



# Bewertung der Freisetzung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in gesundheitsschädlichen Mengen

## LANUV-Fachbericht 22



**Bewertung der Freisetzung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)  
in gesundheitsschädlichen Mengen**

**LANUV-Fachbericht 22**

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2010

## IMPRESSUM

|                        |   |
|------------------------|---|
| Herausgeber            | Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW)<br>Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen<br>Telefon 02361 305-0, Telefax 02361 305-3215, E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de   |
|                        | Der vorliegende Fachbericht ist der Abschlussbericht der Studie "Bewertung der Freisetzung von Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) in gesundheitsschädlichen Mengen", die im Auftrag des LANUV NRW durchgeführt wurde von der Bonnenberg + Drescher GmbH (Industriepark Emil Mayrisch, 52457 Aldenhoven, Telefon 02464 581-0, www.budi.de). |
|                        |    |
| Autor                  | Dr. rer. nat. H. Kretzschmar, Sachverständiger nach § 29a BImSchG   |
| Beteiligte Mitarbeiter | Dipl.-Ing. M. Klaeren, Dipl.-Ing. J. Kloubert, Dipl.-Ing. J. Kottmann, Dipl.-Ing. D. Michel   |
| Korrektor              | Dipl.-Ing. M. Klaeren, Sachverständiger nach § 29a BImSchG  |
| Redaktion              | Dipl.-Ing. Manfred Schütz, Dr. rer. nat. Rüdiger Gregel, Dipl.-Ing. Rüdiger Rudolph (LANUV NRW)   |
| Titelbilder            | Warnschild an einer CO <sub>2</sub> -Löschanlage, CO <sub>2</sub> -Lagerbehälter (LANUV NRW)  |
| ISSN                   | 1864-3930 LANUV-Fachberichte  |
| Informationsdienste:   | Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter<br>• <a href="http://www.lanuv.nrw.de">www.lanuv.nrw.de</a><br>Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im<br>• WDR-Videotext Tafeln 177 bis 179   |
| Bereitschaftsdienst:   | Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV NRW<br>(24-Std.-Dienst): Telefon 0201 714488<br>Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet.<br>Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.                       |

## Inhalt

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>0.</b>  | <b>Einführung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>1.</b>  | <b>Identifizierung und Erfassung relevanter Betriebe</b>                                 | <b>5</b>  |
| 1.1        | <i>Suchraster</i>  | 5         |
| 1.2        | <i>Durchführung der Befragung</i>  | 6         |
| 1.3        | <i>Bewertung der Abfrageergebnisse</i>   | 7         |
| <b>2.</b>  | <b>Auswahl der Musteranlagen und deren Beschreibung</b>                                  | <b>9</b>  |
| <b>2.1</b> | <b><i>Fall 1 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Produktionsbetrieb</i></b>                  | <b>10</b> |
| 2.1.1      | Beschreibung des Standortes  | 10        |
| 2.1.2      | Angaben zur CO <sub>2</sub> -Löschanlage   | 10        |
| 2.1.3      | Schutzbereich der CO <sub>2</sub> -Löschanlage   | 11        |
| 2.1.4      | Gefahren durch CO <sub>2</sub>   | 13        |
| 2.1.5      | Verfahrensparameter des CO <sub>2</sub> -Vorrattanks für den Schutzbereich Rohstofflager | 13        |
| 2.1.6      | Freisetzungsszenarien  | 13        |
| <b>2.2</b> | <b><i>Fall 2 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich A</i></b>                      | <b>14</b> |
| 2.2.1      | Beschreibung des Standortes  | 14        |
| 2.2.2      | Angaben zur CO <sub>2</sub> -Löschanlage   | 14        |
| 2.2.3      | Schutzbereich der CO <sub>2</sub> -Löschanlage   | 15        |
| 2.2.4      | Gefahren durch CO <sub>2</sub>   | 17        |
| 2.2.5      | Verfahrensparameter des CO <sub>2</sub> -Vorrattanks                                     | 17        |
| 2.2.6      | Freisetzungsszenarien  | 17        |
| <b>2.3</b> | <b><i>Fall 3 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich B</i></b>                      | <b>18</b> |
| 2.3.1      | Beschreibung des Standortes  | 18        |
| 2.3.2      | Angaben zur CO <sub>2</sub> -Löschanlage   | 18        |
| 2.3.3      | Schutzbereich der CO <sub>2</sub> -Löschanlage   | 19        |
| 2.3.4      | Gefahren durch CO <sub>2</sub>   | 20        |
| 2.3.5      | Verfahrensparameter des CO <sub>2</sub> -Vorrattanks                                     | 20        |
| 2.3.6      | Freisetzungsszenarien  | 20        |
| <b>2.4</b> | <b><i>Fall 4 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb A</i></b>                   | <b>21</b> |
| 2.4.1      | Beschreibung des Standortes  | 21        |
| 2.4.2      | Verfahrensbeschreibung   | 21        |
| 2.4.3      | Angaben zur Umgebung des CO <sub>2</sub> -Hochdrucktanks                                 | 22        |
| 2.4.4      | Gefahren durch CO <sub>2</sub>   | 23        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 2.4.5      | Verfahrensparameter des CO <sub>2</sub> -HD-Tanks                              | 23        |
| 2.4.6      | Freisetzungsszenarien  | 23        |
| <b>2.5</b> | <b><i>Fall 5 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb B</i></b>         | <b>25</b> |
| 2.5.1      | Beschreibung des Standortes  | 25        |
| 2.5.2      | Verfahrensbeschreibung   | 25        |
| 2.5.3      | Angaben zur Umgebung des CO <sub>2</sub> -Niederdrucktanks                     | 26        |
| 2.5.4      | Gefahren durch CO <sub>2</sub>   | 27        |
| 2.5.5      | Verfahrensparameter des CO <sub>2</sub> -ND-Tanks                              | 27        |
| 2.5.6      | Freisetzungsszenarien  | 27        |
| <b>2.6</b> | <b><i>Fall 6 - CO<sub>2</sub>-Einsatzbehälter in der Getränkeindustrie</i></b> | <b>28</b> |
| 2.6.1      | <i>Beschreibung des Standortes</i>   | <b>28</b> |
| 2.6.2      | Verfahrensbeschreibung   | 29        |
| 2.6.3      | Angaben zur Umgebung des CO <sub>2</sub> -Vorratstanks                         | 29        |
| 2.6.4      | Gefahren durch CO <sub>2</sub>   | 30        |
| 2.6.5      | Verfahrensparameter des CO <sub>2</sub> -Vorratstanks                          | 30        |
| 2.6.6      | Freisetzungsszenarien  | 30        |
| <b>3.</b>  | <b>Vorbemerkungen zu den Ausbreitungsrechnungen</b>                            | <b>31</b> |
| <b>3.1</b> | <b><i>Grundlagen der Ausbreitungsrechnung</i></b>                              | <b>31</b> |
| 3.1.1      | Thermodynamische Kennwerte von Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )                 | 31        |
| 3.1.2      | Theoretische Grundlagen der Ausbreitungsrechnung                               | 33        |
| 3.1.2.1    | Berechnung der Austrittsrate und der gasförmigen Emission von CO <sub>2</sub>  | 33        |
| 3.1.2.2    | Flashverdampfung   | 33        |
| <b>3.2</b> | <b><i>Betrachtete Grenzkonzentrationen</i></b>                                 | <b>34</b> |
| 3.2.1      | Arbeitsplatzgrenzwert (AGW)  | 34        |
| 3.2.2      | TEEL-2-Wert  | 34        |
| 3.2.3      | CO <sub>2</sub> -Konzentrationen > 9 Vol.-%                                    | 35        |
| 3.2.4      | Fahruntüchtigkeit von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren                       | 35        |
| <b>4.</b>  | <b>Ausbreitungsrechnungen für die ausgewählten Fallbeispiele</b>               | <b>36</b> |
| <b>4.1</b> | <b><i>Fall 1 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Produktionsbetrieb</i></b>        | <b>36</b> |
| 4.1.1      | Austrittsberechnung  | 36        |
| 4.1.2      | Berechnung der Ausbreitung   | 37        |
| 4.1.3      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10                                 | 38        |
| 4.1.4      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25                                 | 39        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 4.1.5      | Ergebnis der Berechnung für Fehlauflösung                               | 41         |
| 4.1.6      | Ergebnis der Berechnung bei ordnungsgemäßer Auflösung                   | 44         |
| <b>4.2</b> | <b>Fall 2 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich A</b>            | <b>47</b>  |
| 4.2.1      | Austrittsberechnung   | 47         |
| 4.2.2      | Berechnung der Ausbreitung  | 47         |
| 4.2.3      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10                          | 48         |
| 4.2.4      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25                          | 50         |
| 4.2.5      | Ergebnis der Berechnung für Fehlauflösung                               | 51         |
| 4.2.6      | Ergebnis der Berechnung bei ordnungsgemäßer Auflösung                   | 54         |
| <b>4.3</b> | <b>Fall 3 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich B</b>            | <b>58</b>  |
| 4.3.1      | Austrittsberechnung   | 58         |
| 4.3.2      | Berechnung der Ausbreitung  | 58         |
| 4.3.3      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10                          | 59         |
| 4.3.4      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25                          | 61         |
| 4.3.5      | Ergebnis der Berechnung für Fehlauflösung                               | 62         |
| 4.3.6      | Ergebnis der Berechnung bei ordnungsgemäßer Auflösung                   | 66         |
| <b>4.4</b> | <b>Fall 4 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb A</b>         | <b>69</b>  |
| 4.4.1      | Austrittsberechnung   | 69         |
| 4.4.2      | Berechnung der Ausbreitung  | 69         |
| 4.4.3      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10                          | 71         |
| 4.4.4      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25                          | 75         |
| 4.4.5      | Ergebnis der Berechnung für spontane Freisetzung                        | 78         |
| <b>4.5</b> | <b>Fall 5 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb B</b>         | <b>83</b>  |
| 4.5.1      | Austrittsberechnung   | 83         |
| 4.5.2      | Berechnung der Ausbreitung  | 83         |
| 4.5.3      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10                          | 85         |
| 4.5.4      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25                          | 87         |
| 4.5.5      | Ergebnis der Berechnung für spontane Freisetzung                        | 90         |
| <b>4.6</b> | <b>Fall 6 - CO<sub>2</sub>-Einsatzbehälter in der Getränkeindustrie</b> | <b>95</b>  |
| 4.6.1      | Austrittsberechnung   | 95         |
| 4.6.2      | Berechnung der Ausbreitung  | 95         |
| 4.6.3      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10                          | 97         |
| 4.6.4      | Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25                          | 99         |
| 4.6.5      | Ergebnis der Berechnung für spontane Freisetzung                        | 102        |
| <b>4.7</b> | <b>Zusammenfassende Bewertung der betrachteten Szenarien</b>            | <b>106</b> |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>5.</b>  | <b>Physikalische und toxikologische Daten zu Kohlendioxid</b>                 | <b>108</b> |
| <b>5.1</b> | <b><i>Physikalische Daten</i></b>   | <b>108</b> |
| <b>5.2</b> | <b><i>Gesundheitsschädliche Wirkung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)</i></b> | <b>109</b> |
| 5.2.1      | Aufnahme über die Atemwege  | 109        |
| 5.2.2      | Hauptwirkweisen   | 109        |
| 5.2.2.1    | Akute Toxizität   | 109        |
| 5.2.2.2    | Reproduktionstoxizität  | 111        |
| 5.2.2.3    | Mutagenität   | 111        |
| 5.2.2.4    | Kanzerogenität  | 111        |
| <b>5.3</b> | <b><i>Gefahren und Grenzwerte durch Sauerstoffmangel (Erstickung)</i></b>     | <b>111</b> |
| <b>5.4</b> | <b><i>Toxikologische Grenzwerte für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)</i></b>     | <b>113</b> |
| 5.4.1      | TRGS 900 – Arbeitsplatzgrenzwert (AGW)  | 113        |
| 5.4.2      | ACGIH / TLV-TWA (USA)   | 113        |
| 5.4.3      | ACGIH / STEL-TWA (USA)  | 113        |
| 5.4.4      | IDLH-Wert   | 114        |
| 5.4.5      | VFDB-Wert   | 114        |
| 5.4.6      | TEEL-0-Wert   | 115        |
| 5.4.7      | TEEL-1-Wert   | 115        |
| 5.4.8      | TEEL-2-Wert   | 115        |
| 5.4.9      | TEEL-3-Wert   | 116        |
| <b>5.5</b> | <b><i>Sonstige Grenzwerte für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)</i></b>           | <b>117</b> |
| 5.5.1      | Richtwerte für die Innenraumluft  | 117        |
| 5.5.2      | Internationale Grenzwerte   | 117        |
| <b>6.</b>  | <b>Empfehlung ergänzender Maßnahmen zur Gefahrenabwehr</b>                    | <b>118</b> |
| <b>6.1</b> | <b><i>Fall 1 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Produktionsbetrieb</i></b>       | <b>118</b> |
| 6.1.1      | Maßnahmen zur Gefahrenabwehr  | 118        |
| 6.1.2      | Verhalten bei Leckage   | 119        |
| 6.1.3      | Verhalten bei Fehlauflösung   | 120        |
| 6.1.4      | Verhalten bei ordnungsgemäßem Auslösen der CO <sub>2</sub> -Löschanlage       | 120        |
| <b>6.2</b> | <b><i>Fall 2 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich A</i></b>           | <b>121</b> |
| 6.2.1      | Maßnahmen zur Gefahrenabwehr  | 121        |
| 6.2.2      | Verhalten bei Leckage   | 122        |
| 6.2.3      | Verhalten bei Fehlauflösung   | 123        |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 6.2.4  | Verhalten bei ordnungsgemäßem Auslösen der CO <sub>2</sub> -Löschanlage        | 123        |
| <b>6.3</b>   | <b><i>Fall 3 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich B</i></b>            | <b>124</b> |
| 6.3.1  | Maßnahmen zur Gefahrenabwehr   | 124        |
| 6.3.2  | Verhalten bei Leckage  | 125        |
| 6.3.3  | Verhalten bei Fehlauflösung  | 125        |
| 6.3.4  | Verhalten bei ordnungsgemäßem Auslösen der CO <sub>2</sub> -Löschanlage        | 126        |
| <b>6.4</b>   | <b><i>Fall 4 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb A</i></b>         | <b>127</b> |
| 6.4.1  | Maßnahmen zur Gefahrenabwehr   | 127        |
| 6.4.2  | Verhalten bei Leckage/ Spontanversagen   | 127        |
| <b>6.5</b>   | <b><i>Fall 5 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb B</i></b>         | <b>129</b> |
| 6.5.1  | Maßnahmen zur Gefahrenabwehr   | 129        |
| 6.5.2  | Verhalten bei Leckage  | 129        |
| 6.5.3  | Verhalten bei Spontanversagen  | 130        |
| <b>6.6</b>   | <b><i>Fall 6 - CO<sub>2</sub>-Einsatzbehälter in der Getränkeindustrie</i></b> | <b>131</b> |
| 6.6.1  | Maßnahmen zur Gefahrenabwehr   | 131        |
| 6.6.2  | Verhalten bei Leckage/ Spontanversagen   | 131        |
| <b>7.</b>  | <b>Zusammenfassung wesentlicher Maßnahmen</b>                                  | <b>133</b> |
| <b>7.1</b>   | <b><i>Maßnahmen bei CO<sub>2</sub>-Lager- und Einsatzbehältern</i></b>         | <b>133</b> |
| <b>7.2</b>   | <b><i>Maßnahmen bei CO<sub>2</sub>-Löschanlagen</i></b>                        | <b>134</b> |
| <b>ANHANG</b>  |  | <b>138</b> |
| <b>Graphische Dokumentation der Ausbreitungsrechnung</b> |  | <b>138</b> |
| <b>A4.1</b>  | <b><i>Fall 1 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Produktionsbetrieb</i></b>        | <b>139</b> |
| <b>A4.2</b>  | <b><i>Fall 2 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich A</i></b>            | <b>151</b> |
| <b>A4.3</b>  | <b><i>Fall 3 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich B</i></b>            | <b>169</b> |
| <b>A4.4</b>  | <b><i>Fall 4 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb A</i></b>         | <b>186</b> |
| <b>A4.5</b>  | <b><i>Fall 5 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb B</i></b>         | <b>203</b> |
| <b>A4.6</b>  | <b><i>Fall 6 - CO<sub>2</sub>-Einsatzbehälter in der Getränkeindustrie</i></b> | <b>220</b> |



## 0. Einführung

Das erstickende bzw. gesundheitsschädliche Gefahrenpotenzial von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in hohen Konzentrationen ist seit langem bekannt. Durch seine im Vergleich zur Luft höhere Dichte zeigt es ein ausgeprägtes Schwergasverhalten und kann sich an tiefer gelegenen Stellen ansammeln und entsprechend hohe Konzentrationen erreichen.

So kommt es zum Beispiel im landwirtschaftlichen Sektor immer wieder zu – teils tödlichen – Unfällen mit CO<sub>2</sub>. In Weinkellern, Futtersilos und Jauchegruben können sich durch Gärprozesse beträchtliche Mengen an CO<sub>2</sub> bilden. Wenn nicht für ausreichende Entlüftung gesorgt ist, bilden sich vor allem in Bodennähe gefährliche Konzentrationen.

Auch naturbedingt können sich durch Ausgasungen aus dem Erdinneren, zum Beispiel in Brunnen oder Höhlen, gefährliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bilden. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist die „Hundegrotte“ auf der Insel Capri in Italien. Die Bezeichnung rührt daher, dass in der Atemhöhe von Hunden betäubende CO<sub>2</sub>-Konzentrationen vorliegen; in der Atemhöhe erwachsener Menschen treten solche Konzentrationen dort wegen des Schwergasverhaltens von CO<sub>2</sub> aber nicht auf.

Eine CO<sub>2</sub>-Freisetzung immensen Ausmaßes führte im August 1986 in Kamerun zu einer Tragödie. In den Tiefen des Kratersees „Lake Nyos“ wurden über die Jahre große Mengen von CO<sub>2</sub>-Ausgasungen aus dem Erdinneren wegen des hydrostatischen Druckes in flüssiger Form gebunden. Es wird angenommen, dass die Katastrophe dann am 21. August durch einen Erdbeben oder ein Erdbeben ausgelöst wurde. Hierdurch wurde eine Zirkulation zwischen oberflächennahen und tiefen Wasserschichten ausgelöst, so dass auch große Mengen des verflüssigten Kohlendioxids in oberflächennahe Schichten gelangte und wegen des gesunkenen hydrostatischen Druckes in die Atmosphäre verdampften. In sehr kurzer Zeit entwich nach Schätzungen eine Menge von rund 1,6 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> und wälzte sich als geruchlose Schwergaswolke am Boden entlang. Im Umkreis von 25 km erstickten über 1.700 Menschen und mehr als 2.000 Stück Vieh [1].

Bei CO<sub>2</sub>-Löschanlagen ist über die letzten Jahrzehnte eine Reihe von Ereignissen zu verzeichnen. Häufig geschahen diese Unfälle bei der Errichtung und Inbetriebnahme, bei Wartungsarbeiten oder Probeflutungen. Einer dieser Fälle ereignete sich z. B. am 14. Jan. 1993 in der Dresdner Sempergalerie mit dem traurigen Resultat von 2 Toten und 10 Verletzten [2]. Aber es kam auch zu Fehlauflösungen von CO<sub>2</sub>-Löschanlagen ohne

Alarmierung und Vorwarnzeit, hervorgerufen durch Überspannung aufgrund von Blitzeinschlägen in der Umgebung [3]. Alle diese Ereignisse führten dazu, dass inzwischen ein von Versicherern und Berufsgenossenschaften erstelltes Regelwerk vorliegt, das der Sicherheit und dem Gesundheitsschutz von Personen im Löschbereich von CO<sub>2</sub>-Löschanlagen durch ein Bündel von Maßnahmen Rechnung trägt (siehe z. B. unter [4], [5], [6], [7]).

Dennoch kam es am 21. Aug. 2008 in Wuppertal wieder zur Fehlauslösung einer CO<sub>2</sub>-Löschanlage, was die Freisetzung von ca. 15 t CO<sub>2</sub> in den Löschbereich zur Folge hatte. Zwar wurde für Instandhaltungsarbeiten an der Brandmeldeanlage die betroffene Melderlinie fachgerecht außer Betrieb genommen; vergessen wurde aber, die CO<sub>2</sub>-Löschanlage zu blockieren [8]. Von den Einsatzkräften wurden benachbarte Straßen gesperrt und die Betriebseinstellung der Schwebbahn in der näheren Umgebung veranlasst sowie die Anwohnerschaft gewarnt. Weiter wurden eine kontrollierte Lüftung des gefluteten Bereiches und begleitende Konzentrationsmessungen durchgeführt, so dass letztlich nur eine Person über Übelkeit klagte.

Wenige Tage zuvor, am 16. Aug. 2008, ereignete sich aber in Mönchengladbach eine folgenschwerere Freisetzung von CO<sub>2</sub> nach ordnungsgemäßer Auslösung der Löschanlage durch einen Entstehungsbrand. Von Nachteil war für die Einsatzkräfte die indirekte Zugänglichkeit des gefluteten Lagerbereiches über die Brandmelderzentrale und den benachbarten Lagerbereich. Es kam zur Verschleppung von CO<sub>2</sub> in die benachbarten Räumlichkeiten, so dass der Einsatzleiter ein Rolltor in der Außenwand des benachbarten Lagerbereiches öffnen ließ. Kurze Zeit später kam es zu einer zweiten Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage und in der Folge zur Freisetzung einer großen CO<sub>2</sub>-Menge in die Umgebung.

Dieses Ereignis zeigte, dass nicht nur Personen im Löschbereich oder dessen unmittelbarer Nähe, sondern auch die Nachbarschaft im weiteren Umfeld in erheblichem Maße gefährdet sein können. 107 Personen mussten an dem von den Einsatzkräften eingerichteten Behandlungsplatz versorgt werden; von den 19 in Krankenhäuser transportierten Verletzten wurden 10 weiter stationär behandelt. Die zum Zeitpunkt der Freisetzung herrschende Windstille und die örtliche Topographie – Ansammlung von CO<sub>2</sub> in einer Bodensenke! – trugen zu den schwerwiegenden Auswirkungen bei [8], [9].

Das letztgenannte Ereignis gab Anlass, von Seiten des LANUV NRW ein Untersuchungsvorhaben mit dem Titel „Bewertungen zur Freisetzung von Kohlendioxid in

gesundheitsschädlichen Mengen“ in Auftrag zu geben; Auftragnehmer war die Bonnenberg & Drescher GmbH, Aldenhoven. Die Aufgabenstellung umfasste folgende Punkte:

- Identifizierung und Erfassung der Betriebe in NRW, in denen CO<sub>2</sub> in Mengen von mehr als 3.000 kg hergestellt, gehandhabt oder gelagert wird
- Auswahl von sechs Musteranlagen (verschiedene Anlagentypen) durch das LANUV in einer gemeinsamen Besprechung zur Skizzierung von Fallbeispielen mit realem Hintergrund
- Ausbreitungsrechnung für die ausgewählten Musteranlagen unter ungünstigsten (konservativsten) Randbedingungen mit toxikologischer Bewertung der ermittelten Konzentrationen
- Klärung spezieller Fragen (Toxikologische Daten zu Kohlendioxid, Fahruntüchtigkeit von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor bei hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen)
- Empfehlung ergänzender Maßnahmen zur Gefahrenabwehr

### Literatur:

- [1] Trösch, T.: „Warum heißt der Lake Nyos auch Killersee?“  
Siehe unter: <http://www.handelsblatt.com/technologie/schneller-schlau/warum-heisst-der-lake-nyos-auch-killersee:2070044>
- [2] Paech, H.: „Tod in der Dresdner Sempergalerie – Zur gerichtlichen Aufarbeitung eines sicherheitstechnischen Defizits“  
Sicherheitsingenieur 10/95, S.18 – 23
- [3] Scheuermann, K.: „Personenschutz bei neuen Löschgasen“  
VdS-Fachtagung „Feuerlöschanlagen“, Köln, 29.-30.11.1994
- [4] VdS 2093 : 2009-06 (03) VdS-Richtlinien für CO<sub>2</sub>-Feuerlöschanlagen  
- Planung und Einbau –  
VdS Schadenverhütung GmbH, Köln
- [5] VdS 3518 : 2006-07 (01) VdS-Richtlinien für Feuerlöschanlagen  
„Sicherheit und Gesundheitsschutz beim Einsatz von  
Feuerlöschanlagen mit Löschgasen“  
VdS Schadenverhütung GmbH, Köln
- [6] BGR 134 „Einsatz von Feuerlöschanlagen mit Sauerstoff verdrängenden Gasen“  
Berufsgenossenschaftliche Regeln für Sicherheit und Gesundheitschutz  
am Arbeitsplatz

Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften  
Fachausschuss "Nahrungs- und Genussmittel" der BGZ  
Juli 1998, Aktualisierter Nachdruck Januar 2004

- [7] BGI 888 „Sicherheitseinrichtungen beim Einsatz von Feuerlöschanlagen mit Löschgasen“  
Berufsgenossenschaftliche Informationen für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit, Januar 2004
- [8] IdF NRW CO<sub>2</sub>-Löschanlagen - Hinweise für den Einsatzdienst  
Siehe unter:  
[http://www.idf.nrw.de/service/downloads/pdf/20081104\\_co2\\_loeschanlagen.pdf](http://www.idf.nrw.de/service/downloads/pdf/20081104_co2_loeschanlagen.pdf)
- [9] Lampe, J.; Schattka, D.: „Brandeinsatz mit Kohlenstoffdioxidfreisetzung in einem Lagerbetrieb“  
BRANDSCHUTZ Deutsche Feuerwehr-Zeitung 09/2009,  
S. 747 - 753

## 1. Identifizierung und Erfassung relevanter Betriebe

### 1.1 Suchraster

Zur Identifizierung und Erfassung der Betriebe in NRW, in denen CO<sub>2</sub> in Mengen > 3.000 kg hergestellt, gehandhabt oder gelagert werden, wurde ein Suchraster entwickelt. Dieses Suchraster umfasste folgende Punkte:

- Anfragen bei Behörden:
  - LANUV NRW,
  - Bezirksregierungen NRW,
  - Berufsfeuerwehren;

Anfangs erwogene Anfragen bei IHK und Hochschuleinrichtungen wurden wegen zu niedriger Erfolgsquote zurückgestellt.

- Anfragen bei Verbänden:
  - Werkfeuerwehrverband Deutschland e.V.,
  - Landesfeuerwehrverband NRW,
  - Institut der Feuerwehr NRW,
  - VdS Schadenverhütung GmbH,
  - Technische Prüfstelle Köln des VdS;

Weitere geplante Anfragen z.B. bei Berufsgenossenschaften wurden aus Zeitmangel nicht realisiert.

- Anfragen bei Betrieben des produzierenden Gewerbes (Schlüsselindustrien):
  - Luftzerleger (Hersteller/ Lieferanten),
  - Produzenten von CO<sub>2</sub> in verwertbarer Form (Hersteller/ Lieferanten),
  - Produzenten von Trockeneis (Hersteller/ Lieferanten),
  - Hersteller CO<sub>2</sub>-versetzter Getränke (Bier, Limonade, Mineralwasser),
  - Anwender von CO<sub>2</sub> (chemische Industrie);

Anfragen bei Händlern von Gasen in Einzelbinden (Druckgasflaschen) wurden wegen der geringen zusammenhängenden Menge (max. 50 kg pro Flasche) und der zumeist bevorzugten Lagerung im Freien zunächst nicht gestellt.

- Anfragen zu CO<sub>2</sub>-Löschanlagen:  
CO<sub>2</sub>-Löschanlagen finden in allen Bereichen der Industrie Anwendung, erfolgversprechende Anfragen bei Produktionsstätten mit brennbaren Stoffen (inklusive deren Lagerbereichen) wurden bevorzugt. Dazu zählen:
  - Farb- und Lackhersteller und deren Lager,
  - Autoindustrie,
  - Zementindustrie,
  - Speditionen mit Gefahrstofflagern,
  - Druckereien,
  - Düngemittelhersteller,
  - Polycarbonathersteller.

## **1.2 Durchführung der Befragung**

Die Durchführung der Anfrage bei Behörden und identifizierten Unternehmen gliederte sich in mehrere Schritte:

- Persönliches Telefonat in dem die vorhandene CO<sub>2</sub>-Menge abgefragt wurde und auf Grundlage dieser Angabe eine Einteilung erfolgte.
- Bei Mengen > 3.000 kg bzw. nicht erwünschten telefonischen Anfragen schloss sich umgehend eine schriftliche Abfrage mittels Fax oder E-mail inklusive vorbereitetem Antwortfax und Legitimationsschreiben des LANUV NRW an. In dieser schriftlichen Abfrage wurden die Auskünfte detaillierter abgefragt. Neben den Kontaktdaten des Ansprechpartners wurde um Auskunft über die vorhandene Gesamtmenge sowie die größte zusammenhängende Menge gebeten.
- Bei ausbleibenden schriftlichen Antworten startete 5 Arbeitstage nach Versenden des Faxes die Projektverfolgung. Dazu wurden die Ansprechpartner nochmals kontaktiert, der Bearbeitungsstand der Anfrage wurde höflich erfragt und nochmals um zeitnahe Auskunft gebeten.

### 1.3 Bewertung der Abfrageergebnisse

Zum Stichtag 13.05.2009 liegt folgender Projektstand vor:

**Tabelle 1.3-1:** Projektstand

| Menge >3.000 kg | Vorabinfo: Menge >3.000 kg | Menge <3.000 kg | Anfrage abgelehnt | Anfrage offen | Summe |
|-----------------|----------------------------|-----------------|-------------------|---------------|-------|
| 64              |                            | 113             | 11                | 39            | 227   |
| 28 %            |                            | 50 %            | 5 %               | 17 %          | 100 % |

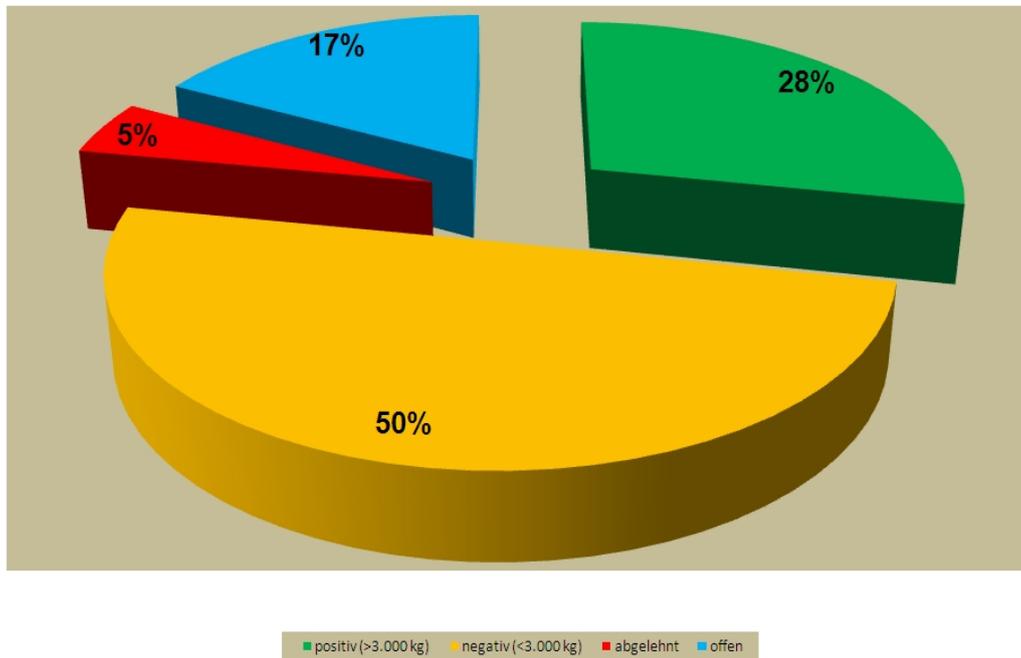
Mehr als  $\frac{3}{4}$  der angefragten Betriebe hat im Laufe des Untersuchungsvorhabens eine Aussage zu den vorhandenen CO<sub>2</sub>-Mengen gemacht.

Etwas mehr als  $\frac{1}{4}$  der Betriebe fällt mit den vor Ort gehandhabten oder gelagerten CO<sub>2</sub>-Mengen in den angegebenen Bereich.

Eine genauere Betrachtung der Firmen, die die Anfrage nicht beantworteten zeigt, dass diese in allen Industriesparten zu finden sind und von der kleinen Hausbrauerei bis zum Chemiekonzern alle Größen umfassen.

Mögliches Potenzial an CO<sub>2</sub>-Mengen oberhalb der 3.000 kg-Schwelle wird noch bei großen Brauereien, Limonadenherstellern, Lackherstellern, Chemiewerken und Industrieparks gesehen.

**Auswertung Projektstand CO<sub>2</sub>-Studie**  
(227 abgeragte Firmen = 100 %)



**Diagramm 1.3-2:** Auswertung Projekt CO<sub>2</sub>-Studie

## **2. Auswahl der Musteranlagen und deren Beschreibung**

Bei den für den zweiten Teil des Untersuchungsvorhabens durch das LANUV NRW ausgewählten Teilnehmern wurde Wert darauf gelegt, eine Auswahl zu treffen, die sowohl verschiedene Bereiche des CO<sub>2</sub>-Einsatzes abdeckt (Getränkeindustrie, Hersteller, Löschanlagen) als auch eine gewisse Verteilung über NRW zu gewährleisten.

