TEXTE
90/2026

Abschlussbericht

Ammoniak als Wasserstoffträger

Fragen und Herausforderungen der Technik bei großvolumigem Import von Ammoniak und deren Umweltauswirkungen

von:

Patrick Schmidt, Christopher Kutz, Werner Weindorf, Johanna Bruckner
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Ottobrunn

Michael Eckbauer, Rolf Zeppenfeld, Corina Habermann, Joanna Simon, Melis Güler
ILF Beratende Ingenieure GmbH (ILF), München

Christian Lindner, Fritz Miserre
TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

TEXTE 90/2026

REFOPLAN des Bundesministeriums Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3724 53 702 0

Abschlussbericht

Ammoniak als Wasserstoffträger

Fragen und Herausforderungen der Technik bei großvolumigem Import von Ammoniak und deren Umweltauswirkungen

von

Patrick Schmidt, Christopher Kutz, Werner Weindorf,
Johanna Bruckner
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Ottobrunn

Michael Eckbauer, Rolf Zeppenfeld, Corina Habermann,
Joanna Simon, Melis Güler
ILF Beratende Ingenieure GmbH (ILF), München

Christian Lindner, Fritz Miserre
TÜV SÜD Industrie Service GmbH, München

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:
Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST)
Daimlerstr. 15
85521 Ottobrunn

ILF Beratende Ingenieure GmbH (ILF)
Werner-Eckert-Str. 7
81829 München

TÜV SÜD Industrie Service GmbH
Westendstraße 199
80686 München

Abschlussdatum:
Januar 2026

Redaktion:
Fachgebiet FG III 2.1 Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen
Christopher Proske

DOI:
https://doi.org/10.60810/openumwelt-8333

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2026

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren.

Kurzbeschreibung: Ammoniak als Wasserstoffträger

Das Forschungsvorhaben „Ammoniak als Wasserstoffträger – Fragen und Herausforderungen der Technik bei großvolumigem Import von Ammoniak (NH_3) und deren Umweltauswirkungen“ untersucht mit Ammoniak-Terminals inklusive Cracker einen wichtigen Teilaspekt des Wasserstoffimports in Form von Ammoniak nach Deutschland. Die Studie wurde vom UBA beauftragt und von einem Konsortium unter Federführung der LBST mit ILF sowie TÜV SÜD von Juli 2024 bis Januar 2026 erarbeitet.

Ziel der Studie ist es, mögliche Auswirkungen eines großskaligen Ammoniakimports in der Rolle als Wasserstoffvektor auf die Umwelt in Deutschland zu untersuchen und mittels einer Gesamtbetrachtung möglicher kumulativer Effekte einzuordnen. Im Zentrum der Analyse stehen Ammoniak-Terminals, einschließlich Tanklager und NH_3-Cracker zur Wasserstoffproduktion. Nicht Teil der vorliegenden Studie sind die vorgelagerte Ammoniakanlieferung mittels Schiff sowie der nachgelagerte Weitertransport von NH_3 in Kesselwagen und/oder H_2 in Pipelines.

Um potenzielle Kritikalität frühzeitig auszuloten, erfolgt die Analyse der Emissionen im Normalbetrieb mittels einer Grenzfallbetrachtung generischer und prototypischer Terminals zur Diskussion (=Worst-Case-Betrachtung). Zudem werden ausgewählte Störfallszenarien hinsichtlich ihrer Auswirkungen diskutiert.

In der Gesamtbetrachtung sind, mit Blick auf den Normalbetrieb, keine signifikanten Zusatzbelastungen auf die Umwelt durch eine eingeschränkte Zahl neuer Ammoniak-Terminals in Deutschland zu erwarten. Punktuell kann es – in Abhängigkeit des jeweiligen Standorts, der Hintergrundbelastung sowie der entsprechenden Ökosysteme – jedoch zu erhöhten bzw. relevanten zusätzlichen Lasteinträgen kommen.

Die im Rahmen der Studie durchgeführten Störfallanalysen zeigen, dass sich durch (schadens-)begrenzende Maßnahmen wirksam die berechneten angemessenen Sicherheitsabstände bzw. die Reichweiten bis zur Unterschreitung des Beurteilungswerts reduzieren lassen. Dies gilt sowohl hinsichtlich der untersuchten Szenarien zur Ermittlung des angemessenen Sicherheitsabstands (in Anlehnung an KAS-18) als auch für Szenarien für die Katastrophenschutzplanung (in Anlehnung an SFK-GS 45 als Erkenntnisquelle) mit einer Segment-Freisetzung von Ammoniak (abgeleitet aus der PGS 12).

Eine darüberhinausgehende Detailanalyse individueller Standorte und Projekte, wie sie etwa im Kontext von Genehmigungsverfahren, Bauleitplanung oder Katastrophenschutzplanung erforderlich ist, kann durch die vorliegende Studie nicht ersetzt werden. Auch werden keine Empfehlungen bzw. Prognosen hinsichtlich der künftigen Eignung bzw. Bedeutung von Ammoniak als Wasserstoffimportvektor für Deutschland gegeben.

Abstract: Ammonia as Hydrogen Carrier

The research project "Ammonia as Hydrogen Carrier – Questions and Challenges of Technology in Case of Large-Volume Import of Ammonia (NH_3) and its Environmental Effects" investigates ammonia terminals including crackers as an important aspect of hydrogen import scenarios in form of ammonia to Germany. The study was commissioned by the German Federal Environmental Agency (UBA) and was developed by a consortium led by LBST, ILF and TÜV SÜD between July 2024 and January 2026.

The aim of the study is to assess possible effects of large-scale ammonia imports as hydrogen vector on the environment in Germany and to characterise their potential cumulative effects in a holistic analysis. It focuses on ammonia terminals, including tank farms and NH_3 crackers for hydrogen production. Neither the delivery of ammonia by ship nor the onward transport of NH_3 in tank wagons and/or of H_2 in pipelines are part of the present study.

In order to identify potential criticalities at an early stage, the analysis of emissions in normal operation is carried out by means of a worst-case analysis of generic and prototypical terminals. In addition, selected accident scenarios are discussed regarding their effects.

Overall, in case of normal operation, no significant additional pollution of the environment is to be expected from a limited number of new ammonia terminals in Germany. However, depending on the respective location, the background pollution and the corresponding ecosystems, there may be increased or relevant additional load inputs in certain areas.

The analyses of major-accident scenarios conducted within the framework of this study show that damage-mitigating measures can effectively reduce the calculated safety distances or the ranges until the assessment thresholds are fallen below. This applies both to the scenarios ("*Dennoch-Störfälle"*) for determining the appropriate safety distance (based on KAS-18) and scenarios to prepare external emergency plans and response measures ("*Katastrophen-schutzplanung"*) (drawing from SFK-GS-45 as a source of insight) involving a segment release of ammonia (derived from PGS 12).

A further detailed analysis of individual locations and projects, as required e.g. in the context of approval procedures, urban land-use planning or external emergency planning, cannot be replaced by the present study. Furthermore, no recommendations or forecasts are given regarding the future suitability or significance of ammonia as a hydrogen import vector for Germany.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 7
Abbildungsverzeichnis 11
Tabellenverzeichnis 15
Abkürzungsverzeichnis 18
Zusammenfassung 20
Summary 28
1 Einleitung 35
2 Entwicklung und Beschreibung von Modellterminals und Beispielstandorten 37
2.1 Importszenario für Ammoniak nach Deutschland 37
2.1.1 Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate 37
2.1.2 Ammoniakproduktion und -import in Deutschland bis 2023 37
2.1.3 Studien zu künftigen Ammoniakbedarfen 39
2.1.4 Ammoniakterminals in Deutschland (vorhanden/geplant) 41
2.1.5 Importszenario für 2030 42
2.2 Definition der Modellterminals 43
2.2.1 Auswahlkriterien für Modellterminals 43
2.2.2 Kenngrößen der definierten Modellterminals 44
2.2.3 Anlagengrenzen der Modellterminals 46
2.3 Beschreibung der Modellterminals 48
2.3.1 Prinzipielle Beschreibung 48
2.3.2 Komponenten der Modellterminals 49
2.3.3 Layout der Modellterminals 59
2.3.4 Beschreibung der einzelnen Modellterminals 61
2.3.5 Energie- und Betriebsmittelverbräuche 63
2.4 Definition der Beispielstandorte 66
3 Emissionen der Modellterminals im Normalbetrieb 68
3.1 Übersicht über die Emissionsquellen im Normalbetrieb 69
3.2 Beschreibung der Emissionsquellen im Normalbetrieb 71
3.2.1 Abgas Crack-Reaktor 71
3.2.2 Abgas Fackel 71
3.2.3 Diffuse Emissionen Terminal 71
3.2.4 Diffuse Emissionen Übergabe 72
3.2.5 Abwasser 72

3.2.6 Emissionsgrenzwerte ... 72
3.3 Zu erwartende Emissionsmengen ... 74
3.3.1 Gasförmige Emissionen ... 74
3.3.2 Emissionen in Wasser ... 77
4 Umweltwirkungen (Immissionen) im bestimmungsgemäßen Betrieb ... 78
4.1 Ausbreitungsrechnungen mit AUSTAL ... 79
4.1.1 Methodisches Vorgehen und Annahmen ... 79
4.1.2 Beschreibung der generischen Beispielstandorte ... 80
4.1.3 Ermittelte Massenkonzentrationswerte ... 83
4.1.4 Ermittelte Depositionswerte ... 87
4.2 Diskussion der unterschiedlichen Wirkdimensionen ... 92
4.2.1 Terrestrische Ökosysteme ... 92
4.2.2 Oberflächen- und Meeresgewässer ... 99
4.2.3 Vegetation ... 101
4.2.4 Klimawirkung ... 104
5 Ereignis- und Störfallbetrachtung für die Modellterminals ... 108
5.1 Übersicht vergangener Vorfälle im Kontext der Lagerung und Nutzung von Ammoniak ... 108
5.1.1 Übersicht Datenbankrecherche sowie weiterer Literaturquellen ... 109
5.1.2 Diskussion ausgewählter Vorfälle mit Ammoniakfreisetzung ... 110
5.1.3 Einordnende Diskussion als Basis der Definition zu untersuchender Störfall-Szenarien ... 117
5.2 Szenariendefinition und Methodik ... 124
5.2.1 Exemplarische Ermittlung angemessener Sicherheitsabstände im Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$ für das Modellterminal 1 ... 125
5.2.2 Exemplarische Ermittlung von Reichweiten auf Basis von Dennoch-Szenarien mit der Freisetzung der GZM (Dennoch-Szenario$_{KatS}$) im Rahmen der Katastrophenschutzplanung ... 127
5.2.3 Darstellung der untersuchten Szenarien ... 131
5.3 Ereignis- / Störfallbetrachtung ... 134
5.3.1 Angemessene Sicherheitsabstände in Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ ... 135
5.3.2 Abstände auf Basis von Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ ... 139
5.4 Learnings – Bedeutung schadensverhindernder und schadensbegrenzender Maßnahmen und Ausblick ... 144
5.5 Umweltwirkungen im Falle von Störfallereignissen ... 146
6 Fazit & Ausblick ... 151

7 Quellenverzeichnis 155
A Anhang A: Eigenschaften von Ammoniak 163
A.1 Chemische Eigenschaften 163
A.2 Physikalische Eigenschaften 163
A.3 Gefahren 164
A.4 Umweltwirkungen 165
B Anhang B: Überlegungen zur Definition der Beispielstandorte 166
B.1 Landschafts-/Vegetationstypen 166
B.2 Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit) 166
B.3 Gewässertypen 166
B.4 Wetterdaten 167
B.5 Weitere Aspekte 168
C Anhang C: Vereinfachte Abstandsbestimmung auf Basis der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 15.1 170
D Anhang D: Ausführungen zur eutrophierenden und toxischen Wirkung von Ammoniak auf Oberflächengewässer im Falle einer Freisetzung 171
E Anhang E: Ergebnisse der Emissionen während des Normalbetriebs 174
E.1 Ergebnisse N-Konzentrationen 174
E.1.1 Modellterminal 1 174
E.1.2 Modellterminal 2 176
E.1.3 Modellterminal 3 178
E.2 Ergebnisse N-Deposition 180
E.2.1 Modellterminal 1 180
E.2.2 Modellterminal 2 182
E.2.3 Modellterminal 3 184
F Anhang F: Emissionen und Immissionen im Normalbetrieb bei erwarteten Emissionsmengen 186
F.1 Erwartete Emissionen am Abgaskamin des Ammoniak-Crackers im Normalbetrieb 186
F.2 Erwartete N-Deposition im Normalbetrieb 187
G Anhang G: Ergebnisse der Störfallauswirkungsberechnungen 191
G.1 Szenario A: Angemessene Sicherheitsabstände auf Basis KAS-18 191
G.1.1 Szenario A1a)/b) Leitung 5 bar Schiff - Tank über Land 191
G.1.2 Szenario A2a)/b) Leitung 5 bar Schiff - Tank über Wasser 194
G.1.3 Szenario A3a)/b) Füllleitung Tank zu Transportbehälter ohne Druckausgleich 20 bar 197
G.1.4 Szenario A4a)/b) Leitung zum Cracker 35 bar 200
G.2 Szenario B: Abstände auf Basis von Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ 203

G.2.1 Szenario B1a)/b) NH_3-Heißgasleitung Cracker 33 bar/600 °C Freistrahl 45° mit thermischer Überhöhung (Auftrieb), 82 kg GZM, DN 400 203

G.2.2 Szenario B2a)/b) DN 200 flüssig-NH3-Leitung (35 bar) zum Cracker 206

G.2.3 Szenario B3a)/b) DN 600 flüssig-NH_3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Land 209

G.2.4 Szenario B4a)/b) DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Wasser 212

G.2.5 Szenario B5a)/b) DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t mit Lachenbegrenzung 1500 m^2 über Land 215

G.2.6 Szenario B6) Große Wasserstoffleckage Brand/Explosion Cracker DN300 GZM 327 kg 218

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Jährliche Ammoniakproduktion in Deutschland 2013 - 2023 ..38
Abbildung 2: Prognostizierter Ammoniak-Import nach Deutschland 40
Abbildung 3: Blockfließbild Ammoniakterminal mit Ammoniak-Cracker.....48
Abbildung 4: Typische Ver- und Entlademole für Flüssiggase 50
Abbildung 5: Typischer „Full Containment“-Tank für flüssiges Ammoniak...51
Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau eines Ammoniak-Rückverflüssigungssystems 53
Abbildung 7: Typische Verfahrensskizze einer Ammoniak-Crackanlage 55
Abbildung 8: Typischer Aufbau eines Ammoniak-Crackreaktors 56
Abbildung 9: Typisches Layout eines Ammoniak-Terminals mit Ammoniak-Crackern.....60
Abbildung 10: Typisches Layout des Modellterminals 2 62
Abbildung 11: Typisches Layout des Modellterminals 3 63
Abbildung 12: Blockdiagramm Emissionsquellen 70
Abbildung 13: Rasternetz um Emissionsquelle als Basis der Ausbreitungsrechnungen 80
Abbildung 14: Beispielwindrose für das Modellterminal 1 81
Abbildung 15: Beispielwindrose für das Modellterminal 2 82
Abbildung 16: Beispielwindrose für das Modellterminal 3 82
Abbildung 17: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NH_3-Konzentrationen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)...83
Abbildung 18: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NH_3-Konzentrationen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)...85
Abbildung 19: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – NH_3-Konzentrationen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)...86
Abbildung 20: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NH_3-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau) 88
Abbildung 21: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NH_3-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau) 89
Abbildung 22: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – NH_3-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau) 91
Abbildung 23: Übersicht der untersuchten Wirkdimensionen.....92
Abbildung 24: Eintrag von reaktiven Stickstoffverbindungen die Umwelt 93
Abbildung 25: Überschreitung der Critical Loads für Versauerung (links) und Eutrophierung (rechts) in Deutschland 96
Abbildung 26: Stickstoff-Deposition um die Modellterminals 1-3 in Bereichen um Emissionsquelle 98
Abbildung 27: Stickstoff-Deposition um die Modellterminals 1-3 in Bereichen um Emissionsquelle im Vergleich zu CAI-Werten für Nord- und Ostsee 101
Abbildung 28: Ammoniak-Konzentration um die Modellterminals 1-3 in Bereichen um Emissionsquelle.....104

Abbildung 29: Potenzielle THG-Emissionen entlang der Ammoniak-Lieferkette 105
Abbildung 30: Übersicht der Nomenklatur gemäß Störfall-Verordnung (StörfallV).....120
Abbildung 31: Zuordnung der untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ zu den einzelnen Anlagenbestandteilen. 132
Abbildung 32: Zuordnung der untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ zu den einzelnen Anlagenbestandteilen. 133
Abbildung 33: Angemessene Sicherheitsabstände für Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2) (angenommene Windgeschwindigkeit: 3 m/s) 137
Abbildung 34: Angemessene Sicherheitsabstände für Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2) (angenommene Windgeschwindigkeit: 5 m/s) 138
Abbildung 35: Ermittelte Abstände für die untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von NH_3) (angenommene Windgeschwindigkeit: 3 m/s) 142
Abbildung 36: Ermittelte Abstände für die untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von NH_3) (angenommene Windgeschwindigkeit: 5 m/s) 142
Abbildung 37: Ermittelte Abstände für die untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von H_2) (angenommene Windgeschwindigkeit: 3 m/s) 143
Abbildung 38: Ermittelte Bevölkerungszahl im Umkreis existierender und potenzieller NH_3-Terminalstandorte in Deutschland 150
Abbildung 39: Dampfdruck von Ammoniak als Funktion der Temperatur....164
Abbildung 40: Wattenmeer Nordsee.....167
Abbildung 41: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – N_2O-Konzentrationen 174
Abbildung 42: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO_x-Konzentrationen 175
Abbildung 43: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – N_2O-Konzentrationen 176
Abbildung 44: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NO_x-Konzentrationen 177
Abbildung 45: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – NO_x-Konzentrationen 178
Abbildung 46: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – N_2O-Konzentrationen 179
Abbildung 47: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO_2-Depositionen 180
Abbildung 48: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO-Depositionen 181

Abbildung 49: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NO_2-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau) 182
Abbildung 50: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NO-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau) 183
Abbildung 51: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 - NO_2-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau) 184
Abbildung 52: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – NO-Depositionen 185
Abbildung 53: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO_2-Depositionen basierend auf Betriebswerten 187
Abbildung 54: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO-Depositionen basierend auf Betriebswerten 188
Abbildung 55: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung Schiff - Tank über Land bei 3 m/s Windgeschwindigkeit.....192
Abbildung 56: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung Schiff - Tank über Land bei 5 m/s Windgeschwindigkeit.....193
Abbildung 57: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung Schiff - Tank über Wasser bei 3 m/s Windgeschwindigkeit ...195
Abbildung 58: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung Schiff - Tank über Wasser bei 5 m/s Windgeschwindigkeit ...196
Abbildung 59: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Füllleitung Tank - Transportbehälter bei 3 m/s Windgeschwindigkeit 198
Abbildung 60: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Füllleitung Tank - Transportbehälter bei 5 m/s Windgeschwindigkeit 199
Abbildung 61: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung zum Cracker bei 3 m/s Windgeschwindigkeit 201
Abbildung 62: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung zum Cracker bei 5 m/s Windgeschwindigkeit 202
Abbildung 63: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus Heißgasleitung Cracker bei 3 m/s Windgeschwindigkeit 204
Abbildung 64: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus Heißgasleitung Cracker bei 5 m/s Windgeschwindigkeit 205
Abbildung 65: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung zum Cracker bei 3 m/s Windgeschwindigkeit 207
Abbildung 66: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung zum Cracker bei 5 m/s Windgeschwindigkeit 208
Abbildung 67: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Land, Windgeschwindigkeit 3 m/s 210

Abbildung 68: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Land, Windgeschwindigkeit 5 m/s 211
Abbildung 69: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Wasser, Windgeschwindigkeit 3 m/s 213
Abbildung 70: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Wasser, Windgeschwindigkeit 5 m/s 214
Abbildung 71: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t mit Lachenbegrenzung über Land, Windgeschwindigkeit 3 m/s 216
Abbildung 72: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t mit Lachenbegrenzung über Land, Windgeschwindigkeit 5 m/s 217
Abbildung 73: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freistrahl bei Freisetzung von Wasserstoff.....219
Abbildung 74: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Bestrahlungsstärke durch gezündeten Freistrahl bei Freisetzung von Wasserstoff 219
Abbildung 75: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Explosionsüberdruck durch zündenden Freistrahl bei Freisetzung von Wasserstoff 220

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kenngrößen der definierten Modellterminals 21
Tabelle 2: Emissionsmassenströme aus dem Ammoniak-Cracker.....22
Tabelle 3: Ermittelte Massenkonzentrationen für Modellterminal 1 an Beispielstandort 1.....23
Tabelle 4: Ermittelte N-Depositionswerte für Modellterminal 1 an Beispielstandort 1.....23
Tabelle 5: Übersicht empirische Critical Loads für ausgewählte Ökosysteme.....23
Tabelle 6: Parameters of the defined model terminals.....29
Tabelle 7: Emission mass flows from the ammonia cracker.....30
Tabelle 8: Determined mass concentrations for model terminal 1 at example location 1.....31
Tabelle 9: Determined N deposition values for model terminal 1 at example location 1.....31
Tabelle 10: Overview of empirical critical loads (CL_{emp}) for selected ecosystems.....31
Tabelle 11: Im- und Exportstatistik für wasserfreies Ammoniak.....39
Tabelle 12: Vorhandene und geplante Ammoniak-Importterminals in Deutschland.....41
Tabelle 13: Definition der Modellterminals bezüglich der Auswahlkriterien 43
Tabelle 14: Übersicht der Kenngrößen der definierten Modellterminals ..44
Tabelle 15: Definition der Anlagengrenzen der Modellterminals.....47
Tabelle 16: Typische Stromverbraucher eines mittleren Ammoniak-Terminals (1 Mio. t/Jahr), ohne Ammoniak-Cracker.....64
Tabelle 17: Typische spezifische Betriebsmittelverbräuche eines Ammoniak-Crackers.....65
Tabelle 18: Beschreibung der Bespielstandorte.....66
Tabelle 19: Emissionsquellen im Normalbetrieb und die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte.....73
Tabelle 20: Abgasdaten am Schornsteinaustritt.....75
Tabelle 21: Emissionsmassenströme bezogen auf Jahresmittelwerte* 75
Tabelle 22: Abschätzung von diffusen gasförmigen NH_3-Emissionen.....77
Tabelle 23: Massenkonzentrationen der Komponenten NO_x, NH_3 und N_2O für das Modellterminal 1.....84
Tabelle 24: Massenkonzentrationen der Komponenten NO_x, NH_3 und N_2O für das Modellterminal 2.....85
Tabelle 25: Massenkonzentrationen der Komponenten NO_x, NH_3 und N_2O für das Modellterminal 3.....87
Tabelle 26: Depositionen des Modellterminal 1.....87
Tabelle 27: Depositionen des Modellterminal 2.....90
Tabelle 28: Depositionen des Modellterminal 3.....90

Tabelle 29: Empirische Critical Loads für ausgewählte Ökosysteme 94
Tabelle 30: Gesamt-Stickstoff-Deposition um die Modellterminals 1-3.....97
Tabelle 31: Critical Levels für Ammoniak 102
Tabelle 32: Ammoniak-Konzentration um Modellterminal 1-3 an den jeweiligen Beispielstandorten 103
Tabelle 33: Klimawirksamkeit ausgewählter Treibhausgase über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren (GWP-100).....105
Tabelle 34: Emissionswerte für Modellterminal 1 107
Tabelle 35: Ergebnisse der THG-Berechnung für unterschiedliche Emissionsszenarien.....107
Tabelle 36: Vorfälle mit Ammoniakaustritt bei Lagerung von tiefgekühltem flüssigem Ammoniak 113
Tabelle 37: Vorfälle mit Ammoniakaustritt bei Entladung von Schiffen von tiefgekühltem flüssigem Ammoniak.....114
Tabelle 38: Vorfälle mit Ammoniakaustritt bei Pipelinetransport.....115
Tabelle 39: Ausgewählte Vorfälle mit Austritt druckverflüssigten Ammoniaks und hohen Opferzahlen.....117
Tabelle 40: Angenommene größte zusammenhängende Menge (GZM) für Modellterminal 1 130
Tabelle 41: Untersuchte Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2).....131
Tabelle 42: Untersuchte Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2) 132
Tabelle 43: Ermittelte angemessene Sicherheitsabstände für Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2) – gerundete Angaben.....135
Tabelle 44: Ermittelte Abstände für Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2) – gerundete Angaben.....139
Tabelle 45: Emissionen der unterschiedlichen Schadstoffe im Falle der untersuchten Störfallereignisse (für Modellterminal 1): 146
Tabelle 46: Ergebnisse der THG-Berechnung für unterschiedliche Störfall-Emissionsszenarien (für Modellterminal 1):.....147
Tabelle 47: AEGL-Grenzwerte für Ammoniak in Abhängigkeit der Expositionsdauer 148
Tabelle 48: Geschätzte Bevölkerungszahl (nach Zensus 2022) in bestimmten Radius um Standorte der bestehenden und geplanten Ammoniak-Importterminals in Deutschland.....149
Tabelle 49: Ausgewählte chemische Eigenschaften von Ammoniak 163
Tabelle 50: Ausgewählte physikalische Eigenschaften von Ammoniak....163
Tabelle 51: Vorherrschende Windrichtung.....168
Tabelle 52: Übersicht über potenzielle Auswirkungen einer Ammoniakfreisetzung auf aquatische/marine Lebensräume (Dawson et al., 2022).....171

Tabelle 53: Übersicht über potenzielle Auswirkungen einer Ammoniakfreisetzung auf ökologische Rezeptoren (Dawson et al., 2022) 172
Tabelle 54: Erwartete Emissionen aus dem Ammoniak-Cracker im Normalbetrieb (Modellterminal 1, Jahresmittelwerte) 186
Tabelle 55: Depositionen basierend auf Betriebswerten am Beispiel des Modellterminal 1 189
Tabelle 56: Vergleich Gesamtstickstoff-Deposition Grenzwert- und Betriebswertbetrachtung 189
Tabelle 57: Erwartete Emissionen aus dem Ammoniak-Cracker im Normalbetrieb 190
Tabelle 58: Vergleich THG-Berechnung Grenzwertbetrachtung vs. erwartete Betriebswerte 190
Tabelle 59: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario A1a)/b) 191
Tabelle 60: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario A2a)/b) 194
Tabelle 61: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario A3a)/b) 197
Tabelle 62: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario A4a)/b) 200
Tabelle 63: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B1a)/b) 203
Tabelle 64: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B2a)/b) 206
Tabelle 65: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B3a)/b) 209
Tabelle 66: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B4a)/b) 212
Tabelle 67: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B5a)/b) 215
Tabelle 68: Berechnungsparameter für die Freisetzung und Entzündung von Wasserstoff – Szenario B6 218

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
a	Jahr
AR	Assessment Report
AEGL	Acute Exposure Guidance Level
ALARP	As Low As Reasonably Possible (so niedrig wie in vernünftiger Weise möglich)
BAT	Best Available Technology (beste verfügbare Technologie)
BImSchG/V	Bundesimmissionsschutz-Gesetz/-Verordnung
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
CAI	Critical Atmospheric Input
CAPEX	Investitionsausgaben
CLe	Critical Levels
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$	Dennoch-Szenarien in Anlehnung an KAS-18
Dennoch-Szenarien$_{KatS}$	Dennoch-Szenarien für die Katastrophenschutzplanung (KatS) (Dennoch-Szenarien in Anlehnung an SFK-GS-45)
DENOX	Rauchgasentstickung
DN	Nomineller Durchmesser in mm (frz. Diamètre Nominal)
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
ERPG	Emergency Response Planning Guidelines
FSRUs	Schiffbasierte Ammoniak-Importterminals (engl. floating storage and regasification units)
ggü.	gegenüber
GWP	Global Warming Potenzial
GZM	größte zusammenhängende Masse
H_2	Wasserstoff

Abkürzung	Erläuterung
KatS	Katastrophenschutz
KAS	Kommission für Anlagensicherheit
MGC	Mid-size Gas Carrier, Gastanker mit ca. 20.000 – 40.000 t Kapazität
Mio.	Millionen (1.000.000)
NOx	Stickoxide
N_2O	Distickstoffoxid (Lachgas)
NH_3	Ammoniak
OPEX	Betriebskosten
OTNOC	Other Than Normal Operating Conditions
PAC	Protective Action Criteria
PGS	Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen (niederl. Publikationsreihe Gefahrstoffe)
PSA	Pressure Swing Adsorption (Druckwechseladsorption)
SdST	Stand der Sicherheitstechnik
SMAV	Mittlerer akuter Grenzwert (engl. species mean acute value)
StörfallV	Störfallverordnung
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VLGC	Very Large Gas Carrier, Gastanker mit ca. 50,000 t Kapazität

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Das Forschungsvorhaben „Ammoniak als Wasserstoffträger – Fragen und Herausforderungen der Technik bei großvolumigem Import von Ammoniak (NH_3) und deren Umweltauswirkungen“ untersucht mit Ammoniak-Terminals inklusive Cracker einen wichtigen Teilaspekt des Wasserstoffimports in Form von Ammoniak nach Deutschland. Die Studie wurde vom UBA beauftragt und von einem Konsortium unter Federführung der LBST mit ILF sowie TÜV SÜD von Juli 2024 bis Januar 2026 erarbeitet.

Ziel der Studie ist es, mögliche Auswirkungen eines großskaligen Ammoniakimports in der Rolle als Wasserstoffvektor auf die Umwelt in Deutschland zu untersuchen und mittels einer Gesamtbetrachtung möglicher kumulativer Effekte einzuordnen. Im Zentrum der Analyse stehen Ammoniak-Terminals, einschließlich Tanklager und NH_3-Cracker zur Wasserstoffproduktion. Nicht Teil der vorliegenden Studie sind die vorgelagerte Ammoniakanlieferung mittels Schiff sowie der nachgelagerte Weitertransport von NH_3 in Kesselwagen und/oder H_2 in Pipelines.

Um potenzielle Kritikalität frühzeitig auszuloten, erfolgt die Analyse der Emissionen im Normalbetrieb mittels einer Grenzfallbetrachtung generischer und prototypischer Terminals zur Diskussion (=Worst-Case-Betrachtung). Zudem werden ausgewählte Freisetzungsszenarien (Bauleitplanung in Anlehnung an Leitfaden KAS-18 und Szenarien für die Katastrophenschutzplanung in Anlehnung an SFK-GS 45 als Erkenntnisquelle mit einer Segment-Freisetzung von Ammoniak abgeleitet aus der PGS 12) hinsichtlich ihrer möglichen Auswirkungen auf Schutzobjekte nach § 3 (5d) BImSchG diskutiert.

Eine darüberhinausgehende Detailanalyse individueller Standorte und Projekte, wie sie etwa im Kontext von Genehmigungsverfahren, Bauleitplanung oder Katastrophenschutzplanung erforderlich ist, kann durch die vorliegende Studie nicht ersetzt werden. Auch werden keine Empfehlungen bzw. Prognosen hinsichtlich der künftigen Eignung bzw. Bedeutung von Ammoniak als Wasserstoffimportvektor für Deutschland gegeben.

Methodisches Vorgehen

In einem ersten Schritt werden die zu erwartenden Importmengen auf Basis der aktuellen Terminalprojekte in Deutschland und Studien für H_2-Importmengen beschrieben und, darauf aufbauend, **generische Modellterminals und -layouts** entwickelt (inkl. NH_3-Lagerung und NH_3-Crackanlagen). Diese stellen die Grundlage einer allgemeinen Diskussion um potenziell zu erwartende Emissionsmengen der NH_3-Terminals sowie deren Umweltwirkungen hinsichtlich unterschiedlicher Wirkdimensionen im **Normalbetrieb** dar. Die Ergebnisse werden zudem vor dem Hintergrund der bestehenden Ökosysteme und Schadstofffrachten in Deutschland eingeordnet.

In einem zweiten Schritt werden, ausgehend von generischen Beispielstandorten, **Störfall-Szenarien** als Freisetzungsszenarien für Betriebsbereiche nach der Störfall-Verordnung entworfen und mögliche Auswirkungen auf Schutzobjekte nach § 3 (5d) BImSchG diskutiert. Ziel ist es, eine Ersteinschätzung hinsichtlich des angemessenen Sicherheitsabstands (Dennoch-Szenarien in Anlehnung an KAS-18 –Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$) sowie für die Katastrophenschutzplanung (KatS) (Dennoch-Szenarien in Anlehnung an SFK-GS-45 als Erkenntnisquelle mit einer Segment-Freisetzung von Ammoniak abgeleitet aus der PGS 12 – Dennoch-Szenarien$_{KatS}$) zu ermöglichen. Auch hier gilt, dass die Ergebnisse nur im Kontext der jeweiligen Annahmen und Erläuterungen Gültigkeit haben und in keinem Fall außer Kontext gesetzt werden sollten.

Insgesamt ist zu betonen, dass die Analysen mit Blick auf individuelle Anlagen nur eingeschränkte Aussagekraft erlauben und die Gesamtbetrachtung künftiger Wasserstoff-Importe via Ammoniak und die hierfür notwendigen NH_3-Terminals im Zentrum stehen.

Abschätzung des Ammoniak-Importbedarfs

Zur Abschätzung des künftigen Bedarfs wurden verschiedene Studien ausgewertet. Die Bundesregierung prognostizierte z. B. für 2030 einen Importbedarf von 45–90 TWh an H_2 und Derivaten.[1] Geht man des Weiteren davon aus, dass 50% dieses Bedarfs durch Ammoniak gedeckt werden, ergibt sich ein Ammoniak-Importbedarf von 5,2 bis 9,9 Mio. t/Jahr.

Für die vorliegende Studie wird, unter Berücksichtigung der derzeitigen Produktionsmengen (2,1 Mio. t/Jahr in 2023), der vorhandenen und geplanten Terminalkapazität (ca. 7,5 Mio. t/Jahr) und der vorliegenden Studien, konservativ von einer Ammoniak-Importmenge im Jahr 2030 von 10 Mio. t/Jahr ausgegangen.[2]

Definition von Modellterminals

Auf Basis der Abschätzung des Importbedarfs und angekündigter Projekte wurden Auswahlkriterien und Kapazitäten von Ammoniak-Modellterminals festgelegt. Es wurden drei Modellterminals als Basis für alle weiteren Betrachtungen definiert:

Tabelle 1: Kenngrößen der definierten Modellterminals

Kenngrößen	Modellterminal 1 (groß)	Modellterminal 2 (mittel)	Modellterminal 3 (klein)
Lage	Küste – Industriegebiet	Küste – Industriegebiet	Binnengewässer – Green-Field
Kapazität Ammoniak	3 Mio. t/a	1 Mio. t/a	0,3 Mio. t/a
Tanks	2 x 50.000 t	2 x 25.000 t	25.000 t
Kapazität Ammoniak-Cracker	2 x 1 Mio. t/a	1 x 0,7 Mio. t/a	1 x 0,2 Mio. t/a

Alle Modellterminals bestehen aus einer Entladevorrichtung am Anleger für tiefkaltes Ammoniak, einem Ammoniaktanklager mit Rückverflüssigung, einer oder zwei Ammoniak-Crackanlagen (Crackkapazität jeweils 2/3 der Gesamtkapazität) sowie NH_3-Kesselwagenverladeeinrichtungen. Weiterhin sind in jedem Modellterminal eine Fackel und weitere Betriebsmittelsysteme vorhanden. Für die Modellterminals wird die Verwendung der best-verfügbaren Technik und die Einhaltung des Stands der Sicherheitstechnik unterstellt.

Emissionsquellen der Modellterminals im Normalbetrieb

Als einzige wesentliche Emissionsquelle von NH_3, NO_x und N_2O im Normalbetrieb wurden die Abgase des NH_3-Crackreaktors identifiziert. Fackel und diffuse Emissionen aus Transportkupplungen und Flanschen sind im Vergleich dazu vernachlässigbar.

[1] Für 2030 wird von einer Nachfrage von 95 bis 130 TWh Wasserstoff und Derivate in Deutschland ausgegangen, wovon voraussichtlich 50 bis 70% importiert werden. Quelle: Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie (2023).

[2] Es ist wahrscheinlich, dass nicht die gesamte Importmenge zu Wasserstoff gecrackt wird, sondern ein kleinerer Anteil angelandet, weitertransportiert und als Ammoniak verwendet wird. Im Sinne einer konservativen Abschätzung wird dieser Aspekt hier nicht weiter betrachtet.

Emissionsgrenzwerte Ammoniak-Cracker

Da Ammoniakspaltanlagen noch nicht großtechnisch betrieben werden, existieren keine spezifischen nationalen Emissionsbegrenzungen. Die folgenden Werte basieren auf erwarteten oder konservativ abgeleiteten Grenzwerten. Die von Anlagenbauern erwarteten tatsächlichen Emissionen werden bei Anwendung der besten verfügbaren Technik voraussichtlich erheblich niedriger sein.

Grenzwerte bzw. Orientierungswerte für den Abgas-Crackreaktor (bezogen auf 3% O_2, trocken, Jahresmittelwerte) wurden wie folgt angenommen:

- Ammoniak (NH_3): 10 mg/Nm^3 (erwarteter Grenzwert/Arbeitshypothese).
- Stickoxide (NO_x): 100 mg/Nm^3 (erwarteter Grenzwert/Arbeitshypothese).
- Lachgas (N_2O): 70 mg/Nm^3 (Orientierungswert, analog Salpetersäureanlagen)

Emissionsmassenströme (Maximalwerte)

Aus den vorstehenden angenommenen Grenzwerten resultieren für die drei Modellterminals folgende maximale Emissionsmassenströme der kritischen Komponenten (Jahresmittelwerte bei vollständiger Ausschöpfung der zugrunde gelegten Grenzwerte).

Tabelle 2: Emissionsmassenströme aus dem Ammoniak-Cracker

	Modellterminal 1 (groß)	Modellterminal 2 (mittel)	Modellterminal 3 (klein)
NH_3 (kg/h)	4	1,4	0,4
NO_x (kg/h)	40	14	4,0
N_2O (kg/h)	28	9,8	2,8

Diese Massenströme bilden die Grundlage für die weiteren Immissionsbetrachtungen.

Ausbreitungsrechnungen für Beispielstandorte

Für die Analyse der Umweltwirkungen wurden die definierten Modellterminals an drei generische Beispielstandorte gesetzt.

- Beispielstandort 1: Modellterminal 1 (groß) an **Tiefwasserhafen an Nord- oder Ostsee, Industriegebiet**
- Beispielstandort 2: Modellterminal 2 (mittel) an **Tiefwasserhafen an Flussunterlauf in Stadtnähe**
- Beispielstandort 3: Modellterminal 3 (klein) an **Binnenstandort** (z. B. Rhein bis Basel, Elbe bis Wittenberge, Weser bis Bremen)

Die Ausbreitungsrechnungen erfolgten in IMMI 2024 mit AUSTAL für jeden der drei Beispielstandorte unter Berücksichtigung der jeweiligen topologischen Besonderheiten. Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen zeigen standortabhängige Profile, die insbesondere durch Winddaten und Rauhigkeitsannahmen geprägt sind. Die Quantifizierung der Depositions- und Konzentrationswerte erfolgt über ein Rastermodell mit einer Zellengröße von 500 m x 500 m – ausreichend genau, um generelle Aussagen über die Höhe der entsprechenden Frachten und allgemeinen Umweltwirkungen für die Beispielstandorte treffen zu können. Des

Weiteren wird die Konzentrationsentwicklung in Abhängigkeit des Abstands zur Emissionsquelle ermittelt.

Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen exemplarisch die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen für Modellterminal 1 (groß) an Beispielstandort 1 (Tiefwasserhafen im Industriegebiet).

Tabelle 3: Ermittelte Massenkonzentrationen für Modellterminal 1 an Beispielstandort 1

[µg / m³]	Maximale Konzentration pro 500x500 m	Durchschnittliche Konzentration in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
NH_3-Konzentration	0,990	0,593	0,437	0,172	0,043	0,013
NO_x-Konzentration	11,600	6,775	5,300	2,283	0,649	0,215
N_2O-Konzentration	8,139	4,746	3,714	1,597	0,455	0,151

Modellterminal 1: Kapazität Ammoniak 3 Mio. t NH_3/a; Beispielstandort 1: Tiefwasserhafen an Nord- oder Ostsee

Tabelle 4: Ermittelte N-Depositionswerte für Modellterminal 1 an Beispielstandort 1

[kg N ha^{-1} a^{-1}]	Maximale Deposition pro 500x500 m	Durchschnittliche Deposition in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
NH_3-Deposition	2,314	1,381	1,030	0,404	0,101	0,027
NO_2-Deposition	0,442	0,247	0,218	0,114	0,045	0,021
NO-Deposition	0,711	0,413	0,324	0,134	0,035	0,010
Gesamt N-Deposition	-	**2,041**	**1,572**	**0,652**	**0,181**	**0,058**

Modellterminal 1: Kapazität Ammoniak 3 Mio. t NH_3/a; Beispielstandort 1: Tiefwasserhafen an Nord- oder Ostsee

Immissionsbetrachtung

Die Abschätzung der Immissionen auf **terrestrische Ökosysteme** erfolgt durch Vergleich der Gesamtstickstoffdeposition mit dem sog. empirischen Critical Load[3] für relevante Ökosysteme.

Tabelle 5: Übersicht empirische Critical Loads für ausgewählte Ökosysteme

Ökosysteme (Kategorien)	Emp. Critical Load [kg N ha^{-1} a^{-1}]	Ökosysteme (Kategorien)	Emp. Critical Load [kg N ha^{-1} a^{-1}]
Bäume und Waldökosysteme	3-15	Grasland	10-25
Moore	5-25	Küstenhabitate	5-20

Quelle: Werte nach (Galert, Geupel, Loran, & Scheuschner, 2024).

Die Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen zeigen, dass die um die Anlage ermittelten Durchschnittswerte der Zusatzbelastung durchgehend unterhalb dieses Critical Load liegen.

[3] Critical Load bezeichnet die wissenschaftlich ermittelten Belastungsgrenzen, die die Auswirkungen von Luftschadstoffen auf die Umwelt beschreiben. Werden diese Belastungsgrenzwerte eingehalten oder unterschritten, kann man nach heutigem Wissen davon ausgehen, dass ein ausgewähltes Schutzgut (ökologischer Rezeptor) weder akut noch langfristig geschädigt wird

Folglich kann von einem geringen eutrophierenden Einfluss ausgegangen werden. Gleichzeitig wird, unter den angenommenen konservativen Emissionswerten, das Abschneidekriterium der FFH-Verträglichkeitsprüfung[4] im Nahbereich (< 2 km x 2 km um die Emissionsquelle) von 0,3 kg ha^{-1} a^{-1} überschritten. In Abhängigkeit der sich in der Umgebung des Vorhabens befindlichen Ökosysteme, erscheint für die Detailprüfung einer Anlage die Einbeziehung der bestehenden Hintergrundbelastung als sinnvoll (etwa auf Basis des PINETI-4-Projekts bzw. des ASCII-Datensatz des UBA-Kartendienst Hintergrundbelastungsdaten Stickstoff[5]).

Hinsichtlich des Stickstoffeintrags über die Deposition in **Gewässer** ist mit Werten bis maximal 2 kg N ha^{-1} a^{-1} im Nahbereich der Anlage (1 km x 1 km Rasterfläche) im Allgemeinen von keiner und großflächigen Überschreitung der Werte für den Critical Atmospheric Input (CAI) für Nord- und Ostsee auszugehen. Diese liegen nach Ergebnissen des RegioNat-Projekts[6] bei einem Gesamtstickstoffeintrag von 5,78 kg N ha^{-1} a^{-1} (Nordsee) bzw. 3,31 kg N ha^{-1} a^{-1} (Ostsee).

Für die Betrachtung der Auswirkungen von Ammoniak-Emissionen auf die **Vegetation** ist im Wesentlichen die potenziell toxische Wirkung von Ammoniak auf Pflanzen zu berücksichtigen. Der Vergleich der ermittelten Ammoniak-Konzentrationen um die Emissionsquellen mit den in der Literatur festgelegten Werten der durchschnittlichen Critical Levels (CLe) ergibt keine kontinuierliche Überschreitung innerhalb der betrachteten Rasterflächen (500 m x 500 m), sowohl für Flechten und Moose (Jahresmittelwert 1 $\mu g/m^3$) als auch für höhere Pflanzen (Jahresmittelwert: 3 $\mu g/m^3$).

Abschließend zeigen Berechnungen hinsichtlich der (direkten und indirekten) **Klimawirkung** der wesentlichen Emissionen (NH_3, NO_x und N_2O), dass die im Normalbetrieb emittierten Emissionen keinen nennenswerten Einfluss haben werden. Die ermittelte THG-Wirkung eines großen Modellterminals auf Basis konservativer Emissionsgrenzwerte (insb. für Lachgas, N_2O) liegen in etwa bei einem vergleichbaren CO_2-Ausstoß von 6.400 Personen in Deutschland.

Unter realen Betriebsbedingungen ist darüber hinaus aufgrund der entsprechend dem Stand der Technik erwarteten wesentlich geringeren Emissionen eine (zum Teil deutlich) geringere Auswirkung auf die Umwelt wahrscheinlich.

Insgesamt lässt sich auf Basis der vorliegenden Analysen von einer sehr geringen Zusatzbelastung durch den Normalbetrieb einer eingeschränkten Zahl an NH_3-Terminals für die Umwelt ausgehen. Detailanalysen für spezifische Standorte bleiben jedoch erforderlich, um standortspezifische Besonderheiten wie empfindliche Ökosysteme oder die bestehende Hintergrundbelastung zu berücksichtigen. Darüber hinaus sind Auswirkungen der NH_3-Anlieferung (via Schiff) sowie der Weitertransport mittel NH_3-Kesselwagen oder H_2-Pipeline nicht Teil der vorliegenden Analyse.

Definition der Störfallszenarien

Im Rahmen einer **Datenbankrecherche** wurden insgesamt 59 Vorfälle in der Vergangenheit mit Freisetzung von Ammoniak in der Literatur identifiziert und näher betrachtet. Die Analysen zeigen, dass hiervon 46 Vorfälle der Kategorie „Austritte von Ammoniak bei der Lagerung oder dem Transport druckverflüssigtem Ammoniak“ (etwa via Kesselwagen) zugeordnet werden und daher nicht im unmittelbaren Fokus der Analysen stehen. Die identifizierten verbleibenden

[4] Ein Unterschreiten des Abschneidekriteriums im Rahmen der FFH (Flora-Fauna-Habitat)-Verträglichkeitsprüfung ermöglicht es, von einer weiteren Betrachtung des Stickstoffeintrages einer geplanten Anlage abzusehen, da davon auszugehen ist, dass der vorhabensbedingte Stickstoffeintrag bei einem Wert unter 0,3 kg ha^{-1} a^{-1}sein FFH-Gebiet nicht erheblich beeinträchtigen wird.

[5] Siehe https://gis.uba.de/website/depo1/de/index.html.

[6] Die Werte basieren auf einer Abschätzung des UBA innerhalb des RegioNat-Projekts, bei dem regionale Stickstoffminderungserfordernisse quantifiziert wurden. Die Veröffentlichung erfolgte im Januar 2026 nach Abschluss der Schlussredaktion für die vorliegende Studie unter https://www.uba.de/n306339en.

Vorfälle werden beschrieben und jeweils unter Angabe diverser Kennzahlen charakterisiert. Mit Blick auf den Studienfokus liegt der Schwerpunkt der Diskussion auf Störfall-Ereignissen bzw. Vorfällen mit Lagerung kaltverflüssigten Ammoniaks. Ziel der Zusammenstellung ist eine Übersicht bisheriger Ereignisse mit Ammoniakfreisetzung als Basis für die Entwicklung möglicher Störfallszenarien. Folglich steht die Ursache im Vordergrund der Kurzbeschreibung, sowie ein Verweis auf jeweils weiterführende Literatur.

Die gängige Nomenklatur im Rahmen der Störfall-Verordnung bildet die Basis für die Definition und Diskussionen der Störfallszenarien. Die Definitionen der Störfallszenarien hinsichtlich der Betreiberpflichten zur Verhinderung bzw. Begrenzung der Auswirkungen zeigen, dass sich diese auf die beiden Gruppen der (i) zu verhindernden Störfälle, sowie der (ii) Dennoch-Störfälle beschränken. Folglich erscheint es im Rahmen dieser Studie sinnvoll und geboten, die **Szenariendefinition** für die nachfolgenden Emissions- bzw. Immissionsbetrachtungen im Störfall auch auf Fälle dieser Gruppen zu beschränken in Anlehnung an die aktuelle Anlagengenehmigungspraxis oder auch für eine geeignete Standortauswahl.

Ziel ist es, durch exemplarische Szenarien eine Ersteinschätzung hinsichtlich

- des angemessenen Sicherheitsabstands für die Bauleitplanung bzw. Standortauswahl (Dennoch-Szenarien in Anlehnung an KAS-18 – Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$) sowie
- für die Katastrophenschutzplanung (KatS) (Dennoch-Szenarien in Anlehnung an SFK-GS-45 mit PGS 12 als Erkenntnisquelle – Dennoch-Szenarien$_{KatS}$)

zu ermöglichen. Auch hier gilt, dass die Ergebnisse nur im Kontext der jeweiligen Annahmen und Erläuterungen Gültigkeit haben.

Ereignis- und Störfallbetrachtung für die Modellterminals

In einem ersten Schritt wurden Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ für die Freisetzung von NH_3 bzw. H_2 definiert und diskutiert. Die ermittelten angemessenen Sicherheitsabstände dieser Szenarien zur Unterschreitung des AEGL-2-Werts liegen bei etwa 80 – 450 m.

Überdies wurden weitere Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ untersucht, bei denen der Austritt einer sogenannten größten zusammenhängenden Masse (GZM) in Anlehnung an PGS 12 als Erkenntnisquelle angenommen wurde. In diesen Fällen liegen die freigesetzten NH_3-Mengen in Abhängigkeit des Szenarios bei zwischen 80 kg und 29 t Ammoniak.[7] Die ermittelten Reichweiten bis zur Unterschreitung des AEGL-2 Werts liegen bei bis zu 1400 m (Abriss Leitung DN 600 mit kaltverflüssigtem NH_3 über Wasser).

Einige der **Haupterkenntnisse aus den Berechnungen** lauten:

- Die numerischen Ergebnisse sind als **Erwartungswerte mit erheblichen Streuungen** zu verstehen und geben einen Eindruck bezüglich der Größenordnungen.
- Eine **Segmentierung der Anlage** zur Begrenzung der größten zusammenhängenden Masse kann zur Verringerung der Schadensreichweiten im Leckagefall führen, da hierdurch geringere Stoffmengen freigesetzt werden. Allerdings ist zu beachten, dass die Installation von z. B. zusätzlichen aktiven Absperrarmaturen auch zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Leckagen führen kann.

[7] Es sei darauf verwiesen, dass aufgrund des angenommenen hohen Grades an Segmentierung die größte Zusammenhängende Menge (GZM) von 80 kg bis 29 t NH_3 deutlich unter den maximal möglichen Menge einer vollständigen Leitungs- bzw. Tankleckage mit Tankvolumina von >10.000 t NH_3 liegt.

- **Rückhaltemaßnahmen** für flüssiges NH_3 zur Begrenzung von entstehenden Lachen können die Schadensreichweiten durch verdampfendes NH_3 signifikant verringern.
- Die **Wirkung** von Bränden, Explosionen und/oder Toxizität infolge einer Gefahrstofffreisetzung ist bei der Anlagenplanung hinsichtlich des zu beherrschenden Gefahrenpotenzials durch „benachbarte Anlagen" sowohl unter Berücksichtigung des Dennoch-Szenarios$_{KAS-18}$ (bzw. KAS-63) als auch des Dennoch-Szenarios$_{KatS}$ bei der statischen und lüftungstechnischen Auslegung der Anlage/Gebäude zu berücksichtigen, insbesondere für Gebäude mit sicherheitstechnischer Relevanz für die Anlage (z. B. Leitwarte/Messwarte). Es sind ggf. andere Beurteilungswerte heranzuziehen, z. B. für Gebäudestabilität aus den Leitfäden.
- Der **Einfluss des Winds** ist hinsichtlich der Verschiebung des Konzentrationsschwerpunkts der Ammoniakwolke in Windrichtung zu berücksichtigen. Ein Windrichtungsanzeiger kann Aufschluss darüber geben, in welche Richtung sich die Ammoniakwolke bewegen wird.
- Die potenzielle **Klimawirkung der untersuchten Störfälle** ist vor dem Hintergrund der szenariengemäß relativ kleinen Austrittsmengen und des Auftretens als Einzelereignis zu vernachlässigen.

Fazit und Ausblick

In der Gesamtbetrachtung sind, mit Blick auf den **Normalbetrieb**, unter den getroffenen Annahmen keine signifikanten Zusatzbelastungen auf die Umwelt durch eine eingeschränkte Zahl neuer Ammoniak-Terminals in Deutschland zu erwarten. Punktuell kann es – in Abhängigkeit des jeweiligen Standorts, der Hintergrundbelastung sowie der entsprechenden Ökosysteme – jedoch zu erhöhten bzw. relevanten zusätzlichen Lasteinträgen kommen.

Die im Rahmen der Studie durchgeführten **Störfallanalysen** haben gezeigt, dass sich durch (schadens-)begrenzende Maßnahmen wirksam die Reichweiten der berechneten angemessenen Sicherheitsabstände bzw. bis zur Unterschreitung des Beurteilungswerts reduzieren lassen. Dies gilt sowohl hinsichtlich der untersuchten Szenarien zur Ermittlung des angemessenen Sicherheitsabstands (Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$) als auch für Szenarien für die Katastrophenschutzplanung (Dennoch-Szenarien$_{KatS}$), letztere mit einer Segment-Freisetzung von bis zu 29 t Ammoniak (angenommen in Anlehnung an PGS 12 als Erkenntnisquelle).

Unabhängig von dieser Gesamtbetrachtung bleibt eine standortabhängige Vorhabensprüfung geboten, die sowohl die bestehende Hintergrundbelastung als auch die vorhabensbedingte Zusatzbelastung durch Ammoniak-Terminals im konkreten Fall bewertet.

Das **Fehlen von verbindlichen Grenzwerten** für das Abgas von Ammoniak-Crackern im Normalbetrieb stellt einen Unsicherheitsfaktor in dieser Studie und den Ergebnissen dar. Dies ist auch für die anstehenden Genehmigungsverfahren zu erwarten. Hier sollte baldmöglichst eine Regelung erfolgen, die die von den Technologie-Lizenzgebern erwarteten Emissionen im Normalbetrieb berücksichtigt.

Abschließend und wesentlich sei auch noch auf den **Stand der Sicherheitstechnik für Ammoniak-Terminals** verwiesen. Dieser ist derzeit auf dem Prüfstand und wird international diskutiert und weiterentwickelt (etwa im Rahmen der 2025 veröffentlichten PGS 12 in den Niederlanden). Dies hat teilweise erheblichen Einfluss auf die technische Ausführung eines NH_3-Terminals (z. B. hinsichtlich der Tankausführung, der Rückverflüssigung von Pendelgas aus Transportschiffen und Kesselwagen, sowie der notwendigen Segmentierung von Rohrleitungen) und damit auf die Wahrscheinlichkeit und Auswirkung von Schadensereignissen. Ohne rechtzeitige und ausreichende Koordinierung auf Behördenebene drohen Inkonsistenzen in der

Genehmigungspraxis der einzelnen Bundesländer, was erhebliche Auswirkungen auf die Projektkosten, sowie Unsicherheiten bei der öffentlichen Wahrnehmung zur Folge hätte.

Darüber hinaus bleibt festzuhalten, dass individuelle **anlagenspezifische Betrachtungen** für die künftige Anlagenplanung im Hinblick auf die StörfallV in jedem Fall durchzuführen sind (insbesondere mit Blick auf die Anlagengröße und das (stoffliche) Gefahrenpotenzial). Hierbei ist eine Berücksichtigung potenzieller Dennoch-Szenarien unerlässlich, um ein mögliches Gefahrenpotenzial zu reduzieren und eine Begrenzung des Schadensausmaßes sicherzustellen – und zwar unabhängig von der Einhaltung des Stands der Technik bzw. der Sicherheitstechnik.

Die Frage hinsichtlich der **Eignung von Ammoniak** als Wasserstoffträger bzw. dessen potenzielle Präferenz gegenüber anderen Wasserstofftransportoptionen (z. B. H_2-Pipeline) **geht über rein technische, ökonomische und Umweltaspekte hinaus**. Beispielweise ist sie auch vor dem Hintergrund einer sich verändernden geo- und sicherheitspolitischen Lage zu betrachten. Dabei ist zu prüfen, ob bestehende oder zusätzliche Risiken gegebenenfalls durch den Einsatz vergleichbarer Technologien gesenkt werden können.

Summary

Background and Objective

The research project "Ammonia as Hydrogen Carrier – Questions and Challenges of Technology in Case of Large-Volume Import of Ammonia (NH_3) and its Environmental Effects" investigates ammonia terminals including crackers as an important aspect of the hydrogen supply chain in the form of ammonia to Germany. The study was commissioned by the German Federal Environmental Agency (UBA) and was developed by a consortium led by LBST, ILF and TÜV SÜD between July 2024 and January 2026.

The **aim of the study** is to investigate possible effects of large-scale ammonia import as a potential hydrogen vector on the environment in Germany and to characterise their potential cumulative effects in a holistic analysis. The analysis focuses on ammonia terminals, including tank farms and NH_3 crackers for hydrogen production. The present study does not include the upstream delivery of ammonia by ship and the downstream onward transport of NH_3 in tank wagons and/or H_2 in pipelines.

In order to identify potential criticalities at an early stage, the analysis of emissions in normal operation is carried out by means of a worst-case analysis of generic and prototypical terminals. In addition, selected release scenarios (urban land-use planning based on German KAS-18 guideline and scenarios for external emergency planning based on SFK-GS 45 as a source of insight with a segment release of ammonia derived from Dutch PGS 12) are discussed with regard to their possible effects on protected objects according to German § 3 (5d) BImSchG.

A further detailed analysis of individual locations and projects, as required e.g. in the context of approval procedures, urban land-use planning or external emergency planning, cannot be replaced by the present study. Furthermore, no recommendations or forecasts are given regarding the future suitability or significance of ammonia as a hydrogen import vector for Germany.

Methodological approach

In a first step, the expected import volumes are described on the basis of the current terminal projects in Germany and studies for H_2 import scenarios and, based on this, generic model terminals and layouts are developed (including NH_3 storage and NH_3 cracking plants). These form the basis of a general discussion about potentially expected emission quantities of the NH_3 terminals as well as their environmental effects with regard to different dimensions in normal operation. The results are also classified against the background of the existing ecosystems and pollutant loads in Germany.

In a second step, based on generic example locations, **incident scenarios** are designed as release scenarios for operating areas according to the German *Störfall-Verordnung* and possible effects on protected objects according to § 3 (5d) BImSchG are discussed. The aim is to enable an initial assessment with regard to the appropriate safety distance (so-called *Dennoch-Szenarien* based on KAS-18 – Dennoch-Szenarien$_{KAS\text{-}18}$) as well as for disaster management planning (*Katastrophenschutzplanung* – KatS, based on SFK-GS-45 as a source of insight with a segment release of ammonia derived from PGS 12 – Dennoch-Szenarien$_{KatS}$). Again, it should be noted that the results are only valid in the context of the respective assumptions and explanations and should not be put out of context.

Overall, it should be emphasized that the analyses only allow limited informative value with regard to individual plants and that the focus is on the holistic view of future hydrogen imports via ammonia and the NH_3 terminals required.

Estimating ammonia import demand

Various studies were evaluated to estimate future requirements. For example, the German government predicted import demand of 45–90 TWh of H_2 and derivatives for 2030.[8] Assuming that 50% of this will be met by ammonia, this results in ammonia import requirements of about 5.2 to 9.9 million tons per year.

For the present study, taking into account current production volumes (2.1 million tons/year in 2023), existing and planned terminal capacity (approx. 7.5 million tons/year), and the available studies, a conservative estimate of 10 million tons/year of ammonia imports in 2030 is assumed.[9]

Definition of model terminals

Selection criteria and capacities for ammonia model terminals were defined based on estimates of import demands and announced projects. Three model terminals were defined as the basis for all further analysis:

Tabelle 6: Parameters of the defined model terminals

Parameter	Model Terminal 1 (large)	Model Terminal 2 (medium)	Model Terminal 3 (small)
Location	Coast– Industrial area	Coast– Industrial area	Inland Waters – Green-field
NH_3 Capacity	3 million t/a	1 million t/a	0.3 million t/a
Storage Tanks	2 x 50,000 t	2 x 25,000 t	25,000 t
Capacity NH_3 cracker	2 x 1 million t/a	1 x 0.7 million t/a	1 x 0.2 million t/a

All model terminals consist of an unloading unit at the jetty for cryogenic ammonia, an ammonia tank farm with reliquefication, one or two ammonia cracking plants (each with a cracking capacity of 2/3 of the total capacity), and NH_3 tank car loading facilities. Furthermore, each model terminal has a flare and other operating systems. The model terminals are assumed to use the best available technology and comply with the latest safety standards.

Emission sources of the model terminals during normal operation

The exhaust gases from the NH_3 cracking reactor were identified as the only significant source of NH_3, NO_x, and N_2O emissions during normal operation. In comparison, flare and diffuse emissions from transport couplings and flanges are negligible.

Emission limits for ammonia crackers

Since ammonia cracking plants are not yet in commercial operation, there are no specific national emission limits. The following values are based on expected or conservatively derived limits. The actual emissions expected by plant manufacturers are likely to be significantly lower when the best available technology is used.

[8] For 2030, a demand of 95 to 130 TWh of hydrogen and derivatives is expected in Germany, of which 50 to 70% is expected to be imported. Source: Update of the National Hydrogen Strategy (2023).

[9] It is likely that not the entire import volume will be cracked into hydrogen, but a smaller proportion will be landed, transported on and used as ammonia. In the sense of a conservative assessment, this aspect will not be considered further here.

Limit values or guideline values for the exhaust gas cracker reactor (based on 3% O_2, dry, annual average values) were assumed as follows:

- Ammonia (NH_3): 10 mg/Nm^3 (expected limit value/working hypothesis).
- Nitrogen oxides (NO_x): 100 mg/Nm^3 (expected limit value/working hypothesis).
- Nitrous oxide (N_2O): 70 mg/Nm^3 (guideline value, analogous to nitric acid plants)

Mass emission flows (maximum values)

Based on the assumed limit values described above, the following maximum mass emission flows of the critical components result for the three model terminals (annual average values with full utilization of the underlying limit values).

