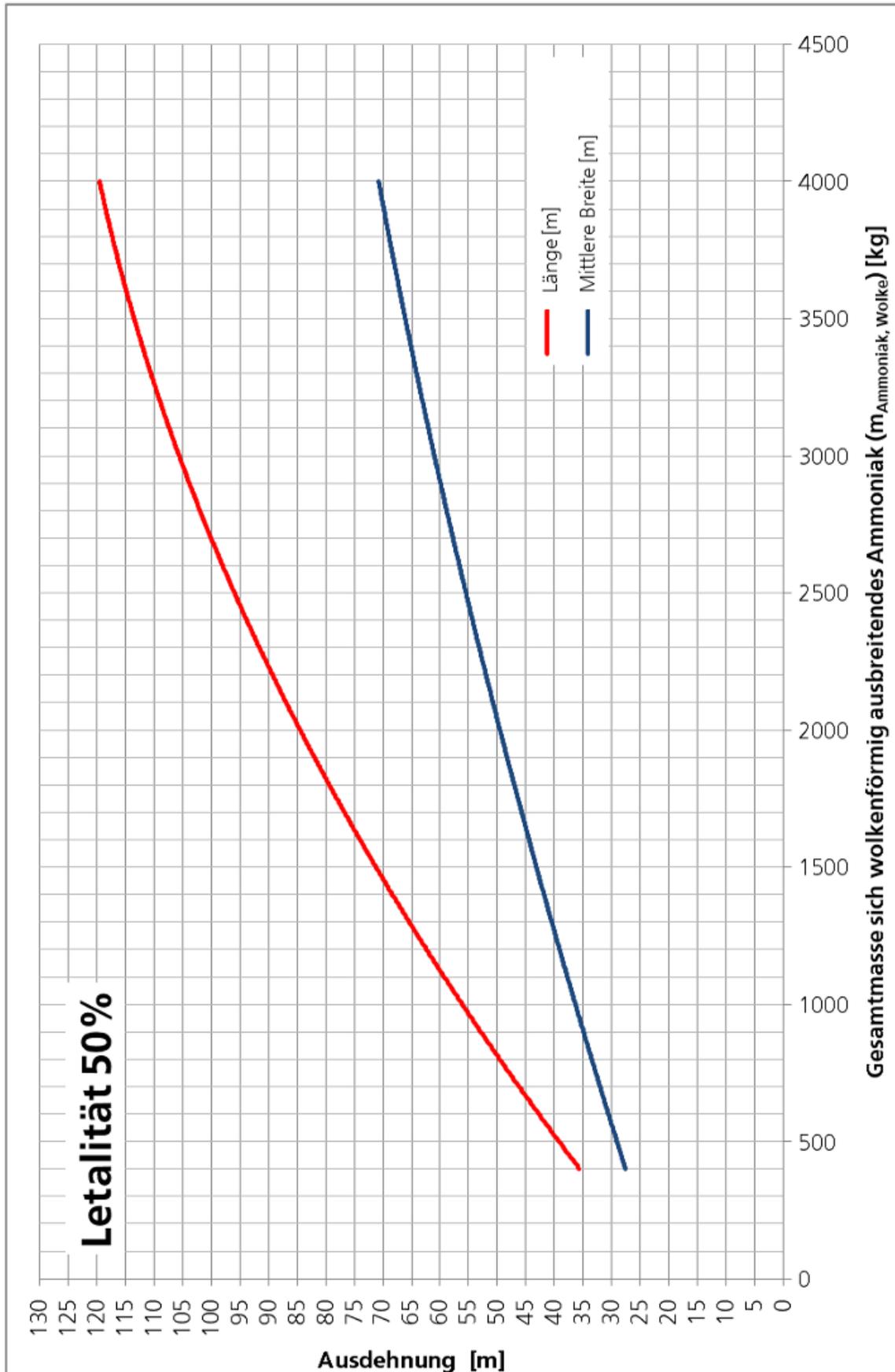
Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von $\geq 1\%$ bei einer Freisetzung mit spontanem Quellterm; Aerosolanteil 50 %.



[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 44: Spontane Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 50 %

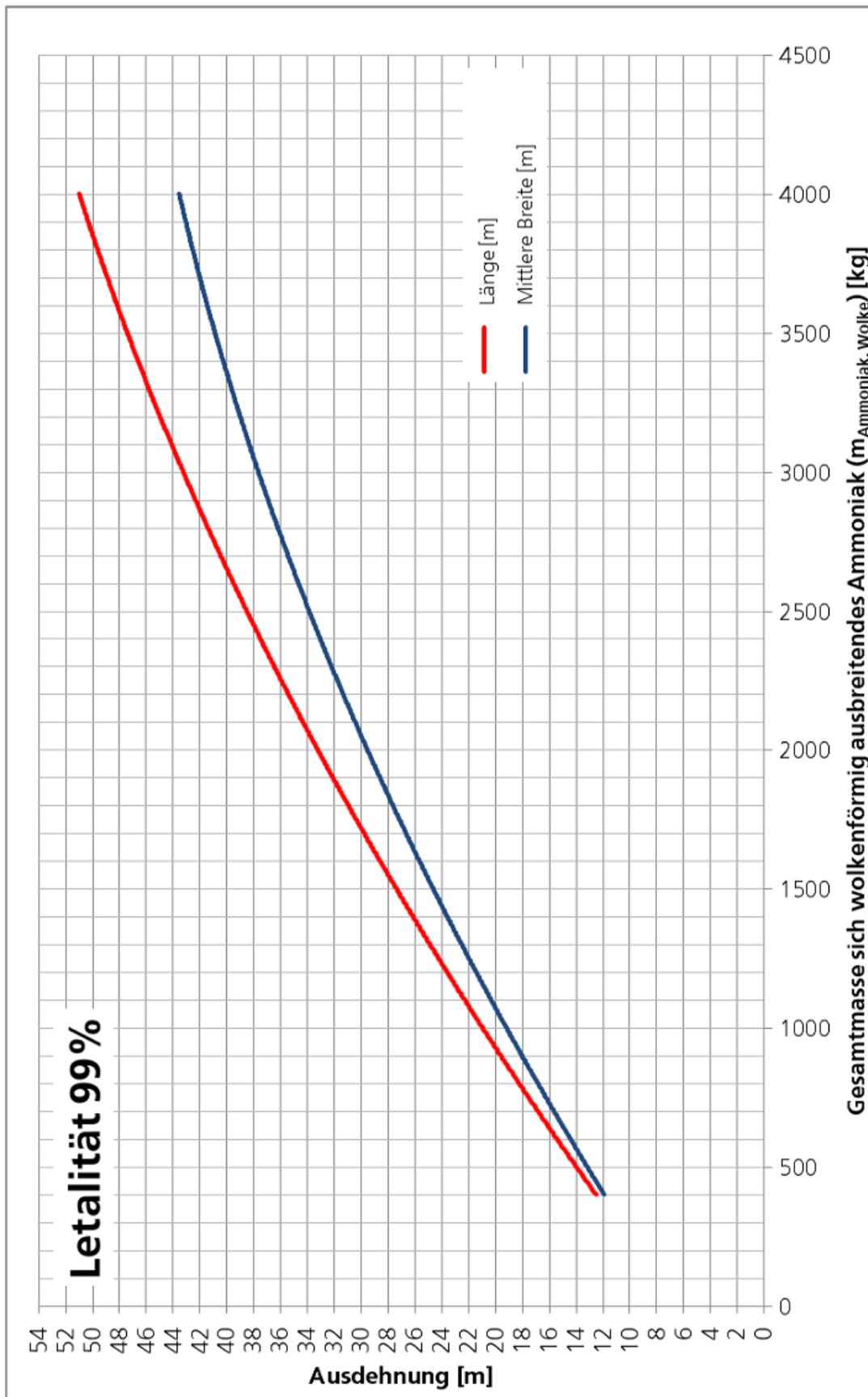
Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von $\geq 50\%$ bei einer Freisetzung mit spontanem Quellterm; Aerosolanteil 50 %.