Im Rahmen des Untersuchungsvorhabens wurden die Musteranlagen besucht, es fand ein Gespräch mit Informationsaustausch zwischen den Beteiligten statt und anschließend wurde eine Betriebsbegehung durchgeführt. Besondere Aufmerksamkeit wurde dabei der CO<sub>2</sub>-Lagerstätte und deren Verwendung gewidmet. Im Folgenden werden die Standorte der Musteranlagen skizziert.

## **2.1 Fall 1 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Produktionsbetrieb**

### 2.1.1 Beschreibung des Standortes

Die Firma produziert und lagert auf dem Betriebsgelände Additive für die Kunststoffherstellung sowie die zur Produktion benötigten Hilfs- und Rohstoffe. Der Betriebsbereich unterliegt den Grundpflichten der StörfallV.

Das Betriebsgelände besteht aus mehreren Produktions- und Verwaltungsgebäuden. Der östliche Teil des Betriebsgeländes, in dem die Produktionsgebäude liegen, wird begrenzt durch eine Straße, eine Eisenbahnlinie, die Hafenbahnlinie und einen Nachbarbetrieb.

In unmittelbarer Umgebung des Betriebsgeländes (Umkreis von ca. 50 m um die Freisetzungsstelle) befinden sich keine besonderen Schutzobjekte, der Betriebsbereich liegt gemäß Flächennutzungsplan in einem reinen Industriegebiet. Für schweres Einsatzgerät stehen der Feuerwehr zwei Zufahrten von der Straße aus zur Verfügung.

### 2.1.2 Angaben zur CO<sub>2</sub>-Löschanlage

Der Vorratstank der CO<sub>2</sub>-Löschanlage für den betrachteten Schutzbereich (Vorhaltevolumen: 25,8 m<sup>3</sup>) befindet sich in einem separaten Lagerraum des Nachbargebäudes auf Ebene 2 und ist über eine Steigleiter erreichbar. Im selben Lagerraum ist auch der Vorratstank der CO<sub>2</sub>-Löschanlage für den Produktionsbereich (Vorhaltevolumen: 14,65 m<sup>3</sup>) untergebracht. Der Lagerraum besitzt eine Tür, die nach außen öffnet.

Der Lagerraum für den CO<sub>2</sub>-Vorratstank hat eine Länge von ca. 20 m und eine Breite von ca. 5 m. Die Außenwände sind in der Feuerwiderstandsklasse F90-A und die Decke als Trapezblechdach mit einer Rohrdurchführung (DN300) ausgeführt. Durch diese Rohrdurchführung ist das Versorgungsrohr der CO<sub>2</sub>-Löschanlage (DN220) verlegt, welches zum Nachbargebäude führt. Die Durchführung ist nicht gasdicht ausgeführt und dient gleichzeitig zur Belüftung des Lagerraums.

Bei der CO<sub>2</sub>-Löschanlage handelt es sich um eine CO<sub>2</sub>-Niederdrucklöschanlage der Fa. Minimax GmbH & Co. KG. Der Vorratstank ist auf einer Waage aufgestellt, die die Füllmenge des Tanks anzeigt. An diesen Tank ist eine Kühleinrichtung mit Steuerung angeschlossen, die die Einhaltung der Lagerparameter steuert. Das Bereichsventil für das Nachbargebäude befindet sich auf dem Dach über dem CO<sub>2</sub>-Vorratstank.

### 2.1.3 Schutzbereich der CO<sub>2</sub>-Löschanlage

In dem durch die CO<sub>2</sub>-Löschanlage zu schützenden Gebäude befindet sich das Rohstofflager, in dem laut Brandschutzkonzept die in Tabelle 2.2.1-2 genannten Lagermengen zugelassen sind.

**Tabelle 2.1-1:** Lagermengen im Rohstofflager

| Bezeichnung | Menge   | Eigenschaften der gelagerten Stoffe                                    |         |
|-------------|---------|--|---------|
| Regallager  | 1.350 t | GefStoffV X <sub>n</sub> X <sub>i</sub> , N, R10                       | WGK 1-2 |
| Kammer 1    | 110 t   | GefStoffV F (R11), X <sub>n</sub> , X <sub>i</sub> , N                 | WGK 1   |
| Kammer 2    | 110 t   | GefStoffV F (R11), X <sub>n</sub> , X <sub>i</sub> , N                 | WGK 1   |
| Kammer 3    | 110 t   | Kühlagerung,<br>GefStoffV F (R11), X <sub>n</sub> , X <sub>i</sub> , N | WGK 1   |
| Kammer 4    | 110 t   | Org. Säuren,<br>GefStoffV C, X <sub>n</sub> , X <sub>i</sub> , N, R10  | WGK 1   |
| Kammer 5    | 110 t   | Org. Basen,<br>GefStoffV C, X <sub>n</sub> , X <sub>i</sub> , N, R10   | WGK 1   |

Der gesamte Gebäudekomplex des Rohstofflagers hat eine Länge von ca. 60 m und eine Breite von ca. 25 m bei einer Höhe von ca. 15 m. Die Außenwände sind in der Feuerwiderstandsklasse F90-A errichtet. Alle tragenden und aussteifenden Bauteile sind ebenfalls in der Feuerwiderstandsklasse F90-A errichtet, alle weiteren Bau- und Sonderbauteile sind gemäß DIN 4102 Teil 4 ausgeführt. Für die Bau- und Sonderbauteile, die nicht der vorgenannten Norm entsprechen, ist vor deren Einbau ein gesonderter Nachweis über das Brandverhalten erbracht worden.

Die Trennwände zwischen den einzelnen Kammern 1-5, den Kammern und dem Regallager sowie zwischen dem Lagergebäude und dem Nachbargebäude sind in der Feuerwiderstandsklasse F-90A errichtet. Durch diese Bauausführungen ergeben sich folgende Brandbekämpfungsabschnitte:

- a) Reservegeschoss
- b) Bürogeschoss

c) Regallager

d) Lagerräume (Kammer 1-5)

Die Brandbekämpfungsabschnitte entsprechend den Forderungen der DIN 4102 Teil 3 und sind mit Feuerschutzabschlüssen der Feuerwiderstandsklasse T30 abgeschlossen.

Die elektrischen Anlagen im Lagergebäude entsprechen den Anforderungen an die Zone 2 in Bezug auf den explosionsgefährdeten Bereich und der Feuerwiderstandsklasse E30.

In der Lagerhalle, einschließlich der Nebenkammern 1-5, ist eine ortsfeste, vollautomatisch auslösende Feuerlöschanlage mit gekoppelter Brandmeldeanlage und Durchschaltung zur öffentlichen Feuerwehr installiert. Zusätzlich ist zur Erkennung von gefährlichen Dampf-Luft-Gemischen eine Gaswarnanlage installiert, die auf Methan kalibriert und mit der Brandmeldeanlage gekoppelt ist. Die Gaswarnanlage steuert die Lüftungsanlage und bewirkt einen 0,25- bis 5-fachen Luftwechsel in Abhängigkeit von der Gaswarnstufe (Ruhebetrieb bis Gaswarnstufe 2).

Im Falle einer Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage geschieht dies nach einer Vorwarnzeit von 30s. In dieser Zeit haben Angestellte und Besucher ausreichend Zeit, um sich aus dem Löschbereich zu entfernen. An den Zugängen zu den einzelnen Brandschutzabschnitten sind beleuchtete Hinweisschilder „CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Betrieb“ und Blitzleuchten installiert, die vor dem Betrieb der CO<sub>2</sub>-Löschanlage und einem Zutritt warnen sollen. Für die Entrauchung des Gebäudes ist eine Rauchabzugsanlage installiert. Zusätzlich zur installierten Anlage werden vor Ort vier Entrauchungsventilatoren bereitgehalten. Die Entrauchung geschieht ausschließlich durch die öffentliche Feuerwehr.

Die Abstände des Rohstofflagers zur Grenze des Betriebsgeländes betragen:

in nördlicher Richtung: ca. 250 m Richtung öffentliche Straße

in östlicher Richtung: ca. 10 m Richtung Eisenbahnlinie Wesel

ca. 60 m Richtung nächster Wohnbebauung

in südlicher Richtung: ca. 80 m Richtung Hafenbahn

in westlicher Richtung: ca. 77 m Richtung Nachbarbetrieb

#### 2.1.4 Gefahren durch CO<sub>2</sub>

Die Firmenmitarbeiter werden in der regelmäßig stattfindenden Brandschutzübung und -schulung auf die Gefahren, die durch CO<sub>2</sub> als Löschmittel entstehen, hingewiesen.

#### 2.1.5 Verfahrensparameter des CO<sub>2</sub>-Vorratstanks für den Schutzbereich Rohstofflager

**Tabelle 2.1-2:** Verfahrensparameter

| <b>Volumen (l)</b>               | <b>zul. Betriebstemperatur (°C)</b> |     | <b>zul. Betriebsdruck (bar)</b> |     |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 25.800                           | -40                                 | +45 |                                 | +25 |
| <b>Masse CO<sub>2</sub> (kg)</b> | <b>Betriebstemperatur (°C)</b>      |     | <b>Betriebsdruck (bar)</b>      |     |
| 23.900                           | ca. -19                             |     | +20,5                           |     |

#### 2.1.6 Freisetzungsszenarien

Für die Freisetzung des gelagerten CO<sub>2</sub> wurden die folgenden Freisetzungsszenarien und deren Auswirkungen betrachtet:

- Stutzenabriss DN10 in der Löschzentrale,
- Stutzenabriss DN25 in der Löschzentrale,
- Fehlauslösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage und
- ordnungsgemäßes Auslösen bei einem Brand.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen und deren Bewertung sind in Kapitel 3 dargestellt.

## **2.2 Fall 2 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich A**

### 2.2.1 Beschreibung des Standortes

Die Firma betreibt auf ihrem Betriebsgelände ein Speditionslager, das den erweiterten Pflichten der StörfallV unterliegt.

Das Betriebsgelände ist unterteilt in zwei Hofflächen, die untereinander nicht verbunden sind. Das Speditionslager besteht aus vier Hallen und dient ausschließlich der Lagerung von Speditionsgütern, insbesondere Chemieprodukten. Die Hallen 1 und 3 sind als Gefahrstofflager ausgewiesen. Weiter befinden sich auf dem Betriebsgelände Rampen, Werkstätten, Bürogebäude und ein Wohnhaus.

In unmittelbarer Umgebung des Betriebsgeländes (Umkreis von ca. 50 m um die Freisetzungsstelle) befinden sich weder besondere Schutzobjekte noch liegt der Betriebsbereich in einem Schutzgebiet. Gemäß Flächennutzungsplan handelt es sich um ein Gewerbemischgebiet.

Für schweres Einsatzgerät stehen der Feuerwehr die Zufahrten von zwei öffentlichen Straßen zur Verfügung.

### 2.2.2 Angaben zur CO<sub>2</sub>-Löschanlage

Der CO<sub>2</sub>-Vorratstank für die Löschanlage befindet sich in einem Lagerraum im Erdgeschoss im Inneren des an die Halle 3 angrenzenden Büro- und Sozialgebäudes (Abmessung ca. 6 m x 13 m). Der Lagerraum besitzt eine Tür, die den Zugang vom Treppenhaus des Gebäudes her ermöglicht, und ein Fenster. Die Tür und das Fenster des Lagerraums öffnen nach innen. Im Lagerraum und im angrenzenden Treppenhaus ist eine alarmierende CO<sub>2</sub>-Gaswarnanlage installiert. Die Rohrdurchführungen in den Decken und Wänden sind gasdicht ausgeführt. Zur Vermeidung unzulässiger Überdrücke im Vorratstank ist eine Druckentlastung zur Atmosphäre installiert. Die Befüllung des Tanks erfolgt bei Bedarf von der Straße her durch das geöffnete Fenster.

Bei der CO<sub>2</sub>-Löschanlage handelt es sich um eine CO<sub>2</sub>-Niederdrucklöschanlage der Fa. TOTAL WALTHER GmbH. Der Vorratstank ist auf einer Waage aufgestellt, die die Füllmenge des Tanks anzeigt und bei Unterschreitung einer durch den Hersteller festgelegten Mengenschwelle von 36.040 kg erstmals und bei 35.570 kg nochmals alarmiert. Die Unterschreitung der Mengenschwelle wird an eine externe Gesellschaft gemeldet und der Tank, spätestens nach der zweiten Alarmierung, auf Veranlassung des Betreibers

nachgefüllt. Diese Meldeprozedur stellt sicher, dass immer die Mindestmenge für einen erfolgreichen Löscheinsatz vorgehalten wird. Die an den Tank angeschlossene Kühleinrichtung mit Steuerung sorgt für die Einhaltung der Lagerparameter. Das CO<sub>2</sub> wird bei Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage zur besseren Wahrnehmung mit Citrusduft markiert.

### 2.2.3 Schutzbereich der CO<sub>2</sub>-Löschanlage

In der Halle 3 sind eine automatisch auslösende CO<sub>2</sub>-Löschanlage und eine Gaswarnanlage (kalibriert auf Toluol) installiert. Bei den dort zu schützenden Speditionsgütern handelt es sich um bis zu 1.000 t brennbarer Stoffe (ehem. VbF-Gefahrklassen AI und AII) und 190 t giftiger Stoffe oder Zubereitungen. Dies entspricht hochentzündlichen (F+), leichtentzündlichen (F) und entzündlichen Stoffen in geschlossenen Gebinden, vor allem Farben und Lacken. Die Eigenschaften sind grundsätzlich als gesundheitsschädlich (X<sub>N</sub>) und reizend (X<sub>I</sub>) einzustufen. Die Produkte sind entsprechend den verkehrsrechtlichen Vorschriften verpackt. Die Gebindegröße liegt zwischen 0,250 l und 1.000 l. Es werden ausschließlich komplette Ladeeinheiten gehandhabt, d.h. Paletten mit Kleingebinden oder Fässer bzw. IBC. Ein Ab- oder Umfüllen findet im gesamten Betriebsbereich nicht statt.

Die Abmessungen der Halle 3 betragen (Länge x Breite x lichte Höhe) 61 m x 22,5 m x 13 m. Die Halle ist mit einem halbautomatischen, EDV-gestützten Hochregallager bestehend aus Einzel- und Doppelregalzeilen mit insgesamt maximal 2.600 Palettenstellplätzen (entsprechend 1.040 t) ausgerüstet. Die Entladung der LKW erfolgt mittels Gabelstapler (E-Stapler bzw. Ex-Stapler). Nach einer Eingangskontrolle befördern diese das palettierte Lagergut zu den Übergabestationen in der Halle 3. Von dort aus werden die Paletten mittels Regalbediengeräten ins Hochregallager verbracht. Die Vergabe der Palettenregalplätze erfolgt EDV-gesteuert.

Alle Hallen auf dem Betriebsgelände sind als Stahlbetonkonstruktion errichtet. Sowohl die Außenwände als auch die ggf. vorhandenen Trennwände zwischen den Hallen sind als Brandwände der Feuerwiderstandsklasse F-90 ausgeführt und haben eine Stärke von ca. 0,28 m. Jede der Lagerhallen bildet einen separaten Brandabschnitt.

Die Dächer der Hallen bestehen aus Stahltrapezprofilen, Dachisolierung (B1) und Dachdeckung mit Dachbahnen. Alle Hallenböden sind als Industrieböden in Beton ausgeführt und nicht brennbar.

Die Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage kann automatisch durch die Branderkennung oder manuell geschehen. Parallel zur Alarmierung der Feuerwehr wird in der Halle 3 akustischer und optischer Alarm ausgelöst (Hupe/ Alarmfanfare und Blitzleuchte). Eine Ampel an der Feuerwehrezufahrt informiert über das Auslösen des Feueralarms in der entsprechenden Halle (rotes Licht). Nach Auslösung der Löschanlage beginnt eine Evakuierungszeit von 40 s. Die Lüftungsanlage wird automatisch abgeschaltet, Stellmotoren verschließen die Lüftungsleitungen, die Rauch- und Wärmeabzugseinrichtung (RWA) sowie die Rolll Tore werden automatisch geschlossen. Mitarbeiter sind gemäß den regelmäßig stattfindenden Schulungen und der in allen Bereichen aushängenden Brandschutzordnung angewiesen, den Löschbereich sofort zu verlassen und den Sammelpunkt aufzusuchen. Vor dem Betreten des mit CO<sub>2</sub> gefluteten Löschbereichs wird optisch mittels Hinweisschild „CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Betrieb“ und Blitzleuchte gewarnt. Die Entrauchung der Halle 3 durch Einschalten der stationären Belüftungsanlage, Überdrucklüfter in den Schlupftüren, Öffnen der RWA und/ oder das Niederschlagen des CO<sub>2</sub> mit Wasser sowie die anschließende Freigabe des Löschbereichs geschehen ausschließlich durch die öffentliche Feuerwehr.

Die Abstände des Vorratstanks zur Grenze des Betriebsgeländes bzw. zu den nächstliegenden besonderen Schutzobjekten betragen:

in nördlicher Richtung: ca. 75 m zur öffentlichen Straße (Gewerbebetrieb) /  
Autobahn

in NW-Richtung: ca. 350 m Hauptfeuer- und Rettungswache der Feuerwehr

in östlicher Richtung: ca. 140 m zur Anschlussstelle der Autobahn

in südlicher Richtung: ca. 270 m zur öffentlichen Straße

in SW Richtung: ca. 175 m Werkwohnungen in Wohnhaus 10

ca. 300 m Berufsbildungszentrum

in westlicher Richtung: ca. 25 m zur öffentlichen Straße

ca. 60 m zur nächstgelegenen Wohnbebauung

#### 2.2.4 Gefahren durch CO<sub>2</sub>

Im Betrieb wird das Verhalten nach Auslösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage durch den entsprechenden Punkt im Alarm- und Gefahrenabwehrplan (AGAP) gemäß § 10 StörfallV geregelt. Zusätzlich ist die Brandschutzordnung gemäß DIN 14096 mit dem Unterpunkt „Sicherheitsregel zum Umgang mit der CO<sub>2</sub>-Löschanlage“ in allen Gebäuden und Lagerhallen auf dem Betriebsgelände angebracht.

#### 2.2.5 Verfahrensparameter des CO<sub>2</sub>-Vorratstanks

**Tabelle 2.2-1:** Verfahrensparameter

| <b>Volumen (l)</b>               | <b>zul. Betriebstemperatur (°C)</b> |     | <b>zul. Betriebsdruck (bar)</b> |     |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 44.560                           | -40                                 | +20 |                                 | +22 |
| <b>Masse CO<sub>2</sub> (kg)</b> | <b>Betriebstemperatur (°C)</b>      |     | <b>Betriebsdruck (bar)</b>      |     |
| 38.060                           | ca. -20                             |     | +20                             |     |

#### 2.2.6 Freisetzungsszenarien

Für die Freisetzung des gelagerten CO<sub>2</sub> wurden die folgenden Freisetzungsszenarien und deren Auswirkungen betrachtet:

- Stutzenabriss DN10 in der Löschzentrale,
- Stutzenabriss DN25 in der Löschzentrale,
- Fehlauslösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage und
- ordnungsgemäßes Auslösen bei einem Brand.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen und deren Bewertung sind in Kapitel 3 dargestellt.

## **2.3 Fall 3 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich B**

### 2.3.1 Beschreibung des Standortes

Die Firma betreibt auf ihrem Betriebsgelände ein Speditionslager, das den erweiterten Pflichten der StörfallV unterliegt. Zusammen mit dem angrenzenden und durch eine Durchfahrt verbundenen Grundstück besteht ein Betriebsbereich.

Das Speditionslager besteht aus vierzehn Hallen sowie zwei Bürogebäuden. Die Hallen 1-7 werden als Gefahrstofflager benutzt. Das Speditionslager dient ausschließlich der Lagerung von Speditionsgütern, insbesondere Chemieprodukten, ein Ab- oder Umfüllen findet nicht statt.

In unmittelbarer Umgebung des Betriebsgeländes (Umkreis von ca. 75 m um die Freisetzungsstelle) befinden sich keine besonderen Schutzobjekte, der Betriebsbereich liegt gemäß Flächennutzungsplan in einem reinen Industriegebiet.

Für schweres Einsatzgerät stehen der Feuerwehr zwei Zufahrten von öffentlichen Straßen zum Betriebsbereich zur Verfügung.

### 2.3.2 Angaben zur CO<sub>2</sub>-Löschanlage

Der CO<sub>2</sub>-Vorratstank für die Löschanlage befindet sich in einem Lagerraum im Inneren des Gebäudes zwischen zwei Lagerhallen (Abmessung ca. 7,5 m x 7,5 m). Der Lagerraum besitzt drei Türen und ist durch zwei Vorräume vom Hof aus zu erreichen. Die Türen des Lagerraums zum Lagerbereich hin öffnen nach innen, die Tür des Lagerraums zu den Vorräumen hin (CO<sub>2</sub>-Löschzentrale) öffnet nach außen. Die Türen sind jeweils mit einem 0,3 m hohen Gasschott versehen. Im Lagerraum ist eine alarmierende CO<sub>2</sub>-Gaswarnanlage installiert. Die Rohrdurchführungen in den Decken und Wänden sind gasdicht ausgeführt. Zur Belüftung des Raumes ist ein Rohr DN300 installiert. Dieses ist unabsperbar mit der Atmosphäre verbunden.

Bei der CO<sub>2</sub>-Löschanlage handelt es sich um eine CO<sub>2</sub>-Niederdrucklöschanlage der Fa. TOTAL WALTHER GmbH. Der Vorratstank ist auf einer Waage aufgestellt, die die Füllmenge des Tanks anzeigt. An diesen Tank ist eine Kühleinrichtung mit Steuerung angeschlossen, die die Einhaltung der Lagerparameter steuert.

### 2.3.3 Schutzbereich der CO<sub>2</sub>-Löschanlage

Die Hallen 1 und 3 haben jeweils Abmessungen von 40 m Länge und 20 m Breite bei einer Höhe von ca. 12 m. Eine unabhängige Gaswarnanlage (kalibriert auf Propan/ Butan) steuert die Lüftungsanlage in den Halle 1 und 3. Bei den dort zu schützenden Speditionsgütern handelt es sich um bis zu 500 t brennbare und giftige Stoffe sowie bis zu 2.400 t brennbare Flüssigkeiten und/ oder Aerosole. Hauptsächlich werden in den Hallen 1 und 3 Farben, Lacke und kosmetische Produkte gelagert.

Die Außen- und Trennwände der Lagerbereiche sind in der Feuerwiderstandsklasse F-90 errichtet worden. Die Dächer der Lagerhallen bestehen aus nicht brennbarem Material.

Bei Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage wird im betroffenen Löschbereich automatisch akustischer und optischer Alarm ausgelöst (Hupe und Blitzleuchte). Nach Auslösung der Löschanlage beginnt eine Evakuierungszeit von 45 s. Mitarbeiter sind gemäß den regelmäßig stattfindenden Schulungen und den in den entsprechenden Bereichen aushängenden Betriebsanweisungen angewiesen, den Löschbereich sofort zu verlassen. Vor dem Betreten des mit CO<sub>2</sub> gefluteten Löschbereichs wird optisch mittels leuchtenden Hinweisschildern „CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Betrieb“ und Blitzleuchten gewarnt. Die Entrauchung mittels Lüftern in den Schlupftüren und über Dach sowie die Freigabe des Löschbereichs geschehen ausschließlich durch die öffentliche Feuerwehr.

Die Abstände des Vorratstanks zur Grenze des Betriebsgeländes bzw. zu den nächstliegenden besonderen Schutzobjekten betragen:

in nördlicher Richtung: ca. 105 m Richtung Nachbarhalle

in NO Richtung: ca. 500 m Schule

in östlicher Richtung: ca. 75 m Richtung Nachbargrundstück

in südlicher Richtung: ca. 95 m Richtung öffentlicher Straße

in westlicher Richtung: ca. 80 m Richtung öffentlicher Straße

ca. 200 m nächstgelegene Wohnbebauung

### 2.3.4 Gefahren durch CO<sub>2</sub>

Im Gefahrstoffbereich werden nur festangestellte Mitarbeiter eingesetzt. Das Verhalten nach Auslösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage wird durch eine detaillierte Betriebsanweisung „Sicherheitsregel zum Umgang mit der CO<sub>2</sub>-Löschanlage“ geregelt. Für die externen Einsatzkräfte findet jährlich eine Begehung statt.

### 2.3.5 Verfahrensparameter des CO<sub>2</sub>-Vorratstanks

**Tabelle 2.3-1:** Verfahrensparameter

| <b>Volumen (l)</b>               | <b>zul. Betriebstemperatur (°C)</b> |     | <b>zul. Betriebsdruck (bar)</b> |     |
|----------------------------------|-------------------------------------|-----|---------------------------------|-----|
| 54.300                           | -40                                 | +45 |                                 | +22 |
| <b>Masse CO<sub>2</sub> (kg)</b> | <b>Betriebstemperatur (°C)</b>      |     | <b>Betriebsdruck (bar)</b>      |     |
| 42.000                           | ca. -18                             |     | +18                             |     |

### 2.3.6 Freisetzungsszenarien

Für die Freisetzung des gelagerten CO<sub>2</sub> wurden die folgenden Freisetzungsszenarien und deren Auswirkungen betrachtet:

- Stutzenabriss DN10 in der Löschzentrale,
- Stutzenabriss DN25 in der Löschzentrale,
- Fehlauslösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage und
- ordnungsgemäßes Auslösen bei einem Brand.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen und deren Bewertung sind in Kapitel 3 dargestellt.

## **2.4 Fall 4 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb A**

### 2.4.1 Beschreibung des Standortes

Der betreffende Betriebsbereich unterliegt den Grundpflichten der StörfallV. Die Firma lagert in diesem Betriebsbereich verschiedene Gase in Tanks, füllt diese Gase in Druckgasflaschen ab und lagert die gefüllten Druckgasflaschen bis zur Auslieferung im Betriebsbereich.

Zum Betrieb gehören neben diversen Arbeits- und Lagerhallen ein Bürogebäude und zwei Wohnhäuser mit Werkwohnungen. Die Wohnhäuser befinden sich nicht auf dem geschlossenen Betriebsgelände und gehören somit nicht zum Betriebsbereich.

In unmittelbarer Umgebung des Betriebes (Umkreis von ca. 200 m um die Freisetzungsstelle) befinden sich weder ausgewiesene Naturschutz- oder Wasserschutzgebiete noch weitere Anlagen, die der StörfallV unterliegen. Die Abstände zu einem Klärwerk, einer Bundesstraße und zum nächstgelegenen Wohngebiet sind sicherheitstechnisch als unbedenklich einzustufen. Aufgrund der örtlichen Lage ist von keinem erhöhten Gefahrenpotential für den Betriebsbereich und die unmittelbare Umgebung auszugehen.

Die einzige mit schwerem Gerät nutzbare Feuerwehrezufahrt zum Betriebsbereich ist ein Wirtschaftsweg. Die Einfahrten zum Betriebsgelände befinden sich gegenüber der Logistikhalle zwischen den Hallen 1 und 3 sowie am LKW-Parkplatz.

### 2.4.2 Verfahrensbeschreibung

Das gelagerte CO<sub>2</sub> wird mittels Tankwagen angeliefert, in den CO<sub>2</sub>-Hochdrucktank (HD-Tank) gepumpt und bis zur Abfüllung dort gelagert. Aus dem HD-Tank wird CO<sub>2</sub> für die Abfüllung von verschiedenen Gasen und Mischgasen entnommen. Als Beispiel soll hier die Abfüllung von Carbolin<sup>®</sup> dienen.

Zur Abfüllung von Carbolin<sup>®</sup>, einem Gemisch aus Stickstoff und Kohlendioxid mit einem CO<sub>2</sub>-Anteil zwischen 3 % und 50 %, in Flaschen und Flaschenbündel dient der im unteren Teil der Abfüllhalle installierte Abfüllstand. Zur Abfülltechnik gehört neben dem HD-Tank, ein Reservebündel zur Entnahme von flüssigem CO<sub>2</sub> für Nachfüll- bzw. Nachdrückzwecke, ein Wärmetauscher zur Verdampfung von flüssigem CO<sub>2</sub> (im Winterbetrieb), ein Palettenfüllstand für 12 Flaschen mit einem Fassungsvermögen von 5 l bis 50 l sowie eine Füllwaage mit angeschlossener Referenzflasche zur Gewährleistung der exakten Füllmenge.

Die Abfüllung geschieht im Sommer durch die Entnahme von gasförmigen CO<sub>2</sub> aus dem HD-Tank bei einem Druck von ca. 50 bar. Im Winter wird flüssiges CO<sub>2</sub> bei einem Tankdruck von

ca. 35 bar entnommen, das vor der Abfüllung im Wärmetauscher verdampft wird. Der Abfüllvorgang ist automatisiert. Er startet nach Auswahl der gewünschten Mischung an der Füllwaage (fest programmierte Gewichte) durch Auslösen der Füllautomatik (Drucktaster). Ein manuelles Nachfüllen von CO<sub>2</sub> (Drucktaster) in die angeschlossenen Flaschen ist zusätzlich möglich. Grundsätzlich handelt es sich um einen diskontinuierlichen Abfüllprozess (Palette für Palette).

Für die Vermeidung eines unzulässig hohen Überdrucks, z.B. durch Einschluss von flüssigem CO<sub>2</sub>, ist die Entnahmeleitung für flüssiges CO<sub>2</sub> mittels installierten Sicherheitsventils abgesichert. Der HD-Tank ist über ein Wechselventil mit zwei Sicherheitsventilen abgesichert.

Bei allen Abfüllvorgängen sind die vorhandenen Sicherheitsvorrichtungen zu benutzen und der Sicherheitsabstand ist einzuhalten.

#### 2.4.3 Angaben zur Umgebung des CO<sub>2</sub>-Hochdrucktanks

In unmittelbarer Nähe des CO<sub>2</sub>-HD-Tanks, in dem das gasförmige CO<sub>2</sub> zur Abfüllung bevorratet wird, liegen die in Tabelle 2.4-1 aufgeführten Nachbarbauten und Einrichtungen.

**Tabelle 2.4-1:** Benachbarte Gebäude zum CO<sub>2</sub>-HD-Tank

|           | <b>Bezeichnung</b>                        | <b>Entfernung</b> |
|-----------|---|-------------------|
| im Norden | Freifläche, unbebautes Gebiet             | angrenzend        |
| im Osten  | Wohnhaus (Werkwohnungen) mit Sozialräumen | ca. 15 m          |
| im Süden  | Abfüllhalle (Halle 1)                     | angrenzend        |
| im Westen | Abfüllhalle (Halle 1) und Verdampfer      | angrenzend        |

Die Abstände zur Grenze des Betriebsgeländes betragen:

in nördlicher Richtung: ca. 30 m Richtung öffentlicher Straße / Kläranlage

in östlicher Richtung: ca. 115 m Richtung Eisenbahnlinie

in südlicher Richtung: ca. 140 m Richtung Bundesstraße

in westlicher Richtung: > 200 m Richtung nächstgelegener Wohnbebauung

Ein weiterer Tank mit druckverflüssigtem CO<sub>2</sub> (Gesamtmasse max. 27.000 kg) befindet sich ebenfalls an der Abfüllhalle (Halle 1) in einer Entfernung von ca. 40 m vom HD-Tank.

#### 2.4.4 Gefahren durch CO<sub>2</sub>

Die Mitarbeiter der Fa. Howe sind verpflichtet, bei der Abfüllung von CO<sub>2</sub> Handschuhe und Schutzbrille zu tragen. Auf die besonderen Gefahren im Umgang mit CO<sub>2</sub> wird in der regelmäßig stattfindenden Schulung hingewiesen. Detaillierte Arbeitsanweisungen regeln die Abfüllvorgänge der verschiedenen CO<sub>2</sub>-haltigen Produkte.

#### 2.4.5 Verfahrensparameter des CO<sub>2</sub>-HD-Tanks

**Tabelle 2.4-2:** Verfahrensparameter

| max. Volumen (l)           | zul. Betriebstemperatur (°C) |     | zul. Betriebsdruck (bar) |     |
|----------------------------|------------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 13.200                     | -50                          | +50 |                          | +80 |
| Masse CO <sub>2</sub> (kg) | Betriebstemperatur (°C)      |     | Betriebsdruck (bar)      |     |
| 9.500                      | ca. 25                       |     | +64                      |     |

#### 2.4.6 Freisetzungsszenarien

Für das Freisetzungsszenario wurde aus den nachfolgenden Gründen der HD-Tank dem CO<sub>2</sub>-Flüssigtank vorgezogen:

1. Die Gesamtmenge an gasförmig freigesetztem CO<sub>2</sub> (z. B. bei einem Spontanversagen) ist bei einer Hochdrucklagerung größer.
2. Die Möglichkeit einer Betrachtung einer Freisetzung aus einem HD-Tank ist bei den ausgewählten Studienteilnehmern nur bei diesem Betrieb gegeben.

Für die Freisetzung des im HD-Tank gelagerten CO<sub>2</sub> wurden die folgenden Freisetzungsszenarien und deren Auswirkungen betrachtet:

- Stutzenabriss DN10,

- Stutzenabriss DN25 und
- spontane Freisetzung.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen und deren Bewertung sind in Kapitel 3 dargestellt.

## **2.5 Fall 5 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb B**

### 2.5.1 Beschreibung des Standortes

Der betreffende Betriebsbereich unterliegt den erweiterten Pflichten der StörfallV und befindet sich in einem Industriegebiet. In diesem Betriebsbereich werden verschiedene Industriegase in Tanks gelagert, in Druckgasflaschen abgefüllt und anschließend bis zur im Betriebsbereich gelagert.

Zum Betrieb gehören neben diversen Abfüll- und Lagerhallen auch Bürogebäude, Lagerflächen und Verladebereiche.