Tabelle 7: Emission mass flows from the ammonia cracker

	Model Terminal 1 (large)	Model Terminal 2 (medium)	Model Terminal 3 (small)
NH_3 (kg/h)	4	1.4	0.4
NO_x (kg/h)	40	14	4.0
N_2O (kg/h)	28	9.8	2.8

These mass flows form the basis for further immission considerations.

Dispersion calculations for example locations

For the analysis of environmental impacts, the defined model terminals were placed at three generic example locations.

- Example location 1: Model terminal 1 (large) at a **deep-water port on the North Sea or Baltic Sea, industrial area**
- Example location 2: Model terminal 2 (medium) at a **deep-water port on a lower river near a city**
- Example location 3: Model terminal 3 (small) at an **inland location** (e.g., Rhine to Basel, Elbe to Wittenberge, Weser to Bremen)

The dispersion calculations were performed in IMMI 2024 with AUSTAL for each of the three example locations, taking into account the respective topological features. The results of the dispersion calculations show location-dependent profiles that are particularly influenced by wind data and roughness assumptions. The deposition and concentration values are quantified using a grid model with a cell size of 500 m x 500 m – sufficiently accurate to make general statements about the level of the corresponding loads and general environmental impacts for the example locations. Furthermore, the concentration development is determined as a function of the distance from the emission source.

Tabelle 8 and Tabelle 9 exemplarily show the results of the dispersion calculations for model terminal 1 (large) at sample location 1 (deep-water port in an industrial area).

Tabelle 8: Determined mass concentrations for model terminal 1 at example location 1

[µg / m³]	Maximum concentration per 500x500 m	Average concentration in grid area				
		1x1 km / 0-0.5 km	2x2 km / 0.5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
NH_3 concentration	0.990	0.593	0.437	0.172	0.043	0.013
NO_x concentration	11.600	6.775	5.300	2.283	0.649	0.215
N_2O concentration	8.139	4.746	3.714	1.597	0.455	0.151

Model terminal 1: Ammonia capacity 3 million t NH_3/a; Example location 1: Deep-water port on the North Sea or Baltic Sea.

Tabelle 9: Determined N deposition values for model terminal 1 at example location 1

[kg N ha^{-1} a^{-1}]	Maximum deposition per 500x500 m	Average deposition in grid area				
		1x1 km / 0-0.5 km	2x2 km / 0.5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
NH_3 deposition	2.314	1.381	1.030	0.404	0.101	0.027
NO_2 deposition	0.442	0.247	0.218	0.114	0.045	0.021
NO deposition	0.711	0.413	0.324	0.134	0.035	0.010
Total N deposition	-	**2.041**	**1.572**	**0.652**	**0.181**	**0.058**

Model terminal 1: Ammonia capacity 3 million t NH_3/a; Example location 1: Deep-water port on the North Sea or Baltic Sea.

Immission assessment

Immissions on terrestrial ecosystems are assessed by comparing total nitrogen deposition with the so-called empirical critical load[10] for relevant ecosystems.

Tabelle 10: Overview of empirical critical loads (CL_{emp}) for selected ecosystems

Ecosystems (Categories)	CL_{emp} [kg N ha^{-1} a^{-1}]	Ecosystems (Categories)	CL_{emp} [kg N ha^{-1} a^{-1}]
Trees and forest ecosystems	3-15	Grassland	10-25
Moors	5-25	Coastal habitats	5-20

Source: Values based on (Galert, Geupel, Loran, & Scheuschner, 2024).

The results of the dispersion calculations show that the average values of the additional load determined around the plant are consistently below this critical load. Consequently, a low eutrophicating influence can be assumed. At the same time, under the assumed conservative emission values, the cut-off criterion of the FFH impact assessment[11] in the immediate vicinity (< 2 km x 2 km around the emission source) of 0.3 kg ha^{-1} a^{-1} is exceeded. Depending on the ecosystems in the vicinity of the project, it seems sensible to include the existing background

[10] Critical load refers to the scientifically determined load limits that describe the effects of air pollutants on the environment. If these exposure limits are complied with or undercut, it can be assumed, according to current knowledge, that a selected protected ecosystem (ecological receptor) will not be damaged either acutely or in the long term

[11] Falling below the cut-off criterion in the context of the FFH (Flora-Fauna-Habitat) impact assessment makes it possible to refrain from further consideration of the nitrogen input of a planned plant, since it can be assumed that the project-related nitrogen input will not significantly impair its FFH area at a value below 0.3 kg ha^{-1} a^{-1}.

load in the detailed assessment of a plant (e.g., based on the PINETI-4 project or the ASCII data set of the UBA map service background load data nitrogen[12]).

With regard to nitrogen input via deposition in **water bodies**, values of up to a maximum of 2 kg ha^{-1} a^{-1} in the vicinity of the plant (1 km x 1 km grid area) are generally not expected to exceed the Critical Atmospheric Input (CAI) values for the North Sea and Baltic Sea over a large area. According to the results of the RegioNat project[13], these are 5.78 kg ha^{-1} a^{-1} (North Sea) and 3.31 kg ha^{-1} a^{-1} (Baltic Sea) for total nitrogen input.

When considering the effects of ammonia emissions on **vegetation**, the potentially toxic effect of ammonia on plants must be taken into account. A comparison of the ammonia concentrations determined around the emission sources with the average critical levels (CLe) specified in the literature does not reveal any continuous exceedance within the grid areas considered (500 m x 500 m), both for lichens and mosses (annual average 1 µg/m^3) and for higher plants (annual average: 3 µg/m^3).

Finally, calculations regarding the (direct and indirect) **climate impact** of the main emissions (NH_3, NO_x, and N_2O) show that the emissions generated during normal operation will have no significant impact. The calculated GHG impact of a large model terminal based on conservative emission limits (especially for nitrous oxide, N_2O) is roughly equivalent to the CO_2 emissions of 6,400 people in Germany.

Under real operating conditions, the impact on the environment is likely to be (in some cases significantly) lower due to the significantly lower emissions expected in line with the state of the art.

Overall, based on the analysis, it can be assumed that the normal operation of a limited number of NH_3 terminals will have a very low additional impact on the environment. However, detailed analyses for specific locations remain necessary in order to take into account location-specific features such as sensitive ecosystems or existing background pollution. Furthermore, the impacts of NH_3 delivery (by ship) and onward transport by NH_3 tank cars or H_2 pipelines are not part of the present analysis.

Definition of accident scenarios

A **database research** identified a total of 59 past incidents involving ammonia releases, which were examined in detail. The analyses show that 46 of these incidents fall into the category of "ammonia leaks during the storage or transport of pressurized liquefied ammonia" (e.g., via tank cars) and are therefore not the immediate focus of the analyses. The remaining incidents identified are described and characterized by various key figures. In view of the focus of the study, the discussion concentrates on major accident events or incidents involving the storage of cold-liquefied ammonia. The aim of the compilation is to provide an overview of previous events involving ammonia releases as a basis for the development of possible major accident scenarios. Consequently, the brief description focuses on the cause and includes references to further literature.

The common nomenclature used in the German *Störfall-Verordnung* forms the basis for the definition and discussion of the accident scenarios (*Störfallszenarien*). The definitions of these accident scenarios with regard to the operator's obligations to prevent or limit the effects show that these are limited to the two groups of (i) accidents to be prevented (*zu verhindernde*

[12] See https://gis.uba.de/website/depo1/de/index.html.

[13] The values are based on an estimate by UBA within the RegioNat project, in which regional nitrogen reduction requirements were quantified. The report was published in January 2026 after final editing of the present study and can be found here: https://www.uba.de/n306339en.

Störfälle) and (ii) *Dennoch-Störfälle*. Consequently, within the scope of this study, it seems sensible and appropriate to limit the **scenario definition** for the following emission and immission considerations in the event of an accident to cases in these groups, in line with current plant approval practice or for a suitable site selection.

The aim is to use exemplary scenarios to provide an initial assessment of

- the appropriate safety distance for urban land-use planning and site selection (scenarios (*Dennoch-Störfälle)* based on KAS-18 – *Dennoch-Scenarien*$_{KAS-18}$) and
- scenarios for external emergency planning (*Katastrophenschutzplanung*) (drawing from SFK-GS-45 as a source of insight) involving a segment release of ammonia (derived from PGS 12 – *Dennoch-Scenarien*$_{KatS}$).

It should be noted that also in this case, the results are only valid in the context of the respective assumptions and explanations.

Analysis of accident scenarios for the model terminals

In a first step, the scenarios *Dennoch-Szenarien*$_{KAS-18}$ for the release of NH_3 and H_2 were defined and discussed. The appropriate safety distances determined for these scenarios to remain below the AEGL-2 value are approximately 80–450 m.

In addition, further scenarios, so called *Dennoch-Scenarien*$_{KatS}$, were examined in which the release of a largest contiguous mass (*größte zusammenhängende Menge*, GZM) was assumed based on based on PGS 12. In these cases, the amounts of NH_3 released range between 80 kg and 29 t of ammonia, depending on the scenario.[14] The ranges determined until the AEGL-2 value is undershot are up to 1400 m (breakage of DN 600 pipe with cold-liquefied NH_3 over water).

Some of the **main findings from the calculations** are:

- The numerical results should be understood as **expected values with considerable variation** and give an impression of the orders of magnitude involved.
- **Segmenting the plant** to limit the largest contiguous mass (GZM) can reduce the extent of damage in the event of a leak, as this results in smaller quantities of material being released. However, it should be noted that the installation of additional active shut-off valves, for example, can also lead to an increased probability of leaks occurring.
- **Containment measures** for liquid NH_3 to limit the formation of pools can significantly reduce the damage range caused by evaporating NH_3.
- The **effects of fires, explosions, and/or toxicit**y resulting from the release of hazardous substances must be taken into account in the design of the plant with regard to the potential hazards to be controlled by "neighboring plants," taking into account both the *Dennoch-Szenarien*$_{KAS-18}$ (or KAS-63) and *Dennoch-Scenarien*$_{KatS}$ in the static and ventilation design of the plant/building, especially for buildings with safety relevance for the plant (e.g., control room/measuring station). Other assessment values may need to be used, e.g., for building stability from the guidelines.

[14] It should be noted that, due to the assumed high degree of segmentation, the largest contiguous quantity (GZM) of 80 kg to 29 t NH_3 is significantly below the maximum possible quantity of a complete pipe or tank leak with tank volumes of >10,000 t NH3.

- The **influence of wind** must be taken into account with regard to the shift in the center of gravity of the ammonia cloud in the direction of the wind. A wind direction indicator can provide information about the direction in which the ammonia cloud will move.
- The **potential climate impact of the incidents investigated** is negligible given the relatively small quantities released in the scenarios and the occurrence as a single event.

Conclusion and outlook

Overall, based on **normal operation** and the assumptions made, no significant additional environmental impact is expected from a limited number of new ammonia terminals in Germany. However, depending on the specific location, background pollution, and the corresponding ecosystems, there may be isolated cases of increased or relevant additional pollution.

The accident analyses (*Störfallanalysen*) carried out as part of the study have shown that damage-limiting measures can effectively reduce the ranges of the calculated appropriate safety distances or until the AEGL-2 value is undershot. This applies both to the scenarios examined to determine the appropriate safety distance (*Dennoch-Szenarien*$_{KAS-18}$) and to scenarios for disaster management planning (*Dennoch-Szenarien*$_{KatS}$), the latter with a segment release of up to 29 tons of ammonia (assumed based on PGS 12 as a source of information).

Regardless of this overall assessment, a site-specific project assessment is still required, which evaluates both the existing background pollution and the additional pollution caused by ammonia terminals in the specific case.

The **lack of binding limit values** for the exhaust gas from ammonia crackers in normal operation represents a factor of uncertainty in this study and its results. This is also to be expected for the upcoming approval procedures. Regulations should be put in place as soon as possible that take into account the emissions expected by technology licensors during normal operation.

Finally, it is also important to refer to the **state of the art in safety technology for ammonia terminals**. This is currently being reviewed and is being discussed and further developed internationally (e.g., in the context of PGS 12, published in 2025 in the Netherlands). This has a significant influence on the technical design of an NH_3 terminal (e.g., with regard to tank design, the reliquification of swing gas from transport ships and tank cars, and the necessary segmentation of pipelines) and thus on the probability and impact of damage events. Without timely and adequate coordination at the regulatory level, there is a risk of inconsistencies in the approval practices of the individual federal states, which would have a significant impact on project costs and lead to uncertainty in public perception.

Furthermore, it should be noted that individual **plant-specific considerations** must be carried out in any case for future plant planning with regard to the *Störfall-Verordnung* (in particular with regard to plant size and the (material) hazard potential). In this context, it is essential to consider potential *Dennoch-Szenarien* in order to reduce potential hazards and limit the extent of damage – regardless of compliance with the state of the art or safety technology.

The question of the **suitability of ammonia as a hydrogen carrier** or its potential preference over other hydrogen transport options (e.g., H_2 pipelines) **goes beyond purely technical, economic, and environmental aspects.** Instead, it must also be considered against the backdrop of a changing geopolitical and security situation and whether existing or additional risks can be reduced by using comparable alternative technology options.

1 Einleitung

Vor dem Hintergrund der hohen Bedeutung von Wasserstoff für das Gelingen der Energiewende in Deutschland geraten mögliche Importpfade zunehmend in das öffentliche Interesse. Die Bundesregierung geht davon aus, dass ein erheblicher Teil der bis 2030 benötigten Wasserstoffmengen nur durch Importe gedeckt werden kann[15]. Neben dem Transport via Pipeline steht dabei insbesondere der Schiffsimport in Form von flüssigen Derivaten wie Ammoniak (NH_3) oder Methanol im Fokus, da sich diese gegenüber verflüssigtem Wasserstoff durch eine höhere Energiedichte auszeichnen.

Das Forschungsvorhaben **„Ammoniak als Wasserstoffträger - Fragen und Herausforderungen der Technik bei großvolumigem Import von Ammoniak und deren Umweltauswirkungen“** untersucht wesentliche Aspekte des Wasserstoffimports in Form von Ammoniak. Die Studie wurde vom UBA beauftragt und von einem Konsortium unter Federführung der LBST mit ILF sowie TÜV SÜD von Ende 2024 bis Ende 2025 erarbeitet.

Zu den untersuchten Themen zählen die zu erwartenden (zusätzlichen) Importmengen unter Berücksichtigung der aktuellen Terminalprojekte und Studien in Deutschland. Auf Basis aktueller Prognosen werden **generische Modellterminals** (inkl. NH_3-Lagerung und NH_3-Crackanlagen) entwickelt. Diese stellen die Grundlage einer allgemeinen Diskussion um **potenziell zu erwartende Emissionsmengen der NH_3-Terminals** sowie deren **Umweltwirkungen im Normalbetrieb** dar.

Die so ermittelten Umweltwirkungen dienen als **Anhaltspunkt für die allgemeine Diskussion um die Folgen einer potenziell steigenden Zahl an Ammoniak-Terminals in Deutschland** aufgrund ihrer Rolle für den Import von Wasserstoff. Die Studie kann dabei weder detaillierte Einzelbetrachtungen im Kontext der Genehmigungsverfahren, Bauleitplanung oder Katastrophenschutzplanung individueller Standorte ersetzen, noch Empfehlungen bzw. Prognosen hinsichtlich der künftigen Eignung bzw. Bedeutung von Ammoniak als Wasserstoffimportvektor geben.

Vielmehr geht es um die **Gesamtbetrachtung der möglichen kumulativen Effekte** bei steigender Zahl an Importmengen und -terminals im Kontext des großskaligen NH_3-Imports zu energetischen Zwecken, d.h. als Wasserstoffvektor. Es werden folglich Grenzfall-Analysen zur Ermittlung potenzieller Worst-Case-Szenarien (hinsichtlich der Emissionen im Normalbetrieb) angenommen, die – mit Blick auf individuelle Anlagen – nur eingeschränkte Aussagekraft erlauben. Die Ergebnisse werden zudem vor dem Hintergrund der bestehenden Ökosysteme und Frachten in Deutschland eingeordnet.

In einem weiteren Schritt werden, ausgehend von generischen Beispielstandorten, **Störfall-Szenarien** entworfen und diskutiert, die eine Ersteinschätzung hinsichtlich des angemessenen Sicherheitsabstands (Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$) sowie für die Katastrophenschutzplanung (Dennoch-Szenario$_{KatS}$) erlauben sollen. Auch hier gilt, dass die Ergebnisse nur im Kontext der jeweiligen Annahmen und Erläuterungen Gültigkeit haben und in keinem Fall außer Kontext gesetzt werden sollten.

Der vorliegende Abschlussbericht gliedert sich wie folgt:

[15] „Die Bundesregierung erwartet im Jahr 2030 für Deutschland einen Bedarf an Wasserstoff und Derivaten in Höhe von 95-130 TWh, bei einem Importanteil von 50-70%. Die Wasserstoffnachfrage und entsprechende Importbedarfe werden im Zuge der volkswirtschaftlichen Transformation hin zu Klimaneutralität weiter ansteigen.“ (Auszug aus Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate, BMWK, Juli 2024).

- **Kapitel 2: Entwicklung/Beschreibung von Modellterminals**
  Ausgehend von einem Importszenario für Ammoniak nach Deutschland im Jahr 2030 werden in diesem Kapitel drei beispielhafte Modellterminals mit ihren anwendungstypischen Größen (groß, mittel und klein) und den jeweiligen Anlagenbestandteilen beschrieben. Dabei erfolgt auch eine Beschreibung der jeweiligen Komponenten und Layouts dieser sog. Modellterminals.

- **Kapitel 3: Betrachtung der Emissionen in die Umwelt der Modellterminals**
  Ziel dieses Kapitels ist es, die potenziellen Emissionen am Ammoniakterminal und -Cracker im Normalbetrieb zu identifizieren. Dabei betrachtet werden Emissionen von Ammoniak (NH_3), Stickstoffdioxid (NO_2), Lachgas (N_2O), Stickoxiden (NO_x; bestehend aus Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO_2), Wasserstoff (H_2) und Staub in die Atmosphäre sowie Emissionen von Ammonium (NH_4^+), Nitriten (NO_2^-), Nitraten (NO_3^-) und Gesamtstickstoff über das Abwasser. Die angegebenen Emissionswerte leiten sich aus existierenden Grenz- und Orientierungswerten ab (etwa aus der TA Luft). Überdies wurden von Lizenzgebern zur Verfügung gestellte erwartete Emissionswerte zur Diskussion herangezogen.

- **Kapitel 4: Wirkungen der Emissionen im bestimmungsgemäßen Betrieb**
  In diesem Kapitel werden die Wirkungen (Immissionen) der für den Normalbetrieb gemäß Kapitel 3 ermittelten (Schadstoff-)Emissionen hinsichtlich unterschiedlicher Wirkungskategorien diskutiert. Diese umfassen die Wirkdimensionen Eutrophierung von terrestrischen Ökosystemen oder Gewässern, der toxischen Wirkung auf die Vegetation sowie der Klimawirkung der einzelnen Schadstoffemissionen. Die Berechnungen zur Bestimmung und Ausbreitung der Emissionen erfolgen mithilfe der Software IMMI 2024 mit dem Berechnungsmodell AUSTAL 3.3.0, welches auf den Anhang 2 der TA Luft 2021 basiert.

- **Kapitel 5: Ereignis-/Störfallbetrachtung**
  Das übergeordnete Ziel dieses Kapitels ist es, auf Basis des in Kapitel 2.2 definierten Ammoniak-Modellterminals 1 (groß – 3 Mio. t NH_3-Kapazität/Jahr) eine Diskussion und Bewertung der Emissionen vorzunehmen, die im Falle von vordefinierten Störfallszenarien aus diesem Ammoniakterminal freigesetzt werden können. Hierbei ist zu beachten, dass den Analysen spezifische Annahmen zugrunde liegen, die zwingend für die Einordnung der Ergebnisse zu berücksichtigen sind. Ergänzt wird die Analyse durch eine Zusammenstellung vergangener Vorfälle im Kontext der großskaligen Lagerung von Ammoniak mit Austritt von Ammoniak anhand einer Auswertung ausgewählter nationaler und internationaler Datenbanken und weiterer Literaturquellen. Dies dient dem Zweck, auf dieser Basis mögliche Ursachen für einen Ammoniakaustritt zu beschreiben und eine informierte Definition der nachfolgenden Störfallszenarien vornehmen zu können. Abschließend werden wesentliche Erkenntnisse aus den Berechnungen hinsichtlich der Bedeutung schadensverhindernder und -begrenzender Maßnahmen zusammengefasst.

- **Kapitel 6: Fazit**
  Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse kurz zusammengefasst, in den Kontext der Aufgabenstellung rund um den großskaligen Import von Ammoniak nach Deutschland eingeordnet und ein Ausblick auf weiterführende Analysen und Fragestellungen gegeben.

2 Entwicklung und Beschreibung von Modellterminals und Beispielstandorten

Kapitel 2 dieses Berichts behandelt, ausgehend von einem Importszenario für Ammoniak nach Deutschland im Jahr 2030, die Definition und Beschreibung von Modellterminals mit ihren anwendungstypischen Größen.

Zunächst werden auf Basis diverser Literaturstudien existierende Importprognosen für Ammoniak nach Deutschland skizziert und diskutiert und hieraus ein Basisszenario für die im Folgenden der Studie angenommenen Importmengen abgeleitet (Kapitel 2.1). Diese Mengen dienen auch als Ausgangspunkt für die Definition dreier Modellterminals unterschiedlicher Größe und Ausgestaltung (Kapitel 2.2). Eine Detailbetrachtung der jeweiligen Modellterminals inkl. ihrer Komponenten und Layouts erfolgt in Kapitel 2.3. Abschließend werden weitere Gedanken hinsichtlich der Diskussion möglicher Beispielstandorte aufgeführt (Kapitel 2.4).

Diese Ausführungen bilden die Basis für die nachfolgenden Betrachtungen zu den Emissionen und deren Umweltwirkungen.

2.1 Importszenario für Ammoniak nach Deutschland

2.1.1 Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate

Die Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz vom Juli 2024 (BMWK, 2024) unterstützt ausdrücklich den Import von Ammoniak als Wasserstoffträger. Zu diesem Zweck wird die Errichtung von zusätzlichen Ammoniak-Importterminals und entsprechende Belieferung mit Gastankern erwartet.

Zur Gewinnung des gebundenen Wasserstoffes ist eine Aufspaltung des Ammoniaks (Dissoziation) in sog. Ammoniak-Crackern vorgesehen. Die Errichtung dieser Crackanlagen wird parallel zum Bau der Importterminals erwartet.

Aktuell geplante bzw. in Bau befindliche LNG-Terminals werden bereits für künftigen Ammoniakimport angedacht/konzipiert. Auch schiffbasierte Ammoniak-Importterminals (floating storage and regasification units, FSRUs) erscheinen möglich, sofern technisch sinnvoll und wirtschaftlich.

Die Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate definiert allerdings keine konkreten Mengen oder Zeitpläne. Deshalb wird im Folgenden ein möglichst realistisches Importszenario für das Jahr 2030 abgeleitet, das als Leitlinie für die Definition der für diese Studie maßgeblichen Modellterminals dienen wird.

2.1.2 Ammoniakproduktion und -import in Deutschland bis 2023

Die deutsche Ammoniakbilanz der vergangenen Jahre, insbesondere im Jahr 2023 stellt einen wesentlichen Eckpunkt des zu entwickelnden Importszenarios dar.

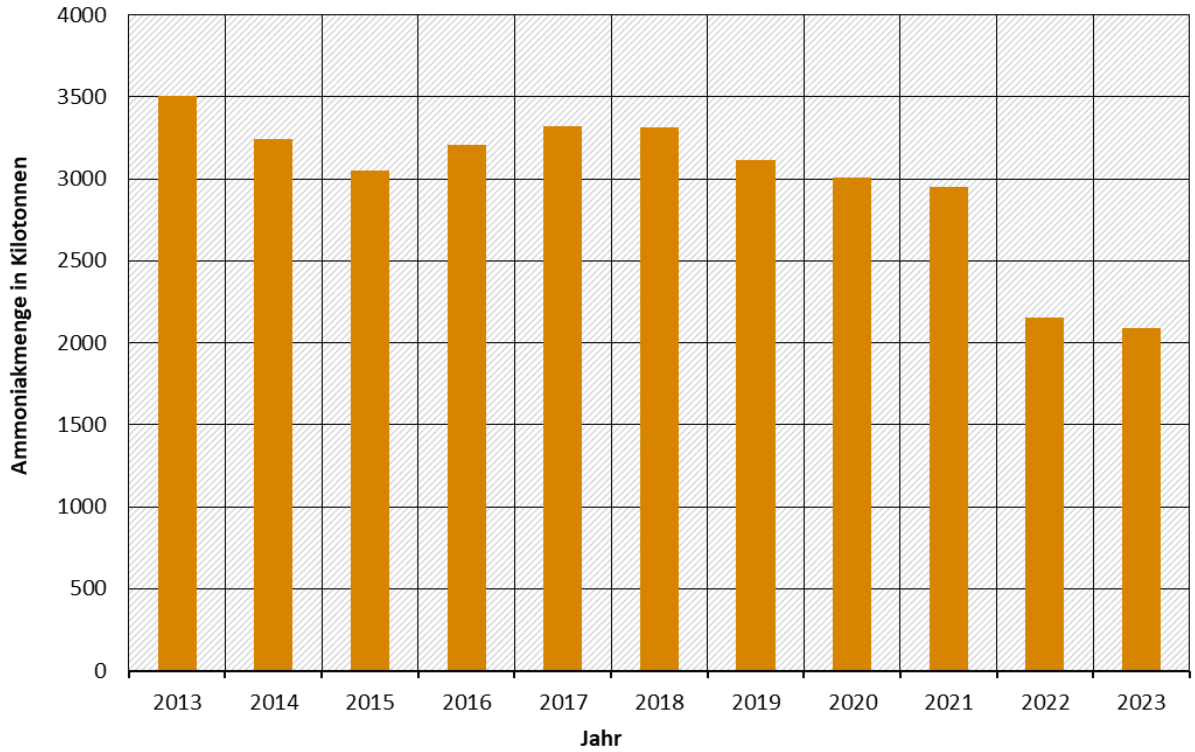
Dabei ist zunächst die aktuelle innerdeutsche industrielle Ammoniakproduktion aus der Nutzung von fossilen Wasserstoffquellen wie Erdgas zu berücksichtigen, die im Rahmen der angestrebten Dekarbonisierung bis 2045 durch „blaues“ (unter Entsorgung des anfallenden CO_2) bzw. „grünes“ (aus erneuerbaren Quellen) hergestelltes Ammoniak zu ersetzen ist.

Abbildung 1 zeigt die Ammoniakproduktion in Deutschland von 2013 bis 2023. Der starke Abfall im Jahr 2022 auf knapp 2,2 Mio. t ist durch den starken Anstieg des Erdgaspreises in Folge des Ukraine-Kriegs verursacht. Im Jahr 2023 wurden nur noch ca. 2,1 Mio. t Ammoniak in

Deutschland produziert, im Wesentlichen an den Standorten Piesteritz (SKW), Brunsbüttel (YARA), Ludwigshafen (BASF) und Köln-Worringen (INEOS).

Obwohl der Erdgaspreis inzwischen wieder deutlich gesunken ist, ist davon auszugehen, dass mittelfristig verstärkt importiertes Ammoniak in der deutschen chemischen Industrie Verwendung findet. BASF hat bereits die Stilllegung einer Ammoniakanlage in Ludwigshafen angekündigt (Olaf Zinke, 2023) und will dafür evtl. „blaues“[16] Ammoniak aus den USA importieren (BASF, 2023).

Abbildung 1: Jährliche Ammoniakproduktion in Deutschland 2013 - 2023



Quelle: (VCI, 2024), korrigiert von Angaben auf N-Basis auf NH_3-Basis

Als Terminals für den Umschlag von Ammoniak stehen derzeit die Terminals in Brunsbüttel (YARA), Rostock (YARA), Stade (DOW) und Ludwigshafen (BASF) zur Verfügung - siehe Tabelle 12.

Der größte und durch sehr große Gastanker (Very Large Gas Carrier, VLGC – ca. 50.000 t Kapazität) am einfachsten zu erreichende Ammoniak-Importterminal ist dabei der Terminal in Brunsbüttel, der in jüngsten Veröffentlichungen (EuropaWire, 2024) mit bis zu 3 Mio. t/Jahr Importkapazität angegeben wurde. Das entspricht einem Anlauf von ca. 60 VLGC pro Jahr. Bisher fehlt die Infrastruktur zur Spaltung des Ammoniaks und zur Weiterleitung des resultierenden Wasserstoffs, was derzeit auch für alle in Betrieb befindlichen Ammoniak-Importterminals gilt. Allerdings ist geplant, dass alle vorhandenen Ammoniakterminals mittelfristig mit dem H_2-Kernnetz verbunden werden. (FNBGAS, 2025)

[16] „Blaues“ Ammoniak meint Ammoniak, das herkömmlich mit Wasserstoff per Dampfreformierung aus Erdgas erzeugt wurde, wobei ein Großteil des anfallenden CO_2 abgetrennt und gespeichert/genutzt wird.

Der Import von Ammoniak ist derzeit für Deutschland noch relativ gering und in 2023 war der Netto-Import sogar leicht negativ.

Dies zeigen die Angaben des Statistischen Bundesamtes in Tabelle 11.

Tabelle 11: Im- und Exportstatistik für wasserfreies Ammoniak

Jahr	Ausfuhr [t]	Einfuhr [t]	Netto-Import [t]
2018	336.340	562.964	226.624
2019	308.617	608.202	299.585
2020	370.909	564.230	193.321
2021	343.077	406.428	63.351
2022	304.326	452.533	148.207
2023	410.200	334.663	-75.537

Auszug Genesis-Datenbank Warengruppe 281410 (wasserfreies Ammoniak)
Quelle: (Statistisches Bundesamt, 2024)

2.1.3 Studien zu künftigen Ammoniakbedarfen

Zur Abschätzung des zu erwartenden Ammoniak-Imports im Jahr 2030 wurden verschiedene Studien ausgewertet. Dabei wird angenommen, dass der Anteil von Ammoniak an den Wasserstoffimporten von 50% im Jahr 2030 auf 20% im Jahr 2050 kontinuierlich sinkt, da der Ammoniakimport nach und nach durch andere, weniger gefährliche und/oder effizientere Wasserstoff-Importwege (Wasserstoff-Pipelines, H_2-Transportschiffe, synthetische Kraftstoffe, andere Wasserstoffträger, etc.) ersetzt wird oder Ammoniakfolgeprodukte direkt importiert werden.

- **Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate** (BMWK, 2024)
  In dieser Quelle wird von einem Importbedarf für Wasserstoff und Wasserstoffderivaten im Jahr **2030** von 45-90 TWh an H_2 und Derivaten ausgegangen. Unter der Annahme, dass dieser Importbedarf zu 50% durch Ammoniak gedeckt wird, ergibt sich ein Ammoniak-Importbedarf von **5,2-9,9 Mio. t/Jahr**[17].
  Für **2045** wird ein Importbedarf von 275-490 TWh prognostiziert. Das ergibt einen Ammoniak-Importbedarf von **19-32 Mio. t/Jahr** bei 30% Deckung durch Ammoniak.

- **Studie „Hintergrund Nationale Wasserstoffstrategie“** (EWI, 2020)
  In dieser Studie wird ein Importbedarf für Wasserstoff und Wasserstoffderivate im Jahr **2050** von 628 TWh vorhergesagt. Geht man auch hier von einer Deckung durch Ammoniak von 30% aus, ergibt sich ein Ammoniak-Importbedarf von **41 Mio. t/Jahr**.

- **Studie „Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem“** (Fraunhofer-ISE, 2021)
  In dieser Studie wurden verschiedene Szenarien für unterschiedliche gesellschaftliche Akzeptanz der notwendigen Maßnahmen zur Erreichung einer Klimaneutralität in Deutschland untersucht. Des Weiteren wurden der H_2-Import sowie der Import von synthetischem Methan (SynGas) und synthetischem Flüssigkraftstoff (SynFuel) separat betrachtet.

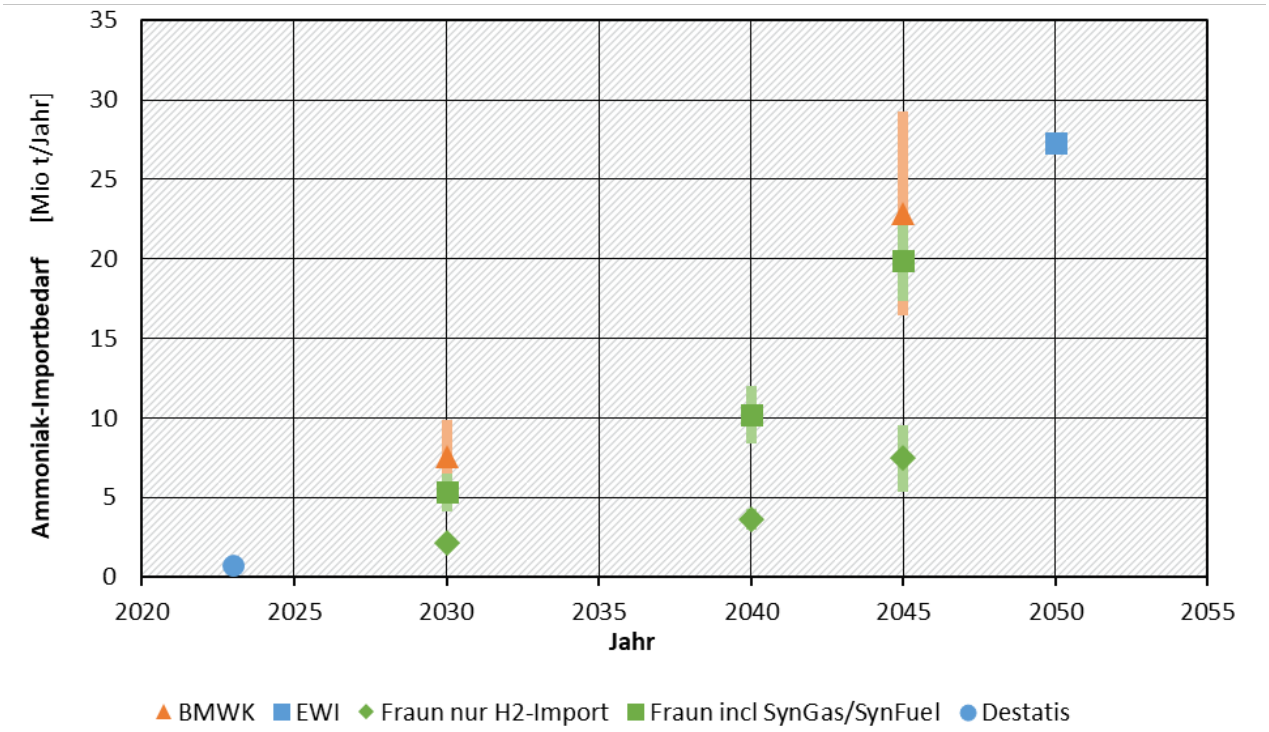
[17] Masse H_2 = Energie H_2 / LHV_{H2}, Masse NH_3 = Masse H_2 / 0,138
(Wasserstoffeffizienz Ammoniak-Cracking = 77,8% bei Restgas-Feuerung)

Die betrachteten Szenarien[18] führen zu Bereichen für den notwendigen Wasserstoffimport in 2030 von 12-20 TWh/Jahr, 2040 von 30-50 TWh/Jahr und in 2045 von 55-125 TWh/Jahr, resultierend in einem Ammoniak-Importbedarf in **2030 von 1,3-2,2 Mio. t/Jahr**, in **2040 von 2,3-3,6 Mio. t/Jahr** und in **2045 von 3,3-7,5 Mio. t/Jahr.**
Nimmt man den Import von Wasserstoff-Derivaten („SynGas" und „SynFuel" entsprechend der oben beschriebenen Definition) hinzu, so ergibt sich ein Importbedarf in 2030 von 38-60 TWh/Jahr, 2040 von 109-669 TWh/Jahr und in 2045 von 290-975 TWh/Jahr, resultierend in einem Ammoniak-Importbedarf in **2030 von 4,1-6,5 Mio. t/Jahr,** in **2040 von 8,4-12 Mio. t/Jahr** und in **2045 von 17,3-22,4 Mio. t/Jahr**.

Abbildung 2 fasst die ausgewerteten Studienergebnisse zusammen.
Im Jahr 2030 liegen alle Prognosen für den Ammoniak-Import nach Deutschland unter 10 Mio. t/Jahr, einige sogar deutlich niedriger. Diese Mengen beinhalten allerdings nicht den Bedarf zum Ersatz des in Deutschland derzeit hergestellten „grauen" Ammoniaks (2,1 Mio. t in 2023).

Für die Jahre ab 2040 streuen die Prognosen erheblich.

Abbildung 2: Prognostizierter Ammoniak-Import nach Deutschland



Soweit die jeweilige Studie Bereiche definiert, sind die Mediane als Symbole und die jeweiligen Bereiche als Balken eingetragen.
BMWK = Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (heute: BMWE = Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, EWI = Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln; Fraun = Fraunhofer Gesellschaft; Destatis = Deutsches Statistik-Informationssystem
Quelle: eigene Darstellung, ILF

[18] Das Szenario 'Beharrung' wurde dabei ausgeschlossen, da zu unwahrscheinlich.

2.1.4 Ammoniakterminals in Deutschland (vorhanden/geplant)

Tabelle 12 zeigt die in Deutschland vorhandenen sowie die derzeit bekannten geplanten neuen Ammoniak-Terminals, mit ihrem jeweiligen Status zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts.

Derzeit existieren vier Ammoniakterminals in Deutschland, davon 3 an der Küste (Brunsbüttel, Stade, Rostock) und einer am Rhein (Ludwigshafen). Der Terminal von DOW in Stade ist derzeit nicht in Betrieb. Keiner der vorhanden Ammoniakterminals hat einen Ammoniak-Cracker zur Erzeugung von Wasserstoff, jedoch sind für Brunsbüttel und Rostock derartige Investitionen angedacht.

Bis 2030 ist demgemäß eine zusätzliche Kapazität zum Ammoniak-Import von ca. 4,6 Mio. t konkret geplant. Dazu könnten noch 1-2 weitere Terminals in ähnlicher Größenordnung sowie zusätzliche Kapazität durch Erweiterung der bereits bestehenden Terminals kommen.

Tabelle 12: Vorhandene und geplante Ammoniak-Importterminals in Deutschland

Ort / Investor	Standort	Kapazität NH3 t / Jahr	Inbetrieb-nahme	Typ, Umfang	Status
Brunsbüttel / YARA	Landeshafen Ostermoor	3.000.000	2024	Vorhandener Terminal mit 2 Jetties, Cracker geplant	In Betrieb
Brunsbüttel / RWE	LNG-Terminal	300.000 2.000.000	2026	Neubau später Erweiterung + Cracker	Geplant (PCI[19]-Projekt)
Hamburg / Mabanaft, Air Products	Blumen-sandhafen	600.000 (Mabanaft, 2024)	2028	Neubau inkl. Cracker	Genehmigung beantragt Juli 2024
Ludwigshafen / BASF	Landeshafen Nord	Nicht veröffentlicht	Vorhanden	Vorhandener Terminal mit 2 Jetties	In Betrieb
Rostock / YARA	Peez, YARA Terminal (Jetty 7)	Nicht veröffentlicht	Vorhanden	Vorhandener Terminal mit 1 Jetty	In Betrieb
Stade / DOW	Seehafen	Nicht veröffentlicht	Vorhanden	Vorhandener Terminal mit 1 Jetties	Derzeit nicht in Betrieb
Stade / DOW	Seehafen	Nicht veröffentlicht	Nicht veröffentlicht	Umrüstung LNG-Terminal nach Nutzungsende	LNG-Terminal im Bau
Wilhelmshaven / BP	NWO-Terminal	1.000.000[20]	2028	Neubau inkl. Cracker für 130.000 t H_2/Jahr	Geplant (PCI-Projekt)
Wilhelmshaven / UNIPER	Greenfield	2.600.000	2030	Neubau inkl. Cracker für Teilmenge	Geplant (PCI-Projekt)

[19] PCI: Project of Common Interest der EU, gemäß (EU, 2023), Nr. 9.11

[20] geschätzter Wert aus veröffentlichter H_2-Produktion

Angesichts des noch nicht realisierten Hochlaufs des Wasserstoffbedarfs und der fehlenden Wasserstoffpipeline-Infrastruktur ist allerdings davon auszugehen, dass nicht alle derzeit geplanten Ammoniakterminals vor 2030 in vollem Umfang realisiert werden. Dies gilt insbesondere auch für die angekündigte Cracker-Kapazität. Es ist auch nicht auszuschließen, dass einzelne konkurrierende Projekte ganz aufgegeben werden.

2.1.5 Importszenario für 2030

Unter Berücksichtigung der derzeitigen Produktionsmengen von Ammoniak in Deutschland (2,1 Mio. t/Jahr im Jahr 2023), der Kapazität der derzeit vorhandenen und geplanten Ammoniak-Importterminals (ca. 7.5 Mio. t/Jahr) und der vorliegenden Studien zum jährlichen Ammoniakimport im Jahr 2030 (2-10 Mio. t/Jahr) wird für diese Studie von einer **Ammoniak-Importmenge im Jahr 2030 von 10 Mio. t / Jahr** ausgegangen. Damit sind auch die maximalen Schätzungen abgedeckt.

Diese Menge könnte im Wesentlichen über deutsche Tiefwasser-Seehäfen an Nord- und Ostsee durch VLGC-Gastanker angeliefert werden, was insgesamt ca. 200 Anläufe im Jahr mit je 50.000 t erfordert.[21]

Dafür sind unter Berücksichtigung von aus Sicherheitsgründen maximal 100 Anläufen pro Jahr pro Terminal 2 bis 3 see-seitig getrennte Terminals notwendig, wobei die entsprechenden Crackanlagen und Einspeiseanlagen in das Wasserstoffkernnetz direkt an diesen Standorten zu errichten sein werden. Für das Szenario wird davon ausgegangen, dass das im Oktober2024 genehmigte Wasserstoffkernnetz bis 2030 für die Verteilung des Wasserstoffs zur Verfügung steht. Hierzu werden bestehende Erdgasleitungen umgerüstet und zusätzliche neue Leitungen gebaut.

Kleinere Mengen zum Ersatz lokaler Produktionsmengen werden direkt zu den bestehenden Ammoniakverarbeitungsbetrieben im Binnenland zu liefern sein – zu den bestehenden Terminals nach Ludwigshafen und Rostock bzw. – falls wirtschaftlich sinnvoll - über neu zu errichtende Flussterminals, über Pipeline oder mit Eisenbahn-Kesselwaggons.

[21] Ein Teil des deutschen Bedarfs an Ammoniak könnte auch in den Niederlanden oder Belgien angelandet werden.

Es ist auch denkbar, dass Nachbarländer Deutschlands auf der Binnenseite Ammoniak bzw. Wasserstoff über Deutschland als Transit importieren.

2.2 Definition der Modellterminals

2.2.1 Auswahlkriterien für Modellterminals

Für die Definition der Modellterminals wurden Auswahlkriterien festgelegt, die die Randbedingungen der zu erwartenden Ammoniak-Importterminals in ihren wichtigsten Dimensionen erfassen.

Zu diesen Auswahlkriterien zählen

- Die Kapazität des Terminals (Hoch, Mittel, Niedrig)
- Die geographische Lage des Terminals (Meer, Binnengewässer)
- Die Besiedelung in unmittelbarer Umgebung des Terminals (Industriegebiet, Stadtgebiet, Green-Field)[22]
- Die Funktion des Terminals (lokale Verwendung, Umschlag auf Binnenschiffe, H_2-Erzeugung)

Tabelle 13 zeigt die gewählten Auswahlkriterien für die drei in dieser Studie betrachteten Modellterminals.

Tabelle 13: Definition der Modellterminals bezüglich der Auswahlkriterien

#	Terminal-kapazität			Gewässer-typ		Besiedelung			Funktion			Mögliche Standorte
	Hoch	Mittel	Niedrig	Meer	Binnengewässer	Stadtnah	Industriegebiet	Green-Field	Lokale Verwendung	Umschlag	H_2-Erzeugung	
1	X			X			X		(X)	X	X	Tiefwasserhafen an Nord- oder Ostsee
2		X		X		X	X		(X)	X	X	Tiefwasserhafen an Flussunterlauf in Stadtnähe
3			X		X			X	X	X	X	Rhein bis Basel Elbe bis Wittenberge Weser bis Bremen

(X) optional

Bezüglich der Kapazität wurde je ein Modellterminal mit hoher, mittlerer und niedriger Kapazität gewählt.

Modellterminal 1 und 2 (hohe und mittlere Kapazität) liegen am Meer und sind durch sehr große Gastanker mit großem Tiefgang (VLGC – 50.000 t) erreichbar. Modellterminal 3 (niedrige Kapazität) liegt an einem Binnengewässer und kann nur von kleinen Gastankern mit geringem Tiefgang erreicht werden.

[22] Für weitere Aspekte hinsichtlich der Umgebung der Terminals im Rahmen möglicher Beispielstandorte siehe auch Kapitel 2.4.

Modellterminal 1 und 2 haben ein Industrieumfeld, wobei Modellterminal 2 zusätzlich in einem stadtnahen Umfeld angesiedelt ist.

Modellterminal 3 wird an einem schiffbaren Binnengewässer „auf der grünen Wiese“ errichtet.

Bezüglich der Funktion sind Modellterminal 1 und 2 auch für den Umschlag auf Binnenschiffe und Eisenbahn-Kesselwaggons geeignet. Alle Modellterminals enthalten eine oder mehrere Ammoniak-Crackanlagen zur Wasserstofferzeugung.

2.2.2 Kenngrößen der definierten Modellterminals

In Tabelle 14 sind die Kenngrößen der gewählten Modellterminals aufgelistet.

Tabelle 14: Übersicht der Kenngrößen der definierten Modellterminals

Kenngrößen	Modellterminal 1 (groß)	Modellterminal 2 (mittel)	Modellterminal 3 (klein)
Lage	Küste - Industriegebiet	Küste - Industriegebiet	Binnengewässer – Green-Field
Kapazität Ammoniak	3 Mio. t/a davon H2-Erzeugung 2 Mio. t/a Umschlag/Lokale Verwendung 1 Mio. t/a	1 Mio. t/a davon H2-Erzeugung 0,7 Mio. t/a Umschlag/Lokale Verwendung 0,3 Mio. t/a	0,3 Mio. t/a davon H2-Erzeugung 0,2 Mio. t/a Lokale Verwendung 0,1 Mio. t/a
Tanks	2 x 50.000 t	2 x 25.000 t	25.000 t
Anzahl Anleger / Jetty	2	1	2
Anzahl Anläufe / Jahr	60 x 50.000 t	40 x 25.000 t	60 x 5.000 t
Ammoniak-Cracker	2 x 1 Mio. t/a	1 x 0,7 Mio. t/a	1 x 0,2 Mio. t/a

Ammoniak wird flüssig drucklos bei -33°C gelagert. Bei einer Dichte von 682 kg/m³ entsprechen 50.000 t einem Volumen von 73.300 m³. Nähere Informationen zur Ammoniaklagerung siehe Abschnitt 2.3.2.2.

Die Kapazitätsabstufung der Modellterminals 1 und 2 wurde im Hinblick aus das Importszenario 2030 mit 10 Mio. t/Jahr gewählt. Mit zwei Modellterminals 1 (3 Mio. t/Jahr) und drei Modellterminals 2 (1 Mio. t/Jahr) lassen sich 9 Mio. t/Jahr Ammoniak importieren. Die restliche Menge könnte durch Binnenschiffe auf dem Rhein aus Rotterdam und/oder andere Importwege (Kesselwagen, Pipeline) bereitgestellt werden.

Die derzeit in Planung befindlichen Importterminals (siehe Abschnitt 2.1.4) fallen außerdem gut in den gewählten Kapazitätsbereich der Modellterminals.

Modellterminal 3 ist mit 0,3 Mio. t/Jahr gut durch Fluss-Gastanker mit 5.000 t Kapazität (geeignet für große Binnengewässer) belieferbar.

2.2.2.1 Designphilosophie Modellterminal 1

Modellterminal 1 (groß) hat eine Kapazität von 3 Mio. t/Jahr Ammoniak. Das entspricht 60 Anläufen der derzeit üblichen sehr großen Gastanker (VLGC) mit einem Fassungsvermögen von 50.000 t. Geht man von einem 3-tägigen Aufenthalt je Entladung aus (1 Tag Anlegen, 1 Tag Entladung, 1 Tag Ablegen), dann ist der Entlade-Jetty 180 Tage pro Jahr belegt. Zwischen den Anläufen ist der Jetty im Schnitt 3 Tage frei, was ausreichend Puffer für allfällige Verzögerungen

bietet und sicherstellt, dass sich immer nur 1 VLGC-Gastanker im jeweiligen Anlaufabschnitt aufhält. Letzteres ist aus Sicherheitsgründen geboten, da die Kollision von 2 Gastankern ein beträchtliches Risiko darstellt.

Bei einer Gesamtentfernung (Hin- und Rückfahrt) von im Mittel 10.000 Seemeilen (z. B. vom südlichen Afrika oder Südamerika) sind die 60 Anläufe für Modellterminal 1 mit 6 VLGC-Gastankern, machbar[23], z. B. unter Zeit-Charter.[24]

Die Tankkapazität von Modellterminal 1 muss größer als die Ladekapazität eines VLGC-Tankers sein (50.000 t). Die üblicherweise für Terminals dieser Größe eingesetzten Ammoniaktanks haben ebenfalls 50.000 t Kapazität, passend zu den VLGC-Tankern. Um einen ausreichenden Kapazitätspuffer für nicht auszuschließende Verzögerungen (max. 6 Tage) bei der Belieferung zu haben, wurde für das Modellterminal 1 die Installation von 2 Ammoniaktanks mit je 50.000 t Kapazität vorgesehen.

Die Kapazität der in Modellterminal 1 zu installierenden Wasserstofferzeugung beträgt 2 Mio. t/Jahr, was 1 Mio. t/Jahr für den Umschlag von Ammoniak über Binnenschiffe, Kesselwagen oder Fernleitung sowie die direkte chemische oder energetische Verwendung im Nahumfeld des Terminals frei lässt.

Die 2 Mio. t/Jahr für die Wasserstofferzeugung werden in zwei parallelen Ammoniak-Crackanlagen verarbeitet. Die namhaften Technologiegeber mit hohem technischem Reifegrad (KBR, Topsoe) bestätigen die kurzfristige Machbarkeit einer Ammoniak-Crackanlage mit 1 Mio. t/Jahr. Durch die Realisierung mit zwei Anlagen kann die Wasserstofferzeugung auch zeitlich gut an einen noch zu erfolgenden Markthochlauf für Wasserstoff angepasst werden. Im Bedarfsfall könnte dann später auch eine dritte Ammoniak-Crackanlage in gleicher Größe ergänzt werden.

2.2.2.2 Designphilosophie Modellterminal 2

Modellterminal 2 (mittel) hat eine Kapazität von 1 Mio. t/Jahr Ammoniak. Das entspricht 40 Anläufen mit jeweils 25.000 t, die mit einer Teilmenge eines großen Gastankers (VLGC) oder mit entsprechend kleineren Gastankern geliefert werden können. Bei einem 3-tägigen Aufenthalt je Entladung (1 Tag Anlegen, 1 Tag Entladung, 1 Tag Ablegen) ist der Entlade-Jetty 120 Tage pro Jahr belegt. Zwischen den Anläufen ist der Jetty im Schnitt 6 Tage frei, was Puffer für allfällige Verzögerungen bietet und sicherstellt, dass sich immer nur 1 Gastanker im jeweiligen Anlaufabschnitt/Flussmündungsabschnitt oder Hafen aufhält. Letzteres ist aus Sicherheitsgründen geboten, da die Kollision von zwei Gastankern ein beträchtliches Risiko darstellt. Damit ist der Modellterminal 2 auch für beengte Anlaufsituationen geeignet (wie z. B. innere Elbmündung/ Hafen Hamburg).

Bei einer Gesamtentfernung (Hin- und Rückfahrt) von im Mittel 4.000 Seemeilen (Marokko, Algerien) sind die 40 Anläufe für Modellterminal 2 mit 2 mittleren Gastankern (25.000 t) machbar, die mit 16 Knoten Geschwindigkeit und 6 Tagen im Start- und Zielterminal in 18 Tagen (incl. 2 Tage Puffer) einen Rundlauf absolvieren können. D.h., jeder Gastanker schafft 20 Anläufe pro Jahr. Die 40 Anläufe benötigen bei der angenommenen Entfernung insgesamt zwei mittelgroße Gastanker, z. B. unter Zeit-Charter.

[23] Bei einer mittleren Reisegeschwindigkeit von 16 Knoten Geschwindigkeit und 6 Tagen im Start- und Zielterminal kann ein Gastanker in 36 Tagen (incl. 4 Tage Puffer) einen Rundlauf absolvieren. Dies bedeutet, dass jeder Gastanker pro Jahr 10 Anläufe schafft. Für die 60 erforderlichen Anläufe werden deshalb 6 VLGC Gastanker benötigt.

[24] Zeit-Charter bedeutet, dass ein Gastanker fest einem Start- und Zielterminal zugeordnet ist, und die Betriebskosten des Tankers und das Transportrisiko vom Betreiber der Transportstrecke getragen wird.

Die Tankkapazität von Modellterminal 2 muss größer als die Liefermenge eines einzelnen Anlaufs sein (25.000 t). Um einen ausreichenden Kapazitätspuffer für nicht auszuschließende Verzögerungen (max. 9 Tage) bei der Belieferung zu haben, wurde für das Modellterminal 2 die Installation von zwei Ammoniaktanks mit je 25.000 t Kapazität vorgesehen.

Die Kapazität der in Modellterminal 2 zu installierenden Wasserstofferzeugung beträgt 0,7 Mio. t/Jahr, was 0,3 Mio. t/Jahr für den Umschlag von Ammoniak über Binnenschiffe oder Kesselwagen oder die direkte chemische oder energetische Verwendung im Nahumfeld des Terminals frei lässt.

Die 0,7 Mio. t/Jahr Ammoniak für die Wasserstofferzeugung werden in einer einzelnen Ammoniak-Crackanlage verarbeitet. Diese könnte im Bedarfsfall auf eine Kapazität von 1 Mio. t/Jahr umgebaut werden.

2.2.2.3 Designphilosophie Modellterminal 3

Für das Modellterminal 3 (großes Binnengewässer, z. B. mittlerer Rhein) wird von einer Gastankerkapazität von 5.000 t ausgegangen. Entsprechend große Fluss-Gastanker sind derzeit in Planung.

Zur Lieferung von 0,3 Mio. t/Jahr sind insgesamt 60 Anläufe dieser Gastanker pro Jahr notwendig. Der Reisezyklus eines Fluss-Gastankers vom Seeterminal zum Binnenterminal wurde mit ca. 12 Tagen einschließlich Be- und Entladen und zwei Tagen Puffer angesetzt. Ein Gastanker schafft damit 30 Anläufe pro Jahr.

Damit sind zwei Gastanker á 5.000 t unter Zeit-Charter zur Lieferung der Terminalkapazität von 0,3 Mio. t/Jahr notwendig.

Als notwendige Tankgröße wurden fünf Anlieferungen mit je 5.000 t zur Pufferung von Niedrigwasserperioden definiert. Damit ist der Modellterminal mit einem Tank mit 25.000 t Kapazität ausgerüstet.

Die Kapazität der in Modellterminal 3 zu installierenden Wasserstofferzeugung beträgt 0,2 Mio. t/Jahr, was 0,1 Mio. t/Jahr für die direkte stoffliche oder energetische Verwendung im Nahumfeld des Terminals frei lässt.

Die 0,2 Mio. t/Jahr Ammoniak für die Wasserstofferzeugung werden in einer einzelnen Ammoniak-Crackanlage verarbeitet. Diese könnte im Bedarfsfall auf eine Kapazität von 0,3 Mio. t/Jahr umgebaut werden.

2.2.3 Anlagengrenzen der Modellterminals

Tabelle 15 definiert die Anlagengrenzen der Modellterminals.

Prinzipiell sind der Transport zum Terminal (mittels Gastanker) und vom Terminal (mittels Gastanker, Kesselwagen oder Pipelineanschluss) nicht Teil der Modellterminals.

Die Verfügbarkeit von Strom für den Betrieb der Terminals aus dem Netz wird vorausgesetzt. An Industriestandorten wird die Verfügbarkeit von kleineren Kühlwassermengen (z. B. für die Rückverflüssigung des Ammoniaks im Tanklager) angenommen.

Ebenso ist eine biologische Abwasserbehandlung für entöltes und neutralisiertes Abwasser (einschließlich des Oberflächenwassers) am Industriestandort nicht Teil des Modellterminals.

Eine Zutrittskontrolle wird an einem Industriestandort ebenfalls vorausgesetzt.

Tabelle 15: Definition der Anlagengrenzen der Modellterminals

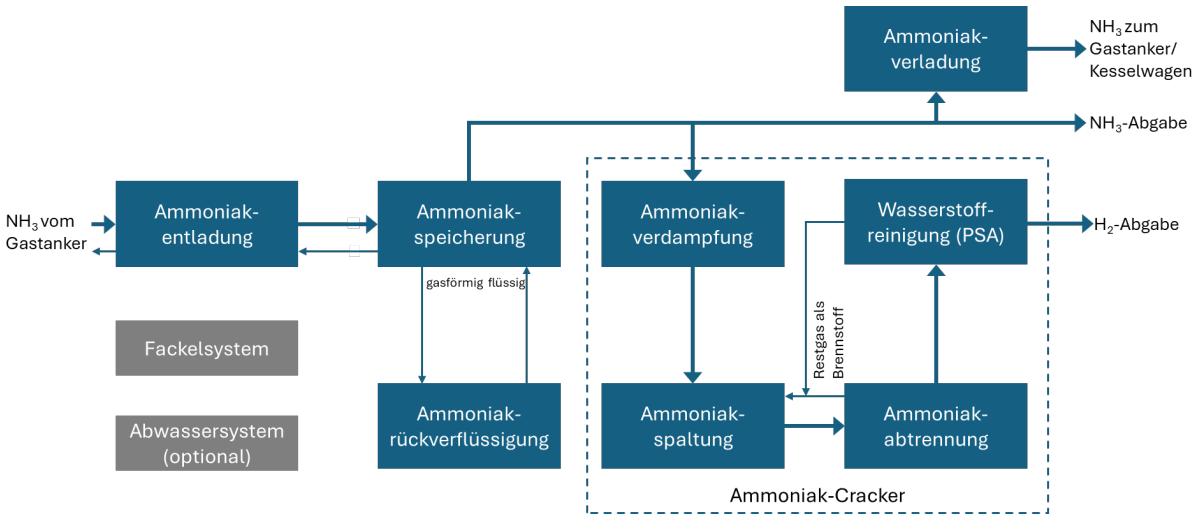
Funktion	Teil des Modellterminals	Außerhalb des Modellterminals
Einsatz	Ammoniak-Jetty und Entladeeinrichtungen	Gastanker
Prozess	Ammoniaktank, Rückverflüssigung Tank, Ammoniak-Cracker	
Produkt	Tankpumpen für Umschlag Verladeeinrichtungen für Umschlag	Binnenschiffe, Kesselwagen Pipelinepumpen/-verdichter, Pipelines
Betriebsmittel	Elektroverteilung, Instrumentenluft, Kühlwassersystem für größere Mengen oder Greenfield	Stromerzeugung, nur Industriestandort: Kühlwassersystem für kleinere Mengen
Entsorgung	Abwasserbehandlung (Greenfield)	Abwasserbehandlung (Industriestandort)
Sicherheitseinrichtungen	Gasalarmsystem, Fackel, Feuerlöschsystem, Notstrom	
Betriebsführung	Leitwarte und Wartungseinrichtungen	
Schutzeinrichtungen	Schutzzaun und Überwachungssysteme Torhaus (Greenfield)	Torhaus (Industriestandort)

2.3 Beschreibung der Modellterminals

2.3.1 Prinzipielle Beschreibung

In Abbildung 3 ist das Blockfließbild eines typischen Ammoniakterminals mit Ammoniak-Cracker dargestellt.

Abbildung 3: Blockfließbild Ammoniakterminal mit Ammoniak-Cracker



Quelle: Eigene Darstellung, ILF

- Bei der **Ammoniakentladung** wird flüssiges Ammoniak (-33 °C, ca. 5 $bar_ü$) vom Gastanker zum Ammoniakspeichertank gepumpt. Zur Förderung dienen üblicherweise im Schiff integrierte Pumpen. Das vertäute Schiff wird dafür mittels Ladearmen mit dem Rohrleitungsnetz des Terminals verbunden. Über eine Gaspendelleitung kann gasförmiger Ammoniak vom Tank zum Schiff zurückströmen, sodass sich im Speichertank kein Druck aufbaut bzw. im Schiffstank kein Vakuum entsteht.
- Die **Ammoniakspeicherung** erfolgt in einem oder mehrerer druckloser Ammoniaktanks als flüssiges Ammoniak (-33 °C, 0 $bar_ü$). Diese Tanks sind isoliert und doppelwandig ausgeführt. Pumpen zum Weitertransport des Ammoniaks sind in der Regel als Tauchpumpen im Tank installiert.
- Das trotz Isolierung durch eindringende Umgebungswärme im Tank verdampfte Ammoniak (boil-off) wird der **Ammoniakrückverflüssigung** zugeführt, in der es durch ein Kältekreislaufsystem wieder kondensiert und zum Tank zurückgespeist wird.
- Von der Ammoniakspeicherung wird das flüssige, kalte Ammoniak entweder direkt zur Anlagengrenze, zur Ammoniakverladung oder zum Ammoniak-Cracker gepumpt.
- In der **Ammoniakverladung** wird das flüssige, kalte Ammoniak über Verladearme in spezielle Gastanker oder Kesselwagen abgegeben. Der von den Tank-Ammoniakpumpen erzeugte Druck muss ausreichen, ggf. auch unter Druck stehende Ammoniaktanks der Gastanker oder Kesselwagen zu befüllen.