[Zurück zum Inhalt](#)

Abbildung 45: Spontane Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 99 %

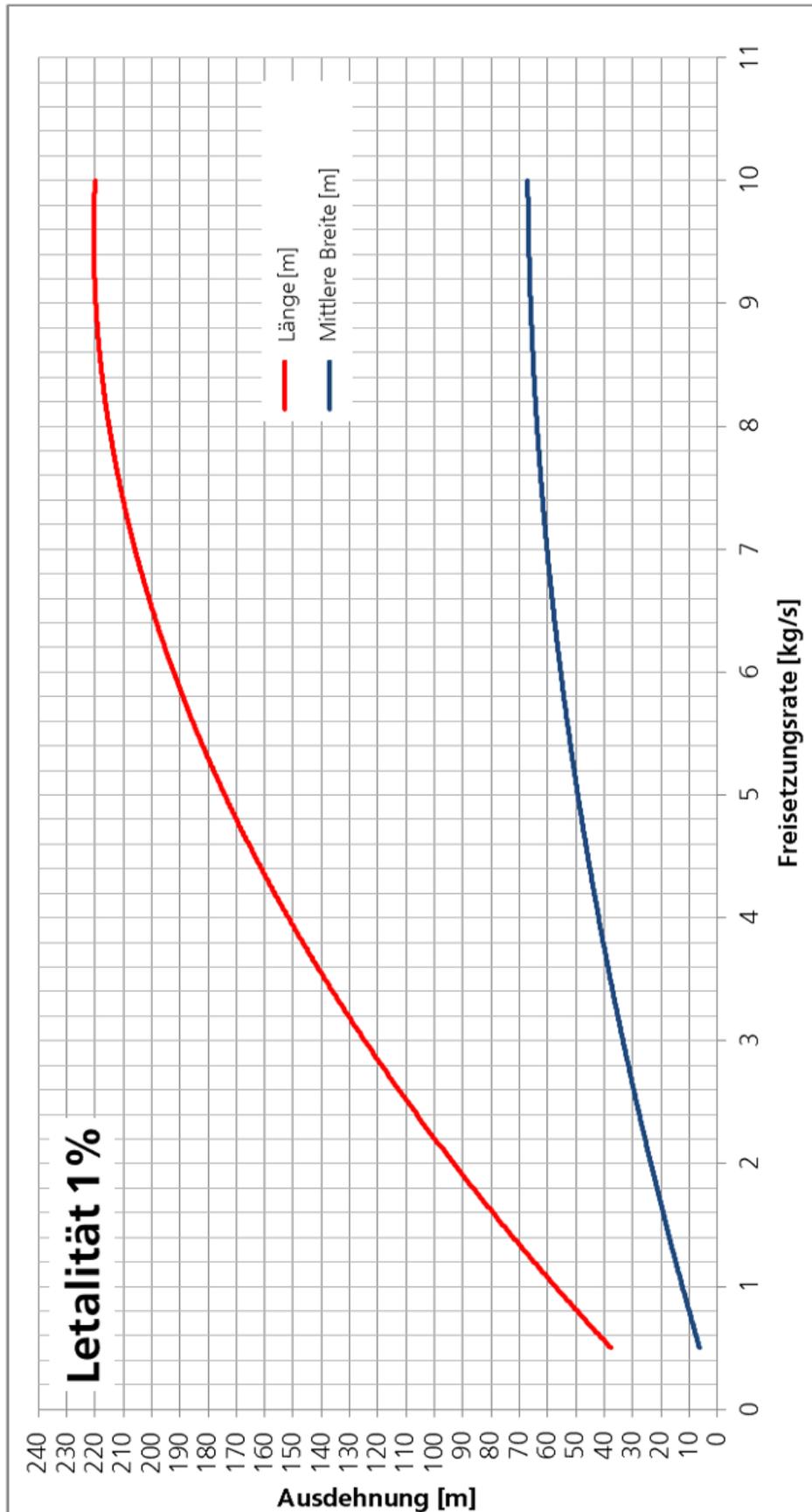
Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von $\geq 99\%$ bei einer Freisetzung mit spontanem Quellterm; Aerosolanteil 50 %.



[Zurück zum Inhalt](#)

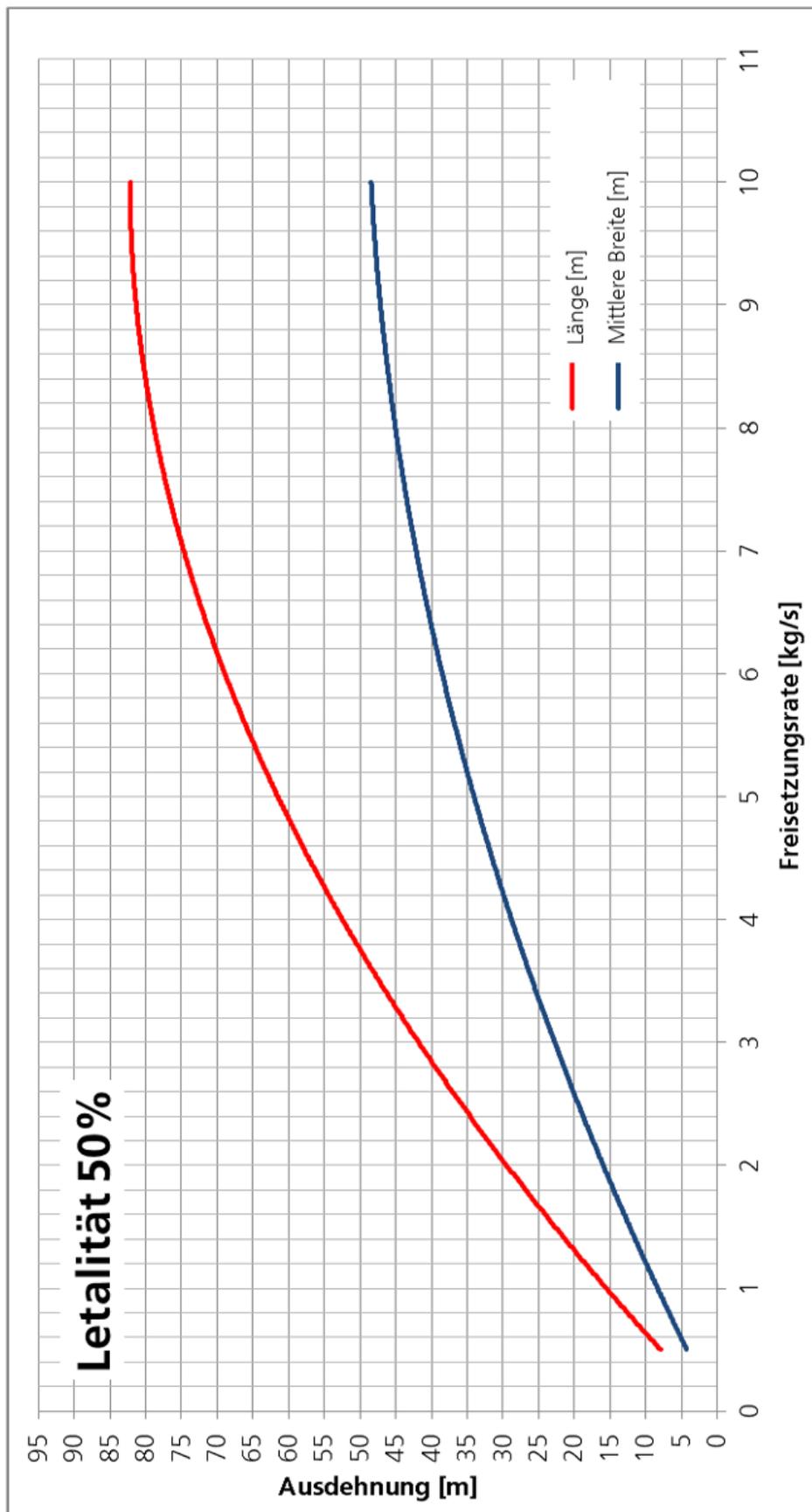
Abbildung 46: Kontinuierliche Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 1 %

Freisetzung im Freien, Ausbreitung als Schwergas, Aerosolanteil in der Wolke = 80 %
Länge und Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von ≥ 1 % bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm; Aerosolanteil 80 %.