In unmittelbarer Umgebung des Betriebes (Umkreis von ca. 50 m um die Freisetzungsstelle) befinden sich keine besonderen Schutzobjekte. Die nächstgelegene Wohnbebauung sowie eine größere Versammlungsstätte sind ausreichend weit entfernt (Entfernung > 100 m). Im Westen an der gegenüberliegenden Straßenseite befinden sich die ersten Gleise des Güterbahnhofs. Im Osten befindet sich ein Gleis einer Museumsbahn, das nur noch als Abstellgleis genutzt wird. An der Südspitze des Geländes befindet sich ein Verkaufsshop für Selbstabholer. Südöstlich schließt sich an den Betriebsbereich ein benachbartes Betriebsgelände an.

Der Betriebsbereich besitzt mehrere Feuerwehrezufahrten (Tore), die mit schwerem Einsatzgerät genutzt werden können.

### 2.5.2 Verfahrensbeschreibung

Das bei der Westfalen AG gelagerte CO<sub>2</sub> wird mittels Tankwagen angeliefert, in den CO<sub>2</sub>-Niederdrucktank (ND-Tank) gepumpt und bis zur Abfüllung dort gelagert.

Aus dem ND-Tank wird CO<sub>2</sub> für die Abfüllung von Mischgasen und reinem Kohlendioxid entnommen. Die Abfüllung erfolgt manometrisch bei Stickstoff- und Argongemischen mit CO<sub>2</sub>-Anteil und gravimetrisch bei der Abfüllung von reinem Kohlendioxid.

Zur Abfülltechnik für die Mischgasabfüllung gehören neben dem ND-Tank eine Kolbenpumpe, ein Wärmetauscher und ein CO<sub>2</sub>-Anwärmer. Die Abfüllung der Mischgase erfolgt durch die Anförderung des flüssigen CO<sub>2</sub> mittels Kolbenpumpe, Verdampfung im Wärmetauscher und nachgeschalteten CO<sub>2</sub>-Anwärmer, so dass das CO<sub>2</sub> bei einem Druck von ca. 50 bar gasförmig in die Flaschen gefüllt wird. Im Anschluss werden die Flaschen mit Argon bzw. Stickstoff bis zum Ansprechen des Kontaktmanometers (Sicherstellung des korrekten

Füllstandes) aufgefüllt. Bei einem Füllvorgang können je Palettenfüllstand maximal 12 Flaschen gleichzeitig gefüllt werden.

Der CO<sub>2</sub>-Strang ist mit einem Sicherheitsventil (80 bar), die Gesamtanlage je Pumpenstrang mit einem Sicherheitsventil (250 bar) und einem Kontaktmanometer zur Pumpenabschaltung gegen unzulässigen Überdruck abgesichert.

Zur Abfülltechnik für die Kohlendioxidabfüllung gehören neben dem ND-Tank, eine Kolbenpumpe, eine Bündel- und eine Flaschenwaage und zwei Füllautomaten. Die Abfüllung von flüssigem CO<sub>2</sub> in Flaschenbündel erfolgt mittels Kolbenpumpe. Pro Füllvorgang kann ein Bündel auf der Bündelwaage gefüllt werden. Die Abfüllung von flüssigem CO<sub>2</sub> in Einzelflaschen erfolgt mittels Füllautomaten. Pro Füllvorgang kann je Füllautomat eine Flasche gefüllt werden.

Der CO<sub>2</sub>-Strang ist mit einem Sicherheitsventil (80 bar), die Füllautomaten mit Sicherheitsventilen (103 bar) gegen unzulässigen Überdruck abgesichert. Der ND-Tank ist mit zwei Sicherheitsventilen (22 bar Wechselventile) gegen unzulässigen Überdruck abgesichert.

Bei allen Abfüllvorgängen sind die entsprechenden Arbeitsanweisungen einzuhalten.

### 2.5.3 Angaben zur Umgebung des CO<sub>2</sub>-Niederdrucktanks

Die Abstände zur Grenze des Betriebsgeländes bzw. zu den nächstliegenden besonderen Einrichtungen betragen:

|                         |           |  |
|-------------------------|-----------|--|
| in nördlicher Richtung: | ca. 150 m | zur Grenze des Betriebsgeländes  |
| in NO Richtung:         | > 250 m   | zu einer größeren Versammlungsstätte                                     |
| in östlicher Richtung:  | ca. 25 m  | zur Grenze des Betriebsgeländes, dahinter Gleis der Museumsbahn          |
| in SO Richtung:         | ca. 90 m  | zum benachbarten Betriebsgelände   |
| in südlicher Richtung:  | ca. 100 m | zur Grenze des Betriebsgeländes  |
| in westlicher Richtung: | ca. 75 m  | zur Grenze des Betriebsgeländes, dahinter Gleisanlagen des Güterbahnhofs |

#### 2.5.4 Gefahren durch CO<sub>2</sub>

Die Firmenmitarbeiter sind verpflichtet, bei der Abfüllung von CO<sub>2</sub> Handschuhe und Schutzbrille zu tragen. Auf die besonderen Gefahren im Umgang mit CO<sub>2</sub> wird in der regelmäßig stattfindenden Schulung hingewiesen. Detaillierte Abfüllanleitungen regeln die Abfüllvorgänge der verschiedenen CO<sub>2</sub>-haltigen Produkte. Betriebsanweisungen hängen in den Arbeitsbereichen aus. Sicherheitsdatenblätter zu allen im Betrieb gehandhabten Stoffen liegen vor.

Für den Fall einer CO<sub>2</sub>-Freisetzung sind im Alarmplan am Beispiel einer Freisetzung von Propan allgemeine Regeln für einen Gasausbruch und das damit verbundene weitere Vorgehen festgelegt. Diese allgemeinen Regeln werden den örtlichen Gegebenheiten/ Stoffeigenschaften angepasst.

#### 2.5.5 Verfahrensparameter des CO<sub>2</sub>-ND-Tanks

**Tabelle 2.5-1:** Verfahrensparameter

| Volumen (l)                | zul. Betriebstemperatur (°C) |     | zul. Betriebsdruck (bar) |     |
|----------------------------|------------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 50.000                     | -50                          | +30 |                          | +22 |
| Masse CO <sub>2</sub> (kg) | Betriebstemperatur (°C)      |     | Betriebsdruck (bar)      |     |
| 45.000                     | ca. -20                      |     | +20                      |     |

#### 2.5.6 Freisetzungsszenarien

Für die Freisetzung des gelagerten CO<sub>2</sub> wurden die folgenden Freisetzungsszenarien und deren Auswirkungen betrachtet:

- Stutzenabriss DN10,
- Stutzenabriss DN25 und
- spontane Freisetzung.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen und deren Bewertung sind in Kapitel 3 dargestellt.

## **2.6 Fall 6 - CO<sub>2</sub>-Einsatzbehälter in der Getränkeindustrie**

### 2.6.1 Beschreibung des Standortes

Der Betriebsbereich gliedert sich in zwei Bereiche, den Altstandort und den Neustandort. Am Neustandort betreibt die Firma einen Betrieb zur Herstellung und Abfüllung von Mineralwasser. Dieser Standort ist im Osten und Westen umgeben von Wiesen- und Ackerflächen und wird im Norden und Süden durch Straßen begrenzt.

Das Produktionsgebäude verfügt im nördlichen Teil über drei Etagen (Untergeschoss: Versorgungsebene, Erdgeschoss: Abfüllung und Obergeschoss: Büros). Das weitere Produktionsgebäude (Vollgutlager 1 und 2) ist, bei gleicher Bauhöhe, eingeschossig ausgeführt. Im nord-westlichen Bereich des Produktionsgebäudes schließt sich der Parkplatz für Mitarbeiter und Besucher an. Westlich des Produktionsgebäudes befinden sich Stellplätze für LKW sowie ein überdachter Außenbereich (Vollgutverladung). Eine Sammelstelle für Mitarbeiter und Besucher, die im Notfall aufzusuchen ist, befindet sich nord-westlich hinter den PKW-Stellplätzen im Bereich der Leergutfläche. Die Anzahl der im Werk befindlichen Personen ist jederzeit aus dem Schichtplan und dem Besucherbuch ersichtlich.

Vom Erdgeschoss (Abfüllung) ist das Untergeschoss (Versorgungsebene) über mehrere Treppenhäuser zu erreichen. Von der Abfüllung aus kann über das im Nord-Osten gelegenen Treppenhaus der Bereich des Rohstofflagers direkt erreicht werden. Eine im Untergeschoss befindliche, als Notausgang markierte Tür, führt direkt auf den Betriebshof. Diese Tür befindet sich im Nahbereich einer möglichen Freisetzung in ca. 20 m Entfernung zum CO<sub>2</sub>-Vorratstank.

Der Standort des CO<sub>2</sub>-Vorratstanks ist an der nord-östlichen Ecke des Produktionsgebäudes im Bereich des Wendeplatzes für die Verladung. Der Vorratstank ist gegen Beschädigung mit einem Anfahrtschutz gesichert und außerhalb der direkten Bewegungszone an der Seitenwand des Gebäudes aufgestellt.

In unmittelbarer Umgebung des Betriebes (Umkreis von ca. 40 m um den Vorratstank) befinden sich keine Wohnhäuser oder besondere Schutzobjekte. Eine Bundesstraße (u. a. Autobahnzubringer) grenzt allerdings unmittelbar an das Betriebsgelände (ca. 40 m von einer möglichen Freisetzungsstelle entfernt). Aufgrund der örtlichen Lage, der geographischen Gegebenheiten vor Ort (abfallender Betriebshof in Richtung Norden, d. h. Bundesstraße) und der meteorologischen Besonderheiten (Fallwinde aus den Ausläufern der südlich gelegenen Hügel) ist von einem erhöhten Gefahrenpotential für die unmittelbare Umgebung (Bundesstraße) auszugehen.

Für schweres Einsatzgerät stehen der Feuerwehr die Haupt- und Nebenzufahrten von der öffentlichen Straße zum Betriebsbereich zur Verfügung.

### 2.6.2 Verfahrensbeschreibung

Am Neustandort wird das Wasser aus der betriebseigenen Mineralquelle gefördert und in Mineralwassertanks gepumpt, um dort zwischengelagert zu werden. Im Abfüllbetrieb wird das Mineralwasser mit Kohlensäure (CO<sub>2</sub>) versetzt und in Flaschen gefüllt. Die gefüllten Flaschen werden in Kästen verpackt und diese auf Paletten gestapelt. Die versandfertigen Paletten werden im Bereich der Vollgutlager 1 und 2 bis zur Verladung gelagert. Die Vorhaltung von Leergut geschieht im Außenbereich.

Das für die Mineralwasserproduktion gelagerte CO<sub>2</sub> befindet sich in einem stehenden Tank auf der Nord-Ostseite des Gebäudes. Der Tank ist über eine Fernabfrageleitung mit einem CO<sub>2</sub>-Lieferanten verbunden. Bei niedrigem Füllstand wird über die Fernabfrage der Lieferant über die notwendige Befüllung informiert und dieser füllt mittels Tankwagen den CO<sub>2</sub>-Vorrattank auf. Das bevorratete CO<sub>2</sub> wird bis zur Abfüllung im Tank gelagert. Aufgrund der Behälterbauweise (Doppelmantel-Behälter mit Perlitefüllung im evakuierten Zwischenraum) kann auf den Betrieb eines Kälteaggregates verzichtet werden. Die Regelung des Tankdruckes erfolgt durch einen Druckaufbauregler (Druckaufbauverdampfer) und einen Druckabbauregler bzw. Tanksicherheitsventile.

### 2.6.3 Angaben zur Umgebung des CO<sub>2</sub>-Vorrattanks

Die Abstände zur Grenze des Betriebsgeländes betragen:

|                         |            |                                     |
|-------------------------|------------|-------------------------------------|
| in nördlicher Richtung: | ca. 40 m   | Werksgrenze / Richtung Bundesstraße |
| in östlicher Richtung:  | ca. 55 m   | Werksgrenze                         |
|                         | ca. 150 m  | nächstgelegene Wohnbebauung         |
| in südlicher Richtung:  | ca. 225 m  | Werksgrenze                         |
| in westlicher Richtung: | angrenzend | Produktions- und Verwaltungsgebäude |
|                         | ca. 265 m  | Werksgrenze                         |

#### 2.6.4 Gefahren durch CO<sub>2</sub>

Das CO<sub>2</sub> wird im Abfüllbereich nur in geschlossenen Maschinen verwendet. Die Menge des zwischen der Abfüllung in die Flaschen und dem Verschrauben dieser Flaschen ausströmenden CO<sub>2</sub> ist minimal und stellt keine relevante Menge im Sinne dieser Studie dar. Die Firmenmitarbeiter sind verpflichtet, bei der Abfüllung von CO<sub>2</sub> Handschuhe und Schutzbrille zu tragen. Auf die besonderen Gefahren im Umgang mit CO<sub>2</sub> wird in der regelmäßig stattfindenden Schulung hingewiesen. Detaillierte Arbeitsanweisungen regeln die Abfüllvorgänge der verschiedenen CO<sub>2</sub>-haltigen Produkte.

#### 2.6.5 Verfahrensparameter des CO<sub>2</sub>-Vorratstanks

**Tabelle 2.6-1:** Verfahrensparameter des CO<sub>2</sub>-Vorratstanks

| max. Volumen (l)           | zul. Betriebstemperatur (°C) |     | zul. Betriebsdruck (bar) |     |
|----------------------------|------------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 48.916                     | -196                         | +50 |                          | +25 |
| Masse CO <sub>2</sub> (kg) | Betriebstemperatur (°C)      |     | Betriebsdruck (bar)      |     |
| 40.000                     | ca. -25                      |     | +16                      |     |

#### 2.6.6 Freisetzungsszenarien

Für die Freisetzung des im Vorratstank gelagerten CO<sub>2</sub> wurden die folgenden Freisetzungsszenarien und deren Auswirkungen betrachtet:

- a) Stutzenabriss DN10,
- b) Stutzenabriss DN25 und
- c) spontane Freisetzung.

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen und deren Bewertung sind in Kapitel 3 dargestellt.

### 3. Vorbemerkungen zu den Ausbreitungsrechnungen

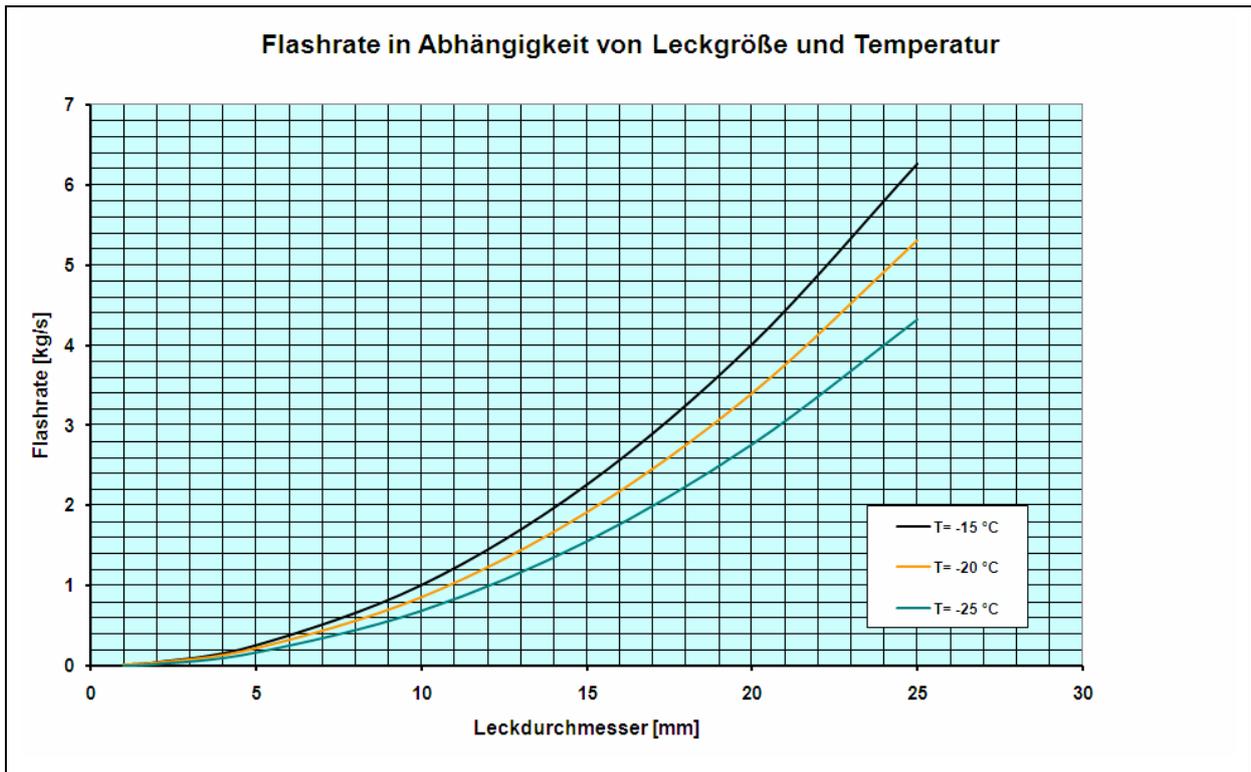
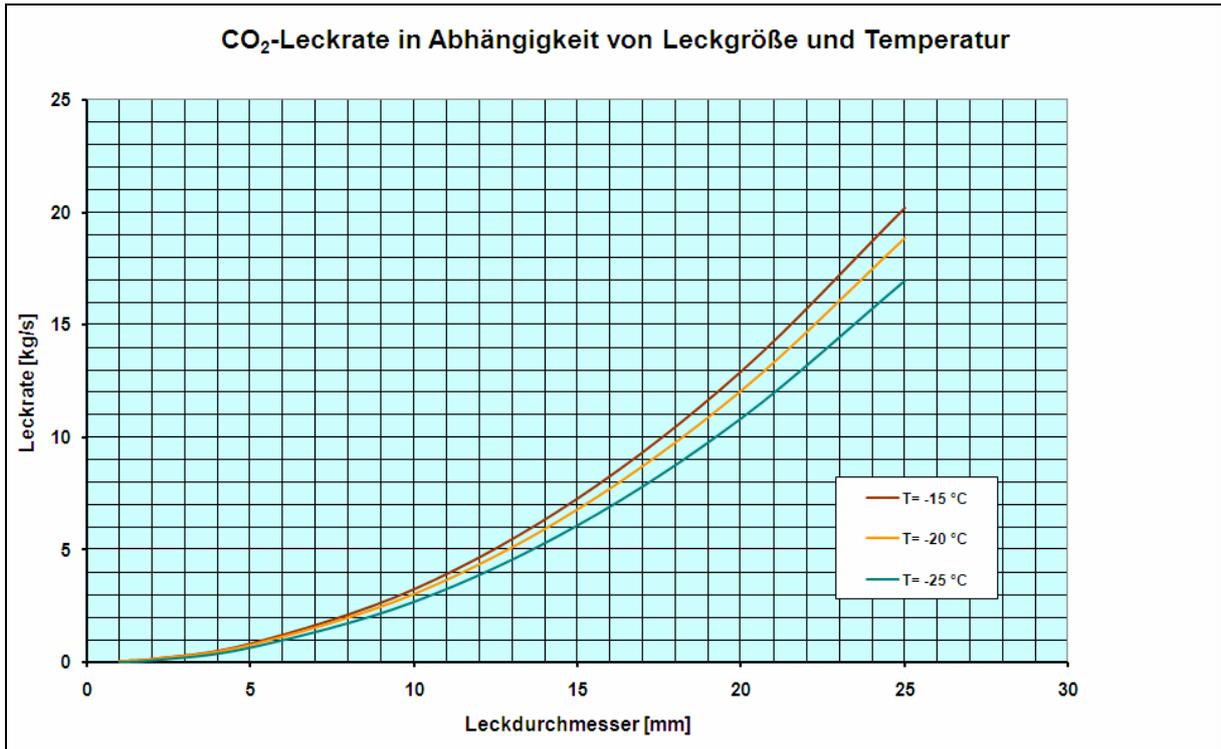
#### 3.1 Grundlagen der Ausbreitungsrechnung

##### 3.1.1 Thermodynamische Kennwerte von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

| Temperatur | Dichte               | Wärmekapazität<br>gasförmig | Wärmekapazität<br>flüssig | Dampfdruck |
|------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------|------------|
| [°C]       | [kg/m <sup>3</sup> ] | [kJ/kg*K]                   | [kJ/kg*K]                 | [bar]      |
| -100       | 1325,58              | 0,698605                    |                           | 0,452674   |
| -95        | 1310,04              | 0,703045                    |                           | 0,641801   |
| -90        | 1294,25              | 0,707759                    |                           | 0,890256   |
| -85        | 1278,18              | 0,712727                    |                           | 1,21056    |
| -80        | 1261,83              | 0,71793                     | 0,332344                  | 1,6165     |
| -75        | 1245,16              | 0,723346                    | 0,765341                  | 2,1231     |
| -70        | 1228,16              | 0,728954                    | 1,11098                   | 2,74648    |
| -65        | 1210,79              | 0,734732                    | 1,38255                   | 3,50383    |
| -60        | 1193,03              | 0,740657                    | 1,58576                   | 4,41331    |
| -55        | 1174,84              | 0,746709                    | 1,73009                   | 5,49396    |
| -50        | 1156,17              | 0,752866                    | 1,83074                   | 6,76562    |
| -45        | 1136,99              | 0,759108                    | 1,89531                   | 8,2489     |
| -40        | 1117,23              | 0,765415                    | 1,92949                   | 9,96508    |
| -35        | 1096,83              | 0,771769                    | 1,95418                   | 11,9361    |
| -30        | 1075,7               | 0,778154                    | 1,96938                   | 14,1846    |
| -25        | 1053,76              | 0,784551                    | 1,99027                   | 16,7336    |
| -20        | 1030,86              | 0,790947                    | 2,02825                   | 19,6072    |
| -15        | 1006,87              | 0,797328                    | 2,08902                   | 22,8296    |
| -10        | 981,578              | 0,803682                    | 2,18777                   | 26,4261    |
| -5         | 954,717              | 0,809996                    | 2,33021                   | 30,4226    |
| 0          | 925,916              | 0,816261                    | 2,52771                   | 34,8458    |
| 5          | 894,638              | 0,822468                    | 2,79169                   | 39,723     |
| 10         | 860,051              | 0,828609                    | 3,13353                   | 45,0829    |
| 15         | 820,75               | 0,834677                    | 3,56273                   | 50,9549    |
| 20         | 773,994              | 0,840666                    | 4,08688                   | 57,3696    |

Leckform: scharfkantiges Loch, keine Rissform

Ausflussfaktor:  $\alpha = 0,62$



### 3.1.2 Theoretische Grundlagen der Ausbreitungsrechnung

#### 3.1.2.1 Berechnung der Austrittsrate und der gasförmigen Emission von CO<sub>2</sub>

Die Austrittsrate des CO<sub>2</sub> wird mit Hilfe der nachfolgend aufgeführten Bernoulli-Gleichung für inkompressible, überkritische Medien berechnet, was für das betrachtete Ereignis als konservativ zu werten ist.

$$\dot{m} = \alpha \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (p_i - p_a)} \quad (\text{Gl. III-1})$$

mit folgender Bedeutung der Parameter:

|           |   |   |
|-----------|---|---|
| $\alpha$  | = | Ausflussfaktor                                  |
| $A$       | = | Größe der Leckageöffnung                        |
| $\rho$    | = | Dichte des Stoffes im Behälter bzw. Rohrleitung |
| $\dot{m}$ | = | Austrittsrate                                   |
| $p_i$     | = | Innendruck                                      |
| $p_a$     | = | Außendruck                                      |

#### 3.1.2.2 Flashverdampfung

Aufgrund der Temperatur im Lager-/ Einsatzbehälter ist das CO<sub>2</sub>, bezogen auf den Umgebungszustand, überhitzt. Ein Teil des flüssig austretenden CO<sub>2</sub> verdampft spontan (Flash-Verdampfung). Der verbleibende Rest kondensiert zu festem CO<sub>2</sub> (Trockeneis) und sinkt mit der Temperatur des Sublimationspunktes (-78,5 C) als Kohlendioxidschnee zu Boden. Wegen der hohen Sublimationswärme (573 kJ/kg) und der begrenzten Wärmezufuhr, ist bei einer Freisetzung in geschlossenen Räumen, im Betrachtungszeitraum nicht davon auszugehen, dass ein wesentlicher Beitrag zur gasförmigen Emission aus dem Kohlendioxidschnee zu erwarten ist. Die Emission aus dem Kohlendioxidschnee, bedingt durch Sonneneinstrahlung, ist nur bei den Szenarien eines Stutzenabrisses (DN10 und DN25) an einem im Freien stehenden Tank in der Lage, einen merklichen Beitrag zur Gesamtemission beizutragen.

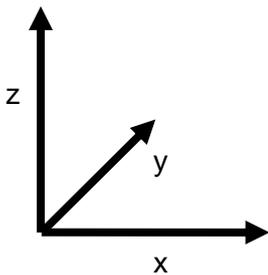
$$\dot{m}_{\text{Flash}} = 1,5 \cdot \dot{m}_{\text{Flg es}} \cdot \left( 1 - \exp \left[ \frac{c_p}{\Delta h_v} (T_{\text{fl}} - T_{\text{Sub}}) \right] \right) \quad (\text{Gl. III-2})$$

Zur Berechnung werden folgende Eingangsgrößen benötigt:

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $\dot{m}_{Fl\ddot{u}ss}$ | gesamter flüssig austretender Massenstrom            |
| $c_p$                    | isobare Wärmekapazität der Flüssigkeit am Siedepunkt |
| $\Delta h_v$             | Verdampfungsenthalpie am Sublimationspunkt           |
| $T_{Sub}$                | Sublimationstemperatur                               |
| $T_{Fl}$                 | Temperatur der Flüssigkeit vor dem Austritt.         |

### 3.2 Betrachtete Grenzkonzentrationen

Zur Bewertung der Freisetzung von gasförmigem Kohlendioxid wurden die nachfolgenden Grenzwerte herangezogen. Konzentrationen, die sich auf die Atemhöhe beziehen, entsprechen einer Höhe von 1,5 m über Erdgleiche. Dabei wird immer die Ausbreitung in Windrichtung (x-Achse) betrachtet. Die jeweils beschriebenen Quellabmessungen (x-, y- und z-Koordinaten) beziehen sich auf folgendes Koordinatensystem:



x-Achse: in Windrichtung

y-Achse: horizontal zur Windrichtung

z-Achse: vertikal zur Windrichtung

#### 3.2.1 Arbeitsplatzgrenzwert (AGW)

Der AGW, ehemals als MAK (Maximale Arbeitsplatzkonzentration) bezeichnet und so auch noch vielfach verwendet, liegt bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 5.000 ppm (entspricht 9.100 mg/m<sup>3</sup>). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Definition siehe Kapitel 5.6.1.

#### 3.2.2 TEEL-2-Wert

Der TEEL-2-Wert liegt bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von 30.000 ppm (entspricht 54.600 mg/m<sup>3</sup>). In Ermangelung definierter ERPG-Werte wird in dieser Studie der den ERPG-Werten am nächsten kommende Beurteilungswert TEEL verwendet. Definition siehe Kapitel 5.6.8.

### **3.2.3 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen > 9 Vol.-%**

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (entspricht 90.000 ppm entspricht 163.800 mg/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen (Quelle: BIA GESTIS Stoffdatenbank).

### **3.2.4 Fahruntüchtigkeit von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren**

Die Sauerstoffgrenzkonzentration für Vergaserkraftstoff beträgt im Allgemeinen 9,3 Vol.-% O<sub>2</sub> (bezogen auf das Inertgas Stickstoff (N<sub>2</sub>)). Der entsprechende Wert für das Inertgas Kohlendioxid ist in der Tabelle der TRBS 2152, Teil 2, 2.3.3.2 Tabelle 1 nicht aufgeführt. Im Analogieschluss zu Kohlenwasserstoffen, wie Benzol, Toluol, Xylol oder Xyclopentan kann für Vergaserkraftstoff eine Sauerstoffgrenzkonzentration von 12,5 Vol.-% O<sub>2</sub> für partielle Inertisierung mit dem Inertgas Kohlendioxid angenommen werden. Ausgehend von einem Sauerstoffanteil in unbelasteter Luft von 21 Vol.-% liegt eine Sauerstoffkonzentration von 12,5 Vol.-% in Luft bei einem Kohlendioxidanteil von 40,5 Vol.-% vor. Dies entspricht einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von ca. 737 g/m<sup>3</sup>.

Oberhalb dieser Konzentration (737 g/m<sup>3</sup>) ist eine Zündung von Verbrennungsmotoren mit Vergaserkraftstoff nicht mehr möglich. Bei in Betrieb befindlichen Fahrzeugen stirbt der Motor ab. Für die in Kapitel 4 angestellten Berechnungen wurde die Lage der Luftansaugung für PKW bei 0,2 m und für LKW bei 0,8 m über Erdgleiche angenommen.

Für Personen, die sich in diesem Konzentrationsbereich aufhalten, führt bereits der erste Atemzug zur Ohnmacht. Betroffene Personen sind dann nicht mehr in der Lage, den gefährdeten Bereich aus eigener Kraft zu verlassen. Ohne Hilfe von außen versterben diese Personen innerhalb von 5 - 10 Minuten.

## 4. Ausbreitungsrechnungen für die ausgewählten Fallbeispiele

Als Grundlage für die Berechnung der ordnungsgemäßen Auslösung und der Fehlauflösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlagen wurde jeweils angenommen, dass der gesamte Behälterinhalt in den jeweiligen Brandabschnitt freigesetzt wird. Diese Verallgemeinerung wurde getroffen, da zum einen die CO<sub>2</sub>-Löschanlagen der Studienteilnehmer unterschiedlich ausgelegt sind und zum anderen damit eine bessere Vergleichbarkeit zum Ereignis am 16.08.2008 in Mönchengladbach hergestellt werden kann, bei dem die CO<sub>2</sub>-Löschanlage nach erfolgreichem Löscheinsatz nochmals auslöste.

### 4.1 Fall 1 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Produktionsbetrieb

#### 4.1.1 Austrittsberechnung

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,62 \\ A_{\text{DN10}} &= 0,0785 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ A_{\text{DN25}} &= 0,491 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \rho_a &= 1030,86 \text{ kg/m}^3 \\ p_a &= 1 * 10^5 \text{ Pa} \\ p_i &= 20,5 * 10^5 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Gesamtmassenstrom von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{DN10}} &= 3,09 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{DN25}} &= 19,30 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Flashanteil von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{Flash, DN10}} &= 0,363 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{Flash, DN25}} &= 2,271 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

#### 4.1.2 Berechnung der Ausbreitung

Zur Berechnung des Ausbreitungsverhaltens der CO<sub>2</sub>-Wolke und den daraus resultierenden relevanten Konzentrationen an Aufpunkten wurde das Programm EFFECTS 7.3 (Modell "Atmospheric Dispersion of heavy gas, concentration") für die Berechnung verwendet.

Folgende allgemeine Modellparameter werden verwendet:

Eingabeparameter:

Gasparameter:

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| Gasart:              | CO <sub>2</sub> |
| Freisetzungsform:    | gasförmig       |
| Austrittstemperatur: | -78,5 °C        |
| Standortparameter:   |                 |
| Ausbreitungsgebiet:  | freies Gelände  |

|                        |                 |
|------------------------|-----------------|
| Ausbreitungssituation: | Pasquill-Klasse |
| ungünstigst            | F               |

Quellparameter:

|                        |  |                              |
|------------------------|--|------------------------------|
| Quellabmessungen DN10: | XQ = 0,110 - 0,150 m   | Ringspalt<br>Lüftungsrohr    |
|                        | YQ = 0,110 - 0,150 m   | Ringspalt<br>Lüftungsrohr    |
|                        | ZQ = 0,0 m   |                              |
| Quellhöhe:             | 10,0 m   |                              |
|                        | Quellabmessungen DN25:                                       |                              |
|                        | XQ = 20,0 m  | Dachabmessung                |
|                        | YQ = 5,0 m   | Dachabmessung                |
|                        | ZQ = 0,0 m   |                              |
| Quellhöhe:             | 10,0 m   |                              |
|                        | Quellabmessungen Fehlauslösung/<br>ordnungsgemäße Auslösung: |                              |
|                        | XQ = 4,0 m   | Torbreite in<br>Windrichtung |
|                        | YQ = 0,0 m   |                              |
|                        | ZQ = 4,0 m   | Torhöhe                      |
| Quellhöhe:             | 0,0 - 4,0 m  |                              |
| Quellentyp:            | Flächenquelle  |                              |
| Quellstärke bei DN10:  | max. 0,363 kg/s  |                              |
| Quellstärke bei DN25:  | max. 2,271 kg/s  |                              |

Weiterhin wurde mit folgenden Eingangsparametern gerechnet:

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Umgebungstemperatur:              | 293 K  |
| Angenommene Emissionsdauer:       | 1800 s |
| Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe: | 1 m/s  |

#### 4.1.3 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10

Ein Stutzenabriss DN10 führt zu einem Austritt von 3,09 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorratstank. Davon werden 0,363 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (2,727 kg/s) sinkt als Kohlendioxidschnee zu Boden und verbleibt dort im Wesentlichen unverändert, da zur Überwindung der hohen Verdampfungs- bzw. Sublimationsenthalpie durch Abkühlung von Luft bzw. des Bodens nur ein begrenztes Energiereservoir zur Verfügung steht. Diese entweichen über den freien Querschnitt der Rohrdurchführung (0,033 m<sup>2</sup>) auf das angrenzende Dach, das im Normalbetrieb und bei Störungen nicht begangen wird.