- Der **Ammoniak-Cracker** besteht im Wesentlichen aus 4 Teilsystemen:
  - In der **Ammoniakverdampfung** wird das flüssige, kalte Ammoniak auf den für die Spaltung benötigten Druck (20 – 45 $bar_ü$) gepumpt und anschließend mit Hilfe der Abwärme aus der Ammoniakspaltung verdampft und überhitzt.
  - Dieses Ammoniakgas wird in der **Ammoniakspaltung** in zwei Reaktorstufen in Wasserstoff und Stickstoff zerlegt, wobei die 2. Stufe durch Brenner beheizt wird und in der mit Hilfe eines Katalysators die Spaltreaktion bis zum Gleichgewicht abläuft.
  - Anschließend wird das Spaltgas durch Vorwärmung des Einsatzes gekühlt und durch eine Wasserwäsche in der **Ammoniakabtrennung** vom restlichen Ammoniak befreit. Das dabei entstehende Abwasser wird in einer Kolonne gestrippt und das dadurch zurückgewonnene nicht konvertierte Ammoniak wird zusammen mit dem Rest-Gas aus der Wasserstoffreinigung im Ammoniak-Spaltreaktor verbrannt.
  - In der **Wasserstoffreinigung** wird das Wasserstoff-Stickstoffgemisch in einer Druckwechseladsorptionsanlage vom Stickstoff befreit. Der abgetrennte Stickstoff enthält noch einen Anteil an Wasserstoff und wird daher als Brennstoff der Feuerung des Ammoniak-Spaltreaktors zugeführt. Der Wasserstoff aus der Wasserstoffreinigung wird entsprechend der Reaktionsbedingungen mit 18 – 43 $bar_ü$ an die Anlagengrenze abgegeben.
  - Um beim Anfahren und Abfahren des Ammoniak-Crackers anfallende, nicht spezifikationsgerechte Gasströme zu entsorgen, ist ein **Fackelsystem** vorhanden. Dieses verbrennt auch nicht planmäßige anfallende Ammoniakmengen bei Ausfall der Ammoniakrückverflüssigung sowie bei Störereignissen.
- Das Oberflächenabwasser des Ammoniakterminals (Regenwasser, Reinigungswasser sowie ggf. Feuerlöschwasser und Wasser aus Wasserschleiern) wird in einem **Abwassersystem** aufgefangen, überwacht, ggf. von Ölresten aus Wartungsarbeiten befreit, neutralisiert und in einem Rückhaltebecken gesammelt. Anschließend wird das Abwasser einer biologischen Kläranlage zugeführt.

2.3.2 Komponenten der Modellterminals

2.3.2.1 Entlade- und Verladeeinrichtungen

Die Entlade- und Verladeeinrichtungen für Ammoniak von und zu Gastankschiffen sind auf einer speziellen Mole mit Dalben und Festmachern untergebracht.

Abbildung 4 zeigt eine typische Mole für die Ver- und Entladung von Flüssiggasen, incl. Ammoniak.

An einer Molenseite sollte aus Sicherheitsgründen nur jeweils ein Gastankschiff gleichzeitig festmachen. Bei sehr großen Terminals sind deshalb mehrere Molen mit ausreichend Abstand oder doppelseitig anlaufbare Molen vorgesehen.

Auf der Mole befinden sich auf einer Plattform mehrere schwenkbare Gelenkladearme, die bis zu den Tankstutzen auf dem Gastanker geschwenkt und dort gasdicht sowohl für das flüssige Ammoniak als auch für die Gaspendelleitung angekuppelt werden. Für große Gastanker werden in der Regel mehrere Gelenkladearme gleichzeitig betrieben, um eine schnelle Entladung (in der Regel in weniger als 24 h) sicherzustellen. In diesem Fall wird ein separater Gelenkladearm für die Gaspendelleitung verwendet.

Die Gelenkladearme können sowohl von der Leitwarte des Terminals als auch direkt an der Mole hydraulisch manövriert werden, um eine einfache Kupplungszentrierung sicherzustellen.

Die Gelenkschwenkarme besitzen Schnelllösekupplungen mit Absperrventilen, um im Notfall die Verbindung zum Schiff schnell und sicher unterbrechen zu können. Das Volumen direkt an der Nahtstelle ist minimiert (wenige Liter), um den Produktaustritt bei Schnelllösung so gering wie möglich zu halten. Im Normalbetrieb wird der Gelenkladearm vor einer Abkoppelung mit Stickstoff gespült, sodass in diesem Fall keine Emissionen in die Umgebung auftreten.

Abbildung 4: Typische Ver- und Entlademole für Flüssiggase

Quelle: (Google Maps, 2024)

Ebenfalls zu den Entlade- und Verladeeinrichtungen gehören die Rohrleitungssysteme zur Verbindung der Gelenkarme mit den Ammoniaktanks, Spülleitungen sowie geeichte Messstationen zur Erfassung der transferierten Ammoniakmenge für Abrechnungszwecke.

Die Entladung von kaltem, drucklosem Ammoniak von Gastankern erfolgt durch die auf dem Schiff installierten Ammoniakpumpen bei ca. 3-5 $bar_{ü}$.

Zur Verladung des in den landseitigen Tanks gelagerten Ammoniaks in Binnenschiffe werden die in den Tanks installierten Pumpen genutzt. Je nach Druck in den zu beschickenden, gegebenenfalls warmen Transporttanks müssen diese bis zu 20 $bar_{ü}$ Druck erzeugen können.

Die Verladung in Kesselwaggons erfolgt nach ähnlichen Prinzipien über Ladebrücken, die über den Gleisen installiert sind.

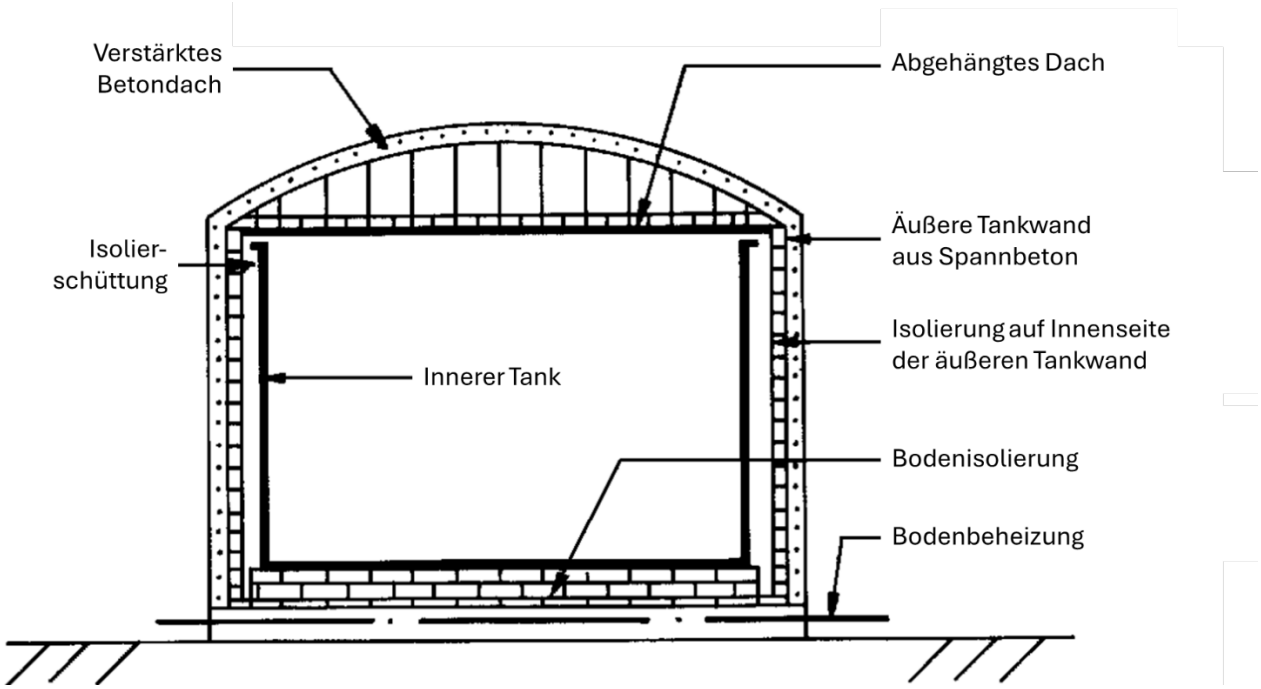
Das aus Binnenschiffen und Kesselwaggons rückgeführte Gas darf nicht direkt in die Ammoniaktanks geleitet werden, um eine Kontamination der Tanks z. B. mit Sauerstoff, auszuschließen.

2.3.2.2 Ammoniaktanklager

Flüssiges, kaltes Ammoniak wird drucklos in doppelwandigen Festdachtanks bei -33°C gelagert. Die Tanks müssen den einschlägigen Normen (z. B. API 620, API 625 und API 650) entsprechen. (American Petroleum Institute, 2021)

Der typische Aufbau eines Ammoniaktanks ist in Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 5: Typischer „Full Containment"-Tank für flüssiges Ammoniak



Quelle: (EEMUA, 2016)

Der innere Tankbehälter aus Niedertemperaturstahl befindet sich in einem zweiten äußeren Spannbeton-Tank, der bei Versagen des inneren Behälters das komplette Tankvolumen aufnehmen kann. Alternativ kann der Sekundärtank auch aus Stahl ausgeführt sein. Dann wird allerdings ebenfalls eine Betonhülle benötigt, die den Tank vor äußeren Einflüssen schützt (Druckbelastung, Aufprall von Gegenständen, Wärmestrahlung) (PGS, 2025).

Im Zwischenraum zwischen dem inneren und dem äußeren Behälter befindet sich die Isolierung, üblicherweise als Paneele auf der Tankwand des inneren oder äußeren Behälters. Ammoniaktanks sind mit redundanten Druck-, Temperatur- und Füllstandsensoren ausgerüstet.

Der Druck im Tank ist überwacht und durch Abführung von gasförmigem Ammoniak zur Ammoniakrückverflüssigung geregelt. Die Verdampfungsrate von Ammoniak im Tank durch zugeführte Umgebungswärme beträgt ca. 0,04 Gew.-% pro Tag, bei großen Tanks mit guter Isolierung ggf. auch weniger.

Ausgangspunkt für die Gestaltung eines Ammoniak-Lagertanks, aber auch der gesamten Ammoniak-Lageranlage einschließlich der dazugehörigen Installationen, ist die Minimierung der Möglichkeit, dass Ammoniak freigesetzt werden kann. Dieses Prinzip wird durch die großen Auswirkungen eines Vorfalls mit Ammoniaklagerung, die Arbeitssicherheitsrisiken bei der Arbeit mit Ammoniak und die Risiken für Gewässer bestimmt. Erforderlich ist eine eigensichere Auslegung des Speichertanks mit geringer Ausfallhäufigkeit gemäß dem Stand der Sicherheitstechnik (siehe hierzu auch Kapitel 5.1.3.2). Hieraus ergeben sich folgende Grundsätze für Maßnahmen zur Gestaltung des Ammoniaklagertanks (Langeveld, 2025):

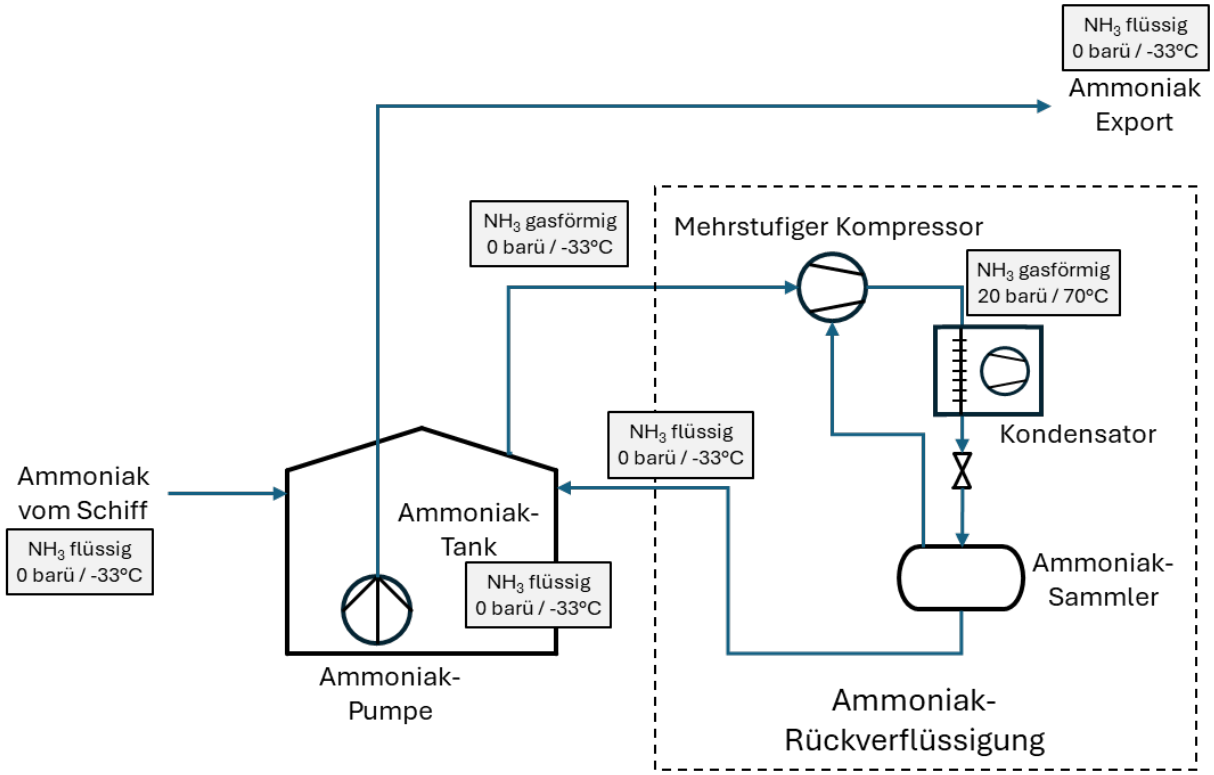
- Lebensdauer des Lagertanks mindestens 50 Jahre;
- „Full Containment“ Lagertank;
- Lagertank mit Betonaußenwand;
- keine Durchdringungen durch Wand und Boden;
- interne Pumpen;
- Gründung auf Pfählen;
- Isolierung vorzugsweise nicht im Ringraum zwischen Innen- und Außentank.

Im Tank befinden sich mindestens zwei Tauchpumpen, die das Ammoniak nachgeschalteten Systemen zuführen oder in andere Tanks umfüllen können. Die Befüllung der Tanks erfolgt mittels der Pumpen des Gastankers.

Weitere Hinweise zum Aufbau, Betrieb, Sicherheitsmaßnahmen und Wartung von Ammoniaktanks sind in (fertilizer europe, 2014), (EEMUA, 2016) und (PGS, 2025) zu finden.

Das Ammoniak-Tanklager ist mit einem Ammoniak-Rückverflüssigungssystem gem. Abbildung 6 ausgerüstet, welches im Tank verdampftes Ammoniak wieder verflüssigt und in den Tank zurückspeist.

Abbildung 6: Prinzipieller Aufbau eines Ammoniak-Rückverflüssigungssystems



Quelle: Eigene Darstellung, ILF

Das gasförmige Ammoniak wird in einem mehrstufigen Kompressor von 0 $bar_ü$ auf ca. 15 $bar_ü$ verdichtet und in einem Luftkühler kondensiert. Das im Kondensator anfallende flüssige Ammoniak wird in den Ammoniak-Sammelbehälter entspannt, wobei ein Teil der Flüssigkeit verdampft und das flüssige Ammoniak abkühlt. Das anfallende Ammoniakgas wird zum Kompressor zurückgeführt, die Flüssigkeit wird zum Tank geleitet.

Aufgrund der Bedeutung der Ammoniak-Rückverflüssigung für den sicheren Betrieb des Ammoniaktanklagers ist diese typischerweise redundant ausgeführt und in die Notstromversorgung eingebunden. Sollte dennoch der Druck im Ammoniaktank durch Ausfall der Ammoniak-Rückverflüssigung oder andere Störereignisse nicht gehalten werden können, wird gasförmiges Ammoniak über Sicherheitsventile einer Ammoniakfackel (entsprechend API 521) zugeführt, die dieses verbrennt.

Rohrleitungen zur Förderung von flüssigem Ammoniak sind aus Stahl mit geeigneter Isolierung ausgeführt. Die Leitungen im Tanklager werden oberirdisch geführt. Die größten Nennweiten treten bei der Füllleitung vom Gastanker auf, da hier innerhalb von 24 h die gesamte Tankerkapazität umgefüllt werden muss. Für eine Terminal mit 50.000 t Entlademenge je Tanker mit zwei Entladearmen und zwei parallelen Ammoniakleitungen zu den Tanks bedeutet dies eine maximale Nennweite von ca. DN 600.

2.3.2.3 Ammoniak-Cracker

Ammoniak wird als Flüssigkeit bei Umgebungsdruck und ca. -33°C gelagert. Im ersten Schritt der Ammoniak-Crackanlage wird deshalb das Ammoniak vorgewärmt und verdampft.

Die Spaltung von Ammoniak ist eine endotherme chemische Gleichgewichtsreaktion

$$NH_3 \rightarrow 0{,}5\ N_2 + 1{,}5\ H_2$$

$$\Delta H_{Reaktion},\ 25°C = 46{,}2\ kJ/mol_{NH3}\ (0{,}754\ kWh/kg_{NH3})$$

Bedingt durch die Endothermizität und die Reaktions-Stöchiometrie wird die Spaltreaktion durch hohe Temperatur und niedrigen Druck begünstigt.

In der Praxis ist die maximale Reaktionstemperatur durch Materialgrenzen und Kosten begrenzt. Der optimale Reaktionsdruck liegt im Hinblick auf die nachgeschalteten Verfahrensschritte bei 25-40 $bar_ü$. Dadurch entfällt auch in vielen Fällen die Notwendigkeit für einen Wasserstoffprodukt-Kompressor.

Entsprechend den gewählten Reaktionsbedingungen enthält das Spalt-Gas aus dem Reaktor noch Ammoniak.

Aus diesen Erwägungen ergibt sich die grundlegende Verfahrenssequenz für den Ammoniak-Crackprozess (Topsoe, 2023) (KBR, 2024) entsprechend Abbildung 7:

- Vorwärmung und Verdampfung von Ammoniak
- Katalytische Spaltung von Ammoniak
- Abtrennung des nicht konvertierten Ammoniaks
- Reinigung des Wasserstoffprodukts

Der minimale Prozesswärmebedarf zur Umwandlung von flüssigem Ammoniak mit -33°C zu Wasserstoff mit 25 $bar_ü$ beträgt ca. ~72 kJ/mol_{NH3} (~1,17 kWh/kg_{NH3}), im Wesentlichen bestimmt durch die Verdampfungsenthalpie und die Spaltreaktion. Die Wahl der Wärmequelle hängt dabei von Faktoren wie Verfügbarkeit, Kosten, Anlagengröße, einzuhaltenden Emissionsgrenzen sowie dem erforderlichen CO_2-Fußabdruck des Wasserstoffprodukts ab.

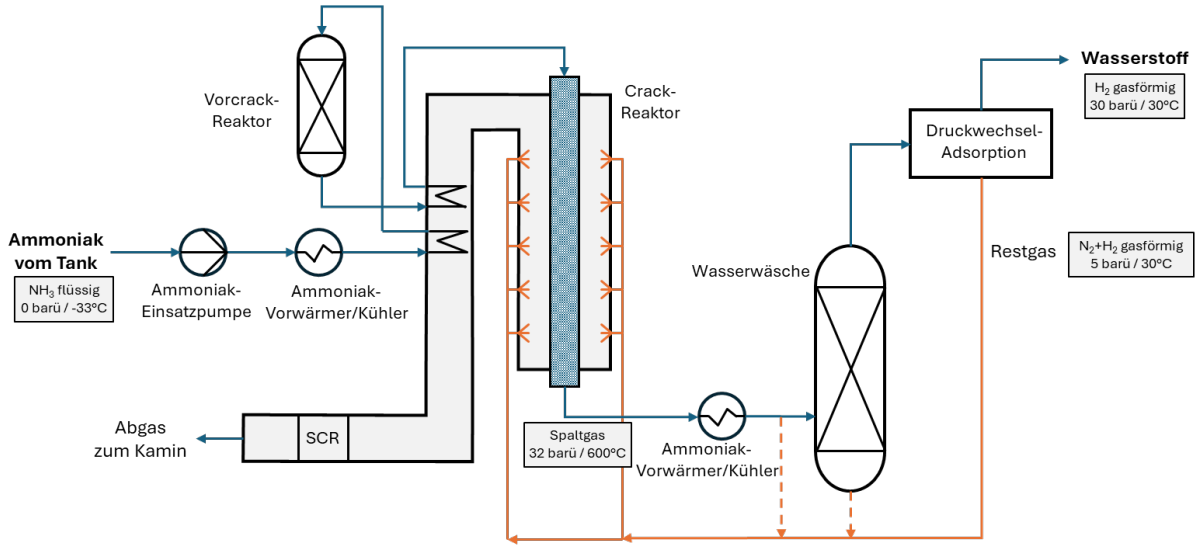
Der Ammoniak-Spaltprozess wird typischerweise durch zwei Kenngrößen charakterisiert:

- Wasserstoffeffizienz =
  Anteil Wasserstoffatome im Produkt / Anteil Wasserstoffatome im Ammoniakeinsatz
- Energieeffizienz =
  Energieinhalt des Wasserstoffprodukts / (Energieinhalt des Ammoniakeinsatzes + zugeführte Prozessenergie[25])

Abbildung 7 zeigt ein typisches vereinfachtes Verfahrensfließbild einer Ammoniak-Crackanlage. Die angegebenen Drücke und Temperaturen sind exemplarisch und hängen von der jeweiligen Crack-Technologie ab.

[25] Strom, Heizgas, externe Prozessabwärme etc.

Abbildung 7: Typische Verfahrensskizze einer Ammoniak-Crackanlage



Quelle: Eigene Darstellung, ILF, auf Basis von (Topsoe, 2023)

Kernstück der Ammoniak-Crackanlage ist der befeuerte Spaltreaktor mit Strahlungszone und Konvektionszone für die Abwärmenutzung. Dieser ist ähnlich den in Dampfreformieranlagen verwendeten Reaktoren aufgebaut.

Nach der Vorwärmung und Verdampfung des Ammoniaks mit Abwärme aus dem Abgas des Spaltreaktors mit zwischengeschaltetem adiabatem Vorcrack-Reaktor (gefüllt mit einem Katalysatorbett) wird das heiße, gasförmige Ammoniak den von außen durch Seitenwandbrenner beheizten und mit Katalysator gefüllten Reaktionsrohren zugeführt.

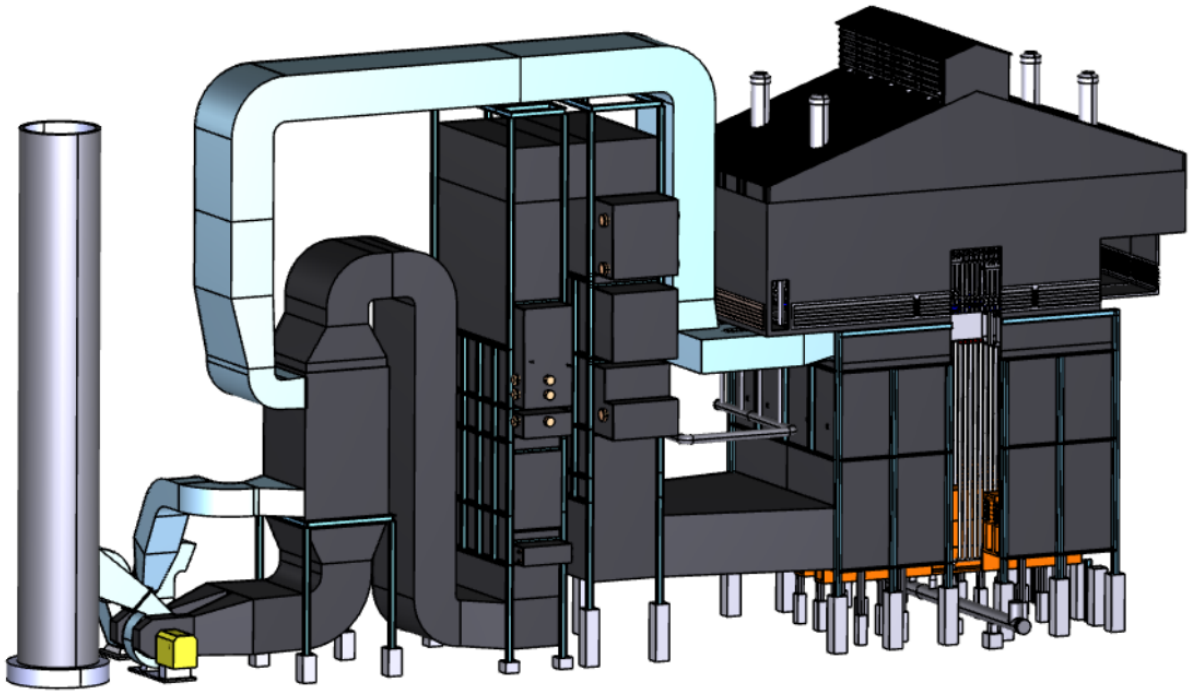
Bei der Materialauswahl für die befeuerten Reaktionsrohre müssen unbedingt die harschen nitrierenden Prozessbedingungen in den Rohren berücksichtigt werden. Der Nickel-basierte Katalysator ist im Hinblick auf Ausbeute und Lebensdauer speziell für die Ammoniakspaltung optimiert.

Abbildung 8 zeigt den typischen Aufbau eines befeuerten Ammoniak-Crackreaktors (KBR, 2024). Rechts sind die befeuerten Strahlungsboxen mit innenliegenden, von oben nach unten durchströmten und mit Katalysator gefüllten Rohren dargestellt.

In der Mitte befindet sich die Konvektionszone, in der verschiedene Rohrbündel zur Anwärmung des Ammoniak-Einsatzes, der Verbrennungsluft sowie zur Dampferzeugung untergebracht sind. Ebenfalls in der Konvektionszone befindet sich die katalytische Abgasreinigung.

Ganz links ist der Abgaskamin mit dem Abgasgebläse sowie das Frischluftgebläse dargestellt.

Abbildung 8: Typischer Aufbau eines Ammoniak-Crackreaktors



Quelle: (KBR, 2024)

Der geringe Anteil nicht konvertierten Ammoniaks im Spaltgas wird nach Abkühlung des Spaltgases in einer Wasserwäsche ausgewaschen und durch Strippen des Wassers zurückgewonnen. Das Ammoniak-freie Spaltgas wird anschließend einem Druckwechsel-Adsorptionssystem (PSA) mit mehreren Adsorbern zugeführt. Der Stickstoff und eine geringe Menge Wasserstoff wird darin an spezielle Adsorbentien gebunden und der Wasserstoff auf die erforderliche Reinheit (Pipelinequalität) gebracht. Die Regenerierung der Adsorber erfolgt nach dem Beladeschritt durch Druckabsenkung, wobei ein Restgas aus Stickstoff und Wasserstoff anfällt.

Das Restgas aus der Wasserstoffreinigung und das Ammoniak aus der Ammoniakabtrennung wird als Heizgas dem Ammoniak-Spaltreaktor zugeführt. Die Bilanzierung des Heizgases erfolgt dabei durch geregelte Zugabe von ungereinigtem Spaltgas.

Alternativ dazu kann auch Erdgas zur Befeuerung des Spaltreaktors verwendet werden. Dadurch kann die Wasserstoffeffizienz der Ammoniak-Crackanlage, bei Einsatz einer zweistufigen Druckwechseladsorption, auf 96% erhöht werden.

Das Abgas aus dem Ammoniak-Spaltreaktor wird entsprechend der Anforderungen durch selektive katalytische Reduktion (SCR) von NO_x und N_2O befreit.

Im Falle einer entsprechenden Betriebsstörung (Überdruck, Leckage, Feuer etc.) muss das Prozessgas über Sicherheitsventile oder bei einer Notentspannung durch Verbrennung in einem Fackelsystem sicher entsorgt werden. Diese wird beim An- und Abfahren der Anlage zur Entsorgung von nicht spezifikationsgerechtem Produkt verwendet.

Durch die begrenzte Lebensdauer des Katalysators muss dieser ca. alle 3 Jahre während eines planmäßigen Anlagenstillstands von wenigen Wochen ausgetauscht werden.

Der vorstehend beschriebene Prozess verwendet einen Teil des Ammoniak-Einsatzes als Heizgas für den befeuerten Ammoniak-Reaktor. Das reduziert die gewonnene Wasserstoffproduktmenge und führt zu einer Wasserstoff-Effizienz von ca. 78-%.

Dieser Wasserstoffverlust kann durch Verwendung von externem Methan-Heizgas weitgehend vermieden werden, was aber eine zweite Wasserstoff-Reinigungsstufe erfordert und je nach Quelle des Heizgases (Erdgas, Biogas) den CO_2-Fußabdruck des Wasserstoff-Produkts verschlechtert. Dies ist zwar bei niedrigen Erdgaspreisen ökonomisch vorteilhaft, aber läuft dem Zweck der CO_2-Vermeidung zuwider und ist deshalb eventuell unerwünscht. Deshalb wird im Rahmen dieser Studie diese Option nicht weiter betrachtet.

Die Beheizung des Ammoniak-Spaltrektors mit elektrischem Strom ist eine weitere Möglichkeit, um die Ammoniakausbeute des Ammoniak-Crackers zu erhöhen. Allerdings befindet sich diese Technologie noch in einem frühen Entwicklungsstadium bezogen auf die großtechnische Anwendung und setzt die Verfügbarkeit von großen Mengen grünen Stroms voraus. Es ist fraglich, ob dieser in den nächsten Jahren ausreichend[26] verfügbar ist. Eine entsprechende Stromerzeugung aus Ammoniak oder Wasserstoff wäre jedenfalls keine sinnvolle Lösung.

Bisher gibt es keine für die Erzeugung von Wasserstoff optimierten kommerziell betriebenen Ammoniak-Crackanlagen. Mehrere erfahrene Prozess-Lizenzgeber (KBR, Topsoe, Air Liquide, Linde, ThyssenKrupp etc.) arbeiten an deren Entwicklung und Demonstration. Allerdings sind die verwendeten Technologien im Einzelnen erprobt, sodass eine kurzfristige Kommerzialisierung dieser Technologie kein Problem sein sollte.

Zur Risikominimierung hinsichtlich Funktionalität durch Redundanz und bezüglich des schlecht vorhersehbaren zeitlichen Hochlaufs des Wasserstoffbedarfs ist zu erwägen, große Ammoniak-Crackkapazitäten in mehreren parallelen Anlagen zu realisieren, die zeitlich gestaffelt installiert werden. Dadurch geht allerdings die Kosteneinsparung durch Skaleneffekte bei größeren Anlagen verloren.

2.3.2.4 Betriebsmittelsysteme

Als Betriebsmittelsysteme umfasst ein Ammoniak-Terminal in der Regel die folgenden Systeme.

Kühlwassersystem

Für die Kondensation des Ammoniaks in der Ammoniak-Rückverflüssigung wird Kühlwasser benötigt. Dieses kann, soweit verfügbar, aus einem externen Kühlwasserkreislauf entnommen werden - soweit sich das Terminal im industriellen Umfeld befindet und entsprechend freie Kapazität in einem externen Kühlwassersystem vorhanden ist.

Ist dies nicht der Fall oder ist der Anschluss an ein externes Kühlwassersystem zu aufwändig, ist die Kondensation des Ammoniaks in Luftkühlern sinnvoll. Ein eigenes Kühlwassersystem mit Rückkühlung lohnt sich für ein Ammoniak-Terminal meist nicht.

Kondensat-Aufbereitungssystem

Zur optimalen Wärmeintegration des Ammoniak-Crackers wird mit der überschüssigen Abwärme des befeuerten Reaktors Dampf erzeugt, der dann an anderen Stellen des Prozesses zum Heizen (z. B. der Ammoniak-Strippkolonne) verwendet wird. Das anfallende Kondensat muss dazu im Kondensat-Aufbereitungssystem gesammelt, entgast und als Kesselspeisewasser wieder mit entsprechendem Druck bereitgestellt werden. Ein Teil des Kondensats wird als

[26] Ausreichend bedeutet in diesem Zusammenhang eine Verfügbarkeit an den jeweiligen Standorten, zu akzeptablen Preisen und hinreichend zeitlich konstant.

Abschlämmung zum Abwassersystem ausgeschleust und durch Frischwasser ersetzt. Dieses muss ggf. erst noch demineralisiert werden.

Instrumentenluftsystem

Für bestimmte Ventilantriebe und Instrumente ist Instrumentenluft erforderlich. Falls diese nicht von extern bereitgestellt werden kann, ist ein Instrumentenluftsystem notwendig, das als voll funktionsfähiges Package Unit mit Kompressor, Trockner und Pufferbehälter ausgeführt wird.

Stickstoffsystem

Zur Spülung von Leitungen (z. B. Gelenkladearmkupplungen) wird Stickstoff benötigt. Dieser wird über einen Tank bereitgestellt, der regelmäßig von einem Industriegase-Lieferanten nachgefüllt wird.

Abwassersystem

Obwohl im Ammoniak-Terminal und Ammoniak-Cracker kein Prozessabwasser anfällt, ist für möglicherweise kontaminiertes Oberflächenwasser sowie für die Abschlämmung des Kondensat-Aufbereitungssystems ein Abwassersystem notwendig. Als Kontamination kann Ammoniak aus Leckagen direkt oder über Niederschlag im Wasserschleier anfallen. Auch Ölrückstände aus Wartungsmaßnahmen sind nicht ungewöhnlich.

Um diesen potenziellen Verunreinigungen Rechnung zu tragen, wird das im Terminalbereich auf den versiegelten Oberflächen aufgefangene Wasser (Regen, Wasserschleier zur Niederschlagung von Ammoniak im Störfall, Feuerlöschwasser, Reinigungswasser) über einen Ölabscheider geleitet und in einem Rückhaltebecken aufgefangen. Dort wird der pH-Wert überwacht und das Wasser ggf. mit Schwefelsäure oder Natronlauge neutralisiert. Schwefelsäure und Natronlauge wird in Tanks vorgehalten, die bei Bedarf von einem Chemikalien-Lieferanten nachgefüllt werden.

Das behandelte Wasser wird dann in eine biologische Kläranlage (hier extern) abgegeben, in der die weitere Reinigung des Wassers erfolgt.

2.3.2.5 Sicherheitssysteme

Sicherheitsgerichtete Steuerung

Neben dem Prozessleitsystem zur betrieblichen Steuerung der Anlage ist ein sicherheitsgerichtetes System installiert, das über zusätzliche Druck- und Temperatursensoren den Zustand der Anlage überwacht. Not-Aus Taster sind ebenfalls an dieses System angeschlossen.

Fackelsystem(e)

Zur sicheren Verbrennung von Ammoniak, Spaltgas, Restgas und Wasserstoff beim An- und Abfahren des Ammoniak-Crackers sowie im Falle einer Betriebsstörung (z. B. Ausfall der Ammoniak-Rückverflüssigung, Überdruck in einzelnen Systemen oder Notentspannung bei Leckagen) muss sowohl das Ammoniak-Tanklager als auch der Ammoniak-Cracker an eine Fackel angeschlossen sein. Dies können eine zentrale oder mehrere lokale Fackeln sein.

Die Fackeln sind jeweils auf die maximal zu erwartende Gasmenge ausgelegt, die im Rahmen der sicherheitstechnischen Auslegung der Anlage zu ermitteln ist.

Jede Fackel besitzt typischerweise einen ständig brennenden Pilotbrenner, der ein sicheres Zünden des Fackelgases ermöglicht. Als Brenngas für die Pilotbrenner käme neben Erdgas oder Propan/Butan auch Wasserstoff aus Druckgasflaschen zur Vermeidung von CO_2-Emissionen in

Frage. Fackeln, die keinen ständigen Pilotbrenner benötigen und bei Bedarf schnell genug zünden, sind in Entwicklung.

Die Aufstellung einer Fackel erfolgt mit ausreichend Sicherheitsabstand zu anderen Anlagenteilen, Straßen/Wegen und brennbaren Materialien, um eine Gefährdung durch die Wärmeabstrahlung bei Fackelbetrieb auszuschließen.

Gasüberwachung

Zur Erkennung von Gasleckagen (Ammoniak, Spaltgas, Restgas oder Wasserstoff) sind über die ganze Anlage verteilt Gasdetektoren installiert. Diese lösen ggf. einen Gasalarm aus, schalten ggf. Wasserschleier zur Niederschlagung von austretendem Ammoniak ein und initiieren andere gebotenen Sicherheitsprozeduren.

Feuerüberwachung

Zur Erkennung von Brandherden im Anlagenbereich sind über die ganze Anlage verteilt Brandsensoren installiert. Diese lösen ggf. einen Feueralarm aus, schalten installierte Sprinklersysteme ein, alarmieren die Werksfeuerwehr sowie die Betriebsführung.

Feuerlöschsystem

Im Ammoniakterminal ist ein Feuerlöschsystem, bestehend aus einem Rohrleitungssystem für Feuerlöschwasser, Feuerlöschpumpen und einem Feuerlöschwassertank. An dieses Rohrleitungssystem sind Sprinklersysteme, Wasserschleier und Feuerlöschmonitore zur effektiven Brandbekämpfung angeschlossen.

2.3.3 Layout der Modellterminals

Insbesondere Anzahl und Größe der Tanks, sowie die Ammoniak-Crackanlage bestimmen den Flächenbedarf. Falls die Entlade- und Beladeanlagen aus verkehrstechnischen Gründen nicht direkt anschließen, muss außerdem eine verbindende Rohrleitungstrasse mit ausreichend Sicherheitsabstand zur umliegenden Bebauung/Nutzung vorgesehen werden.

Der Platzbedarf für einen Ammoniak-Terminal kann je nach Größe mehrere Hektar umfassen.

Folgende Designprinzipien bestimmen das Layout eines Ammoniak-Terminals:

- Die Anordnung der einzelnen Anlagenteile erfolgt nach Möglichkeit entlang des Prozessablaufs, um die verbindenden Rohleitungen möglichst kurz zu halten.
- Verbindende Rohrleitungen werden auf Rohrbrücken oder -trassen zusammengefasst, die im Falle von Flüssigammoniak-Leitungen nach Möglichkeit in einer Auffangrinne zur Begrenzung der Lachenbildung geführt werden.
- Alle wesentlichen Anlagenteile müssen durch befestigte Wege zugänglich sein, insbesondere solche mit wartungsintensiven Komponenten.
- Es sind ausreichend Sicherheitsabstände zwischen den Anlagenteilen, der Umgebung sowie zu den betriebstechnischen Gebäuden einzuhalten, um eine Gefährdung bei Leckagen und/oder Bränden bzw. Explosionen zu minimieren.
- Tankanlagen sind in der Regel von abgedichteten Erdwällen umgeben, um bei einer größeren Leckage die Ausbreitung der Flüssigkeit zu verhindern.
- In Anlagenbereichen mit Tanks, Apparaten, Maschinen und Rohrleitungen (insbesondere ammoniakführende Rohrleitungen sowie wartungsanfällige Rohrleitungselemente wie z. B.

Regelventile, Siebe etc.) ist das Oberflächenwasser aufzufangen und über einen Ölabscheider einem Rückhaltebecken zuzuführen.

- Fackeln brauchen einen Strahlungszonenkreis, der von allen Materialien und Verkehr freizuhalten ist.
- Betriebstechnische Gebäude und Zufahrten sind in einem separaten äußeren Teil der Anlagenfläche zusammengefasst, der möglichst nicht in Hauptwindrichtung liegt.
- Verdichter und Turbinen befinden sich in speziellen Einhausungen oder Gebäuden, um die Maschinen zu schützen, den Maschinenlärm zu dämpfen und Wartungsarbeiten in geschützter Umgebung durchzuführen zu können.
- Es sind ggf. Flächen für künftige Erweiterungen vorzusehen.

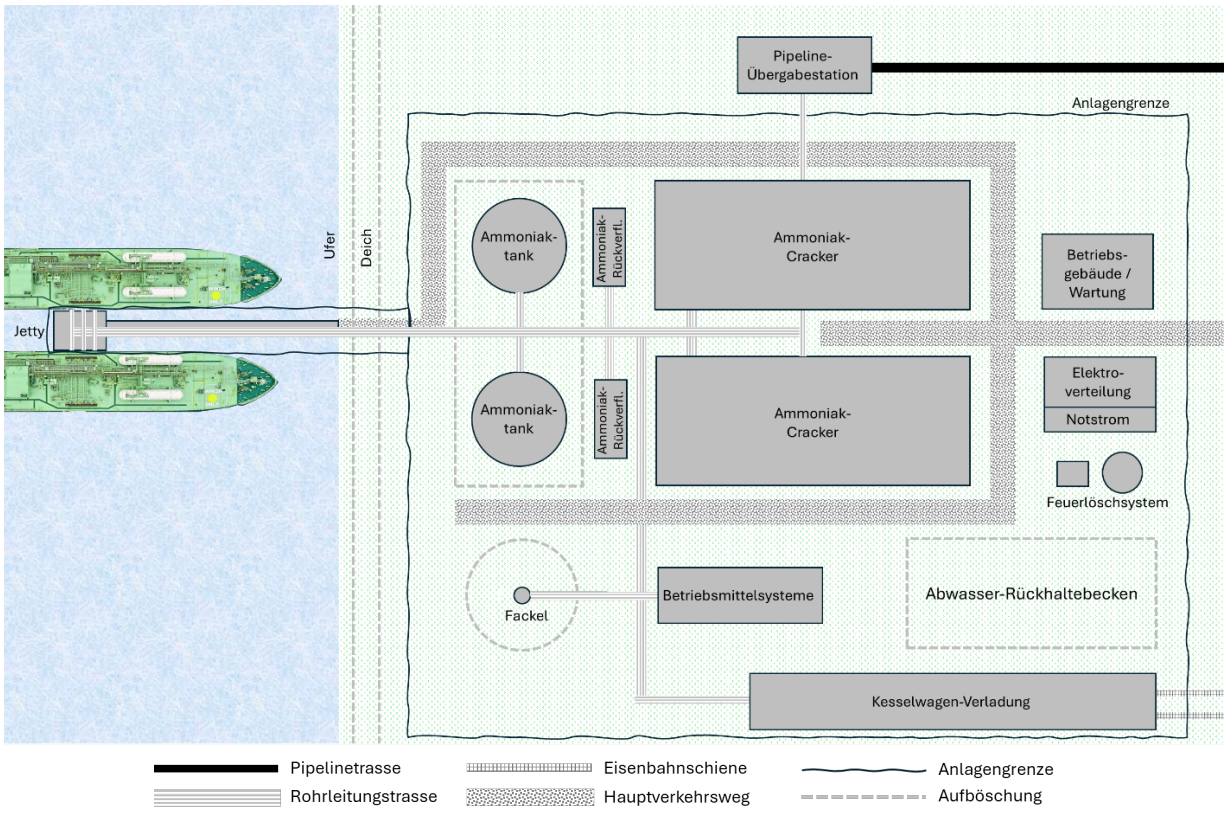
Abbildung 9 zeigt ein typisches Layout eines Ammoniak-Terminals mit Ammoniak-Cracker. Allerdings ist dieses nur als exemplarisch zu betrachten, da das tatsächliche Layout insbesondere im industriellen Umfeld im Einzelfall stark von den lokal verfügbaren Flächen und Verkehrswegen abhängig ist.

Der Jetty ist mit einem oder zwei Anlaufplätzen ausgestattet (Darstellung hier mit 2 Plätzen). Dabei können je nach den örtlichen Hafenverhältnissen zum Ufer senkrechte oder parallele Anlaufplätze sinnvoll sein.

Das Betriebsgebäude befindet sich in maximalem Abstand zu den Ammoniaktanks.

Die Pipeline-Übergabestation ist nicht Teil dieser Studie und daher nur angedeutet und nicht im unten angegebenen Flächenbedarf berücksichtigt.

Abbildung 9: Typisches Layout eines Ammoniak-Terminals mit Ammoniak-Crackern



Quelle: Eigene Darstellung, ILF

Für das Auftreten von Wechselwirkungen im Falle von Störereignissen sind insbesondere die gewählten Abstände zwischen den gefährdeten Anlagenteilen (Tanks, Prozessanlagen, Fackel, Verladeeinrichtungen, Betriebsgebäude) relevant. Die hier angenommenen Abstände sind in diesem Sinne nur exemplarischer Natur und müssen im Einzelfall nach dem Vorliegen von entsprechenden detaillierten Risikobetrachtungen und Studien (Explosion, Ausbreitung Gaswolken etc.) zur Risikominimierung nach dem ALARP[27]-Prinzip festgelegt werden.

In diesem Sinn sollten auch die Wasserstoffleitungen auf von den Ammoniakleitungen getrennten Rohrtrassen geführt werden.

2.3.4 Beschreibung der einzelnen Modellterminals

Entsprechend der unterschiedlichen Größe der Modellterminals und ihres unterschiedlichen Umfelds unterscheiden sich die drei Modellterminals bzgl. der Konfiguration (siehe Tabelle 14) und sind hinsichtlich Prozess und Layout entsprechend angepasst. Diese Unterschiede werden nachfolgend erläutert und illustriert.

2.3.4.1 Modellterminal 1 (groß, Küste, Industriegebiet)

Der Modellterminal 1 (3 Mio. t/Jahr) ist mit zwei großen Ammoniak-Tanks (je 50.000 t) und zwei Ammoniak-Crackanlagen (je 1 Mio. t/Jahr) ausgestattet. Jeder Ammoniak-Tank hat eine eigene Ammoniak-Rückverflüssigung, was sowohl aus betriebstechnischen Gründen vorteilhaft ist als auch die Betriebssicherheit durch Redundanz erhöht. Die Kesselwagenverladung ist aufgrund der hohen Terminal-Kapazität zweigleisig ausgeführt. Der Jetty hat aufgrund der hohen Anlauffrequenz zwei Anlaufplätze.

Das Layout entspricht der in Abbildung 9 dargestellten Anordnung.

Die Gesamtfläche für Modellterminal 1 wird mit ca. 300 m x 200 m = 60.000 m^2 angenommen. Dies resultiert aus einer kompakten Aufstellung, wie sie bei beengten Platzverhältnissen in existierenden Industriegebieten häufig notwendig ist.

2.3.4.2 Modellterminal 2 (mittel, Küste, Industriegebiet)

Modellterminal 2 (1 Mio. t/Jahr) ist mit nur einem Ammoniak-Cracker ausgestattet, der etwas kleiner als die Cracker in Modellterminal 1 ist (0,7 Mio. t/Jahr statt 1 Mio. t/Jahr). Die Ammoniak-Tanks haben nur jeweils die halbe Kapazität wie die in Modellterminal 1 (25.000 t statt 50.000 t)

Abbildung 10 zeigt ein exemplarisches Layout für den Modellterminal 2.

Der Platzbedarf der Anlagenteile ist entsprechend der geringeren Kapazität etwas kleiner als für Modellterminal 1. Allerdings sind die Sicherheitsabstände nach wie vor einzuhalten, und auch die Breite der Verkehrswege kann nicht verringert werden. Die Kesselwagenverladung ist wie in Modellterminal 1 zweigleisig ausgeführt.

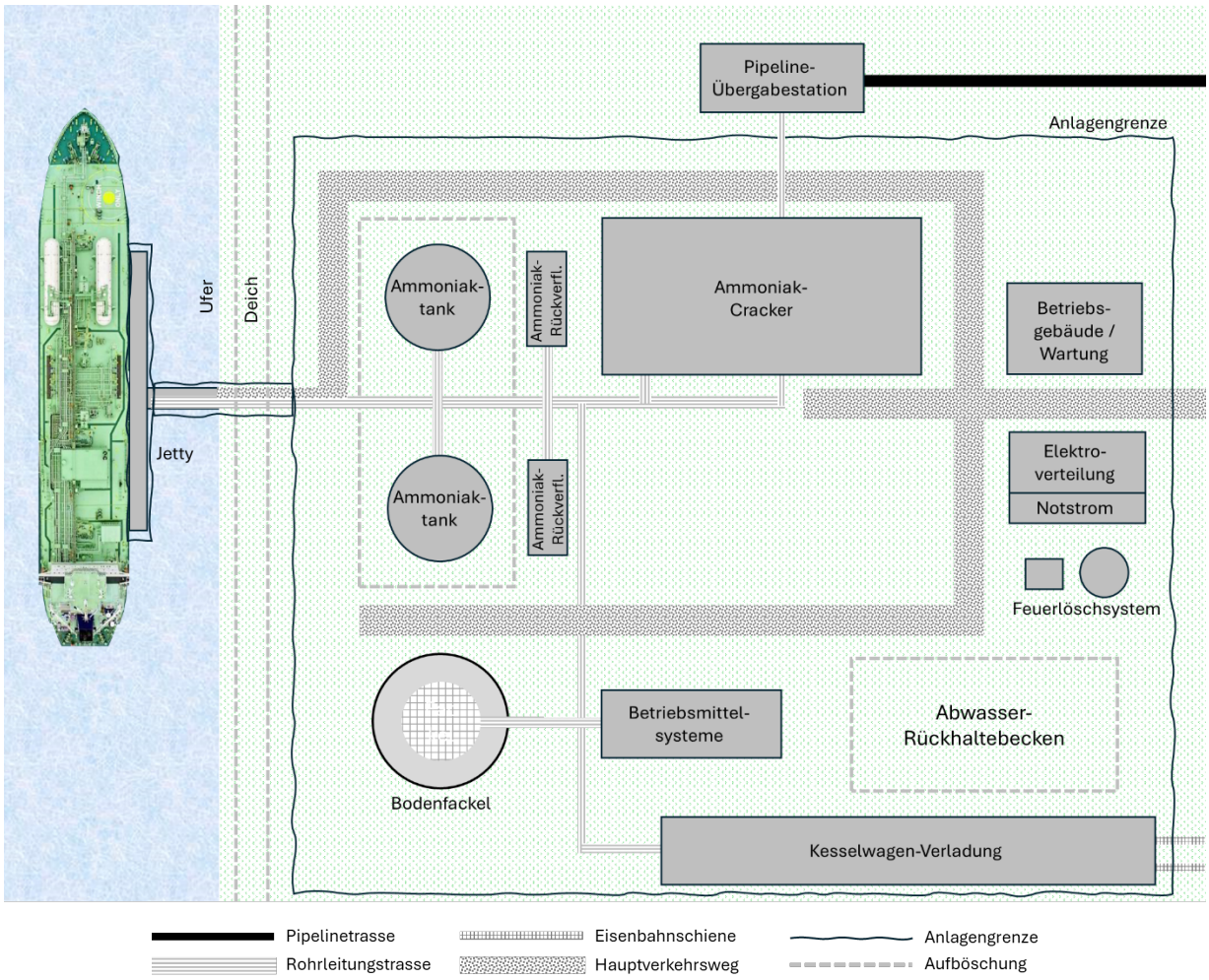
Da der Modellterminal 2 als stadtnah definiert ist, ist zur Lärm- und Lichtabschirmung eine Bodenfackel mit ausreichend hoher Ringwand vorgesehen.

Es wurde eine Reservefläche für die Installation eines weiteren Ammoniak-Crackers (max. 0,7 Mio. t/Jahr) vorgesehen, falls dies durch eine Steigerung des Wasserstoffbedarfs, eventuell bei gleichzeitiger Kapazitätserweiterung des Terminals, geboten ist.

[27] ALARP: **A**s **L**ow **A**s **R**easonably **P**ossible

Die Gesamtfläche für das Modell-Terminal 2 beträgt ca. 275 m x 150 m = 41.250 m² (kompakte Aufstellung).

Abbildung 10: Typisches Layout des Modellterminals 2



Quelle: Eigene Darstellung, ILF

2.3.4.3 Modellterminal 3 (klein, Binnengewässer, Greenfield)

Aus prozesstechnischer Sicht ist wegen der geringen Größe und der Greenfield-Umgebung des Modellterminal 3 (0,3 Mio. t/Jahr, nur Binnenschiffe) der Einsatz von Luftkühlern und der Verzicht auf ein Dampfsystem alternativlos.

Im Modellterminal 3 ist nur ein Tank vorgesehen, allerdings ist eine Aufstellfläche für einen später zu installierenden zweiten Tank berücksichtigt. Es wird eine Ammoniak-Rückverflüssigung mit Redundanz der Verdichter installiert.

Abbildung 11 zeigt ein exemplarisches Layout für den Modellterminal 3, mit nur einem Tank (25.000 t) sowie einem Ammoniak-Cracker. Der Jetty hat aufgrund der hohen Anlauffrequenz zwei Anlaufplätze.

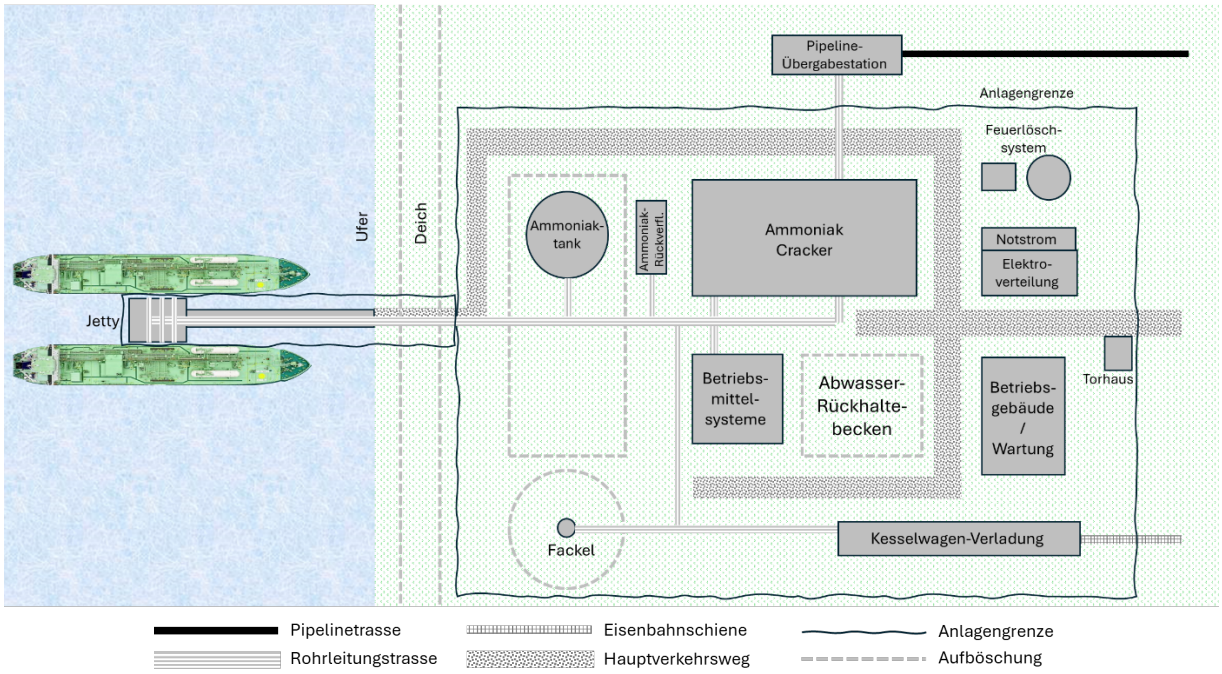
Der Platzbedarf der Anlagenteile ist entsprechend der geringen Kapazität verkleinert. Allerdings sind die Sicherheitsabstände nach wie vor einzuhalten, und auch die Breite der Verkehrswege kann nicht verringert werden. Die Kesselwagenverladung ist eingleisig ausgeführt.

Da das Modellterminal 3 in einer Greenfield-Umgebung steht, wurde ein Torhaus vorgesehen.

Es wurde eine Reservefläche für die Installation eines weiteren Ammoniak-Tanks (25.000 t) vorgesehen, falls dies bei einer späteren Kapazitätserweiterung geboten ist.

Die Gesamtfläche für das Modell-Terminal 3 beträgt ca. 250 m x 125 m = 31.250 m^2 (kompakte Aufstellung).

Abbildung 11: Typisches Layout des Modellterminals 3



Quelle: Eigene Darstellung, ILF

2.3.5 Energie- und Betriebsmittelverbräuche

Als Betriebsmittel benötigt ein Ammoniak-Terminal im Wesentlichen elektrische Energie aus dem Stromnetz – für den Betrieb der Ammoniakpumpen und -kompressoren (Ammoniak-Rückverflüssigung), der hydraulischen Gelenkladearme sowie für die MSR-Technik und die Beleuchtung. Da ein Teil dieser Stromversorgung für die Sicherheit des Terminals essenziell ist, ist eine entsprechende Notstromversorgung vorzusehen.

Für das Ammoniak-Rückverflüssigungssystem werden zur Kondensation des Ammoniaks Luftkühler eingesetzt, deren Ventilatoren ebenfalls elektrischen Strom verbrauchen. Falls Kühlwasser zu Verfügung steht (hier nicht betrachtet) kann auch dieses verwendet werden.

Durch die hohe Wärmeintegration des Ammoniak-Crackers entfällt der Bedarf für externe Prozesswärme. Es entsteht auch kein überschüssiger Dampf.

Für den Betrieb der Fackel-Pilotbrenner wird eine geringe Brennstoffmenge (ca. 10 Nm^3/h) benötigt. Hierfür kann, soweit am Standort verfügbar, Erdgas eingesetzt werden. Alternativ dazu wird Flüssiggas aus entsprechenden Tanks verwendet.

Für den Betrieb von MSR-Geräten und zum Spülen von Rohrleitungen ist Instrumentenluft und Stickstoff bereitzustellen. Instrumentenluft wird durch eine entsprechende Instrumentenluftstation (bestehend aus Filter, Kompressor, Trockner und Tank) bereitgestellt. Der Stickstoff wird in einem Flüssig-Stickstofftank vorgehalten und durch einen mit Luft erwärmten Verdampfer gasförmig bereitgestellt. Der Stickstofftank wird bei Bedarf mittels eines Tankfahrzeugs nachgefüllt.

Zur Neutralisation von mit Ammoniak verunreinigten Oberflächenwasser bei einem ungeplanten Störereignis (Leckage, Betrieb Wasserschleier) sind Neutralisationschemikalien vorzuhalten (H_2SO_4, NaOH).

Wesentliches Betriebsmittel eines Ammoniak-Import-Terminal ist also elektrischer Strom aus dem Netz.

Tabelle 16 zeigt die wesentlichen Stromverbraucher eines typischen mittleren Ammoniak-Terminals (1 Mio. t/Jahr), ohne Ammoniak-Cracker, mit ihrem kontinuierlichen Verbrauch, ihrem maximalen Verbrauch (z. B. Ladebetrieb, nachts etc.) und dem Jahresverbrauch.

Tabelle 16: Typische Stromverbraucher eines mittleren Ammoniak-Terminals (1 Mio. t/Jahr), ohne Ammoniak-Cracker

Verbraucher	Betriebsart	Einheit	Typischer Verbrauch	Bemerkung
Rückverflüssigung (Kompressor, Luftkühler)	kontinuierlich Max Jahresverbrauch	kW kW MWh/a	91 148 839	Abdampfmenge 0,0004 1/d * 50000 t /24 h/d = 0,83 t/h, COP 3,5, dH 1370 kJ/kg Beladung Binnenschiff: 1000 t/h / 0,69 kg/m³ = 1450 m³/h, mit 0,94 kg/m³ > 1,36 t/h 300.000 t/a Gesamtbeladung
Verladepumpen	Max Jahresverbrauch	kW MWh/a	436 131	1000 t/h, 120 m, 75% Eff. 36 t/h (300.000 t/a), 120 m, 75% Eff.
Transferpumpen (zum Ammoniak-Cracker)	kontinuierlich Jahresverbrauch	kW MWh/a	33 280	82 t/h (700.000 t/a), ca. 100 m, 75% Wirkungsgrad = 82000/3600 * 100 * 9,81 / 0,75
Betriebsmittel-systeme	kontinuierlich Jahresverbrauch	kW MWh/a	20 175	Hauptsächlich Instrumentenluftverdichter - Schätzwert
MSR-Technik	kontinuierlich Jahresverbrauch	kW MWh/a	50 438	Schätzwert
Beleuchtung	Max Jahresverbrauch	kW MWh/a	80 350	ca. 2 W/m², 50% Zeitanteil
Sonstiges	Max Jahresverbrauch	kW MWh/a	200 100	Gebäudebetrieb, Wartung - Schätzwert
Gesamt	**Summe kont. Summe Max Jahresverbrauch**	**kW kW MWh/a**	**194 1.058 2.313**	

Tabelle 17 zeigt die wichtigsten spezifischen Betriebsmittelverbräuche eines Ammoniak-Crackers, bezogen auf die Wasserstoffproduktmenge. Die Bandbreite der Verbräuche ist relativ groß aufgrund der unterschiedlichen Verfahren der Technologielizenzgeber, insbesondere hinsichtlich des Einsatzes eines internen Dampfkreislaufs zur Wärmeintegration.

Tabelle 17: Typische spezifische Betriebsmittelverbräuche eines Ammoniak-Crackers

Betriebsmittel	Hauptverbraucher	Einheit	Typischer Verbrauch[28]	Bemerkung
Elektrischer Strom	Einsatzpumpe, Kesselspeisewasser-pumpe, ggf. H_2-Verdichter	kWh/t H_2	100 - 300	Oberer Grenzwert mit H_2-Verdichter, der aber bei Pipeline-Übergabe außerhalb des Betrachtungsbereichs liegt.
Kühlwasser	ggf. Kondensator Ammoniak-Strippkolonne, ggf. Kühler nach H_2-Verdichter	t/t H_2	0 - 30	Bei vollständiger Wärmeintegration und ggf. Verwendung von Luftkühlern wird kein Kühlwasser benötigt. Dies ist wahrscheinlich auch die wirtschaftlichste Lösung.
Demineralisiertes Wasser	ggf. Dampfsystem	t/t H_2	0 - 0,1	Bei Verzicht auf internes Dampfsystem durch Direkt-Wärmeintegration Spaltgas/Ammoniak wird kein demineralisiertes Wasser benötigt. Dies ist wahrscheinlich auch die wirtschaftlichste Lösung.

Des Weiteren wird für den Betrieb des Ammoniak-Crackers Instrumentenluft und gasförmiger Stickstoff zur Spülung benötigt. Hierfür liegen aber keine Angaben der Lizenzgeber vor.

Die angegebenen Betriebsmittelverbräuche können auf andere Anlagenkapazitäten in erster Näherung linear umgerechnet werden.

[28] Bereich der Angaben verschiedener Technologielizenzgebern

2.4 Definition der Beispielstandorte

Neben der Definition typischer Modellterminals können für die Bewertung der Umweltauswirkungen aus Normal- sowie Störbetrieb überdies weitere (Standort-)Faktoren relevant sein. Die potenziell zu betrachtenden Aspekte sowie die Bandbreite ihrer Ausprägungsformen an deutschen Beispielstandorten werden im Folgenden vorgestellt. Hierbei werden insbesondere die heute bereits existierenden Terminal-Standorte als Ausgangspunkt der Überlegungen herangezogen. Darauf aufbauend werden drei generische Beispielstandorte definiert, die Basis für die Ausbreitungsrechnungen der Emissionen im Normalbetrieb (Kapitel 4) und im Störfall (Kapitel 5) sind und welche die erforderliche Grundlage der nachfolgenden Immissionsbewertung liefern.[29]

Zu den möglichen Umweltbedingungen, die in der Diskussion hinsichtlich Umweltauswirkungen Berücksichtigung finden könnten, zählen beispielsweise:

- Landschafts-/Vegetationstypen
- Oberflächenbeschaffenheit und -rauigkeit (z. B. durch Bebauung)
- Gewässertypen
- Wetterdaten (vorherrschende Windrichtung, Niederschlagsmenge / Luftfeuchtigkeit)
- Potenzielle weitere Aspekte (Zahl der Anwohnenden, weitere Schutzobjekte, saisonale Schwankungen (Niedrigwasser)

Beschreibungen zu den Grundlagen dieser Überlegungen finden sich in Anhang B.