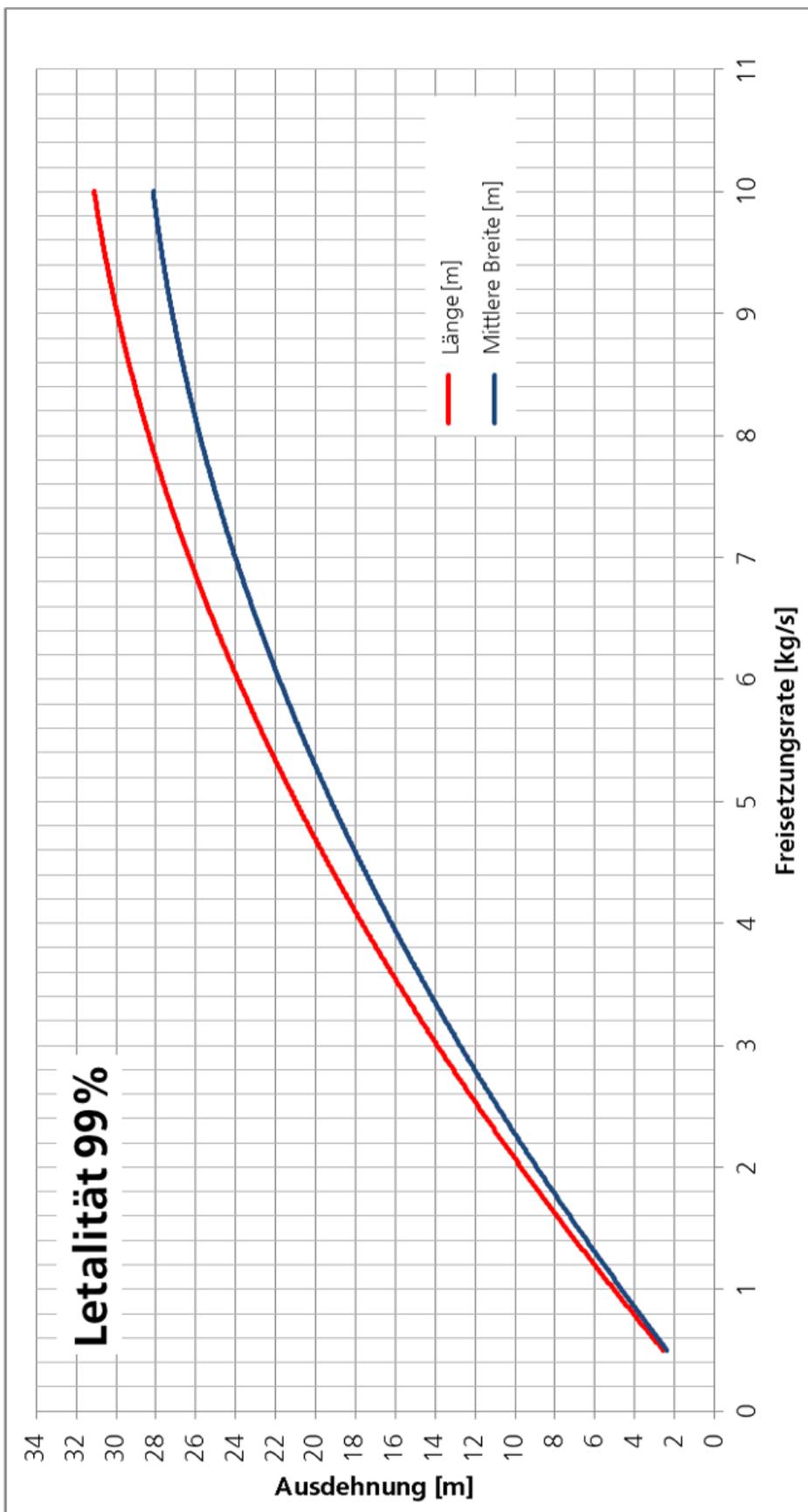
[Zurück zum Inhalt](#)**Abbildung 47: Kontinuierliche Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 50%**

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



[Zurück zum Inhalt](#)**Abbildung 48: Kontinuierliche Freisetzung, Schwergasmodell: Letalität 99%**

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



[Zurück zum Inhalt](#)

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 schwere Schädigungen auf Stufe Kurzbericht, sollten Ausbreitungsrechnungen mit der realen Freisetzungshöhe der Anlage durchgeführt werden.

[Zurück zum Inhalt](#)**Abbildung 49: 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.