Relevante Konzentrationen können sich unter ungünstigen meteorologischen Bedingungen aufgrund der örtlichen Gegebenheiten (Mulde auf dem Dach zwischen dem Giebel des Gebäudes P 2C/ P 2B) im Bereich der Ansaugung für die technische Lüftung (in südwestlicher Richtung) ansammeln. Es bildet sich dann ein CO<sub>2</sub>-Pool aus, aus dem wegen des ausgeprägten Schwergasverhaltens von CO<sub>2</sub>, dieses über die Kante des Gebäudes „fließt“ und unter Verdrängung der Umgebungsluft als kompakte Wolke zu Boden sinkt. Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen zur Außenhaut des Gebäudes erreicht:

**Tabelle 4.1-1: Grenzwertüberschreitungen DN10**

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 0   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 0   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 0   |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 0   |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 9   |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unterschreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung, wie in Diagramm A4.1-1 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren getriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderfahrzeuge) ist zu jeder Zeit technisch möglich.

Im unmittelbaren Bereich der Außenhaut des Gebäudes werden auf Atemhöhe über Erdgleiche mit Ausnahme des AGW keine Beurteilungswerte überschritten. Eine sich dort aufhaltende Person ist in der Lage, sich jederzeit selbsttätig aus dem Gefahrenbereich zu entfernen.

Der AGW wird in einem Bereich von 9 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich weder kurzzeitige noch ständige Arbeitsplätze (Werkstraße). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 7.735 s entspricht ca. 2,1 Stunden) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW unterschritten wird.

#### 4.1.4 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25

Ein Stutzenabriss DN25 führt zu einem Austritt von 19,3 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorrattank. Davon werden 2,271 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (17,029 kg/s) sinkt als Kohlendioxid zu Boden und verbleibt dort im Wesentlichen unverändert, da zur Überwindung der hohen Verdampfungs- bzw. Sublimationsenthalpie durch Abkühlung der Luft und des Bodens nur ein begrenztes Energiereservoir zur Verfügung steht. Wegen des geringen Freisetzungsquerschnitts der Rohrdurchführung (0,033 m<sup>2</sup>) kann der freigesetzte Flashmassenstrom nicht abgeführt werden, so dass es im Vorratsraum zu einem Druckanstieg kommt. Die Druckentlastung erfolgt durch Aufreißen des Trapezblechdachs, folglich steht als Freisetzungsquerschnitt die gesamte Dachfläche (ca. 100 m<sup>2</sup>) zur Freisetzung zur Verfügung. Es bildet sich dann in den Grenzen des Vorratsraums ein CO<sub>2</sub>-Pool aus, aus dem wegen des ausgeprägten Schwergasverhaltens von CO<sub>2</sub> dieses über die Kante des Vorratsraums „fließt“ und unter Verdrängung der Umgebungsluft als kompakte Wolke zu Boden sinkt. Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen zur Außenhaut des Gebäudes erreicht:

**Tabelle 4.1-2:** Grenzwertüberschreitungen DN25

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 2   |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 2   |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 39  |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer beträgt 1.238 s. Sie errechnet sich aus dem Behälterinhalt und dem Emissionsmassenstrom. Da sich eine Überschreitung der herangezogenen Beurteilungswerte (maßgeblich hier: AGW mit 39 m) nur für den Nahbereich ergibt, hat sich trotz der im Vergleich zu den im Regelfall in dieser Studie angenommenen Austrittszeiträumen (1.800 s) auch für den kürzeren Ausbreitungszeitraum bei einem Leck DN25 ein stationäres Konzentrationsprofil eingestellt (siehe Diagramm A4.1-2 im Anhang).

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderzeuge) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nur im unmittelbaren Bereich des Fallzylinders (2 m zum Freisetzungsort) technisch nicht möglich.

In diesem unmittelbaren Bereich des Fallzylinders, ca. 2 m Entfernung um die Außenhaut des Gebäudes in der Horizontalen, werden bis auf Erdgleiche alle Beurteilungswerte überschritten. Eine sich dort aufhaltende Person ist dann in der Lage, sich selbsttätig aus dem Gefahrenbereich zu entfernen, wenn sie zu Beginn der Freisetzung nicht in der Einatemphase ist. Das ausgetretene CO<sub>2</sub> bildet einen bodennahen Gaspool aus, aus dem durch Konvektion und Turbulenz Kohlendioxid auf Atemhöhe gelangen kann. Die maximale Konzentration an Kohlendioxid auf Atemhöhe beträgt ca. 9.360 mg/m<sup>3</sup> in ca. 38 m Entfernung. Somit werden auf Atemhöhe – mit Ausnahme des AGW – sämtliche herangezogenen Beurteilungswerte für Entfernungen, die größer sind als der oben definierte Fallzylinder, deutlich unterschritten.

Der AGW wird in einem Bereich von 39 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Werkstraße, Büros und Verladung). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 1.238 s entspricht ca. 20,6 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

#### 4.1.5 Ergebnis der Berechnung für Fehlauflösung

Ein Fehlauflösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage führt zur Flutung des entsprechenden Brandabschnitts mit 161,8 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub>. Nach 142 s (entspricht ca. 2,5 min) ist der Ausströmvorgang beendet. Während dieser Zeit werden durch Flashverdampfung ca. 19,10 kg/s gasförmig in den Brandabschnitt freigesetzt. Der Rest (ca. 142,7 kg/s) sinkt als Kohlendioxidschnee zu Boden und verbleibt dort während des betrachteten Zeitraums im Wesentlichen unverändert, da ein Wärmeeintrag aus der Luft und aus dem Boden zu vernachlässigen ist. Der Eintrag von insgesamt 2.715 kg gasförmigem CO<sub>2</sub> führt zu einer Volumenzunahme im betrachteten Brandabschnitt. Gleichzeitig führt die Einmischung von sehr kaltem CO<sub>2</sub> (-78,5 °C) bei der unterstellten turbulenten Vermischung zu einer Abkühlung des Gas-Luft-Gemischs auf 12 °C, ausgehend von der Prozesstemperatur (20 °C). Insgesamt ergibt sich eine Volumenzunahme von 1.676 m<sup>3</sup> während des Zeitraums von 142 s. Obwohl eine Fehlauflösung ebenso wie eine Auflösung im Brandfall zum automatischen Schließen der Tore führt, wird zur Berechnung eines Austrittsereignisses als zweiter unabhängiger Fehler angenommen, dass eines der beiden Rolltore mit den Abmessungen 4 m x 4 m aus einem nicht näher bezeichneten Grund nicht schließt. Fernerhin wird unterstellt, dass wegen der für den Brandfall beabsichtigten guten Durchmischung des Gas-Luft-Gemisches eine ubiquitär gleiche Kohlendioxidkonzentration in der Halle herrscht. Diese beträgt unter Berücksichtigung der Hallenabmaße (19.700 m<sup>3</sup>) ca. 7 Vol.-% (70.000 ppm entspricht 0,1274 kg/m<sup>3</sup>). Aufgrund der Volumenzunahme tritt somit aus dem als geöffnet angesehenen Rolltor ein Volumenstrom von 11,8 m<sup>3</sup>/s aus. Dieses Gas-Luft-Gemisch besitzt bei der sich einstellenden Temperatur eine Dichte von 1,263 kg/m<sup>3</sup>, so dass ein Massenstrom von 14,903 kg/s austritt.

Zur Abbildung des errechneten Gemisches im Simulationsprogramm muss aufgrund der hier vorliegenden Dichte des Gas-Luft-Gemisches, dieses als Neutralgas gerechnet werden. Die ausgewiesenen Konzentrationen werden auf den Volumenanteil CO<sub>2</sub> und das im Vergleich

zum mittleren Molgewicht der Luft höhere Molgewicht des Kohlendioxids umgerechnet. Für das ermittelte Gemisch beträgt der Umrechnungsfaktor 9,3. Für die zur Bewertung herangezogenen Beurteilungswerte ergeben sich damit in den Konzentrations-Weg-Diagrammen folgende Grenzwerte:

**Tabelle 4.1-3:** Grenzwerte für vorliegendes Gemisch

| Bezeichnung | ursprünglicher Grenzwert | Umrechnung auf vorliegendes Gemisch |
|-------------|--------------------------|-------------------------------------|
| TEEL-2-Wert | 54.600 mg/m <sup>3</sup> | 508.300 mg/m <sup>3</sup>           |
| AGW         | 9.100 mg/m <sup>3</sup>  | 84.700 mg/m <sup>3</sup>            |

Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.1-4:** Grenzwertüberschreitungen bei Fehlauflösung

| Bezeichnung              | Grenzwert                       | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|---------------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub>      | 0   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub>      | 0   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>       | 0   |
| TEEL-2-Wert              | 508.300 mg/m <sup>3</sup> (neu) | 132                                       |
| AGW                      | 84.700 mg/m <sup>3</sup> (neu)  | 425                                       |

Da die maximale Konzentration an der Austrittsstelle (Rolltor) ca. 7,0 Vol.-% CO<sub>2</sub> beträgt und ein wirksamer Aufkonzentrierungsmechanismus außerhalb des Gebäudes (z. B. Senken, Gräben) fehlt, können außerhalb des Gebäudes höhere Konzentrationen als die 7,0 Vol.-% CO<sub>2</sub> nicht erreicht werden. Daher ist sowohl ein Befahren des Hofgeländes mit PKW und LKW ohne Einschränkung als auch eine selbstständige Entfernung von sich im Gefahrenbereich befindlichen Mitarbeitern jederzeit ohne fremde Hilfe möglich.

Relevante Konzentrationen im Bereich des umgerechneten TEEL-2-Wertes werden auf Atemhöhe in bis zu 132 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze. Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 425 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 142 s entspricht ca. 2,5 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW um Größenordnungen unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der TEEL-2-Wert im Bereich der angrenzenden Bahnstrecke überschritten, da die eine Schwergasausbreitung verhindernde Begrenzung des Betriebsgeländes die Neutralgasausbreitung nur behindert. Die Weiterfahrt dieselgetriebener Lokomotiven wird nicht beeinflusst, Reisende und Personal erleiden wegen der Kürze der Exposition und durch die geschlossene Ausführung der Zugbestandteile keine schädlichen Wirkungen.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der AGW ebenfalls überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (142 s entspricht ca. 2,5 Minuten) ist wegen des Druckausgleichs die Diffusion der einzig wirksame Austauschmechanismus zwischen der Hallenluft und der Umgebungsatmosphäre (außerhalb der Halle). Die Diffusionsausgleichsströme bewirken lediglich im Nahbereich (< 1 m) einen messbaren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration, die allerdings in der gleichen Größenordnung wie die der Umgebungsluft liegt (Umgebungsluft ca. 300–400 ppm).

#### 4.1.6 Ergebnis der Berechnung bei ordnungsgemäßer Auslösung

Die Freisetzung von CO<sub>2</sub> nach ordnungsgemäßer Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage z.B. durch die Branderkennung und anschließendes unsachgemäßes Belüften des Brandabschnitts durch das Öffnen eines Rolltores mit den Abmessungen 4 m x 4 m ist wie folgt zu bewerten.

Das Auslösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage führt zu einem Austritt von 161,8 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> in den Brandabschnitt innerhalb von 147 s (entspricht ca. 2,5 Minuten). Ein Teil des austretenden Kohlendioxids verdampft spontan. Der sich dabei spontan bildende Kohlen-säureschnee sublimiert aufgrund der durch den Brand zu Verfügung gestellten Wärme. Unter der Annahme, dass mehr als 1.000 kg Brenngut (Kohlenwasserstoffe) vor dem Löschen verbrannt waren, wird das in den Brandabschnitt geleitete Kohlendioxid auf Temperaturen oberhalb von 150 °C erwärmt. Bei dieser Temperatur erreicht Kohlendioxid die Dichte von Umgebungsluft und verliert somit sein Schwergasverhalten beim Austritt durch das Rolltor. Das austretende Kohlendioxid wird als dichteneutrales Gas („Neutralgas“) in der Atmosphäre dispergiert.

Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.1-5:** Grenzwertüberschreitungen bei ordnungsgemäßer Auslösung

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 469                                       |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 469                                       |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 897                                       |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 1.394                                     |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 2.811                                     |

Das Befahren der Hoffläche mit LKW ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nicht möglich. Eine Annäherung ist bis auf einen Radius von 469 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Sich im LKW aufhaltende Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in

Atemhöhe bereits beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit und nachfolgend zu Atemlähmung und Tod führen kann. Die Rettung der dort verbleibenden Personen muss von außen mittels Fremdbeatmung erfolgen.

Das Befahren der Hoffläche mit PKW und gasbetriebenen Flurförderzeugen (Sauerstoffgrenzkonzentration 12,5 Vol.-%) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration ebenfalls nicht möglich. Eine Annäherung ist bis auf einen Radius von 469 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Dies entspricht der Entfernung, die auch für die Annäherung von LKW festgestellt wurde, und ist mit dem Ausbreitungsmodus als Leichtgas verknüpft. Wegen der großen Entfernung zum Freisetzungsort ist die Ansaughöhe kein entscheidendes Kriterium für unterschiedliche Konzentrationsprofile mehr. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Im PKW eingeschlossene Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, die Lüftung des Fahrzeugs ist auszuschalten bzw. auf Umluft zu stellen, wegen der relativ niedrigen Sitzhöhe sind die Personen trotz geschlossener Fenster und Türen erheblich gefährdet und daher vorrangig durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen. Alle Mitarbeiter der Firma suchen bereits bei Ertönen des Feueralarms den Sammelplatz auf. Sollte bei Feststellen der Vollzähligkeit dennoch eine oder mehrere Personen vermisst werden, müssen diese durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich verbracht werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 1.394 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze sowie öffentliche Verkehrswege. Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden. Personen, die die öffentlichen Verkehrswege benutzen, müssen gewarnt werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 2.811 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 147 s entspricht ca. 2,5 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird die Sauerstoffgrenzkonzentration für mit Vergaserkraftstoff betriebene Fahrzeuge im Bereich von 405 m um die Freisetzungsstelle unterschritten. Die eine Schwergasausbreitung verhindernde Begrenzung des Betriebsgeländes behindert die Neutralgasausbreitung allerdings nicht. Daher ist eine Weiterfahrt mit PKW und LKW sowie dieselgetriebenen Lokomotiven nicht mehr möglich, Reisende und Personal der Bahn werden trotz geschlossener Ausführung der Zugbestandteile aufgrund der wirkenden Lüftung und gegebenenfalls vorhandener und geöffneter Fenster während der Freisetzung gegenüber Konzentrationen exponiert, die auch bei kurzzeitiger Einatmung zum Tode führen können. Der Rand dieser Zone (in 405 m Entfernung) wird nach ca. 7 Minuten erreicht. Am jeweiligen Standort treten die Zündung von Verbrennungsmotoren ausschließende Konzentrationen für eine Dauer von ca. 2,5 Minuten auf. Eine sofortige Alarmierung aller umliegender Bereiche und eine zügige koordinierte Evakuierung der in Windrichtung gelegenen Sektoren unter besonderer Berücksichtigung von besonderen Schutzobjekten (Schulen, Kindergärten, Krankenhäusern, etc.) durch Einsatzkräfte wird für diesen Fall als obligatorisch erachtet. Wegen der unter ungünstigen Umständen großen Anzahl von betroffenen Personen und der kurzen zur Rettung zur Verfügung stehenden Zeit wird eine Rettung nur für einen geringen Teil Betroffener überhaupt möglich sein.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird die Konzentration 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> im Bereich von 897 m um die Freisetzungsstelle überschritten. Personen, die sich ungeschützt im Freien aufhalten, werden mit relevanten Konzentrationen beaufschlagt und können diesen Bereich nicht mehr aus eigener Kraft verlassen. Die Weiterfahrt dieselgetriebener Lokomotiven wird nicht beeinflusst, Reisende und Personal erleiden wegen der Kürze der Exposition und durch die geschlossene Ausführung der Zugbestandteile keine schädlichen Wirkungen. Die Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub>, bei der der erste Atemzug bereits zur Bewusstlosigkeit führen kann, wird je nach Bebauungsdichte nach 15-18 Minuten erreicht. Die Dauer der Exposition gegenüber den jeweils relevanten Konzentrationen beträgt durchweg ca. 2,5-3 Minuten.

Die Grenze des TEEL-2-Wertes wird je nach Bebauungsdichte nach 24-27 Minuten erreicht. Auch hier beträgt die maximale Expositionszeit ca. 2,5-3 Minuten und liegt damit erheblich unter dem für den TEEL-2-Wert festgelegten Beurteilungszeitraum von 1 Stunde.

## 4.2 Fall 2 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich A

### 4.2.1 Austrittsberechnung

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,62 \\ A_{\text{DN10}} &= 0,0785 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ A_{\text{DN25}} &= 0,491 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \rho_a &= 1030,86 \text{ kg/m}^3 \\ p_a &= 1 * 10^5 \text{ Pa} \\ p_i &= 20,0 * 10^5 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Gesamtmassenstrom von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{DN10}} &= 3,05 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{DN25}} &= 19,05 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Flashanteil von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{Flash, DN10}} &= 0,359 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{Flash, DN25}} &= 2,241 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

### 4.2.2 Berechnung der Ausbreitung

Zur Berechnung des Ausbreitungsverhaltens der CO<sub>2</sub>-Wolke und den daraus resultierenden relevanten Konzentrationen an Aufpunkten wurde das Programm EFFECTS 7.3 (Modell "Atmospheric Dispersion of heavy gas, concentration") für die Berechnung verwendet.

Folgende allgemeine Modellparameter werden verwendet:

Eingabeparameter:

Gasparameter:

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| Gasart:              | CO <sub>2</sub> |
| Freisetzungsfom:     | gasförmig       |
| Austrittstemperatur: | -78,5 °C        |
| Standortparameter:   |                 |
| Ausbreitungsgebiet:  | freies Gelände  |

|  |                  |                              |
|--|------------------|------------------------------|
| Ausbreitungssituation:                                       | Pasquill-Klasse: |                              |
| ungünstigst  | F                |                              |
| Quellparameter:  |                  |                              |
| Quellabmessungen Stutzenabriss:                              | XQ = 0,0 m       |                              |
|  | YQ = 1,2 m       | Fensterbreite                |
|  | ZQ = 0,8 m       | Fensterhöhe                  |
| Quellhöhe:   | 1,0 m            |                              |
| Quellabmessungen Fehlauflösung/<br>ordnungsgemäße Auflösung: | XQ = 4,0 m       | Torbreite in<br>Windrichtung |
|  | YQ = 0,0 m       |                              |
|  | ZQ = 4,0 m       | Torhöhe                      |
| Quellhöhe:   | 0,0 - 4,0 m      |                              |
| Quellentyp:  | Flächenquelle    |                              |
| Quellstärke bei DN10:  | max. 0,359 kg/s  |                              |
| Quellstärke bei DN25:  | max. 2,241 kg/s  |                              |

Weiterhin wurde mit folgenden Eingangsparametern gerechnet:

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Umgebungstemperatur:              | 293 K  |
| Angenommene Emissionsdauer:       | 1800 s |
| Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe: | 1 m/s  |

#### 4.2.3 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10

Ein Stutzenabriss DN10 führt zu einem Austritt von 3,05 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorratstank. Davon werden 0,359 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (2,691 kg/s) sinkt als Kohlsäureschnee zu Boden und verbleibt dort im Wesentlichen unverändert, da zur Überwindung der hohen Verdampfungs- bzw. Sublimationsenthalpie durch Abkühlung von Luft bzw. des Bodens nur ein begrenztes Energiereservoir zur Verfügung steht. Im Vorratsraum kommt es zu einem Druckanstieg. Aufgrund des höheren Ansprechdrucks der installierten Druckentlastung erfolgt eine Druckentlastung über das Fenster, dieses wird aufgedrückt. Folglich steht als Freisetzungsquerschnitt die gesamte Fensterfläche (ca. 1 m<sup>2</sup>) zur Freisetzung zur Verfügung.

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten, gasförmig ausströmendes CO<sub>2</sub> „fließt“ dem natürlichen Gefälle folgend über den Wendeplatz weiter in Richtung Senke und damit

Richtung Autobahn ab, werden relevante Konzentrationen in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.2-1:** Grenzwertüberschreitungen DN10

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | < 2                                       |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | < 2                                       |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 3   |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 3   |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 3   |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unterschreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung wie in Diagramm A4.2-1 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderzeuge) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nur im unmittelbaren Ausströmbereich (2 m zum Freisetzungsort) technisch nicht möglich. Dieser Bereich kann wegen der baulichen Gegebenheiten nicht befahren werden.

In diesem unmittelbaren Bereich der Freisetzungsstelle, ca. 3 m im Halbkreis um die Austrittsöffnung (Fenster), werden bis auf Erdgleiche alle Beurteilungswerte überschritten. Eine sich dort aufhaltende Person ist dann in der Lage sich selbsttätig aus dem Gefahrenbereich zu entfernen, wenn sie zu Beginn der Freisetzung nicht in der Einatemphase ist. Das ausgetretene CO<sub>2</sub> bildet einen bodennahen Gaspool aus, aus dem durch Konvektion und Turbulenzen Kohlendioxid auf Atemhöhe gelangen kann. Die maximale Konzentration an Kohlendioxid auf Atemhöhe beträgt ca. 5.250 mg/m<sup>3</sup> in ca. 7 m Entfernung. Somit werden auf Atemhöhe sämtliche herangezogenen Beurteilungswerte für Entfernungen, die größer sind als der oben definierte Halbkreis, deutlich unterschritten.

#### 4.2.4 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25

Ein Stutzenabriss DN25 führt zu einem Austritt von 19,05 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorratstank. Davon werden 2,241 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (16,809 kg/s) sinkt als Kohlsäureschnee zu Boden und verbleibt dort im Wesentlichen unverändert, da zur Überwindung der hohen Verdampfungs- bzw. Sublimationsenthalpie durch Abkühlung von Luft bzw. des Bodens nur ein begrenztes Energiereservoir zur Verfügung steht. Im Vorratsraum kommt es zu einem Druckanstieg. Aufgrund des höheren Ansprechdrucks der installierten Druckentlastung erfolgt eine Druckentlastung über das Fenster, dieses wird aufgedrückt. Folglich steht als Freisetzungsquerschnitt die gesamte Fensterfläche (ca. 1 m<sup>2</sup>) zur Freisetzung zur Verfügung.

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten, gasförmig ausströmendes CO<sub>2</sub> „fließt“ dem natürlichen Gefälle folgend über den Wendeplatz weiter in Richtung Senke und damit Richtung Autobahn ab, werden relevante Konzentrationen in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.2.-2:** Grenzwertüberschreitungen DN25

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | < 2                                       |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 3   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 3   |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 3   |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 72  |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unterschreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung, wie in Diagramm A4.2-2 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hofffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren getriebenen Fahrzeugen LKW, PKW und Flurförderfahrzeuge ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenz-

konzentration nur im unmittelbaren Ausströmbereich (3 m zum Freisetzungsort) technisch nicht möglich. Dieser Bereich kann wegen baulicher Gegebenheiten nicht befahren werden.

In diesem unmittelbaren Bereich der Freisetzungsstelle, ca. 3 m im Halbkreis um die Austrittsöffnung (Fenster), werden bis auf Erdgleiche die Grenzwerte 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> und der TEEL-2-Wert überschritten. Eine sich dort aufhaltende Person ist dann in der Lage sich selbsttätig aus dem Gefahrenbereich zu entfernen, wenn sie zu Beginn der Freisetzung nicht in der Einatemphase ist. Das ausgetretene CO<sub>2</sub> bildet einen bodennahen Gaspool aus, aus dem durch Konvektion und Turbulenz Kohlendioxid auf Atemhöhe gelangen kann.

Der AGW wird in einem Bereich von 72 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Verladebereiche, Büros und Nachbarbetriebe). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (1.998 s entspricht ca. 33,3 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

#### 4.2.5 Ergebnis der Berechnung für Fehlauflösung

Ein Fehlauflösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage führt zur Flutung des entsprechenden Brandabschnitts mit 40,45 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub>. Nach 941 s (entspricht ca. 15,7 min) ist der Ausströmvorgang beendet. Während dieser Zeit werden durch Flashverdampfung ca. 4,775 kg/s gasförmig in den Brandabschnitt (Halle 3) freigesetzt. Der Rest (ca. 35,7 kg/s) sinkt als Kohlendioxid zu Boden und verbleibt dort während des betrachteten Zeitraums im Wesentlichen unverändert, da ein Wärmeeintrag aus der Luft und aus dem Boden zu vernachlässigen ist. Der Eintrag von insgesamt 4.493 kg gasförmigen CO<sub>2</sub> führt zu einer Volumenzunahme im betrachteten Brandabschnitt. Gleichzeitig führt die Einmischung von sehr kaltem CO<sub>2</sub> (-78,5 °C) bei der unterstellten turbulenten Vermischung zu einer Abkühlung des Gas-Luft-Gemischs auf 11,2 °C ausgehend von der Prozesstemperatur (20 °C). Insgesamt ergibt sich eine Volumenzunahme von 1.481 m<sup>3</sup> während des Zeitraums von 941 s. Obwohl eine Fehlauflösung ebenso wie eine Auflösung im Brandfall zum automatischen Schließen der Tore führt, wird zur Berechnung eines Austrittsereignisses als zweiter unabhängiger Fehler angenommen, dass eines der beiden Rolltore mit den Abmessungen 4 m x 4 m aus einem nicht näher bezeichneten Grund nicht schließt. Fernerhin wird unterstellt, dass wegen der für den Brandfall beabsichtigten guten Durchmischung des Gas-Luft-Gemisches eine ubiquitär gleiche Kohlendioxidkonzentration in der Halle

herrscht. Diese beträgt unter Berücksichtigung der Hallenabmaße (17.850 m<sup>3</sup>) ca. 7,7 Vol.-% (76.750 ppm entspricht 0,1395 kg/m<sup>3</sup>). Aufgrund der Volumenzunahme tritt somit aus dem als geöffnet angesehenen Rolltor ein Volumenstrom von 1,57 m<sup>3</sup>/s aus. Dieses Gas-Luft-Gemisch besitzt bei der sich einstellenden Temperatur eine Dichte von 1,27 kg/m<sup>3</sup>, so dass damit ein Massenstrom von 2,0 kg/s austritt.

Zur Abbildung des errechneten Gemisches im Simulationsprogramm wird mit der Komponente „Luft“ gerechnet. Die ausgewiesenen Konzentrationen werden auf den Volumenanteil CO<sub>2</sub> und das im Vergleich zum mittleren Molgewicht der Luft höhere Molgewicht des Kohlendioxids umgerechnet. Für das ermittelte Gemisch beträgt der Umrechnungsfaktor 8,5. Für die zur Bewertung herangezogenen Beurteilungswerte ergeben sich damit in den Konzentrations-Weg-Diagrammen folgende Grenzwerte:

**Tabelle 4.2-3:** Grenzwerte für vorliegendes Gemisch

| Bezeichnung | ursprünglicher Grenzwert | Umrechnung auf vorliegendes Gemisch |
|-------------|--------------------------|-------------------------------------|
| TEEL-2-Wert | 54.600 mg/m <sup>3</sup> | 464.100 mg/m <sup>3</sup>           |
| AGW         | 9.100 mg/m <sup>3</sup>  | 77.500 mg/m <sup>3</sup>            |

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten, gasförmig ausströmendes CO<sub>2</sub> „fließt“ dem natürlichen Gefälle folgend über den Wendeplatz weiter in Richtung Senke und damit Richtung Autobahn ab, werden relevante Konzentrationen in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.2-4:** Grenzwertüberschreitungen bei Fehlauflösung

| Bezeichnung              | Grenzwert                       | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|---------------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub>      | 0   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub>      | 0   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>       | 0   |
| TEEL-2-Wert              | 464.100 mg/m <sup>3</sup> (neu) | 36  |
| AGW                      | 77.500 mg/m <sup>3</sup> (neu)  | 143                                       |

Da die maximale Konzentration an der Austrittsstelle (Rolltor) ca. 7,7 Vol.-% CO<sub>2</sub> beträgt und ein wirksamer Aufkonzentrierungsmechanismus außerhalb des Gebäudes (z.B. Senken, Gräben) fehlt, können außerhalb des Gebäudes höhere Konzentrationen als die 7,7 Vol.-% CO<sub>2</sub> nicht erreicht werden. Daher ist sowohl ein Befahren des Hofgeländes mit PKW und LKW ohne Einschränkung als auch eine selbstständige Entfernung von sich im Gefahrenbereich befindlichen Mitarbeitern jederzeit ohne fremde Hilfe möglich.

Relevante Konzentrationen im Bereich des umgerechneten TEEL-2-Wertes werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 36 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze (Verladung). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 143 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Verladung). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 941 s entspricht ca. 15,7 min) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der AGW bis zu einer Entfernung von 143 m überschritten. Aufgrund der geographischen Gegebenheiten, gasförmig ausströmendes CO<sub>2</sub> „fließt“ dem natürlichen Gefälle folgend über den Wendepunkt und weiter in Richtung Senke und damit Richtung Autobahn ab, werden Personen außerhalb des Betriebsgeländes mit Konzentrationen oberhalb des AGW beaufschlagt. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 941 s entspricht ca. 15,7 Minuten) ist wegen des Druckausgleichs die Diffusion der einzig wirksame Austauschmechanismus zwischen der Hallenluft und der Umgebungsatmosphäre (außerhalb der Halle). Die Diffusionsausgleichsströme bewirken lediglich im Nahbereich (< 1 m) einen messbaren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration, die allerdings in der gleichen Größenordnung wie die der Umgebungsluft liegt (Umgebungsluft ca. 300–400 ppm).

#### 4.2.6 Ergebnis der Berechnung bei ordnungsgemäßer Auslösung

Die Freisetzung von CO<sub>2</sub> nach ordnungsgemäßer Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage, z.B. durch die Branderkennung, und anschließendes unsachgemäßes Belüften des Brandabschnitts durch das Öffnen eines Rolltores mit den Abmessungen 4 m x 4 m führt zu einer Freisetzung auf den Betriebshof und ist wie folgt zu bewerten.

Das Auslösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage führt zu einem Austritt von 40,45 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> in den Brandabschnitt innerhalb von 941 s (entspricht ca. 15,7 Minuten). Ein Teil des austretenden Kohlendioxids verdampft spontan. Der sich dabei spontan bildende Kohlen-säureschnee sublimiert aufgrund der durch den Brand zu Verfügung gestellten Wärme. Unter der Annahme, dass mehr als 1.000 kg Brenngut (Kohlenwasserstoffe) vor dem Löschen verbrannt waren, wird das in den Brandabschnitt geleitete Kohlendioxid auf Temperaturen oberhalb von 150 °C erwärmt. Bei dieser Temperatur erreicht Kohlendioxid die Dichte von Umgebungsluft und verliert somit sein Schwergasverhalten beim Austritt durch das Rolltor. Das austretende Kohlendioxid wird als dichteneutrales Gas („Neutralgas“) in der Atmosphäre dispergiert.

Relevante Konzentrationen in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.2-5:** Grenzwertüberschreitungen bei ordnungsgemäßer Auslösung

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 213                                       |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 213                                       |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 587                                       |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 1.183                                     |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 3.140                                     |

Das Befahren der Hoffläche mit LKW ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nicht möglich. Eine Annäherung ist bis auf einen Radius von 213 m zum

Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Sich im LKW aufhaltende Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Atemhöhe bereits beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit und nachfolgend zu Atemlähmung und Tod führen kann. Die Rettung der dort verbleibenden Personen muss von außen mittels Fremdbeatmung erfolgen.

Das Befahren der Hoffläche mit PKW und gasbetriebenen Flurförderzeugen (Sauerstoffgrenzkonzentration 12,5 Vol.-%) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration ebenfalls nicht möglich. Eine Annäherung ist bis auf einen Radius von 213 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Dies entspricht der Entfernung, die auch für die Annäherung von LKW festgestellt wurde, und ist mit dem Ausbreitungsmodus als Leichtgas verknüpft. Wegen der großen Entfernung zum Freisetzungsort ist die Ansaughöhe kein entscheidendes Kriterium für unterschiedliche Konzentrationsprofile mehr. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Im PKW eingeschlossene Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, die Lüftung des Fahrzeugs ist auszuschalten bzw. auf Umluft zu stellen, wegen der relativ niedrigen Sitzhöhe sind die Personen trotz geschlossener Fenster und Türen erheblich gefährdet und daher vorrangig durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen. Alle Mitarbeiter der Firma suchen bereits bei Ertönen des Feueralarms den Sammelplatz auf. Sollte bei Feststellen der Vollzähligkeit dennoch eine oder mehrere Personen vermisst werden, müssen diese durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich verbracht werden.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 587 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und

Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 1.183 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze (Verladung) sowie öffentliche Verkehrswege. Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden. Personen, die den öffentlichen Verkehrsweg benutzen müssen gewarnt werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 3.140 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Verladung, öffentliche Verkehrswege und besondere Schutzobjekte). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (941 s entspricht ca. 15,7 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

Bei westlichen Winden ist wegen der Ausbreitung des Kohlendioxid-Luft-Gemischs als „Neutralgas“ trotz ansteigenden Geländeprofiles und Verlaufs der Autobahn auf einem Damm eine Beaufschlagung der Autobahn mit Konzentrationen an Kohlendioxid zu erwarten, die sowohl bei PKW als auch bei LKW zu einem Absterben der Verbrennungsmotoren führen können. An der Autobahn treten die die Zündung verhindernden Konzentrationen ca. 3 Minuten nach Beginn des Ereignisses ein und dauern für ca. 16 Minuten an.