Bei diesen Ausführungen ist anzumerken, dass die Studie keine spezifischen Standortanalysen durchführen wird, wie dies etwa im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) für den entsprechenden Standort gefordert ist. Vielmehr soll anhand generischer Projekte bzw. Beispiele eine erste Abschätzung hinsichtlich der Risiken und insbesondere Auswirkungen der Emissionen in Betriebs- oder Störfallszenarien auf die Umwelt diskutiert werden.

Ausgangspunkt bilden die Definitionen der Modellterminals in Tabelle 13 und Tabelle 14. Die dort beschriebenen Modellterminals werden entsprechend im Folgenden an sogenannte Beispielstandorte verortet (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Beschreibung der Bespielstandorte

Beispielstandort	Tiefwasserhafen	Tiefwasserhafen	Binnenstandort
Beschreibung	Nord- oder Ostsee	Flussunterlauf in Stadtnähe	**Rhein bis Basel, Elbe bis Wittenberge** Weser bis Bremen
Lage	Küste - Industriegebiet	Küste - Industriegebiet und stadtnah	Binnengewässer – Green-Field
Terminallayout	groß (Modellterminal 1)	mittel (Modellterminal 2)	klein (Modellterminal 3)

[29] Hinweis: Zu beachten ist, dass die Ausbreitungsrechnungen für kontinuierliche Emissionen im Normalbetrieb (kleine Mengen diverser Schadstoffemissionen über längere Zeiträume) im Rahmen der Analysen anders betrachtet werden als die Analyse potenzieller Störfälle (große Mengen Ammoniaks während eines Einzelereignisses). Dies spiegelt sich auch in der genutzten Methodik wider.

Beispielstandort	Tiefwasserhafen	Tiefwasserhafen	Binnenstandort
Angenommener Flächenbedarf	ca. 300 m x 200 m = 60.000 m²	ca. 275 m x 150 m = 41.250 m²	ca. 250 m x 125 m = 31.250 m²
Cracker-Kapazität	2 x 1 Mio. t/a	1 x 0,7 Mio. t/a	1 x 0,2 Mio. t/a
Umgebung / Höhenprofil	Meer neben der Anlage, ansonsten flache Umgebung im Radius von 2 km	Hafeneinfahrt neben der Anlage, ansonsten flache Umgebung im Radius von 2 km	Fluss neben der Anlage, ansonsten flache Umgebung im Radius von 2 km
Oberflächenrauigkeit	Meer, Industrieflächen, hafentypischer Bewuchs	Hafenbecken, Industrie- und Stadtflächen	Fluss, Industrieflächen, Stadtflächen und Vegetation (z. B. Wald / Weinbau)
Wetterdaten	Exemplarisch für Bremerhaven	Exemplarisch für Hamburg	Exemplarisch für Mannheim

3 Emissionen der Modellterminals im Normalbetrieb

Emissionen und Immissionen sind zentrale Begriffe im Umweltschutz. **Emissionen** beziehen sich auf die Freisetzung von Schadstoffen aus Quellen wie Industrieanlagen, Fahrzeugen oder Heizungen in die Umwelt. Diese Schadstoffe können in Form von Gasen, Partikeln oder Flüssigkeiten auftreten. **Immissionen** hingegen beschreiben die Konzentration dieser Schadstoffe in der Umwelt, also die Belastung, die auf Menschen, Tiere, Pflanzen und Materialien einwirkt. Während Emissionen an der Quelle gemessen werden, werden Immissionen an den Orten gemessen, an denen die Schadstoffe tatsächlich ankommen und ihre Wirkung entfalten. Die Regulierung und Kontrolle von Emissionen sind entscheidend, um Immissionen zu minimieren und somit die Umwelt und die Gesundheit der Bevölkerung zu schützen.

In Deutschland werden Emissionen und Immissionen durch verschiedene Gesetze und Verordnungen geregelt. Die wichtigsten Regelungen in ihrer jeweils gültigen Fassung sind:

1. **Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG[30])**: Dieses Gesetz bildet die Grundlage für den Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge. Es legt die Anforderungen an die Genehmigung und den Betrieb von Anlagen fest, die Emissionen verursachen.
2. **Verordnungen zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV)**: Diese Verordnungen regeln die Luftqualitätsstandards und die maximal zulässigen Emissionen bestimmter Schadstoffe, in Abhängigkeit vom Anwendungsfall.
3. **Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft[31])**: Diese Verwaltungsvorschrift konkretisiert die Anforderungen des BImSchG und legt spezifische Emissionswerte für Luftschadstoffe fest.

Die Modellterminals unterliegen einer Genehmigung nach § 4 und § 10 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG). Diese Vorschriften regeln die Genehmigungspflicht für Anlagen, die aufgrund ihrer Beschaffenheit oder ihres Betriebs potenziell schädliche Umwelteinwirkungen hervorrufen können. Zusätzlich wird eine wasserrechtliche Erlaubnis gemäß den § 8, § 9 und § 11 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) benötigt, um Niederschlagswasser und eventuell industrielles Abwasser einleiten zu dürfen. Diese Erlaubnis stellt sicher, dass die Nutzung von Gewässern im Einklang mit den gesetzlichen Anforderungen erfolgt und keine nachteiligen Veränderungen der Gewässereigenschaften verursacht werden.

Im Rahmen der Genehmigungsverfahren mit Beteiligung der Öffentlichkeit ist eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) durchzuführen. Diese Prüfung umfasst die frühzeitige Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der erheblichen Umweltauswirkungen eines Vorhabens. Dabei werden die Öffentlichkeit und die Behörden, deren Aufgabenbereich durch das Vorhaben berührt wird, beteiligt. Die Bewertung der Auswirkungen der Emissionen auf den Menschen erfolgt gemäß der 39. BImSchV[32] und der TA Luft. Diese Vorschriften legen die Grenzwerte bzw. Emissionswerte für Luftschadstoffe fest und definieren Maßnahmen zur Luftreinhaltung, um die Gesundheit der Bevölkerung und die Umwelt zu schützen.

Ziel dieses Kapitels ist es, die potenziellen Emissionen am Ammoniakterminal und Cracker **im Normalbetrieb** zu identifizieren.

[30] Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274; 2021 I S. 123), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 22. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 348) geändert worden ist.

[31] Neufassung der Ersten Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 18. August 2021.

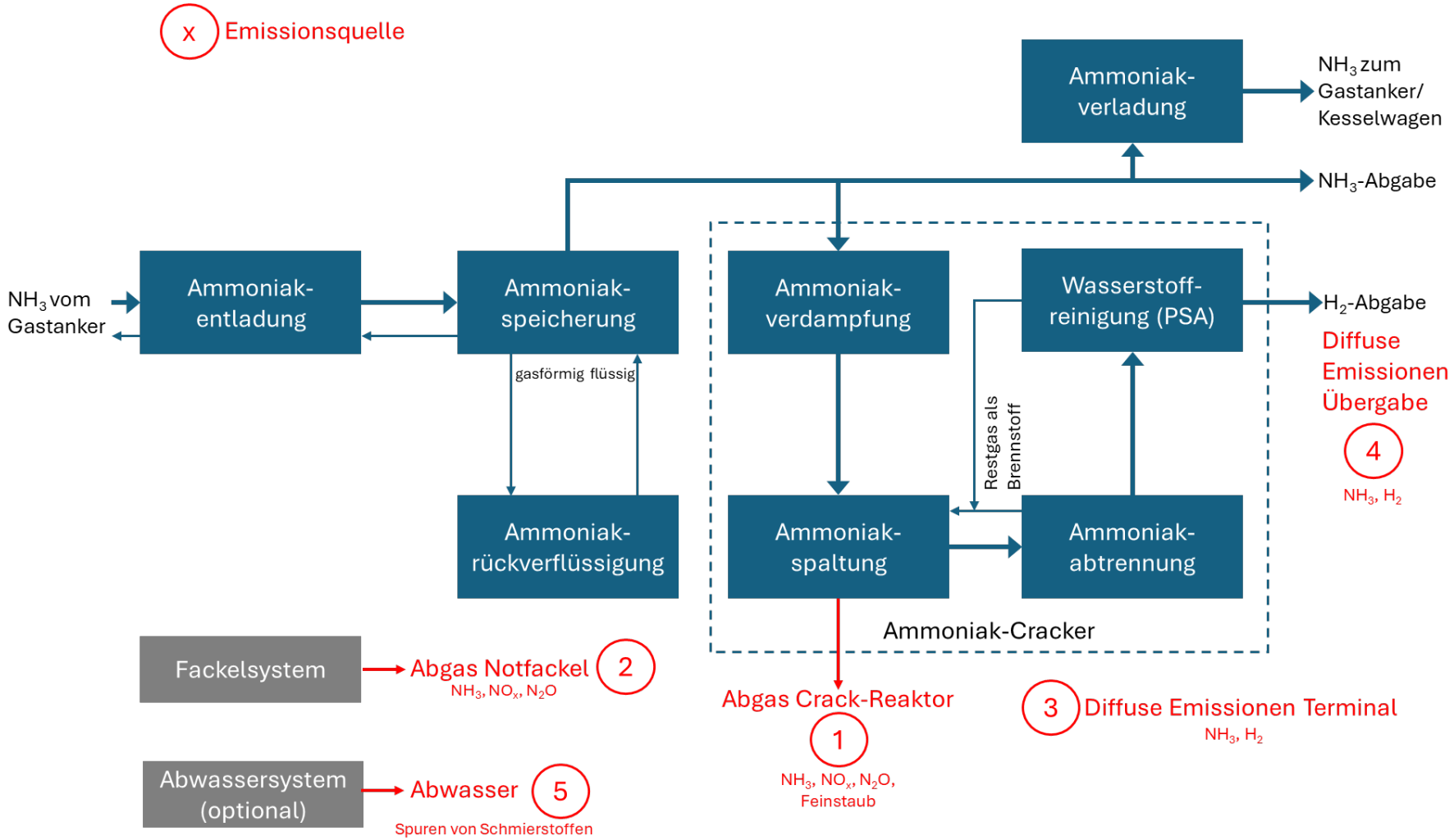
[32] 39. BImSchV: Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065), die zuletzt durch Artikel 112 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist.

Dabei betrachtet werden Emissionen von Ammoniak (NH_3), Lachgas (N_2O), Stickoxiden (NO_x; bestehend aus Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO_2), Wasserstoff (H_2) und Staub in die Atmosphäre sowie Emissionen von Ammonium (NH_4+), Nitriten (NO_2-), Nitraten (NO_3-) und Gesamtstickstoff über das Abwasser.

3.1 Übersicht über die Emissionsquellen im Normalbetrieb

Das nachstehend dargestellte Blockfließschema illustriert die Hauptprozessschritte eines exemplarischen Modellterminals, beginnend mit der Ammoniakentladung vom Schiff bis zur Verteilung von NH_3 beziehungsweise H_2. Die in Rot gekennzeichneten Annotationen repräsentieren die an den jeweiligen Hauptprozessschritten möglichen Emissionen. Eine detaillierte Analyse der individuellen Emissionsquellen sowie eine quantitative Analyse der zu erwartenden Emissionen wird in den Abschnitten 3.2 und 3.3. dargestellt.

Abbildung 12: Blockdiagramm Emissionsquellen



Quelle: eigene Darstellung, ILF

3.2 Beschreibung der Emissionsquellen im Normalbetrieb

Laut Angaben der einschlägigen Lizenzgeber treten im Normalbetrieb von Ammoniakterminals und Ammoniak-Crackern nur sehr geringe Mengen an Emissionen auf, die unter den gesetzlichen Emissionsgrenzwerten liegen. Dennoch ist es wichtig, sämtliche Emissionen zu identifizieren und zu quantifizieren, um potenzielle Umweltauswirkungen in Kapitel 5 bewerten zu können.

Die Emissionsquellen werden im Folgenden entsprechend der Nummerierung im Blockdiagramm beschrieben. Dabei werden die emittierten Stoffe angegeben.

3.2.1 Abgas Crack-Reaktor

- Der Kamin des Ammoniak-Crackreaktors setzt stickstoffoxidhaltige Emissionen (NO_x, N_2O) nach einer selektiven katalytischen Reduktion (SCR) des Rauchgases frei.
- Stickstoffdioxid (NO_2) entsteht im Ammoniak-Crackreaktor hauptsächlich durch die Verbrennung von Ammoniak bei hohen Temperaturen. Während dieser Verbrennungsprozesse reagiert der Stickstoff (N_2) aus der Luft oder dem Brennstoff mit Sauerstoff (O_2) und bildet Stickoxide (NO_x), zu denen auch NO_2 gehört.
- Der Kamin setzt Ammoniak-Emissionen durch in der SCR zugeführtes NH_3 frei.
- Feinstaub entsteht bei verschiedenen Prozessschritten in Ammoniak-Crackern. Hauptquellen sind der Abrieb des PSA-Molekularsiebs und des SCR-Katalysators. Da dies aber Festbetten sind, ist der Abrieb vergleichsweise gering. Dieser Feinstaub wird über den Kamin emittiert.

3.2.2 Abgas Fackel

- Je nach Verfahren wird während des An- und Abfahrens des Ammoniak-Crackers möglicherweise nicht vollständig umgesetztes NH_3 mit H_2 in der Fackel verbrannt. Dabei werden unter Umständen geringe Mengen an gasförmigen Emissionen für kurze Zeit über die Fackel freigesetzt.
- Stickoxide (NO_x) und Stickstoffdioxid (NO_2) entstehen dabei hauptsächlich bei unvollständiger Verbrennung von NH_3 oder bei hohen Temperaturen, bei denen Stickstoff und Sauerstoff aus der Luft reagieren. Die kontinuierlich brennende Pilotflamme der Fackel kann ebenfalls geringe Emissionen über die Fackel freisetzen.
- Lachgas (N_2O) kann in Spuren durch die Verbrennung von NH_3 während des An- und Abfahrens der Anlage freigesetzt und über die Fackel abgeführt werden (PNAS, 2023).
- Es ist allerdings anzustreben, dass der Fackelbetrieb beim An- und Abfahren minimiert wird und nicht spezifikationsgerechte Stoffe weitgehend im Ammoniak-Crackreaktor verbrannt werden, der über eine Abgasreinigung verfügt.

3.2.3 Diffuse Emissionen Terminal

- Diffuse Emissionen entstehen bei Flanschen, Ventilpackungen und Wellendichtungen. Dies sind vor allem Ammoniak (NH_3) und Wasserstoff (H_2). Diese sind durch regelmäßige Prüfung und Wartung zu minimieren.

3.2.4 Diffuse Emissionen Übergabe

- Weitere diffuse Emissionen können beim Umschlag von NH_3 in Lagerbehälter, Tankfahrzeuge oder Eisenbahn-Kesselwagen über temporäre, gekuppelte Verbindungen wie Schläuche oder Ladearme für Produkt und Gaspendelbetrieb entstehen.
- Um diese Emissionen zu minimieren, sind derartige temporäre Verbindungen vor der Trennung mit Stickstoff zu spülen, und der kontaminierte Stickstoff ist vor der Freisetzung geeignet zu reinigen.
- Ammoniak (NH_3) kann durch diffuse Emissionen beim Umschlag von Schiffen in Lagerbehälter ins Gewässer gelangen. Dort kann es sich in Ammonium (NH_4^+) umwandeln oder zu Nitrat und Nitrit reagieren. Zudem kann es sich mit Schwefeloxiden und Stickoxiden zu Salzen verbinden.

3.2.5 Abwasser

- Öl und Schmierstoffe können in geringen Mengen bei Wartungsarbeiten austreten.
- In den entsprechenden Anlagenbereichen wird das Oberflächenwasser allerdings gesondert aufgefangen und über einen Ölabscheider geleitet. Im Abwasser können nichtsdestotrotz geringe Spuren von Öl und Schmierstoffen enthalten sein.

3.2.6 Emissionsgrenzwerte

Die nachstehende Tabelle 19 zeigt eine Übersicht der Emissionsquellen während des regulären Anlagenbetriebs. Sie spezifiziert die emittierte chemische Verbindung, den Mechanismus bzw. den Ort der Entstehung.

Für Ammoniakspaltanlagen existieren noch keine großtechnischen Anlagen. Es liegen somit keine Erfahrungen zu Emissionen und daher auch keine spezifischen Emissionsbegrenzungen in den nationalen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelwerken (wie bspw. 13. BImSchV[33] oder TA Luft) vor. In einer Genehmigung einer Pilotanlage wurde ersatzweise die 44. BImSchV[34] herangezogen, bei größeren Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 50 MW käme als „Sicherheitsnetz“ auch der Abschnitt 6 der 13. BImSchV in Frage. Die dort enthaltenen Anforderungen beziehen sich jedoch auf bestehende Anlagen. Das UBA hält diese in Bezug auf Neuanlagen, insbesondere da die genannten Anlagen voraussichtlich immer mit Abgasreinigungsanlagen (SCR) ausgestattet werden, für deutlich zu hoch und nicht dem Stand der Technik für diese Anlagen entsprechend.

In Anlehnung an die Emissionsbegrenzungen neueren Datums und bei Anwendung von SCR-Abgasreinigungsanlagen unter Einbeziehung der Unsicherheiten durch die fehlenden Erfahrungen mit den Anlagen und den spezifischen Brenn- und Abgaszusammensetzungen, werden zur Verwendung in diesem Vorhaben die in Tabelle 21 angegebenen Emissionswerte als obere Begrenzung vorgeschlagen. Voraussichtlich sind die Betriebswerte aber deutlich geringer. Näheres dazu Anhang F: Emissionen und Immissionen im Normalbetrieb bei erwarteten Emissionsmengen.

[33] 13. BImSchV: Verordnung über Großfeuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen vom 6. Juli 2021 (BGBl. I S. 2514).

[34] 44. BImSchV: Verordnung über mittelgroße Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen vom 13. Juni 2019 (BGBl. I S. 804), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 12. Oktober 2022 (BGBl. I S. 1801) geändert worden ist.

Tabelle 19: Emissionsquellen im Normalbetrieb und die dazugehörigen Emissionsgrenzwerte

Emissionsquelle	Chemische Verbindung	Entstehungs-mechanismus	Grenzwerte (Emissionen)[35]
Abgas Crack-Reaktor	NH_3	Restemission nach selektiver katalytischer Reduktion	10 mg/Nm³ als Jahresmittelwert erwarteter Grenzwert (siehe oben)
	N_2O (Lachgas)		Derzeit kein Grenzwert Orientierungswert 70 mg/Nm³ (Salpetersäureanlagen gemäß TA Luft) Betriebswerte voraussichtlich deutlich geringer (Faktor 5)
	Gesamtstaub[36]	Katalysatorabrieb	20 mg/ Nm³ (Nr. 5.2.1 der TA Luft) keine nennenswerten Staub-Emissionen zu erwarten
	NOx	Bei unvollständiger Verbrennung oder hohen Temperaturen	100 mg/Nm³ als Jahresmittelwert *(Arbeitshypothese UBA – mangels existierenden Grenzwerts)*
Abgas Fackel	NH_3	Bei unvollständiger Verbrennung	Keine Grenzwerte Anforderungen der TA Luft und BVT sind einzuhalten
	NOx	Bei unvollständiger Verbrennung oder hohen Temperaturen	
	Gesamtstaub	Verbrennung von NH_3	
Diffuse Emissionen Terminal	H_2	Diffuse Emissionen	Keine summarischen Grenzwerte – Gesamtmengen bei Einhaltung der Dichtheitsanforderungen vernachlässigbar
	NH_3	Diffuse Emissionen	
Diffuse Emissionen Übergabe	H_2	Diffuse Emissionen bei Umschlag von Lagerbehälter in H_2-Leitung, LKW oder Eisenbahn	Keine summarischen Grenzwerte – Gesamtmengen bei Einhaltung der Dichtheitsanforderungen vernachlässigbar
	NH_3	Diffuse Emissionen in Gewässer bei Umschlag von Schiff in Lagerbehälter	NH_3 mit Umwandlung in NH_4^+, NH_3 mit Umwandlung zu Nitrat & Nitrit, Verbindung mit Schwefeloxiden und Stickoxiden zu Salzen (UBA, 2022) NH_3 <1 - 2 µg/l abhängig von Gewässertyp $NH_4^+ \leq 0{,}04$ mg/l Oberflächengewässer[37]

[35] Grenzwerte von gasförmigen Emissionen bei Normbedingungen (273,15 K und 101,3 kPa), bezogen auf 3% Sauerstoffgehalt, trocken, Jahresmittelwerte

[36] Als „Gesamtstaub" werden im gesetzlichen Kontext alle im Abgas enthaltenen Staubpartikel – unabhängig von ihrer Größe oder chemischen Zusammensetzung – bezeichnet.

[37] Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung, OGewV), 14. Dezember 2020, BGBl. I Nr. 61.

Emissionsquelle	Chemische Verbindung	Entstehungs-mechanismus	Grenzwerte (Emissionen)[35]
Abwasser	Spuren von Öl und Schmier-stoffen	Austritt von geringen Mengen während routinemäßiger Wartungsarbeiten	20 mg/l Kohlenstoffe gesamt[38]

3.3 Zu erwartende Emissionsmengen

3.3.1 Gasförmige Emissionen

Herstellerangaben zufolge liegen die Emissionen von Ammoniakterminals und Ammoniak-Crackern im Normalbetrieb deutlich unter den in der TA Luft und den einschlägigen Bundesimmissionsschutzverordnungen festgelegten Grenzwerten und sind daher voraussichtlich irrelevant (HPC, 31.10.2024).

Eine Gesamtzusatzbelastung gilt gemäß Absatz 1 Buchstabe c der TA Luft als irrelevant, wenn sie folgende Kriterien erfüllt: Für Immissionswerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit und Staubniederschlag überschreitet sie nicht drei Prozent des Immissionswertes. Bei Geruchsimmissionen liegt der Wert unter 0,02%. Für Immissionswerte zum Schutz der Vegetation und von Ökosystemen beträgt die Grenze zehn Prozent des jeweiligen Immissionswertes, und für Schadstoffdepositionen liegt sie bei fünf Prozent des jeweiligen Immissionswertes.[39] Nähere Ausführungen dazu sind im Kapitel 5 enthalten.

Ein Ammoniak-Modellterminal hat zwei Hauptemissionsquellen: den Schornstein des Ammoniak-Crackreaktors und die Fackel.

3.3.1.1 Gasförmige Emissionen aus dem Schornstein des Ammoniak-Cracker

Der **Schornstein** einer Ammoniak-Crackanlage dient dazu, die bei der Befeuerung des Ammoniak-Crackreaktors entstehenden Abgase (Rauchgas) nach der Verbrennung und Reinigung sicher in die Atmosphäre abzuleiten. Es werden hauptsächlich Wasserdampf (H_2O) und Stickstoff sowie Spuren von Stickoxiden (NO_x) und Ammoniak (NH_3) emittiert. Diese Abgase werden durch den Kamineffekt und die thermische Überhöhung so verteilt, dass sie sich in der Atmosphäre verdünnen und dissipieren, wodurch die Umweltbelastung minimiert wird.

Anhand von gemittelten Erfahrungswerten wurde exemplarisch die Menge an Abgas und der Sauerstoffgehalt für die drei Modellterminals abgeschätzt (Tabelle 20).

Tabelle 21 weist die Emissionsmengenströme[40] kritischer Komponenten aus dem Schornstein des Ammoniakcrackers im Normalbetrieb bei maximaler Ausschöpfung der in Tabelle 19 angegebenen Grenzwerte für die 3 Modellterminals aus.

[38] Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung, AbwV), 20. April 2024, Anhang 49. BGBl. I Nr. 13.

[39] Es wird darauf hingewiesen, dass die Hintergrundbelastung des Projektgebiets eine entscheidende Rolle bei der Berechnung der Gesamtbelastung spielt. Daher muss sie bei der immissionsschutz-rechtlichen Genehmigung stets im Kontext des spezifischen Standorts berücksichtigt werden.

[40] Summe über alle parallelen Ammoniak-Crackanlagen

Tabelle 20: Abgasdaten am Schornsteinaustritt

	Modellterminal 1 (groß)	Modellterminal 2 (mittel)	Modellterminal 3 (klein)
NH_3 zum Cracker (t/a)	2.000.000	700.000	200.000
Feuerungswärmeleistung Crackreaktor (MW)	2 * 160[41]	110	32
Abgas-Volumenstrom trocken[42] (Nm^3/h)	380.000	133.000	38.000
Sauerstoffgehalt im Abgas (%)	2	2	2

Tabelle 21: Emissionsmassenströme bezogen auf Jahresmittelwerte*

	Modellterminal 1 (groß)	Modellterminal 2 (mittel)	Modellterminal 3 (klein)
NH_3 (kg/h)	4	2,8	0,4
NO_x (kg/h) [43]	40	14	4,0
N_2O (kg/h) [44]	28	9,8	2,8

*Die angegebenen Massenströme sind Jahresmittelwerte bei vollständiger Ausschöpfung der erwarteten zulässigen Grenzwerte bzw. Orientierungswerte.

Die in Tabelle 21 genannten Emissionsmassenströme sind konservative Werte. Die tatsächlichen Emissionen dürften bei Einsatz der besten verfügbaren Technologien zu Verbrennung und Abgasreinigung erheblich niedriger sein.

3.3.1.2 Gasförmige Emissionen der Fackel

Die Fackel erzeugt sehr geringe absolute Emissionsmengen, da sie nur kurzzeitig im Falle von Betriebsstörungen und ggf. beim An- und Abfahren eingesetzt wird.

Temperaturen von über 1.000 °C und eine entsprechend lange Verweildauer bei niedrigen Austrittsgeschwindigkeiten gewährleisten eine nahezu vollständige Verbrennung der Fackel-Abgase.

Für die ununterbrochene Bereitschaft der Fackel für plötzlich auftretende Störfälle ist eine kontinuierlich brennende Pilotflamme vorhanden, die durch Propan, Erdgas (ca. 10 Nm^3/h) oder Wasserstoff gespeist werden kann.

[41] Da die beiden Ammoniak-Crackanlagen jeweils getrennt errichtet und betrieben werden, erfolgt keine Aggregation der Feuerungsleistung gemäß 13. BImSchV, § 4. Demzufolge werden die Grenzwerte entsprechend der Feuerungsleistung der Einzelanlagen definiert.

[42] Basis: wasserstoffreiches Brenngas, im Wesentlichen aus Restgas von 1-stufiger PSA.

[43] Basierend auf erwartetem Grenzwert 100 mg/Nm^3; voraussichtlich sind die Betriebswerte aber deutlich geringer – näheres dazu siehe Anhang D.

[44] Basierend auf Orientierungswert 70 mg/Nm^3 entsprechend Grenzwert für Salpetersäureanlagen in der TA Luft; voraussichtlich sind die Betriebswerte aber deutlich geringer – näheres dazu siehe Anhang E.

Für die Fackel gibt es keine allgemeingültigen Grenzwerte. Allerdings müssen die Anforderungen entsprechend des auf der TA Luft beruhenden Genehmigungsbescheids eingehalten werden.

Gegenüber den Schornstein-Emissionen des Ammoniak-Crackers sind die Schadstoff-Emissionen der Fackel im störungsfreien Normalbetrieb im Hinblick auf die Umwelteinwirkungen vernachlässigbar.

Ein Sonderfall ist die automatische Notentspannung und -entleerung des Ammoniak-Crackers zur Fackel aufgrund einer Gefahrensituation. In diesem Fall wird das Inventar des Crackers innerhalb kurzer Zeit zur Fackel entspannt, um damit das Risiko bei (drohender) Leckage, Brand und/oder Explosion zu senken. Eine derartige Notentleerung tritt nur äußerst selten auf.

Es wird hier exemplarisch angenommen, dass das Inventar eines 1 Mio. t/a Ammoniak-Crackers ca. 100 t Ammoniak umfasst. Dies wird wesentlich durch den Vorlagebehälter der Ammoniak-Einsatzpumpen bestimmt. Die Entleerungszeit wird mit 5 Minuten angenommen. Die Verbrennung von 100 t Ammoniak in 5 Minuten entspricht einer Verbrennungsleistung von ca. 6,1 MW. Nach Abzug der Leistung für Verdampfung und Erhitzung des Ammoniaks sowie der Verbrennungsluft verbleiben ca. 4 MW, die abgestrahlt werden. Diese Leistung bestimmt auch die Fackelhöhe sowie die Sicherheitsabstände der Fackel zur Sicherstellung einer maximalen Strahlungsleistung in der Umgebung.

Geht man von einer typischen Ausbrandrate der Fackel von 99% aus, wird bei einer Notentleerung ca. 1 t Ammoniak über das Abgas der Fackel mit freigesetzt. Da eine starke thermische Überhöhung vorliegt, sind gefährliche Immissionskonzentrationen auf Bodenhöhe unwahrscheinlich. Dies lässt sich auch durch eine Abschätzung nach VDI 3783 Blatt 1 für eine mittlere Ausbreitungssituation rechnerisch bestätigen, wenn z. B. die Fackelhöhe 15 m beträgt.

Gleichzeitig entstehen auch größere Mengen NO_x und N_2O, die aber mangels belastbarer Emissionsfaktoren in der Literatur nicht sinnvoll abgeschätzt werden können.

3.3.1.3 Diffuse Emissionen

Diffuse Emissionen von Prozessfluiden (NH_3, H_2) können konservativ aus den maximal erlaubten Leckraten der im Terminal verbauten Flanschen abgeschätzt werden.

Dazu sind in Ermangelung einer Detailplanung der Modellterminals Annahmen je Medium bezüglich der Anzahl der Flansche und des mittleren Durchmessers der Rohrleitungen zu treffen.

Tabelle 22 zeigt die getroffenen Annahmen und die resultierenden Emissionsmengen für NH_3. bei einer Flansch-Leckagerate von 0,01 mg/s/m.

Aufgrund der vorgeschriebenen sehr geringen Leckagerate sind die absoluten diffusen Emissionen von NH_3 aus den Modellterminals sehr klein und hinsichtlich ihrer Umweltwirkung vernachlässigbar.

Die resultierenden Emissionsmengen für H_2 sind aufgrund der deutlich geringeren Flanschzahl noch erheblich kleiner und werden deshalb hier nicht quantitativ betrachtet.

Tabelle 22: Abschätzung von diffusen gasförmigen NH_3-Emissionen

	Modellterminal 1 (groß)	Modellterminal 2 (mittel)	Modellterminal 3 (klein)
Anzahl Flansche	2000	1200	1000
Mittlerer Flanschdurchmesser (m)	0,3	0,2	0,15
NH_3 Emission (mg/s)	6	2,4	1,5
NH_3 Emission (kg/h)	0,022	0,009	0,005

3.3.2 Emissionen in Wasser

Es wird erwartet, dass während routinemäßiger Wartungsarbeiten Öle und Schmierstoffe lediglich in Kleinstmengen in das Abwasser gelangen und Mithilfe von Ölabscheidern weitgehend abgetrennt werden. Das Abwasser des Ammoniakterminals wird auf Öl und NH_3 überwacht, bevor es abgeleitet wird. Bei Bedarf erfolgt Abtransport zur externen Behandlung.

Weitere Abwässer fallen nicht an, da von der Verwendung von Luftkühlern (kein Kühlwasser) sowie einer vollständigen Wärmeintegration im Ammoniak-Cracker ohne Dampfsystem (keine Kondensat-Abschlämmung) ausgegangen wird.

Ammoniak ist ein gasförmiger Stoff, der sich leicht in Wasser löst und dabei Ammoniumionen (NH_4^+) bildet. Bei der Übergabe von Schiff zu Land können diffuse Emissionen von Ammoniak in das Wasser gelangen. Allerdings sind die Mengen dieser Emissionen als so gering zu erachten, dass sie keinen nennenswerten Einfluss auf die Wasserqualität in Hafenbecken haben.

4 Umweltwirkungen (Immissionen) im bestimmungsgemäßen Betrieb

In diesem Kapitel werden die Wirkungen (Immissionen) der für den Normalbetrieb gemäß Kapitel 3 ermittelten (Schadstoff-)Emissionen hinsichtlich unterschiedlicher Wirkungskategorien diskutiert (etwa Versauerung und Eutrophierung von Ökosystemen oder die Klimawirkung der Emissionen). Ziel des Kapitels ist ein generischer Überblick über die unterschiedlichen Immissionen von NH_3-Terminals auf die Umgebung – ohne jedoch eine Detailprüfung im Rahmen der jeweiligen Genehmigungsverfahren vorwegnehmen zu können.

Kapitel 4.1 beschreibt Methodik und Ergebnisse der Ausbreitungsrechnungen (Konzentration und Deposition) der unterschiedlichen Stickstoffkomponenten. Die Diskussion und Einordnung der Ergebnisse für die unterschiedlichen Wirkdimensionen erfolgt in Kapitel 4.2.

Hintergrund: Immissionen

Im Gegensatz zu Emissionen beziehen sich Immissionen im Wesentlichen auf die Einwirkung von Luftschadstoffen auf die Umwelt und den Menschen. Sie umfassen alle Schadstoffe, die durch Emissionen in die Atmosphäre gelangen und dort auf Pflanzen, Tiere, Gebäude und Menschen einwirken.

Emissionswerte, die unterhalb der Relevanzschwelle liegen, führen zu sehr niedrigen Konzentrationen von Schadstoffen in der Umgebungsluft. Dadurch bleiben die Immissionen gering und es sind in der Regel keine schädlichen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit oder die Umwelt zu erwarten. Diese geringe Zusatzbelastung trägt dazu bei, dass die Gesamtbelastung der Luftqualität nicht wesentlich erhöht wird, was besonders in bereits vorbelasteten Gebieten von Bedeutung ist. Dies ist auch für nahegelegene Schutzgebiete, wie Naturschutzgebiete oder Natura 2000-Gebiete[45], von besonderer Relevanz, damit die empfindlichen Ökosysteme in diesen Gebieten nicht beeinträchtigt werden. Die ökologische Bewertung der Stickstoffdeposition ist u.a. in der FFH-Verträglichkeitsprüfung zur Ausbreitung und Deposition im Normalbetrieb dokumentiert[46].

Allerdings müssen die zu erwarteten Emissionen der Anlage bei der Erstellung der Antragsunterlagen für die immissionsschutzrechtliche Genehmigung stets im Kontext der bestehenden Hintergrundbelastung des jeweiligen Standorts betrachtet werden. Dies hilft, die kumulativen Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit besser zu verstehen und sicherzustellen, dass die gesetzlichen Grenzwerte insgesamt eingehalten werden. Zu beachten ist, dass die zusätzliche Belastung durch Verbrennungsprozesse in Verbrennungsmotoren von Kraftfahrzeugen und Schiffen nicht Gegenstand vorliegender Untersuchung ist. Diese sind bei der Antragstellung dennoch mit einzuberechnen.

Ein aktuelles Beispiel für eine entsprechende Umweltverträglichkeitsprüfung einer Anlage, bei der ebenfalls Ammoniak umgesetzt und gelagert wird, wurde im Rahmen des Zulassungsverfahrens für die „Errichtung und Betrieb eines Ammoniak-Lagertanks mit einem Volumen von 80.000 m^3 Ammoniak (ca. 55.000 t)“ durch die Firma Mabanaft New Energy Gate Hamburg GmbH beauftragt und im Zuge der öffentlichen Auslegung (13.12.2024 – 13.01.2025) veröffentlicht (Mabanaft,

[45] In der Europäischen Union wurde 1992 beschlossen ein Schutzgebietsnetz, Natura 2000 genannt, aufzubauen. Es dient dem Erhalt wildlebender Pflanzen- und Tierarten und ihrer natürlichen Lebensräume gemäß der Fauna-Flora-Habitatrichtlinie (FFH-Gebiete) und EG-Vogelschutzrichtlinie.

[46] Stickstoffleitfaden BImSchG-Anlagen - Hinweise zur Prüfung von Stickstoffeinträgen in der FFH-Verträglichkeitsprüfung für Vorhaben nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz, 2019, siehe Link.

2024). Der Bericht zu UVP wurde durch die HPC AG erstellt (HPC, 31.10.2024). Das Gutachten umfasst eine detaillierte Betrachtung diverser Wirkfaktoren hinsichtlich unterschiedlicher Schutzgüter. Beim Vergleich mit dem in diesem Projekt anvisierten Modellterminal (siehe Kapitel 2.2) ist jedoch zu beachten, dass sich die UVP in diesem Fall lediglich auf das Tanklager beschränkt ist. Das Genehmigungsverfahren für den Bau eines Ammoniak-Crackers wird separat durchgeführt.

4.1 Ausbreitungsrechnungen mit AUSTAL

Um eine generische Diskussion der Wirkungen der identifizierten Emissionen zu ermöglichen, wird im Rahmen dieses Arbeitspakets auf die in Kapitel 2.4 eingeführte Definition möglicher Beispielstandorte mit den jeweiligen Terminalgrößen und Emissionswerten aufgebaut.

Dabei gilt es zu beachten, dass eine quantitative Analyse auf Basis von durchgeführten IMMI-Ausbreitungsrechnungen rein generischer Natur ist und vor dem Hintergrund der Zusatzbelastung durch entsprechende Terminals in den jeweiligen Kontext verschiedenerer Standorte mit jeweils unterschiedlicher Vorbelastung diskutiert werden soll.

4.1.1 Methodisches Vorgehen und Annahmen

Die Berechnungen zur Bestimmung der Immissionen wurden mithilfe der Software IMMI 2024 durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde das Berechnungsmodell AUSTAL 3.3.0 herangezogen, welches auf der TA Luft 2021 basiert.

Für jedes Modellterminal wurde ein separates generisches Modell erstellt, wobei Umgebungseinflüsse durch eine gemittelte, auf typischen Standortmerkmalen basierende Rauhigkeitslänge wiedergegeben werden. Die verwendeten Rauhigkeitslängen für die verschiedenen Regionen, wie städtische Prägung, Strand oder Hafengebiete, wurden der TA Luft 2021 entnommen. Es wurde eine allgemeine Austrittshöhe von 30 m für den Schornstein der Cracker angenommen, um die Emissionsausbreitungen der einzelnen Anlagengrößen miteinander zu vergleichen[47]. Die Emissionsmassenströme für die verschiedenen Modellterminals wurden der Tabelle 21 entnommen. Diffusive Emissionen durch Undichtigkeiten, beispielsweise bei Flanschverbindungen, sind im Verhältnis zu den Emissionen, die durch das Cracking von Ammoniak entstehen, gering, weshalb sie bei der Berechnung der Emissionen der Anlage vernachlässigt werden.

Die Deposition von NO_x kann aufgrund der unterschiedlichen Depositionsgeschwindigkeiten der einzelnen Komponenten, d.h. NO und NO_2, in IMMI nicht direkt ermittelt werden. Um den Einfluss auf die Stickstoffdeposition zu berücksichtigen, wurde ein Verhältnis von NO und NO_2 von 90 zu 10 angenommen, welches eine mögliche Zusammensetzung am Austritt des Ausbläsers repräsentiert (Alnajideen, et al., 2024). Die exakte Zusammensetzung kann durch mehrere Faktoren variieren, wie zum Beispiel der Zersetzungsprozess selbst, aber auch von der Austrittstemperatur oder ob und welche Katalysatoren verwendet werden. Durch Umwelteinflüsse, wie Sonnenstrahlung, wird NO zu NO_2 umgesetzt, welches in der Software berücksichtigt wird, wobei der Anteil an NO mit zunehmender Distanz zur Anlage abnimmt.

Die verwendeten Wetterdaten stammen aus dem Open Data Angebot des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Sie wurden individuell für die drei Modellterminals ermittelt und sind repräsentativ für die jeweilige Region. Für jeden Standort wurde ein Referenzjahr für den Zeitraum 2005 bis 2023 erstellt. Die berücksichtigte Anemometerhöhe beträgt 10 Meter.

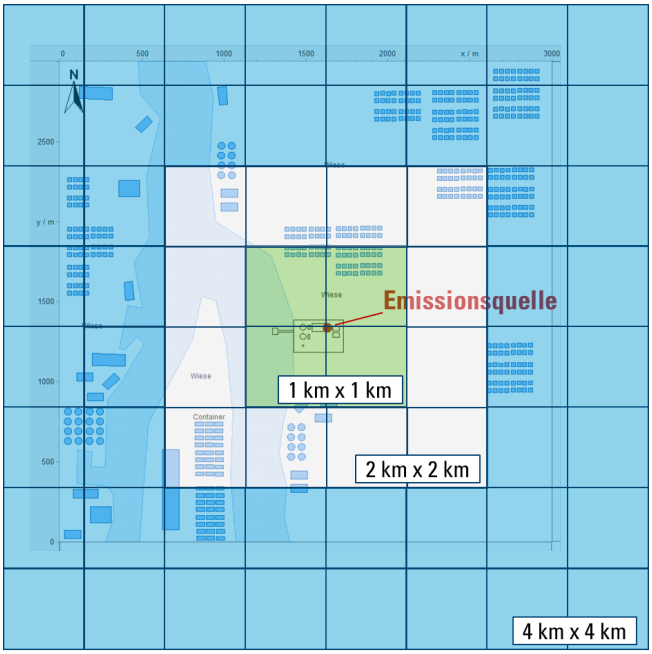
[47] Die Höhe des Schornsteins richtet sich nach den jeweiligen Umgebungsbedingungen wie Vorbelastung, Region und Ausstoßmenge. Sie muss für jede Anlage individuell auf Grundlage der vorgegebenen Rahmenbedingungen festgelegt werden.

Für die Berechnungen wurde ein Gitter mit einer Auflösung von 500 m x 500 m verwendet, um eine großflächige Analyse der Emissionen und deren Auswirkungen zu ermöglichen. Dieses Raster ist schematisch in Abbildung 13 zu sehen. Aus dem Raster ergeben sich auch die für die Analysen herangezogenen Rasterflächen in jeweiligen Abständen zur Emissionsquelle (von 1x1km bis 20x20 km). Die Bestimmung der durchschnittlichen Massenkonzentration sowie Deposition erfolgte für festgelegte Entfernungen vom Emissionspunkt, wobei dieser exakt im Schnittpunkt von vier Rasterfeldern positioniert wurde. Neben der durchschnittlichen Massenkonzentration bzw. Deposition wird auch die maximal zu erwartende Anreicherung für die Rastergröße bestimmt.

Der betrachtete Bereich wurde dazu in folgende fünf Flächen unterteilt:

1. 1000 m x 1000 m um Emissionspunkt (Bereich: 0 – 500 m = grüne Fläche)
2. 2000 m x 2000 m um Emissionspunkt (Bereich: 500 – 1000 m = weiße Fläche)
3. 4000 m x 4000 m um Emissionspunkt (Bereich: 1000 – 2000 m = blaue Fläche)
4. 10 000 m x 10 000 m um Emissionspunkt (Bereich: 2000 – 5000 m = nicht gezeigt)
5. 20 000 m x 20 000 m um Emissionspunkt (Bereich: 5000 – 10 000 m = nicht gezeigt)

Abbildung 13: Rasternetz um Emissionsquelle als Basis der Ausbreitungsrechnungen



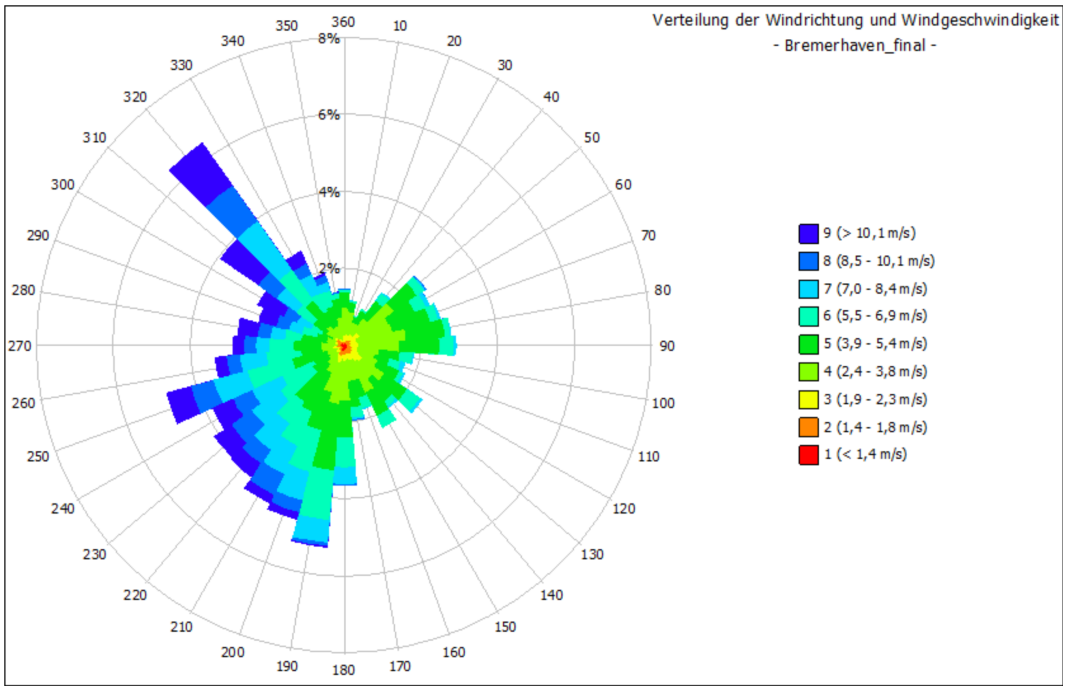
Quelle: eigene Darstellung, LBST, ILF.

4.1.2 Beschreibung der generischen Beispielstandorte

Die Beispielstandorte wurden so gewählt, dass sie typische Bedingungen für verschiedene Terminalgrößen und Emissionsszenarien abbilden. Für eine bessere Einordnung der Standorte in die spezifischen Regionen wurden beispielhafte Industrieareale (z. B. Tanklager) sowie Gebäude in die Modelle integriert, welche in blau in den Ergebnisabbildungen dargestellt werden. Die typische Zusammensetzung dieser Umgebungseinflüsse für die einzelnen Modelle, die über eine gemittelten Rauhigkeitslänge in die Berechnung eingehen, wurde durch eine Betrachtung verschiedener Standorte, die den entsprechenden Anforderungen entsprechen, abgeleitet. Grundlegende Überlegungen zur Definition der Bespielstandorte finden sich in Kapitel 2.4.

Modellterminal 1 spiegelt einen Standort mit einem Tiefseehafen wider und befindet sich in der Nähe zum Meer. Die Einflüsse der Bodenrauigkeit auf die Ausbreitung der Emissionen wird durch einen Rauhigkeitslänge von 0,27 m berücksichtig. Die entsprechenden Referenzrauhigkeitslängen wurden der TA Luft 2021 entnommen. Als Basis für die Wetterdaten wurde exemplarisch Bremerhaven verwendet, um den Einfluss der Küstennähe zu berücksichtigen. Bei der Orientierung der Anlage im Modell wurde darauf geachtet, dass die Windverhältnisse aus den entsprechenden Himmelsrichtungen erfolgen. Die Windrose ist in Abbildung 14 dargestellt.

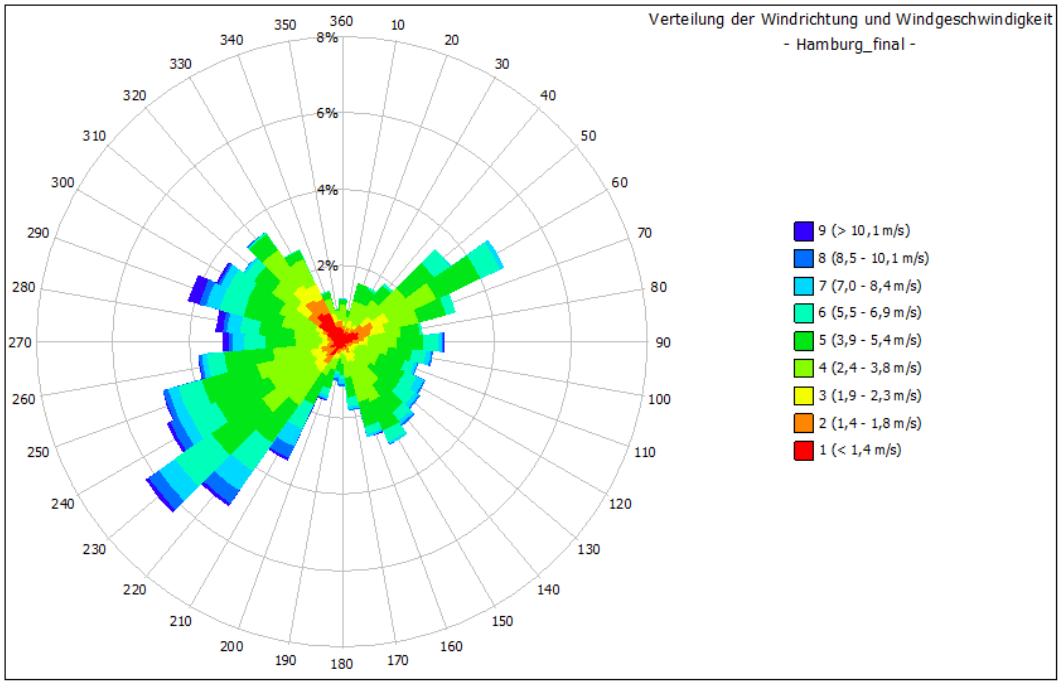
Abbildung 14: Beispielwindrose für das Modellterminal 1



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Modellterminal 2 befindet sich ebenfalls an einem Tiefseehafen. Für die Simulierung dieses generischen Standorts wurde eine Rauhigkeitslänge von 0,82 m verwendet, welche auf den Referenzwerten aus der TA Luft 2021 beruhen. Als Basis für die Wetterdaten dient exemplarisch Hamburg. Die zugehörige Windrose ist in Abbildung 15 aufgeführt.

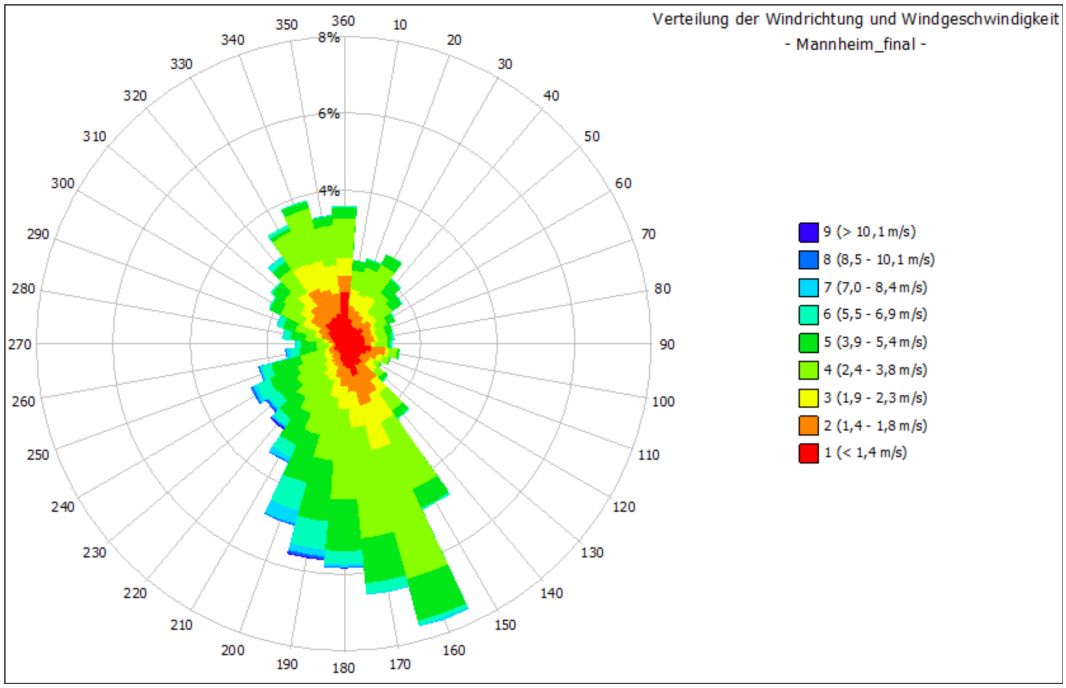
Abbildung 15: Beispielwindrose für das Modellterminal 2



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Für das Modellterminal 3 wird von einem Binnenstandort mit einer Rauhigkeitslänge von 1,04 m ausgegangen. Zur Berücksichtigung der Wettereinflüsse für diesen generischen Binnenstandort wurden die Wetterdaten von Mannheim verwendet. Die entsprechende Windrose ist in Abbildung 16 dargestellt.

Abbildung 16: Beispielwindrose für das Modellterminal 3



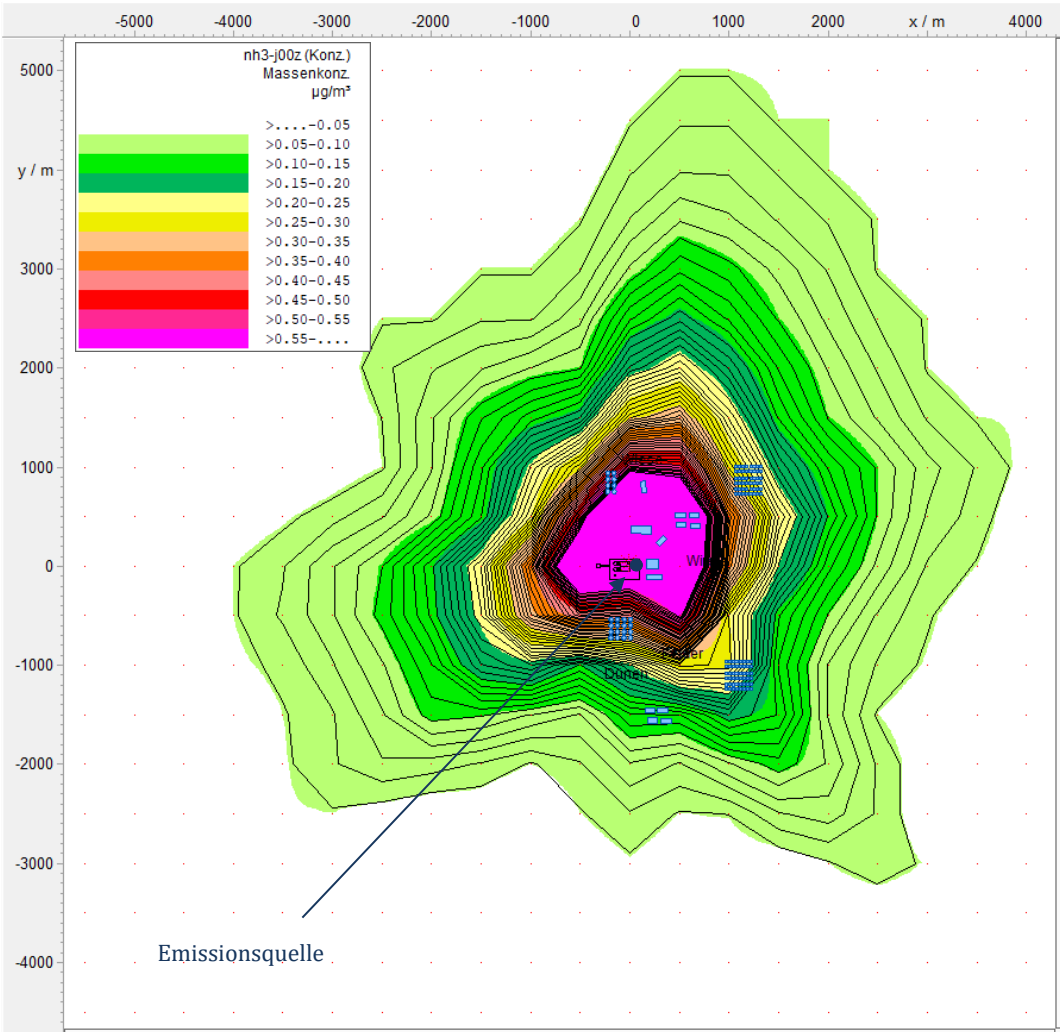
Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Die verwendeten Wetterdaten und der zugehörige Standort dienen als Orientierung und sollen keinen Standort hervorheben oder bevorzugen.

4.1.3 Ermittelte Massenkonzentrationswerte

Für jedes Modellterminal wurden die Konzentrationen für die einzelnen Emissionen ermittelt. Die Ausdehnung der Isolinien basiert auf der Modellauflösung, wobei für Ammoniak ein Minimalwert von 0,05 µg/m³ zugrunde gelegt wird; die Werte der Isolinien erhöhen sich zur Mitte hin schrittweise um jeweils 0,01 µg/m³ bis zu einem Maximalwert von 0,55 µg/m³. Dabei hat sich gezeigt, dass in dem betrachteten Gebiet die räumliche Ausbreitung der Emissionen weitgehend stoffunabhängig ist und allein von den Wetterbedingungen abhängt. Aufgrund dessen ist im Folgenden für jeden Standort jeweils die Emissionsverteilung für Ammoniak aufgeführt. Für die anderen Emissionen sind die Ergebnisse im Anhang E aufgelistet. Für die bessere Vergleichbarkeit der Emissionsausbreitungen der einzelnen Standorte wurde für Ammoniak sowie jeweils für die anderen Emissionskomponenten eine vereinheitlichte Emissionslegende verwendet.

Abbildung 17: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NH_3-Konzentrationen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Im Fall des Modellterminal 1 breiten sich, analog wie in Abbildung 17 gezeigt, die verschiedenen Emissionskomponenten in alle Richtungen aus, wobei die weiteste Ausdehnung in Richtung Norden/Nordosten erfolgt. Der niedrigste aufgelöste Konzentrationswert für Ammoniak von 0,05 µg/m^3 wird hier bei einer Distanz von ca. 5000 m unterschritten. Die geringste Ausdehnung erfolgt in Richtung Nordwesten, was mit der Windrose für den Standort übereinstimmt. Die höchsten Konzentrationen werden ca. 500 m nördlich der Anlage erreicht. Eine ähnliche Ausbreitung zeigt sich bei N_2O (Abbildung 41) und NO_x (Abbildung 42). Die größte Ausbreitung erfolgt Richtung Norden, wobei die kleinste Isolinie bei NO_x (0,51 µg/m^3) bei einer Distanz von 6500 m unterschritten wird und bei Lachgas (0,36 µg/m^3) bei einer Distanz von 5500 m.

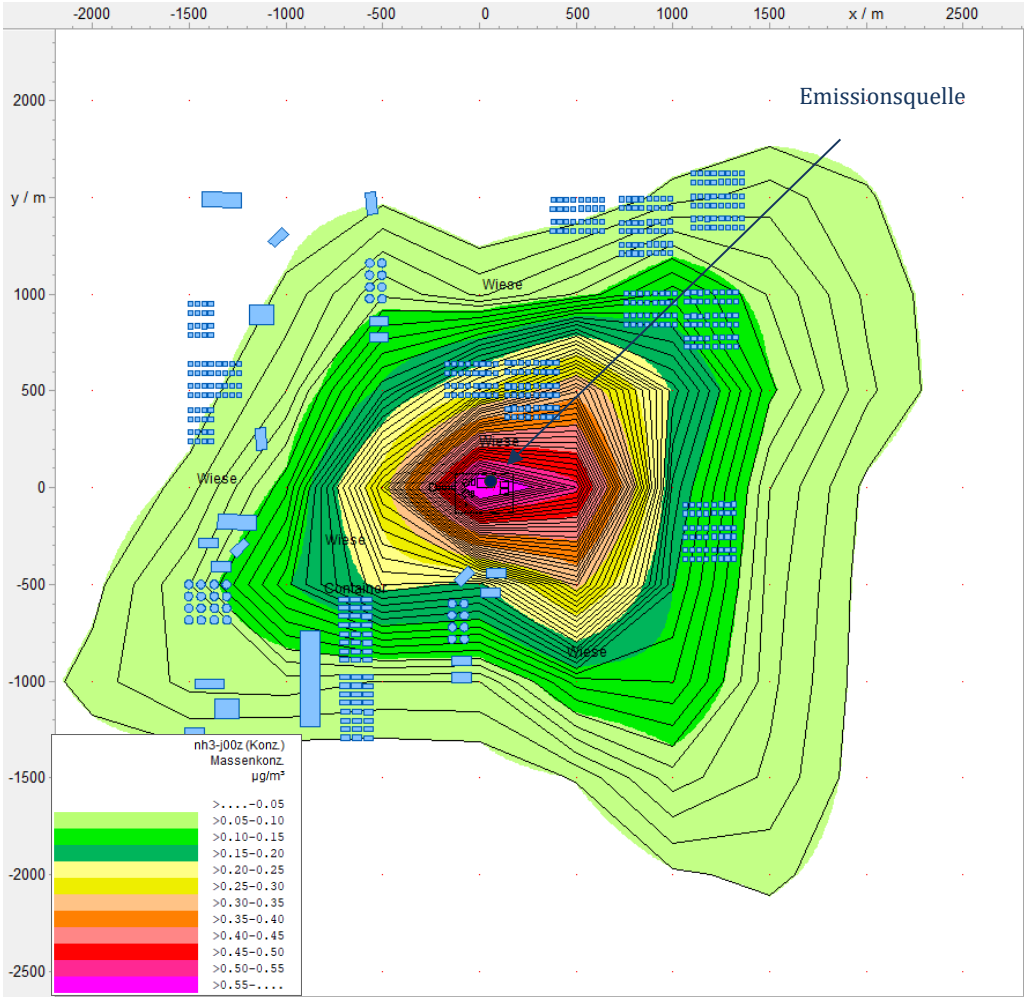
Die Emissionskomponenten für Beispielstandort 1 sind in der nachfolgenden Tabelle 23 zusammengefasst.