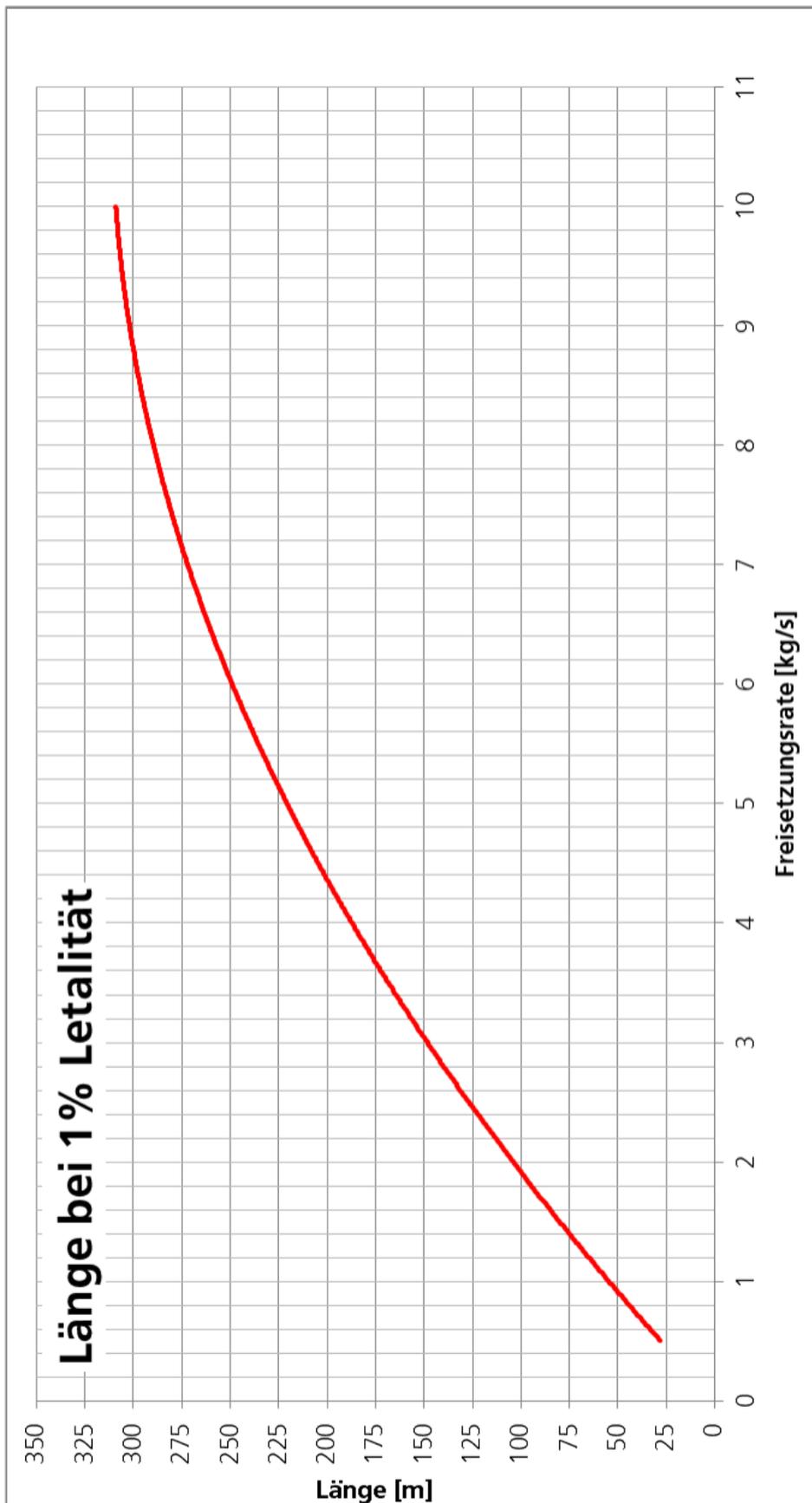
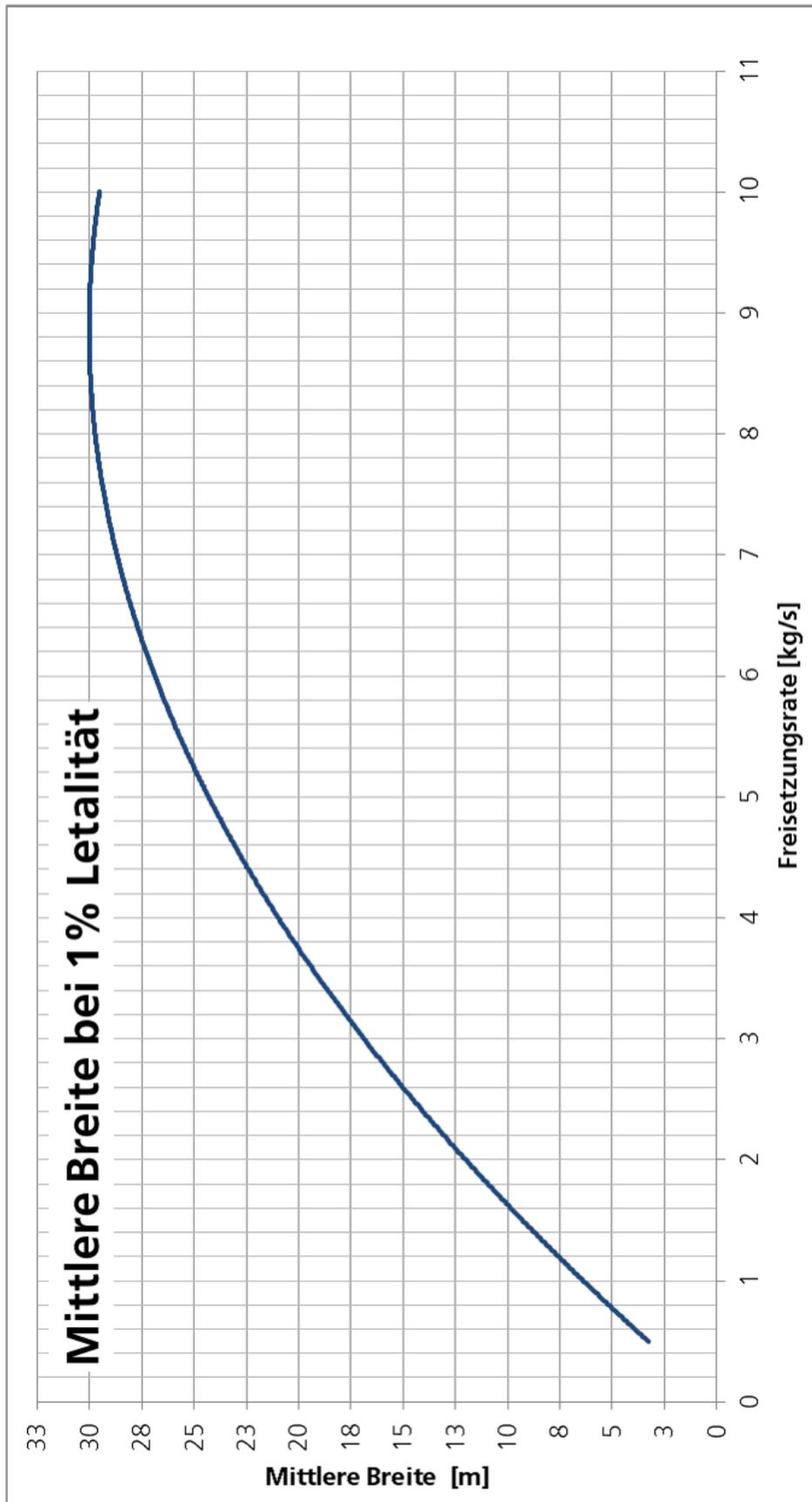


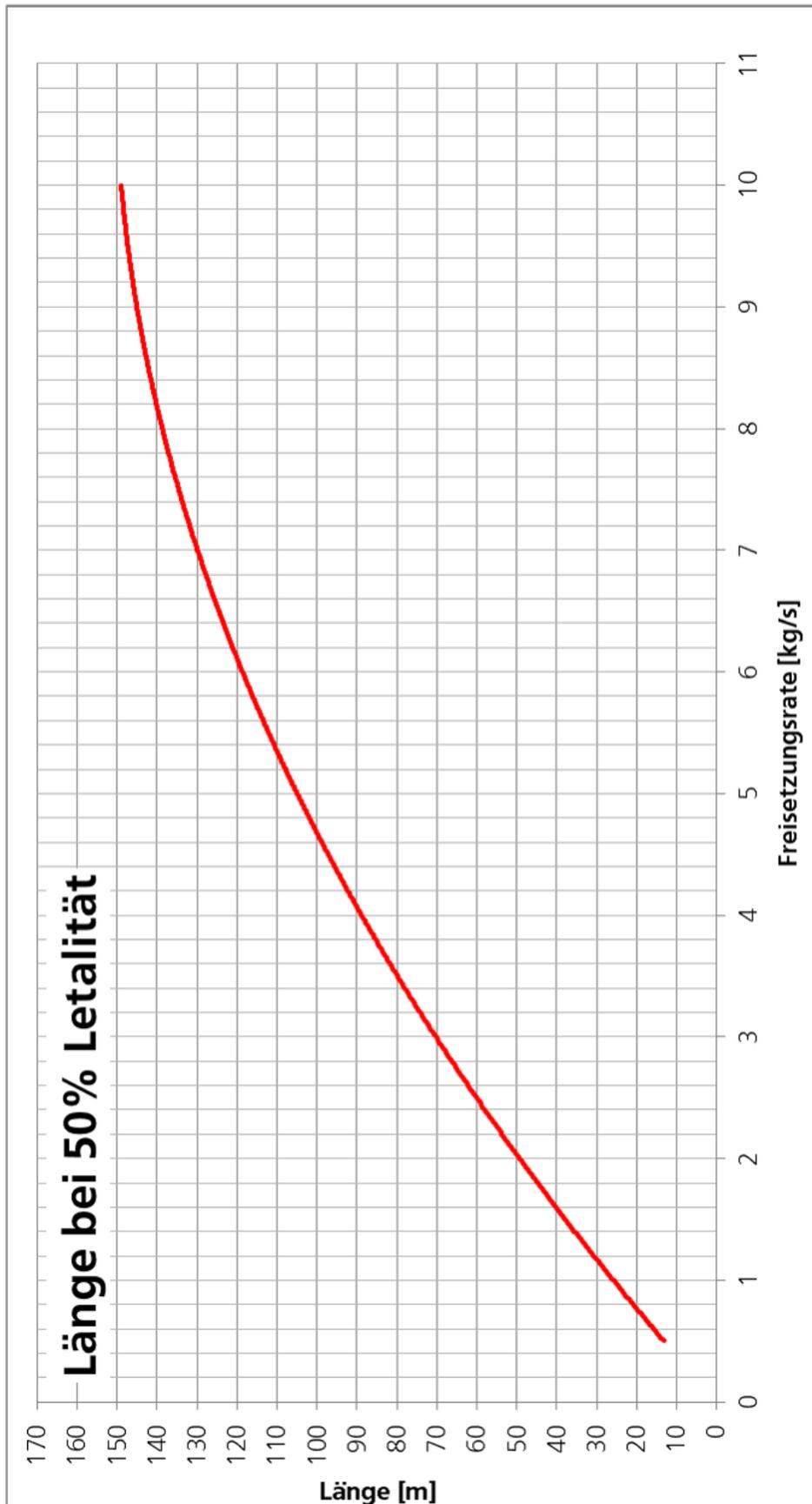
Abbildung 50: Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell:**Mittlere Breite bei 1 % Letalität**