Bei südöstlichen Winden wird insbesondere auch das besondere Schutzobjekt Hauptfeuerwehr- und Rettungswache der Stadt trotz ansteigenden Geländeprofiles wegen des Neutralgasverhaltens des Kohlendioxid-Luft-Gemischs mit Konzentrationen beaufschlagt, die bei sich ungeschützt im Freien aufhaltenden Einsatzkräften schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen können. Dies kann daher zum teilweisen oder vollständigen Ausfall der im Katastrophenschutzplan der Stadt vorgesehenen Einsatzkräfte führen. An der Hauptfeuerwehr- und Rettungswache der Stadt steigen die Konzentrationen an CO<sub>2</sub> ca. 6 Minuten

nach Beginn des Ereignisses auf Bewusstlosigkeit hervorrufende Konzentrationen an, so dass für eine Alarmierung und Einleitung von Gegenmaßnahmen für die Einsatzkräfte nur ein eng begrenzter Zeitraum zur Verfügung steht.

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten, natürliches Gefälle in Richtung der Senke bzw. der Autobahn aber auch aufgrund des Neutralgasverhaltens und der möglichen Überwindung des ansteigenden Geländeprofiles bei Wind aus entsprechenden Himmelsrichtungen, wird sich eine Kohlendioxidwolke auch in die umliegenden Straßen außerhalb des Betriebsbereichs ausbreiten und dort befindliche Personen mit einer Atmosphäre beaufschlagen, die sowohl ein Befahren als auch eine eigenständige Rettung aus einem Radius von ca. 600 m erschweren und gegebenenfalls bei ansteigender Konzentration verhindern. In diesem Bereich (600 m um die Freisetzungsstelle) werden alle Beurteilungswerte weit überschritten. Eine sofortige Alarmierung aller umliegender Bereiche und eine zügige koordinierte Evakuierung der in Windrichtung gelegenen Sektoren durch Einsatzkräfte wird für diesen Fall als obligatorisch erachtet.

### 4.3 Fall 3 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich B

#### 4.3.1 Austrittsberechnung

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,62 \\ A_{DN10} &= 0,0785 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ A_{DN25} &= 0,491 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \rho_a &= 1030,86 \text{ kg/m}^3 \\ p_a &= 1 * 10^5 \text{ Pa} \\ p_i &= 18,0 * 10^5 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Gesamtmassenstrom von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{DN10} &= 2,88 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{DN25} &= 18,02 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Flashanteil von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{Flash, DN10}} &= 0,339 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{Flash, DN25}} &= 2,120 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

#### 4.3.2 Berechnung der Ausbreitung

Zur Berechnung des Ausbreitungsverhaltens der CO<sub>2</sub>-Wolke und den daraus resultierenden relevanten Konzentrationen an Aufpunkten wurde das Programm EFFECTS 7.3 (Modell "Atmospheric Dispersion of heavy gas, concentration") für die Berechnung verwendet.

Folgende allgemeine Modellparameter werden verwendet:

Eingabeparameter:

Gasparameter:

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| Gasart:              | CO <sub>2</sub> |
| Freisetzungsfom:     | gasförmig       |
| Austrittstemperatur: | -78,5 °C        |
| Standortparameter:   |                 |
| Ausbreitungsgebiet:  | freies Gelände  |

|  |                  |                                       |
|--|------------------|---------------------------------------|
| Ausbreitungssituation:                                       | Pasquill-Klasse: |                                       |
| ungünstigst  | F                |                                       |
| Quellparameter:  |                  |                                       |
| Quellabmessungen Stutzenabriss.                              | XQ = 0,15 m      | Rohröffnung in Windrichtung           |
|  | YQ = 0,15 m      | Rohröffnung senkrecht zu Windrichtung |
|  | ZQ = 0,0 m       |                                       |
| Quellhöhe:   | 3,0 m            |                                       |
| Quellabmessungen Fehlauflösung/<br>ordnungsgemäße Auflösung: | XQ = 4,0 m       | Torbreite in Windrichtung             |
|  | YQ = 0,0 m       |                                       |
|  | ZQ = 4,0 m       | Torhöhe                               |
| Quellhöhe:   | 0,0 – 4,0 m      |                                       |
| Quellentyp:  | Flächenquelle    |                                       |
| Quellstärke bei DN10:  | max. 0,339 kg/s  |                                       |
| Quellstärke bei DN25:  | max. 2,120 kg/s  |                                       |

Weiterhin wurde mit folgenden Eingangsparametern gerechnet:

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Umgebungstemperatur:              | 293 K  |
| Angenommene Emissionsdauer:       | 1800 s |
| Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe: | 1 m/s  |

#### 4.3.3 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10

Ein Stutzenabriss DN10 führt zu einem Austritt von 2,88 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorratstank. Davon werden 0,339 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (2,541 kg/s) sinkt als Kohlendioxidschnee zu Boden und verbleibt dort im Wesentlichen unverändert, da zur Überwindung der hohen Verdampfungs- bzw. Sublimationsenthalpie durch Abkühlung von Luft bzw. des Bodens nur ein begrenztes Energiereservoir zur Verfügung steht. Das gasförmige CO<sub>2</sub> entweicht über den freien Querschnitt des Lüftungsrohres (DN300) und wird zwischen den Hallen 1 und 7 in ca. 3 m Höhe auf die Hoffläche freigesetzt. Aufgrund der geographischen Gegebenheiten (natürliches Gefälle in Richtung der öffentlichen Straße) und wegen der ausgeprägten Schluchtenwirkung erfolgt eine Ausbreitung bevorzugt in Richtung der öffentlichen Straße. Bei Wind aus nördlichen

Richtungen kann eine Ausbreitung auch entgegen dem natürlichen Gefälle in Richtung einer anderen öffentlichen Straße stattfinden.

Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.3-1:** Grenzwertüberschreitungen DN10

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 2   |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 2   |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 2   |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unterschreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung, wie in Diagramm A4.3-1 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderzeuge) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nur im unmittelbaren Ausströmbereich (2 m zum Freisetzungsort) technisch nicht möglich.

In diesem unmittelbaren Bereich der Freisetzungsstelle, ca. 2 m Entfernung um die Austrittsöffnung in der Horizontalen, werden bis auf Erdgleiche alle Beurteilungswerte überschritten. Eine sich dort aufhaltende Person ist dann in der Lage, sich selbsttätig aus dem Gefahrenbereich zu entfernen, wenn sie zu Beginn der Freisetzung nicht in der Einatemphase ist. Das ausgetretene CO<sub>2</sub> bildet einen bodennahen Gaspool aus, aus dem durch Konvektion und Turbulenzen Kohlendioxid auf Atemhöhe gelangen kann. Die maximale Konzentration an Kohlendioxid auf Atemhöhe beträgt ca. 2.800 mg/m<sup>3</sup> in ca. 67 m Entfernung. Somit werden

auf Atemhöhe sämtliche herangezogenen Beurteilungswerte für Entfernungen, die größer sind als der oben definierte Fallzylinder, deutlich unterschritten.

#### 4.3.4 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25

Ein Stutzenabriss DN25 führt zu einem Austritt von 18,02 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorratstank. Davon werden 2,12 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (15,9 kg/s) sinkt als Kohlendioxidschnee zu Boden und verbleibt dort im Wesentlichen unverändert, da zur Überwindung der hohen Verdampfungs- bzw. Sublimationsenthalpie durch Abkühlung von Luft bzw. des Bodens nur ein begrenztes Energiereservoir zur Verfügung steht. Das gasförmige CO<sub>2</sub> entweicht über den freien Querschnitt des Lüftungsrohres (DN300) und wird zwischen den Hallen 1 und 7 in ca. 3 m Höhe auf die Hoffläche freigesetzt. Aufgrund der geographischen Gegebenheiten (natürliches Gefälle in Richtung der öffentlichen Straße) und wegen der ausgeprägten Schluchtenwirkung erfolgt eine Ausbreitung bevorzugt in Richtung der öffentlichen Straße. Bei Wind aus nördlichen Richtungen kann eine Ausbreitung auch entgegen dem natürlichen Gefälle in Richtung einer anderen öffentlichen Straße stattfinden.

Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.3-2:** Grenzwertüberschreitungen DN25

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 3   |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 3   |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 3   |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unter-

schreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung, wie in Diagramm A4.3-2 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderzeuge) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nur im unmittelbaren Ausströmbereich (2 m zum Freisetzungsort) technisch nicht möglich.

In diesem unmittelbaren Bereich der Freisetzungsstelle, ca. 3 m Entfernung um die Austrittsöffnung in der Horizontalen, werden bis auf Erdgleiche alle Beurteilungswerte überschritten. Eine sich dort aufhaltende Person ist dann in der Lage, sich selbsttätig aus dem Gefahrenbereich zu entfernen, wenn sie zu Beginn der Freisetzung nicht in der Einatemphase ist. Das ausgetretene CO<sub>2</sub> bildet einen bodennahen Gaspool aus, aus dem durch Konvektion und Turbulenz Kohlendioxid auf Atemhöhe gelangen kann. Die maximale Konzentration an Kohlendioxid auf Atemhöhe beträgt ca. 7.650 mg/m<sup>3</sup> in ca. 80 m Entfernung. Somit werden auf Atemhöhe sämtliche herangezogenen Beurteilungswerte für Entfernungen, die größer sind als der oben definierte Fallzylinder, deutlich unterschritten.

#### 4.3.5 Ergebnis der Berechnung für Fehlauflösung

Ein Fehlauflösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage führt zur Flutung des entsprechenden Brandabschnitts mit 40,45 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub>. Nach 1.038 s (entspricht ca. 17,5 min) ist der Ausströmvorgang beendet. Während dieser Zeit werden durch Flashverdampfung ca. 4,775 kg/s gasförmig in den Brandabschnitt (Halle 1 oder 3) freigesetzt. Der Rest (ca. 35,7 kg/s) sinkt als Kohlensäureschnee zu Boden und verbleibt dort während des betrachteten Zeitraums im Wesentlichen unverändert, da ein Wärmeeintrag aus der Luft und aus dem Boden zu vernachlässigen ist. Der Eintrag von insgesamt 4.956 kg gasförmigem CO<sub>2</sub> führt zu einer Volumenzunahme im betrachteten Brandabschnitt. Gleichzeitig führt die Einmischung von sehr kaltem CO<sub>2</sub> (-78,5 °C) bei der unterstellten turbulenten Vermischung zu einer Abkühlung des Gas-Luft-Gemischs auf -4,2 °C ausgehend von der Prozesstemperatur (20 °C). Insgesamt ergibt sich eine Volumenzunahme von 1.700 m<sup>3</sup> während des Zeitraums von 1.038 s. Obwohl eine Fehlauflösung ebenso wie eine Auflösung im Brandfall zum automatischen Schließen der Tore führt, wird zur Berechnung eines Austrittsereignisses als zweiter unabhängiger Fehler angenommen, dass eines der beiden Rolltore mit den Abmessungen 4 m x 4 m aus einem nicht näher bezeichneten Grund nicht schließt. Fernerhin wird unterstellt, dass wegen der für den Brandfall beabsichtigten guten

Durchmischung des Gas-Luft-Gemischs eine ubiquitär gleiche Kohlendioxidkonzentration in der Halle herrscht. Diese beträgt unter Berücksichtigung der Hallenabmaße (9.600 m<sup>3</sup>) ca. 22 Vol.-% (220.000 ppm entspricht 0,4004 kg/m<sup>3</sup>). Aufgrund der Volumenzunahme tritt somit aus dem als geöffnet angesehenen Rolltor ein Volumenstrom von 1,64 m<sup>3</sup>/s aus. Dieses Gas-Luft-Gemisch besitzt bei der sich einstellenden Temperatur eine Dichte von 1,44 kg/m<sup>3</sup>, so dass damit ein Massenstrom von 2,36 kg/s austritt.

Zur Abbildung des errechneten Gemisches im Simulationsprogramm wird mit der Komponente „Luft“ gerechnet. Die ausgewiesenen Konzentrationen werden auf den Volumenanteil CO<sub>2</sub> und das im Vergleich zum mittleren Molgewicht der Luft höhere Molgewicht des Kohlendioxids umgerechnet. Für das ermittelte Gemisch beträgt der Umrechnungsfaktor 2,98. Für die zur Bewertung herangezogenen Beurteilungswerte ergeben sich damit in den Konzentrations-Weg-Diagrammen folgende Grenzwerte:

**Tabelle 4.3-3:** Grenzwerte für vorliegendes Gemisch

| Bezeichnung              | ursprünglicher Grenzwert  | Umrechnung auf vorliegendes Gemisch |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------------|
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup> | 488.100 mg/m <sup>3</sup>           |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>  | 162.700 mg/m <sup>3</sup>           |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>   | 27.100 mg/m <sup>3</sup>            |

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten (natürliches Gefälle in Richtung der öffentlichen Straße) und wegen der ausgeprägten Schluchtenwirkung erfolgt eine Ausbreitung bevorzugt in Richtung der öffentlichen Straße. Bei Wind aus nördlichen Richtungen kann eine Ausbreitung auch entgegen dem natürlichen Gefälle in Richtung einer anderen öffentlichen Straße stattfinden. Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.3-4:** Grenzwertüberschreitungen bei Fehlauflösung

| Bezeichnung              | Grenzwert                       | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|---------------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub>      | 0   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub>      | 0   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 488.100 mg/m <sup>3</sup> (neu) | 4   |
| TEEL-2-Wert              | 162.700 mg/m <sup>3</sup> (neu) | 61  |
| AGW                      | 27.100 mg/m <sup>3</sup> (neu)  | 295                                       |

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderzeuge) ist zu jeder Zeit möglich. Ein Befahren der Halle ist dagegen nicht möglich.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (umgerechnet 488.100 mg/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 4 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die Freisetzung ist neben der Fehlauflösung als zweiter unabhängiger Fehler zu betrachten und führt zu einer Exposition von Personen in einem Bereich von 4 m um die Freisetzungsstelle. Dort befinden sich ständig besetzte Arbeitsplätze (Verladung). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis

eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des umgerechneten TEEL-2-Wertes (162.700 mg/m<sup>3</sup>) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 61 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze (Verladung). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 295 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Verladung). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 1.038 s entspricht ca. 17,5 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der AGW überschritten. Aufgrund der geographischen Gegebenheiten (natürliches Gefälle in Richtung der öffentlichen Straße) und wegen der ausgeprägten Schluchtenwirkung erfolgt eine Ausbreitung bevorzugt in Richtung der öffentlichen Straße. Bei Wind aus nördlichen Richtungen kann eine Ausbreitung auch entgegen dem natürlichen Gefälle in Richtung einer anderen öffentlichen Straße stattfinden. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 1.038 s entspricht ca. 17,5 Minuten) ist wegen des Druckausgleichs die Diffusion der einzig wirksame Austauschmechanismus zwischen der Hallenluft und der Umgebungsatmosphäre (außerhalb der Halle). Die Diffusionsausgleichsströme bewirken lediglich im Nahbereich (< 1 m) einen messbaren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration, die allerdings in der gleichen Größenordnung wie die der Umgebungsluft liegt (Umgebungsluft ca. 300–400 ppm).

#### 4.3.6 Ergebnis der Berechnung bei ordnungsgemäßer Auslösung

Die Freisetzung von CO<sub>2</sub> nach ordnungsgemäßer Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage z. B. durch die Branderkennung und anschließendes unsachgemäßes Belüften des Brandabschnitts durch das Öffnen eines Rolltores mit den Abmessungen 4 m x 4 m ist wie folgt zu bewerten.

Das Auslösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage führt zu einem Austritt von 40,45 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> in den Brandabschnitt innerhalb von 1.038 s (entspricht ca. 17,5 Minuten). Ein Teil des austretenden Kohlendioxids verdampft spontan. Der sich dabei spontan bildende Kohlen-säureschnee sublimiert aufgrund der durch den Brand zu Verfügung gestellten Wärme. Unter der Annahme, dass mehr als 1.000 kg Brenngut (Kohlenwasserstoffe) vor dem Löschen verbrannt waren, wird das in den Brandabschnitt geleitete Kohlendioxid auf Temperaturen oberhalb von 150 °C erwärmt. Bei dieser Temperatur erreicht Kohlendioxid die Dichte von Umgebungsluft und verliert somit sein Schwergasverhalten beim Austritt durch das Rolltor. Das austretende Kohlendioxid wird als dichteneutrales Gas („Neutralgas“) in die Atmosphäre dispergiert.

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten (natürliches Gefälle in Richtung der öffentlichen Straße) und wegen der ausgeprägten Schluchtenwirkung erfolgt eine Ausbreitung bevorzugt in Richtung der öffentlichen Straße. Bei Wind aus nördlichen Richtungen kann eine Ausbreitung auch entgegen dem natürlichen Gefälle in Richtung der Straße einer anderen öffentlichen Straße stattfinden.

Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.3-5:** Grenzwertüberschreitungen bei ordnungsgemäßer Auslösung

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 223                                       |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 223                                       |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 588                                       |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 1.203                                     |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 3.182                                     |

Das Befahren der Hoffläche mit LKW ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nicht möglich. Eine Annäherung ist bis auf einen Radius von 223 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Sich im LKW aufhaltende Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Atemhöhe bereits beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit und nachfolgend zu Atemlähmung und Tod führen kann. Die Rettung der dort verbleibenden Personen muss von außen mittels Fremdbeatmung erfolgen.

Das Befahren der Hoffläche mit PKW und gasbetriebenen Flurförderzeugen (Sauerstoffgrenzkonzentration 12,5 Vol.-%) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration ebenfalls nicht möglich. Eine Annäherung ist bis auf einen Radius von 223 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Dies entspricht der Entfernung, die auch für die Annäherung von LKW festgestellt wurde, und ist mit dem Ausbreitungsmodus als Leichtgas verknüpft. Wegen der großen Entfernung zum Freisetzungsort ist die Ansaughöhe kein entscheidendes Kriterium für unterschiedliche Konzentrationsprofile mehr. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Im PKW eingeschlossene Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, die Lüftung des Fahrzeugs ist auszuschalten bzw. auf Umluft zu stellen. Wegen der relativ niedrigen Sitzhöhe sind die Personen trotz geschlossener Fenster und Türen erheblich gefährdet und daher vorrangig durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen. Alle Mitarbeiter der Firma suchen bereits bei Ertönen des Feueralarms den Sammelplatz auf. Sollte bei Feststellen der Vollzähligkeit dennoch eine oder mehrere Personen vermisst werden, müssen diese durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich verbracht werden.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 588 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Frei-

gelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 1.203 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze (Verladung) sowie öffentliche Verkehrswege. Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden. Personen, die die öffentlichen Verkehrswege benutzen, müssen gewarnt werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 3.182 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Verladung, öffentliche Verkehrswege und besondere Schutzobjekte). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 1.038 s entspricht ca. 17,5 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

Aufgrund der geographischen Gegebenheiten (natürliches Gefälle in Richtung der öffentlichen Straße) und wegen der ausgeprägten Schluchtenwirkung erfolgt eine Ausbreitung bevorzugt in Richtung der öffentlichen Straße. Bei Wind aus nördlichen Richtungen kann eine Ausbreitung auch entgegen dem natürlichen Gefälle in Richtung einer anderen öffentlichen Straße stattfinden. Bei einer sich weit ausbreitenden Kohlendioxidwolke werden auch die umliegenden Straßen außerhalb des Betriebsbereichs mit einer Atmosphäre beaufschlagt, die sowohl ein Befahren als auch eine eigenständige Rettung aus dem Bereich von ca. 588 m erschweren und gegebenenfalls bei ansteigender Konzentration verhindern. In diesem Bereich (588 m um die Freisetzungsstelle) werden alle Beurteilungswerte weit überschritten. Eine sofortige Alarmierung aller umliegenden Bereiche und eine zügige koordinierte Evakuierung der in Windrichtung gelegenen Sektoren durch Einsatzkräfte wird für diesen Fall als obligatorisch erachtet.

#### 4.4 Fall 4 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb A

##### 4.4.1 Austrittsberechnung

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,62 \\ A_{\text{DN10}} &= 0,0785 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ A_{\text{DN25}} &= 0,491 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \rho_a &= 773,99 \text{ kg/m}^3 \\ p_a &= 1 * 10^5 \text{ Pa} \\ p_i &= 64,0 * 10^5 \text{ Pa (bei } T = 25 \text{ °C)}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Gesamtmassenstrom von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{DN10}} &= 4,81 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{DN25}} &= 30,05 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Flashanteil von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{Flash, DN10}} &= 0,914 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{Flash, DN25}} &= 5,712 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

##### 4.4.2 Berechnung der Ausbreitung

Zur Berechnung des Ausbreitungsverhaltens der CO<sub>2</sub>-Wolke und den daraus resultierenden relevanten Konzentrationen an Aufpunkten wurde das Programm EFFECTS 7.3 (Modell "Atmospheric Dispersion of heavy gas, concentration") für die Berechnung verwendet.

Folgende allgemein Modellparameter werden verwendet:

Eingabeparameter:

Gasparameter:

Gasart: CO<sub>2</sub>  
Freisetzungform: gasförmig  
Austrittstemperatur: -78,5 °C

Standortparameter:

Ausbreitungsgebiet: freies Gelände

Ausbreitungssituation: Pasquill-Klasse:

ungünstigst

F

Quellparameter:

|                                      |                 |   |
|--------------------------------------|-----------------|---|
| Quellabmessungen DN10:               | XQ = 0,005 m    | halbe<br>Lecköffnung in<br>Windrichtung |
|                                      | YQ = 0,0 m      | horizontales<br>Ausströmen              |
|                                      | ZQ = 0,005 m    | halbe Leckhöhe                          |
| Quellhöhe:                           | 1,0 m           |   |
| Quellabmessungen DN25:               | XQ = 0,0125 m   | halbe<br>Lecköffnung in<br>Windrichtung |
|                                      | YQ = 0,0 m      | horizontales<br>Ausströmen              |
|                                      | ZQ = 0,0125 m   | halbe Leckhöhe                          |
| Quellhöhe:                           | 1,0 m           |   |
| Quellabmessungen<br>Spontanversagen: | XQ = 1,0 m      | Abriss Boden in<br>xy-Ebene             |
|                                      | YQ = 1,0 m      | Abriss Boden in<br>xy-Ebene             |
|                                      | ZQ = 0,0 m      |   |
| Quellhöhe:                           | 1,0 m           |   |
| Quellentyp:                          | Flächenquelle   |   |
| Quellstärke bei DN10:                | max. 0,914 kg/s |   |
| Quellstärke bei DN25:                | max. 5,712 kg/s |   |

Weiterhin wurde mit folgenden Eingangsparametern gerechnet:

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Umgebungstemperatur:              | 293 K  |
| Angenommene Emissionsdauer DN10:  | 1800 s |
| Angenommene Emissionsdauer DN25:  | 316 s  |
| Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe: | 1 m/s  |

Parameter für die Emission aus dem Kohlendioxidschnee:

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Bestrahlungsstärke der Sonne:           | 1,1 KW/m <sup>2</sup> |
| Beschneite Fläche:                      | 100 m <sup>2</sup>    |
| Quellstärke aus dem Kohlendioxidschnee: | 1,015 kg/s            |

Gesamtemission:

|   |            |
|---|------------|
| Quellstärke (Flashmassenstrom DN10 und Emission Kohlsäureschnee): | 1,929 kg/s |
| Quellstärke (Flashmassenstrom DN25 und Emission Kohlsäureschnee): | 6,727 kg/s |

#### 4.4.3 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10

Ein Stutzenabriss DN10 führt zu einem Austritt von 4,81 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorrattank. Davon werden 0,914 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (3,896 kg/s) sinkt als Kohlsäureschnee zu Boden und bedeckt eine Fläche von ca. 100 m<sup>2</sup>. Aus dieser beschneiten Fläche verdampfen bei Sonneneinstrahlung (angenommene Bestrahlungsstärke 1,1 KW/m<sup>2</sup>) zusätzlich 1,015 kg/s gasförmiges Kohlendioxid aus dem Kohlsäureschnee. Bei dieser Abschätzung wird zum einen die Örtlichkeit berücksichtigt (der Behälter wird im Süden und Westen durch die Halle 1 abgeschirmt; eine Ausbringung des Kohlsäureschnees kann daher nur in die anderen Himmelsrichtungen erfolgen), zum anderen wird unter Berücksichtigung der Dichte von festem Kohlendioxid (ca. 1.560 kg/m<sup>3</sup>) davon ausgegangen, dass die mittlere Schichtdicke des Kohlsäureschnees zwischen 4 und 5 cm beträgt. An der Freisetzungsstelle wird die Schichtdicke am größten sein und zu den Rändern des als Halbkreis angenommenen Ausbringungsgebietes kontinuierlich abnehmen.

Aufgrund des natürlichen Gefälles erfolgt eine bevorzugte Ausbreitung des CO<sub>2</sub> in Richtung Norden (Freifläche, unbebautes Gelände, Wiese, Bachlauf). Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.4-1:** Grenzwertüberschreitungen DN10

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 4   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 4   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 13  |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 41  |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 204                                       |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unterschreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung, wie in Diagramm A4.4-1 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hoffläche mit LKW ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 4 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Sich im LKW aufhaltende Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Atemhöhe bereits beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit und nachfolgend zu Atemlähmung und Tod führen kann. Die Rettung der dort verbleibenden Personen muss von außen mittels Fremdbeatmung erfolgen.

Das Befahren der Hoffläche mit PKW und gasbetriebenen Flurförderzeugen (Sauerstoffgrenzkonzentration 12,6 Vol.-%) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 4 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Im PKW eingeschlossene Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, die Lüftung des Fahrzeugs ist auszuschalten bzw. auf Umluft zu stellen, wegen der relativ niedrigen Sitzhöhe sind die Personen trotz geschlossener Fenster und Türen erheblich gefährdet und daher vorrangig durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen. Der Arbeitsplatz der Führer der Flurförderzeuge ist gegenüber der Sitzposition der PKW erhöht, dafür allerdings gegenüber der Atmosphäre ungeschützt. Die Fahrer dürfen ihren Arbeitsplatz

keinesfalls verlassen, es sei denn, Sie verfügen über eine auch für diese Konzentrationen wirksame persönliche Schutzausrüstung. Andernfalls sind auch Sie von außen durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 13 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die Freisetzung erfolgt unter starker Geräusentwicklung und der weithin sichtbaren Ablagerung von Kohlensäureschnee. Wegen der Belegung der Hoffläche mit Arbeitsmitteln sowie der umgebenden betriebseigenen Bebauung ist eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Ereignis nicht von allen Punkten des Betriebsbereichs möglich. In diesem Bereich (13 m um die Freisetzungsstelle) werden innerhalb der Gebäude (Halle 1) regelmäßig Tätigkeiten ausgeführt (Abfüllen und Verladen). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 41 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze (Halle 1 und ein Haus mit Werkwohnungen). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im

Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 204 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ständige Arbeitsplätze (Halle 1, Büros und ein Haus mit Werkwohnungen). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (ca. 1.975 s entspricht ca. 0,55 Stunden) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der TEEL-2-Wert überschritten. Aufgrund des natürlichen Gefälles erfolgt die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> bevorzugt in Richtung Norden (Freifläche, unbebautes Gelände, Wiese, Bachlauf). Der im Süden liegende zukünftige Radweg (ehemalige Bahnstrecke) ist durch den davor befindlichen Wall und die als Barriere fungierende Begrenzung des Betriebsgeländes (Zaun mit geschlossenen Blechelementen, 2 m hoch) vor Einwirkungen durch CO<sub>2</sub> geschützt. Eine Ausbreitung des CO<sub>2</sub> in Richtung der nächstgelegenen Wohnbebauung hinter dem höher liegenden überregionalen Verkehrsweg wird durch diesen Wall verhindert. Sich im Bereich der Logistikhalle und des öffentlichen Verkehrsweges aufhaltende Personen werden mit relevanten Konzentrationen beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jedoch möglich.

Der AGW wird außerhalb des Betriebsgeländes ebenfalls überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 2.000 s entspricht ca. 34 min) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird. Aufgrund des natürlichen Gefälles erfolgt die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> bevorzugt in Richtung Norden (Freifläche, unbebautes Gelände, Wiese, Bachlauf). Der im Süden liegende zukünftige Radweg (ehemalige Bahnstrecke) ist durch den davor befindlichen Wall und die als Barriere fungierende Begrenzung des Betriebsgeländes (Zaun mit geschlossenen Blechelementen, 2 m hoch) vor Einwirkungen durch CO<sub>2</sub> geschützt. Eine Ausbreitung des CO<sub>2</sub> in Richtung der nächstgelegenen Wohnbebauung hinter dem höher liegenden überregionalen Verkehrsweg wird durch diesen Wall verhindert. Sich im Bereich der Freisetzung aufhaltende Personen werden mit Konzentrationen oberhalb des AGW beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jederzeit möglich.

#### 4.4.4 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25

Ein Stutzenabriss DN25 führt zu einem Austritt von 30,05 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorratstank. Davon werden 5,721 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (24,329 kg/s) sinkt als Kohlendäureschnee zu Boden und bedeckt eine Fläche von ca. 100 m<sup>2</sup>. Aus dieser beschneiten Fläche verdampfen bei Sonneneinstrahlung (angenommene Bestrahlungsstärke 1,1 KW/m<sup>2</sup>) zusätzlich 1,015 kg/s gasförmiges Kohlendioxid aus dem Kohlendäureschnee. Bei dieser Abschätzung wird zum einen die Örtlichkeit berücksichtigt (der Behälter wird im Süden und Westen durch die Halle 1 abgeschirmt; eine Ausbringung des Kohlendäureschnees kann daher nur in die anderen Himmelsrichtungen erfolgen), zum anderen wird unter Berücksichtigung der Dichte von festem Kohlendioxid (ca. 1.560 kg/m<sup>3</sup>) davon ausgegangen, dass die mittlere Schichtdicke des Kohlendäureschnees zwischen 4 und 5 cm beträgt. An der Freisetzungsstelle wird die Schichtdicke am größten sein und zu den Rändern des als Halbkreis angenommenen Ausbringungsgebietes kontinuierlich abnehmen.

Aufgrund des natürlichen Gefälles erfolgt eine bevorzugte Ausbreitung des CO<sub>2</sub> in Richtung Norden (Freifläche, unbebautes Gelände, Wiese, Bachlauf). Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.4-2:** Grenzwertüberschreitungen DN25

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 9   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 10  |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 34  |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 143                                       |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 310                                       |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer beträgt 316 s. Sie errechnet sich aus dem Behälterinhalt und dem Emissionsmassenstrom. Wie in Diagramm A4.4-2 im Anhang dargestellt, hat der Ausströmvorgang erst nach 316 s, im Bereich bis ca.

60 m vom Austrittsort entfernt, ein stationäres Konzentrationsprofil erreicht. Die sich außerhalb dieses Bereichs einstellenden maximalen Konzentrationen sind sowohl vom Ortsfeld abhängig als auch zeitabhängig, so dass kein einfacher funktionaler Zusammenhang mehr zwischen Konzentration und Ortsfeld besteht.

Das Befahren der Hoffläche mit LKW ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 9 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Sich im LKW aufhaltende Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Atemhöhe bereits beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit und nachfolgend zu Atemlähmung und Tod führen kann. Die Rettung der dort verbleibenden Personen muss von außen mittels Fremdbeatmung erfolgen.

Das Befahren der Hoffläche mit PKW und gasbetriebenen Flurförderfahrzeugen (Sauerstoffgrenzkonzentration 12,6 Vol.-%) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 10 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Im PKW eingeschlossene Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, die Lüftung des Fahrzeugs ist auszuschalten bzw. auf Umluft zu stellen, wegen der relativ niedrigen Sitzhöhe sind die Personen trotz geschlossener Fenster und Türen erheblich gefährdet und daher vorrangig durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen. Der Arbeitsplatz der Führer der Flurförderzeuge ist gegenüber der Sitzposition der PKW erhöht, dafür allerdings gegenüber der Atmosphäre ungeschützt. Die Fahrer dürfen ihren Arbeitsplatz keinesfalls verlassen, es sei denn, Sie verfügen über eine auch für diese Konzentrationen wirksame persönliche Schutzausrüstung. Andernfalls sind auch Sie von außen durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 34 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die Frei-

setzung erfolgt unter Geräuschentwicklung und der weithin sichtbaren Ablagerung von Kohlsäureschnee. Wegen der Belegung der Hoffläche mit Arbeitsmitteln sowie der umgebenden betriebseigenen Bebauung ist eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Ereignis nicht von allen Punkten des Betriebsbereichs möglich. In diesem Bereich (34 m um die Freisetzungsstelle) befinden sich ständige Arbeitsplätze (Werkstätten und Büros). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 143 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze (Werkstätten, Büros, ein Haus mit Werkwohnungen und öffentliche Verkehrswege). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 310 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Werkstätten, Büros und ein Haus mit Werkwohnungen). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (ca. 316 s entspricht ca. 5,3 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW um Größenordnungen unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der TEEL-2-Wert überschritten. Aufgrund des natürlichen Gefälles erfolgt die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> bevorzugt in Richtung Norden (Freifläche, unbebautes Gelände, Wiese, Bachlauf). Der im Süden liegende zukünftige Radweg (ehemalige Bahnstrecke) ist durch den davor befindlichen Wall und die als Barriere fungierende Begrenzung des Betriebsgeländes (Zaun mit geschlossenen Blechelementen,

2 m hoch) vor Einwirkungen durch CO<sub>2</sub> geschützt. Eine Ausbreitung des CO<sub>2</sub> in Richtung der nächstgelegenen Wohnbebauung hinter dem höher liegenden überregionalen Verkehrsweg wird durch diesen Wall verhindert. Sich im Bereich der Logistikhalle und des öffentlichen Verkehrsweges aufhaltende Personen werden mit relevanten Konzentrationen beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jedoch möglich.