Tabelle 23: Massenkonzentrationen der Komponenten NO_x, NH_3 und N_2O für das Modellterminal 1

[µg / m³]	Maximale Konzentra-tion	Durchschnittliche Konzentration in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
NO_x	11,600	6,775	5,300	2,283	0,649	0,215
NH_3	0,990	0,593	0,437	0,172	0,043	0,013
N_2O	8,139	4,746	3,714	1,597	0,455	0,151

Im Falle vom Modellterminal 2 erfolgt die größte Ausbreitung für alle drei betrachteten Emissionskomponenten in Ost-West Richtung, wobei sich die Komponenten im Osten stärker ausbreiten. Im Falle von NH_3 wird ein Wert von 0,05 µg/m^3 bis zu einer Distanz von 2250 m erreicht (siehe Abbildung 18). NO_x (Abbildung 44) breitet sich analog zu Ammoniak aus, wobei die Anreicherung von Stickoxiden im Osten stärker ausgeprägt ist. NO_x-Konzentrationen oberhalb eines Wertes von 0,51 µg/m^3 können bis zu einer Distanz von 2700 m gemessen werden. N_2O (Abbildung 43) zeigt ein ähnliches Ausbreitungsverhalten, mit einer maximalen Ausbreitung (0,36 µg/m^3) von circa 2700 m in Richtung Südosten. Aufgrund der sich ausgleichenden Wetterbedingungen befindet sich die höchste Konzentration auf dem Anlagengelände.

Abbildung 18: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NH_3-Konzentrationen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Die gemittelten Massenkonzentrationen für den Beispielstandort 2 sind in Tabelle 24 aufgeführt.

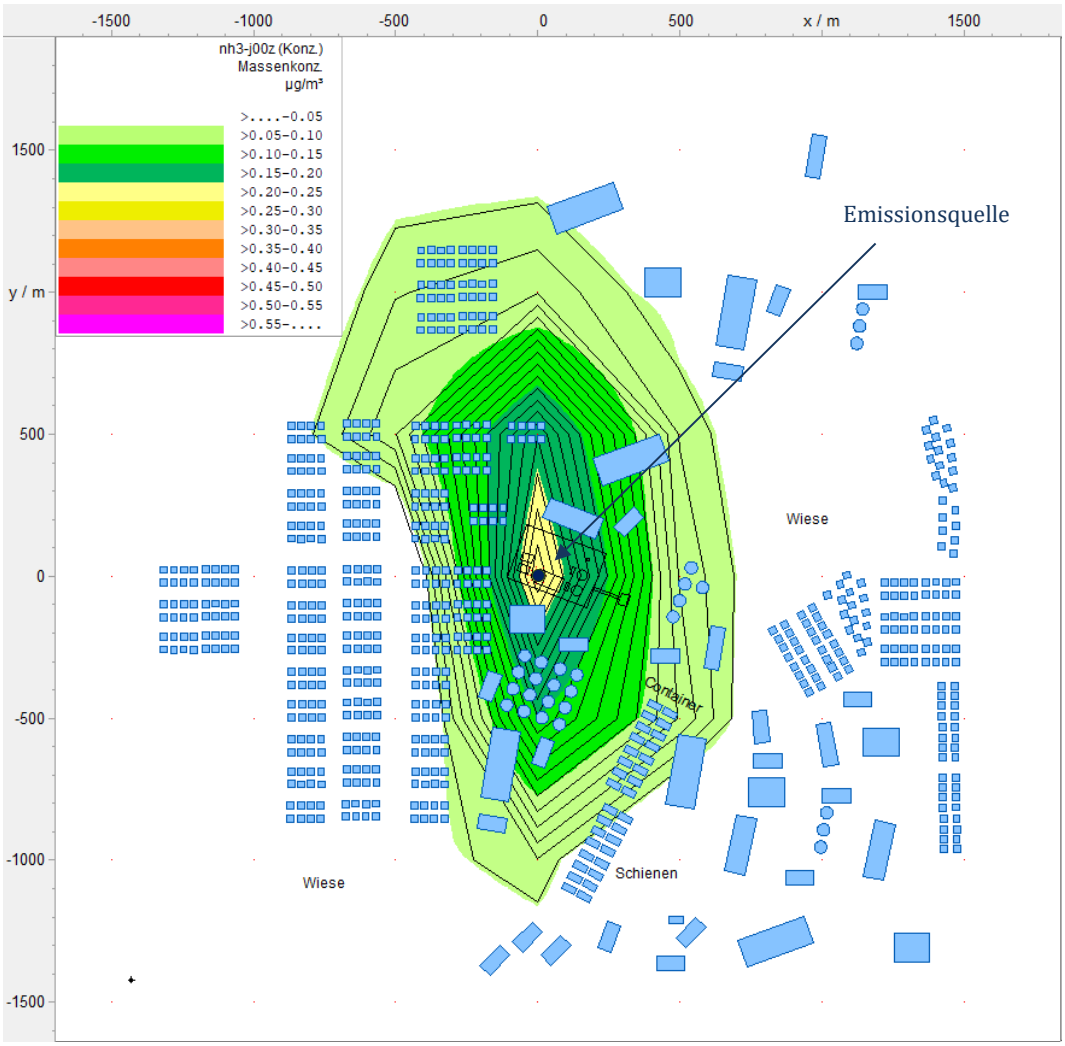
Tabelle 24: Massenkonzentrationen der Komponenten NO_x, NH_3 und N_2O für das Modellterminal 2

[µg / m³]	Maximale Konzentra-tion	Durchschnittliche Konzentration in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
NO_x	6,100	4,300	2,017	0,729	0,196	0,052
NH_3	0,560	0,378	0,169	0,056	0,014	0,002
N_2O	4,265	3,013	1,417	0,510	0,137	0,041

Modellterminal 3 befindet sich an einem Binnenstandort, wobei der Wind hauptsächlich aus dem Süden und teilweise aus dem Norden kommt. Dies zeigt sich bei den Ausbreitungen der Emissionen, welche sich hauptsächlich auf einer Achse von Norden nach Süden anreichern, wobei aufgrund der stärkeren Winde aus dem Süden die Emissionen im Norden vermehrt

ansammeln. Die Ausbreitung in östliche bzw. westliche Richtung ist sehr gering. Aufgrund der ausgeglichenen Windverhältnisse wird die höchste Massenkonzentration bei allen drei Komponenten auf dem Gelände der Anlage erreicht. NH_3-Konzentrationen oberhalb von 0,05 µg/m³ werden bis zu einer Distanz von 1300 m erreicht (Abbildung 19). NO_x (Abbildung 45) breitet sich bis zu 1500 m (Isolinie 0,51 µg/m³) in nördliche Richtung und 1300 m in südliche Richtung aus. N_2O (Abbildung 46) breitet sich anlog zu NO_x aus mit einer maximalen Ausdehnung von Süden nach Norden mit 2800 m (Isolinie 0,36 µg/m³).

Abbildung 19: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – NH_3-Konzentrationen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

In Tabelle 25 sind die Ergebnisse der Massenkonzentrationen für Beispielstandort 3 zusammengefasst.

Tabelle 25: Massenkonzentrationen der Komponenten NO_x, NH_3 und N_2O für das Modellterminal 3

[µg / m³]	Maximale Konzentra0-tion	Durchschnittliche Konzentration in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
NO_x	2,600	1,575	0,500	0,235	0,059	0,002
NH_3	0,230	0,133	0,041	0,018	0,003	0,000
N_2O	1,811	1,085	0,352	0,163	0,045	0,013

4.1.4 Ermittelte Depositionswerte

Für jedes Modellterminal wurden die Depositionen für die einzelnen Emissionen ermittelt. Die Ausdehnung der Isolinien basiert auf der Modellauflösung, wobei für Ammoniak ein Minimalwert von 0,15 kg ha^{-1} a^{-1} zugrunde gelegt wird; die Werte der Isolinien erhöhen sich zur Mitte hin schrittweise um jeweils 0,3 kg ha^{-1} a^{-1} bis zu einem Maximalwert von 1,65 kg ha^{-1} a^{-1}.

Bei N_2O handelt es sich um ein Treibhausgas, weshalb keine relevante Deposition stattfindet und es somit in diesem Kapitel nicht untersucht wird. Da die Deposition von NO_x in IMMI nicht direkt ermittelt werden kann, wurde ein Verhältnis von 90 NO zu 10 NO_2 verwendet, um dennoch den Einfluss berücksichtigen zu können.

Die Deposition am Standort 1 verhält sich von der Ausbreitung der Gase sehr ähnlich wie die Konzentrationsverteilung, wobei das Depositionsverhalten größtenteils identisch ist und in sinnvollem Zusammenhang mit der entsprechenden Windrose steht, die in Abbildung 14 zu sehen ist. Die Anordnung der Isolinien in Abbildung 20 lässt vermuten, dass sich der maximale Depositionswert von NH_3 etwa 500 m nördlich der Emissionsquelle befindet. Die maximale Depositionsausbreitung (Isolinie für 0,15 kg ha^{-1} a^{-1}) liegt nördlich bei etwa 4700 m und im Westen bei etwa 4000 m. Trotz der größten Menge zu Beginn nimmt die Depositionsmengen an NH_3 prozentual am schnellsten ab (Tabelle 20). Die Deposition an NO (Abbildung 48) nimmt aufgrund der Umsetzung zu NO_2 schneller ab als NO_2, wobei ab 5500 m die NO-Deposition unterhalb von 0,07 kg ha^{-1} a^{-1} liegt. Im Falle von NO_2 (Abbildung 47) können Depositionen oberhalb von 0,06 kg ha^{-1} a^{-1} bis über 10000 m in nördliche Richtung und in westliche Richtung erreicht werden, trotz der geringen Mengen zu Beginn.

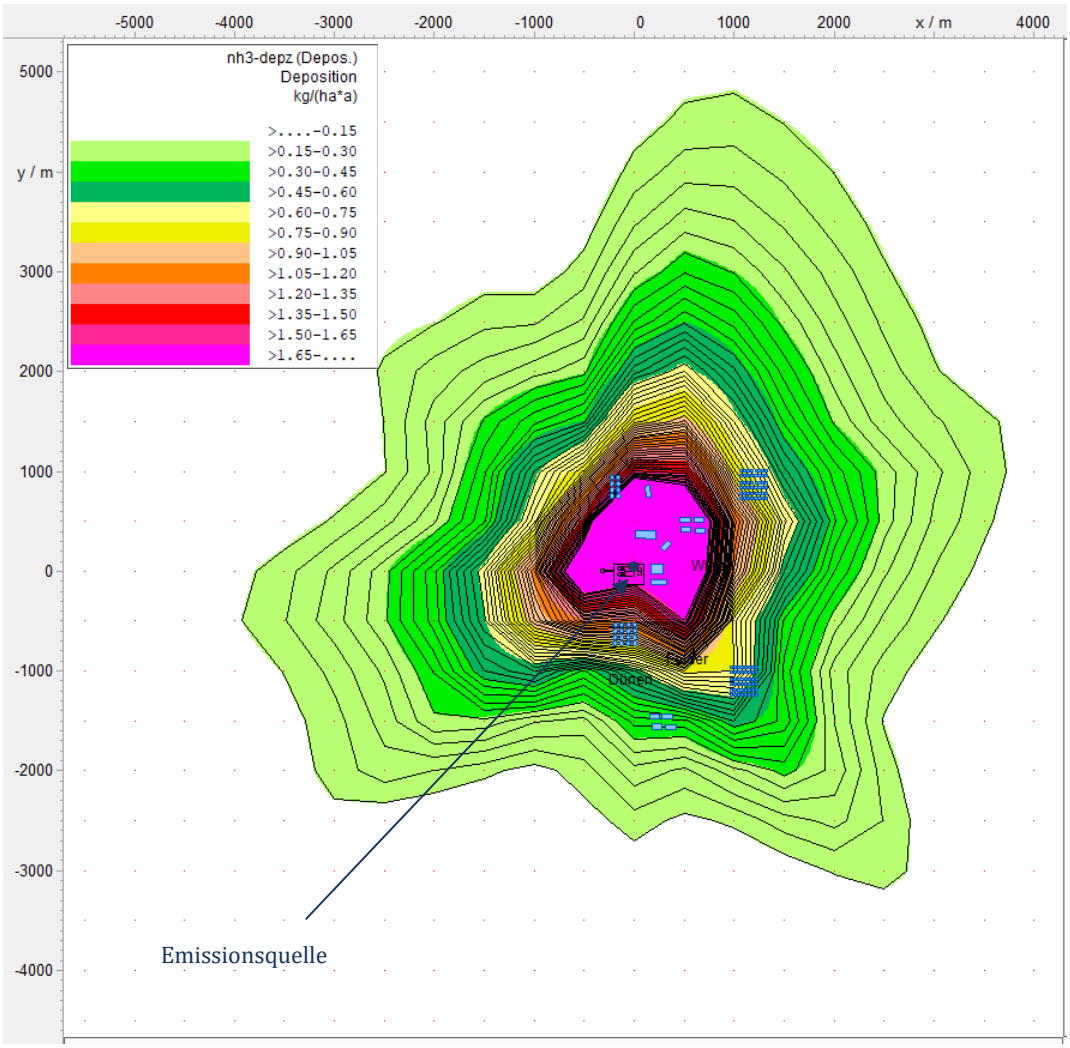
Tabelle 26: Depositionen des Modellterminal 1

Maximale und durchschnittliche Depositionswerte in Bereichen um Emissionsquelle.
Rechnung für 500 m x 500 m Raster.

	Maximale Deposition	Durchschnittliche Deposition in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
Deposition in kg ha^{-1} a^{-1}						
NH_3	2,813	1,679	1,253	0,492	0,122	0,033
NO_2	1,452	0,810	0,716	0,375	0,148	0,068
NO	1,524	0,884	0,693	0,288	0,075	0,021
Deposition in kg-N ha^{-1} a^{-1} (normiert auf N-Anteil)						

	Maximale Deposition	Durchschnittliche Deposition in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
NH_3	2,314	1,381	1,030	0,404	0,101	0,027
NO_2	0,442	0,247	0,218	0,114	0,045	0,021
NO	0,711	0,413	0,324	0,134	0,035	0,010
Gesamt N	-	2,041	1,572	0,652	0,181	0,058

Abbildung 20: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NH_3-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)

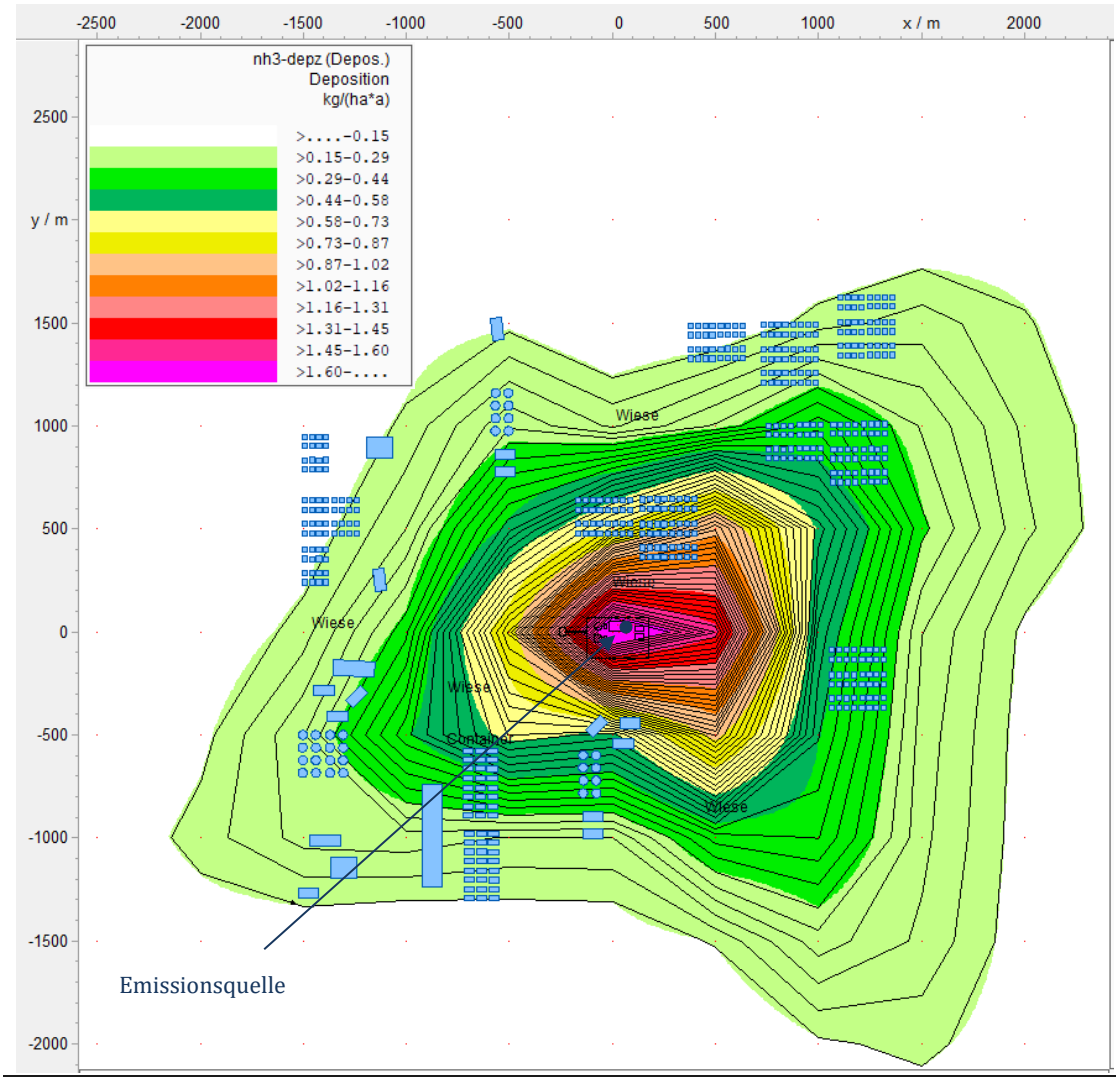


Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Analog zu Standort 1 zeigt das Modell am Standort 2 eine Depositionsverteilung proportional zur Konzentrationsausbreitung. Die maximale Deposition findet im Bereich direkt um den Emissionspunkt statt. Mit einer östlichen, südlichen und westlichen Ausdehnung von NH_3 von je etwa 2200 m vom Emissionspunkt und etwa 1800 m im Norden, ist die Ausbreitung relativ gleichmäßig verteilt (Isolinie für 0,15 kg ha^{-1} a^{-1} in Abbildung 21). Wie auch beim vorherigen Modell ergeben sich die Unterschiede der Deposition der verschiedenen Gase vor allem durch

die unterschiedlichen Depositionsgeschwindigkeiten sowie durch die Umsetzung von NO zu NO_2. Die Ausbreitung von NO (Abbildung 50) ist analog zu der von Ammoniak, mit der größten Ausprägung von 2500 m (Isolinie für 0,07 kg ha^{-1} a^{-1}) in Richtung Südosten. NO_2 (Abbildung 49) Ausdehnung nimmt hingegen den größten Bereich ein. Der von der Emissionsquelle am weitesten entfernte Emissionspunkt liegt im Südosten, bei etwa 4300 m in Richtung Osten und 5300 m in Richtung Süden (Isolinie für 0,06 kg ha^{-1} a^{-1}). Auch die Ausdehnungen in die anderen Hauptausbreitungsrichtungen sind deutlich ausgeprägter als bei der NH_3 Deposition.

Abbildung 21: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NH_3-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Tabelle 27: Depositionen des Modellterminal 2

Maximale und durchschnittliche Depositionswerte in Bereichen um Emissionsquelle.
Rechnung für 500 m x 500 m Raster.

	Maximale Deposition	Durchschnittliche Deposition in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
Deposition in kg ha^{-1} a^{-1}						
NH_3	1,746	1,173	0,521	0,171	0,041	0,011
NO_2	0,717	0,560	0,298	0,133	0,048	0,020
NO	0,841	0,585	0,270	0,093	0,023	0,006
Deposition in kg-N ha^{-1} a^{-1} (normiert auf N-Anteil)						
NH_3	1,436	0,965	0,429	0,141	0,034	0,009
NO_2	0,218	0,170	0,091	0,040	0,015	0,006
NO	0,393	0,273	0,126	0,044	0,011	0,003
Gesamt N	-	**1,408**	**0,646**	**0,225**	**0,060**	**0,018**

Am Beispielstandort 3 erreicht die Deposition ihre Maximalwerte im Bereich direkt um die Emissionsquelle. Wie durch die in Abbildung 16 gezeigte Windrose zu erwarten ist, liegen die Hauptausbreitungsrichtungen der Deposition im Norden und im Süden. Die maximale Ausbreitung von NH_3 liegt dabei nördlich bei etwa 1300 m (Isolinie für 0,15 kg ha^{-1} a^{-1}). Die Zusammenhänge der Depositionen der verschiedenen Gase verhalten sich am Beispielstandort 3 analog zu den zuvor betrachteten Standorten, wobei sich NO_2 (Abbildung 51) durch die Bildung aus NO mit 2200 m in nördliche Richtung und 2000 m in südliche Richtung am stärksten ausbreitet (Isolinie für 0,06 kg ha^{-1} a^{-1}). NO (Abbildung 52) breitet sich analog zu NH_3 aus, mit der größten Ausbreitung von 1500 m Richtung Norden und 1300 m Richtung Süden (Isolinie für 0,07 kg ha^{-1} a^{-1}). Die Depositionsmengen von NH_3 nehmen aufgrund der höheren Depositionsgeschwindigkeit am schnellsten ab, die Werte liegen aber aufgrund höheren Anfangsmenge dennoch oberhalb der Depositionsmengen der anderen Stoffe.

Die Depositionsmengen sind für festgelegte Bereiche in Tabelle 28 zusammengetragen.

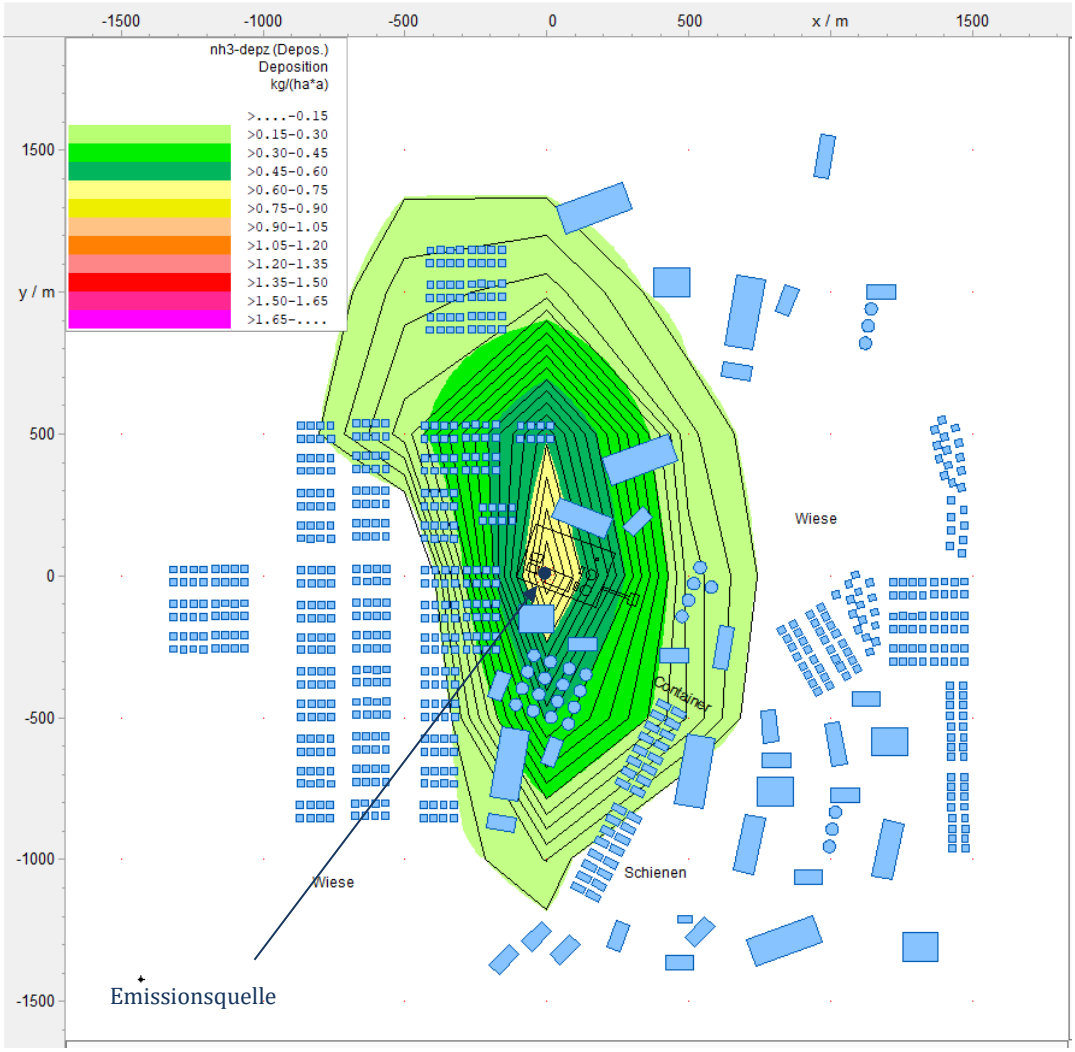
Tabelle 28: Depositionen des Modellterminal 3

Maximale und durchschnittliche Depositionswerte in Bereichen um Emissionsquelle.
Rechnung für 500 m x 500 m Raster.

	Maximale Deposition	Durchschnittliche Deposition in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
Deposition in kg ha^{-1} a^{-1}						
NH_3	0,724	0,413	0,129	0,055	0,013	0,003
NO_2	0,325	0,215	0,077	0,044	0,016	0,007
NO	0,354	0,209	0,067	0,030	0,008	0,002

	Maximale Deposition	Durchschnittliche Deposition in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
Deposition in kg-N ha^{-1} a^{-1} (normiert auf N-Anteil)						
NH_3	0,596	0,340	0,106	0,045	0,011	0,003
NO_2	0,099	0,066	0,023	0,013	0,005	0,002
NO	0,165	0,098	0,031	0,014	0,004	0,001
Gesamt N	-	**0,504**	**0,160**	**0,072**	**0,020**	**0,006**

Abbildung 22: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – NH_3-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

4.2 Diskussion der unterschiedlichen Wirkdimensionen

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt anhand der im Folgenden dargestellten Wirkdimensionen.

Abbildung 23: Übersicht der untersuchten Wirkdimensionen

Quelle: eigene Darstellung, LBST.

4.2.1 Terrestrische Ökosysteme

4.2.1.1 Hintergrund

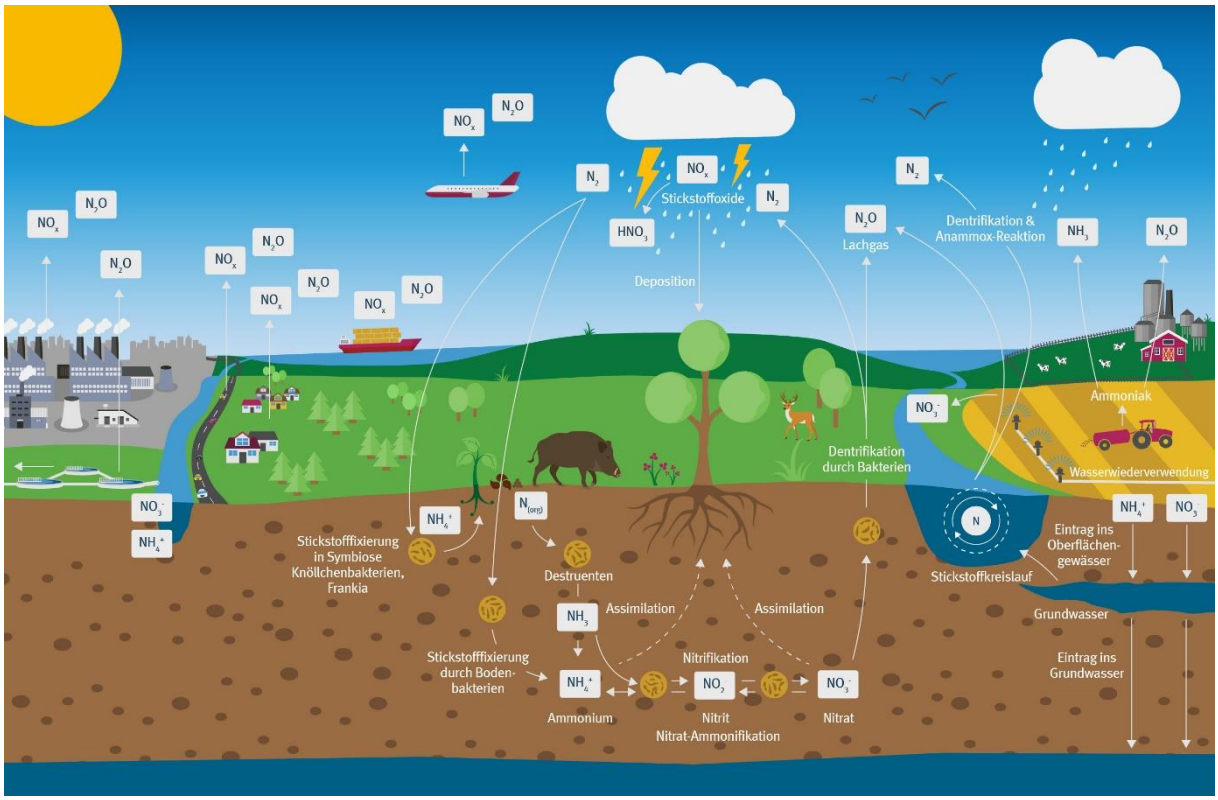
Stickstoffkreislauf

Der Eintrag von Stickstoff- und stickstoffhaltigen Verbindungen durch den Menschen in die Umwelt führt zu starken Veränderungen im natürlichen Stickstoffkreislauf. Stickstoffhaltige Verbindungen gelangen in großen Mengen durch die Landwirtschaft und Viehhaltung (z. B. Düngemittel und Gülle) sowie durch Verbrennungsprozesse (insbesondere NO_x und NO_2-Emissionen) in die Umgebung und haben einen starken Einfluss auf die Biodiversität.

Heute stellt die Landwirtschaft mit einem Anteil von etwa 95% den Hauptemittenten für Ammoniak dar, wobei der Großteil von über 70% aus der Tierhaltung stammen und etwa über Stallmist oder Gülle in die Umgebung freigesetzt werden (Umweltbundesamt (UBA), 2023). Weitere in diesem Kontext relevante Stickstoffverbindungen sind etwa Stickoxide (NO_x), die insb. bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen. Als Folge der Freisetzung kommt es über die Bildung von Luftfeinstäuben zu einem flächendeckenden Eintrag in diverse Ökosysteme und schließlich zu einer Anreicherung von Nährstoffen im Boden (Eutrophierung). (Friedrich-Schiller-Universität Jena, o. D.) Dies kann unter anderem zu Verdrängungsprozessen nährstoffliebender Arten gegenüber Arten nährstoffarmer Habitate führen. Zusätzlich bewirkt die Nitrifikation (Umwandlung von Ammonium zu Nitrat) eine beschleunigte Auswaschung basischer Kationen und führt damit zu einer kontinuierlichen Versauerung des Bodens.

Beide Effekte, die Versauerung und die Eutrophierung der Böden können folglich durch NH_3, NH_4^+, NO_3^- oder NO_x (insb. NO und NO_2) hervorgerufen werden und führen zu einem Ungleichgewicht des Nährstoffeintrags und bedrohen so die natürlichen Lebensräume diverser Arten. Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die natürlichen und menschengemachten Quellen für Stickstoff und reaktive Stickstoffverbindungen.

Abbildung 24: Eintrag von reaktiven Stickstoffverbindungen die Umwelt



© Kopfarbyte UG / Bosch + Partner GmbH (erstellt im Auftrag des UBA)
Quelle: Umweltbundesamt (UBA) (Umweltbundesamt, kein Datum).

Stickstoffeintrag und Hintergrundbelastung

Die Bedeutung des anthropogenen Stickstoffeintrags sowie anderer versauernd wirkenden Verbindungen auf terrestrische Ökosysteme wurde innerhalb der PINETI-4 Modellierungen untersucht. Die Arbeiten umfassen die atmosphärische Deposition von Stickstoff- sowie Schwefelverbindungen für Deutschland (Kranenburg, Schaap, Coenen, Thürkow, & Banzhaf, 2024). Die Ergebnisse zeigen, dass die jährliche Gesamtdeposition in Deutschland im Durchschnitt von 19,5 kg N pro Hektar im Jahr 2000 auf etwa 14 kg N pro Hektar im Jahr 2019 gesunken ist. Dennoch werden große Unterschiede zwischen den einzelnen Regionen beschrieben. So sind für Ammoniak (NH_3) die größten Konzentrationen in den landwirtschaftlich geprägten Regionen Niedersachsens, Bayern sowie den Grenzregionen der Niederlande zu beobachten, während städtische und industrielle Cluster besonders hohe Konzentrationen von NO und NO_2 zeigen.

Die daraus resultierende Hintergrundbelastung für Stickstoff (in kg N ha^{-1} a^{-1}) können über den UBA-Kartendienst Hintergrundbelastungsdaten Stickstoff auf der Webseite des UBA eingesehen werden.[48]

Auch einen weiteren Aspekt zur Belastung durch Emissionsquellen beschreiben (Kranenburg, Schaap, Coenen, Thürkow, & Banzhaf, 2024) im Rahmen des PINETI-4-Projekts: „Sensitivitätssimulationen für Ammoniak ergaben, dass für Oberflächenquellen bzw. hohe Schornsteine etwa 20% bzw. 5% der Gesamtemissionen innerhalb einer Entfernung von 20 km deponiert wird.“ Folglich findet ein Großteil der Deposition aus Industrieanlagen nicht in der unmittelbaren Umgebung der Anlage statt und ein Großteil der Hintergrundbelastung ist auf die

[48] Siehe https://gis.uba.de/website/depo1/de/index.html.

Emissionen nicht-lokaler Quellen zurückzuführen. Daher war es Aufgabe der vorliegenden Studie zu prüfen, ob es durch die Kumulation der Einträge aus einer potenziellen Anzahl in Deutschland neu errichteten NH_3-Terminal in manchen Regionen zu einer wesentlichen Erhöhung der Hintergrundbelastung kommen könnte.

Critical Loads

Der wesentliche Aspekt zur Bewertung des Einflusses von Ammoniak-Terminals auf die Umgebung liegt in einem Vergleich der Zusatzbelastung durch den Terminal mit dem sogenannten Critical Load[49].

Dabei gibt es zwei unterschiedliche Methoden, den Critical Load für Stickstoff- oder Schwefelbelastungen aus der Luft für Ökosysteme zu bestimmen.

1) Empirische Critical Loads

In diesem Ansatz werden auf Basis diverser Studien und Experteneinschätzungen anhand Messdaten und Erfahrungen die Schwellenwerte bestimmt. Im Rahmen des CLRTAP wurden diese zuletzt veröffentlicht. In (Galert, Geupel, Loran, & Scheuschner, 2024) findet sich eine Liste mit empirischen Critical Loads (CL_{emp}) für 51 unterschiedliche Ökosystemtypen / Habitate für Europa. Werte für ausgewählte Ökosysteme finden sich in Tabelle 29.

Tabelle 29: Empirische Critical Loads für ausgewählte Ökosysteme

Ökosysteme	Critical Loads [kg ha^{-1} a^{-1}]	Veränderungen im Ökosystem, z. B.
Küstenhabitate		
Wanderdünen der Küsten (N13, N14(	10 – 20	Zunahme der Biomasse, zunehmende Stickstoffauswaschung
Stabile Küstendünen (N18, N19)	10 – 15	Zunahme an Hochgräsern, Rückgang an Bodendeckern und typischen Flechten, Zunahme der Stickstoffauswaschung und der Bodenversauerung
Dünenheiden an der Küste (N15)	5 – 15	Zunahme der pflanzlichen Produktion, erhöhte Stickstoffauswaschung, beschleunigte Sukzession
Feuchte oder nasse Dünentümpel (N1H)	5 – 15	Zunahme der Biomasse bei Hochgräsern
Bäume und Waldökosysteme		
Buchenwälder (T17, T18)	10 – 15	Nährstoffungleichgewichte, Veränderung der Bodenvegetation
Laubwald (T1)	10 – 15	Nährstoffungleichgewichte, Veränderung der Bodenvegetation
Nadelwälder(T3)	3 – 15	Nährstoffungleichgewichte, Veränderung der Bodenvegetation

[49] Der Critical Load beschreibt spezifische, jährliche Belastungswerte für bestimmte Schadstoffe, unterhalb derer nach aktuellem Wissensstand keine signifikanten (akuten und langfristigen) schädlichen Auswirkungen auf bestimmte empfindliche Elemente der Umwelt auftreten. Quelle: CLRTAP (2024): Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends. Umweltbundesamt, Dessau.

Ökosysteme	Critical Loads [kg ha^{-1} a^{-1}]	Veränderungen im Ökosystem, z. B.
(Montane) Tannen- und Fichtenwald (T31, T32)	10 – 15	Geringere Wurzelmasse, Nährstoffungleichgewichte, Veränderungen der Bodenvegetation
Gemäßigter kontinentaler Kiefernwald (T35)	5 – 15	*Keine Beschreibung*
Mischwald aus Tanne, Fichte, Buche	10 – 15	Nährstoffungleichgewichte, Veränderung der Bodenvegetation
Moore		
Hoch- und Deckenmoore (Q1)	5 – 10	Zunahme Gefäßpflanzen, veränderte Artenzusammensetzung
Niedermoore, nährstoffarm (Q2)	5 – 15	Zunahme von Riedgräsern und anderen Gefäßpflanzen, negative Wirkung auf Moose
Niedermoore, nährstoffreich (Q41-Q44)	15 – 25	Keine Beschreibung
Grasland		
Halbtrockenrasen, kalkreich (R1A)	10 – 20	Zunahme von Hochgräsern, Abnahme der Artenvielfalt
Mähwiesen, tiefe bis mittlere Lage (R22)	10 – 20	Zunahme von Hochgräsern, Abnahme der Artenvielfalt
Bergmähwiesen (R23)	10 – 15	Zunahme stickstoffliebender Gräser, Abnahme der Artenvielfalt
Pfeifengraswiesen (Streuwiesen)	15 – 25	Zunahme von Hochgräsern, Abnahme der Artenvielfalt, Rückgang der Moose

Werte nach (Galert, Geupel, Loran, & Scheuschner, 2024). Die Beschreibung der Veränderungen in den jeweiligen Ökosystemen sind dem Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von Stickstoffeinträgen der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (Stand: 1.3.2012) entnommen (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz, 2012).

Die gesamte Bandbreite der empirischen Critical Loads (CL_{emp}) reicht von eine 20-30 kg N ha^{-1} a^{-1} für atlantische Salzmarschen (MA225) bis zu 2-4 kg N ha^{-1} a^{-1} für alpine und subarktische klare Wasserseen (C1.1).

Diese Werte dienen auch im Rahmen dieser Studie als Basis.

2) Simple Mass Balance (SMB) -Methode

Die Grundidee dieses zweiten Ansatzes besteht darin, das Potenzial natürlicher oder naturnaher Ökosysteme zur Bewältigung bestimmter Luftschadstoffe (Stickstoff und/oder Schwefel) unter sogenannten stationären Bedingungen zu schätzen. Dies umfasst die Schätzung des Potenzials zur sicheren Speicherung und/oder Pufferung von Stickstoff- und Schwefelablagerungen durch natürlich vorkommende Prozesse wie die Aufnahme in die Vegetation und Puffermechanismen über die verfügbare Säureneutralisationskapazität (ANC) des Bodens. Dies geschieht vor der Annahme, dass keine Veränderung oder keine negativen Auswirkungen auf das Ökosystem und seine Eigenschaften auftreten dürfen.

Überschreitungen der Critical Loads

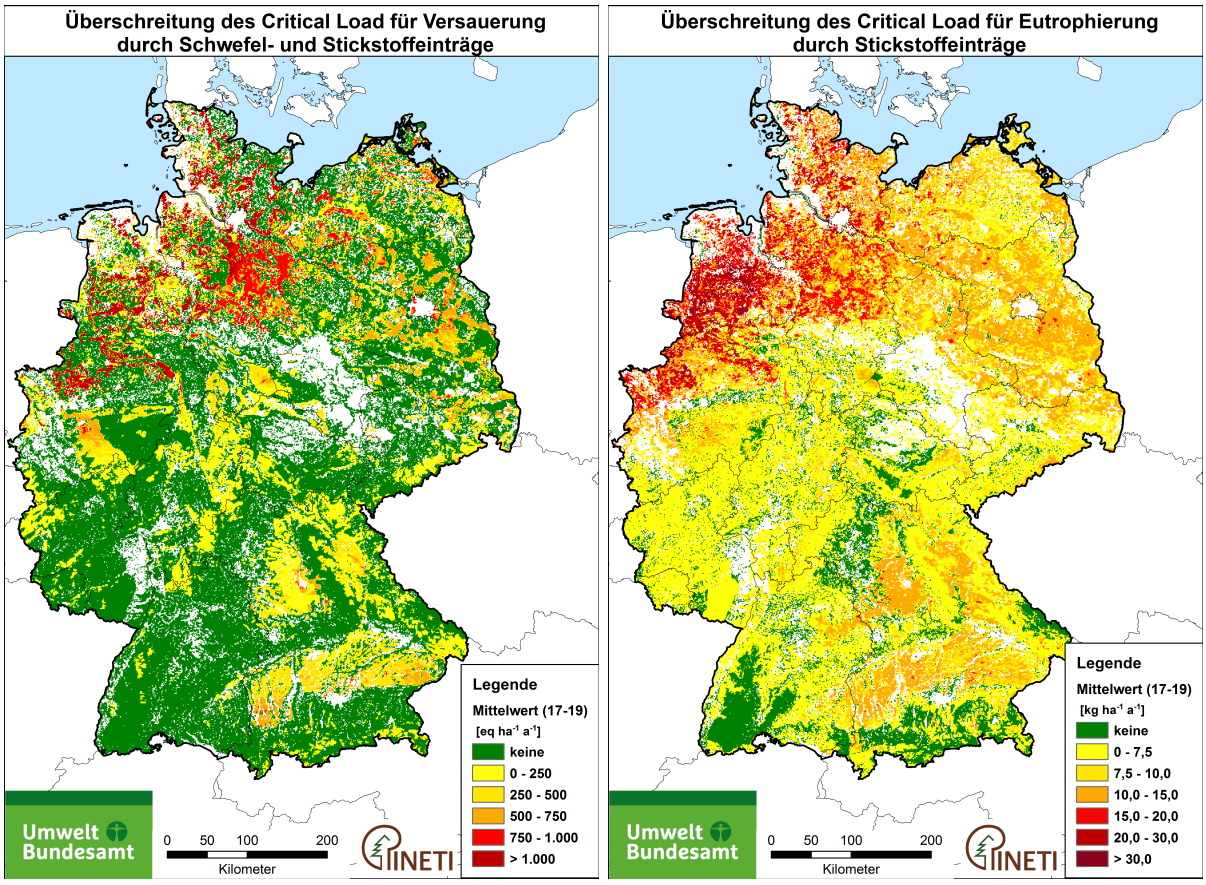
Wird ein Critical Load für ein bestimmtes Ökosystem durch den Eintrag von atmosphärischen Stickstoffverbindungen überschritten, so kann eine Belastung des Ökosystems nicht ausgeschlossen werden. Die Berechnung der Überschreitungen der Critical Loads hinsichtlich Eutrophierung und Versauerung wurden für Deutschland im Rahmen des PINETI-4-Projekts durchgeführt. (Kranenburg, Schaap, Coenen, Thürkow, & Banzhaf, 2024)[50] . Dafür wurden die Critical Loads nach der Mass-Balance-Methode verwendet.

Während die Analysen insbesondere für den Nordwesten Deutschlands eine große Zahl an Überschreitungen des Critical Load identifizieren, sind gleichzeitig die urbanen Räume weitestgehend von der Analyse ausgenommen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse aus dem PINETI-4-Projekt hinsichtlich der Überschreitung der Critical Loads für die Versauerung und Eutrophierung für die unterschiedlichen Regionen Deutschlands.

Abbildung 25: Überschreitung der Critical Loads für Versauerung (links) und Eutrophierung (rechts) in Deutschland

Berücksichtigt werden die Schwefel- und Stickstoff-Depositionen (Versauerung) sowie nur die Stickstoff-Deposition (Eutrophierung). Die Überschreitung des Critical Loads auf Basis gemittelter Schwefel- und/oder Stickstoffdeposition der Jahresscheiben 2017, 2018 und 2019 („Mittelwert 17-19“).



Quelle: Umweltbundesamt.

[50] Die Überschreitung der Critical Loads wird in (Fagerli et al., 2024) und (UK Centre for Ecology & Hydrology, 2017) in Äquivalent pro ha und Jahr dargestellt und ergeben sich aus der Überschreitung der N-Äquivalent-Belastung in mol pro ha und Jahr multipliziert mit der Molmasse von Stickstoff (14,00674 g/mol). Somit entsprechen 500 mol N-Äquivalent ha^{-1} a^{-1} etwa 7000 g N ha^{-1} a^{-1}.

Weiterführende Analysen zum Eutrophierungs-Risiko durch Stickstoffverbindungen auf europäischer Ebene finden sich beispielsweise in (European Environment Agency, 2024). Demnach ist in weiten Teilen der EU und insbesondere auch in Nord- und Ostsee-Küstennähe der Eintrag von Stickstoffverbindungen in die Böden und Gewässer bereits heute sehr hoch und überschreitet auch die Critical Loads für die Eutrophierung.

Die geplanten Standorte für künftige NH_3-Terminals befinden sich unter anderem an Nord- und Ostseeküste. Hohe Freisetzungsmengen von NH_3 sowie oxidierten Stickstoffverbindungen (insb. NO_x) könnten folglich zu zusätzlicher Versauerung und Eutrophierung empfindlicher Ökosysteme führen.

In der nachfolgenden Analyse sollen die ermittelten Depositionswerte des Ammoniak-Terminals im Normalbetrieb hinsichtlich ihrer Größenordnung mit bestehenden Hintergrundbelastungen und empirischen Critical Loads an unterschiedlichen potenziellen Standorten verglichen und diskutiert werden. Betrachtet werden der Eintrag von reduzierten (hauptsächlich NH_3) und oxidierten Stickstoffverbindungen (insb. NO_x) aus den Emissionen der NH_3-Anlage über die Atmosphäre in den Boden bzw. das Ökosystem.

4.2.1.2 Vergleich mit empirischer Critical Load

Im Rahmen der vorliegenden Analysen wird untersucht, ob die in Kapitel 4.1.4 ermittelten Depositionswerte in der Umgebung der Modellterminals die in der Literatur (z. B. (Galert, Geupel, Loran, & Scheuschner, 2024), (Bobbink, et al., 2022) und (Fagerli, et al., 2024)) angegebenen Critical Loads für Eutrophierung[51] überschreiten könnten. Dabei werden in die Diskussion auch unterschiedliche potenzielle Hintergrundbelastungen einbezogen. Hinsichtlich der FFH-Verträglichkeitsprüfung ist alternativ zu prüfen, ob eine vorhabensbedingte Zusatzbelastung >0,3 kg N ha^{-1} a^{-1} vorliegt (sog. Abschneidekriterium) oder die N-Bagatellschwelle von 3% des Critical Load unterschritten wird. (Umweltministerkonferenz 2019, 2019). Sofern innerhalb des mit dem Abschneidekriterium ermittelten Beurteilungsgebiet keine empfindlichen Ökosysteme vorhanden sind, sind keine weiteren Untersuchungen erforderlich.

Tabelle 30: Gesamt-Stickstoff-Deposition um die Modellterminals 1-3

Maximale und durchschnittliche Depositionswerte in Bereichen um Emissionsquelle.
Rechnung für 500 m x 500 m Raster.

[kg ha^{-1} a^{-1}]	Maximale Deposition	Durchschnittliche Deposition in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
Modellterminal 1	-	2,040	1,572	0,653	0,180	0,058
Modellterminal 2	-	1,408	0,645	0,225	0,059	0,017
Modellterminal 3	-	0,503	0,161	0,072	0,020	0,006

Hinweis: Lachgas (N_2O) wirkt vorwiegend als Treibhausgas in der Atmosphäre. Es wurde entsprechend keine N2O-Deposition berücksichtigt.

[51] Hinweis: Aufgrund der geringen Depositionswerte konzentrieren sich die nachfolgenden Ausführungen exemplarisch ausschließlich auf das Thema der Eutrophierung.

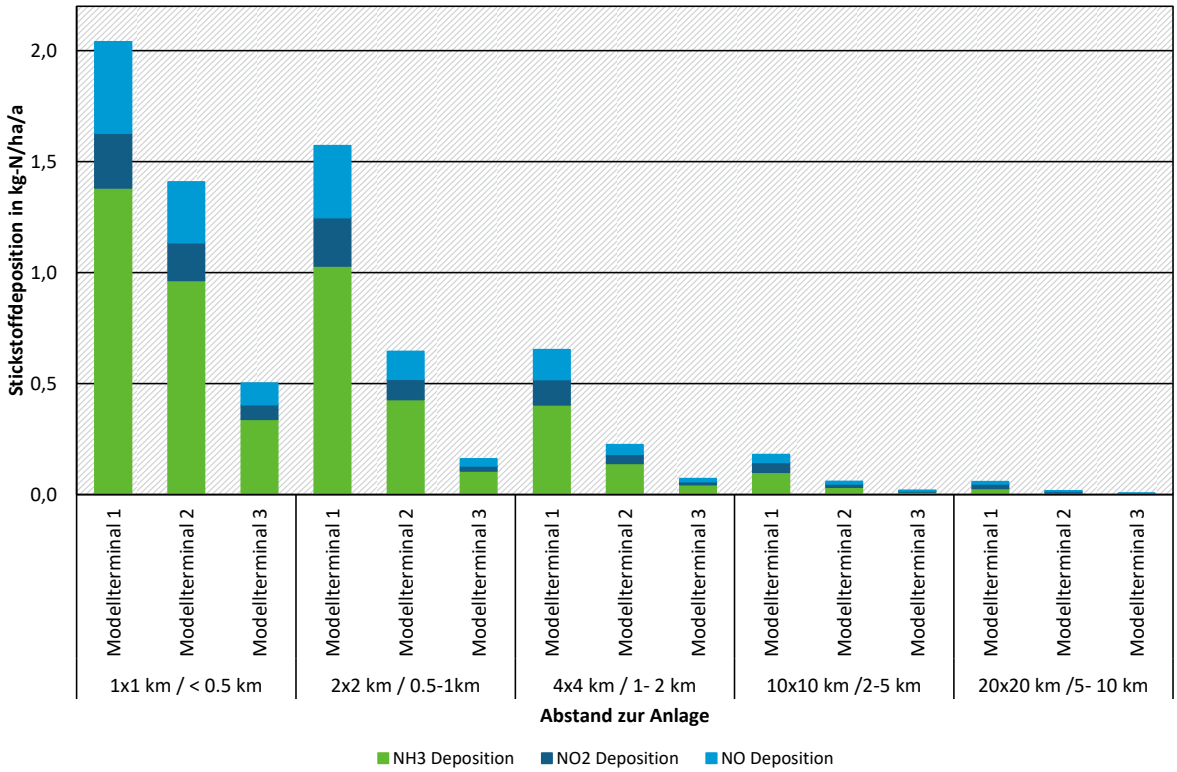
Die in Tabelle 30 aufgeführten Depositionswerte zeigen, dass die durchschnittliche Deposition für Gesamtstickstoff des Modellterminal 1 in der direkten Umgebung bis zu einer Entfernung von 0.5 km (rote Rasterflächen) durchschnittliche Werte von etwa 2 kg N ha^{-1} a^{-1} erreichen. Im Abstand von bis zu 1 km Entfernung (grüne Rasterflächen) beträgt der Wert etwa 1,6 kg N ha^{-1} a^{-1}. Bei darüber hinaus ansteigendem Abstand von der Emissionsquelle sind signifikant sinkende Depositionswerte zu beobachten. Die Ergebnisse sind auch in Abbildung 26 dargestellt.

Der Vergleich mit den in Tabelle 29 gezeigten empirischen Critical Load-Werten zeigt einerseits, dass die gezeigten Durchschnittswerte damit unterhalb der für die jeweiligen Ökosysteme identifizierten Werten liegen. Andererseits werden im direkten Umfeld des Terminals (d.h. bis zu einer Entfernung von 2 km), der im Rahmen der FFH-Verträglichkeitsprüfung für Natura2000-Gebiete festgelegte Grenzwert von einer vorhabensbedingte Zusatzbelastung von>0,3 kg N ha^{-1} a^{-1} (sog. Abschneidekriterium) überschritten (Umweltministerkonferenz 2019, 2019). In dieser unmittelbaren Nähe der Emissionsquelle ist es jedoch unwahrscheinlich, dass empfindliche Ökosystemtypen vorhanden sind, da diese Bereiche noch zum NH_3-Terminal oder dem umgebenden Industriegebiet gehören.

Obwohl die Zusatzbelastung durch den (Normal-)Betrieb der kleineren Modellterminals 2 und 3 jeweils kleiner ausfällt, wird auch hier (zumindest im Nahbereich um die Emissionsquelle) das Abschneidekriterium überschritten.

Abbildung 26: Stickstoff-Deposition um die Modellterminals 1-3 in Bereichen um Emissionsquelle

Durchschnittliche Depositionswerte in Bereichen um Emissionsquelle. Rechnung für 500 m x 500 m Raster.



Quelle: Eigene Darstellung, ILF, LBST.

Insgesamt sind jedoch die geringen Gesamt-Stickstoff-Depositionswerte zu beachten. Während diese darauf hindeuten, dass die Zusatzbelastung der Terminals an sich keine besonderen

Auswirkungen auf die terrestrischen Ökosysteme in der Umgebung haben werden, kann dies in Verbindung mit der standortspezifischen Hintergrundbelastung durchaus dazu führen, dass der Critical Load bestimmter Ökosysteme überschritten wird. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass diese mit Blick auf die Eutrophierung aber auch auf die Versauerung für eine Vielzahl an Standorten in Deutschland bereits heute regelmäßig überschritten werden. (siehe Abbildung 25).

Eine standortabhängige Prüfung, die die sowohl bestehende Hintergrundbelastung als auch die vorhabensbedingte Zusatzbelastung abschätzt bleibt damit auch im Rahmen der Genehmigungsprozesse für Ammoniak-Terminals geboten. Als Ausgangspunkt können hierzu die Daten des UBA-Kartendienst Hintergrundbelastungsdaten Stickstoff auf der Webseite des UBA dienen.[52] Diese enthalten die Hintergrundbelastung für Stickstoff (in kg N ha^{-1} a^{-1}) innerhalb einer Rasterzelle (1x1 km^2) mit entsprechenden spezifischen Depositionswerte für unterschiedliche Landnutzungsklassen[53]. Der Vergleich mit ausgewählten Standorten zeigt, dass die ermittelten Depositionswerte meist deutlich unter der bestehenden Hintergrundbelastung für relevante Standort liegen: Beispiel Hamburg mit einer Hintergrundbelastung von etwa 30 kg N ha^{-1} a^{-1}.

Wie oben erwähnt, sind kumulativ gesehen die Einträge aus vielen Einzelquellen oft ein zentraler Bestandteil der Hintergrundbelastung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Gesamtzahl der in Deutschland neu zu errichtenden NH_3-Terminals vergleichsweise gering sein wird (siehe Kapitel 2.1.4). Folglich kann man zusammen mit den hier berechneten Depositionsfrachten darauf schließen, dass dieser kumulative Effekt auf die Hintergrundbelastung weitestgehend vernachlässigt werden kann.

4.2.2 Oberflächen- und Meeresgewässer

Ebenso wie bei der Diskussion der Auswirkungen der Emissionen aus dem Normalbetrieb des NH_3-Terminals werden die (potenziellen) Stickstoff-Einträge und Auswirkungen auf Gewässer für unterschiedliche Terminalstandorte mit den zulässigen Eintragszielen bzw. Grenzwerten auf Basis gesetzlicher Regelungen verglichen.

4.2.2.1 Hintergrund

Die potenziellen Auswirkungen von Ammoniak auf Meeres-Ökosysteme sind fortlaufender Teil wissenschaftlicher und toxikologischer Diskussionen. Eine umfassende Analyse im Kontext der künftigen Anwendung von Ammoniak als Schiffskraftstoff wurde im Jahr 2021 durch das Öko-Institut im Auftrag des NABU durchgeführt. (Cames, Wissner, & Sutter, 2021) Die Studie fasst die kurz- und langfristigen Effekte Ammoniaks auf Fische und marine Ökosysteme auf Basis diverser Studien zusammen. Für die kurzfristige Toxizität durch den direkten Eintrag von Ammoniak ins Wasser verweisen die Autoren unter anderem auf die mittleren akuten Grenzwerte (SMAV = species mean acute values) für unterschiedliche Lebewesen (United States Environmental Protection Agency, 2013). Als langfristige Folge beschreiben die Autoren dagegen den eutrophierenden Effekt des resultierenden Stickstoffeintrags (insbesondere über Depositionen aus der Luft) auf Algen oder Mikroorganismen.

Die Analysen in Kapitel 3.3 zeigen, dass im Rahmen des Normalbetrieb der Terminals (inkl. Tanklager und Cracker) mit keinem signifikanten direkten Eintrag von Ammoniak in Gewässer zu rechnen ist. Entsprechend ist die Toxizitätsbetrachtung in diesem Kontext von

[52] Siehe https://gis.uba.de/website/depo1/de/index.html.

[53] Folgende Landnutzungsklassen mit unterschiedlichen spezifischen Depositionswerten werden unterschieden: (1) Ackerland, (2) Nadelwald, (3) Dauerkulturen, (4) Laubwald (5), Wiesen und Weiden, (6) Mischwald, (7) Dünen und Felsfluren, (8) Semi-natürliche Vegetation, (9) bebautes Gebiet, (10) Binnengewässer und (11) Marine Wasserflächen (Küstenzonen).

untergeordneter Bedeutung. Im Kontext der Genehmigungsunterlagen der Mabanaft New Energy Gate Hamburg GmbH wird auf einen unbedenklichen Grenzwert von 0.91 mg/l (No Effect Concentration (NOEC) verwiesen. Für Lebewesen beträgt der 96hLC50-Wert[54] (für Total Ammonia N) demnach außerdem 22 mg/l bis 59 mg/l. (Mabanaft, 2024)

Neben der potenziell akuten Toxizität hat Ammoniak, ähnlich wie bei den terrestrischen Ökosystemen (Kapitel 5.2), eine eutrophierende Wirkung durch Stickstoffeintrag. Hierfür werden als wesentlicher Grenzwert die sog. Critical Atmospheric Input (CAI)-Werte zum Schutz der marinen Ökosysteme in den Küstenzonen (innerhalb der 1-nautischen Meilen-Zone) angelegt:[55]

- 5,78 kg N ha^{-1} a^{-1} für die Nordsee
- 3,31 kg N ha^{-1} a^{-1} für die Ostsee.

Diese Werte werden mit den vorliegenden Stickstoff-Depositionswerten aus Kapitel 4.1.4 verglichen. Weitergehende Überlegungen zur eutrophierenden und toxischen Wirkung von Ammoniak finden sich auch in Anhang D.

4.2.2.2 Vergleich mit CAI-Werten

Inwieweit die abgeschätzte Deposition des im Normalbetrieb freigesetzten Ammoniaks (bzw. anderer stickstoffhaltiger Verbindungen) in signifikanten Umfang einen Einfluss auf die entsprechenden Meeresökosysteme haben, soll im Nachfolgenden durch einen Vergleich mit den Hintergrundbelastungen sowie dem Critical Load für ausgewählte Ökosysteme diskutiert werden.

Dabei sei erwähnt, dass im Normalbetrieb gemäß den Ausführungen in Kapitel 3.2.5 keine signifikanten direkten Emissionen in das Wasser zu erwarten sind. Dies ist insofern relevant, da der Nährstoffeintrag in Ökosysteme wie beispielsweise die Ostsee insbesondere über Flüsse und Direkteinleiter erfolgt. (Umweltbundesamt, 2024) (Umweltbundesamt, 2020)

Ein Vergleich mit existierenden Grenzwerten für direkte Stickstoffeinträge ist folglich schwierig. Stattdessen kann die Diskussion sich lediglich auf potenzielle Schadstofffrachten über die Luft in Form von Niederschlag (Nassdeposition) oder Staubniederschlag (Trockendeposition) begrenzen.

Als wesentlicher Grenzwert im Zuge der vorliegenden Studie werden die zuvor beschriebenen Critical Atmospheric Input (CAI)-Werte zum Schutz der marinen Ökosysteme in den Küstenzonen (innerhalb der 1-nautischen Meilen-Zone) angelegt: Die entsprechenden Werte betragen 5,78 kg N ha^{-1} a^{-1} für die Nordsee sowie 3,31 kg N ha^{-1} a^{-1} für die Ostsee.[55]

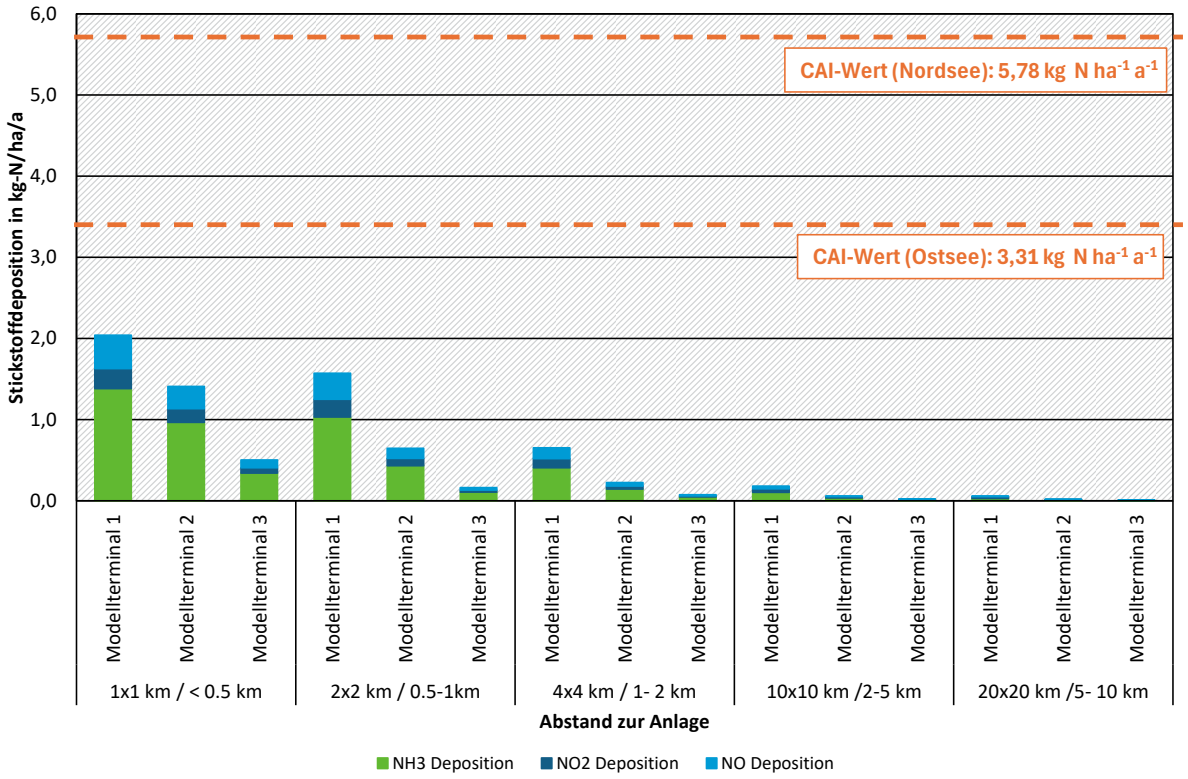
Ähnlich wie in Kapitel 4.2.1 für terrestrische Ökosysteme beschrieben werden diese Werte für keines der untersuchten Modellterminals erreicht (Abbildung 27). Dies gilt sowohl für die punktuelle maximale Deposition als auch für die für die unterschiedlichen Raster-Gebiete ermittelten Durchschnittswerte. Dabei sei überdies angemerkt, dass die entsprechende maximale Konzentration sowie die Position des Maximalwertes auch stark von den jeweiligen Windbedingungen beeinflusst wird und dadurch im Einzelfall der maximale Depositionswert bei großen Terminals durchaus im Bereich der genannten CAI-Werte liegen kann.