Breite des Gefährdungsbereiches mit einer Letalität von $\geq 1\%$ bei einer Freisetzung mit kontinuierlichem Quellterm und Ausbreitung als Neutralgas.



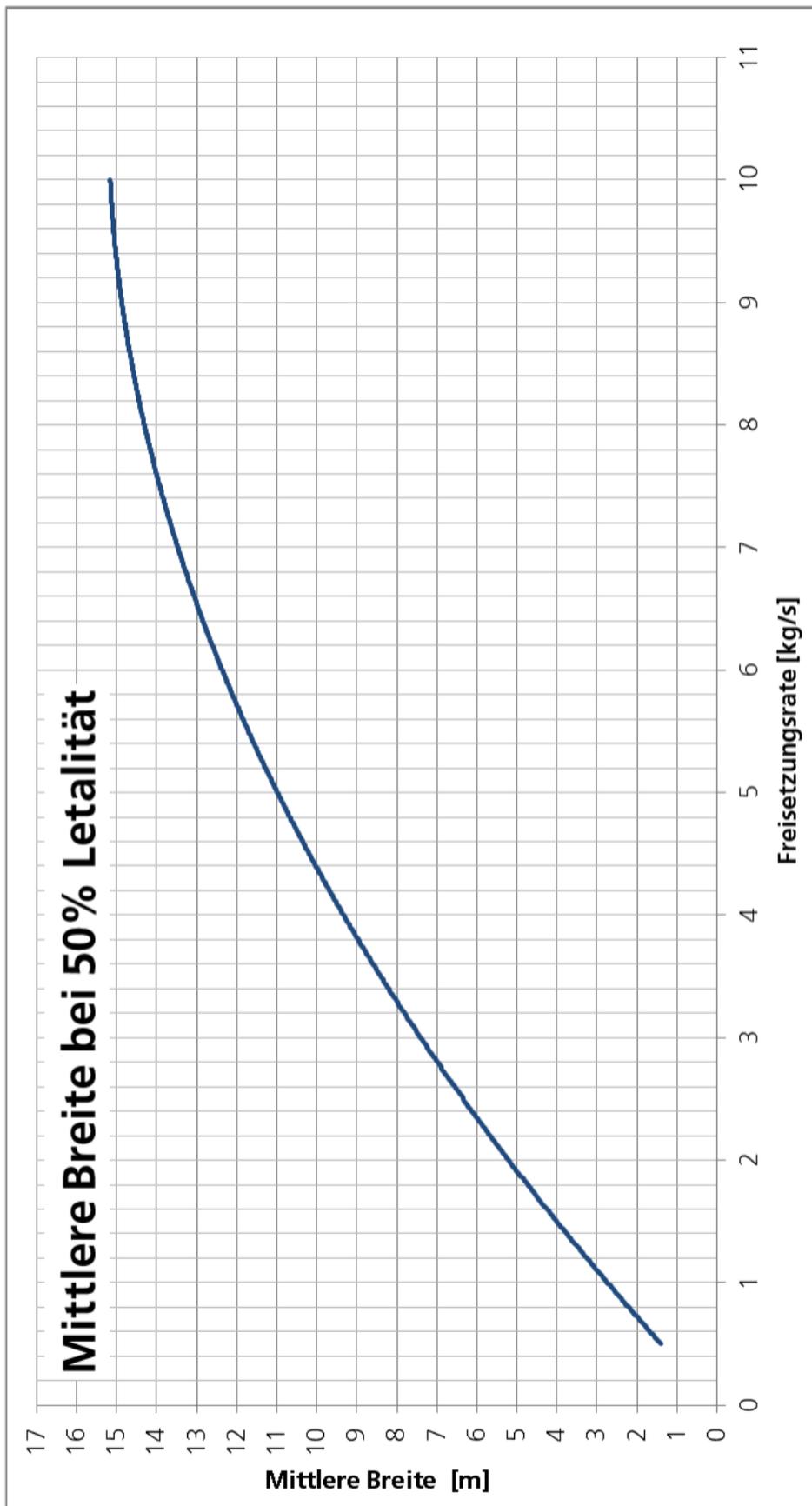
[Zurück zum Inhalt](#)**Abbildung 51: Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell:****Länge bei 50 % Letalität**

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



[Zurück zum Inhalt](#)**Abbildung 52: 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.



[Zurück zum Inhalt](#)**Abbildung 53: 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.