Der AGW wird außerhalb des Betriebsgeländes ebenfalls überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 316 s entspricht ca. 5,3 min) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW um Größenordnungen unterschritten wird. Aufgrund des natürlichen Gefälles erfolgt die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> bevorzugt in Richtung Norden (Freifläche, unbebautes Gelände, Wiese, Bachlauf). Der im Süden liegende zukünftige Radweg (ehemalige Bahnstrecke) ist durch den davor befindlichen Wall und die als Barriere fungierende Begrenzung des Betriebsgeländes (Zaun mit geschlossenen Blechelementen, 2 m hoch) vor Einwirkungen durch CO<sub>2</sub> geschützt. Eine Ausbreitung des CO<sub>2</sub> in Richtung der nächstgelegenen Wohnbebauung hinter dem höher liegenden überregionalen Verkehrsweg wird durch diesen Wall verhindert. Sich im Bereich der Freisetzung aufhaltende Personen werden mit Konzentrationen oberhalb des AGW beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jederzeit möglich.

#### 4.4.5 Ergebnis der Berechnung für spontane Freisetzung

Ein spontanes Versagen des Lagertanks führt zu einer unmittelbaren Freisetzung von 5.460 kg CO<sub>2</sub>. Der Rest (4.040 kg) sinkt als Kohlensäureschnee zu Boden und bedeckt eine Fläche von ca. 100 m<sup>2</sup>. Bei dieser Abschätzung wird zum einen die Örtlichkeit berücksichtigt (der Behälter wird im Süden und Westen durch die Halle 1 abgeschirmt; eine Ausbringung des Kohlensäureschnees kann daher nur in die anderen Himmelsrichtungen erfolgen), zum anderen wird unter Berücksichtigung der Dichte von festem Kohlendioxid (ca. 1.560 kg/m<sup>3</sup>) davon ausgegangen, dass die mittlere Schichtdicke des Kohlensäureschnees zwischen 2 und 3 cm beträgt. An der Freisetzungsstelle wird die Schichtdicke am größten sein und zu den Rändern des als Halbkreis angenommenen Ausbringungsgebietes kontinuierlich abnehmen. Wegen des wesentlich höheren Druckes wird der Kohlensäureschnee aus der Nähe der Freisetzungsstelle zu den Rändern hin verbracht, so dass insgesamt eine

vergleichmäßigte Schichtdicke entsteht. Während des Betrachtungszeitraums von ca. 8 min, in denen im Nahbereich der Freisetzung in Atemhöhe Überschreitungen der betrachteten Beurteilungswerte berechnet werden, wird durch Energieeintrag von außen auf den Kohlen-säureschnee kein merklicher gasförmiger Beitrag beigesteuert. Zusätzlich zum gasförmig freiwerdenden CO<sub>2</sub> verdampfen bei Sonneneinstrahlung (angenommene Bestrahlungsstärke 1,1 KW/m<sup>2</sup>) ca. 1,015 kg/s aus dem Kohlen-säureschnee. Das über die Sonneneinstrahlung freigesetzte gasförmige Kohlendioxid erreicht somit einen Massenstrom, der vergleichbar ist mit dem bei dem Szenario Stutzenabriss DN10 festgestellten. Wegen der erheblich geringeren Entfernungen, in denen die jeweiligen Beurteilungswerte beim Stutzenabriss DN10 unterschritten werden, sind die Beiträge für durch Sonneneinstrahlung gasförmig freigesetztes CO<sub>2</sub> bei Spontanversagen des Behälters vernachlässigbar.

Aufgrund des natürlichen Gefälles erfolgt eine bevorzugte Ausbreitung des CO<sub>2</sub> in Richtung Norden (Freifläche, unbebautes Gelände, Wiese, Bachlauf). Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.4-3:** Grenzwertüberschreitungen Spontanversagen

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 11  |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 35  |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 82  |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 161                                       |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 417                                       |

Das Befahren der Hoffläche mit LKW ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffkonzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 11 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Sich im LKW aufhaltende Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Atemhöhe bereits beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit und nachfolgend zu Atemlähmung und Tod führen kann. Die Rettung der dort verbleibenden Personen muss von außen mittels Fremdbeatmung erfolgen.

Das Befahren der Hoffläche mit PKW und gasbetriebenen Flurförderzeugen (Sauerstoffgrenzkonzentration 12,6 Vol.-%) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 35 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Im PKW eingeschlossene Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, die Lüftung des Fahrzeugs ist auszuschalten bzw. auf Umluft zu stellen, wegen der relativ niedrigen Sitzhöhe sind die Personen trotz geschlossener Fenster und Türen erheblich gefährdet und daher vorrangig durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen. Der Arbeitsplatz der Fahrer der Flurförderzeuge ist gegenüber der Sitzposition der PKW erhöht, dafür allerdings gegenüber der Atmosphäre ungeschützt. Die Fahrer dürfen ihren Arbeitsplatz keinesfalls verlassen, es sei denn, Sie verfügen über eine auch für diese Konzentrationen wirksame persönliche Schutzausrüstung. Andernfalls sind auch Sie von außen durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 82 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die spontane Freisetzung erfolgt unter starker Geräusentwicklung und der weithin sichtbaren Ablagerung von Kohlensäureschnee. Wegen der Belegung der Hoffläche mit Arbeitsmitteln sowie der umgebenden betriebseigenen Bebauung ist eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Ereignis nicht von allen Punkten des Betriebsbereichs möglich. In diesem Bereich (82 m um die Freisetzungsstelle) befinden sich ständig besetzte Arbeitsplätze (Halle 1 und Büros). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 161 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze (Halle 1, Büros und ein Haus mit Werkwohnungen). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 417 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Werkstätten, Büros). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach der spontanen Freisetzung sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW um Größenordnungen unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird die Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> überschritten. Sich im Bereich des Wirtschaftswegs ungeschützt im Freien aufhaltende Personen werden mit relevanten Konzentrationen beaufschlagt und können diesen Bereich nicht mehr aus eigener Kraft verlassen. Wegen der dort in Bodennähe herrschenden Konzentrationen ist zur Vermeidung von Todesfällen eine schnelle Rettung durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung unabdingbar. Da diese Personen unvorbereitet betroffen werden, ist ein Verlassen des Gefahrenbereichs auch für geübte Personen nicht problemlos möglich.

Ebenso wird außerhalb des Betriebsgeländes der TEEL-2-Wert überschritten. Aufgrund des natürlichen Gefälles erfolgt die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> bevorzugt in Richtung Norden (Freifläche, unbebautes Gelände, Wiese, Bachlauf). Der im Süden liegende zukünftige Radweg (ehemalige Bahnstrecke) ist durch den davor befindlichen Wall und die als Barriere fungierende Begrenzung des Betriebsgeländes (Zaun mit geschlossenen Blechelementen, 2 m hoch) vor Einwirkungen durch CO<sub>2</sub> geschützt. Eine Ausbreitung des CO<sub>2</sub> in Richtung der nächstgelegenen Wohnbebauung hinter dem höher liegenden überregionalen Verkehrsweg wird durch diesen Wall verhindert. Sich im Bereich der Logistikhalle und des öffentlichen Verkehrsweges aufhaltende Personen werden mit relevanten Konzentrationen beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jedoch möglich.

Auch der AGW wird außerhalb des Betriebsgeländes überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach der spontanen Freisetzung sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW um Größenordnungen unterschritten wird. Aufgrund des natürlichen Gefälles erfolgt die Ausbreitung des CO<sub>2</sub> bevorzugt in Richtung Norden (Freifläche, unbebautes Gelände, Wiese, Bachlauf). Der im Süden liegende zukünftige Radweg (ehemalige Bahnstrecke) ist durch den davor befindlichen Wall und die als Barriere fungierende Begrenzung des Betriebsgeländes (Zaun mit geschlossenen Blechelementen, 2 m hoch) vor Einwirkungen durch CO<sub>2</sub> geschützt. Eine Ausbreitung des CO<sub>2</sub> in Richtung der nächstgelegenen Wohnbebauung hinter dem höher liegenden überregionalen Verkehrsweg wird durch diesen Wall verhindert. Sich im Bereich der Freisetzung aufhaltende Personen werden mit Konzentrationen oberhalb des AGW beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jederzeit möglich.

#### 4.5 Fall 5 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb B

##### 4.5.1 Austrittsberechnung

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,62 \\ A_{DN10} &= 0,0785 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ A_{DN25} &= 0,491 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \rho_a &= 1030,86 \text{ kg/m}^3 \\ p_a &= 1 * 10^5 \text{ Pa} \\ p_i &= 20,0 * 10^5 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Gesamtmassenstrom von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{DN10} &= 3,05 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{DN25} &= 19,05 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Flashanteil von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{Flash, DN10}} &= 0,359 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{Flash, DN25}} &= 2,241 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

##### 4.5.2 Berechnung der Ausbreitung

Zur Berechnung des Ausbreitungsverhaltens der CO<sub>2</sub>-Wolke und den daraus resultierenden relevanten Konzentrationen an Aufpunkten wurde das Programm EFFECTS 7.3 (Modell "Atmospheric Dispersion of heavy gas, concentration") für die Berechnung verwendet.

Folgende allgemeine Modellparameter werden verwendet:

Eingabeparameter:

Gasparameter:

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| Gasart:              | CO <sub>2</sub> |
| Freisetzungsfom:     | gasförmig       |
| Austrittstemperatur: | -78,5 °C        |
| Standortparameter:   |                 |
| Ausbreitungsgebiet:  | freies Gelände  |

|                                   |                  |                                   |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| Ausbreitungssituation:            | Pasquill-Klasse: |                                   |
| ungünstigst                       | F                |                                   |
| Quellparameter:                   |                  |                                   |
| Quellabmessungen DN10:            | XQ = 0,005 m     | halbe Lecköffnung in Windrichtung |
|                                   | YQ = 0,0 m       | horizontales Ausströmen           |
|                                   | ZQ = 0,005 m     | halbe Leckhöhe                    |
| Quellhöhe:                        | 1,0 m            |                                   |
| Quellabmessungen DN25:            | XQ = 0,0125 m    | halbe Lecköffnung in Windrichtung |
|                                   | YQ = 0,0 m       | horizontales Ausströmen           |
|                                   | ZQ = 0,0125 m    | halbe Leckhöhe                    |
| Quellhöhe:                        | 1,0 m            |                                   |
| Quellabmessungen Spontanversagen: | XQ = 1,0 m       | Abriss Boden in xy-Ebene          |
|                                   | YQ = 1,0 m       | Abriss Boden in xy-Ebene          |
|                                   | ZQ = 0,0 m       |                                   |
| Quellhöhe:                        | 1,0 m            |                                   |
| Quellentyp :                      | Flächenquelle    |                                   |
| Quellstärke bei DN10:             | max. 0,359 kg/s  |                                   |
| Quellstärke bei DN25:             | max. 2,241 kg/s  |                                   |

Weiterhin wurde mit folgenden Eingangsparametern gerechnet:

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Umgebungstemperatur:              | 293 K  |
| angenommene Emissionsdauer:       | 1800 s |
| Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe: | 1 m/s  |

Parameter für die Emission aus dem Kohlendioxid-schnee:

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Bestrahlungsstärke der Sonne            | 1,1 KW/m <sup>2</sup> |
| Beschneite Fläche                       | 100 m <sup>2</sup>    |
| Quellstärke aus dem Kohlendioxid-schnee | 0,298 kg/s            |

Gesamtemission:

|   |            |
|---|------------|
| Quellstärke (Flashmassenstrom DN10 und Emission Kohlsäureschnee): | 0,657 kg/s |
| Quellstärke (Flashmassenstrom DN25 und Emission Kohlsäureschnee): | 2,539 kg/s |

#### 4.5.3 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10

Ein Stutzenabriss DN10 führt zu einem Austritt von 3,05 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorratstank. Davon werden 0,359 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (2,691 kg/s) sinkt als Kohlsäureschnee zu Boden und bedeckt eine Fläche von ca. 100 m<sup>2</sup>. Aus der beschneiten Fläche verdampfen bei Sonneneinstrahlung (angenommene Bestrahlungsstärke 1,1 KW/m<sup>2</sup>) zusätzlich 0,298 kg/s gasförmiges Kohlendioxid aus dem Kohlsäureschnee. Bei dieser Abschätzung wird zum einen die Örtlichkeit berücksichtigt (der Behälter wird im Norden und Westen durch die Abfüllhalle abgeschirmt; eine Ausbringung des Kohlsäureschnees kann daher nur in die anderen Himmelsrichtungen erfolgen), zum anderen wird unter Berücksichtigung der Dichte von festem Kohlendioxid (ca. 1.560 kg/m<sup>3</sup>) davon ausgegangen, dass die mittlere Schichtdicke des Kohlsäureschnees zwischen 3 und 4 cm beträgt. An der Freisetzungsstelle wird die Schichtdicke am größten sein und zu den Rändern des als Halbkreis angenommenen Ausbringungsgebietes kontinuierlich abnehmen.

Da das Betriebsgelände eben ist, wird keine Vorzugsrichtung für eine CO<sub>2</sub>-Ausbreitung erwartet. Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.5-1:** Grenzwertüberschreitungen DN10

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 7   |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 20  |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 100                                       |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unterschreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung, wie in Diagramm A4.5-1 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderzeuge) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nur im unmittelbaren Ausströmbereich (2 m zum Freisetzungsort) technisch nicht möglich.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 7 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die Freisetzung erfolgt unter Geräuschentwicklung und der weithin sichtbaren Ablagerung von Kohlendioxidschnee. Wegen der Belegung der Hoffläche mit Arbeitsmitteln sowie der umgebenden betriebseigenen Bebauung ist eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Ereignis nicht von allen Punkten des Betriebsbereichs möglich. In diesem Bereich (7 m um die Freisetzungsstelle) werden innerhalb der Gebäude (Abfüllhalle) regelmäßig Tätigkeiten ausgeführt (Abfüllen und Verladen). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 20 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ständige Arbeitsplätze (Abfüllhalle und Büros). Sich im Inneren von

Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 100 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Abfüllhalle, Verladebereiche und Büros). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 14.750 s entspricht ca. 4,1 Stunden) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW unterschritten wird.

Der AGW wird außerhalb des Betriebsgeländes ebenfalls überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 14.750 s entspricht ca. 4,1 Stunden) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW unterschritten wird. Sich im Bereich der Eisenbahn ungeschützt im Freien aufhaltende Personen werden mit Konzentrationen oberhalb des AGW beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jederzeit möglich. In Richtung Westen ist eine Ausbreitung aufgrund der Bebauung nicht möglich. In den südlich gelegenen Nachbarbetrieben werden dortige Mitarbeiter ebenfalls Konzentrationen oberhalb des AGW ausgesetzt.

#### 4.5.4 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25

Ein Stutzenabriss DN25 führt zu einem Austritt von 19,05 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorrattank. Davon werden 2,241 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (16,809 kg/s) sinkt als Kohlendioxid zu Boden und bedeckt eine Fläche von ca. 100 m<sup>2</sup>. Aus dieser beschneiten Fläche verdampfen bei Sonneneinstrahlung (angenommene Bestrahlungsstärke 1,1 kW/m<sup>2</sup>) zusätzlich 0,298 kg/s gasförmiges Kohlendioxid aus dem Kohlendioxid zu Boden. Bei dieser Abschätzung wird zum einen die Örtlichkeit berücksichtigt (der Behälter wird im Norden und Westen durch die Abfüllhalle abgeschirmt; eine

Ausbringung des Kohläensäureschnees kann daher nur in die anderen Himmelsrichtungen erfolgen), zum anderen wird unter Berücksichtigung der Dichte von festem Kohlendioxid (ca. 1.560 kg/m<sup>3</sup>) davon ausgegangen, dass die mittlere Schichtdicke des Kohläensäureschnees zwischen 10 und 20 cm beträgt. An der Freisetzungsstelle wird die Schichtdicke am größten sein und zu den Rändern des als Halbkreis angenommenen Ausbringungsgebietes kontinuierlich abnehmen.

Da das Betriebsgelände eben ist, wird keine Vorzugsrichtung für eine CO<sub>2</sub>-Ausbreitung erwartet. Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.5-2:** Grenzwertüberschreitungen DN25

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntugtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| Fahruntugtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 3   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 15  |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 48  |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 248                                       |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unterschreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung, wie in Diagramm A4.5-2 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderzeuge) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nur im unmittelbaren Ausströmbereich (2-3 m zum Freisetzungsort) technisch nicht möglich.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für

diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 15 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die Freisetzung erfolgt unter Geräusentwicklung und der weithin sichtbaren Ablagerung von Kohlensäureschnee. Wegen der Belegung der Hoffläche mit Arbeitsmitteln sowie der umgebenden betriebseigenen Bebauung ist eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Ereignis nicht von allen Punkten des Betriebsbereichs möglich. In diesem Bereich (15 m um die Freisetzungsstelle) werden innerhalb der Gebäude (Abfüllhalle) regelmäßig Tätigkeiten ausgeführt (Abfüllen und Verladen). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 48 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ständige Arbeitsplätze (Abfüllhalle und Büros). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 248 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Abfüllhalle, Verladebereiche und Büros). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 2.000 s entspricht ca. 33 Minuten) sinkt

die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der TEEL-2-Wert überschritten. Sich im Bereich der Eisenbahn ungeschützt im Freien aufhaltende Personen werden mit relevanten Konzentrationen beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jedoch möglich. In Richtung Westen ist eine Ausbreitung aufgrund der Bebauung nicht möglich. In den südlich gelegenen Nachbarbetrieben werden dortige Mitarbeiter ebenfalls relevanten Konzentrationen ausgesetzt.

Ebenso wird außerhalb des Betriebsgeländes der AGW überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 2.000 s entspricht ca. 33 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird. Sich im Bereich der Eisenbahn ungeschützt im Freien aufhaltende Personen werden mit Konzentrationen oberhalb des AGW beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jederzeit möglich. In Richtung Westen ist eine Ausbreitung aufgrund der Bebauung nicht möglich. In den südlich gelegenen Nachbarbetrieben werden dortige Mitarbeiter ebenfalls Konzentrationen oberhalb des AGW ausgesetzt.

#### 4.5.5 Ergebnis der Berechnung für spontane Freisetzung

Ein spontanes Versagen des Lagertanks führt zu einer unmittelbaren Freisetzung von 8.200 kg CO<sub>2</sub>. Der Rest (36.800 kg) sinkt als Kohlensäureschnee zu Boden und bedeckt eine Fläche von ca. 100 m<sup>2</sup>. Bei dieser Abschätzung wird zum einen die Örtlichkeit berücksichtigt (der Behälter wird im Norden und Westen durch die Abfüllhalle abgeschirmt; eine Ausbringung des Kohlensäureschnees kann daher nur in die anderen Himmelsrichtungen erfolgen), zum anderen wird unter Berücksichtigung der Dichte von festem Kohlendioxid (ca. 1.560 kg/m<sup>3</sup>) davon ausgegangen, dass die mittlere Schichtdicke des Kohlensäureschnees zwischen 10 und 20 cm beträgt. An der Freisetzungsstelle wird die Schichtdicke am größten sein und zu den Rändern des als Halbkreis angenommenen Ausbringungsgebietes kontinuierlich abnehmen. Aufgrund der Standhöhe des spontan versagenden Behälters wird an der Austrittsstelle von einer Schichtdicke von ca. 0,5 m ausgegangen. Während des Betrachtungszeitraums von ca. 10 min, in denen im Nahbereich der Freisetzung in Atemhöhe Überschreitungen der betrachteten Beurteilungswerte berechnet werden, wird

durch Energieeintrag von außen auf den Kohlsäureschnee kein merklicher gasförmiger Beitrag beigesteuert. Zusätzlich zum gasförmig freiwerdenden CO<sub>2</sub> verdampfen bei Sonneneinstrahlung (angenommene Bestrahlungsstärke 1,1 KW/m<sup>2</sup>) ca. 0,5 kg/s aus dem Kohlsäureschnee. Das über die Sonneneinstrahlung freigesetzte gasförmige Kohlendioxid erreicht somit einen Massenstrom, der vergleichbar ist mit dem bei dem Szenario Stutzenabriss DN10 festgestellten. Wegen der erheblich geringeren Entfernungen, in denen die jeweiligen Beurteilungswerte beim Stutzenabriss DN10 unterschritten werden, sind die Beiträge für durch Sonneneinstrahlung gasförmig freigesetztes CO<sub>2</sub> bei Spontanversagen des Behälters vernachlässigbar.

Da das Betriebsgelände eben ist, wird keine Vorzugsrichtung für eine CO<sub>2</sub>-Ausbreitung erwartet. Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.5-3:** Grenzwertüberschreitungen Spontanversagen

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 12  |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 41  |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 97  |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 179                                       |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 504                                       |

Das Befahren der Hofffläche mit LKW ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 12 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Sich im LKW aufhaltende Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Atemhöhe bereits beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit und nachfolgend zu Atemlähmung und Tod führen kann. Die Rettung der dort verbleibenden Personen muss von außen mittels Fremdbeatmung erfolgen.

Das Befahren der Hofffläche mit PKW und gasbetriebenen Flurförderzeugen (Sauerstoffgrenzkonzentration 12,6 Vol.-%) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenz-

konzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 41 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Im PKW eingeschlossene Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, die Lüftung des Fahrzeugs ist auszuschalten bzw. auf Umluft zu stellen, wegen der relativ niedrigen Sitzhöhe sind die Personen trotz geschlossener Fenster und Türen erheblich gefährdet und daher vorrangig durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen. Der Führer der Flurförderzeuge ist gegenüber der Sitzposition der PKW erhöht, dafür allerdings gegenüber der Atmosphäre ungeschützt. Die Fahrer dürfen ihren Arbeitsplatz keinesfalls verlassen, es sei denn, Sie verfügen über eine auch für diese Konzentrationen wirksame persönliche Schutzausrüstung. Andernfalls sind auch Sie von außen durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 97 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die spontane Freisetzung erfolgt unter starker Geräusentwicklung und der weithin sichtbaren Ablagerung von Kohlensäureschnee. Wegen der Belegung der Hoffläche mit Arbeitsmitteln sowie der umgebenden betriebseigenen Bebauung ist eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Ereignis nicht von allen Punkten des Betriebsbereichs möglich. In diesem Bereich (97 m um die Freisetzungsstelle) befinden sich ständig besetzte Arbeitsplätze (Werkstätten und Büros). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 179 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze (Werkstätten und Büros). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 504 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Werkstätten und Büros). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach der spontanen Freisetzung sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW um Größenordnungen unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird die Sauerstoffgrenzkonzentration für PKW im Bereich der Eisenbahngleise unterschritten. Sich im Bereich des Bahnhofs ungeschützt im Freien aufhaltende Personen werden mit relevanten Konzentrationen beaufschlagt und können diesen Bereich nicht mehr aus eigener Kraft verlassen. Wegen der dort in Bodennähe herrschenden Konzentrationen > 40 Vol.-% CO<sub>2</sub> ist zur Vermeidung von Todesfällen eine schnelle Rettung durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung unabdingbar, da die Besucher unvorbereitet und ohne persönliche Schutzausrüstung betroffen werden und aufgrund der Örtlichkeit (Gleise, Zäune) ein Verlassen des Gefahrenbereichs auch für geübte Personen nicht problemlos möglich ist.

Ebenso wird der TEEL-2-Wert außerhalb des Betriebsgeländes überschritten. Sich im Bereich der Eisenbahn ungeschützt im Freien aufhaltende Personen werden mit relevanten Konzentrationen beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jedoch möglich. In Richtung Westen ist eine Ausbreitung aufgrund der Bebauung nicht möglich. In den südlich gelegenen Nachbarbetrieben werden dortige Mitarbeiter ebenfalls relevanten Konzentrationen ausgesetzt.

Des Weiteren wird der AGW außerhalb des Betriebsgeländes überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als

untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach der spontanen Freisetzung sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW um Größenordnungen unterschritten wird. Sich im Bereich der Eisenbahn ungeschützt im Freien aufhaltende Personen werden mit Konzentrationen oberhalb des AGW beaufschlagt. Wegen der zu erwartenden Konzentrationen ist das Verlassen der gefährdeten Zone aus eigener Kraft jederzeit möglich. In Richtung Westen ist eine Ausbreitung aufgrund der Bebauung nicht möglich. In den südlich gelegenen Nachbarbetrieben werden dortige Mitarbeiter ebenfalls Konzentrationen oberhalb des AGW ausgesetzt.

#### 4.6 Fall 6 - CO<sub>2</sub>-Einsatzbehälter in der Getränkeindustrie

##### 4.6.1 Austrittsberechnung

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,62 \\ A_{\text{DN10}} &= 0,0785 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ A_{\text{DN25}} &= 0,491 * 10^{-3} \text{ m}^2 \\ \rho_a &= 1030,86 \text{ kg/m}^3 \\ p_a &= 1 * 10^5 \text{ Pa} \\ p_i &= 16,0 * 10^5 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Gesamtmassenstrom von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{DN10}} &= 2,828 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{DN25}} &= 17,678 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Dies ergibt einen Flashanteil von:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{Flash, DN10}} &= 0,331 \text{ kg/s} \\ \dot{m}_{\text{Flash, DN25}} &= 2,092 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

##### 4.6.2 Berechnung der Ausbreitung

Zur Berechnung des Ausbreitungsverhaltens der CO<sub>2</sub>-Wolke und den daraus resultierenden relevanten Konzentrationen an Aufpunkten wurde das Programm EFFECTS 7.3 (Modell "Atmospheric Dispersion of heavy gas, concentration") für die Berechnung verwendet.

Folgende allgemeine Modellparameter werden verwendet:

Eingabeparameter:

Gasparameter:

Gasart: CO<sub>2</sub>  
Freisetzungsfom: gasförmig  
Austrittstemperatur: -78,5 °C

Standortparameter:

Ausbreitungsgebiet: freies Gelände

Ausbreitungssituation: Pasquill-Klasse:

ungünstigst

F

Quellparameter:

|                                   |                 |                                   |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| Quellabmessungen DN10:            | XQ = 0,005 m    | halbe Lecköffnung in Windrichtung |
|                                   | YQ = 0,0 m      | horizontales Ausströmen           |
|                                   | ZQ = 0,005 m    | halbe Leckhöhe                    |
| Quellhöhe:                        | 1,0 m           |                                   |
| Quellabmessungen DN25:            | XQ = 0,0125 m   | halbe Lecköffnung in Windrichtung |
|                                   | YQ = 0,0 m      | horizontales Ausströmen           |
|                                   | ZQ = 0,0125 m   | halbe Leckhöhe                    |
| Quellhöhe:                        | 1,0 m           |                                   |
| Quellabmessungen Spontanversagen: | XQ = 1,0 m      | Abriss Boden in xy-Ebene          |
|                                   | YQ = 1,0 m      | Abriss Boden in xy-Ebene          |
|                                   | ZQ = 0,0 m      |                                   |
| Quellhöhe:                        | 1,0 m           |                                   |
| Quellentyp :                      | Flächenquelle   |                                   |
| Quellstärke bei DN10:             | max. 0,331 kg/s |                                   |
| Quellstärke bei DN25:             | max. 2,092 kg/s |                                   |

Weiterhin wurde mit folgenden Eingangsparametern gerechnet:

|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| Umgebungstemperatur:              | 293 K  |
| Angenommene Emissionsdauer:       | 1800 s |
| Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe: | 1 m/s  |

Parameter für die Emission aus dem Kohlendioxid:

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Bestrahlungsstärke der Sonne:                                  | 1,1 KW/m <sup>2</sup> |
| Beschneite Fläche:   | 100 m <sup>2</sup>    |
| Quellstärke aus dem Kohlendioxid:                              | 0,298 kg/s            |
| Gesamtemission:  |                       |
| Quellstärke (Flashmassenstrom DN10 und Emission Kohlendioxid): | 0,629 kg/s            |
| Quellstärke (Flashmassenstrom DN25 und Emission Kohlendioxid): | 2,390 kg/s            |

#### 4.6.3 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN10

Ein Stutzenabriss DN10 führt zu einem Austritt von 2,828 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorratstank. Davon werden 0,331 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (2,497 kg/s) sinkt als Kohlsäureschnee zu Boden und bedeckt eine Fläche von ca. 100 m<sup>2</sup>. Aus dieser beschneiten Fläche verdampfen bei Sonneneinstrahlung (angenommene Bestrahlungsstärke 1,1 KW/m<sup>2</sup>) zusätzlich 0,298 kg/s gasförmiges Kohlendioxid aus dem Kohlsäureschnee. Bei dieser Abschätzung wird zum einen die Örtlichkeit berücksichtigt (der Behälter wird im Norden und Westen durch die Abfüllhalle abgeschirmt; eine Ausbringung des Kohlsäureschnees kann daher nur in die anderen Himmelsrichtungen erfolgen), zum anderen wird unter Berücksichtigung der Dichte von festem Kohlendioxid (1.560 kg/m<sup>3</sup>) davon ausgegangen, dass die mittlere Schichtdicke des Kohlsäureschnees zwischen 3 und 4 cm beträgt. Am Freisetzungsort wird die Schichtdicke am größten sein und zu den Rändern des als Halbkreis angenommenen Ausbringungsgebietes kontinuierlich abnehmen.

Da das Betriebsgelände zum Wendepunkt hin abfällt, wird dieser Bereich als Vorzugsrichtung für eine CO<sub>2</sub>-Ausbreitung angenommen. Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.6-1:** Grenzwertüberschreitungen DN10

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 6   |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 19  |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 95  |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unterschreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge

resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung, wie in Diagramm A4.6-1 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderzeuge) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nur im unmittelbaren Ausströmbereich (2 m zum Freisetzungsort) technisch nicht möglich.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 6 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die Freisetzung erfolgt unter Geräuschentwicklung und der weithin sichtbaren Ablagerung von Kohlensäureschnee. Wegen der Belegung der Hoffläche mit Arbeitsmitteln sowie der umgebenden betriebseigenen Bebauung ist eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Ereignis nicht von allen Punkten des Betriebsbereichs möglich. In diesem Bereich (2 m um die Freisetzungsstelle) werden innerhalb der Gebäude (Produktion, Werkstatt und Büros) regelmäßig Tätigkeiten ausgeführt. Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 19 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige Arbeitsplätze (Verladung). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige

Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 95 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Werkstätten und Büros). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 14.145 s entspricht ca. 3,9 Stunden) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der AGW überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 14.145 s entspricht ca. 3,9 Stunden) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW unterschritten wird.

#### 4.6.4 Ergebnis der Berechnung für Stutzenabriss DN25

Ein Stutzenabriss DN25 führt zu einem Austritt von 17,678 kg/s an flüssigem CO<sub>2</sub> aus dem Vorrattank. Davon werden 2,092 kg/s bei der Flashverdampfung gasförmig freigesetzt. Der Rest (15,586 kg/s) sinkt als Kohlendioxid zu Boden und bedeckt eine Fläche von ca. 100 m<sup>2</sup>. Aus dieser beschneiten Fläche verdampfen bei Sonneneinstrahlung (angenommene Bestrahlungsstärke 1,1 kW/m<sup>2</sup>) zusätzlich 0,298 kg/s gasförmiges Kohlendioxid aus dem Kohlendioxid. Bei dieser Abschätzung wird zum einen die Örtlichkeit berücksichtigt (der Behälter wird im Norden und Westen durch die Abfüllhalle abgeschirmt; eine Ausbringung des Kohlendioxidschnees kann daher nur in die anderen Himmelsrichtungen erfolgen), zum anderen wird unter Berücksichtigung der Dichte von festem Kohlendioxid (ca. 1.560 kg/m<sup>3</sup>) davon ausgegangen, dass die mittlere Schichtdicke des Kohlendioxidschnees zwischen 2 und 4 cm beträgt. An der Freisetzungsstelle wird die Schichtdicke am größten sein und zu den Rändern des als Halbkreis angenommenen Ausbringungsgebietes kontinuierlich abnehmen.

Da das Betriebsgelände zum Wendepunkt hin abfällt, wird dieser Bereich als Vorzugsrichtung für eine CO<sub>2</sub>-Ausbreitung angenommen. Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.6-2:** Grenzwertüberschreitungen DN25

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 2   |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 3   |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 15  |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 47  |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 233                                       |

Die für die Berechnung der Ausbreitung angenommene Ausströmdauer von 1.800 s führt dazu, dass sich für alle herangezogenen Beurteilungswerte und für ihre berechnete Unterschreitung im Ortsfeld bereits ein stationäres Konzentrationsprofil aufgebaut hat. Als Folge resultiert ein einfacher funktionaler Zusammenhang zwischen Konzentration und Entfernung in Windrichtung, wie in Diagramm A4.6-1 im Anhang zu sehen.

Das Befahren der Hoffläche mit allen durch Verbrennungsmotoren angetriebenen Fahrzeugen (LKW, PKW und Flurförderzeuge) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration nur im unmittelbaren Ausströmbereich (2 m bzw. 3 m zum Freisetzungsort) technisch nicht möglich.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung. Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 15 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die Freisetzung erfolgt unter Geräusentwicklung und der weithin sichtbaren Ablagerung von Kohlensäureschnee. Wegen der Belegung der Hoffläche mit Arbeitsmitteln sowie der

umgebenden betriebseigenen Bebauung ist eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Ereignis nicht von allen Punkten des Betriebsbereichs möglich. In diesem Bereich (15 m um die Freisetzungsstelle) werden innerhalb der Gebäude (Abfüllhalle) regelmäßig Tätigkeiten ausgeführt (Abfüllen und Verladen). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 47 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich weder kurzzeitige noch ständige Arbeitsplätze. Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 233 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Abfüllhalle, Verladebereiche und Büros). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 2.263 s entspricht ca. 38 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der TEEL-2-Wert aufgrund der örtlichen Gegebenheiten (Wall zur überregionalen Straße mit einer Höhe von 2,0 - 2,5 m Höhe) nicht überschritten. Das gasförmige CO<sub>2</sub> verbleibt als CO<sub>2</sub>-Pool im Bereich des Wendeplatzes.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der AGW überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach Beendigung der Freisetzung (nach 2.263 s

entspricht ca. 38 Minuten) sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW deutlich unterschritten wird.