[54] Beschreibt die Konzentration, bei der in 96 Stunden 50% der Fische gestorben sind.

[55] Die Werte basieren auf einer Abschätzung des UBA innerhalb des RegioNat-Projekts, bei dem regionale Stickstoffminderungserfordernisse quantifiziert wurden. Die Veröffentlichung erfolgte im Januar 2026 nach Abschluss der Schlussredaktion für die vorliegende Studie unter https://www.uba.de/n306339en.

Abbildung 27: Stickstoff-Deposition um die Modellterminals 1-3 in Bereichen um Emissionsquelle im Vergleich zu CAI-Werten für Nord- und Ostsee

Durchschnittliche Depositionswerte in Bereichen um Emissionsquelle. Rechnung für 500 m x 500 m Raster.



Quelle: Eigene Darstellung, ILF, LBST.

4.2.3 Vegetation

Neben den (langfristigen) Auswirkungen durch Stickstoffeintrag auf terrestrische Ökosysteme oder Gewässer als Ganzes können hohe Ammoniak-Konzentrationen in der Luft auch direkt pflanzentoxisch wirken und zu Veränderungen der Artenvielfalt und Schäden and Tieren und Pflanzen führen. (Heldstab, et al., 2020) Das vorliegende Kapitel fokussiert sich auf die Immissionen von Ammoniak auf die Vegetation.

4.2.3.1 Hintergrund

Der Eintrag von Ammoniak und Stickstoffverbindungen kann Auswirkungen auf die Vegetation haben. Insbesondere Wälder gelten als relativ stickstoffarme Ökosysteme mit hoher Kontaktfläche zur Luft und sind damit als wesentliche Senken für Stickstoffverbindungen anzusehen. Zusätzlich hat die toxische Wirkung von Ammoniak auch direkte Auswirkungen auf Blattorgane, auf die im Folgenden eingegangen werden soll. (Umweltbundesamt (UBA), 2023)

Auf Basis der vorhandenen Erkenntnisse wurden im Genfer Luftreinhalteabkommen Empfehlungen für Grenzwerte für Ammoniakkonzentrationen definiert, auch als sog. Critical Levels (CLe)[56] für Ammoniak bezeichnet. Diese Belastungsgrenzen sind für unterschiedlich

[56] Die Critical Level-Werte (CLe) berücksichtigen sowohl direkte (z. B. toxische) als auch indirekte Auswirkungen (z. B. auf die Artenzusammensetzung). Obwohl die Veränderung der Artenzusammensetzung eher mit der N-Deposition und der Eutrophierung zusammenhängt, zeigte die mathematische Umrechnung der Critical Loads in NH_3-Konzentrationen unter standardisierten

lange Expositions-Zeiträume definiert. Bei Einhaltung der CLe-Werte werden keine Schäden bei 95% der Pflanzenarten beobachtet. (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2018)

Die aktuellen Werte wurden im Jahr 2006/2007 durch die UNECE festgelegt (Sutton, Giles, & Baker, 2007) (ICP Vegetation, 2017) Dabei wurde explizit eine Ausweitung der Betrachtungszeiträume auf jährliche CLe-Werte (anstelle der zuvor ebenfalls existierenden stündlichen und täglichen Werte) empfohlen, um die Belastbarkeit der Werte zu erhöhen und ebenfalls längerfristige Effekte von Ammoniak berücksichtigen zu können.

Tabelle 31: Critical Levels für Ammoniak

Vegetationstyp	Kritische NH_3-Konzentration	Zeitraum
Flechten und Moose (einschließlich Ökosysteme, in denen Flechten und Moose ein wesentlicher Bestandteil der ökologischen Integrität sind)	1 µg/m³	Jahresmittel
Höhere Pflanzen (einschließlich Heide, Grünland und Bodenflora von Wäldern)	3 µg/m³*	Jahresmittel
Vorläufiger kritischer Wert – Höhere Pflanzen	23 µg/m³**	Monatsmittel

*Ein expliziter Unsicherheitsbereich von 2–4 µg/m³ wurde für höhere Pflanzen (einschließlich Heide, halbnatürlichem Grünland und Bodenflora von Wäldern) festgelegt. Der Unsicherheitsbereich ist nützlich für Anwendungen in verschiedenen Bewertungszusammenhängen (z. B. Vorsorgeprinzip oder Beweislage).

** Wert auf Basis der ursprünglichen UNECE Critical Levels nur als vorläufig zu verstehen.

Quelle: (ICP Vegetation, 2017).

Im Rahmen eines Expertenworkshops im Jahre 2022 am UBA in Dessau wurden insbesondere auch einige Punkte zu den zuletzt 2006 von der UNECE festgelegten Critical Levels (CLe) herausgearbeitet (Franzaring & Kösler, 2023), ähnliche Punkte finden sich auch in (ICP Vegetation, 2017):

- Die langfristigen / jährlichen CLe-Werte sind u.U. nicht geeignet, längere Zeiträume über 20-30 Jahre zu beschreiben.
- Die monatlichen Critical Levels können für etwa Flechten und Moore nicht über einen gesamten Jahreszeitraum angewendet werden, da dies die jährlichen CLe-Werte für niedrige Pflanzen überschreiten würde.
- Die jährlichen Jahresmittelwerte für kritische NH_3-Konzentration von 3 µg/m³ Luft für höhere und 1 µg/m³ Luft für niedrigere Pflanzen wie Flechten und Bryophyten können grundsätzlich bestätigt werden

Eine der Kernempfehlungen des Workshops ist jedoch außerdem die Einbeziehung standardisierter Ammoniakgrenzwerte und -messungen in die europäische Luftqualitäts- und Habitatrichtlinie. (Franzaring & Kösler, 2023)

Im Rahmen der folgenden Analyse wird im Folgenden untersucht, ob es durch die direkten Emissionen von Ammoniak-Terminals zu einer Überschreitung dieser im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention festgelegten Critical Levels (CLe) für Ammoniak für die Vegetation kommen könnte.

meteorologischen Annahmen eine gute Übereinstimmung mit den Critical Levels der UNECE, was ein weiterer Hinweis für deren wissenschaftliche Zuverlässigkeit ist.

4.2.3.2 Vergleich mit Critical Levels

Tabelle 32 zeigt die Ergebnisse der Konzentrationsberechnungen für Ammoniak in Abhängigkeit der Entfernung der jeweiligen Emissionsquelle. Als Grundlage dienen die Annahmen für die drei Modellterminals mit der Verortung an die entsprechenden Beispielstandorte. Während die maximalen Ammoniak-Konzentrationen in den entsprechenden Rasterflächen von je 500x500 m bereits weniger als 1 µg/m³ betragen, nimmt die durchschnittliche Konzentration mit zunehmender Entfernung stark ab.

Nach Tabelle 31 liegen die Critical Levels für Flechten und Moose sowie für höhere Pflanzen (einschließlich Heide, Grünland und Bodenflora von Wäldern) im Jahresmittel bei 1 bzw. 3 µg/m³. Folglich kann unter den angenommenen Rahmenbedingungen davon ausgegangen werden, dass diese Critical Levels für Ammoniak durch die Modellterminals an den Beispielstandorten nicht erreicht werden (Abbildung 28). Im Falle großer Terminals (Modellterminal 1) können jedoch punktuell auch im Normalbetrieb schon maximale Ammoniak-Konzentrationen im Bereich um 1 µg/m³ (Mittelwert für 500 m x 500 m Rasterfläche) erreicht werden. Folglich sind insbesondere Auswirkungen auf Flechten und Moose auch im Normalbetrieb denkbar und sollten kontinuierlich kontrolliert werden. Insbesondere bei Einbeziehung der Ammoniak-Hintergrundbelastung, ist eine Überschreitung der Critical Levels für Ammoniak durch die Zusatzbelastung der Anlage möglich.

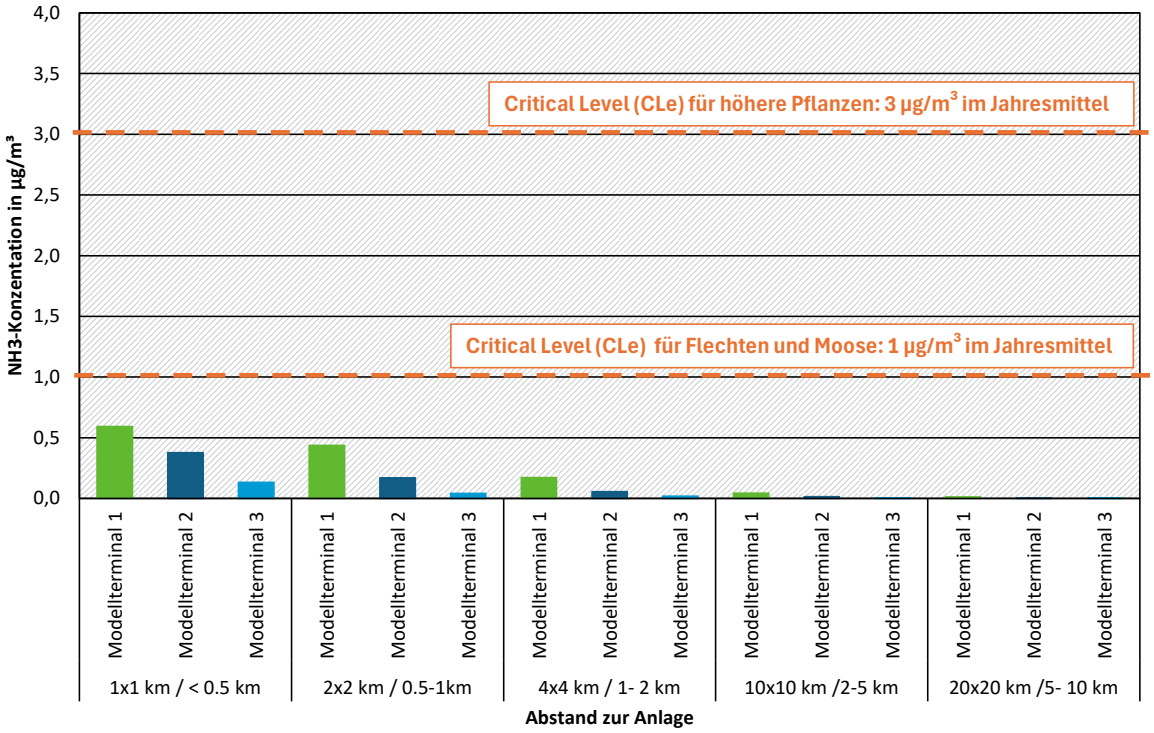
Tabelle 32: Ammoniak-Konzentration um Modellterminal 1-3 an den jeweiligen Beispielstandorten

Maximale und durchschnittliche Konzentrationswerte in Bereichen um Emissionsquelle.
Rechnung für 500 m x 500 m Raster.

[µg NH_3/m^3]	Maximale NH_3-Konzentration	Durchschnittliche NH_3-Konzentration in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5- 10 km
Beispielstandort 1	0,990	0,593	0,437	0,172	0,043	0,013
Beispielstandort 2	0,560	0,378	0,169	0,056	0,014	0,002
Beispielstandort 3	0,230	0,133	0,041	0,018	0,003	0,000

Abbildung 28: Ammoniak-Konzentration um die Modellterminals 1-3 in Bereichen um Emissionsquelle

Durchschnittliche NH_3-Konzentrationswerte in Bereichen um Emissionsquelle.
Rechnung für 500 m x 500 m Raster.



Quelle: Eigene Darstellung, ILF, LBST.

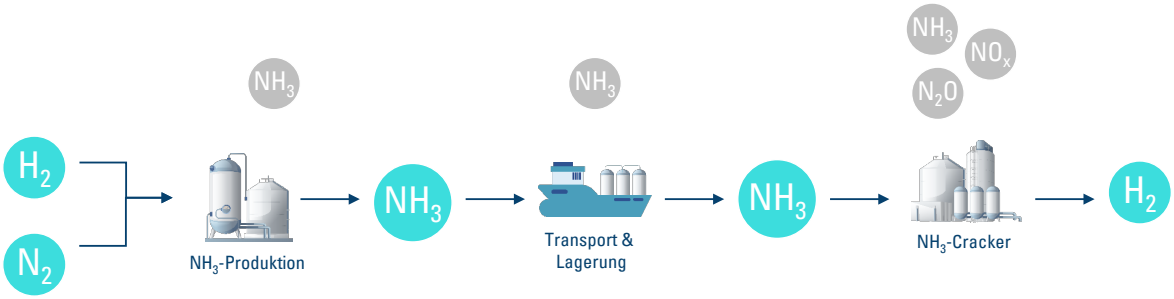
4.2.4 Klimawirkung

4.2.4.1 Hintergrund

Die potenzielle Klimawirkung der Emissionen eines Ammoniak-Terminals hängt in entscheidendem Maße davon ab, inwieweit Stickstoffverbindungen bereits in der Anlage durch Verbrennung oder Cracking vollständig zu Stickstoff umgesetzt werden oder ob reaktive Stickstoffverbindungen (NH_3, N_2O, NO_x) in die Atmosphäre gelangen. (Bertagni, et al., 2023).

Während bei Verbrennungsprozessen in Abhängigkeit der Reaktionsbedingungen (z. B. Temperatur, Sauerstoffgehalt) die Entstehung von NO_x und N_2O-Emissionen wahrscheinlich ist, liegt das Hauptaugenmerk während des Cracking-Prozesses auf nicht-umgesetzten Ammoniakmengen. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 2.3.2.3 wird das nicht umgesetzte Ammoniak im Cracker mittels einer Wasserwäsche zurückgewonnen und zusammen mit dem Restgas aus der PSA als Heizgas dem Ammoniak-Spaltreaktor zugeführt. Um die möglichen NO_x und N_2O-Emissionen zu vermeiden und den Anforderungen des TA-Luft zu entsprechen, wird eine DENOX-Anlage zur selektiven katalytischen Reduktion nachgeschaltet. Hierdurch können durch Reaktion zu Stickstoff und Wasser die verbleibenden NO_x-Emissionen signifikant reduziert werden. Die Konversionsraten typischer Anlagen liegen bei bis zu 99,9% (Bertagni, et al., 2023).

Abbildung 29: Potenzielle THG-Emissionen entlang der Ammoniak-Lieferkette



Quelle: eigene Darstellung, LBST auf Basis (Bertagni, et al., 2023).

Für die Gesamtbetrachtung der Klimawirkung einer auf Ammoniak-basierenden Energiewirtschaft sind ferner die potenziellen Ammoniakemissionen entlang der Wertschöpfungskette (Ammoniakschlupf, etwa aus dem Haber-Bosch-Prozess sowie dem Transport, siehe Abbildung 29) zu berücksichtigen. (Bertagni, et al., 2023). Diese liegen jedoch außerhalb des Rahmens dieser Studie.

THG-Wirkung von Stickstoff-Verbindungen

Allgemein werden Treibhausgasemissionen (z. B. CO_2, Methan oder Lachgas, N_2O) mit Emissionsfaktoren für die Treibhausgaswirkung multipliziert, um die Klimawirksamkeit zu berechnen. Tabelle 33 zeigt die Klimawirksamkeit ausgewählter Treibhausgase für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren in den verschiedenen Berichten des IPCC. Bisher erschienen sind der 4th Assessment Report (Solomon, 2007), 5th Assessment Report (Stocker, et al., 2013)und der 6th Assessment Report (Masson-Delmotte, et al., 2021). Im Rahmen dieser Studie werden die AR6-Werte verwendet.

Tabelle 33: Klimawirksamkeit ausgewählter Treibhausgase über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren (GWP-100)

Treibhausgas	AR4 (g CO_2-Äquivalent/g)	AR5 (g CO_2-Äquivalent/g)	AR6 (g CO_2-Äquivalent/g)
CO_2	1	1	1
CH_4	25*	28*	27.9*
N_2O	298	265	273
NH_3	Nur indirekte THG-Wirkung		
NO_x			
H_2			

*Ohne gebundenes fossiles CO_2

N_2O bildet sich überdies indirekt etwa aus den Emissionen von NH_3 und NO_x, indem sie in Ökosysteme eingetragen werden und dort durch Nitrifikations- bzw. Denitrifkationsprozesse zu einem Anteil unter anderem N_20 bilden. Nach (Eggleston, Buendia, Miwa, Ngara, & Tanabe, 2006) und (Hergoualch, et al., 2019) entstehen als typischer Wert pro g freigesetzten NH_3-N und NO_x-N in Regionen mit feuchtem Klima etwa 0,014 g N_2O-N oder etwa 0,022 g N_2O (bei trockenem Klima wären es 0,005 g N_2O-N oder etwa 0,0079 g N_2O). Deutschland zählt zu den feuchten Regionen.

Über die Standard-GWPs hinaus werden zusätzlich auch die Klimawirkungen von H_2-Emissionen in die Atmosphäre betrachtet. Wasserstoff (H_2) ist ein indirektes Klimagas. Nach (Sand, et al., 2023) beträgt das Treibhausgaspotenzial für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren (GWP 100) etwa 11,6 g CO_2-Äquivalent pro g H_2 ±2,8 g CO_2-Äquivalent pro g H_2.

4.2.4.2 THG-Emissionswirkung unterschiedlicher Fälle

4.2.4.2.1 Beschreibung der untersuchten Fälle

Für die Analyse der Klimawirkung eines Ammoniak-Terminals werden im Folgenden zwei unterschiedliche Emissions-Szenarien betrachtet. Die Analysen fokussieren sich jeweils auf den Fall des in Tabelle 14 beschriebenen Modellterminals 1 (groß).

- Emissions-Szenario 1: Emissionen im Normalbetrieb

  Die Klimawirkung wird auf Basis der in Tabelle 21 gezeigten Informationen zu den erwarteten Emissionsmassenströmen (Tagesmittelwerte) auf Basis der Grenzwerte im Normalbetrieb errechnet. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um konservative Annahmen handelt.

- Emissions-Szenario 2: Sonderfall: Automatische Notentspannung über Fackel (OTNOC-Fall)

  Zusätzlich kann es im normalen Betrieb eines Terminals unter bestimmten Umständen zu einer automatischen Notentspannung kommen, wodurch ein Teil des Inventars eines Crackers über eine Fackel abgeleitet wird (siehe Kapitel 3.3.1.2). Dieser Fall kann als OTNOC (Othern Than Normal Operating Conditions) betrachtet werden.

  Bei dem beschriebenen Beispiel wird angenommen, dass über eine Entleerungszeit von 5 Minuten das gesamte Inventar des Crackers von etwa 100 t Ammoniak verbrannt wird. Für die Klimawirkung sind sowohl die Mengen an nicht-verbranntem Ammoniak relevant (Annahme: ca. 1 t) sowie auch die beim Verbrennungsprozess in größeren Mengen entstehenden NO_x-Emissionen.

4.2.4.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Auf Basis der in Tabelle 34 dargestellten Emissionswerte für die unterschiedlichen Treibhausgase wird mittels der THG-Wirkfaktoren die Treibhausgaswirkung der unterschiedlichen Emissionen ermittelt.

Tabelle 35 zeigt die Ergebnisse der THG-Berechnungen auf. Die ermittelten THG-Wirkungen liegen im Normalbetrieb unter den getroffenen Annahmen bei knapp 66.000 $t_{CO2\text{-}Äq./}$a. Dieser Wert wird zum überwiegenden Teil durch die hohen Lachgasemissionen hervorgerufen. Dabei ist zu beachten, dass die vorliegenden Analysen – aufgrund bislang fehlender Grenzwerte – sich auf die konservativen Annahmen der TA-Luft für Salpetersäureanlagen (Orientierungswert 70 mg/Nm^3) stützen. Für Ammoniak-Cracker mit NH_3-Brennern ist von deutlich geringeren N_2O-Emissionen auszugehen. Dennoch ist folgendes zu beachten: Bei dem gegenwärtigen Pro-Kopf-Ausstoß von durchschnittlich 10,3 Tonnen CO_2-Äquivalente in Deutschland (UBA, 2025) entspräche dies dem CO_2-Ausstoß von etwa 6.400 Personen. Folglich sind diese Emissionen insgesamt vernachlässigbar klein.

Sieht man von diesen hohen Lachgas-Emissionen ab, liegt die THG-Wirkung der konservativ angenommenen Ammoniak- und Stickoxid-Emissionen im Normalbetrieb (Emissionsszenario 1) bei etwa 790 $t_{CO2\text{-}Äq./}$a. Demgegenüber stehen mit 324 $t_{CO2\text{-}Äq./}$a deutlich geringere THG-Emissionen im Falle der einmaligen Notentspannung über die Fackel.

Tabelle 34: Emissionswerte für Modellterminal 1

	Einheit	Szenario 1: Normalbetrieb	Szenario 2: Notentspannung über Fackel
Annahmen		8.500 h/a	einmalig
Ammoniak, NH_3	kg/h	4	0,12
	kg/a	34.000	1.000
Stickoxide, NO_x	kg/h	40	20,5
	kg/a	340.000	174.000
Lachgas, N_2O	kg/h	28[a]	0[b]
	kg/a	238.000[a]	0[b]
Wasserstoff, H_2	kg/h	0	0
	kg/a	0	0

[a] Hinweis: Basierend auf Orientierungswert 70 mg/Nm³ entsprechend Grenzwert für Salpetersäureanlagen in der TA Luft; voraussichtliche Betriebswerte können abweichen – siehe Anhang F.1).

[b] Annahme: Vollständige Umsetzung von NH_3 zu NO_x in der Fackel. (Berg & Herrington, 2022)

Tabelle 35: Ergebnisse der THG-Berechnung für unterschiedliche Emissionsszenarien

	Einheit	Szenario 1: Normalbetrieb	Szenario 2: Notentspannung über Fackel
Annahmen		8.500 h/a	Einmaliges Ereignis
Ammoniak, NH_3	$t_{CO2\text{-}Äq.}/a$	168	5
Stickoxide, NO_x	$t_{CO2\text{-}Äq.}/a$	622	319
Lachgas, N_2O	$t_{CO2\text{-}Äq.}/a$	64.974[a]	-
Wasserstoff, H_2	$t_{CO2\text{-}Äq.}/a$	-	-
Gesamt THG-Wirkung	**$t_{CO2\text{-}Äq.}/a$**	**65.764**	**324**

[a] Hinweis: Basierend auf Orientierungswert 70 mg/Nm³ entsprechend Grenzwert für Salpetersäureanlagen in der TA Luft; voraussichtliche Betriebswerte können abweichen – siehe Anhang F.1).

Quelle: eigene Berechnungen, LBST.

5 Ereignis- und Störfallbetrachtung für die Modellterminals

Das übergeordnete Ziel dieses Kapitels ist es, auf Basis des in Kapitel 2.2 definierten Ammoniak-Modellterminals 1 eine Diskussion und Bewertung der Emissionen vorzunehmen, die im Falle von unter Kapitel 5.2 definierten Störfallszenarien durch dieses Ammoniak-Modellterminal freigesetzt werden können. Hierbei ist zu beachten, dass den Analysen spezifische Annahmen zugrunde liegen, die im Folgenden detailliert beschrieben werden.

Vorgelagert soll jedoch zunächst in Kapitel 5.1 eine Analyse vergangener Vorfälle[57] im Kontext der großskaligen Lagerung von Ammoniak anhand einer Auswertung ausgewählter nationaler und internationaler Datenbanken und weiterer Literaturquellen vorgenommen werden. Dies dient dem Zweck, auf Basis vergangener Vorfälle mit Ammoniakaustritt, den Szenarienraum möglicher Störfälle aufzuzeigen und auf Basis dessen eine informierte Definition der nachfolgenden Störfallanalysen in Kapitel 5.2 vornehmen zu können. Dabei werden auch die einzelnen Vorfälle näher beschrieben und weiterführende Literaturquellen genannt. Zusätzlich wird die im Rahmen der gängigen Störfallbewertung genutzte Nomenklatur eingeführt (insb. zu verhindernde Störfälle, Dennoch-Störfälle und exzeptionelle Störfälle) und vor dem Hintergrund der Studie diskutiert

Darauf aufbauend beschreibt Kapitel 5.2 die Definition und Annahmen der zu untersuchenden Freisetzungsszenarien (Dennoch-Störfälle) Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ und die darüberhinausgehende Freisetzung der größten zusammenhängenden Masse (GZM) in Dennoch-Szenarien$_{KatS}$, sowie die Methodik der Analyse. Die ermittelten Reichweiten bis zur Unterschreitung der relevanten Beurteilungswerte für Immissionen werden in Kapitel 5.3 beschrieben. Abschließend werden wesentliche Erkenntnisse aus den Berechnungen hinsichtlich der Bedeutung schadensverhindernder und -begrenzender Maßnahmen in Kapitel 5.4 zusammengefasst.

5.1 Übersicht vergangener Vorfälle im Kontext der Lagerung und Nutzung von Ammoniak

Im Rahmen einer Hintergrundrecherche werden diverse (nationale und internationale) Datenbanken auf relevante Vorfälle geprüft und die Ergebnisse zusammengetragen. Relevante Vorfälle stellen im Kontext dieses Kapitels Schadens- bzw. Störfall-Ereignisse an (ggf. ehemals) bestehenden Anlagen dar, die dem in dieser Studie betrachteten Anlagentyp (siehe Modellterminals) gleichen oder ähneln, oder in denen Ammoniak in gleicher oder ähnlicher Art und Weise gehandhabt wird. Ziel der Analyse ist es, auf Basis dieser vergangenen Vorfälle bei der großskaligen Lagerung und Handhabung von Ammoniak die Grundlage für die Szenariendefinition in Kapitel 5.2 zu legen.

Hierbei werden folgende Datenbanken berücksichtigt: ZEMA (Deutschland), ARIA (Frankreich), eMARS (Europäische Union), CSB (USA) und NTSB (USA).[58] Die Datenbanken werden jeweils nach dem Stichwort „Ammoniak“ bzw. „ammonia“ im Kontext der Lagerung von Ammoniak sowie an den Studienschwerpunkt angrenzende Themen wie die Be- und Entladung sowie dem Transport von Ammoniak durchsucht. Vorfälle im Zusammenhang mit der Nutzung von Ammoniak als Kühlmittel (etwa in der Lebensmittelindustrie) bleiben unberücksichtigt, da sich diese aufgrund der unterschiedlichen Art und Weise bei der Handhabung des Ammoniaks

[57] Die Bezeichnung „Vorfälle“ wurde bewusst gewählt, um eine Abgrenzung der klar in nationalem Recht definierten „(Störfall-)Ereignissen“ (beispielsweise im Sinne der Störfall-Verordnung) vornehmen zu können. Diese sind abhängig vom Land und der übergeordneten Regulatorik unterschiedlich definiert und daher nicht miteinander gleichzusetzen.

[58] Weitere im Rahmen der Recherche geprüfte Datenbanken umfassen AS-ER (Deutschland), DECHEMA (Deutschland) und PHMSA (USA). Hierbei wurde unter den gewählten Suchkriterien jedoch keine zutreffenden Vorfälle bzw. Ereignisse identifiziert.

innerhalb der Anlage (als Arbeitsmedium im geschlossenen Kreislauf) sowie aufgrund des unterschiedlichen stofflichen Potenzials (deutlich geringere Stoffmenge) nicht zielführend in den Kontext dieser Studie einbinden lassen. Die Recherche der Vorfälle in den Datenbanken wird ferner ergänzt durch relevante Übersichten in der Literatur.

5.1.1 Übersicht Datenbankrecherche sowie weiterer Literaturquellen

Im Folgenden findet sich eine Kurzbeschreibung zu den jeweiligen Datenbanken: [59]

Die Zentrale Melde- und Auswertstelle für Störfälle und Störungen (ZEMA) erfasst alle meldepflichtigen Ereignisse nach der Störfall-Verordnung (12. BImSchV[60]) in Deutschland. Sie wurde im Jahr 1993 beim Umweltbundesamt (UBA) eingerichtet. Vorgelagertes Ziel der Auswertung der gesammelten Daten ist die Weiterentwicklung der Anlagensicherheit.[61] Im Zeitraum von 1980 bis 2025 wurden in der Datenbank der ZEMA 1010 Ereignisse aus Deutschland registriert, wovon 74 Fälle auf Ammoniak entfallen und davon 10 im Rahmen dieser Recherche als relevant eingestuft und näher betrachtet wurden.

Die **ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents)** ist eine vom französischen Umweltministerium (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires) betriebene Datenbank zu industriellen Stör- und Unfällen. Insgesamt umfasst die Datenbank etwa 46.000 Unfälle und Zwischenfälle in Frankreich und im Ausland. Jedes Jahr werden nach Betreiberangaben etwa 1.200 neue Ereignisse aufgenommen. Im Rahmen der Recherche wurden etwa 200 Ereignisse[62] mit Ammoniak identifiziert, wovon 14 als relevant eingestuft wurden.[63]

Die eMARS-Datenbank (Major Accident Reporting System) wurde durch die Europäische Kommission im Rahmen der Seveso-Richtlinie (82/501/EEC) im Jahr 1982 etabliert. Ziel ist es, aus Erfahrungen diverser Vor- und Störfälle zu lernen. Bis zuletzt ist die Meldung eines entsprechenden Ereignisses an das Major Accident Hazards Bureau (MAHB) des Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission für EU-Mitgliedstaaten verpflichtend, sofern ein Seveso-Betrieb betroffen und die Kriterien eines „schweren Unfalls“ gemäß Anhang VI der Seveso-III-Richtlinie (201218/EU) erfüllt sind.[64] Vertrauliche Informationen, wie Namen und Standorte von Unternehmen, werden jedoch nicht veröffentlicht. In der Datenbank wurden 103 Fälle zum Thema Ammoniak identifiziert, davon 7 mit Relevanz für das Projekt.[65]

Das **CSB (Chemical Safety Board)** ist eine unabhängige Bundesbehörde der USA, die für die Untersuchung von Chemieunfällen in der Industrie zuständig ist. Die Untersuchungsberichte werden nach Abschluss der Ermittlungen auf der Webseite des CSB veröffentlicht. Die Recherche im Rahmen dieser Studie ergab insgesamt 124 veröffentlichte Untersuchungsberichte im Kontext von Ammoniak.[66]

[59] Im Rahmen der Datenbankanalyse wurden Vorfälle berücksichtigt, die bis November 2024 in den Datenbanken eingetragen wurde.

[60] 12. BImSchV: Störfall-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. März 2017 (BGBl. I S. 483), die zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 3. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 225) geändert worden ist.

[61] ZEMA: https://www.infosis.uba.de/index.php/de/zema/index.html

[62] Hinweis: Die Umsetzung der Seveso(III)-Richtlinie in französisches nationales Recht erfolgte, im Vergleich zur deutschen Umsetzung, mit kleineren Mengenschwellen, ab denen eine Meldung erforderlich ist.

[63] ARIA: https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/the-aria-database/?lang=en

[64] Ab 01.01.2026 erfolgt die Meldung für EU-Mitgliedstaaten an die EEA (European Environment Agency) der Europäischen Kommission.

[65] eMARS: https://emars.jrc.ec.europa.eu/en/emars/content

[66] CSB: https://www.csb.gov/about-the-csb/

Das **NTSB (National Transportation Safety Board)** sammelt seit 1926 in den USA Informationen zu Unfällen in der Luftfahrt, sowie weiterer Transport-Unfälle, auf Schiene, Schiff, Straße, sowie via Pipeline. Die Analyse ergab 447 Datenbankeinträge zum Thema Ammoniakstörfall, wovon 8 im Kontext der Analyse als relevant eingestuft und näher betrachtet wurden.[67]

Eine Übersicht vergangener bedeutender Vorfälle mit Ammoniakfreisetzung im Zeitraum zwischen 1969 und 2023 findet sich in (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024). Die Autoren unterscheiden hierbei zwischen mit druckverflüssigtem (17 Vorfälle) und kaltverflüssigtem Ammoniak (6 Vorfälle) und beschreiben die unmittelbaren Ursachen des jeweiligen Ereignisses (z. B. Korrosion, Leckage, menschliches Versagen), ohne jedoch auf übergeordnete Themen wie Sicherheitssysteme und -kultur einzugehen.

Weitere Zusammenstellungen früherer Freisetzungen von Ammoniak finden sich beispielsweise in (Griffiths & Kaiser, 1982) (Zeitraum 1952 – 1979) und (DNV, 1987) (Zeitraum 1963 – 1984). Es ist zu beachten, dass ein Großteil der beschriebenen Vorfälle im Kontext des Einsatzes von Ammoniak als Kühlmittel oder Düngemittel in kleinen Mengen (unter 5 Tonnen) und durch Anwendung von zum Teil nicht ausreichend geschultem Personal zurückzuführen ist. Diese Aussage wird etwa auch gestützt durch eine Analyse von Ammoniak-Vorfällen im Vereinigten Königreich (1992-1998) (Haywood, 2012). Dagegen fanden Freisetzungen in chemischen Prozessen oder während des Transports meist aufgrund von Korrosion, Ventilversagen oder Versagen der Prozessüberwachung statt. Auch eine vergleichbare Analyse für 17 US-Bundesstaaten für die Jahre 2002-2005 kommt zu einem ähnlichen Ergebnis (Wattigney, Coper, Drew, & Orr, 2009): Der Großteil der Vorfälle findet im Bereich der Nahrungsmittelproduktion oder Landwirtschaft statt – wobei, in diesen Fällen bis zu 90% der Fälle auf Materialversagen oder menschliche Fehler zurückgeführt werden kann.

5.1.2 Diskussion ausgewählter Vorfälle mit Ammoniakfreisetzung

Basierend auf der Datenbankrecherche werden im Folgenden einzelne Vorfälle beschrieben und – sofern Informationen verfügbar – Hintergründe dieser vorgestellt. Mit Blick auf den Projektfokus liegt der Schwerpunkt der Diskussion auf Ereignissen mit Lagerung kaltverflüssigten Ammoniaks. Als weiterführende Quellen werden (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024) sowie (Pattabathula, Rani, & Timbres, 2011) empfohlen.

Ziel der Zusammenstellung ist eine Übersicht bisheriger Ereignisse mit Ammoniakfreisetzung als Basis für die Entwicklung möglicher Störfallszenarien im nachfolgenden Kapitel. Folglich steht die Ursache im Vordergrund der Kurzbeschreibung, sowie ein Verweis auf jeweils weiterführende Literatur.

Insgesamt wurden 59 Vorfälle identifiziert und näher betrachtet. Zu beachten ist jedoch, dass hiervon 46 Vorfälle der Kategorie „Austritte von Ammoniak bei der Lagerung oder dem Transport druckverflüssigtem Ammoniak“ (etwa via Kesselwagen) zugeordnet werden und daher nicht im unmittelbaren Fokus der Analysen stehen. Die identifizierten Vorfälle werden im Folgenden kurz beschrieben und tabellarisch zusammengestellt (siehe Tabelle 36 bis Tabelle 39), jeweils unter Angabe von Jahr, Land, Ort, Kurzbeschreibung inkl. identifizierter Ursache, NH_3-Lagerungskapazität und -menge, Austrittsmenge und Austrittsdauer, sowie die Zahl der Verletzten und Toten.

[67] NTSB: https://www.ntsb.gov/about/Pages/default.aspx

5.1.2.1 Ereignisse mit Freisetzung kaltverflüssigtes Ammoniak

Lagerung von tiefgekühltem flüssigem Ammoniak

Die nachfolgenden Ereignisse sind chronologisch geordnet:

Bei einer Überfüllung eines Flüssig-Ammoniak-Tanks (Kapazität: 36.000 t) in **Blair, Nebraska (USA)** im Jahr 1970 kam es zum Austritt von etwa 160 t Ammoniak über das Überlaufventil. Hierbei beschreiben die Quellen als Ursache das Versagen der Warnsysteme. (Pattabathula, Rani, & Timbres, 2011) nennen als Lehre aus dem Vorfall eine räumliche Trennung des Überdruck- und Absperrventils – sowie die Redundanz in Tank-Füllstandsmessungen. Als Folge des Austritts wird eine etwa 10 m dicke Ammoniakwolke beschrieben, die sich über eine Länge von etwa 2,7 km ausbreitete. Im Nachgang des Ereignisses mussten drei Mitarbeiter der örtlichen Feuerwehr wegen Gasinhalation behandelt werden. (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024)

Im Jahr 1989 kam es in **Jonova (Litauen)** zum wohl bislang größten Ammoniakaustritt. Hierbei führte das versehentliche Einleiten von warmem Ammoniak in einen 10.000 t NH_3-Tank zu einem Bersten aufgrund des Überdrucks im Tanks („Thermal Overload“), wodurch etwa 7.000 t flüssiges Ammoniak austraten. (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024) In Folge des Austritts wurde auch eine Erdgasleitung beschädigt, infolgedessen ein Feuer ausbrach, das letztlich zur Entzündung der Ammoniak-Lache führte. Hierdurch wurde auch ein nahegelegenes Ammonium-Nitrat Lager beschädigt. Das Verdampfen der etwa 70 cm hohen Ammoniaklache dauerte über etwa 12 Stunden an. Unterschiedliche Quellen berichten von einer Ammoniakwolke, die sich bis zu 35 km entlang der Windrichtung ausbreitete. Als Folge des Ereignisses wurden 7 Menschen getötet, 57 verletzt, sowie etwa 32.000 evakuiert (ARIA, 2007) (Andersson, 1989). Gemäß dem ARIA-Report No 717 fanden zum Unfallzeitpunkt Wartungsarbeiten an den beiden Verflüssigungskompressoren statt. Das Ammoniak aus der Produktionsanlage wurde stattdessen über eine Sicherheitskolbenpumpe zur Sicherheitsfackel evakuiert. Trotzdem gelangen einige Tonnen des warmen Ammoniaks (10 °C) in den Lagertank (14 t entsprechend etwa 15 Minuten Gastransfer). Auch nach einer aktuellen und detaillierten Analyse von (Stewart, 2025) kann das Unglück auf ein Zusammenspiel aus Konstruktions- und Handhabungsfehlern der Betreiber zurückgeführt werden.

Bei einem NATO-Luftangriff auf einen Raffinerie- und Chemiestandort in **Pančevo** (Serbien) während des Bosnien-Konflikts kam es nach (Clarke, 2002) im Jahr 1999 zu einem Austritt von etwa 250 t flüssigem Ammoniak – neben diversen weiteren Chemikalien (United Nations Environment Programme and United Nations Centre for Human Settlements (Habitat), 1999). Die Folgen für Umwelt und Gesundheit können aufgrund der unterschiedlichen freigesetzten Chemikalien nicht klar zugeordnet werden.

In **Rostock (Deutschland)** ereignete sich 2005 in Folge von Wartungsarbeiten an der Tankisolierung eines 11.800 t Ammoniaktanks ein weiterer Vorfall. Gemäß damaligem Sicherheitsprotokoll wurde 25%-iges Ammoniakwasser im Tank vorgelegt und der Tank durch Einsprühen von flüssigem Ammoniak heruntergekühlt. Durch einen Ölfilm als Folge spezifikationsgemäßer minimaler Ölanteile im Ammoniak bildete sich eine Sperrschicht zwischen den beiden Phasen, die erst durch das Öffnen eines Ventils durchbrochen wurde. Durch das schlagartige Vermischen kam es im Tank zu einem Druckanstieg, der zu einem Anheben des Tanks und einem Abriss der Ammoniak-Leitung führte. Insgesamt wurden etwa 100 t Ammoniak freigesetzt. Im Zusammenhang mit dem Schadensereignis wurden 2 Personen verletzt, eine davon verstarb später im Krankenhaus. (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024) Unter Berücksichtigung der aus dem Vorfall gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere das potenzielle Vorhandensein von Ölanteilen, wurde das Sicherheitsprotokoll zum sicheren Befüllen des Tanks verändert. Der Vorfall verdeutlicht die Vorteile eines Tankdesigns, das ausschließlich eine Be-

und Entladung über die Tankoberseite vorsieht. Durch diese Bauweise wird das Risiko eines seitlichen Leitungsabrisses und eines daraus resultierenden Ammoniakaustritts konstruktiv ausgeschlossen. Weitere Informationen zu dem Vorfall finden sich auch in (Bakli, 2006).

Bei einem Vorfall im Assaluyeh-Hafen im **iranischen Bushehr im Komplex der Pardis Petrochemical Company** kam es im Jahr 2011 zu einer Beschädigung eines 20.000 t NH_3-Tanks – hervorgerufen durch Überdruck im Tankinneren. Nach (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024) sowie (Orooji & Hosseininia, 2015) stieg der Innendruck eines der Ammoniaklagertanks aufgrund von dem Einleiten von warmen Ammoniak (-12°C) in den Tank an, was zu einem Bruch an zwei Punkten in den Verbindungen zwischen Kuppeldach und Mantel und zur Ausbreitung von Ammoniakgas in die Umgebung führte. Damit kann der Vorfall hauptsächlich auf menschliches Versagen (hohe NH_3-Temperatur sowie hoher Durchfluss von 112 m^3/h) in Verbindung mit weiteren technischen Problemen, wie etwa dem Ausfall der Notkühlkompressoren, zurückgeführt werden. Der Druckanstieg verursachte auch das Einknicken und Absinken einiger anderer Teile des Mantels an den Verbindungen zum Kuppeldach. Die Ausbreitung des Ammoniakgases konnte allerdings innerhalb 24 Stunden begrenzt und damit die Auswirkungen des Schadensereignisses signifikant verringert werden. Der nachfolgende Stilllegungsprozess des Tanks umfasste insgesamt 297 Tage, wovon 5 Tage auf die Leerung des Tankinhalts und weitere 60 Tage auf die Spülung des Tanks entfielen. Details zum Vorfall, sowie zur Tankentleerung finden sich bei (Orooji & Hosseininia, 2015)

In einem weiteren Vorfall kam es im Jahr 2016 in **Chittagong (Bangladesch)** zur Explosion eines kleineren, 500 t NH_3-Tanks durch Überdruck, wodurch der gesamte Tankinhalt von 325 t Ammoniak freigesetzt wurde. Bei dem Vorfall löste sich der Tank vollständig von seinem Fundament und kam einige Meter weiter auf dem Boden auf. Aufgrund der sich ausbreitenden Ammoniak-Wolke (über mehrere Kilometer) wurden 52 Personen im Krankenhaus behandelt. (Khan, 2016) Die Feuerwehr setzte auch Wasser ein, um das Ammoniak-Gas aus der Luft auszuwaschen. Nach dem veröffentlichten Bericht lag die Ammoniakkonzentration in der Luft 5 Stunden nach dem Vorfall bei etwa 600 ppm. Als Ursache erscheinen ein Zusammenspiel aus Fehlern im Betrieb der Anlage, mechanischen Schwächen sowie einer unzureichenden Sicherheitskultur wahrscheinlich. (Khan, 2016) (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024)

Neben den genannten Vorfällen beschreiben (Pattabathula, Rani, & Timbres, 2011) weitere Vorfälle von Tankversagen bei Ammoniak-Tanks. Hierbei ist jedoch wichtig zu erwähnen, dass es bei den Vorfällen keine nennenswerten Austritte von Ammoniak gab und die Tanks nach dem Erkennen der Schwachstellen überholt oder außer Betrieb genommen wurden. Folgende Beispiele werden im Bericht explizit genannt, weitere in einer Tabelle zusammengetragen.

- Teilweise Einreißen der Hülle eines 6.349 t NH_3-Lagertanks durch Vakuumentwicklung des Tanks. Leck oberhalb des Füll-Levels, daher kein direkter Flüssigkeitsaustritt (Pocatello, USA, 1978)
- Schaden am Tankfundament (vermutlich in Folge eines Erdbebens) (Asmidal, Algerien, 1986)
- Schäden durch Stress-Corrosion-Cracking (SCC) an einem 12.000 t NH_3-Lagertank (Middelesbrough, England, 1988)
- Tankversagen der inneren Tankhülle bei doppelwandigen 5.000 t NH_3-Lagertank (Coromandel Fertilisers Ltd, India., 2001)

Die beschriebenen Vorfälle mit Ammoniakaustritt bei Lagerung von tiefgekühltem flüssigem Ammoniak sind in Tabelle 36 zusammengestellt.

Tabelle 36: Vorfälle mit Ammoniakaustritt bei Lagerung von tiefgekühltem flüssigem Ammoniak

Jahr	Ort (Land)	Kurzbeschreibung	Lager-kapazität	Lagermenge	Austritts-menge	Austritts-dauer	Zahl Verletzte / Tote
1970	Blair, Nebraska (USA)	Überfüllung eines NH_3-Lagertanks (Ausfall des Alarm - und Notfallsystems) **= Technischer Defekt**	36.000 t	k.A.	160 t	2 – 2,5 h	3 / 0
1989	Jonova (Litauen / UDSSR)	Abrupter Druckanstieg im Tank durch Einleitung von warmem Ammoniak (10°C), Bersten des Tanks + Feuer in Folge von Beschädigung einer Gasleitung sowie Feuer-Übergriff auf Ammoniumnitrat-Lager **= Designfehler + menschliches Versagen**	10.000 t	7.000 t	7.000 t	12 h	57 / 7
1999	Pančevo (Serbien)	Beschuss von Tank einer Raffinerie, Austritt und Brand diverser Chemikalien als Folge **= militärischer Angriff**	k.A.	k.A.	250 t	k.A.	k.A. (keine Zuordnung möglich)
2005	Rostock (Deutschland)	Nach Wartungsarbeiten an Tankisolierung, Wiederbefüllung gemäß Sicherheitsprotokoll, Ölfilm in Tank führte zu Phasentrennung zwischen 25%-igem Ammoniakwasser und Ammoniak. Reaktion beider Phasen durch Ventilöffnung führte zu Tankversagen durch Überdruck **= Fehler im Sicherheitsprotokoll**	11.180 t	k.A.	100 t	k.A.	2 / 1
2011	Pardis (Iran)	Flüssiges Ammoniak mit -12°C wurde in den Tank gepumpt. Dies führte Aufgrund der hohen Temperatur zu Überdruck und Tankversagen = **menschliches Versagen**	20.000 t	k.A.	k.A.	k.A	0 / 0
2016	Chittagong (Bangladesch)	Überdruck wegen menschlicher Fehler oder mechanisches Problem = **menschliches Versagen / Sicherheitskultur**	500 t	325 t	325 t	k.A.	52 / 0

Quelle: LBST auf Basis der Literaturanalyse.

Vorfälle bei Be- und Entladung von Schiffen mit kaltverflüssigtem Ammoniak

Neben den im Rahmen der Studie relevanten Vorfällen mit Ammoniakaustritt bei der Lagerung von Ammoniak seien außerdem noch drei Vorfälle mit Ammoniakaustritt während des Be- und Entladevorgangs von Schiffen genannt. Durch Sicherheitsventile und Abbruch der Be- und Entladung liegen in diesen Vorfällen die Austrittsmengen jedoch deutlich unter jenen bei einem vollständigen oder teilweisen Tankversagen (siehe Tabelle 36).

In **Landskrona (Schweden)** kam es 1976 zu einem Vorfall beim Entladen von 533 t wasserfreien Ammoniak. Während des Entladevorgangs riss der Schlauch, der ersatzweise während der Reparatur des eigentlichen Entladeschlauchs genutzt wurde, und es kam zum Austritt des Ammoniaks und zur Bildung einer Gaswolke. Spätere Untersuchungen zeigten, dass der Schlauch nur für Propan und Butan, nicht aber Ammoniak ausgelegt war. (Maritime Integrated Decision Support Information System on Transport of Chemical Substances (REMPEC), 1976)

In einem weiteren Vorfall wurde im Jahr 1993 in **Ambes (Frankreich)** bei dem Test eines Verladearms für kryogenes Ammoniak ein Leck entdeckt. Hierbei formte sich durch das austretende Ammoniakgas eine Gaswolke (ARIA Fall 4320) (ARIA, 1993).

Im Jahr 2018 wurden bei der Entladung eines NH_3-Schiffs in **Kwinana (Australien)** bei einem Entkopplungsvorgang rund 1,2 Tonnen Ammoniak innerhalb von 24 Sekunden freigesetzt. Während des Spülvorgangs mit Ammoniakgas nach Entladung des Schiffes wurde durch einen Bedienfehler ein Ventil teilweise geschlossen, wodurch es zu einer Druckerhöhung im Entladearm kam. Hierdurch kam es schließlich zu einer Trennung des Entladearms von der Flanschverbindung des Schiffes, wodurch das Ammoniakgas freigesetzt wurde und sich eine Gaswolke bildete. (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024) (Government of Western Australia - Department of Mines, Industry, Regulation and Safety, 2024)

Tabelle 37: Vorfälle mit Ammoniakaustritt bei Entladung von Schiffen von tiefgekühltem flüssigem Ammoniak

Jahr	Ort (Land)	Kurzbeschreibung	Lager-kapazität	Lager-menge	Austritts-menge	Austritts-dauer	Zahl Verletzte / Tote
1976	Landskrona (Schweden)	Schlauch platzte/riss beim Entladevorgang (war nur für Propan bzw. Butan ausgelegt) Ventile wurden direkt geschlossen *Hinweis: Unklar, ob es sich um unter Druck stehendes oder halbgekühltes Ammoniak handelte: in den Berichten ist von „unter Druck stehendem" Ammoniak die Rede* **= Designfehler / menschliches Versagen**	1500 t	533 t	180 t	50 Minuten	2/2
1993	Ambes (Frankreich)	Leck während Testbeladung von Schiffen; Entstehung einer Gaswolke **= Designfehler / menschliches Versagen**	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Jahr	Ort (Land)	Kurzbeschreibung	Lager-kapazität	Lager-menge	Austritts-menge	Austritts-dauer	Zahl Verletzte / Tote
2018	Kwinana (Australien)	Entladearm löste sich während des Spülvorgangs nach der Entladung aus dem Schiff von der Flanschverbindung. Grund war der erhöhten Druck infolge der falschen Betätigung eines Ventils. = **menschliches Versagen**	k.A.	k.A.	1.2 t	24 Sekunden	k.A.

Quelle: LBST auf Basis der Literaturanalyse

5.1.2.2 Weitere Vorfälle mit Freisetzung von Ammoniak (Pipelinetransport, Lagerung / Transport druckverflüssigtes Ammoniak)

Trotz der Schwerpunktlegung auf kaltverflüssigtem Ammoniak im Kontext dieser Studie sei zusätzlich auch eine Kurzübersicht zu bedeutenden Ammoniakaustritten (in Kontext dieses Kapitels: Vorfälle, die Tote und Verletzte zur Folge hatten oder bei denen große Mengen Ammoniak freigesetzt wurden) aus druckverflüssigten Tanks (bei Lagerung oder Be- und Entladung) sowie beim Pipelinetransport genannt. Aufgrund der Vielzahl an Vorfällen sind die nachfolgendend beschriebenen Vorfälle jeweils als beispielhaft zu verstehen.

a) Ammoniakaustritt beim Pipelinetransport

Tabelle 38: Vorfälle mit Ammoniakaustritt bei Pipelinetransport

Jahr	Ort (Land)	Kurzbeschreibung	Lager-kapazität	Lager-menge	Austritts-menge	Austritts-dauer	Zahl Verletzte / Tote
1973	McPherson, Kansas (USA) (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024)	Stromausfall und Pipeline Shutdown wegen Eissturm, Überdruck bei Wiederinbetriebnahme durch Ventilversagen, Bildung einer Ammoniakwolke **= technischer Defekt**	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	2/0
2004	Kingman (USA) (National Transport Safety Board (NTSB), 2007)	Explosion der Pipeline nach bereits vorhandener Beschädigung (z. B. durch Agrarmaschinen), Bildung einer Ammoniakwolke Leck in Fluss führte zu Auswirkungen auf Umwelt, u.a. starben etwa 25.000 Fische **= technischer Defekt**	k.A.	k.A.	480 t (4.858 Barrel)	k.A.	0/0
2007	Tampa Bay (USA) (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2007)	Pipeline bewusst durch Dritten angebohrt Pipelinedruck wegen Wartungsarbeiten reduziert **= Sabotage**	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1/0

Jahr	Ort (Land)	Kurzbeschreibung	Lager-kapazität	Lager-menge	Austritts-menge	Austritts-dauer	Zahl Verletzte / Tote
2016	Tekemah (USA) (National Transportation Safety Board, 2020)	Magellan Pipeline: Freisetzung Ammoniak aus 8-Inch-Pipeline Bildung einer Ammoniakwolke **= technischer Defekt**	k.A.	k.A.	209 t (2.587 Barrel)	k.A.	2/1

Quelle: LBST auf Basis der Literaturanalyse.

b) Austritt druckverflüssigtem Ammoniak aus Tanks bzw. Kesselwägen

Von den im Rahmen der Literaturrecherche identifizierten 59 Vorfällen wurden 46 Vorfälle der Kategorie „Austritte von Ammoniak bei der Lagerung oder dem Transport druckverflüssigtem Ammoniak“ (etwa via Kesselwagen) zugeordnet.

Davon betreffen 12 Vorfälle den Transport von Kesselwägen (darunter auch 4 mit Entgleisung von Kesselwägen beim Transport via Schiene).[68] Diese Vorfälle werden im Folgenden nicht weiter betrachtet, da diese außerhalb der Fragestellung dieses Forschungsprojektes liegen.

Die Ursache der übrigen 34 Vorfälle unterteilt sich wie folgt:

- Defektes oder versehentlich geöffnetes Ventil (10 Vorfälle)
- Abriss Umladeschlauch / Rohr (5 Vorfälle)
- Tankleckage (2 Vorfälle) oder Tankversagen (6 Vorfälle, meist durch Beschädigung oder Überdruck)
- Weitere Gründe (Zylinder, Flanschverbindung, Elektronik) oder keine Angabe: 8 Vorfälle

Ferner lassen sich die Fälle folgendermaßen einteilen:

- Technischer Defekt (21 Vorfälle)
- Menschliches Versagen (6 Vorfälle)
- Umwelteinfluss (3 Vorfälle)
- Militärischer Angriff (1 Vorfall, Novoselytsya/Sumy (Ukraine), 2022[69])
- Keine Angabe (2 Vorfälle, Unfälle bei Beladung NH_3-Lkw bzw. Umfüllen von Ammoniak)

Von den 33 Vorfällen sind bei 13 Vorfällen keine Informationen zu Verletzten oder Toten Personen bekannt. Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele von Ereignissen mit bedeutenden Auswirkungen (hinsichtlich Anzahl geschädigter Personen oder Menge des Ammoniak-Austrittes) kurz beschrieben, mit einem Hinweis auf weiterführende Quellen.

Bei einem der Vorfälle kam es im US-amerikanischen West (Texas) am 17. April 2012 in Folge eines Brands in einem Düngemittellager zu einem Ammoniakaustritt (ca. 17 t) aus Lagertanks.

[68] Zuletzt kam es im Dezember 2022 im serbischen Pirot zu einer Entgleisung mehrerer Kesselwägen, als ein Zug über eine nicht für den Gütertransport freigegebene Bahnstrecke geleitet wurde. In Folge des Ammoniakaustritts (ca. 20 Tonnen) aus einem der Wagen bildete sich eine Gaswolke, die sich langsam auch über eine benachbarte Autobahn ausbreitete. Insgesamt wurden nach Medienberichten bis zu 59 Personen in Folge des Vorfalls in einer Klinik behandelt. (Riha, 26.01.2023)

[69] So wurde beispielsweise im März 2022 ein 50 Tonnen Ammoniak-Tank im Chemiekomplex in Sumy (Ukraine) durch einen Angriff beschädigt, was zum Austritt gasförmigen Ammoniaks führte (The Guardian, 2022).

Grund für den Austritt war jedoch die Explosion falsch gelagerten Ammoniumnitrats. In Folge der Explosion wurden überdies 15 Personen (davon 12 Feuerwehrkräfte) getötet und mehr als 260 Personen verletzt. (U.S. Chemical Safety Board, CSB, 2016) Dieser Vorfall zeigt auch die möglichen Wechselwirkungen zwischen unterschiedlichen Schadensereignissen auf, die schlussendlich auch dazu führen können, dass keine klare Zuordnung der einzelnen Schadensursachen möglich ist, oder aber die Wirkung des Ammoniakaustritts durch größere Schadensereignisse überlagert wird.

Tabelle 39: Ausgewählte Vorfälle mit Austritt druckverflüssigten Ammoniaks und hohen Opferzahlen

Jahr	Ort (Land)	Kurzbeschreibung	Lager-kapazität	Lager-menge	Austritts-menge	Austritts-dauer	Zahl Verletzte / Tote
1968	Lievin (Frankreich)	Tankexplosion aufgrund Korrosion während Entladung eines NH3-LKWs (ARIA, 1968)	k.A.	19 t	19 t	k.A.	24 / 6
1973	Potchefstroom (Südafrika):	Versagen eines 50-t-Drucktanks, evtl. beschädigtes Bodenblech (Lonsdale, k.A.)	50 t	50 t	30 + 8 t	k.A.	65 / 18
1992	Panipat (Indien)	Defektes Sicherheitsventil an der Druckseite der Ammoniakpumpe (Baboo, 2021)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	10 / 11
1992	Dakar (Senegal)	Überdruck im Tank an Erdnussöl-Mühle wegen Überladung / Befüllung von warmem Ammoniak, Ereignis während Feiertag / Ramadan (Dharmavaram & Pattabathula, 2023)	17,7 t	22,0 t	22,0 t	k.A.	1.150 / 129

Quelle: LBST auf Basis der Literaturanalyse.

5.1.3 Einordnende Diskussion als Basis der Definition zu untersuchender Störfall-Szenarien

Die beschriebenen Vorfälle lassen sich in der überwiegenden Zahl auf eine Kombination aus menschlichem Versagen, Fehlbedingung und/oder Versagen von Sicherheitseinrichtungen zurückführen. Die gute Dokumentation der Vorfälle in den Datenbanken, sowie auch der regelmäßige Austausch zwischen den Betreibern / Akteuren der chemischen Industrie (siehe etwa (Pattabathula, Rani, & Timbres, 2011)) erlauben es, dass jeder Vorfall eine Basis für die Anpassung bzw. Verbesserung der Sicherheitsprotokolle, -routinen und ggf. Designanpassungen sowie für die Aktualisierung des Stands der Technik ist.

Um eine angemessene Szenariendefinition im Rahmen dieser Studie anhand geltender Konventionen zu begründen, werden im Folgenden zunächst relevante Begriffe im Kontext der

Störfall-Verordnung eingeführt und geeignete Maßnahmen zur Störfallverhinderung bzw. Störfallauswirkungsbegrenzung beschrieben.

5.1.3.1 Terminologie / Taxonomie

Gemäß den Empfehlungen des Arbeitskreises „Dennoch-Störfälle" der Störfall-Kommission wird zur Abgrenzung der Dennoch-Störfälle sowie für Vorkehrungen zur Begrenzung ihrer Auswirkungen in SFK-GS-26[70] eine Unterscheidung der folgenden Begriffe empfohlen, die auch in der nachfolgenden Diskussion und Szenariendefinition gelten soll. Diese werden als etablierte Begrifflichkeiten innerhalb des deutschen Störfallrechts verstanden, deren Definition einzig im SFK-GS-26 niedergeschrieben ist. Daher wird der SFK-GS-26 weiterhin als Erkenntnisquelle angeführt, auch wenn er sich formal im Archiv der KAS befindet (STÖRFALL-KOMMISSION beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit SFK-GS-26, 1999).

- ***Zu verhindernde Störfälle*** *beruhen auf Betriebsstörungen, die sich aufgrund von vernünftigerweise nicht auszuschließenden Gefahrenquellen zu einem Störfall ausweiten würden, wenn ihr Ablauf nicht durch störfallverhindernde Maßnahmen nach § 3 Abs. 1 StörfallV unterbrochen oder so eingegrenzt werden würde, dass sie keine ernste Gefahr mehr hervorrufen. Störfälle dieser Art und die störfallverhindernden Maßnahmen werden in der Sicherheitsanalyse (SiA) dargelegt.*

- ***Dennoch-Störfälle*** *stellen die Ausweitung von Betriebsstörungen dar, die trotz störfallverhindernder Maßnahmen, aber aufgrund des Wirksamwerdens einer vernünftigerweise auszuschließenden Gefahrenquelle oder des zeitgleichen Wirksamwerdens mehrerer voneinander unabhängiger Gefahrenquellen (Nr. 3.2.4 der 2. Störfall-VwV) eine ernste Gefahr hervorrufen. Zur Begrenzung der Auswirkung von Störfällen dieser Art sind anlagenbezogene Vorkehrungen und spezielle Gefahrenabwehrmaßnahmen nach § 3 Abs. 3 in Verbindung mit § 5 StörfallV zu treffen.*

- ***Exzeptionelle Störfälle*** *entstehen aus Gefahrenquellen, die sich jeder Erfahrung und Berechenbarkeit entziehen und daher auch außerhalb der durch § 5 Abs. 1 Nr. 1 BImSchG[71] gezogenen Grenzen liegen. Gegen das Eintreten solcher Störfälle sind keine zusätzlichen anlagenbezogenen Vorkehrungen zu treffen. Hierzu gehören z. B. Störfälle, die durch kriegerische oder bürgerkriegsähnliche Zustände und Ereignisse hervorgerufen werden können.*

Ferner werden im Bericht SFK-GS-26 die Störfallbeurteilungswerte und die GZM (größte zusammenhängende Menge) wie folgt definiert.

- **Störfallbeurteilungswerte** sind die für den jeweiligen Störfallstoff ermittelten Konzentrationen oder Dosen, bei deren Überschreitung eine ernste Gefahr ausgelöst werden kann. Als Störfallbeurteilungswerte für luftgetragene Störfallstoffe kommen derzeit insbesondere in Betracht: Konzentrations- oder Dosisleitwerte für die Notfallplanung im Störfall nach ERPG, AEGL oder IDLH sowie VCI-Störfallbeurteilungswerte.