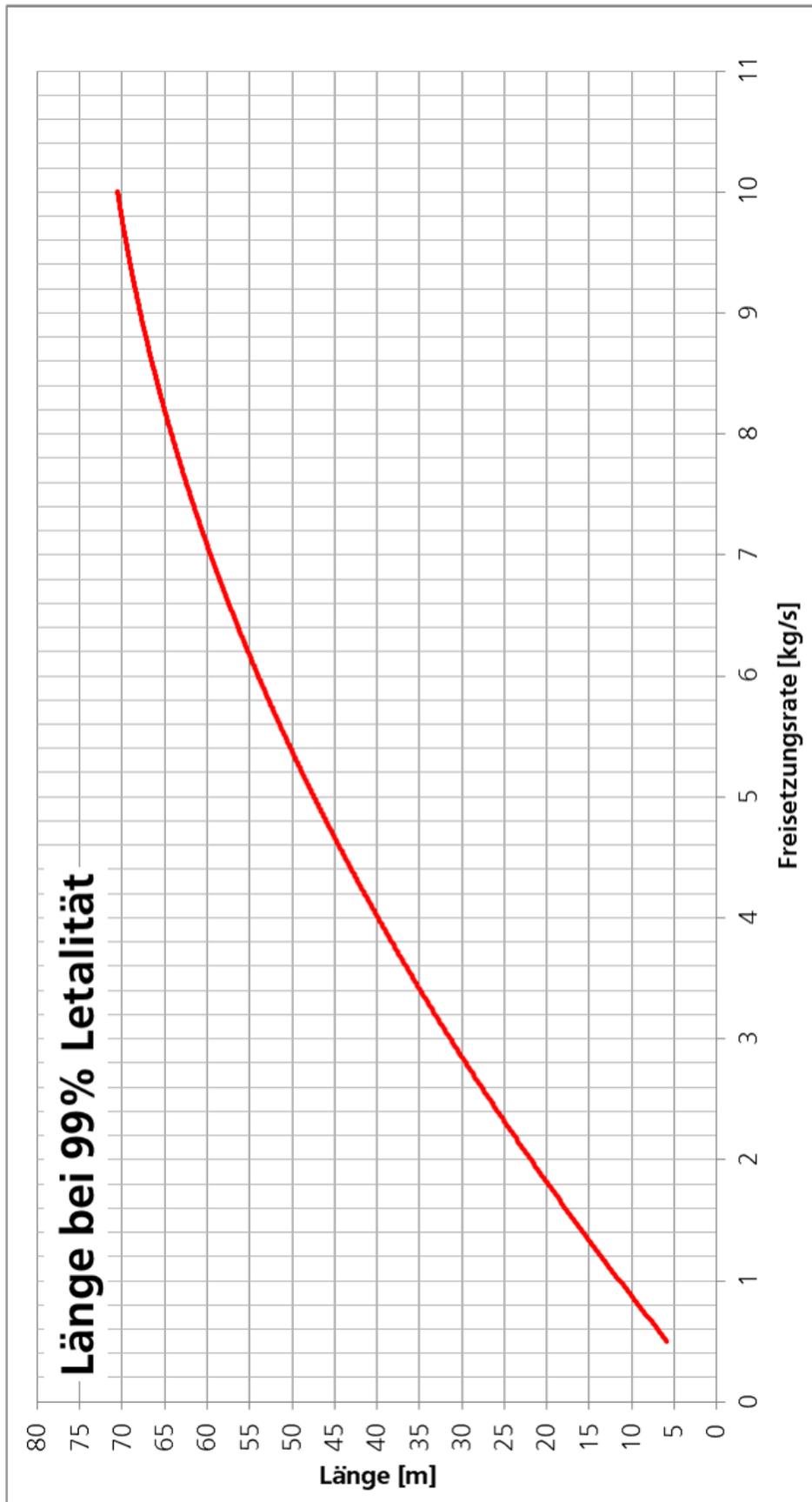
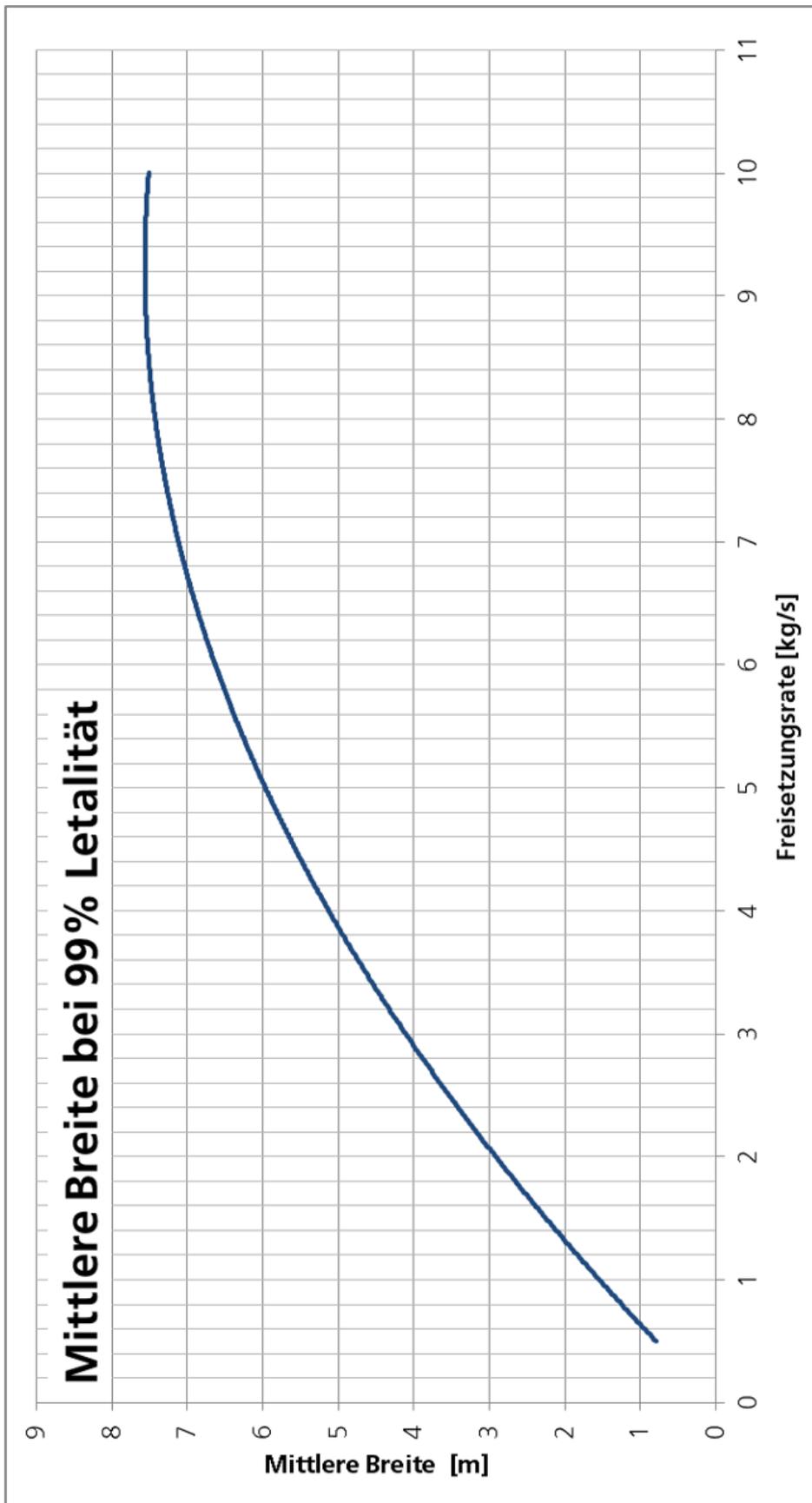


Abbildung 54: Kontinuierliche Freisetzung, Neutralgasmodell:**Mittlere Breite bei 99 % Letalität**

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



[Zurück zum Inhalt](#)

Berechnung der mittleren Letalitätsraten

Der Zusammenhang zwischen Ammoniak-Konzentration und Letalität exponierter Personen wird anhand von Probitberechnungen gemäss GEXCON ermittelt⁵³. 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 der mittleren Letalität und einer Exposition während 10 min bei konstanter Ammoniak-Konzentration aufgeführt.

Tabelle 18: Zusammenhang zwischen Ammoniak-Konzentration und Letalität (Exposition während 10 min).

Zusammenhang zwischen Ammoniak-Konzentration und Letalität	Ammoniak-Konzentration ⁵⁴
<i>Letalität</i>	
99 %	42'500 ppm (entspricht 30'500 mg/m ³)
50 %	13'300 ppm (entspricht 9'400 mg/m ³)
1 %	4'150 ppm (entspricht 2'940 mg/m ³)

⁵³ Probitparameter $a = -15.6$, $b = 1.0$, $n = 2.0$ (Einheit $\text{min} \cdot \text{mg}/\text{m}^3$; Quelle: TNO, Yellow Book, 2005)

⁵⁴ 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 $a = -15.6$, $b = 1.0$, $n = 2.0$ (Einheit $\text{min} \cdot \text{mg}/\text{m}^3$; Quelle: TNO, Yellow Book, 2005); Expositionsdauer = 10 min; Temperatur = 293 K.