#### 4.6.5 Ergebnis der Berechnung für spontane Freisetzung

Ein spontanes Versagen des Lagertanks führt zu einer unmittelbaren Freisetzung von 6.820 kg CO<sub>2</sub>. Der Rest (33.180 kg) sinkt als Kohlendioxid zu Boden und bedeckt eine Fläche von ca. 100 m<sup>2</sup>. Bei dieser Abschätzung wird zum einen die Örtlichkeit berücksichtigt (der Behälter wird im Westen durch das Produktionsgebäude abgeschirmt; eine Ausbringung des Kohlendioxids kann daher nur in die anderen Himmelsrichtungen erfolgen), zum anderen wird unter Berücksichtigung der Dichte von festem Kohlendioxid (ca. 1.560 kg/m<sup>3</sup>) davon ausgegangen, dass die mittlere Schichtdicke des Kohlendioxidschnees zwischen 10 und 20 cm beträgt. An der Freisetzungsstelle wird die Schichtdicke am größten sein und zu den Rändern des als Halbkreis angenommenen Ausbringungsgebietes kontinuierlich abnehmen. Aufgrund der Standhöhe des spontan versagenden Behälters wird an der Austrittsstelle von einer Schichtdicke von ca. 0,5 m ausgegangen. Während des Betrachtungszeitraums von ca. 10 min, in denen im Nahbereich der Freisetzung in Atemhöhe Überschreitungen der betrachteten Beurteilungswerte berechnet werden, wird durch Energieeintrag von außen auf den Kohlendioxidschnee kein merklicher gasförmiger Beitrag beigesteuert. Zusätzlich zum gasförmig freiwerdenden CO<sub>2</sub> verdampfen bei Sonneneinstrahlung (angenommene Bestrahlungsstärke 1,1 kW/m<sup>2</sup>) ca. 0,5 kg/s aus dem Kohlendioxidschnee. Das über die Sonneneinstrahlung freigesetzte gasförmige Kohlendioxid erreicht somit einen Massenstrom, der vergleichbar ist mit dem bei dem Szenario Stützenabriss DN10 festgestellten. Wegen der erheblich geringeren Entfernungen, in denen die jeweiligen Beurteilungswerte beim Stützenabriss DN10 unterschritten werden, sind die Beiträge für durch Sonneneinstrahlung gasförmig freigesetztes CO<sub>2</sub> bei Spontanversagen des Behälters vernachlässigbar.

Da das Betriebsgelände zum Wendeplatz hin abfällt, wird dieser Bereich als Vorzugsrichtung für eine CO<sub>2</sub>-Ausbreitung angenommen. Relevante Konzentrationen werden in Windrichtung in Bodennähe auf Atemhöhe in folgenden Entfernungen erreicht:

**Tabelle 4.6-3:** Grenzwertüberschreitungen Spontanversagen

| Bezeichnung              | Grenzwert                  | Entfernung von der Freisetzungsstelle (m) |
|--------------------------|----------------------------|---|
| Fahruntüchtigkeit LKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 11  |
| Fahruntüchtigkeit PKW    | 12,5 Vol.-% O <sub>2</sub> | 38  |
| 9 Vol.-% CO <sub>2</sub> | 163.800 mg/m <sup>3</sup>  | 13  |
| TEEL-2-Wert              | 54.600 mg/m <sup>3</sup>   | 15  |
| AGW                      | 9.100 mg/m <sup>3</sup>    | 340                                       |

Das Befahren der Hoffläche mit LKW ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 11 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Sich im LKW aufhaltende Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Atemhöhe bereits beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit und nachfolgend zu Atemlähmung und Tod führen kann. Die Rettung der dort verbleibenden Personen muss von außen mittels Fremdbeatmung erfolgen.

Das Befahren der Hoffläche mit PKW und gasbetriebenen Flurförderzeugen (Sauerstoffgrenzkonzentration 12,6 Vol.-%) ist aufgrund der Unterschreitung der Sauerstoffgrenzkonzentration höchstens bis zu einer Entfernung von 38 m zum Freisetzungsort technisch möglich. Bei weiterer Annäherung sterben die Motoren ab. Im PKW eingeschlossene Personen dürfen diesen keinesfalls verlassen, die Lüftung des Fahrzeugs ist auszuschalten bzw. auf Umluft zu stellen, wegen der relativ niedrigen Sitzhöhe sind die Personen trotz geschlossener Fenster und Türen erheblich gefährdet und daher vorrangig durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen. Der Arbeitsplatz der Fahrer der Flurförderzeuge ist gegenüber der Sitzposition der PKW erhöht, dafür allerdings gegenüber der Atmosphäre ungeschützt. Die Fahrer dürfen ihren Arbeitsplatz keinesfalls verlassen, es sei denn, Sie verfügen über eine auch für diese Konzentrationen wirksame persönliche Schutzausrüstung. Andernfalls sind auch Sie von außen durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung aus dem Gefahrenbereich zu verbringen.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, führt bereits der erste Atemzug bei Konzentrationen oberhalb von 10 Vol.-% zu Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung.

Konservativ wird für die Berechnungen eine Konzentration von 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> (163,8 g/m<sup>3</sup>) für diese Wirkung angenommen, um Fehler, die durch die modellhafte Betrachtung im Simulationsprogramm auftreten könnten, abzufangen. Konzentrationen oberhalb 9 Vol.-% CO<sub>2</sub> werden im Umkreis von 13 m um die Freisetzungsstelle erreicht. Die Freisetzung kann bei einer sich dort ungeschützt aufhaltenden Person schon beim ersten Atemzug zu Bewusstlosigkeit führen. Daher ist das Verlassen dieses Bereichs ohne fremde Hilfe nicht unter allen Umständen möglich. Die Rettung dieser Personen darf wegen der wesentlich höheren Konzentrationen auf Erdgleiche nur unter Beachtung der entsprechenden Sicherheitsvorschriften sowie durch Einsatzkräfte mit Fremdbeatmung erfolgen. Die spontane Freisetzung erfolgt unter starker Geräusentwicklung und der weithin sichtbaren Ablagerung von Kohlsäureschnee. Wegen der Belegung der Hoffläche mit Arbeitsmitteln sowie der umgebenden betriebseigenen Bebauung ist eine direkte Zuordnung zum tatsächlichen Ereignis nicht von allen Punkten des Betriebsbereichs möglich. In diesem Bereich (13 m um die Freisetzungsstelle) befinden sich ständig besetzte Arbeitsplätze (Werkstätten und Büros). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Relevante Konzentrationen im Bereich des TEEL-2-Wertes (30.000 ppm) werden in Bodennähe auf Atemhöhe in bis zu 15 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich ebenfalls ständige Arbeitsplätze (Werkstätten und Büros). Sich im Inneren von Gebäuden aufhaltende Personen können durch die Raumlüftung gegenüber gefährlichen Konzentrationen exponiert werden. Im Gegensatz zum Aufenthalt im Freigelände steigen die Konzentrationen in Räumen allerdings nur langsam an. Eine Entfernung über rückwärtige Teile der Gebäude über ausgeschilderte Flucht- und Rettungswege ist daher – auch unter Nutzung der persönlichen Schutzausrüstung – im Regelfall noch möglich, wenn das Ereignis eindeutig zugeordnet werden kann und die für diesen Fall vorliegenden Arbeitsanweisungen angewendet werden.

Der AGW wird in einem Bereich von 340 m um die Freisetzungsstelle überschritten. In diesem Bereich befinden sich kurzzeitige und ständige Arbeitsplätze (Produktion, Büros und Verladung). Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach der

spontanen Freisetzung sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW um Größenordnungen unterschritten wird.

Außerhalb des Betriebsgeländes wird der AGW überschritten. Dieser Schichtmittelwert ist für eine Beurteilungszeit von 8 Stunden ausgelegt und wird hier nur als untere Grenze einer möglichen Beeinträchtigung angegeben. Nach der spontanen Freisetzung sinkt die Konzentration sehr schnell ab, so dass der Beurteilungszeitraum für den AGW um Größenordnungen unterschritten wird.

#### **4.7 Zusammenfassende Bewertung der betrachteten Szenarien**

Bei der Auswertung des Schadensausmaßes für die unterschiedlichen Szenarien lassen sich folgende allgemeine Schlussfolgerungen ziehen.

1. Bei den im Freien aufgestellten CO<sub>2</sub>-Behältern (Abfüllbetriebe und Getränkehersteller) stellt das Spontanversagen des Behälters, mit dem Freisetzen des gesamten Behälterinhaltes in einer kurzen Zeitspanne, das abdeckende Ereignis dar. Spontanes Behälterversagen ist ein sehr selten auftretendes Ereignis. Aus Datenbanken, die die Eintrittshäufigkeit solch katastrophaler Ereignisse listen und bewerten, können Werte von  $1 \times 10^{-5}/a$  als Richtwert entnommen werden. Lediglich in Fällen, in denen Schutzobjekte sich im Nahfeld der Ausbreitung befinden, ist mit signifikanten Auswirkungen bezüglich Ausfall von Verbrennungsmotoren, Bewusstlosigkeit oder irreversiblen Folgen zu rechnen. Insgesamt sind die hier betrachteten Ereignisse vom Szenarienablauf her als beherrschbar anzusehen, insbesondere, was die häufiger eintretenden Szenarien mit Leckbildung angeht.
2. Bei den an CO<sub>2</sub>-Löschanlagen (Produktions- und Lagerbetriebe) untersuchten Szenarien sind wegen der Einhausung der Behälter (Wände meist Beton, Dach aus Trapezblech oder Beton) die Szenarien mit Leckbildung von ihren Auswirkungen her auf den Nahbereich der Austrittsstelle begrenzt. Wegen der betrieblichen Störfallvorsorge (Schulung von Mitarbeitern, PSA, Arbeitsanweisungen, Alarmer) sind die Auswirkungen dieser Ereignisse als gering anzusehen.
3. Die beiden anderen untersuchten Szenarien (Fehlauslösung und Freisetzung nach ordnungsgemäßer Auslösung) setzen beide das Vorliegen einer Fehlerkette von mindestens zwei voneinander unabhängigen Fehlern voraus. Dies senkt die Eintrittshäufigkeit für ein solches Ereignis erheblich ab. Solange Schwergasverhalten unterstellt werden kann, bleiben die Ereignisse im Wesentlichen auf den Betriebsbereich begrenzt, es sei denn, Schutzobjekte außerhalb des Betriebsbereichs befinden sich in unmittelbarer Nähe. Die Auswirkungen sind vom Schweregrad her jedoch im Allgemeinen höher einzustufen als für im Freien aufgestellte Behälter. Insgesamt sind aufgrund der betrieblich bereits getroffenen Maßnahmen diese Ereignisse im Wesentlichen als beherrschbar anzusehen.
4. Muss bei einem Ereignis Neutralgasverhalten angenommen werden, treten sehr weit reichende Auswirkungen mit hohen Konzentrationen selbst noch im Fernfeld auf. Wegen der durch die Ausbreitungsgeschwindigkeit begrenzten Zeit von wenigen Minuten sind

die üblichen Alarmierungsmaßnahmen und ausbreitungsbegrenzenden Gegenmaßnahmen für einen Großteil der Betroffenen aller Wahrscheinlichkeit nach nicht erfolgreich, so dass mindestens mit irreversiblen Schädigungen, wahrscheinlich aber auch – insbesondere bei länger andauernder Exposition – von Todesopfern auszugehen ist. Daher sind insbesondere für diese Fälle (Brandereignis und Freisetzung nach ordnungsgemäßer Auslösung) besondere Vorkehrungen beim Lüften bzw. Entrauchen der beaufschlagten Brandabschnitte zu treffen. Insbesondere ist darauf zu achten, dass ein unbeabsichtigtes Öffnen bzw. das Offenstehen eines Tores zu einem beaufschlagten Brandabschnitt die sofortige Alarmierung und Evakuierung der Bevölkerung und Mitarbeiter in den windabwärts gelegenen Sektoren zur Folge haben muss.

## 5. Physikalische und toxikologische Daten zu Kohlendioxid

### 5.1 Physikalische Daten

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Aggregatzustand:      | gasförmig (bei 1.013 mbar/ 20 °C)  |
| Farbe:                | farblos  |
| Geruch:               | geruchlos/ schwach sauer   |
| Molmasse:             | 44,01 g/mol  |
| Umrechnungsfaktor:    | 1 ml/m <sup>3</sup> = 1,83 mg/m <sup>3</sup> (bei 1.013 mbar/ 20 °C)                                     |
| Schmelzpunkt:         | -56,57 °C  |
| Siedepunkt:           | kein Siedepunkt bei Normaldruck  |
| Gasdichte:            | 1,9767 kg/m <sup>3</sup> (bei 1.013 mbar/ 0 °C)<br>1,8474 kg/m <sup>3</sup> (bei 1 bar/ 15 °C)           |
| Rel. Gasdichte:       | 1,5289 kg/m <sup>3</sup> (Dichteverhältnis zu trockener Luft bei gleicher Temperatur und gleichem Druck) |
| Dampfdruck:           | 57,258 bar (bei 20 °C)<br>72,1 bar (bei 30 °C)   |
| Kritische Temperatur: | 31,0 °C  |
| Kritischer Druck:     | 73,7 bar   |
| Kritische Dichte:     | 0,4676 kg/l  |
| Tripelpunkt:          | -56,57 °C/ 5,185 bar   |
| Sublimationspunkt:    | -78,5 °C bei Normaldruck   |
| Quelle:               | BIA GESTIS Stoffdatenbank  |

## **5.2 Gesundheitsschädliche Wirkung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)**

### **5.2.1 Aufnahme über die Atemwege**

Die Resorptionsrate ist abhängig von der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Inspirationsluft. Das endogen entstandene CO<sub>2</sub>, das durch das Blut in die Lunge transportiert wird, bewirkt normalerweise eine Beladung der Expirationsluft mit etwa 4 % CO<sub>2</sub>. Übersteigt nun die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Inspirationsluft den Normalwert von ca. 0,035 %, wird zunächst die Abgabe des endogenen CO<sub>2</sub> aus der Lunge vermindert. Bei weiterer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Inspirationsluft - auf 4 % - findet kein Austausch mehr statt. Wird die 4 %-Grenze überschritten, kommt es zu einer zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Aufnahme aus der Inspirationsluft ins Blut.

Quelle: BIA GESTIS Stoffdatenbank

### **5.2.2 Hauptwirkweisen**

- Akute Wirkung auf Atemzentrum, Stoffwechsel, Herz-/ Kreislauf- und Zentralnervensystem
- Chronische Wirkung auf Zentralnervensystem und Herz-/ Kreislaufsystem

Eine permanente Einatmung über Tage und Wochen auch wesentlich unter dem AGW von 5.000 ml/m<sup>3</sup> (= 9.100 mg/m<sup>3</sup>) liegender Kohlendioxid-Konzentrationen führt zu einer Vermehrung der harten Knochensubstanz, indem CO<sub>2</sub> als Carbonat abgelagert wird. Dies kann in Raumfähren und Unterseebooten zum Problem werden.

Quelle: BIA GESTIS Stoffdatenbank

#### **5.2.2.1 Akute Toxizität**

CO<sub>2</sub> selbst hat keine spezifisch toxische Wirkung; die stets inhalativ entstandenen Vergiftungserscheinungen durch Kohlendioxid sind vorwiegend Folgen mangelhaften Sauerstoffangebots. Da bei CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über 20 Vol.-% die Erstickung einen "apoplektiformen Verlauf" nimmt, d. h. der Betroffene wie vom Schlag getroffen plötzlich bewusstlos zusammenbricht und der Tod bereits nach 5 – 10 Minuten eintritt, ist rasche Hilfeleistung (unter Selbstschutz) unbedingt erforderlich. Bei rechtzeitiger Frischluftzufuhr erfolgt oft schnelle Erholung.

Die Inhalation von 0,1 Vol.-% CO<sub>2</sub> hat bei empfindlichen Personen, die sich in geschlossenen, künstlich klimatisierten Räumen aufhielten, bereits zu Kopfdruck und Kopfschmerzen geführt. Kritische Wirkung bei inhalativer Kurzzeitexposition ist jedoch die Azidose, die bei körperlich mäßig belasteten Freiwilligen deutlich wurde, wenn sie 30 Min. lang gegenüber 1 Vol.-% CO<sub>2</sub> (10.000 ppm) exponiert waren. Diese Konzentration wird aber bei fehlender körperlicher Belastung vom gesunden Erwachsenen noch kompensiert (d.h.: der pH-Wert fiel nur von 7,4 auf 7,37). 2 Vol.-% in der Inspirationsluft erhöhen die Atemfrequenz und das Atemzugvolumen, bei 4 - 6 Vol.-% CO<sub>2</sub> (keine Angabe der Expositionsdauer) werden Kopfschmerzen, Ohrensausen (Tinnitus), Herzklopfen, Blutdruckanstieg, psychische Erregung (wie im Exzitationsstadium der Narkose) sowie Schwindel und Benommenheit beobachtet.

In weiteren, besser dokumentierten Untersuchungen an Freiwilligen wurden jeweils nur bestimmte Symptome beobachtet bzw. Parameter gemessen, von denen die folgenden besonders interessant sind:

- 5 Vol.-%/ 30 min: starke Aktivierung der Durchblutung der Nieren und des Gehirns;
- 6 Vol.-%/ 6 – 8 min: EKG-Veränderungen (stärker ausgeprägt bei älteren Personen > 60 Jahre);
- ab 10 Vol.-%/ 1,5 – 7 min: starke Aktivierung der Herztätigkeit, Kopfschmerz, Schwindel, erweiterte Pupillen, muskuläre Schüttelkrämpfe;
- ab 10 Vol.-%/ 10 – 20 min: Atemnot, Bewusstlosigkeit und ggf. Tod durch Erstickung;
- 20 – 30 Vol.-%/ ca. 1 min: Narkose, Bewusstlosigkeit, Krämpfe, EEG- und EKG-Veränderungen und erhebliche Augenschäden (retinale Degeneration).

Andererseits wurde berichtet, dass Konzentrationen von 10 Vol.-% von einigen Personen bis zu 1 h ohne offensichtliche Gefährdung toleriert worden sein sollen. Verschiedene Todesfälle sind vorgekommen, insbesondere nachdem Kessel, Gruben, Brunnen oder andere Räume betreten wurden, in denen sich CO<sub>2</sub> aufgrund seiner hohen spezifischen Dichte (im Vergleich zur Luft) angesammelt hatte. Bei der Autopsie wurden hauptsächlich Veränderungen an den Augen (Retina) und im Gehirn gefunden.

Orale Vergiftungen mit CO<sub>2</sub> sind erwartungsgemäß nicht beschrieben.

Quelle: BIA GESTIS Stoffdatenbank

#### 5.2.2.2 Reproduktionstoxizität

Negative Erfahrungen bezüglich der Exposition schwangerer Frauen gegenüber moderat erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen liegen offenbar nicht vor. Dies wurde auch mit einer metabolisch bedingten, günstigen physiologischen Situation Schwangerer plausibel begründet. Um den CO<sub>2</sub>-Druck im Fötus auf einem für ihn ungefährlichen Niveau zu halten, wurde empfohlen, die Exposition Schwangerer unter allen Umständen unter 0,5 Vol.-% zu halten.

In den wenigen verfügbaren reproduktionstoxikologischen Experimenten an Ratten fand man reversible Beeinflussungen der männlichen Fertilität und eine erhöhte Inzidenz teratogener Effekte gegenüber einer Kontrollgruppe nur bei für den Menschen unrealistisch hohen Konzentrationen.

Quelle: BIA GESTIS Stoffdatenbank

#### 5.2.2.3 Mutagenität

Es sind keine Angaben verfügbar.

Quelle: BIA GESTIS Stoffdatenbank

#### 5.2.2.4 Kanzerogenität

Es sind keine Angaben verfügbar.

Quelle: BIA GESTIS Stoffdatenbank

### **5.3 Gefahren und Grenzwerte durch Sauerstoffmangel (Erstickung)**

Kohlendioxid ist schwerer als Luft, so dass der für Menschen lebensnotwendige Sauerstoff verdrängt wird. Ist die Atmosphäre mit inerten, reaktionsträgen Gasen wie Kohlendioxid angereichert, so führt der dadurch entstehende Sauerstoffmangel zur Erstickungsgefahr. Kohlendioxid ist farb- sowie geruchslos und verursacht keine spürbare Atemnot. Es kann durch die menschlichen Sinne nicht wahrgenommen werden.

Der normale Anteil an Sauerstoff in der Atemluft beträgt 21 Vol.-%. Jede Reduzierung unter 21 Vol.-% Sauerstoff ist als Gefährdung anzusehen. Atmen Menschen sauerstoffreduzierte Atmosphäre ein, kann dies ohne Vorwarnung, wie z.B. Schwindelgefühl, zur unmittelbaren Bewusstlosigkeit und zum Tod durch Erstickten führen. Ein Sauerstoffgehalt unter 18 Vol.-% führt bereits zu subjektiven Fehleinschätzungen der akuten Gefahr, unter 10 Vol.-% zu bleibenden Gehirnschäden und nach wenigen Minuten zum Tod.

Nachstehend sind die verschiedenen Auswirkungen aufgeführt, die bei Sauerstoffmangel eintreten:

| <b>O<sub>2</sub>-Konzentration<br/>(Vol.-%)</b> | <b>Folgen und Symptome</b>  |
|---|---|
| 18 - 21   | Betroffene können keine erkennbaren Symptome feststellen.   |
| 11 - 18   | Es sind körperliche und geistige Leistungsfähigkeiten beeinträchtigt, ohne dass der Betroffene dies bemerkt.  |
| 8 – 11  | Mögliche Ohnmacht innerhalb weniger Minuten ohne Vorwarnung. Unter 11 Vol.-% O <sub>2</sub> tödliches Risiko. |
| 6 – 8   | Ohnmacht nach kurzer Zeit.<br>Bei sofortiger Durchführung Wiederbelebung möglich.                             |
| 0 – 6   | Unmittelbare Ohnmacht.<br>Auch bei sofortiger Rettung bleibende Hirnschäden.                                  |

Bei 0 % Sauerstoffgehalt bewirkt bereits der zweite Atemzug ohne Vorwarnung den Verlust des Bewusstseins. Innerhalb weniger Minuten erfolgt die irreversible Schädigung des Gehirns.

Bei zunehmendem Sauerstoffmangel nimmt der Sauerstoffgehalt im Blut ab. Bei einer O<sub>2</sub>-Konzentration < 18 Vol.-% zeigen sich Erstickungs-Symptome wie Schwindel, Kopfweg, Sprachstörung, Verminderung und Verlust des Bewusstseins, Wahrnehmungstrübung und Verlust der Motorikkontrolle. Da diese Symptome denjenigen bei Unwohlsein ähneln (inerte Gase wie Kohlendioxid sind geruchlos, farblos, geschmacklos), werden sie vom Opfer nicht als Erstickung wahrgenommen.

Bei längerem Aufenthalt in sauerstoffreduzierter Atmosphäre können als Erstickungs-symptome starkes Atmen und Kurzatmigkeit, starke Ermüdung sowie Übelkeit und Erbrechen auftreten.

Quelle: Industriegaseverband

## **5.4 Toxikologische Grenzwerte für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)**

### **5.4.1 TRGS 900 – Arbeitsplatzgrenzwert (AGW)**

Grenzwert: 5.000 ml/m<sup>3</sup>

9.100 mg/m<sup>3</sup>

Begrenzung von Expositionsspitzen:

Überschreitungsfaktor 2

Dauer 15 min, Mittelwert; 4 mal pro Schicht; Abstand 1 h

Erläuterung: Arbeitsplatzgrenzwert ehemals auch als MAK-Wert bezeichnet; Empfehlungen der MAK-Kommission. TRGS - technische Regeln für Gefahrstoffe. Die Angaben sind wissenschaftliche Empfehlungen und kein geltendes Recht.

Quelle: RL 2006/15/EG

Arbeitsplatz-Richtgrenzwert der Europäischen Gemeinschaft

### **5.4.2 ACGIH / TLV-TWA (USA)**

Grenzwert: 5.000 ppm

Erläuterung: Schichtmittelwert; Der vorliegende TLV-Wert (Threshold Limit Values) bezeichnet den TLV-TWA-Wert (Time Weighted Average), der als zeitgewichteter Mittelwert für einen normalen 8-stündigen Arbeitstag und eine Wochenarbeitszeit von 40 Stunden definiert ist und somit dem deutschen AGW in ppm entspricht.

Quelle: ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) Threshold Limit Values for Chemical Substances 2006

### **5.4.3 ACGIH / STEL-TWA (USA)**

Grenzwert: 30.000 ppm

Erläuterung: Schichtmittelwert; Der vorliegende TLV-Wert (Threshold Limit Values) bezeichnet den TLV-STEL-Wert (Short Term Exposure Limit) und ist die maximal zulässige Arbeitsplatzkonzentration, der ein Arbeiter für eine Zeit

bis zu 15 Minuten dauernd ausgesetzt sein kann, ohne dass Reizerscheinungen, chronische oder irreversible Gewebeveränderungen oder Benommenheit (Narkose) auftreten, welche ausreichen, um die Unfallträchtigkeit zu erhöhen, eine Selbstrettung zu verhindern oder wesentlich die Arbeitsleistung zu reduzieren. Der STEL ist als Höchstwert zu betrachten, der zu keinem Zeitpunkt innerhalb der 15-minütigen Expositionszeit überschritten werden darf.

Quelle: ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) Threshold Limit Values for Chemical Substances 2006

#### **5.4.4 IDLH-Wert**

Grenzwert: 40.000 ppm

Erläuterung: IDLH = Immediately Dangerous to Life or Health (USA).

Der IDLH-Wert ist die Konzentration eines Stoffes in Luft, bei der sich ein Arbeitnehmer bei Ausfall eines Atemschutzgerätes innerhalb von 30 Minuten aus der Expositionszone entfernen kann, ohne dass diese Flucht behindert wird oder dass Gesundheitsschäden eintreten.

Quelle: IDLH-Werte (revised) des NIOSH (USA), Stand 2004

#### **5.4.5 VFDB-Wert**

Grenzwert: 10.000 ppm

Erläuterung: Einsatztoleranzwert (VFDB = Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V.).

Die Einsatztoleranzwerte sind so festgesetzt worden, dass unterhalb des Einsatztoleranzwertes die Leistungsfähigkeit von Einsatzkräften ohne Atemschutz bei etwa 4-stündiger Exposition während eines Einsatzes und in der Folgezeit nicht beeinträchtigt wird.

Quelle: VFDB 10/01 Bewertung von Schadstoffkonzentrationen im Feuerwehreinsatz, 7/2005.

Die Werte entstammen einem Entwurf zur VFDB -Richtlinie 10/01 vom Juni 1992.

#### **5.4.6 TEEL-0-Wert**

Grenzwert: 5.000 ppm

Erläuterung: Vom amerikanischen Department of Energy in Auftrag gegebene Werte. Der TEEL-0-Wert (Temporary Emergency Exposure Limit) bezeichnet die Grenzkonzentration, unterhalb der die meisten Menschen kein schätzbares Risiko für ihre Gesundheit eingehen.

Dauer: TEEL-Werte basieren auf 60 Minuten-Werten (z.B. AEGL, ERPG)

Quelle: Protective Action Criteria (PAC) with AEGLs, ERPGs, & TEELs: Rev. 25 for Chemicals of Concern, U.S. Department of Energy, Office of Health, Safety and Security, 08/2009.

#### **5.4.7 TEEL-1-Wert**

Grenzwert: 30.000 ppm

Erläuterung: Vom amerikanischen Department of Energy in Auftrag gegebene Werte. Der TEEL-1-Wert (Temporary Emergency Exposure Limit) bezeichnet die maximale Konzentration in der Luft, von der angenommen wird, dass ihr fast alle Menschen ausgesetzt werden können, ohne dass sie mehr als nur leichte kurzlebige Beeinträchtigungen der Gesundheit erfahren oder einen klar definierten unangenehmen Geruch wahrnehmen. Der dreifache TLV-TWA-Wert kann als vorläufiger TEEL-1-Wert verwendet werden.

Dauer: TEEL-Werte basieren auf 60 Minuten-Werten (z.B. AEGL, ERPG)

Quelle: Protective Action Criteria (PAC) with AEGLs, ERPGs, & TEELs: Rev. 25 for Chemicals of Concern, U.S. Department of Energy, Office of Health, Safety and Security, 08/2009.

#### **5.4.8 TEEL-2-Wert**

Grenzwert: 30.000 ppm

Erläuterung: Vom amerikanischen Department of Energy in Auftrag gegebene Werte. Der TEEL-2-Wert (Temporary Emergency Exposure Limit) bezeichnet die

maximale Konzentration in der Luft, von der angenommen wird, dass ihr fast alle Menschen ausgesetzt werden können, ohne dass sie irreversible oder andere schwerwiegende Beeinträchtigungen der Gesundheit erfahren oder entwickeln oder Symptome zeigen, die sie daran hindern, Schutzmaßnahmen zu ergreifen. Der fünffache TLV-TWA-Wert kann als vorläufiger TEEL-2-Wert verwendet werden.

Dauer: TEEL-Werte basieren auf 60 Minuten-Werten (z.B. AEGL, ERPG)

Quelle: Protective Action Criteria (PAC) with AEGLs, ERPGs, & TEELs: Rev. 25 for Chemicals of Concern, U.S. Department of Energy, Office of Health, Safety and Security, 08/2009.

#### **5.4.9 TEEL-3-Wert**

Grenzwert: 40.000 ppm

Erläuterung: Vom amerikanischen Department of Energy in Auftrag gegebene Werte. Der TEEL-3-Wert (Temporary Emergency Exposure Limit) bezeichnet die maximale Konzentration in der Luft, von der angenommen wird, dass ihr fast alle Menschen ausgesetzt werden können, ohne dass sie lebensbedrohliche Beeinträchtigungen der Gesundheit erfahren oder entwickeln. Als Grenzwert wird hier 500 mg/m<sup>3</sup> für Aerosole angenommen.

Dauer: TEEL-Werte basieren auf 60 Minuten-Werten (z.B. AEGL, ERPG)

Quelle: Protective Action Criteria (PAC) with AEGLs, ERPGs, & TEELs: Rev. 25 for Chemicals of Concern, U.S. Department of Energy, Office of Health, Safety and Security, 08/2009.

## 5.5 Sonstige Grenzwerte für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)

### 5.5.1 Richtwerte für die Innenraumluft

| Wert   | Bemerkung   | Quelle   |
|--------|---|--|
| 0,15 % | Hygienischer Innenraumluftrichtwert für Räume mit raumluftechnischen Anlagen, in denen eine sitzende oder leichte Tätigkeit ausgeübt wird | Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit 3/2006 |
| 0,1 %  | Oberer Grenzwert für eine ausreichende Durchlüftung von Arbeitsräumen mit raumluftechnischen Anlagen                                      | Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit 3/2006 |

Quelle: IGS Stoffliste

### 5.5.2 Internationale Grenzwerte

|                   | 8 Stunden-Grenzwert |                     | Kurzzeit-Grenzwert   |                      |
|-------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
|                   | ppm                 | mg/m <sup>3</sup>   | ppm                  | mg/m <sup>3</sup>    |
| Österreich        | 5.000 <sup>4)</sup> | 9.000 <sup>4)</sup> |                      |                      |
| Belgien           | 5.000 <sup>4)</sup> | 9.131 <sup>4)</sup> | 30.000 <sup>4)</sup> | 54.784 <sup>4)</sup> |
| Europäische Union | 5.000 <sup>1)</sup> | 9.000 <sup>1)</sup> |                      |                      |
| Deutschland       | 5.000 <sup>2)</sup> | 9.100 <sup>2)</sup> | 10.000 <sup>1)</sup> | 18.200 <sup>4)</sup> |
| Schweiz           | 5.000 <sup>4)</sup> | 9.000 <sup>4)</sup> |                      |                      |
| USA               | 5.000 <sup>1)</sup> | 9.000 <sup>1)</sup> |                      |                      |
| Großbritannien    | 5.000 <sup>1)</sup> | 9.150 <sup>1)</sup> | 15.000 <sup>1)</sup> | 27.400 <sup>1)</sup> |

Quellen:

<sup>1)</sup> IGS Stoffliste

<sup>2)</sup> TRGS 900

<sup>3)</sup> BIA GESTIS Stoffdatenbank

<sup>4)</sup> versch. EG-Sicherheitsdatenblätter

## 6. Empfehlung ergänzender Maßnahmen zur Gefahrenabwehr

### 6.1 Fall 1 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Produktionsbetrieb

#### 6.1.1 Maßnahmen zur Gefahrenabwehr

Folgende Maßnahmen zur Gefahrenabwehr werden empfohlen:

a) Allgemein:

- Installation eines Windrichtungsanzeigers zur Ermöglichung einer ungefährdeten Flucht aus dem Freisetzungsbereich,
- Festlegung einer an die Anforderungen angepassten Mengenbegrenzung der Löschmittelzugabe und
- diversitäre Stromversorgung für die Antriebe der Rolltore (USV, Notstromaggregate).

b) Leckagen:

- Verlegung der Ansaugöffnungen der technischen Lüftung zur Verhinderung relevanter Konzentrationen im Gebäude,
- Alarmierung des CO<sub>2</sub>-Austritts mittels Überwachung des Füllstandes des CO<sub>2</sub>-Vorrattanks oder Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Lagerraum zur Erkennung eines Austritts, jeweils zusätzlich mit optischer Alarmierung an der Außenseite des Eingangs zum Lagerraum und
- Erstellung einer Arbeitsanweisung zur Vorgehensweise bei Alarmierung (u. a. Regelungen zum Betreten des Lagerraums, Ausrüstung der Mitarbeiter, ggf. Zugangsbeschränkungen).

c) Bei Fehlauflösung:

- Nach Feststellung der Fehlauflösung in Absprache mit der Feuerwehr ggf. Hauptventile schließen, um ein weiteres Ausströmen zu verhindern,
- Sicherstellung des ordnungsgemäßen Verschlusses des Brandabschnitts zur Verhinderung einer weitreichenden Freisetzung und

- Aufgrund des festgestellten Schadensausmaßes bei einer unsachgemäßen Lüftung sollte der Flucht- und Rettungswegeplan überarbeitet werden (liegt der Sammelpunkt ggf. im Gefahrenbereich?).

d) Nach ordnungsgemäßer Auslösung:

- Aufgrund des festgestellten Schadensausmaßes (mindestens S3 der SIL-Klassifizierung nach VDI/VDE 2180 Blatt 1) bei deterministisch unterstelltem geöffnetem Tor ist zwingend die Sicherstellung des Schließens (mit Verzögerung zur Evakuierung des Brandabschnitts) erforderlich, z. B. durch diversitäre und redundante MSR-Einrichtungen oder durch geeigneten Schließmechanismus.
- Wegen des Schadensausmaßes (s. o.) ist die Lüftung bzw. Entrauchung über einen längeren Zeitraum auszudehnen, so dass der Emissionsmassenstrom an CO<sub>2</sub> signifikant abgesenkt wird.
- Zur Begrenzung des Schadensausmaßes Verriegelung des Verschlussmechanismus gegen ein Hydroschild ausreichender Wasserleistung, der über eine entsprechend klassifizierte PLT-Schutzeinrichtung geschaltet wird.
- Aufgrund des festgestellten Schadensausmaßes bei einer unsachgemäßen Entrauchung sollte der Flucht- und Rettungswegeplan überarbeitet werden (liegt der Sammelpunkt ggf. im Gefahrenbereich?).