- **Größte zusammenhängende Menge (GZM)** ist die Menge eines Störfallstoffs, die sich in einem zusammenhängenden Volumen innerhalb einer im bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlage abgesperrten oder absperrbaren Umschließung (Behälter, Rohrleitung) maximal

[70] Abschlussbericht SFK-GS-26 – Schadensbegrenzung bei Dennoch-Störfällen Empfehlung für Kriterien zur Abgrenzung von Dennoch-Störfällen und für Vorkehrungen zur Begrenzung ihrer Auswirkungen, verabschiedet im Oktober 1999

[71] BImSchG – Bundes-Immissionsschutzgesetz. Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge

befinden kann. Bei der Ermittlung der GZM nach der 3. StörfallVwV können aktive Absperreinrichtungen außerhalb des gestörten Anlageteils berücksichtigt werden.

In der Vollzugshilfe zur StörfallV des BMU von 2004[72] erfolgt ein Bezug auf die Systematik des Berichts SFK-GS-26 mit dem Verweis auf das Vorgehen bei der Ermittlung der GZM.

Bezifferte Störfallbeurteilungswerte und weitere Definitionen/Anforderungen finden sich im Leitfaden KAS-55[73]: „Mindestangaben im Sicherheitsbericht" als aktuelle Erkenntnisquelle wie folgt:

- **Vernünftigerweise auszuschließende Szenarien:** Das gleichzeitige Wirksamwerden zweier voneinander unabhängiger Gefahrenquellen oder das Versagen der erforderlichen Vorkehrungen nach § 3 Abs. 1 und 4 der Störfall-Verordnung kann zu einem vernünftigerweise auszuschließenden Szenario (Dennoch-Szenario) führen. Die Betrachtung von Dennoch-Szenarien kann die Grundlage für die Beurteilung der Wirksamkeit der gemäß § 3 Abs. 3 der Störfall-Verordnung vorzusehenden störfallauswirkungsbegrenzenden Maßnahmen sein. Anforderungen an störfallverhindernde Maßnahmen können daraus nicht abgeleitet werden.

Mögliche Dennoch-Szenarien können z. B. sein (keine abschließende Aufzählung):

- Stofffreisetzung durch Überfüllung eines Behälters beispielsweise infolge des Versagens der Füllstandüberwachung und redundanten Überfüllsicherung,
- Stofffreisetzungen infolge eines Abrisses einer Schlauchverbindung bei gleichzeitigem Versagen z. B. einer Abreißkupplung,
- Lagerbrand bei Versagen von mindestens zwei unabhängigen technischen Brandschutzmaßnahmen

Hinsichtlich der allgemeinen Betreiberpflichten nach §3 Störfall-Verordnung (12. BImSchV) gibt die Vollzugshilfe zur StörfallV die nachfolgenden Spezifizierungen (Umweltbundesamt, 2004). Demnach ist der Betreiber verpflichtet, „technische und organisatorische Maßnahmen zur Verhinderung von Störfällen sowie zur Begrenzung ihrer Auswirkungen" durchzuführen. Hierbei werden insbesondere auf (i) betriebliche sowie (ii) umgebungsbedingte Gefahrenquellen oder (iii) Eingriffe Unbefugter verwiesen. Des Weiteren wird nachfolgende Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zugrunde gelegt:

- ***Vernünftigerweise nicht auszuschließende Gefahrenquellen*** *können zu Störfällen führen, die grundsätzlich zu verhindern sind, indem Vorkehrungen nach § 3 Abs. 1 StörfallV getroffen werden.*
- ***Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen*** *können zu* ***Dennoch-Störfällen*** *führen, deren Eintreten zwar nicht zu verhindern ist, gegen deren Auswirkungen jedoch unabhängig von den* ***störfallverhindernden Vorkehrungen*** *nach § 3 Abs. 1 StörfallV zusätzliche* ***störfallauswirkungsbegrenzende Vorkehrungen*** *zu treffen sind (§ 3 Abs. 3 StörfallV). Das Versagen von Vorkehrungen nach § 3 Abs. 1 StörfallV stellt beispielsweise eine vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquelle dar, die zu einem Dennoch-Störfall führen kann.*

[72] Vollzugshilfe des BMU zur StörfallV (2004) Herausgeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Referat Öffentlichkeitsarbeit – 11055 Berlin

[73] Leitfaden KAS-55 – Mindestangaben im Sicherheitsbericht, 15. April 2021

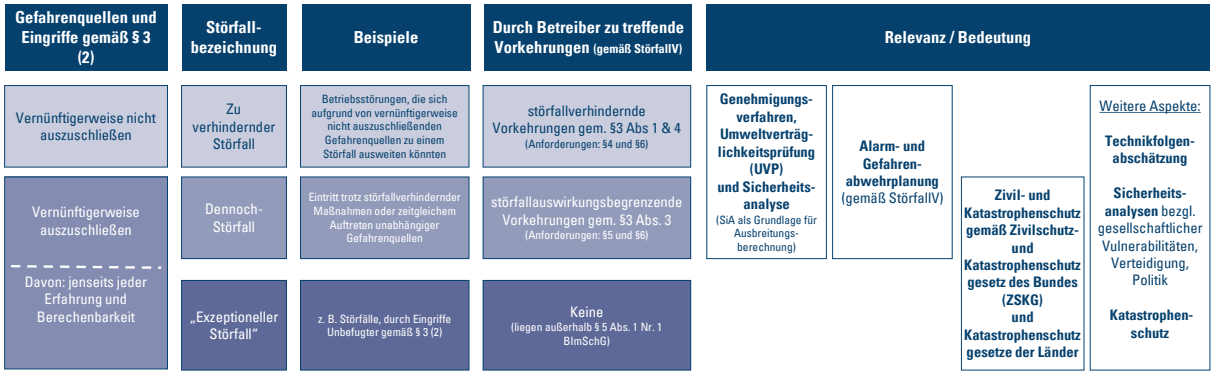
- ***Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen*** *können jedoch auch so unwahrscheinlich sein, dass sie* ***jenseits der Erfahrung und Berechenbarkeit liegen****. Gegen diese exzeptionellen Störfälle sind keine anlagenbezogenen Vorkehrungen zu treffen.*

Dabei folgt die gängige Praxis dem Grundsatz: „Je größer die mögliche Gefahr, desto mehr Aufwand ist nach dem Stand der Sicherheitstechnik erforderlich (Verhältnismäßigkeits-Grundsatz). In diese Betrachtung sind die vernünftigerweise auszuschließenden Gefahrenquellen nicht einzubeziehen." (aus Vollzugshilfe zur StörfallV) (Umweltbundesamt, 2004).

Die durch den Betreiber zu ergreifenden Maßnahmen umfassen damit sowohl störfallverhindernde Vorkehrungen nach § 3 Abs. 1 und 4 StörfallV als auch störfallauswirkungsbegrenzende Vorkehrungen (§ 3 Abs. 3 StörfallV).

Die beschriebene Nomenklatur ist auch in der folgenden Abbildung schematisch dargestellt.

Abbildung 30: Übersicht der Nomenklatur gemäß Störfall-Verordnung (StörfallV)



Quelle: Eigene Darstellung LBST, TÜV SÜD.

Im Kontext dieses Kapitels wird der Begriff „Abstand" zur Unterschreitung von Störfallbeurteilungswerten auf folgende Weise in abgestufter Form verwendet:

- Angemessener Sicherheitsabstand gemäß § 3 Absatz 5c BImSchG wird als der „ […] Abstand zwischen einem Betriebsbereich oder einer Anlage, die Betriebsbereich oder Bestandteil eines Betriebsbereichs ist, und einem benachbarten Schutzobjekt, der zur gebotenen Begrenzung der Auswirkungen auf das benachbarte Schutzobjekt […] beiträgt", bezeichnet. (sich aus vernünftigerweise auszuschließenden Szenarien ergebender Abstand)
- Achtungsabstand (In Anlehnung an den angemessenen Sicherheitsabstand, jedoch per Konvention festgelegt, z. B. Leitfaden KAS-18[74], Abstandsempfehlungen für die Bauleitplanung ohne Detailkenntnisse / ohne anlagenbezogene Berechnung)
- Reichweite (zur Abgrenzung vom angemessenen Sicherheitsabstand/Achtungsabstand verwendeter Begriff oder aber zur allgemeineren Beschreibung des Abstands ausgehend vom Freisetzungsort bis zur Unterschreitung des zugrunde gelegten (Störfall-) Beurteilungswerts.)

Im Kontext dieses Kapitels wird der Begriff „abdeckend" verwendet. Dieser bezieht sich auf die folgend untersuchten Szenarien und beschreibt

[74] Leitfaden KAS-18 Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung — Umsetzung § 50 BImSchG 3. überarbeitete Fassung, 29.01.2025

- die bei der systematischen Untersuchung des Modellterminals potenziell größten zu unterstellenden Leckagen, die an einem Anlagenteil/Segment auftreten können im Vergleich zu anderen Anlagenteilen/Segmenten. Größere Leckagen an einem Segment der Anlage können kleinere Leckagen an einem anderen Segment der Anlage hinsichtlich der sich ergebenden Reichweite mit abdecken. Die abgedeckten Segmente werden im Rahmen dieser Studie nicht erwähnt.

oder

- das Szenario mit der größten sich ergebenden Reichweite, die die Reichweite anderer Szenarien übersteigt und dadurch mit abdeckt.

5.1.3.2 Beschreibung Stand der Sicherheitstechnik (SdST) für Terminals

Erfahrungsgemäß häufig getroffene Vorkehrungen zur Einhaltung des Stands der Technik bzw. Sicherheitstechnik im Kontext eines Ammoniak-Terminals sind im Folgenden aufgeführt.

Störfallverhindernde Vorkehrungen:

- Hinsichtlich NH_3 und H_2 geeignete Werkstoff- und Dichtungswahl, geeignete Auslegung auf zu erwartende Drücke und (tiefe) Temperaturen
- Doppelwandige Ausführung von Tanks; Schutz gegen mechanische Beschädigung, Vermeidung von Rohrleitungs-Anschlüssen in der Flüssigphase
- Zuverlässige leittechnische Absicherungen im Wesentlichen gegen unzulässige Betriebszustände wie z. B. unzulässige Drücke, Temperaturen und Füllstände auf Basis einer systematischen Gefahrenanalyse, z. B. Hazop-Analyse
- Druckentlastungseinrichtungen, soweit gefahrlose Ableitung hierüber möglich ist
- Maßnahmen zum Explosionsschutz im Anlageninneren (i. W. Vermeidung gefährlicher explosionsfähiger Gemische) bzw. in der Umgebung (i. W. Zündquellenfreiheit/Dichtheit)
- Ergänzende Maßnahmen wie Mitarbeiterschulung, erstmalige und wiederkehrende Prüfungen, Kennzeichnung; Regelungen zum Sicherheitsmanagementsystem nach StörfallV

Störfallauswirkungsbegrenzende Vorkehrungen:

- Segmentierung von Rohrleitungsabschnitten mittels geeigneter (fernbedienbarer) Armaturen
- Umwallung zur Eindämmung der sich ausbildenden Lache bei flüssigen Leckagen
- Gaswarnanlagen/Not-Aus-Einrichtungen zur schnellen Unterbrechung von Stoffströmen
- Abriss-/Trennkupplungen bei Ver-/Entladeeinrichtungen zur Begrenzung austretender Stoffmengen infolge mechanischer Beschädigung
- Maßnahmen nach internem Alarm- und Gefahrenabwehrplan (z. B. Wasservorhänge, Einsatz der Feuerwehr)

Weitere Diskussionen hinsichtlich Tankdesign

Neben den genannten störfallverhindernden und störfallauswirkungsbegrenzenden Vorkehrungen ergeben sich mit Blick auf aktuelle Diskussionen auch neue Ansatzpunkte hinsichtlich der „besten verfügbaren Technologie“ („Best Available Technology“, BAT) für

beispielsweise das Tankdesign großskaliger Ammoniaktanks. So werden etwa in der aktuellen Revision (2022-2025[75]) der niederländischen PGS 12 weitere Aspekte für neue und größere Ammoniaktanks beschrieben (siehe hierzu auch Kapitel 2.3.2.2), die sich potenziell auf die Planung neuer Importterminals auswirken können (Langeveld, 2025).

5.1.3.3 Fazit zur Szenariendefinition und darüberhinausgehende Diskussion

Die zuvor beschriebenen Definitionen hinsichtlich der Betreiberpflichten zur Verhinderung bzw. Begrenzung der Auswirkungen zeigen, dass sich diese auf die beiden Gruppen der (i) zu verhindernden Störfälle, sowie der (ii) Dennoch-Störfälle beschränken. Folglich erscheint es im Rahmen dieser Studie sinnvoll und geboten, die Szenariendefinition für die nachfolgenden Emissionsbetrachtungen im Störfall auch auf Fälle dieser Gruppen zu beschränken, da diese maßgeblich für die Genehmigung der Anlage sowie die Standortwahl (Bauleitplanung) sein können.

Unabhängig hiervon zeigt die Definition zu „exzeptionellen Störfällen“, also jenen Störfällen, deren Auftreten sich jeglicher Erfahrung und Berechenbarkeit entziehen, dass durchaus weitere Szenarien hinsichtlich größerer Ammoniak-Emission denkbar sind. Diesbezüglich sind insbesondere kriegerische oder bürgerkriegsähnliche Zustände und Ereignisse zu nennen.

Eine im Jahr 2016 vom Bund veröffentlichte „Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz“, zur Freisetzung chemischer Stoffe zeigt die potenziellen Auswirkungen (siehe Textbox). (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BKK), 2016) Diese Risikoanalyse ist als fachliche Bestandsaufnahme zu verstehen und stellt die Basis für eine Gesamtbewertung dar, in die etwa die Risikoakzeptanz einer Gesellschaft einfließen kann. Als Teilszenario 3 liegt der Analyse auch ein Fall mit „Freisetzung einer größeren Menge einer toxischen Chemikalie aus einer chemischen Anlage“ zugrunde, welche so auch auf ein Ammoniak-Terminal angewendet werden kann.

Textbox: Risikoanalyse 2016 „Freisetzung chemischer Stoffe“
entnommen aus (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BKK), 2016)

Zur Verhinderung des Eintretens sog. „exzeptioneller Störfälle“, die bspw. durch kriegerische oder bürgerkriegsähnliche Zustände und Ereignisse hervorgerufen werden können, werden keine zusätzlichen Vorkehrungen gefordert. Dies gilt ebenso für die Begrenzung der Auswirkungen solcher „exzeptioneller Störfälle“. Insofern ist hier ausschließlich der Staat gefordert, im Ereignisfall die erforderlichen Maßnahmen zur Bewältigung und Eingrenzung der Folgen sicherzustellen. Nach Artikel 12 der Seveso-III-Richtlinie sind entsprechend für Störfallbetriebe der „oberen Klasse“ staatliche Notfallpläne zu erstellen und gemäß Artikel 17 nach „schweren Unfällen“ staatliche Maßnahmen zu ergreifen.

Es ist für die Ermittlung der akuten Betroffenheit nach einer Freisetzung von chemischen Gefahrstoffen jedoch unerheblich, ob sie unfallbedingt oder vorsätzlich herbeigeführt wurde, bzw. ob sie zu Friedenszeiten oder im Rahmen von Kriegshandlungen stattfindet.

Eine Freisetzung chemischer Gefahrstoffe, die vorsätzlich herbeigeführt wird, dürfte jedoch aufgrund der vorausgehenden Planungen (Wahl des Ortes der Freisetzung, Zeitpunkt sowie der Mittel zur Herbeiführung der Freisetzung) deutlich schwieriger zu bewältigen sein als ein unfallbedingtes Ereignis. Als Bespiel sei die Freisetzung einer toxischen Substanz aus einer chemischen Anlage genannt: Während die Freisetzung z. B. durch einen Störfall zumeist auf einen

[75] Die niederländische PGS 12:2025 Version 1.0 wurde im Dezember 2025 veröffentlicht: https://publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties/pgs12/.

Anlagenteil beschränkt ist (und auf einen solchen Störfall die Gefahrenabwehrmaßnahmen der zuständigen Behörden ausgelegt sind), können der gezielte Einsatz von effektiven Sprengmitteln oder die Vornahme von technischen Manipulationen durchaus mehrere Anlagen betreffen, da bauliche Maßnahmen zum Schutz von Anlagen und insbesondere Maßnahmen zur Härtung von Gefahrguttransporten gegen die Einwirkung großer gerichteter Kräfte im Regelfall nicht ergriffen werden. Bei einem gezielten Angriff sind daher ggf. Anzahl und Menge der freigesetzten Stoffe gegenüber einer unfallbedingten Freisetzung signifikant erhöht und dementsprechend auch die Folgen für Betroffene und Umwelt. In der Schadenswirkung noch um ein Vielfaches höher und von der Bewältigung her wesentlich anspruchsvoller wäre der Einsatz von für den militärischen Einsatz vorgesehenen und optimierten chemischen Kampfstoffen.

Eine entschlossene und mit ausreichendem Fachwissen ausgestattete terroristische Gruppierung dürfte durchaus in der Lage sein, das in Deutschland zu Genüge vorhandene Potenzial an chemischen Gefahrstoffen im Rahmen eines Anschlags für ihre Ziele zu nutzen.

Aufgrund dieser potenziell signifikanten Auswirkungen möglicher Unfälle infolge von Eingriffen Unbefugter auf chemische Industrieanlagen wie Ammoniak-Terminals, sollte dieser Sicherheitsaspekt Teil einer (gesellschaftlichen und politischen) Technologie-Risikobewertung sein. Die Vorfälle in Pančevo (Serbien) und Sumy (Ukraine) (siehe Kapitel 5.1.2) zeigen, dass der Austritt von Ammoniak infolge kriegerischer Auseinandersetzungen ein realistisches, wenn auch nicht häufiges Ereignis ist. Gerade in Zeiten geopolitischer Unsicherheiten kann eine Neubewertung der Risiken mit Blick auf Eingriffe Unbefugter auf die kritische Energieinfrastruktur in Europa gegebenenfalls sinnvoll sein.

Die möglichen Konsequenzen eines Unfalls oder Terroranschlags auf einen Ammoniak-Tanker bzw. Tank im Hafen von Haifa (Israel) wurden in einem Bericht zahlreicher Wissenschaftler zusammengestellt (Keinan, 2017). Die durch ein solches Ereignis entstehende giftige Wolke hätte demnach das Potenzial, das gesamte Stadtgebiet von Haifa zu betreffen. Aufgrund der Bedrohungslage sowie unzureichender Wartungsintervalle veranlasste ein lokales Gericht im Jahr 2017 schließlich die Leerung eines bestehenden 12.000 t Ammoniaktanks.

Die meisten industriellen Sicherheitskonzepte, auch in Deutschland, konzentrieren sich, wie beschrieben, vor allem auf Unfälle oder Anlagenausfälle und nicht auf vorsätzliche Terroranschläge, die aufgrund von Relevanz und Kostenfaktoren nur im Rahmen von gesetzlichen Anforderungen (z. B. § 41 Atomgesetz – Integriertes Sicherungs- und Schutzkonzept - Schutz gegen sonstige Einwirkungen Dritter und Artikel 12 (2) der Richtlinie (EU) 2022/2557) untersucht werden. Angesichts der potenziell erheblichen Risiken für die Umwelt und die Sicherheit der Menschen ist eine gründlichere Berücksichtigung dieser Risiken zu diskutieren, um eine solide Sicherheits- sowie Alarm- und Gefahrenabwehrplanung im Rahmen des Ausbaus der Wasserstoff- und Ammoniakinfrastruktur in Deutschland zu gewährleisten.

5.2 Szenariendefinition und Methodik

Vorbemerkungen und rechtliche Einordnung

Die Störfall-Verordnung[76] ist auf die zu betrachtenden Modellterminals anzuwenden. Grundlage für die Anwendung der StörfallV ist das Vorhandensein von gefährlichen Stoffen, die in Anhang I der 12. BImSchV mit ihren jeweiligen Mengenschwellen aufgeführt sind. Es sind alle am Standort vorhandenen Stoffe nach Anhang I zu betrachten. Wird die untere bzw. die obere Mengenschwelle in einer Gefahrenkategorie oder für einen Stoff überschritten, erfolgt die Einstufung des Standorts in einen Betriebsbereich unterer Klasse bzw. oberer Klasse. Die obere Mengenschwelle gemäß Ahg. 1 StörfallV Spalte 5 für Stoff Nr. 2.5 „Ammoniak, wasserfrei“ (200.000 kg) ist jeweils am Modellterminal deutlich überschritten. Die Grundpflichten und erweiterten Pflichten sind somit zu erfüllen, darunter z. B. die Erstellung eines Sicherheitsberichts mit systematischen Gefahrenanalysen und eines betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplans (AGAP).

Die Mengenschwellen Spalte 4 / Spalte 5 (5.000 kg/50.000 kg) nach StörfallV für Wasserstoff als Stoff Nr. 2.44 gemäß Ahg. 1 StörfallV im Bereich des NH_3-Crackers werden bei den betrachteten Modellterminals unterschritten.

Aus der Anwendung der StörfallV ergeben sich folgende Grundanforderungen für die Modellterminals als Betriebsbereiche im Sinne der StörfallV/des BImSchG:

- Die Beschaffenheit und der Betrieb der Anlagen des Betriebsbereichs müssen dem Stand der Technik/Sicherheitstechnik[77] entsprechen.
- Am jeweiligen Modellterminal liegen sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) aufgrund ihres Stoffinhalts gemäß den Mengenrichtwerten des Berichts KAS-1[78] vor. Aufgrund der Überschreitung des Mengenrichtwertes 1.000 kg für NH_3 wasserfrei (als hold-up bzw. Mengenstrom in 10 Minuten) sind insbesondere Schiffsentladeeinrichtungen, große NH_3-Leitungen einschließlich Pumpen, NH_3-Lagertanks einschließlich Pumpen, die NH_3-Crackeranlage und die Füllanlagen für NH_3-Transportbehälter (Eisenbahnkesselwägen und Container) SRAs aufgrund des Stoffinhalts.
- Hinsichtlich Wasserstoff ist auch der Mengenrichtwert nach KAS-1 (100 kg H_2) für wasserstoffführende Anlagenteile im Bereich des Crackers überschritten.
- Für SRAs müssen aufgrund des Stoffinhalts systematische Gefahrenanalysen durchgeführt werden und im Sicherheitsbericht dokumentiert sein.
- Gemäß Anhang II (Mindestangaben im Sicherheitsbericht) der StörfallV ist unter II. 4. eine Beschreibung der Bereiche, die von einem Störfall betroffen werden könnten, gefordert.
- Hierzu können rechnerische Störfallauswirkungsbetrachtungen durchgeführt werden.

[76] Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes

[77] Stand der Sicherheitstechnik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Verhinderung von Störfällen oder zur Begrenzung ihrer Auswirkungen gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Stands der Sicherheitstechnik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind.

[78] Bericht KAS-1 “Sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches und Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA)“ 05.10.2017

- Zur Abgrenzung von verschiedenen „Arten/Kategorien“ von Störfällen bzw. von den in dieser Studie zu betrachtenden Dennoch-Störfällen sind Definitionen aus dem Leitfaden SFK-GS-26 (1999) zu entnehmen, siehe weiter oben unter Kapitel 5.1.3.1.

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden die Szenarien mit dem größten realistischen Gefahrenpotenzial aus Kapitel 5.1.3.3, die einen Störfall nach § 2 12. BImSchV zur Folge haben können, für die Freisetzung von am Modellterminal 1 vorhandenen Stoffen betrachtet:

- Dennoch-Szenario mit einer Stofffreisetzung in Anlehnung an den Leitfaden KAS-18 (Konvention) (Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$), und Ermittlung des angemessenen Sicherheitsabstands bzw. Angabe des Achtungsabstands (Szenario für die Bauleitplanung), sowie

- Dennoch-Szenario mit einer Freisetzung der GZM in Anlehnung an SFK-GS-26 bzw. SFK-GS-45 auf Basis eines noch annehmbaren, jedoch konstruierten Szenarios, das unterstellt wird, und Ermittlung der sich daraus ergebenden Reichweiten (Szenario für die Katastrophenschutzplanung - Dennoch-Szenario$_{KatS}$)

Die sich ergebenden Reichweiten erstrecken sich vom Freisetzungsort bis zur Unterschreitung der zugrunde gelegten Beurteilungswerte.

Zu beachten ist hier, dass es sich bei einem im Rahmen dieser Studie betrachteten Szenario „Freisetzung der GZM“ um eine Abstufung des Dennoch-Szenarios handelt, bei der eine größere Stoffmenge als beim Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$ austritt, die jedoch klar abgegrenzt von einem exzeptionellen Störfall zu sehen ist. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines solchen Dennoch-Szenarios$_{KatS}$ wird im Vergleich zu einem Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, generell als signifikant geringer eingestuft.

Zu Beurteilungswerten finden sich im Leitfaden KAS-55 folgende Anforderungen:

- (Danach) sind für die Beurteilung störfallbedingter Freisetzungen AEGL-Werte bevorzugt heranzuziehen, wenn sie für einen zu betrachtenden Stoff festgelegt worden sind. Für die Beurteilung einer ernsten Gefahr soll der PAC-2-Wert (Protective Action Criteria) herangezogen werden.

- Für die Beurteilung der Personenschäden infolge der Druckwirkung im Falle einer Gaswolkenexplosion werden als Beurteilungswert ein Überdruck von 0,05 bar (Anm. in Abweichung von KAS-18: 0,1 bar), für die Beurteilung infolge der Wärmestrahlung des Brands der Wert von 1,6 kW/m^2 empfohlen.

5.2.1 Exemplarische Ermittlung angemessener Sicherheitsabstände im Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$[79] für das Modellterminal 1

Achtungsabstände für NH_3/H_2 ohne Detailkenntnisse

Es erfolgt zunächst der Hinweis auf KAS-18, Kap. 3.1 „Abstandsempfehlungen für Neuplanungen von Flächen für Betriebsbereiche ohne Detailkenntnisse („Grüne Wiese“) sowie deren Erweiterung“.

[79] Leitfaden KAS-18 Empfehlungen für Abstände zwischen Betriebsbereichen nach der Störfall-Verordnung und schutzbedürftigen Gebieten im Rahmen der Bauleitplanung — Umsetzung § 50 BImSchG 3. überarbeitete Fassung, 29.01.2025

Der Achtungsabstand[80] für Ammoniak fällt darin in die Abstandsklasse II und beträgt 500 m. Die Eingruppierung erfolgt anhand einer dokumentierten Berechnung in KAS-18, die auf Basis des ERPG-2-Wertes als Beurteilungswert für NH_3 rechnerisch einen Abstand von 398 m ergibt.

Wasserstoff als Stoff, bei dem nur Brand-/Explosionswirkungen zu betrachten sind, lässt sich der niedrigsten Abstandsklasse I zuordnen und der Achtungsabstand beträgt 200 m.

Annahmen zur Ermittlung der angemessenen Sicherheitsabstände

Da für die Modellterminals Detailkenntnisse über deren Auslegung/Ausführung bestehen bzw. aus der Literatur herangezogen wurden, können angemessene Sicherheitsabstände mit Detailkenntnissen gemäß den Empfehlungen in Kapitel 3.2 des KAS-18 rechnerisch unter Berücksichtigung des Beurteilungswerts ermittelt werden. Zum verwendeten Berechnungsmodell und Programmpaket siehe Kapitel 5.3.

Entsprechend lassen sich folgende Berechnungsgrundlagen aus der Konvention (Leitfaden KAS-18) ableiten:

- Leckfläche 490 mm^2
- scharfkantiges Leck (Ausflussziffer: 0,62)
- Umgebungstemperatur 20 °C
- mittlere Wetterlage nach VDI-Richtlinie 3783 mit einer indifferenten Temperaturschichtung und ohne Betrachtung von Inversion.

Es ist für den Betriebsbereich die häufigste Windgeschwindigkeit für eine indifferente Temperaturschichtung zu ermitteln/verwenden.

Weiterhin lassen sich aus KAS-18 folgende Randbedingungen für die Berechnung ableiten:

- Freisetzungsdauer 10 Minuten/Berechnungsdauer 30 Minuten
- Kein Spray/keine Tröpfchen bei Verdunstung bzw. Verdampfung
- Sonneneinstrahlung wird mit 1 kW/m^2 berücksichtigt.

Als Beurteilungswert für die toxische Wirkung von NH_3 wird, abweichend vom Leitfaden KAS-18, aber unter Berücksichtigung des Leitfadens KAS-55 per Konvention bzw. SFK-GS-45 der AEGL-2-Wert für 60 Minuten-Zeitintervalle herangezogen (AEGL = Acute Exposure Guideline Level).[81] Er beträgt für NH_3 160 ppm (60 min). Im Rahmen dieser Studie wurde der AEGL-2-Wert dem im Leitfaden KAS-18 empfohlenen ERPG-2-Wert (150 ppm) als (Störfall-) Beurteilungswert vorgezogen. Diese Entscheidung basiert auf der fachlichen Einschätzung, dass der AEGL-2-Wert die realen Expositionsbedingungen bei einem Stoffaustritt differenzierter und sachgerechter abbildet. Insbesondere berücksichtigt der AEGL-2-Wert im Gegensatz zum ERPG-2-Wert explizit empfindliche Bevölkerungsgruppen wie Kinder, ältere Menschen sowie Personen mit (Vor)-erkrankungen der Atemwege.

Die AEGL-Werte sind hinsichtlich der Wirkungen wie folgt abgestuft:

[80] Hinweis: Der Achtungsabstand wurde in der Konvention mit dem (konservativeren) ERPG-Wert angegeben. Der AEGL-Wert wird für Berechnungen mit Detailkenntnissen verwendet.

[81] Siehe diverse Quellen, etwa https://www.umweltbundesamt.de/aegl-stoerfallbeurteilungswerte-definition-methodik, https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/anlagensicherheit/aegl-stoerfallbeurteilungswerte, https://www.epa.gov/aegl, https://www.epa.gov/aegl/ammonia-results-aegl-program, https://www.energy.gov/ehss/protective-action-criteria-pac-aegls-erpgs-teels.

- AEGL-1: Schwelle zum spürbaren Unwohlsein;
- AEGL-2: Schwelle zu schwerwiegenden, lang andauernden oder fluchtbehindernden Wirkungen;
- AEGL-3: Schwelle zur tödlichen Wirkung.

Die Betrachtung und Benennung dieser Dennoch-Szenarien erfolgt aufgrund der von KAS-18 abweichenden Bewertung mittels AEGL-2-Wert statt des ERPG-2 Werts, in Anlehnung an den Leitfaden KAS-18.

Um die Lage der Modellterminals in Küstennähe (Nord-/Ostseeküste) bzw. im Landesinneren zu berücksichtigen, erfolgen die Berechnungen für 2 Windgeschwindigkeiten: 3 m/s (typisch für eine Inlandslage) und 5 m/s (typisch für eine Küstenlage).

Beurteilungswerte für entzündbaren Wasserstoff gehen aus dem einschlägigen Bericht KAS-63[82] wie folgt hervor:

“Der angemessene Sicherheitsabstand ergibt sich 1. bei einem Explosionsüberdruck von 50 mbar, da ein Explosionsüberdruck von 50 mbar bei Schutzobjekten nach § 3 Abs. 5 d BImSchG nicht überschritten werden soll oder 2. bei einer Bestrahlungsstärke von 1,6 kW/m2.”

Gemäß KAS-63 ergibt sich der angemessene Sicherheitsabstand für Anlageteile mit gasförmigem Wasserstoff im Bereich der NH3-Crackeranlage.

Der Betriebsüberdruck des Wasserstoffs bleibt im Bereich Cracker unter 100 bar. Die Leckfläche ist bei dem Modellterminal mit 490 mm² anzusetzen, die Wirkung durch Gasexplosion ist abstandsbestimmend.

Hinweis: Ammoniakgas ist grundsätzlich auch ein entzündbares Gas, das allerdings im Freien im Vergleich zu typischen brennbaren Gasen deutlich zündunwilliger ist (hohe Mindestzündenergie, enge Konzentrationsbereiche der Entzündbarkeit). Daher erfolgen im Rahmen dieser Studie keine weiteren Betrachtungen zu Bränden/Explosionen infolge Freisetzung von Ammoniak. Des Weiteren ist zu beachten, dass derzeitige Berechnungsmodelle für die Freisetzung von tiefkaltem Ammoniak (bzw. tiefkalt verflüssigten Gasen allgemein) nicht validiert sind und die Ergebnisse daher als Erwartungswerte mit erheblichen Streuungen interpretiert werden sollen und lediglich Einsichten und Größenordnungen vermitteln sollen. Die zur Berechnung verwendeten Modelle stellen eine mögliche Herangehensweise dar.

5.2.2 Exemplarische Ermittlung von Reichweiten auf Basis von Dennoch-Szenarien mit der Freisetzung der GZM (Dennoch-Szenario$_{KatS}$) im Rahmen der Katastrophenschutzplanung

Definition und Vorgehensweise: Dennoch-Szenario$_{KatS}$

Ein Dennoch-Szenario$_{KatS}$ muss durch einen Sachverständigenkreis mit detaillierter Anlagenkenntnis immer anlagen- bzw. standortspezifisch konstruiert und dadurch definiert werden. Für die Definition eines solchen Szenarios werden entweder bereits (anderorts) ereignete Vorfälle herangezogen, oder es werden gänzlich neue, auf Grundlage der vorliegenden Anlagenkonstellation und -bauweise denkbare Szenarien konstruiert.

[82] Empfehlung KAS-63 - Ermittlung des angemessenen Sicherheitsabstands für Anlagen mit gasförmigem Wasserstoff, Kommission für Anlagensicherheit (KAS), im November 2023 von der KAS verabschiedet

Hierbei ist die Vorgehensweise zur Definition des unwahrscheinlichen Eintritts des Dennoch-Szenarios$_{KatS}$ wie folgt:

- Anlagenteile mit großem Stoffpotenzial werden einzeln identifiziert unter Berücksichtigung von physischen/mechanischen Grenzen innerhalb der Anlage wie z. B. Absperreinrichtungen. Hieraus ergeben sich „Segmente" der Anlage, die für ein solches Szenario in Frage kommen. Im weiteren Verlauf kann bei der Auswertung der Ergebnisse festgelegt werden, dass die Segmente durch zusätzliche Absperreinrichtungen verkleinert werden, um das Gefahrenpotenzial zu reduzieren.
- Das Versagen aller technischen (verhindernden) Maßnahmen wird unterstellt.
- Das Versagen aller organisatorischen (verhindernden) Maßnahmen wird unterstellt.
- Das Versagen der Anlage bzw. des betrachteten Anlagenteils/Segments wird so konstruiert, dass nahezu das gesamte sich darin befindliche Stoffpotenzial innerhalb von 10 Minuten (analog zur Freisetzungsdauer im Leitfaden KAS-18) freigesetzt wird, als Folge von z. B. grob fahrlässigen Fehlbedienungen/Fehlhandlungen oder Materialversagen.

Die sich ergebenden Szenarien werden alle unabhängig voneinander betrachtet. Die Festlegung eines „abdeckenden" Szenarios als Dennoch-Szenario$_{KatS}$ ist im Anschluss denkbar. Das abdeckende Szenario ergibt im Vergleich zu den anderen Szenarien die größte Reichweite und schließt die Reichweiten der anderen Szenarien mit ein.

Festlegung der Betrachtungsgrenzen der im Rahmen dieser Studie betrachteten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$

Untere Grenze: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$ bzw. siehe Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung (2004) (exklusive), wurde in Kapitel 5.2.1 betrachtet.

Obere Grenze: Tankversagen (exklusive), Begründung folgt im weiteren Text.

Das Tankversagen (in großen Tanklagern wie auch im Modellterminal) wird im Rahmen dieser Studie als das schwerwiegendste denkbare Szenario angesehen. Technisch bedingte Ursachen können durch sorgfältige Planung, Erfahrungswerte und die Einhaltung des Stands der Technik mit hoher Zuverlässigkeit vermieden werden. Auch menschliche Fehler – ob grobe Fahrlässigkeit oder Vorsatz – lassen sich durch geeignete organisatorische Maßnahmen weitgehend beherrschen. Dennoch bleiben Ursachen denkbar, die bislang unbekannt oder als unvorhersehbar gelten. Die Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. das Wirksamwerden solcher Ursachen lässt sich dann nur noch über Freiheitsgrade differenzieren – also über die Anzahl und Art möglicher Einwirkungen auf eine Anlage oder deren Segmente. Diese Freiheitsgrade werden durch technische und organisatorische Maßnahmen für vorhersehbare Szenarien kontrolliert eingeschränkt. Darüber hinaus ist von unvorhersehbaren Szenarien oder ferner exzeptionellen Störfällen die Rede.

Im Folgenden wird das Dennoch-Szenario „Tankversagen" im Hinblick auf vergangene Vorfälle, „Eingriffe Unbefugter" und Fehlhandlungen betrachtet und dessen Relevanz bzw. zielführende Verwendung für diese Studie bewertet.

Es sind grundsätzlich bei einer störfallbedingten Freisetzung eines gesamten Tankinhalts hohe Schadensreichweiten durch die akut toxische/umweltgefährdende Wirkung von NH_3 zu erwarten (mehrere km, ggf. > 10 km rechnerisch auch für mittlere Ausbreitungsbedingungen).

Vergangene Vorfälle, die als Dennoch-Szenario auch für das Modellterminal möglicherweise in Frage kommen könnten, insbesondere schwerwiegende wie z. B. Tankversagen in Jonova,

Litauen (1989), Rostock, Germany (2005), Pardis, Iran (2011) und Chittagong, Bangladesh (2016) (vgl. Kapitel 5.1), werden aufgrund der zum jeweiligen Vorfall dokumentierten Ursache nur als Erkenntnisquelle zur Einschätzung der Größenordnung sich ergebender Reichweiten herangezogen, nicht jedoch als Grundlage für Berechnungen für das Modellterminal in dieser Studie. Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass der Stand der Technik bzw. Stand der Sicherheitstechnik umgesetzt wird.

Eine weitere mögliche Ursache für ein Tankversagen sind „Eingriffe Unbefugter", die in zerstörerischer Absicht oder mutwillig, also vorsätzlich handeln. Maßnahmen gemäß Abschnitten 4 und 7 des Leitfadens KAS-51[83] können solche Eingriffe bis zu einem gewissen Grad verhindern. Szenarien darüber hinaus, wie terroristische Angriffe oder kriegsähnliche Zustände werden aufgrund ihrer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit als exzeptionelle Störfälle eingestuft und in dieser Studie nicht weiter betrachtet.

Ein Tankversagen infolge einer Fehlhandlung wird im Rahmen dieser Studie nicht unterstellt, da Tätigkeiten, die ein Tankversagen zur Folge haben könnten, üblicherweise nicht ohne zusätzliche technische oder organisatorische Maßnahmen durchgeführt werden dürfen. Diese müssen als Ergebnis aus einer durchzuführenden Gefährdungsbeurteilung hervorgehen.

Je mehr Freiheitsgrade eine Anlage oder ein Anlagenteil/Anlagensegment besitzt, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit von einem unvorhergesehenen Ereignis betroffen zu sein. Ein Beispiel für einen Freiheitsgrad stellt die mechanische Belastung der Schiffsentladeleitung infolge des Wellengangs dar, während das Tankschiff zur Entladung angeschlossen ist. Ein unvorhersehbares Szenario wäre in diesem Fall der Abriss dieser Leitung durch einen plötzlichen unerwartet hohen Wellengang aus normalerweise nicht zu unterstellender Ursache. Ortsfest betriebene Tanks besitzen im Allgemeinen verhältnismäßig wenige Freiheitsgrade. Für diese Studie wird daher unterstellt, dass unvorhersehbare Ereignisse bei ortsfesten Tanks nicht auftreten.

Die Freisetzung eines gesamten Tankinhalts Ammoniak im Modellterminal wird im Rahmen dieser Studie nicht betrachtet. Gründe hierfür sind, dass

1. die dokumentierte Ursache bereits ereigneter Vorfälle an Anlagen, aufgrund der vom Modellterminal verschiedenen Anlagenkonstellation nicht als Ursache für ein Tankversagen beim Modellterminal in Frage kommen kann, da z. B.
   a. bei dem hier betrachteten Modellterminal keine NH_3-Produktionsanlage mit komplexeren Stoffströmen und hierdurch zusätzlich möglichen Störungen vorliegt,
   b. das Verfahren „Kaltfahren eines Tanks" nicht mehr angewandt wird
2. eine Tankausführung nach dem Stand der Technik (z. B. gemäß PGS 12) für die Planung und den späteren Betrieb unterstellt wird,
3. umfangreiche geeignete technische Maßnahmen, ergänzt um weitere entsprechende organisatorische Maßnahmen für Tätigkeiten, unterstellt werden,
4. ausreichende, geeignete und wirksame Maßnahmen gegen Eingriffe Unbefugter, die in zerstörerischer Absicht auf die Anlage wirken oder mutwillig handeln, vorhanden sind,
5. Exzeptionelle Störfälle nicht im Fokus dieser Studie liegen,
6. unvorhersehbare Ereignisse, mit Hinblick auf Freiheitsgrade ortsfest betriebener Tanks, nicht unterstellt werden.

Die Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ in diesem Bericht werden folglich anlagenspezifisch für das Modellterminal anhand oben beschriebener Vorgehensweise definiert.

[83] Leitfaden KAS-51 – Maßnahmen gegen Eingriffe Unbefugter 14. November 2019

Es gelten folgende Randbedingungen für die untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$:

- Ein solches Dennoch-Szenario wird isoliert und unabhängig von anderen Dennoch-Szenarien betrachtet, da das gleichzeitige unabhängige Auftreten von zwei Dennoch-Szenarien in jeweils unterschiedlichen Anlagenteilen aufgrund der äußerst niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeit nicht zu unterstellen ist.
- Dennoch-Szenarien werden nicht als Folge von Domino-Effekten (i.S.d. § 15 der 12. BImSchV) betrachtet, da keine Kenntnis über benachbarte betriebsfremde Betriebe oder Betriebsbereiche besteht und deren Vorhandensein nicht unterstellt wird.
- Dennoch-Szenarien werden nicht als Folge von (internen) Wechselwirkungen zwischen Anlagen innerhalb des Betriebsbereichs betrachtet, da
  - mindestens die Erfüllung der Grundpflichten in §§ 3-8 der 12. BImSchV unterstellt wird,
  - Dennoch-Szenarien, die ausreichend Potenzial hätten ein weiteres Dennoch-Szenario auszulösen (z. B. Wirkung beider über die Betriebsgrenze hinaus), ohnehin separat betrachtet werden,
  - Szenarien mit begrenzter Wirkung (nicht über Betriebsgrenze hinaus), die ein Dennoch-Szenario$_{KatS}$ auslösen können, ohnehin durch dieses mit abgedeckt sind,
  - die konkrete Ursache eines konstruierten Dennoch-Szenarios zweitrangig ist.

Rechnerisch untersuchte Dennoch-Szenarien$_{KatS}$

Bei der Analyse des Modellterminals zeigt sich, dass die im Rahmen eines Dennoch-Szenarios$_{KatS}$ austretende GZM durch Absperreinrichtungen, wie z. B. Absperrarmaturen, Schnellschlussventile oder Abreißkupplungen, auf das betroffene Segment beschränkt werden kann. An dieser Stelle der Hinweis, dass eine weitere Segmentierung durch z. B. Einführung weiterer Absperreinrichtungen, Dampfsperren oder Parallelführung von Leitungen ist prinzipiell denkbar, muss jedoch verhältnismäßig sein, da hierdurch immer Freiheitsgrade hinzukommen.

Auf Basis der PGS 12, sowie der Modellterminalbeschreibungen in Kapitel 2 als Erkenntnisquellen wurden aus der gesamten Anlage die Segmente mit den größten GZM durch den Sachverständigenkreis bestimmt und im Rahmen des Dennoch-Szenarios untersucht. Die entsprechenden Segmente mit den sechs größten GZM sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 40: Angenommene größte zusammenhängende Menge (GZM) für Modellterminal 1

Anlagenbereich	Stoff, Phasenzustand	GZM (t)	Ermittlung GZM[84]
Entladeleitung vom Schiff zum Tank	Ammoniak flüssig	29,0	DN 600, 150 m Segmentlänge
Nach Einsatzpumpe Cracker	Ammoniak flüssig	1,09	DN 200, 50 m Segmentlänge
Eintritt Crackrohre	Ammoniak + H_2 + N_2 gasförmig	0,08	DN 450, 50 m Segmentlänge

[84] Rohrnennweiten basieren auf typischen Strömungsgeschwindigkeiten (1,7 m/s für Flüssigkeiten, 20 m/s für Gase) und Volumenströmen entsprechend der Terminalkapazität.
Segmentlängen gemäß Angaben aus der Darstellung des Stands der Technik in der PGS 12 (PGS, 2025),.Hierbei ist anzumerken, dass diese verstärkte Sicherheitsanforderungen in der PGS 12 zu geringeren potenziellen NH_3-Freisetzungemengen führen.

Anlagenbereich	Stoff, Phasenzustand	GZM (t)	Ermittlung GZM[84]
Austritt Crackrohre	H_2 + N_2 + Ammoniak gasförmig	0,08	DN 450, 50 m Segmentlänge
Eintritt PSA*	H_2 + N_2 gasförmig	0,08	DN 300, 50 m Segmentlänge
Austritt PSA* zur Anlagengrenze	H_2 gasförmig	0,33	DN 300, 200 m Segmentlänge

*Druckwechsel-Adsorption (DWA oder PSA – Pressure Swing Adsorption)

5.2.3 Darstellung der untersuchten Szenarien

Angemessene Sicherheitsabstände im Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$

Es werden abdeckende Leckagen an folgenden Anlagenbereichen untersucht:

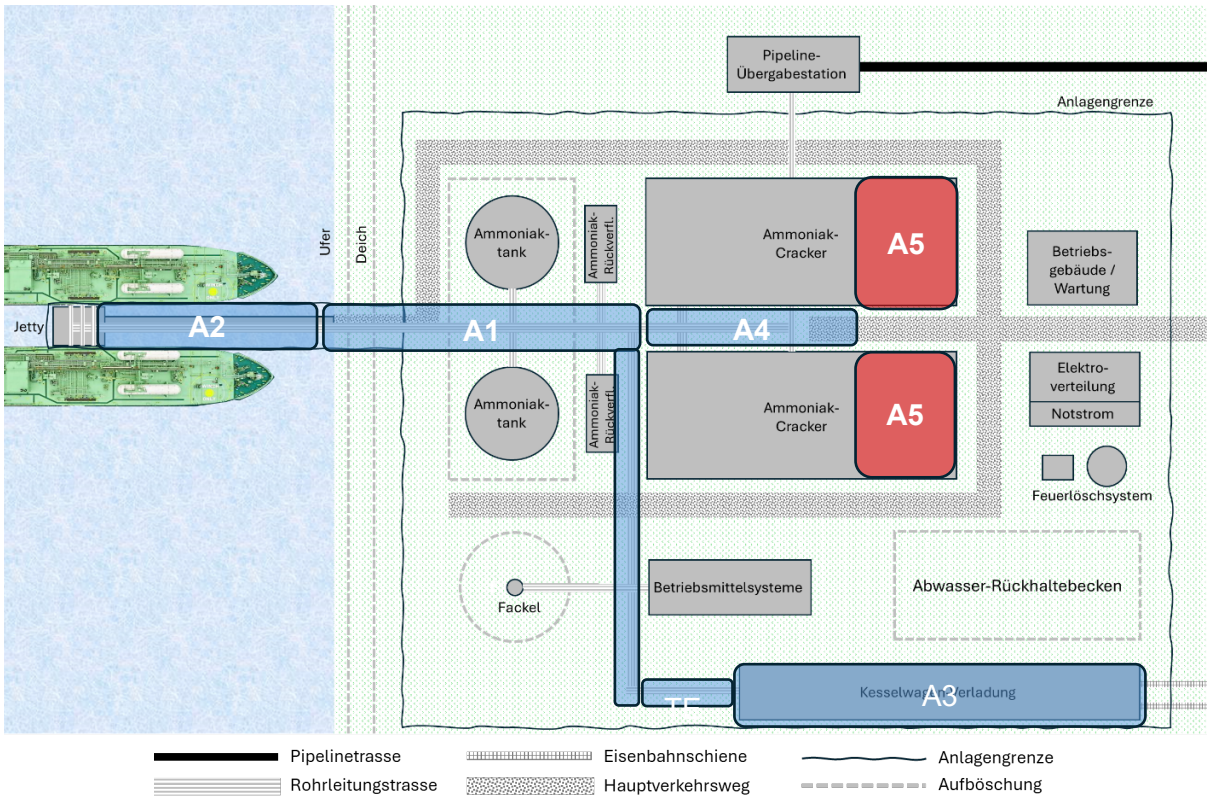
Tabelle 41: Untersuchte Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2)

Szenario	Beschreibung (Stoffinhalt)
A1a) /b)	Leitung 5 bar Schiff - Tank über Land (NH_3)
A2a) /b)	Leitung 5 bar Schiff - Tank über Wasser (NH_3)
A3a) /b)	Füllleitung Tank zu Transportbehälter ohne Druckausgleich 20 bar (NH_3)
A4a) /b)	Leitung zum Cracker 35 bar (NH_3)
A5	Wasserstoffleckage Cracker nach KAS-63 max. Druck/Nennweite (H_2)

Szenarien a) Berechnung mit 3 m/s Windgeschwindigkeit und Szenarien b) mit 5 m/s.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Zuordnung der untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ zu den einzelnen Anlagenteilen bzw. Segmenten, in die die Anlage unterteilt wurde.

Abbildung 31: Zuordnung der untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ zu den einzelnen Anlagenbestandteilen.



Quelle: Eigene Darstellung

Abstände auf Basis von Dennoch-Szenarien$_{KatS}$

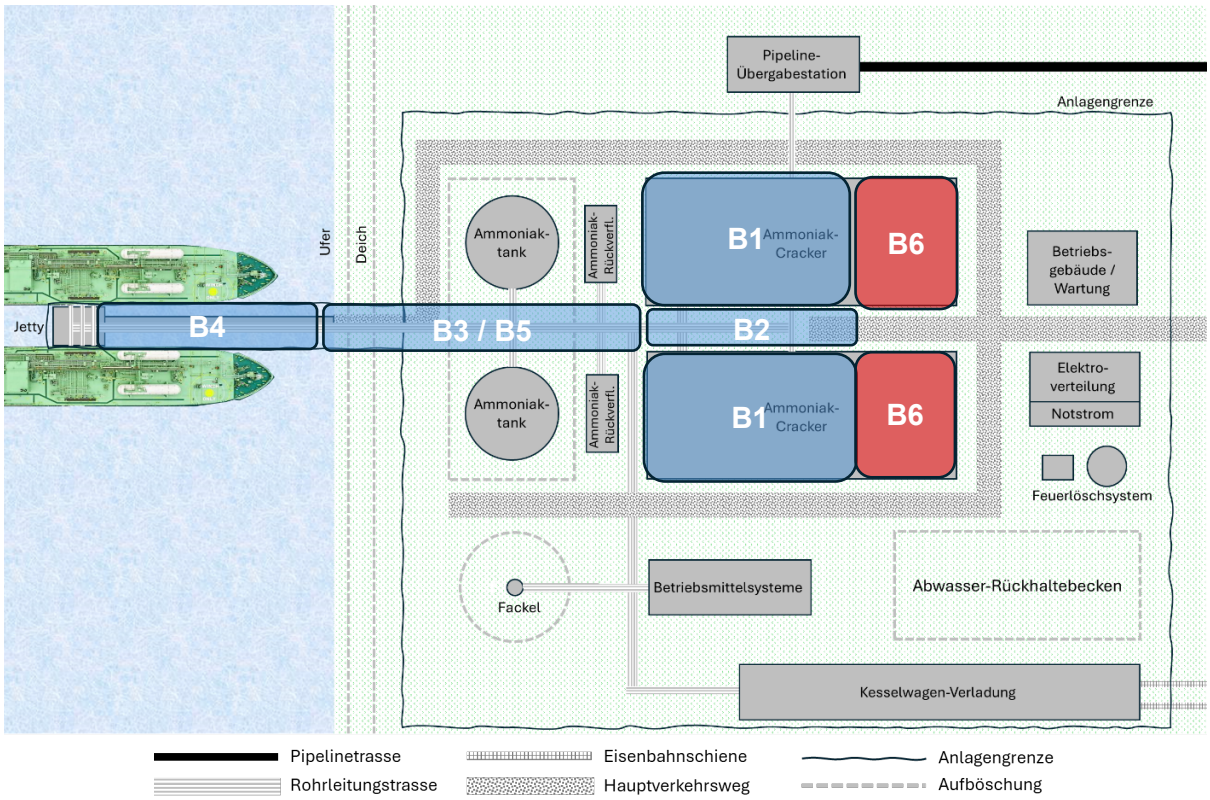
Unter Berücksichtigung von schadensbegrenzenden Maßnahmen (durch Maßnahmen reduzierte GZM tritt aus) sowie 30 Minuten Berechnungsdauer werden abdeckende Leckagen an folgenden Anlagenbereichen untersucht:

Tabelle 42: Untersuchte Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2)

Szenario	Beschreibung (Stoffinhalt)
B1a)/b)	NH_3-Heißgasleitung Cracker 33 bar/600 °C Freistrahl 45 ° mit thermischer Überhöhung 82 kg GZM DN 400 (NH_3)
B2a)/b)	DN200 flüssig-NH_3-Leitung (35 bar) zu Cracker GZM 1,089 t bodennah (NH_3)
B3a)/b)	DN600 flüssig-NH_3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Land (NH_3)
B4a)/b)	DN600 flüssig-NH_3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Wasser (NH_3)
B5a)/b)	DN600 flüssig-NH_3-Leitung (5 bar) GZM 29 t mit Lachenbegrenzung z. B. 1500 m^2 über Land (NH_3)
B6	Wasserstoffleckage Brand/Explosion Cracker DN300 GZM 327 kg (H_2)

Szenarien a) Berechnung mit 3 m/s Windgeschwindigkeit und Szenarien b) mit 5 m/s.

Abbildung 32: Zuordnung der untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ zu den einzelnen Anlagenbestandteilen.



Quelle: Eigene Darstellung

5.3 Ereignis- / Störfallbetrachtung

Für die Berechnungen und deren Dokumentation wird das in Deutschland auch behördlich akzeptierte Programmpaket „ProNuSs“ (Version 9.49.2)[85] verwendet, für das langjährige Erfahrungen vorliegen und ein fachlicher Austausch mit den Programmentwicklern etabliert ist.

Hierin ist auch die derzeit geltende Ausbreitungsrichtlinie VDI 3783 Blatt 1[86] (Gauß-Wolken-Modell) und VDI 3783 Blatt 2[87] (Schwergasausbreitung) für störfallbedingte Freisetzungen mit implementiert. Die Freisetzung des Ammoniaks (unter Druck oder als Flüssigkeit) führt nach (Gant, Pearson, & Sullivan, 2024) teilweise zur Bildung eines Aerosols mit wahrscheinlichem Schwergas-Verhalten. Weitere Freisetzungs- und Ausbreitungsversuche, insbesondere im Zusammenspiel mit Wasser an küstennahen Standorten, werden jedoch empfohlen. Die im Programmpaket mit integrierte Prüfung auf Schwergasverhalten im Sinne der Richtlinie ergibt bei den betrachteten Freisetzungen, dass die anfängliche Gasdichte RHO 0 unter 1.392 kg/m^3 liegt. Die Schwergaseffekte sind daher nach den Kriterien der VDI 3782 Blatt 2 vernachlässigbar.

Alle Berechnungen erfolgen für eine Aufpunkthöhe von 2 m.

Es erfolgt ein Hinweis zu einem fortentwickelten Entwurf der Ausbreitungsrichtlinie:

VDI 3783 Blatt 1:2024-10 – Entwurf, Umweltmeteorologie - Ausbreitung von störungsbedingten Freisetzungen. Der Entwurf umfasst zwei Rechenmethoden: Gauß-Wolken-Modell und Lagrange`sches Partikelmodell. Die Ausbreitungsparameter im Gauß-Wolken-Modell werden auf Grundlage der Richtlinie VDI 3783 Blatt 8 (Messwertgestützte Turbulenzparametrisierung für Ausbreitungsmodelle) berechnet. Durch die in Anhang C dieser Richtlinie dargestellten Modifikationen wird erreicht, dass die Berechnungsergebnisse des Gauß-Wolken-Modells die Ergebnisse des Lagrange`schen Partikelmodells hinreichend wiedergeben.
Es sei angemerkt, dass das Lagrange`sche Partikelmodell im Vergleich zur geltenden Ausbreitungsrichtlinie VDI 3783 Blatt 1 allgemein konservativere Ergebnisse (d.h. größere Reichweiten bei gleichen Leckmassenströmen) errechnet.

Da sich die Überarbeitung noch im Entwurf befindet, wird die bislang geltende Richtlinie verwendet. In den folgenden zwei Unterkapiteln werden die Ergebnisse der Berechnungen für die Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ sowie für die Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ dargestellt und ausgewertet. Die Auswertung erfolgt im Hinblick auf

- Vergleich der Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ untereinander
- Vergleich der Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ untereinander
- Identifikation und Beschreibung von Faktoren mit Einfluss auf die Reichweite
  - Druck
  - Windgeschwindigkeit
  - Bodenrauhigkeit
  - GZM

[85] https://www.pronuss.de

[86] VDI-Richtlinie 3783 Blatt 1; Ausbreitung von störfallbedingten Freisetzungen - Sicherheitsanalyse, Beuth Verlag GmbH, Ausgabe 05/1987

[87] VDI-Richtlinie 3783 Blatt 2; Ausbreitung von störfallbedingten Freisetzungen schwerer Gase - Sicherheitsanalyse, Beuth Verlag GmbH, Ausgabe 07/1990

- Begrenzende Maßnahmen

► Vergleich der Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ mit den Dennoch-Szenarien$_{KatS}$

Hinweis zu den Szenarien A1 und A2 bzw. B3 und B4: Es erfolgt eine formal getrennte Betrachtung der Freisetzung über Land und über Wasser für den jeweiligen Leitungsabschnitt derselben Leitung über dem entsprechenden Untergrund. Für die Freisetzung über Wasser wird aufgrund ungenügender Wissenslage zu thermodynamischen und strömungsmechanischen Mechanismen, insbesondere für die Ausbreitung großer Mengen Ammoniak über Wasser, ein konservativer Ansatz verfolgt, der insbesondere eine Durchmischung des Ammoniaks mit dem Wasser nicht berücksichtigt und eine ungehinderte Ausbreitung des Ammoniaks als Teppich über Wasser unterstellt. Eine Berücksichtigung solcher Effekte würde möglicherweise geringere Reichweiten in der Luft zur Folge haben.

In Anhang G finden sich tabellarische Übersichten über die gewählten Berechnungsparameter und die Grafiken zu den Reichweiten bis zur Unterschreitung des Beurteilungswerts sowohl für die Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ als auch für die Dennoch-Szenarien$_{KatS}$.

5.3.1 Angemessene Sicherheitsabstände in Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$

Tabelle 43: Ermittelte angemessene Sicherheitsabstände für Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2) – gerundete Angaben

Szenario-Nr.	Szenario	Wind 3 m/s	Wind 5 m/s
		Unterschreitung AEGL-2 (160 ppm 60 Min) Abstand [m]	Unterschreitung AEGL-2 (160 ppm 60 Min) Abstand [m]
A1a) /b)	Leitung 5 bar Schiff - Tank über Land	ca. 250	ca. 200
A2a) /b)	Leitung 5 bar Schiff - Tank über Wasser	ca. 400	ca. 250
A3a)/b)	Füllleitung Tank zu Transportbehälter ohne Druckausgleich 20 bar	ca. 350	ca. 250
A4a)/b)	Leitung zum Cracker 35 bar	ca. 450	ca. 300
A5	Wasserstoffleckage Bereich Cracker nach KAS-63 u. B. max. Druck/ Nennweite		=> **80 m** gemäß KAS-63

Szenarien a) Berechnung mit 3 m/s Windgeschwindigkeit und Szenarien b) mit 5 m/s.

Die Reichweiten bis zur Unterschreitung des Beurteilungswerts AEGL-2 für die Freisetzung von Ammoniak (flüssig) bewegen sich für die Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ zwischen ca. 250 m und ca. 425 m für Windgeschwindigkeiten von 3 m/s und zwischen ca. 175 m und ca. 275 m für Windgeschwindigkeiten von 5 m/s. Es ergeben sich Unterschiede in den Reichweiten bei unterschiedlichem Freisetzungsdruck (vgl. Szenarien A1/A2 mit A3 mit A4) und bei

unterschiedlichen Bodengegebenheiten (vgl. Szenarien A1 mit A2), sowie bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (vgl. innerhalb eines Szenarios 3 m/s und 5 m/s).

Für eine Wasserstoffleckage ergibt sich per Konvention ein angemessener Sicherheitsabstand von 80 m im Hinblick auf Explosionsüberdruck (abdeckend für Wärmestrahlung).

Einfluss Druck

Mit höherem Leitungsdruck ergeben sich größere Reichweiten in Folge der größeren Massenströme, die durch die nach Konvention vorgegebene Leckfläche strömen. Der Druck ist für die Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ die treibende Kraft. Mit größeren Massenströmen ergeben sich größere freigesetzte Mengen, die größere Reichweiten bis zur Unterschreitung des Beurteilungswerts zur Folge haben. Reichweiten für die Szenarien sind demnach A4>A3>A1 (A2 wird hierbei nicht betrachtet aufgrund der unterschiedlichen Bodenrauhigkeit, siehe hierzu weiter unten „Einfluss Bodenrauhigkeit“).

Einfluss Windgeschwindigkeit

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit reduzieren sich die Reichweiten innerhalb eines betrachteten Szenarios (vgl. innerhalb eines Szenarios mit 3 m/s und 5 m/s). Der Beurteilungswert wird für höhere Windgeschwindigkeiten in kleinerem Abstand vom Freisetzungsort unterschritten. Bei höherer Windgeschwindigkeit wird die freigesetzte Menge Ammoniak durch die zusätzlich vorhandene Luft stärker verdünnt. Die Konzentration des freigesetzten Ammoniaks nimmt mit zunehmendem Abstand vom Freisetzungsort für höhere Windgeschwindigkeiten stärker ab.

An dieser Stelle erfolgt der Hinweis (da nicht ersichtlich aus den Grafiken), dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit der Konzentrationsschwerpunkt der Ammoniakwolke, der sich bei Windstille direkt über dem Flächenschwerpunkt der freigesetzten Masse befindet, in Windrichtung „verschoben“ wird, während jedoch gleichzeitig der Verdünnungseffekt durch den Wind einsetzt.