A6 Personenaufkommen bei Spezialsituationen

In der Umgebung einer Kälteanlage oder Wärmepumpe können Personenansammlungen stattfinden, die nicht dem üblichen, durchschnittlichen Personenaufkommen entsprechen. Eine deutlich erhöhte Personendichte kann zum Beispiel durch folgende Anlässe zustande kommen: Sportereignisse und Turniere, Märkte, Open-Air Kulturprojekte, traditionelle Festivitäten. Um zu entscheiden, welche sogenannten Spezialsituationen zu berücksichtigen sind, ist in Kapitel 2.2.4 ein pragmatisches Vorgehen beschrieben. Die Grundlage zur Entscheidung bildet Abbildung 12. Im Folgenden wird beschrieben, auf welchen Annahmen und Überlegungen die Werte basieren.

In Abbildung 12 wird auf der x-Achse auf einer logarithmischen Skala die Anzahl der Personen im Gefährdungsbereich dargestellt. Dies korreliert über die Letalität im Gefährdungsbereich direkt mit der Anzahl an Todesopfern, dargestellt in Abbildung 55. Damit ist das Ausmass angelehnt an die Darstellung von Störfallwerten gemäss der Störfallverordnung, siehe [Lit. 15]. Als mittlere Letalität im Gefährdungsbereich wurde von 28 % ausgegangen, welche für Freisetzungsraten zwischen 0.5 bis 6.0 kg/s gilt, die Herleitung ist in Anhang A3, Abbildung 33 beschrieben.

Auch die Einteilung der beiden Bereiche basiert grundsätzlich auf einem W/A-Diagramm gemäss Störfallverordnung, jedoch wurde kein «Übergangsbereich» definiert, um Grenzfälle zu vermeiden. Der sogenannte Übergangsbereich ist für den vorliegenden Bericht vollständig dem «roten» Bereich zugeordnet, für den Spezialsituationen in Betracht gezogen werden müssen (konservative Betrachtung).

Für den grünen Bereich ist davon auszugehen, dass die Spezialsituation zu einem akzeptablen Risiko führt. Wird für eine Spezialsituation ermittelt, dass der Datenpunkt im roten Bereich liegt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Anlass zu einem nicht tragbaren Risiko führt.

Auf der y-Achse wird die Gesamtdauer der Spezialsituation pro Jahr logarithmisch dargestellt. Den Überlegungen zugrunde gelegt ist eine mittlere Freisetzungswahrscheinlichkeit von $5.0 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr. Dieser Wert kann als plausibel für übliche Anlagen in der Schweiz angenommen werden und basiert auf Literaturwerten zum Totalversagen für Druckbehälter und -leitungen wie dargestellt in Tabelle 3.3 in [Lit. 25] (Druckbehälter, spontanes und kontinuierliches Behälterversagen über 10 min jeweils mit $5.0 \cdot 10^{-7}$ pro Jahr angegeben). Eine Übersicht verschiedener Werte von Freisetzungswahrscheinlichkeiten wird in Abbildung 57 dargestellt.

Über die beiden Parameter «Anwesenheit der Personen» und «Freisetzungswahrscheinlichkeit» wird die Exposition dargestellt, d.h. mit welcher Wahrscheinlichkeit Personen, die sich im Gefährdungsbereich aufhalten, tatsächlich einer Ammoniakwolke ausgesetzt sind.

Die Einteilung ist so definiert, dass Spezialsituationen mit mehr als 3'000 Personen im Gefährdungsbereich immer zu betrachten sind. Ebenso sind Spezialsituationen, die an mindestens 100 h pro Jahr stattfinden (rund 1 % der Zeit) immer zu berücksichtigen.

[Zurück zum Inhalt](#)

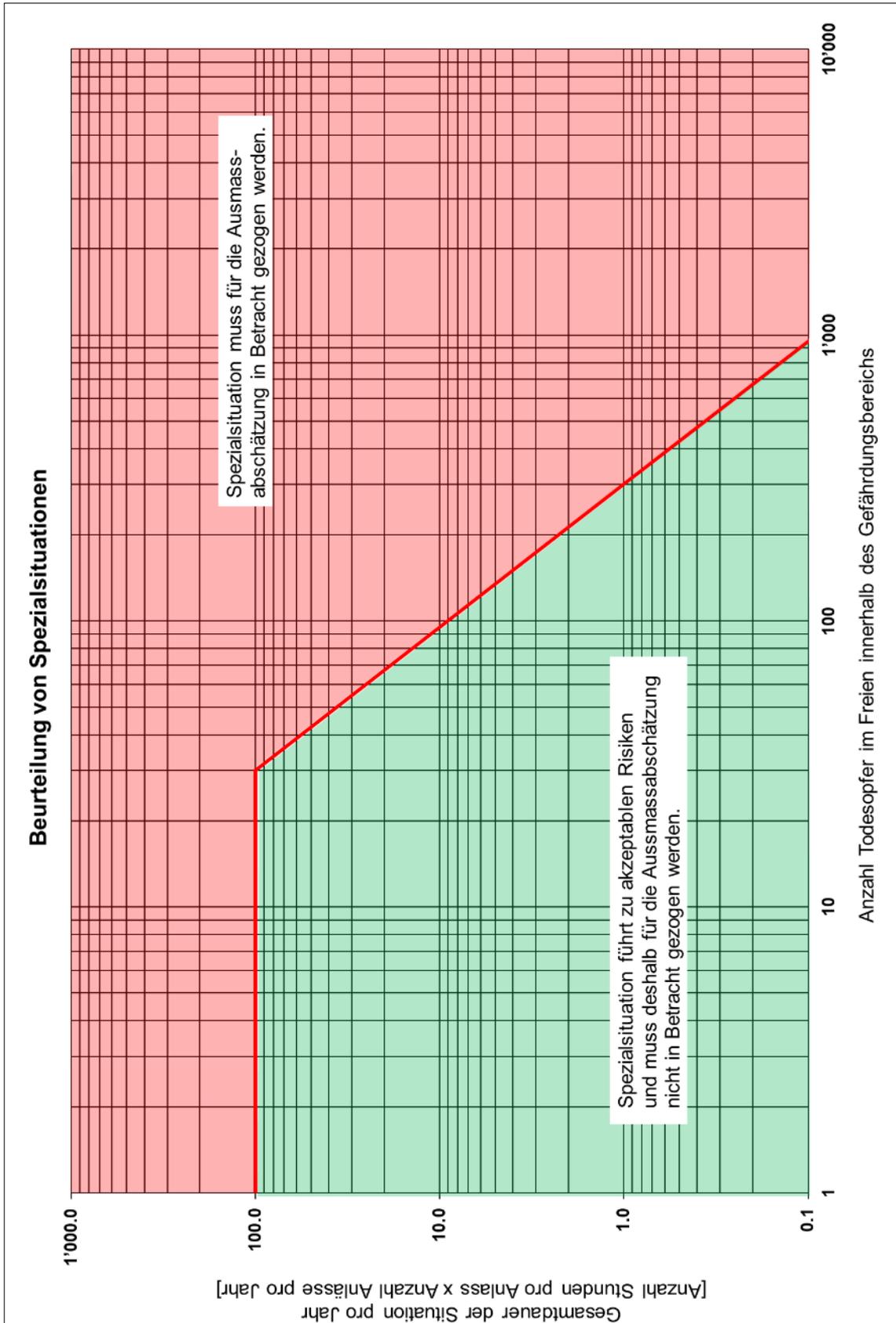


Abbildung 55: Darstellung des Bereichs, der bzgl. Personenaufkommen nicht berücksichtigt werden muss (grüne Fläche). x-Achse: Einheit «Anzahl Todesopfer»