### **6.1.2 Verhalten bei Leckage**

- a) Bei einer Alarmierung wegen einer Leckage müssen die Mitarbeiter das Gebäude in Richtung Osten (Bahnlinie) verlassen,
- b) die Leckage muss behoben werden,
- c) eine Wärmezufuhr, die auf den Kohlendioxidnebel einwirken kann, muss verhindert werden,
- d) der Kohlendioxidnebel muss in Absprache mit der Feuerwehr an einen gesicherten, gut gelüfteten Ort verbracht werden, um dort kontrolliert abzukühlen.

Der Ausschluss zusätzlicher Wärmezufuhr, die über die latente Wärme von Begrenzungen (Mauern und Boden sowie der Umgebungsluft) hinausgeht, führt dazu, dass die

Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 signifikant geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

### **6.1.3 Verhalten bei Fehlauflösung**

Bei einer Fehlauflösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage sind die betriebseigenen Vorschriften/ Konzepte (AGAP) zu beachten. Ein Verlassen des Gefahrenbereichs bei unsachgemäßem Belüften des Brandabschnitts muss unter Beachtung der Windrichtung stattfinden.

Auslösung und Beachtung der im AGAP festgelegten Meldekette und Information der Bevölkerung.

Die Verhinderung einer unkontrollierten Freisetzung führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

### **6.1.4 Verhalten bei ordnungsgemäßer Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage**

Bei ordnungsgemäßer Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage sind die betriebseigenen Vorschriften/ Konzepte (AGAP) zu beachten. Ein Verlassen des Gefahrenbereichs bei unsachgemäßem Belüften des Brandabschnitts muss unter Beachtung der Windrichtung stattfinden.

Auslösung und Beachtung der im AGAP festgelegten Meldekette und Information der Bevölkerung.

Auslösung von Großalarm mit anschließender Evakuierung der windabwärts gelegenen Sektoren. Beachtung der windabwärts gelegenen Zone, die unter Umständen nicht mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren befahren werden kann.

Die Verhinderung einer unkontrollierten Freisetzung führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 nicht weitaus höher ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

## **6.2 Fall 2 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich A**

### **6.2.1 Maßnahmen zur Gefahrenabwehr**

Folgende Maßnahmen zur Gefahrenabwehr werden empfohlen:

a) Allgemein:

- Installation eines Windrichtungsanzeigers zur Ermöglichung einer ungefährdeten Flucht aus dem Freisetzungsbereich,
- Festlegung einer an die Anforderungen angepassten Mengenbegrenzung der Löschmittelzugabe und
- diversitäre Stromversorgung für die Antriebe der Rolltore (USV, Notstromaggregate).

b) Leckagen:

- Erstellung einer Arbeitsanweisung zur Vorgehensweise bei Alarmierung (u. a. Regelungen zum Betreten des Lagerraums, des angrenzenden Treppenhauses und der angrenzenden Büroräume, Ausrüstung der Mitarbeiter, ggf. Zugangsbeschränkungen).

c) Bei Fehlauflösung:

- Nach Feststellung der Fehlauflösung in Absprache mit der Feuerwehr ggf. Hauptventile schließen, um ein weiteres Ausströmen zu verhindern,
- Sicherstellung des ordnungsgemäßen Verschlusses des Brandabschnitts zur Verhinderung einer weitreichenden Freisetzung und
- Aufgrund des festgestellten Schadensausmaßes bei einer unsachgemäßen Lüftung sollte der Flucht- und Rettungswegeplan überarbeitet werden (liegt der Sammelpunkt ggf. im Gefahrenbereich?).

d) Nach ordnungsgemäßer Auslösung:

- Aufgrund des festgestellten Schadensausmaßes (mindestens S3 der SIL-Klassifizierung nach VDI/VDE 2180 Blatt 1) bei deterministisch unterstelltem geöffnetem Tor ist zwingend die Sicherstellung des Schließens (mit Verzögerung zur Evakuierung des Brandabschnitts) erforderlich, z. B. durch diversitäre und redundante MSR-Einrichtungen oder durch geeigneten Schließmechanismus.
- Wegen des Schadensausmaßes (s. o.) ist die Lüftung bzw. Entrauchung über einen längeren Zeitraum auszudehnen, so dass der Emissionsmassenstrom an CO<sub>2</sub> signifikant abgesenkt wird.
- Zur Begrenzung des Schadensausmaßes Verriegelung des Verschlussmechanismus gegen ein Hydroschild ausreichender Wasserleistung, der über eine entsprechend klassifizierte PLT-Schutzeinrichtung geschaltet wird.
- Aufgrund des festgestellten Schadensausmaßes bei einer unsachgemäßen Entrauchung sollte der Flucht- und Rettungswegeplan überarbeitet werden (liegt der Sammelpunkt ggf. im Gefahrenbereich?).

### **6.2.2 Verhalten bei Leckage**

- a) Die Leckage muss behoben werden,
- b) ggf. Information der Nachbarbetriebe,
- c) eine Wärmezufuhr, die auf den Kohlendioxid einwirken kann, muss verhindert werden,
- d) der Kohlendioxid muss in Absprache mit der Feuerwehr an einen gesicherten, gut gelüfteten Ort verbracht werden, um dort kontrolliert abzukühlen.

Der Ausschluss zusätzlicher Wärmezufuhr, die über die latente Wärme von Begrenzungen (Mauern und Boden sowie der Umgebungsluft) hinausgeht, führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 signifikant geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

### **6.2.3 Verhalten bei Fehlauflösung**

Bei einer Fehlauflösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage sind die betriebseigenen Vorschriften/ Konzepte (AGAP) zu beachten. Ein Verlassen des Gefahrenbereichs bei unsachgemäßem Belüften des Brandabschnitts muss unter Beachtung der Windrichtung stattfinden.

Auslösung und Beachtung der im AGAP festgelegten Meldekette und Information der Nachbarbetriebe.

Der Ausschluss zusätzlicher Wärmezufuhr, die über die latente Wärme von Begrenzungen (Mauern und Boden sowie der Umgebungsluft) hinausgeht, führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 signifikant geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

### **6.2.4 Verhalten bei ordnungsgemäßer Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage**

Bei ordnungsgemäßer Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage sind die betriebseigenen Vorschriften/ Konzepte (AGAP) zu beachten. Ein Verlassen des Gefahrenbereichs bei unsachgemäßem Belüften des Brandabschnitts muss unter Beachtung der Windrichtung stattfinden.

Auslösung und Beachtung der im AGAP festgelegten Meldekette und Information der Bevölkerung.

Auslösung von Großalarm mit anschließender Evakuierung der windabwärts gelegenen Sektoren. Beachtung der windabwärts gelegenen Zone, die unter Umständen nicht mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren befahren werden kann sowie Sperrung der überregionalen Verkehrswege an den entsprechenden Zufahrten.

Die Verhinderung einer unkontrollierten Freisetzung führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 nicht weitaus höher ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

### **6.3 Fall 3 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich B**

#### **6.3.1 Maßnahmen zur Gefahrenabwehr**

Folgende Maßnahmen zur Gefahrenabwehr werden empfohlen:

a) Allgemein:

- Installation eines Windrichtungsanzeigers zur Ermöglichung einer ungefährdeten Flucht aus dem Freisetzungsbereich,
- Festlegung einer an die Anforderungen angepassten Mengenbegrenzung der Löschmittelzugabe und
- diversitäre Stromversorgung für die Antriebe der Rolltore (USV, Notstromaggregate).

b) Leckagen:

- Erstellung einer Arbeitsanweisung zur Vorgehensweise bei Alarmierung (u.a. Regelungen zum Betreten des Lagerraums und der Sprinklerzentrale, Ausrüstung der Mitarbeiter, ggf. Zugangsbeschränkungen).

c) Bei Fehlauflösung:

- Nach Feststellung der Fehlauflösung in Absprache mit der Feuerwehr ggf. Hauptventile schließen, um ein weiteres Ausströmen zu verhindern,
- Sicherstellung des ordnungsgemäßen Verschlusses des Brandabschnitts zur Verhinderung einer weitreichenden Freisetzung und
- Aufgrund des festgestellten Schadensausmaßes bei einer unsachgemäßen Lüftung sollte der Flucht- und Rettungswegeplan überarbeitet werden (liegt der Sammelpunkt ggf. im Gefahrenbereich?).

d) Nach ordnungsgemäßer Auslösung:

- Aufgrund des festgestellten Schadensausmaßes (mindestens S3 der SIL-Klassifizierung nach VDI/VDE 2180 Blatt 1) bei deterministisch unterstelltem geöffnetem Tor ist zwingend die Sicherstellung des Schließens (mit Verzögerung zur Evakuierung des Brandabschnitts) erforderlich, z. B. durch diversitäre und redundante MSR-Einrichtungen oder durch geeigneten Schließmechanismus.

- Wegen des Schadensausmaßes (s. o.) ist die Lüftung bzw. Entrauchung über einen längeren Zeitraum auszudehnen, so dass der Emissionsmassenstrom an CO<sub>2</sub> signifikant abgesenkt wird.
- Zur Begrenzung des Schadensausmaßes Verriegelung des Verschlussmechanismus gegen ein Hydroschild ausreichender Wasserleistung, der über eine entsprechend klassifizierte PLT-Schutzeinrichtung geschaltet wird.
- Aufgrund des festgestellten Schadensausmaßes bei einer unsachgemäßen Lüftung bzw. Entrauchung sollte der Flucht- und Rettungswegeplan überarbeitet werden (liegt der Sammelpunkt ggf. im Gefahrenbereich?).

### **6.3.2 Verhalten bei Leckage**

- a) Die Leckage muss behoben werden,
- b) ggf. Information der Nachbarschaft,
- c) eine Wärmezufuhr, die auf den Kohlendioxidnebel einwirken kann, muss verhindert werden,
- d) der Kohlendioxidnebel muss in Absprache mit der Feuerwehr an einen gesicherten, gut gelüfteten Ort verbracht werden, um dort kontrolliert abzukochen.

Der Ausschluss zusätzlicher Wärmezufuhr, die über die latente Wärme von Begrenzungen (Mauern und Boden sowie der Umgebungsluft) hinausgeht, führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 signifikant geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

### **6.3.3 Verhalten bei Fehlauflösung**

Bei einer Fehlauflösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage sind die betriebseigenen Vorschriften/ Konzepte (AGAP) zu beachten. Ein Verlassen des Gefahrenbereichs bei unsachgemäßem Belüften des Brandabschnitts muss unter Beachtung der Windrichtung stattfinden.

Auflösung und Beachtung der im AGAP festgelegten Meldekette und Information der Nachbarschaft.

Der Ausschluss zusätzlicher Wärmezufuhr, die über die latente Wärme von Begrenzungen (Mauern und Boden sowie der Umgebungsluft) hinausgeht, führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 signifikant geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

#### **6.3.4 Verhalten bei ordnungsgemäßem Auslösen der CO<sub>2</sub>-Löschanlage**

Bei ordnungsgemäßer Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage sind die betriebseigenen Vorschriften/ Konzepte (AGAP) zu beachten. Ein Verlassen des Gefahrenbereichs bei unsachgemäßem Belüften des Brandabschnitts muss unter Beachtung der Windrichtung stattfinden.

Auslösung und Beachtung der im AGAP festgelegten Meldekette und Information der Bevölkerung.

Auslösung von Großalarm mit anschließender Evakuierung der windabwärts gelegenen Sektoren. Beachtung der windabwärts gelegenen Zone, die unter Umständen nicht mit Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren befahren werden kann.

Die Verhinderung einer unkontrollierten Freisetzung führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 nicht höher ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

## **6.4 Fall 4 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb A**

### **6.4.1 Maßnahmen zur Gefahrenabwehr**

Folgende Maßnahmen zur Gefahrenabwehr werden empfohlen:

a) Allgemein:

- Installation eines Windrichtungsanzeigers zur Ermöglichung einer ungefährdeten Flucht aus dem Freisetzungsbereich und
- Erstellung einer Arbeitsanweisung, durch die gewährleistet wird, dass zu jeder Zeit – auch im Sommer – die Türen der Abfüllhalle geschlossen sind, ggf. in Kombination mit einem akustischen Signal nach einer festgelegten Toleranzzeit.

b) Leckagen:

- Alarmierung des CO<sub>2</sub>-Austritts mittels Überwachung des Füllstandes des CO<sub>2</sub>-Vorrattanks zur Erkennung eines Austritts, ohne z. B. das gesicherte Abfüllgebäude verlassen zu müssen.

c) Spontanversagen:

- Regelmäßige Prüfung der Wanddicken des Lagerbehälters.

### **6.4.2 Verhalten bei Leckage/ Spontanversagen**

- a) Die Mitarbeiter verlassen den Bereich der Freisetzung unter Beachtung der Windrichtung,
- b) im Wohnhaus befindliche Personen dürfen die Kellerräume nicht betreten, das Haus nicht in Richtung Abfüllhalle verlassen und müssen die höher gelegenen Stockwerke aufsuchen,
- c) die Zufahrtsstraße ist abzusperren,
- d) die Leckage muss behoben werden,
- e) eine Wärmezufuhr, die auf den Kohlendioxidschnee einwirken kann, soll – wenn möglich – durch Bedeckung mit Löschschaum (durch die Feuerwehr) begrenzt werden,

- f) der Kohlendioxidschnee soll in Absprache mit der Feuerwehr auf der Hoffläche verbleiben, um dort kontrolliert abzukondensieren.

Der weitgehende Ausschluss zusätzlicher Wärmezufuhr, die über die latente Wärme von Begrenzungen (Mauern und Boden sowie der Umgebungsluft) hinausgeht, führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 weitaus geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

## **6.5 Fall 5 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb B**

### **6.5.1 Maßnahmen zur Gefahrenabwehr**

Folgende Maßnahmen zur Gefahrenabwehr werden empfohlen:

a) Allgemein:

- Installation eines Windrichtungsanzeigers zur Ermöglichung einer ungefährdeten Flucht aus dem Freisetzungsbereich,
- Erstellung einer Arbeitsanweisung, durch die gewährleistet wird, dass zu jeder Zeit – auch im Sommer – die Türen der Abfüllhalle zur Hoffläche hin geschlossen sind, ggf. in Kombination mit einem akustischen Signal nach einer festgelegten Toleranzzeit.

b) Leckagen:

- Alarmierung des CO<sub>2</sub>-Austritts mittels Überwachung des Füllstandes des CO<sub>2</sub>-Vorrattanks zur Erkennung eines Austritts, ohne z. B. das gesicherte Abfüllgebäude verlassen zu müssen.

c) Spontanversagen:

- Regelmäßige Prüfung der Wanddicken des Lagerbehälters.

### **6.5.2 Verhalten bei Leckage**

- a) Die Mitarbeiter verlassen den Bereich der Freisetzung unter Beachtung der Windrichtung,
- b) Alarmierung der naheliegenden Eisenbahn sowie der umliegenden Betriebe (in Abhängigkeit von der Windrichtung),
- c) die Leckage muss behoben werden,
- d) eine Wärmezufuhr, die auf den Kohlensäureschnee einwirken kann, soll – wenn möglich – durch Bedeckung mit Löschschaum (durch die Feuerwehr) begrenzt werden,

- e) der Kohlendäureschnee muss in Absprache mit der Feuerwehr an einen gesicherten, gut gelüfteten Ort verbracht werden, um dort kontrolliert abzdampfen.

Der weitgehende Ausschluss zusätzlicher Wärmezufuhr (Beschatten, Bedecken mit Schaum), die über die latente Wärme von Begrenzungen (Mauern und Boden sowie der Umgebungsluft) hinausgeht, führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

### **6.5.3 Verhalten bei Spontanversagen**

- a) Die Mitarbeiter verlassen den Bereich der Freisetzung unter Beachtung der Windrichtung,
- b) Alarmierung der naheliegenden Versammlungsstätte, der Eisenbahn sowie der umliegenden Betriebe (in Abhängigkeit von der Windrichtung),
- c) eine Wärmezufuhr, die auf den Kohlendäureschnee einwirken kann, soll – wenn möglich – durch Bedeckung mit Löschschaum (durch die Feuerwehr) begrenzt werden,
- d) der Kohlendäureschnee muss in Absprache mit der Feuerwehr an einen gesicherten, gut gelüfteten Ort verbracht werden, um dort kontrolliert abzdampfen.

Der weitgehende Ausschluss zusätzlicher Wärmezufuhr (Beschatten, Bedecken mit Schaum), die über die latente Wärme von Begrenzungen (Mauern und Boden sowie der Umgebungsluft) hinausgeht, führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

## **6.6 Fall 6 - CO<sub>2</sub>-Einsatzbehälter in der Getränkeindustrie**

### **6.6.1 Maßnahmen zur Gefahrenabwehr**

Folgende Maßnahmen zur Gefahrenabwehr werden empfohlen:

a) Allgemein:

- Installation eines Windrichtungsanzeigers zur Ermöglichung einer ungefährdeten Flucht aus dem Freisetzungsbereich.

b) Leckagen:

- Alarmierung des CO<sub>2</sub>-Austritts mittels Überwachung des Füllstandes des CO<sub>2</sub>-Vorratstanks zur Erkennung eines Austritts, ohne z. B. das gesicherte Produktionsgebäude verlassen zu müssen,
- Installation eines alarmierenden Gaswarngerätes mit optischem Hinweis, das bei einer erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration im Außenbereich vor dem Betreten des Treppenhauses/ Wendeplatzes warnt, in Verbindung mit einer entsprechenden Betriebsanweisung, die das Aufsuchen eines Sammelplatzes beschreibt.

c) Spontanversagen:

- Regelmäßige Prüfung der Wanddicken des Lagerbehälters.

### **6.6.2 Verhalten bei Leckage/ Spontanversagen**

- a) Die Mitarbeiter verlassen den Bereich der Freisetzung unter Beachtung der Windrichtung,
- b) die Leckage muss behoben werden,
- c) eine Wärmezufuhr, die auf den Kohlendioxidschnee einwirken kann, soll – wenn möglich – durch Bedeckung mit Löschschaum (durch die Feuerwehr) begrenzt werden,
- d) der Kohlendioxidschnee soll in Absprache mit der Feuerwehr auf der Hoffläche verbleiben, um dort kontrolliert abzukühlen.

Der weitgehende Ausschluss zusätzlicher Wärmezufuhr (Beschatten, Bedecken mit Schaum), die über die latente Wärme von Begrenzungen (Mauern und Boden sowie der Umgebungsluft) hinausgeht, führt dazu, dass die Auswirkungen im Vergleich zum Ereignis in Mönchengladbach am 16.08.2008 weitaus geringer ausfallen und insbesondere weitreichende Gefährdungen vernünftigerweise auszuschließen sind.

## 7. Zusammenfassung wesentlicher Maßnahmen

Aus dem Ereignis von Mönchengladbach am 16. August 2008 und den Ausbreitungsrechnungen in diesem Bericht lassen sich einige wesentliche Maßnahmen ableiten, die sowohl bei bestehenden Anlagen als bei Neuanlagen berücksichtigt werden sollten. Erkenntnisse aus den CO<sub>2</sub>-Freisetzungen am 16. August 2008 in Mönchengladbach und am 21. August 2008 in Wuppertal sind schon in die Überarbeitung der VdS-Richtlinie 2093 eingeflossen [1].

### 7.1 Maßnahmen bei CO<sub>2</sub>-Lager- und Einsatzbehältern

Bei den CO<sub>2</sub>-Lager- und Einsatzbehältern in der Getränkeindustrie, in Abfüllbetrieben für Industriegase, etc. handelt es sich in aller Regel um stehende zylindrische Behälter, die im Freien neben einem Betriebsgebäude aufgestellt sind. Wegen der vielfältigen Verwendungszwecke (Nahrungsmittel, medizinischer Bereich usw.) wird das Kohlendioxid nicht odoriert.

Realistische Freisetzungsszenarien basieren auf kleineren Lecks in dem Bereich unter dem Behälter (Flansche, Armaturen, etc.) oder Leckagen bei unsachgemäßer Befüllung des Behälters. Solche Freisetzungen werden durch die Ausbreitungsrechnungen für das Szenario „Stutzenabriss DN10“ abgedeckt. Dies bedeutet, dass der Gefahrenradius um diese Behälter in den meisten Fällen realistischerweise nicht mehr als 15 – 20 m beträgt, wenn die folgenden Maßnahmen ergriffen werden:

- Betriebsgebäude in unmittelbarer Nähe von CO<sub>2</sub>-Lagerbehältern sollten im Hinblick auf das mögliche Eindringen einer CO<sub>2</sub>-Gaswolke überprüft werden und ggf. bauliche, technische und/oder organisatorische Maßnahmen bzgl. der Gebäudeöffnungen (Türen, Fenstern, Lüftungsöffnungen) erfolgen. Das Eindringen von CO<sub>2</sub> in größeren Mengen ist zu vermeiden, da es im Gebäudeinnern zum Aufkonzentrieren der Gaswolke kommen kann.
- Für den Bereich unterhalb von Lager- und Einsatzbehältern ist eine Überwachung durch Gassensoren zu empfehlen, da hier potentielle Leckstellen wie Flansche und Armaturen liegen. So könnte frühzeitig eine gefährliche Leckage des geruchlosen, nicht odorierten Kohlendioxids festgestellt und alarmiert werden.
- Wie die entsprechenden Szenarien in diesem Bericht darlegen, schlägt sich der größere Anteil des freigesetzten CO<sub>2</sub> als Schnee nieder. Da die Sublimation aus diesem CO<sub>2</sub>-

Reservoir durch entsprechenden Wärmeeintrag – Sonneneinstrahlung u. a. – zu einem deutlich größeren Gefahrenradius als dem oben angegebenen führen könnte, ist die Abschattung des Kohlendioxidschnees, z. B. durch Aufbringen von Löschschaum, geboten. Die Vorgehensweise sollte mit der zuständigen Feuerwehr abgestimmt und für die Notfallplanung in geeigneter Weise dokumentiert werden.

## **7.2 Maßnahmen bei CO<sub>2</sub>-Löschanlagen**

- Die Nachbarschaft eines Betriebes mit automatischer CO<sub>2</sub>-Löschanlage ist – soweit sie im möglichen Gefahrenbereich liegt – hinsichtlich der Löschanlage ausreichend zu informieren. Die Informationen sollten die Bedeutung von optischen und akustischen Alarmen in Verbindung mit der Löschanlage, den Geruch des Odorierungsmittels und das richtige Verhalten im Freisetzungsfall beinhalten. Bei Betrieben, die der Störfall-VO unterliegen, können diese Informationen in die gemäß §11 zu vermittelnden integriert werden; bei anderen Betrieben sollte analog §11 der Störfall-VO verfahren werden. Die Schulung des Betriebspersonals hinsichtlich der oben genannten Informationen ist obligatorisch.
- In den Räumlichkeiten zur Löschmittelbevorratung (CO<sub>2</sub>-Löschzentrale) herrscht meistens eine gewisse räumliche Enge; zudem ist in aller Regel nur ein Fluchtweg vorhanden. Aus Erwägungen des Arbeitsschutzes ist es daher geboten, in diesen Räumen eine Raumüberwachung mittels Gassensoren zu installieren.
- Die Ausbreitungsrechnungen zu den Szenarien „Fehlauflösung“ und „ordnungsgemäße Auflösung im Brandfall“ mit jeweils offenstehendem Rolltor zeigen, wie wichtig die Erreichung eines guten Verschlusszustandes des betroffenen Brandabschnitts vor der Flutung mit CO<sub>2</sub> ist. Das Abstellen von Lagergut und Fahrzeugen in den Torbereichen muss unterbunden werden; hierzu sind regelmäßige Unterweisungen des Personals erforderlich in Verbindung mit Hinweisen vor Ort, z. B. durch entsprechende Bodenmarkierungen. Das Blockieren von Türen und Toren in Offenstellung durch Keile o. ä. kann verhindert werden, indem die Installation zugelassener Feststelleinrichtungen, ggf. mit Schließfolgeregler vorgenommen wird. Insbesondere aber ist das Schließen großer Öffnungen sicherzustellen, vor allem eine gesicherte Stromversorgung (Notstrom) für Antriebe von Roll- oder Sektionaltoren ist vonnöten. Lüftungsöffnungen müssen - gekoppelt mit dem Brandalarm – automatisch geschlossen und Lüftungsventilatoren automatisch abgeschaltet werden.
- Die Odorierung wird aus Arbeitsschutzgründen bisher dann gefordert, wenn der Schutzbereich der CO<sub>2</sub>-Löschanlage tiefer gelegene Räume wie Keller oder

Maschinengruben beinhaltet (siehe unter Nr. 6.9 in [2]). Wie das Ereignis von Mönchengladbach aber auch die Ausbreitungsrechnungen in diesem Bericht zeigen, ist es sinnvoll, eine Odorierung durchgängig bei allen größeren CO<sub>2</sub>-Löschanlagen, d. h. zumindest bei den Niederdruckanlagen, vorzunehmen. Insbesondere sind hier auch die Topographie und die Anordnung von Gebäuden (Ausbildung von Häuserschluchten o. ä.) in der Umgebung zu berücksichtigen. Bei der Auswahl des Odorierungsmittels ist zu beachten, dass es in der angewendeten Konzentration nicht gesundheitsschädlich ist; im übrigen sollte es einen unangenehmen Geruch besitzen, der den Fluchtgedanken unterstützt.

- Die Aufschaltung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage auf eine ständig besetzte Stelle und die Information an die zuständige Feuerwehr über deren Vorhandensein werden in Kap. 1.8 der VdS-Richtlinie 2093 empfohlen [1]. Eine Informations- und Aufschaltungspflicht für größere CO<sub>2</sub>-Löschanlagen wird derzeit diskutiert.
- Bei dem Ereignis von Mönchengladbach kam es u. a. wegen der nur indirekten Zugänglichkeit des betroffenen Brandabschnittes zur Verschleppung von CO<sub>2</sub> in benachbarte Bereiche; das Öffnen eines Außentores des benachbarten Lagerbereiches und eine zweite Auslösung der CO<sub>2</sub>-Löschanlage führten letztlich zu einer massiven CO<sub>2</sub>-Freisetzung ins Freie [3]. Sinnvoll ist deshalb eine Gebäudekonzeption, die den Einsatzkräften der Feuerwehr einen direkten Zugang zu dem betroffenen Brandabschnitt für die Erkundung und Nachlöscharbeiten über Schlupf-, Flucht- und sonstige Türen, d. h. kleine Umschließungsöffnungen, gewährt. So müssen keine großen Tore geöffnet oder gar aufgebrochen werden, die dann im Notfall nicht mehr geschlossen werden können.
- Die erste Flutung einer CO<sub>2</sub>-Löschanlage dürfte bei Anrücken jedweder Feuerwehr im Gange oder schon erfolgt sein. Eine Eingriffsmöglichkeit in die Löschanlagensteuerung sollte der Einsatzleitung der Feuerwehr dahingehend gegeben sein, in Abhängigkeit vom Ergebnis der Lageerkundung ggf. eine CO<sub>2</sub>-Nachflutung reversibel blockieren zu können. Auch die Möglichkeit der Stummschaltung von Alarmhupen wäre zur Erleichterung der Kommunikation der Einsatzkräfte einem erfolgreichen Einsatz nur dienlich.
- Für die Notfallplanung ist eine Gefährdungsanalyse durchzuführen, in der alle innerhalb und außerhalb des Betriebsgeländes befindlichen Bereiche, in denen nach einer Freisetzung gefährliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auftreten können, ermittelt werden. Im Einsatzfall können dann auf Basis dieser Analyse Messungen durch die Einsatzkräfte durchgeführt werden, anhand derer der tatsächliche Gefahrenbereich verifiziert und ggf.

entsprechende Maßnahmen wie Warnung der Nachbarschaft, Sperrungen und Evakuierungen durchgeführt werden können.

- Das gemäß VdS 2093, Kap. 1.8 zu erstellende Konzept zur sachgerechten Lüftung des Löschbereiches nach einer Fehlauflösung bzw. Auslösung im Brandfall muss alle möglichen Gefahrenbereiche innerhalb und außerhalb des Betriebsgeländes berücksichtigen. In dem Konzept sind die erforderlichen Sicherheits- und Überwachungsmaßnahmen festzulegen. Das Lüftungskonzept muss die CO<sub>2</sub>-Menge, die Nachbarschaft und die Topographie der Umgebung berücksichtigen. Weiter muss es für verschiedene Witterungsverhältnisse, d. h. insbesondere Windgeschwindigkeiten, ausgearbeitet werden, um den Einsatzkräften entsprechende Hilfestellung geben zu können. Die Konzeption muss ein dosiertes Lüften über wieder verschließbare Öffnungen beinhalten, das begleitet wird von Konzentrationsmessungen unter Berücksichtigung der Windrichtung.
- Das Gesamtkonzept für die CO<sub>2</sub>-Löschanlage einschließlich der Gefährdungsanalyse, der Personenschutzmaßnahmen und der Verknüpfungen (d. h. des Zusammenspiels) mit anderen Anlagen im Schutzbereich (Brandmeldeanlage, Schließvorrichtungen für Feuerschutzabschlüsse, Rauch- und Wärmeabzugsanlage, Lüftungsanlage, etc.) ist in folgenden Dokumentationen darzulegen:
  - Brandschutzkonzept
  - Sicherheitsbericht bzw. –konzept
  - Alarm- und Gefahrenabwehrplan

Ist in einem Genehmigungsverfahren keines dieser Dokumente erforderlich, ist der Genehmigungsbehörde zusammen mit den Antragsunterlagen ein separates Gesamtkonzept für die CO<sub>2</sub>-Löschanlage vorzulegen. Ist die Löschanlage nicht Bestandteil eines Genehmigungsverfahrens, so ist das Gesamtkonzept vom Betreiber zu erstellen und vorzuhalten.

Die im Zusammenhang mit der CO<sub>2</sub>-Löschanlage stehenden Regelungen müssen im Sicherheitsmanagementsystem – soweit einzurichten – implementiert sein.

**Literatur:**

- [1] VdS 2093 : 2009-06 (03) VdS-Richtlinien für CO<sub>2</sub>-Feuerlöschanlagen  
- Planung und Einbau –  
VdS Schadenverhütung GmbH, Köln
- [2] VdS 3518 : 2006-07 (01) VdS-Richtlinien für Feuerlöschanlagen  
„Sicherheit und Gesundheitsschutz beim Einsatz von  
Feuerlöschanlagen mit Löschgasen“  
VdS Schadenverhütung GmbH, Köln
- [3] Lampe, J.; Schattka, D.: „Brandeinsatz mit Kohlenstoffdioxidfreisetzung in einem  
Lagerbetrieb“  
BRANDSCHUTZ Deutsche Feuerwehr-Zeitung 09/2009,  
S. 747 - 753

## **ANHANG**

### **Graphische Dokumentation der Ausbreitungsrechnung**

***A4.1 Fall 1 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Produktionsbetrieb***

***A4.2 Fall 2 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich A***

***A4.3 Fall 3 - CO<sub>2</sub>-Löschanlage in Lagerbereich B***

***A4.4 Fall 4 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb A***

***A4.5 Fall 5 - CO<sub>2</sub>-Lagerbehälter in Abfüllbetrieb B***

***A4.6 Fall 6 - CO<sub>2</sub>-Einsatzbehälter in der Getränkeindustrie***

Zu den in den folgenden Kapiteln aufgeführten Grafiken und den aus programmtechnischen Gründen teilweise unklaren Darstellungen, sei auf das Sachverständigentreffen im April 2008 in Baden-Württemberg und den von Herrn Dr. B. Schalau gehaltenen Vortrag zum Vergleich verschiedener Berechnungsprogramme für Ausbreitungsrechnungen verwiesen.