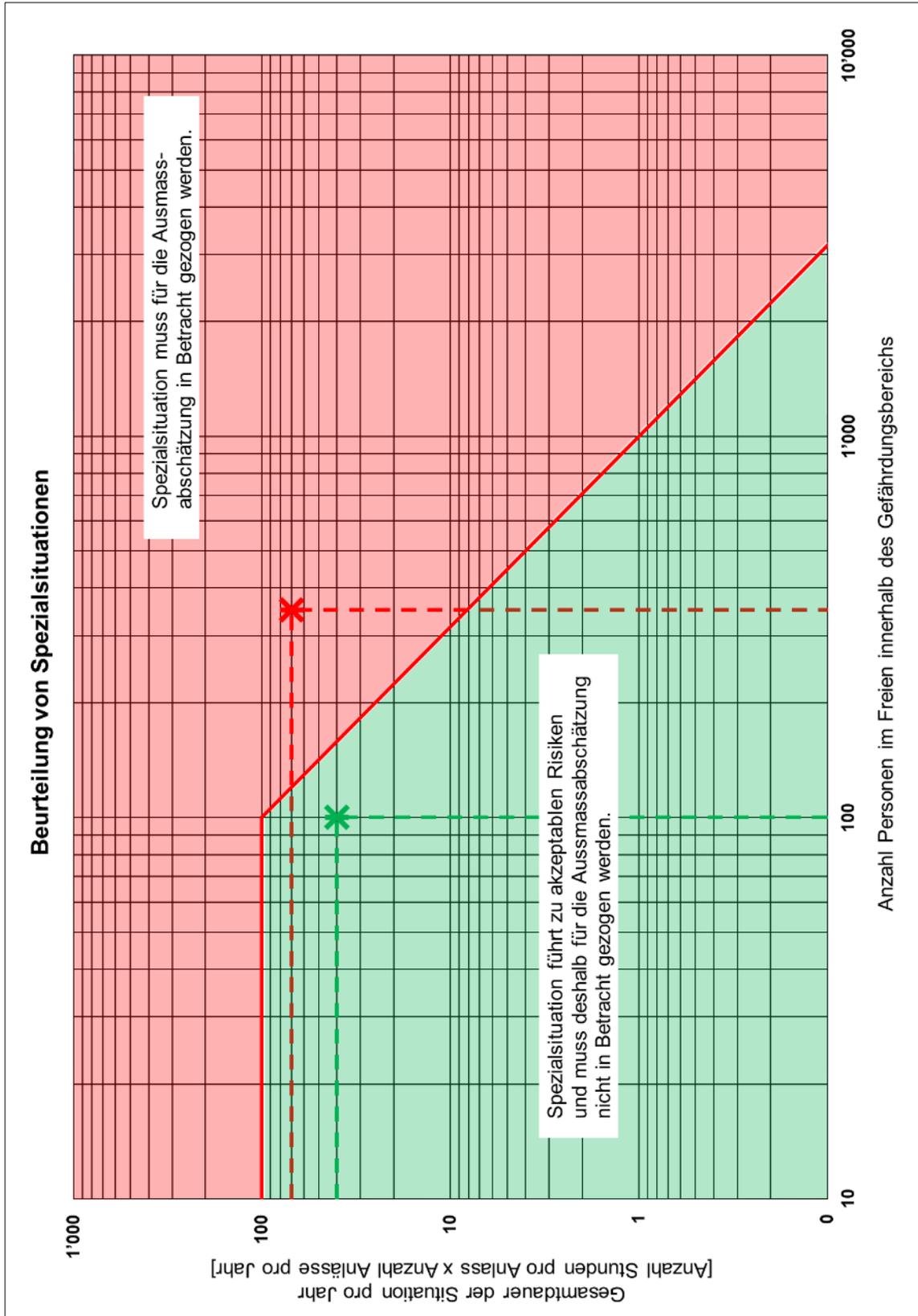


Abbildung 56: Darstellung des Bereichs, der bzgl. Personenaufkommen nicht berücksichtigt werden muss (grüne Fläche). x-Achse: Einheit «Anzahl Personen im Freien» (identisch mit Abbildung 12)

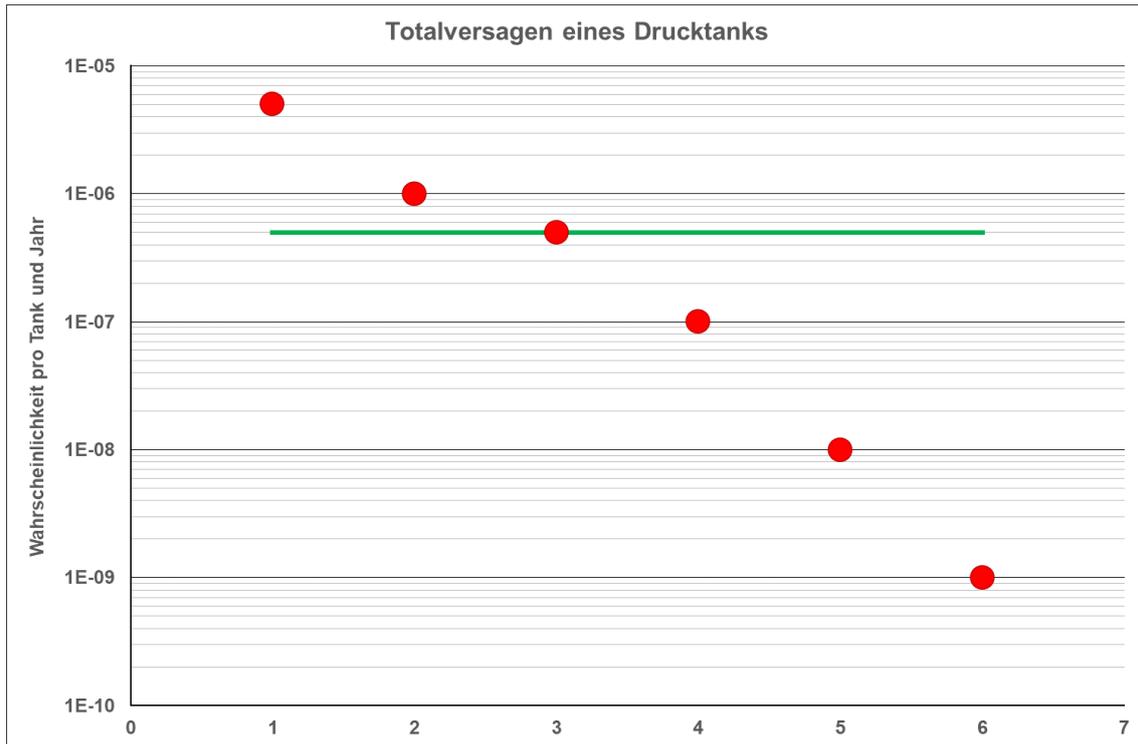


Abbildung 57: Wahrscheinlichkeiten eines Tankversagens gemäss den folgend aufgeführten Quellen

Quellenverzeichnis, Abbildung 57

- Quelle 1:
HSE (2012): Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments (28/06/2012), Item FR 1.1.3 Pressure Vessels
- Quelle 2:
EC, JRC Technical Report (2017): Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks
- Quelle 3:
VROM (2005): Guidelines for quantitative risk assessment (Purple Book): Druckbehälterversagen, Tabelle 3.3 auf Seite 3.3
- Quelle 4:
Flemish Government, LNE Department Environment, Nature and Energy Policy Unit Safety, Reporting Division (2009): Handbook Failure Frequencies for drawing up a Safety Report, chapter 2, Table 1
- Quelle 5:
AIChE, CCPS (1989): Guidelines for Process Equipment Reliability Data with Data Tables, Data Table 3.6.2.1, mean failure rate, Rayleigh-Verteilung
- Quelle 6:
IChemE (2004): A new estimate of the likelihood of spontaneous catastrophic failure of pressurised lpg storage vessels, Symposium Series No. 150