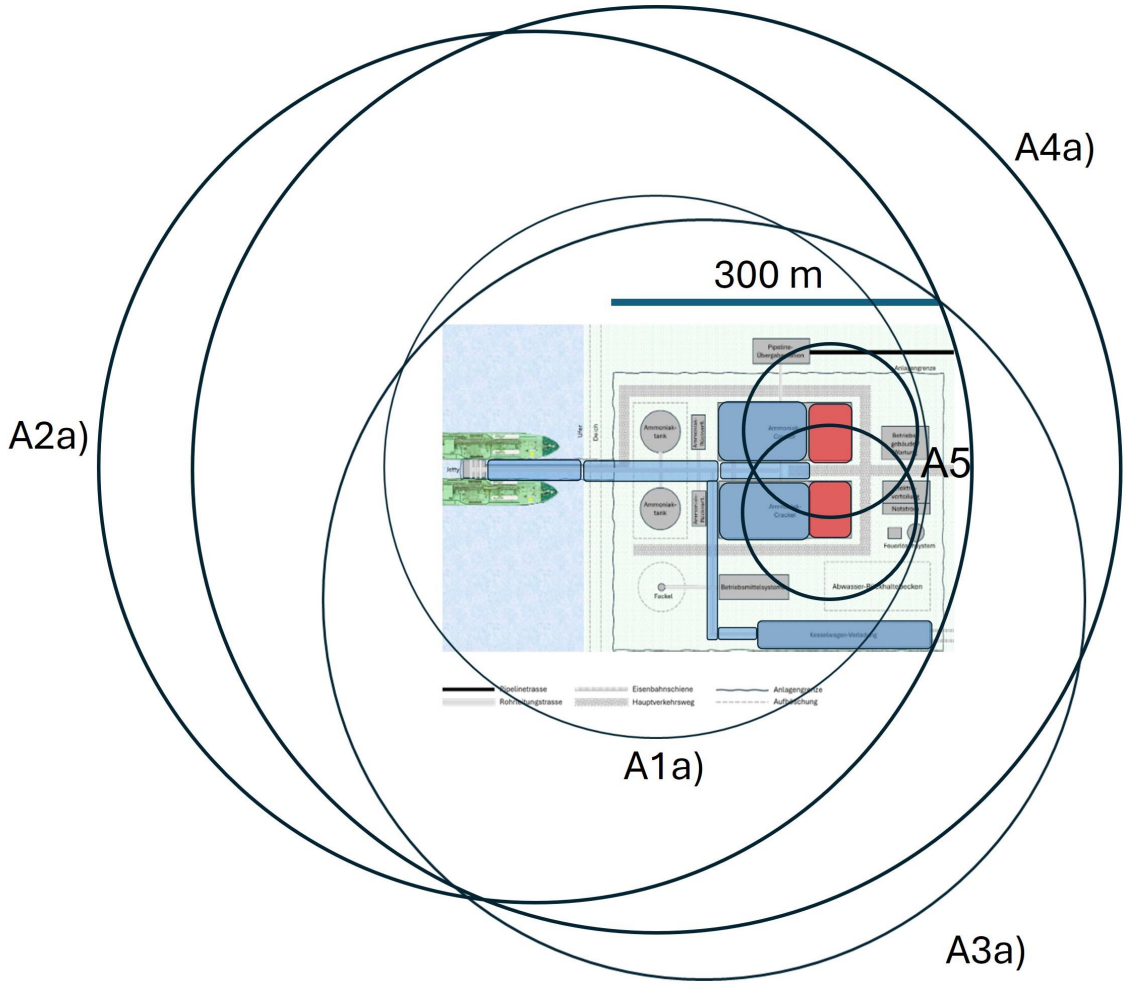
Einfluss Bodenrauhigkeit

Mit abnehmender Bodenrauhigkeit ergeben sich größere Reichweiten. Rauhe Bodenoberflächen (Wiesen, Buschwerk/Bäume, Bebauung, sonstige Strömungshindernisse) hemmen die Ausbreitung stärker als glatte Oberflächen (z. B. Wasseroberflächen). Eine sehr glatte Oberfläche kann die rasche Ausbreitung insoweit fördern, dass im Vergleich selbst bei geringerem Freisetzungsdruck höhere Reichweiten erreicht werden. (vgl. Szenario A2a) mit A3a) für 3 m/s). Erst mit zunehmender Windstärke wird der Einfluss der Bodenrauhigkeit geringer (vgl. Szenario A2b) mit A3b) für 5 m/s). Sehr glatte Bodenoberflächen sind an Land eher selten/nicht zu erwarten.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass Freisetzungsdruck, Bodenrauhigkeit und Windgeschwindigkeit in unterschiedlicher Weise zusammen auf die sich ergebende Reichweite auswirken, während zunehmender Freisetzungsdruck zu größeren Reichweiten führt, jedoch zunehmende Bodenrauhigkeit und zunehmende Windstärke die Reichweite verringern.

Die nachfolgenden Abbildungen soll die angemessenen Sicherheitsabstände im Verhältnis zur Größe des Modellterminals für eine angenommene Windgeschwindigkeit von 3 m/s bzw. 5 m/s veranschaulichen. Die Freisetzungsorte stellen jeweils den Mittelpunkt der sich ergebenden Kreise dar und der Radius entspricht dem angemessenen Sicherheitsabstand.

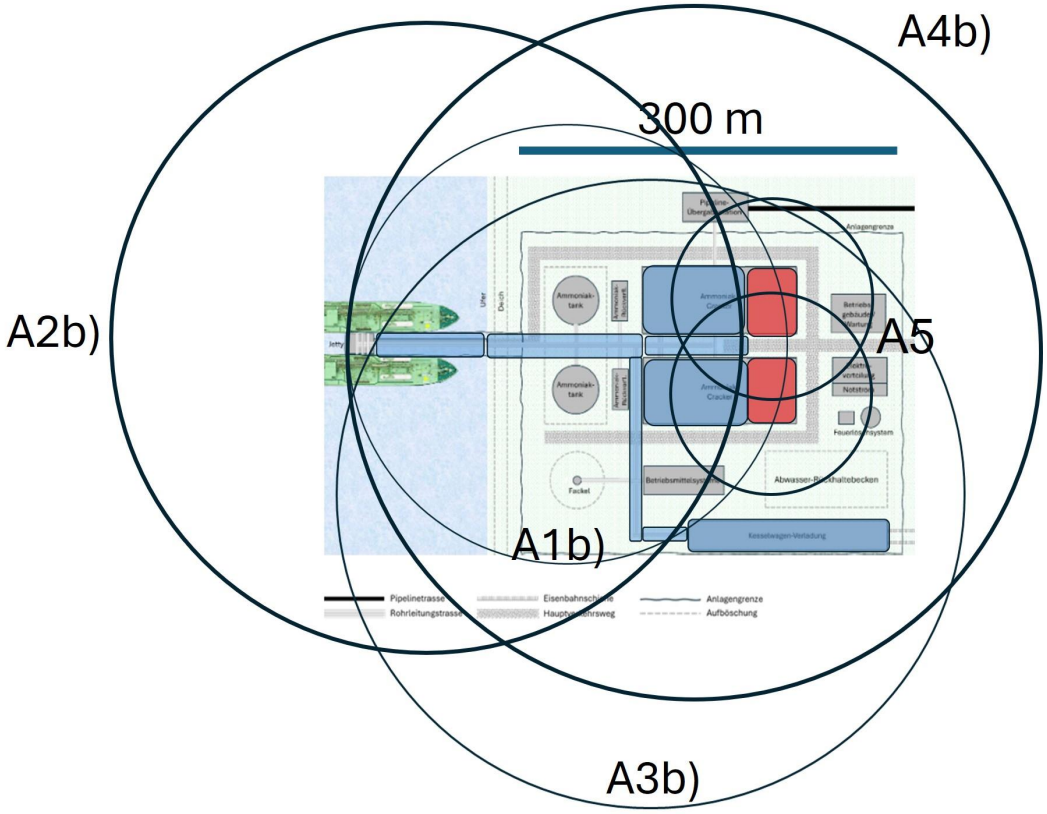
Abbildung 33: Angemessene Sicherheitsabstände für Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2) (angenommene Windgeschwindigkeit: 3 m/s)



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV SÜD.

Hinweis zur Darstellung und den weiteren Darstellungen dieser Art innerhalb dieses Kapitels: Der Radius „Freisetzung über Wasser“ ragt in die Landfläche hinein, genauso wie der Radius „Freisetzung über Land“ in die Wasserfläche hineinragt, ungeachtet der unterschiedlichen Bodenrauhigkeit der jeweils anderen Bodenfläche. Der sich tatsächlich ergebende Kreis kann unter Berücksichtigung des jeweils anderen Untergrunds aus beiden Kreisen kombiniert gebildet werden.

Abbildung 34: Angemessene Sicherheitsabstände für Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2) (angenommene Windgeschwindigkeit: 5 m/s)



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV SÜD.

5.3.2 Abstände auf Basis von Dennoch-Szenarien$_{KatS}$

Tabelle 44: Ermittelte Abstände für Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von NH_3 bzw. H_2) – gerundete Angaben

Szenario-Nr.	Szenario	Wind 3 m/s	Wind 5 m/s
		Unterschreitung AEGL-2 (160 ppm, 60 Min) Abstand [m]	Unterschreitung AEGL-2 (160 ppm, 60 Min) Abstand [m]
B1a) /b)	NH3-Heißgasleitung Cracker 33 bar/600 °C Freistrahl 45 ° mit thermischer Überhöhung, 82 kg GZM DN 400	Keine Überschreitung	Keine Überschreitung
B2a) /b)	DN200 flüssig-NH3-Leitung (35 bar) zu Cracker GZM 1,089 t bodennah	ca. 200	ca. 150
B3a) /b)	DN600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Land	ca. 850	ca. 600
B4a) /b)	DN600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Wasser	ca. 1400	ca. 1000
B5a) /b)	DN600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t mit Lachenbegrenzung 1500 m2 über Land	ca. 450	ca. 350
B6	Große Wasserstoffleckage mit Folge Brand/Explosion Cracker DN300 GZM 327 kg	Unterschreitung Wärmestrahlung 1,6 KW/m2 (Wert KAS-18): 140 m	
		Unterschreitung Explosionsüberdruck 0,1 bar (Wert KAS-18): 230 m	
		Unterschreitung Explosionsüberdruck 0,05 bar (Wert KAS-55): 370 m	

Szenarien a) Berechnung mit 3 m/s Windgeschwindigkeit und Szenarien b) mit 5 m/s.

Die Reichweiten bis zur Unterschreitung des Beurteilungswerts AEGL-2 für die Freisetzung von Ammoniak (flüssig) bewegen sich für die Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ zwischen ca. 200 m und ca. 1400 m für Windgeschwindigkeiten von 3 m/s und zwischen ca. 150 m und ca. 1000 m für Windgeschwindigkeiten von 5 m/s. Es ergeben sich Unterschiede in den Reichweiten bei unterschiedlicher GZM (vgl. B3/B4/B5 und B1 und B2), bei unterschiedlichen Bodengegebenheiten (vgl. B3 mit B4), mit begrenzenden Maßnahmen (vgl. Szenarien B5 und B3), sowie bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten (vgl. innerhalb eines Szenarios 3 m/s und 5 m/s).

Die Reichweiten bei einer Wasserstoffleckage bewegen sich für das Dennoch-Szenario$_{KatS}$ zwischen 140 m hinsichtlich Wärmestrahlung und 370 m hinsichtlich Explosionsüberdruck. Hinsichtlich der realistischeren Abbildung von Schadensereignissen wird der neuere Beurteilungswert von 0,05 bar$_{Ü}$ aus dem KAS-55 bzw. KAS-63 dem veralteten aus KAS-18 vorgezogen. Im Abstand von bis zu 140 m für die Dauer des Freistrahlbrands können für den dauerhafte Aufenthalt Personenschäden nicht ausgeschlossen werden. Im Abstand von bis zu 370 m für den Fall einer Gaswolkenexplosion können Personenschäden nicht ausgeschlossen werden.

Einfluss GZM

Mit höherer GZM ergeben sich offensichtlich größere Reichweiten. Die GZM kann durch weitere Segmentierung der Anlagenteile weiter reduziert werden.

Einfluss Druck

Der Leitungsdruck spielt im Rahmen eines Dennoch-Szenarios$_{KatS}$ keine Rolle, da die GZM über einen definierten Zeitraum freigesetzt wird, unabhängig vom anstehenden Druck. Siehe außerdem „Vergleich mit Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$“ weiter unten.

Einfluss Windgeschwindigkeit

Mit zunehmender Windgeschwindigkeit reduzieren sich die Reichweiten innerhalb eines betrachteten Szenarios (vgl. innerhalb eines Szenarios mit 3 m/s und 5 m/s). Bei höherer Windgeschwindigkeit wird die freigesetzte Menge Ammoniak durch die zusätzlich vorhandene Luft stärker verdünnt. Die Konzentration des freigesetzten Ammoniaks nimmt mit zunehmendem Abstand vom Freisetzungsort für höhere Windgeschwindigkeiten stärker ab. Der Beurteilungswert wird für höhere Windgeschwindigkeiten in kleinerem Abstand vom Freisetzungsort unterschritten.

An dieser Stelle erfolgt der Hinweis (da nicht ersichtlich aus den Grafiken), dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit der Konzentrationsschwerpunkt der Ammoniakwolke, der sich bei Windstille direkt über dem Flächenschwerpunkt der freigesetzten Masse befindet, in Windrichtung „verschoben“ wird, während jedoch gleichzeitig der Verdünnungseffekt durch den Wind einsetzt.

Einfluss Bodenrauhigkeit

Mit abnehmender Bodenrauhigkeit ergeben sich größere Reichweiten. Rauhe Bodenoberflächen (Wiesen, Buschwerk/Bäume, Bebauung, sonstige Strömungshindernisse) hemmen die Ausbreitung stärker als glatte Oberflächen (z. B. Wasseroberflächen). Eine sehr glatte Oberfläche kann die rasche Ausbreitung fördern. Sehr glatte Bodenoberflächen sind an Land eher selten/nicht zu erwarten.

Einfluss begrenzender Maßnahmen

Freigesetzte verflüssigte Gase breiten sich zunächst am Boden in flüssiger Form aus (abzüglich des Anteils aus der Flash-Verdampfung) und verdampfen/verdunsten nach und nach, bis ausreichend Energie zu deren vollständiger Verdampfung oder Luft zu deren Verdunstung über Stofftransport zugeführt wurde. Bis dahin breitet sich die Flüssigkeit entsprechend der Bodenrauhigkeit und den Ausbreitungsmöglichkeiten (Hindernisse) aus. Durch eine Begrenzung der Ausbreitungsfläche im Szenario B5 (hier Lachenbegrenzung exemplarisch auf 1500 m^2 festgelegt) wird der verdampfende und verdunstende Massenstrom gesenkt, da die sonst über die Luft und den Boden zugeführte Energie aufgrund der begrenzten Fläche, sowie die vorhandene Fläche für Stofftransporte durch Verdunstung (nicht verdampfungsgetrieben), reduziert wird. Durch den reduzierten Verdampfungs- und Verdunstungsmassenstrom wird

Ammoniak nach der Freisetzung der GZM langsamer in die Luft freigesetzt, wodurch der Verdünnungseffekt durch den Wind wieder stärker zum Tragen kommt. Eine Lachenbegrenzung führt zu geringeren Reichweiten und verzögert die Verdampfung und Verdunstung des freigesetzten Ammoniaks.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass GZM, Bodenrauhigkeit, Windgeschwindigkeit und ausbreitungsbegrenzende Maßnahmen in unterschiedlicher Weise zusammen auf die sich ergebende Reichweite auswirken. Zunehmende GZM führt zu größeren Reichweiten, zunehmende Bodenrauhigkeit und zunehmende Windstärke, sowie zunehmende Ausbreitungsbegrenzung (Lachenbegrenzung) verringern die Reichweite. Maßgeblich für die Reichweite ist neben der GZM, die hauptsächlich von der Segmentierung abhängt, vor allem die Begrenzung der Ausbreitung von flüssigem Ammoniak und die Windgeschwindigkeit. Der Freisetzungsdruck spielt in diesem Fall keine Rolle. Die Einflussnahme auf die Bodenrauhigkeit bietet bei derartigen Szenarien mit großen Reichweiten, die über Land gehen, nur geringen Handlungsspielraum und sollte untergeordnet betrachtet werden.

Vergleich mit KAS-18 Szenarien

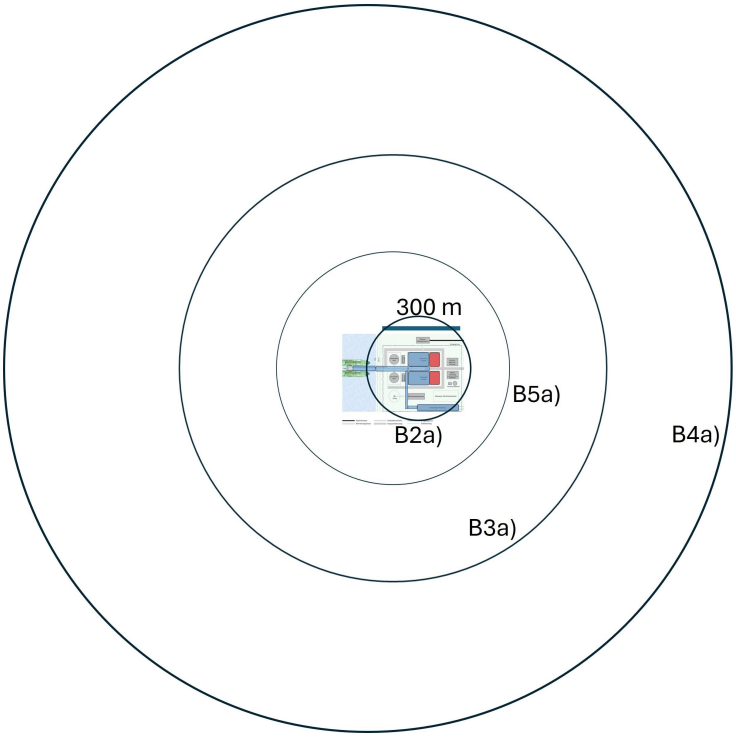
Auffällig ist beim Vergleich der Szenarien B2a)/b) und A1a)/b), dass die sich ergebenden Reichweiten bei Freisetzung der GZM im Vergleich zur Freisetzung in Anlehnung an KAS-18 für beide Windgeschwindigkeiten geringer sind, trotz höherem Druck (vgl. 35 bar in B mit 5 bar in A). Grund hierfür liegt in der Vorgehensweise bei der Betrachtung der Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$. Über die Leckfläche ergibt sich für die Freisetzungsdauer von 10 min rechnerisch eine freigesetzte Menge für das Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, die größer ist als die GZM.

Ansonsten ist zu beobachten, dass die Reichweiten der Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ tendenziell deutlich über denen der Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ liegen. Hauptfokus, um die Auswirkungen durch Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ an die der Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ anzunähern und damit die Reichweiten der Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ reduzieren zu können, sind

- die Begrenzung der Fläche, auf der sich freigesetztes Ammoniak ausbreiten kann.
  Dies kann z. B. durch physische Barrieren wie Erdwall oder Mauer erfolgen – Stichwort „Lachenbegrenzung“.
- die Reduzierung der GZM durch zusätzliche Segmentierung.
  Mit der Reduzierung der GZM reduziert sich auch die freigesetzte Menge im Fall eines Dennoch-Szenarios$_{KatS}$.

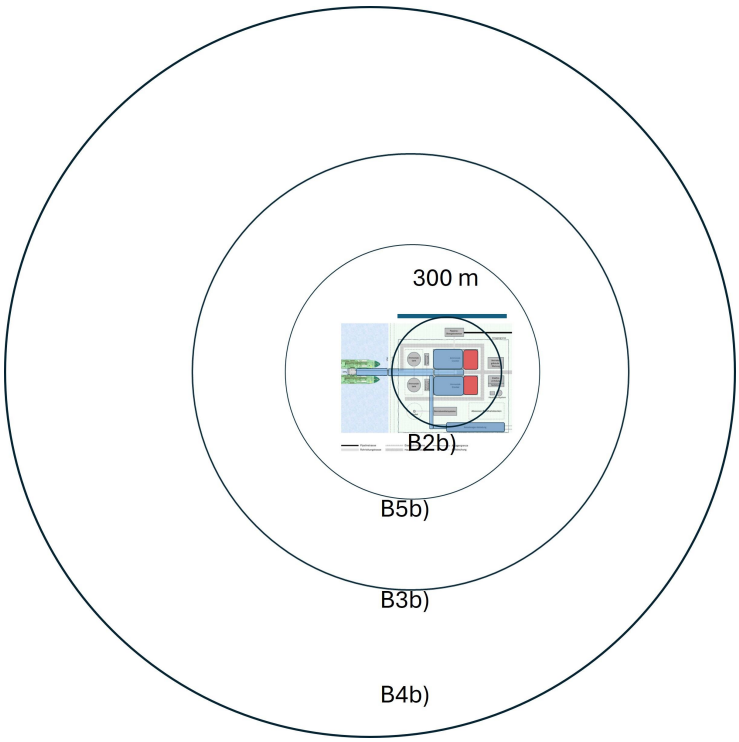
Die nachfolgenden Abbildungen sollen Reichweiten der jeweiligen Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ im Verhältnis zur Größe des Modellterminals für eine angenommene Windgeschwindigkeit von 3 m/s bzw. 5 m/s veranschaulichen. Die Freisetzungsorte stellen jeweils den Mittelpunkt der sich ergebenden Kreise dar und der Radius entspricht der Reichweite.

Abbildung 35: Ermittelte Abstände für die untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von NH_3) (angenommene Windgeschwindigkeit: 3 m/s)



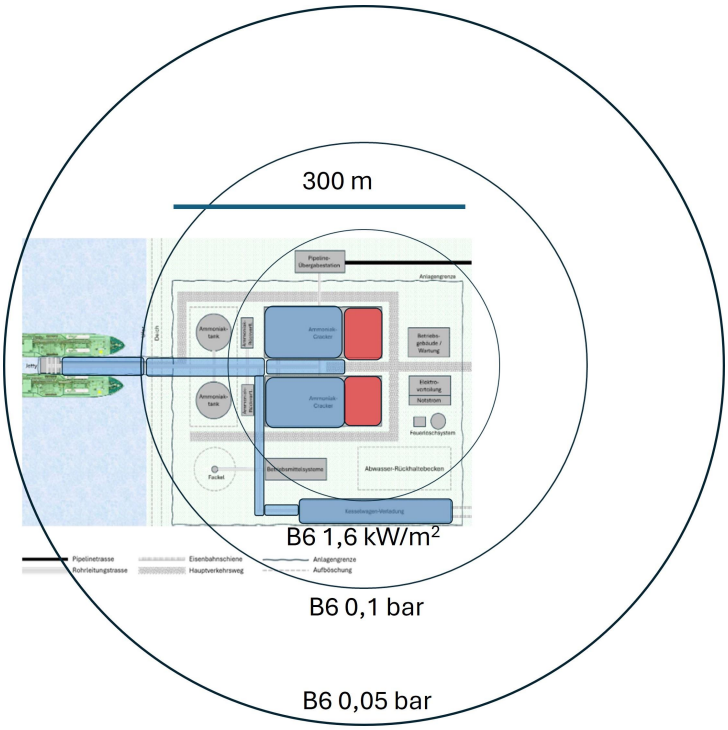
Quelle: Eigene Darstellung, TÜV SÜD.

Abbildung 36: Ermittelte Abstände für die untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von NH_3) (angenommene Windgeschwindigkeit: 5 m/s)



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV SÜD.

Abbildung 37: Ermittelte Abstände für die untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ (Freisetzung von H_2) (angenommene Windgeschwindigkeit: 3 m/s)



Quelle: Eigene Darstellung, TÜV SÜD.

5.4 Learnings – Bedeutung schadensverhindernder und schadensbegrenzender Maßnahmen und Ausblick

Zusammenfassend lassen sich aus den rechnerischen Abschätzungen durch die exemplarischen Berechnungen für das Modellterminal 1 folgende Aussagen ableiten:

- Anmerkung vorab: Die numerischen Ergebnisse sollen als Erwartungswerte mit erheblichen Streuungen interpretiert werden und sollen lediglich Einsichten und Größenordnungen vermitteln. Die zur Berechnung verwendeten Modelle stellen eine mögliche Herangehensweise dar.
- Die Reichweiten der berechneten angemessenen Sicherheitsabstände durch eine NH_3-Leckage in Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$ bewegen sich abhängig vom Ort der Leckage und der Windgeschwindigkeit in einem engeren Bereich von 150 – 450 m. Höhere Windgeschwindigkeiten führen zu niedrigeren Reichweiten, aufgrund des Verdünnungseffekts des Winds.
- Die untersuchten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ ergaben abhängig von der verfahrenstechnisch freisetzbaren unterschiedlichen GZM deutliche Unterschiede in den Reichweiten bis zur Unterschreitung des Beurteilungswerts (bis zu ca. 1400 m Reichweite in der Beispielrechnung).
- Eine weitere Segmentierung der Anlage über die im Szenario aus Abbildung 31 dargestellte hinaus, zur weiteren Begrenzung der GZM, kann zur Verringerung der Schadensreichweiten im Leckagefall führen, da hierdurch geringere Stoffmengen freigesetzt werden. Allerdings ist zu beachten, dass die Installation von z. B. zusätzlichen aktiven Absperrarmaturen, oder Dampfsperren (bei kaltverflüssigtem Ammoniak), auch zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Leckagen führen kann.
- Rückhaltemaßnahmen für flüssiges NH_3 zur Begrenzung von entstehenden Lachen können die Schadensreichweiten durch verdampfendes NH_3 signifikant verringern. Eine Lachenbegrenzung ist bei der Planung der Anlage zu berücksichtigen. Die Begrenzung kann durch physische Barrieren (z. B. Mauer, Erdwall) realisiert werden.
- Die größten Reichweiten ergeben sich bei Freisetzung und Verdampfung von flüssigem NH_3 über Wasser als ebene Fläche (unter den getroffenen relativ groben/konservativen, vereinfachten Annahmen).[88] Darüber hinaus ist die ausbreitungshemmende Bodenrauhigkeit auf der Wasseroberfläche geringer als an Land. Das genaue Verhalten von größeren Mengen an freigesetztem Ammoniak über einer Wasseroberfläche ist wissenschaftlich noch nicht fundiert beschrieben. Für zuverlässigere Aussagen und Prognosen ist weitere Forschung hierzu nötig. Eine Reduzierung der Reichweiten an der Luft ist unter Berücksichtigung möglicher thermodynamische bzw. strömungsmechanischer Mechanismen denkbar.
- Bei Leckagen von heißem NH_3-Gas ist aufgrund des thermischen Auftriebs des austretenden Gases aus Leitungen im Bereich des Crackers eine Überschreitung des Störfallbeurteilungswerts am Boden unwahrscheinlich.

[88] Die Flüssigkeit breitet sich ungehindert auf der Wasseroberfläche aus, während sie gleichzeitig siedet und sich mit dem Wasser vermischt. Die bei Lösen des Ammoniaks im Meerwasser freigesetzte Wärme erhöht die Verdampfungsrate des Ammoniaks. Nach einer Recherche von Ming et. al "Ammonia as a Marine Fuel – Bunkering, Safety and Release Simulations" Oktober 2022, gelangen etwa 30 bis 40 % des auf die Wasseroberfläche freigesetzten Ammoniaks in die Luft und bilden eine Ammoniakwolke, die sich mit dem Wind verteilt, während sich die restlichen 60 bis 70 % im Wasser auflösen.

- Die schematischen Abstandswerte des KAS-63 zu Bränden/Explosionen von H_2 führen im Vergleich zu NH_3 zu geringen Reichweiten, wohingegen sich bei Berechnungen für H_2 im Dennoch-Szenario$_{KatS}$ im Vergleich zu Konvention des KAS-63 deutlich größere Reichweiten ergeben. Die Wirkung von Bränden/Explosionen infolge einer Freisetzung von H_2 ist bei der Anlagenplanung hinsichtlich des zu beherrschenden Gefahrenpotenzials durch „benachbarte Anlagen“ sowohl unter Berücksichtigung des Dennoch-Szenarios$_{KAS-18}$ (bzw. KAS-63) als auch des Dennoch-Szenarios$_{KatS}$ bei der statischen Auslegung der Anlage/Gebäude zu berücksichtigen, insbesondere für Gebäude, die zudem eine sicherheitstechnische Relevanz für die Anlage haben (z. B. Leitwarte/Messwarte). Es sind ggf. andere Beurteilungswerte z. B. für Gebäudestabilität aus den Leitfäden heranzuziehen.
- Der Einfluss des Winds ist hinsichtlich der Verschiebung des Konzentrationsschwerpunkts der Ammoniakwolke in Windrichtung zu berücksichtigen. Ein Windrichtungsanzeiger kann Aufschluss darüber geben, in welche Richtung sich die Ammoniakwolke bewegen wird.
- Das Thema Cybersecurity im Hinblick auf Maßnahmen gegen Eingriffe Unbefugter ist bei der Anlagenplanung zu berücksichtigen.

5.5 Umweltwirkungen im Falle von Störfallereignissen

Vergleichbar zur Analyse und Diskussion der Immissionen des bestimmungsgemäßen Betriebs werden im Folgenden für ausgewählte Störfallszenarien aus Kapitel 5.3 die Aspekte der Klimawirkung sowie Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit diskutiert.

Überdies finden sich in Anhang D weiterführende Ausführungen zur toxischen Wirkung von Ammoniak auf marine Ökosysteme bzw. Oberflächengewässer durch die großskalige Freisetzung.

Klimawirkung im Falle ausgewählter Störfallereignisse

Für die Analyse der Klimawirkung eines Ammoniak-Terminals werden im Folgenden zwei unterschiedliche „Störfall-Emissionsszenarien" betrachtet. Die Analysen fokussieren sich jeweils auf den Fall des in Tabelle 14 beschriebenen Modellterminals 1 (groß) und umfassen je ein Störfallereignis mit (a) NH_3- bzw. (b) H_2-Freisetzung der jeweils maximalen GZM aus Kapitel 5.3.

Die folgenden Szenarien werden für die Analyse ausgewählt, da in diesen von der jeweils größten Freisetzungsmenge für Ammoniak bzw. Wasserstoff in die Umgebung ausgegangen wird:

- Szenario B5: DN600 flüssig-NH_3-Leitung (5 bar) GZM 29 t mit Lachenbegrenzung z. B. 1500 m^2 über Land
- Szenario B6: Wasserstoffleckage Brand/Explosion Cracker DN300 GZM: 327 kg

Die hierbei ermittelte Klimawirkung setzt sich je nach Szenario folglich aus den direkten und indirekten Klimawirkungen der freigesetzten Mengen zusammen und soll die Auswirkung einer einmaligen Leckage im Falle eines Störfalls darstellen. Vereinfachend wird hierbei davon ausgegangen, dass jeweils die GZM gleichzeitig als Gas in die Umgebung entweicht. Die Rechnungen erfolgen analog zu Kapitel 4.2.4 unter Verwendung der AR6-Werte (Tabelle 33).

Auf Basis der in Tabelle 45 dargestellten Emissionswerte für die unterschiedlichen Emissionsstoffe wird mittels der THG-Wirkfaktoren die Treibhausgaswirkung der unterschiedlichen Emissionen ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass im Falle der einmaligen Freisetzung der GZM in den untersuchten Störfall-Szenarien mit 156 $t_{CO2\text{-}Äq.}$ (Leckage der DN600 NH_3-Leitung, GZM = 29 t) bzw. 3.8 $t_{CO2\text{-}Äq.}$ (Leckage der DN300 H_2-Leitung, GZM = 327 kg) in der Gesamtbetrachtung gegenüber der THG-Wirkung des Emissionen im Normalbetrieb (ca. 66.000 $t_{CO2\text{-}Äq.}$/a) vernachlässigt werden können (siehe Kapitel 4.2.4).

Tabelle 45: Emissionen der unterschiedlichen Schadstoffe im Falle der untersuchten Störfallereignisse (für Modellterminal 1):

	Einheit	Störfallszenario B5: Leckage der DN600 NH_3-Leitung	Störfallszenario B6: Leckage der DN300 H_2-Leitung
Annahmen		Einmaliges Ereignis	Einmaliges Ereignis
Ammoniak, NH_3	kg	29.000	0
Wasserstoff, H_2	kg	0	327

Tabelle 46: Ergebnisse der THG-Berechnung für unterschiedliche Störfall-Emissionsszenarien (für Modellterminal 1):

	Einheit	Störfallszenario B5: Leckage der DN600 NH_3-Leitung	Störfallszenario B6: Leckage der DN300 H_2-Leitung
Ammoniak, NH_3	$t_{CO2\text{-}Äq.}/a$	143	-
Wasserstoff, H_2	$t_{CO2\text{-}Äq.}/a$	-	3,8
Gesamt THG-Wirkung	**$t_{CO2\text{-}Äq.}/a$**	**143**	**3,8**

Quelle: eigene Berechnungen, LBST.

Menschliche Gesundheit

Abschließend wird die Wirkungskategorie menschliche Gesundheit in die allgemeine Diskussion der Immissionen eines künftigen NH_3-Terminals aufgenommen. Die Ausführungen beschränken sich dabei ausschließlich auf den Fall des Ammoniak-Austritts im Fall eines Störfallereignisses.

Mit Blick auf die menschliche Gesundheit sind für Ammoniak folgende Aspekte relevant: Ammoniak weist eine hohe **akute Toxizität** beim Einatmen auf (Kategorie 3), wirkt überdies ätzend auf der Haut (Kategorie 1B) und kann zu schweren Augenschädigungen (Kategorie 1) führen (siehe Anhang A3). Abhängig von Konzentration und Expositionsdauer sind folgende typischen Symptome möglich: Brennen der Augen, Nase und Rachen sowie Atembeschwerden, Tränenfluss, Husten sowie eine Steigerung der Atemfrequenz. Bei geringen Konzentrationen tritt häufig eine Gewöhnung ein, sodass die Reizerscheinungen nicht mehr festzustellen sind. (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2018). Die Geruchsschwelle von NH_3 liegt bei 5 ppm (vol.) oder 3,8 mg pro m^3 Luft. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) beträgt 20 ppm (vol.) oder 15 mg pro m^3 Luft (Franzaring & Kösler, 2023). Ab einer NH_3-Konzentration von 2.500 ppm (~1900 mg/m^3) in der Luft treten Vergiftungserscheinungen auf. Ein NH_3-Gehalt von 5.000 ppm (~3800 mg/m^3) in der Luft wirkt tödlich (Universität Stuttgart, 2024).

Ein für die Gefährdungsbeurteilung wesentlicher Grenzwert ist der **AEGL-Grenzwert**, der auch den Analysen in Kapitel 5.2 zugrunde gelegt wird. Basierend auf unterschiedlichen Schweregraden der toxischen Wirkungen sind drei unterschiedliche AEGL-Grenzwerte definiert: Oberhalb einer Ammoniakkonzentration des AEGL-1-Wertes in der Luft (ausgedrückt in ppm), kann es bereits Reizungen oder Unwohlsein führen. Diese Auswirkungen sind jedoch nicht behindernd, sondern vorübergehend und nach Beendigung der Exposition reversibel. Bei Überschreitung des AEGL-2-Wertes können dagegen irreversible oder schwere, langanhaltende gesundheitsschädliche Auswirkungen oder eine Beeinträchtigung der Fluchtfähigkeit auftreten. Der AEGL-3-Wert steht für eine Expositionsstufe, die lebensbedrohliche gesundheitliche Auswirkungen oder den Tod zur Folge haben kann (Liu, Harikrishnan, Kolluru, & Mastorakos, 2024).

Neben den direkten gesundheitlichen Gefahren von Ammoniak, reagiert NH_3 in der Atmosphäre außerdem zu Ammoniumsulfat, $(NH_4)_2SO_4$, und Ammoniumnitrat, NH_4NO_3, die als sekundäre, gesundheitsschädliche Aerosole (PM 2,5) eine lange Lebensdauer in der Atmosphäre haben (Franzaring & Kösler, 2023). Diese müssen vor dem Hintergrund der menschlichen Gesundheit zusammen mit Gesamtstaubemissionen als weiterer potenzieller langfristiger Aspekt gesehen werden, sind jedoch nicht Teil der folgenden Diskussion.

Tabelle 47: AEGL-Grenzwerte für Ammoniak in Abhängigkeit der Expositionsdauer

Angabe in ppm

	10 Min.	30 Min.	60 Min.	4 Stunden	8 Stunden
AEGL-1	30	30	30	30	30
AEGL-2	220	220	160	110	110
AEGL-3	2700	1600	1100	550	390

AEGL-1: Schwelle zum spürbaren Unwohlsein;
AEGL-2: Schwelle zu schwerwiegenden, lang andauernden oder fluchtbehindernden Wirkungen;
AEGL-3: Schwelle zur tödlichen Wirkung.
Quelle: United States Environmental Protection Agency, Link.

Die Analyse hinsichtlich des Aspekts der menschlichen Gesundheit fokussiert sich im Rahmen dieser Analyse auf die Diskussion der Auswirkungen der angenommen Dennoch-Szenarien$_{KatS}$. Negative Auswirkungen im Normalbetrieb auf z. B. Anwohnende sind nicht zu erwarten. Die in der Umgebung der Anlage berechnetet Ammoniak-Konzentrationen (Kapitel 4.2.3) sind gegenüber den in Tabelle 47 angegebenen Grenzwerten vernachlässigbar.

Die Rechnungen zur Ermittlung der erforderlichen Abstände zur Unterschreitung des AEGL-2-Wertes von 160 ppm (60 Minuten) in Kapitel 5.3 (bzw. Anhang G.2) zeigen die höchsten Werte für eine Leckage von einer zusammenhängenden Menge von 29 t aus der DN600-Leitung, die vom Schiff in die Ammoniak-Tanks führt (flüssig-NH_3, 5 bar).

Die ermittelten Abstände für eine angenommene Windgeschwindigkeit von 3 m/s (5 m/s) lauten:

- Szenario B3a (ohne Lachenbegrenzung, über Land): ca. 850 m (ca. 600 m)
- Szenario B5a (mit Lachenbegrenzung, über Land): ca. 450 m (ca. 350 m)
- Szenario B4a (ohne Lachenbegrenzung, über Wasser): ca. 1400 m (ca. 1000 m)

Folglich ergeben die Analysen bei der geringeren Windgeschwindigkeit von 3 m/s um ca. 30-40% höhere Werte gegenüber 5 m/s.

Hinweis: Weiterführende Analysen zur Freisetzung größerer Mengen, etwa direkt aus dem Tank, wurden im Rahmen der Analysen nicht durchgeführt. Historische Beispiele für größere NH3-Freisetzungen sind in Tabelle 36 beschriebenen.

Um nun generell die Auswirkungen einer NH_3-Freisetzung auf die menschliche Gesundheit in der Umgebung des NH_3-Terminals zu diskutieren, sind Informationen über die Bevölkerungsdichte in dem betroffenen Gebiet sowie vorherrschende Windrichtung und -geschwindigkeit einer möglichen Gaswolke jeweils fallspezifisch zu berücksichtigen.

Dabei gilt es, drei Personengruppen zu unterscheiden, die prinzipiell durch einen entsprechenden Austritt „betroffen“ sein können:

- Geschultes Fachpersonal des NH_3-Terminals,
- Personal auf umliegenden Industriebetrieben sowie
- Anwohnende.

Gesprächen mit einem Terminalbetreiber zeigen, dass unterschiedliche Sicherheitskonzepte etabliert sind, um die Personen in der Umgebung zu schulen und im Ernstfall frühzeitig zu warnen. Hierzu zählen etwa (i) gemeinsame Sirenenanlagen mit den Nachbarbetrieben, (ii) Störfall-Unterweisungen für die angrenzenden Betriebe und Anwohner sowie (iii) regelmäßige Schulungen mit der städtischen Feuerwehr sowie den Katastrophenschutzbehörden.

Allgemein liegt die durchschnittliche Einwohnerdichte in Deutschland im Jahr 2022 im Durchschnitt etwa 236 Menschen pro Quadratkilometer[89]. Im Vergleich dazu zeigen die untersuchten Standorte aufgrund ihres industriell-geprägten Charakters und aufgrund der Abstandsregeln im Genehmigungsverfahren naturgemäß eine geringere Einwohnerdichte auf.

Um im Folgenden die potenziellen Auswirkungen auf die Gruppe der Anwohnenden abzuschätzen, wird in Tabelle 48 beispielhaft jeweils die Einwohnerzahl im Gebiet um den Standort der bestehenden und geplanten NH_3-Terminals zusammengefasst. Hierzu werden die Einwohnerzahlen des Zensus 2022 im Zensus Atlas[90] als Ausgangspunkt genommen.

Tabelle 48: Geschätzte Bevölkerungszahl (nach Zensus 2022) in bestimmten Radius um Standorte der bestehenden und geplanten Ammoniak-Importterminals in Deutschland

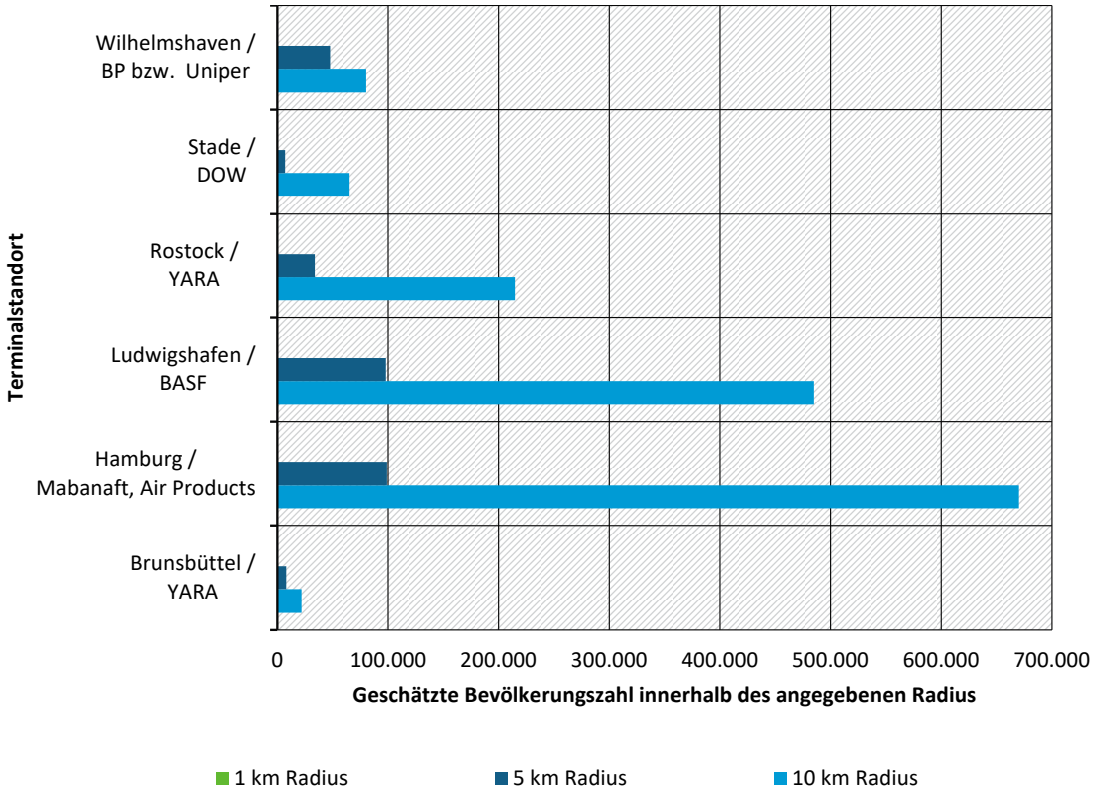
Ort / Investor	Standort	Geschätzte Bevölkerungszahl (nach Zensus 2022) in bestimmten Radius um Standort		
		1 km	5 km	10 km
Brunsbüttel / YARA	Landeshafen Ostermoor / Holstendamm 2, 25572 Büttel	-	8.000	22.000
Hamburg / Mabanaft, Air Products	Kattwykstraße 1, 21107 Hamburg	-	99.000	670.000
Ludwigshafen / BASF	Landeshafen Nord Hafenstraße, 67063 Ludwigshafen am Rhein	-	98.000	485.000
Rostock / YARA	Peez 4, 18147 Rostock	-	34.000	215.000
Stade / DOW	Seehafen, Johann-Rathje-Köser-Straße 2A, 21683 Stade	-	7.000	65.000
Wilhelmshaven / BP , Uniper	NWO-Terminal, Greenfield Zum Ölhafen 207, 26384 Wilhelmshaven	-	48.000	80.000

Hinweis. Die Ermittlung der ungefähren Einwohnerzahlen erfolgte auf Basis des Zensus Atlas 2022. Bei der Berechnung erfolgt die Berücksichtigung der Bevölkerungszahl anteilig in Abhängigkeit vom Anteil der besiedelten Fläche, die innerhalb der gezeichneten Fläche liegt. Die in der Karte gezeigten Gitterzellen sind 100m x 100m groß.

[89] siehe https://www.demografie-portal.de/DE/Fakten/bevoelkerungsdichte.html

[90] siehe https://atlas.zensus2022.de/.

Abbildung 38: Ermittelte Bevölkerungszahl im Umkreis existierender und potenzieller NH_3-Terminalstandorte in Deutschland



Quelle: LBST auf Basis Zensus Atlas 2022.

Während die Zahl der Anwohnenden im relevanten Bereich <1 km für alle Standorte bei Null liegt, zeigen sich dennoch z.T. große Unterschiede bei der Berücksichtigung größerer Abstände. Die Bedeutung dieser Erkenntnisse auf die Standortwahl sollte Teil weiterführender Diskussionen in Alarm- und Gefahrenabwehrplänen bzw. auch der Technologierisikoanalysen sein.[91]

Mit Blick auf die ermittelten Abstände zur Unterschreitung des AEGL-2-Werts von in der Regel unter 1 km sind – bei Annahmen der im Rahmen der Studie zugrunde gelegten Dennoch-Szenarien$_{KatS}$ sowie der aus der PGS 12 abgeleiteten Sicherheitsmaßnahmen– folglich keine wesentlichen Auswirkungen auf die Bevölkerung zu erwarten. Hinzu kommt die stark abfallende Ammoniak-Konzentration bei zunehmender Entfernung von der Emissionsquelle (siehe Diagramme in Anhang G.2).

[91] Hinweis: Im Rahmen des Genehmigungsprozesses der Mabanaft wurde für das Schutzgut Mensch ein Untersuchungsraum mit 2.500 m Abstand zur Vorhabensfläche festgelegt. (Mabanaft, 2024) Die Einwohnerzahl in diesem Bereich wird mit 13.800 Menschen angegeben.

6 Fazit & Ausblick

Das Forschungsvorhaben „Ammoniak als Wasserstoffträger - Fragen und Herausforderungen der Technik bei großvolumigem Import von Ammoniak und deren Umweltauswirkungen“ untersuchte wesentliche (Teil-)Aspekte des Wasserstoffimports in Form von Ammoniak nach Deutschland. Gemäß der Zielsetzung wurden die **Auswirkungen auf die Umwelt des großskaligen Ammoniakimports zu energetischen Zwecken**, d.h. als Wasserstoffvektor mittels einer Gesamtbetrachtung der möglichen kumulativen Effekte anhand exemplarischer NH_3-Modellterminals diskutiert.

Eine **Grenzfall-Betrachtung generischer Modellterminals an Beispielstandorten diente der Analyse möglicher Worst-Case-Szenarien** (hinsichtlich der Emissionen im Normalbetrieb). Eine darüberhinausgehende Detailanalyse individueller Standorte und Projekte, wie sie etwa im Kontext von Genehmigungsverfahren, Bauleitplanung oder Katastrophenschutzszenarien erforderlich ist, wurde nicht vorgenommen. Auch werden keine Empfehlungen bzw. Prognosen hinsichtlich der künftigen Eignung bzw. Bedeutung von Ammoniak als Wasserstoffimportvektor für Deutschland vorgenommen. Neben dem Normalbetrieb wurden auch klar-definierte **Störfall-Szenarien** entworfen und diskutiert, die eine **Ersteinschätzung hinsichtlich des angemessenen Sicherheitsabstands (Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$ in Anlehnung an KAS-18) sowie für die Katastrophenschutzplanung (Dennoch-Szenario$_{KatS}$ in Anlehnung an SFK-GS-45 als Erkenntnisquellen mit Segmentfreisetzung abgeleitet aus der PGS 12)** erlauben. Es erscheint wichtig hervorzuheben, dass die Ergebnisse nur im Kontext der jeweiligen Annahmen und Erläuterungen Gültigkeit haben und in keinem Fall außer Kontext gesetzt werden sollten.

Der für diese Studie zugrunde gelegte **Importbedarf** von Ammoniak im Jahre 2030 von 10 Mio. t/Jahr erscheint im Licht der aktuellen wirtschaftlichen und politischen Entwicklungen in Deutschland als hoch gegriffen. Wahrscheinlicher ist ein um mehrere Jahre verzögerter Hochlauf der Wasserstoffwirtschaft und ggf. Importbedarfs für Ammoniak. Entsprechend wird die Investition in neue Ammoniakterminals sich wahrscheinlich verzögern – was einen dämpfenden Effekt auf die ohnehin geringen ermittelten Umweltwirkungen der Ammoniakterminals haben würde.

Das **Fehlen spezifischer Grenzwerte** für das Abgas von Ammoniak-Crackern im Normalbetrieb erwies sich als Unsicherheitsfaktor für die Studie. Dies ist auch für die anstehenden Genehmigungsverfahren zu erwarten. Hier sollte nach Sicht der Autoren baldmöglichst eine Regelung erfolgen, die die von den Technologie-Lizenzgebern erwarteten Emissionen im Normalbetrieb berücksichtigt.

Die betrachteten Szenarien der Emissionsmassenströme im Normalbetrieb stellen eine konservative Grenzwertbetrachtung dar. Tatsächliche Betriebswerte werden in der Regel darunter liegen, und auch die Anlagen-Aufstellungen können bei realen Projekten naturgemäß abweichen.

Die **Ausbreitungsrechnungen** zur Diskussion der Umweltwirkungen zeigte die hohe Abhängigkeit von den jeweiligen Wind- und Wetterbedingungen. Hierdurch kam der generische Ansatz zur Diskussion nicht näher spezifizierter Modellterminals an seine Grenze. Stattdessen mussten entsprechende realistische Beispielstandorte entwickelt werden – generisch genug, um allgemeingültige Aussagen zu erlauben und ausreichend konkret, um regionale Besonderheiten (Küste vs. Inland) sowie konkrete Wetterdaten berücksichtigen zu können. Daneben stellte insbesondere die Wahl der Höhe der Emissionsquelle von 30 m eine entscheidende Annahme für die Berechnungen dar. Vor dem Hintergrund der Gesamtbetrachtung der Umweltwirkungen

im Kontext der Studie erscheint dies jedoch von untergeordneter Natur. Des Weiteren beeinflusst insbesondere auch die Wahl ausreichend großer Rasterflächen von 500 m x 500 m und eine entsprechende Mittelung der Konzentrations- und Depositionswerte die Ergebnisse. Durch die Betrachtung eines generischen Standortes wurde auf eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowie eine großflächige Analyse geachtet, für die Auswertung von individuellen Standorten sollte der Fokus auf eine detaillierte Analyse gesetzt werden, bei welcher die lokalen Gegebenheiten berücksichtigt werden.

In der Gesamtbetrachtung sind, mit Blick auf den Normalbetrieb auf Basis der getroffenen Annahmen, **keine signifikanten Zusatzbelastungen auf die Umwelt durch eine eingeschränkte Zahl neuer Ammoniak-Terminals in Deutschland zu erwarten**. Punktuell kann es – in Abhängigkeit des jeweiligen Standorts, der Hintergrundbelastung sowie der entsprechenden Ökosysteme – jedoch zu erhöhten bzw. relevanten zusätzlichen Lasteinträgen kommen.

Weiterführende Analysen zur Versauerungs- und Eutrophierungs-Belastung durch Stickstoff-Verbindungen finden sich auf deutscher (siehe PINETI-4-Projekt (Kranenburg, Schaap, Coenen, Thürkow, & Banzhaf, 2024)) oder europäischer Ebene (European Environment Agency, 2024). Die Ergebnisse zeigen, dass bereits heute in weiten Teilen der EU und insbesondere auch in Nord- und Ostsee-Küstennähe der Eintrag von Stickstoffverbindungen in die Böden und Gewässer sehr hoch ist und auch der Critical Load für viele Ökosysteme bereits überschritten ist.

Eine standortabhängige Vorhabensprüfung, die die sowohl bestehende Hintergrundbelastung als auch die vorhabensbedingte Zusatzbelastung abschätzt, bleibt damit auch im Rahmen der Genehmigungsprozesse für Ammoniak-Terminals geboten. Als Ausgangspunkt können hierzu die Daten des UBA-Kartendienst Hintergrundbelastungsdaten Stickstoff auf der Webseite des UBA dienen.[92] Diese enthalten die Hintergrundbelastung für Stickstoff (in kg N ha^{-1} a^{-1}) innerhalb einer Rasterzelle (1x1 km^2) mit entsprechenden spezifischen Depositionswerten für unterschiedliche Landnutzungsklassen. Beispiel Hamburg - Hintergrundbelastung von etwa 30 kg N ha^{-1} a^{-1}.

Unabhängig hiervon ist nach den Ergebnissen des PINETI-4-Projekts auch davon auszugehen, dass ein Großteil der Deposition von Emissionen aus Industrieanlagen nicht in der unmittelbaren Umgebung um die Anlage stattfindet, sondern abhängig von Wind- und Wetterverhältnissen auch über viele Kilometer verteilt wird. Kumulativ gesehen sind die Einträge aus vielen Einzelquellen oft ein zentraler Bestandteil der Hintergrundbelastung. Die potenziell eingeschränkte Zahl an erforderlichen NH_3-Terminals in Deutschland zeigt zusammen mit den in dieser Studie berechneten Depositionsfrachten, dass dieser kumulative Effekt auf die Hintergrundbelastung jedoch weitestgehend vernachlässigt werden kann.

Der **Stand der Sicherheitstechnik für Ammoniak-Terminals** ist derzeit auf dem Prüfstand und wird international diskutiert und weiterentwickelt (z. B. zu PGS 12 in den Niederlanden). Dies hat teilweise erheblichen Einfluss auf die technische Ausführung eines derartigen Terminals (z. B. hinsichtlich der Tankausführung, der Rückverflüssigung von Pendelgas aus Transportschiffen und Kesselwagen sowie der notwendigen Segmentierung von Rohrleitungen) und damit auf die Wahrscheinlichkeit und Auswirkung von Schadensereignissen. Dies beeinflusst wiederum die notwendigen Sicherheitsabstände. Eine nationale Koordination der Sicherheitsanforderungen auf Behördenebene ist daher prinzipiell wünschenswert, bevor die Genehmigungspraxis auf Länderebene Fakten schafft, die bei unterschiedlichen Anforderungen mehr Aufwand und Unsicherheiten nach sich zieht. Der Bedarf für entsprechende Leitlinien als

[92] Siehe https://gis.uba.de/website/depo1/de/index.html.

Orientierung zeigte sich durch Rückmeldungen ausgewählter Akteure (Lizenzgebern, Behörden der Länder, Projektentwickler, etc.) im Rahmen eines projektinternen Fachworkshops im Oktober 2025. Unabhängig hiervon erscheint ein weiterer Erfahrungsaustausch der beteiligten Akteursgruppen geboten.

Die im Rahmen der Studie durchgeführten **Störfallanalysen** haben gezeigt, dass sich durch (schadens-)begrenzende Maßnahmen die Reichweiten der berechneten angemessenen Sicherheitsabstände bzw. bis zur Unterschreitung des Beurteilungswerts wirksam reduzieren lassen. Dies gilt sowohl hinsichtlich der untersuchten Szenarien zur Ermittlung des angemessenen Sicherheitsabstands (Dennoch-Szenarien$_{KAS-18}$) als auch für Szenarien für die Katastrophenschutzplanung (Dennoch-Szenario$_{KatS}$) mit einer Segment-Freisetzung von Ammoniak.

Nichtsdestotrotz sind individuelle anlagenspezifische Betrachtungen für zukünftige Anlagenplanung im Hinblick auf die Störfall-Verordnung durchzuführen, insbesondere mit Blick auf (i) die Anlagengröße und (ii) das (stoffliche) Gefahrenpotenzial. Die Berücksichtigung solcher Dennoch-Szenarien im Rahmen der Planung sind zur Reduktion des Gefahrenpotenzials sowie zur Begrenzung des Schadensausmaßes auch künftig unerlässlich. Dies gilt insbesondere auch unabhängig von der Einhaltung des Stands der Technik und der Sicherheitstechnik.

Aspekte, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht berücksichtigt sind bzw. werden konnten, umfassen

- Emissionen über den gesamten Lebenszyklus des Ammoniaks (produktionsbedingte Emissionen, Transportemissionen der Schiffe bzw. aus Weitertransport via Kesselwagen bzw. Pipeline).
- Detailuntersuchung der Folgen bzw. Auswirkungen der Freisetzung großer Mengen Ammoniak über Wasser, insbesondere hinsichtlich Löslichkeit und Verteilung im Wasser sowie Nebelbildung. Hinsichtlich der Toxizität von Ammoniak bleibt festzuhalten, dass es gegenwärtig keinen gültigen Beurteilungswert für Toxizität im Wasser im Falle der Freisetzung großer Mengen bzw. im Rahmen eines Störfalls gibt.
- Darüber hinaus wurden keine exzeptionellen Störfälle nach StörfallV durch Eingriffe Unbefugter gemäß §3(2) StörfallV) berücksichtigt, da in diesen Fällen keine durch Betreiber zu treffenden Vorkehrungen zu treffen sind (Diese Störfälle liegen außerhalb §5 Abs1 Nr. 1 BImSchG).

Auch parallele aktuelle Entwicklungen zu Störfallbetrachtungen (z. B. Wahl von AEGL-2-Wert vs. ERPG-2-Wert), sowie Diskussionen um heranzuziehende Modelle bzw. die Konvention zur Definition und zu treffende Annahmen im Rahmen der Störfallbetrachtung (Stichwort: VDI 3783-1 bzw. KAS-18) konnten nicht vollumfänglich berücksichtigt werden. Nach Veröffentlichung der neuen Fassungen sind diese für künftige Betrachtungen heranzuziehen.

Die Frage, inwieweit diese Aspekte bei der **Gesamtbewertung** der Eignung bzw. Bedeutung von Ammoniak als Wasserstoffträger Berücksichtigung finden sollten, ist **auf politischer und gesellschaftlicher Ebene zu diskutieren**. Dabei sollten in weiteren Analysen um die potenziellen Sicherheitsrisiken eines großskaligen Einsatzes von Ammoniak als Energieträger über den heutigen Einsatz als chemischer Grundstoff hinaus auch sich ändernde Randbedingungen berücksichtigt werden. Dies beinhaltet etwa folgende Punkte:

1. Die Frage hinsichtlich der Eignung von Ammoniak als Wasserstoffträger geht über rein technische, ökonomische und Umweltaspekte hinaus und sollte vor dem Hintergrund

aktueller **geo- und sicherheitspolitischen Entwicklungen** zunehmend auch Gegenstand der innen- und sicherheitspolitischen Diskussionen sein.

2. Aufgrund des zu erwarteten **gesteigerten Mengenumsatzes** kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass mehr und größere Anlagen mit einem tendenziell geringeren Abstand zu bewohnten Gebieten errichtet werden. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass sich der heutige Ammoniakmarkt auch durch ein hohes Maß an (erdgasbasierter) Vor-Ort-Produktion von Ammoniak durch Dampfreformierung und direkter Weiterverarbeitung zu Düngemitteln oder Sprengstoffen auszeichnet. [93] Höhere Stoffumsätze, weitere Transportwege und längere Verweildauern bergen unweigerlich eine höhere Störanfälligkeit und Risikooberfläche.
3. Die hieraus resultierenden zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen durch Anwendung der BAT im Gegensatz zum bisherigen Einsatz in der chemischen Industrie werden mit **erhöhten Ausgaben und Kosten** (CAPEX und OPEX[94]) verbunden sein, die die Gesamtkosten des Ammoniak-Handlings gegenüber heutigen Maßstäben erhöhen werden. Dies kann nicht zuletzt auch die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber alternativen Energieträgern (z. B. Methanol, Wasserstoff, LOHC) sowie alternativen Wasserstoff-Transportoptionen (z. B. H_2-Pipeline) reduzieren.

Zuletzt sollte außerdem auch die grundsätzliche Frage möglicher Technologie-Alternativen in die politische Risikobewertung einfließen. Dabei ist zu prüfen, ob bestehende oder zusätzliche Risiken gegebenenfalls durch den Einsatz vergleichbarer Technologien gesenkt werden können.

[93] Diese allgemeine Aussage ist jedoch stark von den Erdgas-Rohstoffpreisen abhängig.

[94] CAPEX: Investitionsausgaben, OPEX: Betriebskosten

7 Quellenverzeichnis

Alnajideen, M., Shi, H., Northrop, W., Emberson, D., Kane, S., Czyzewski, P., . . . Valera-Medina, A. (2024). Ammonia combustion and emissions in practical applications: a review. *Carbon Neutrality*. doi:10.1007/s43979-024-00088-6

American Petroleum Institute. (September 2021). API 625: Tank Systems for Refrigerated Liquefied Gas Storage.

Andersson, B. O. (1989). Lithuanian Ammonia Accident March 20th 1989. *ICHEME Symposium Series No. 124*. Abgerufen am 16. 4 2025 von https://www.icheme.org/media/10446/xi-paper-02.pdf

ARIA. (1968). *ARIA No 4988 - Opening of an ammonia tanker truck, Lievin France.* Abgerufen am 29. 04 2025 von https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/4988_en/?lang=en

ARIA. (1993). *Ammonia leak following test on boat loading arm.* Abgerufen am 17. 4 2025 von https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/accident/4320_en/?lang=en

ARIA. (2007). *No. 717: Rupture of a cryogenic ammonia tank, March 20th 1989, Jonova Lithuania (USSR).* Abgerufen am 16. 4 2025 von https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/A717_ips00717_002.pdf

Baboo, P. (2021). Risk Management in Ammonia / Urea Plants. Abgerufen am 29. 04 2025 von https://www.researchgate.net/publication/355586609_RISK_MANAGEMENT_IN_AMMONIA_UREA_PLANTS

Bakli, K. (2006). Safe Ammonia Storage. *2006 IFA Technical Symposium, 25-28 April 2006, Vilnius, Lithuania, Technical Research Paper no. 27.*

BASF. (29. 06 2023). *BASF und Yara evaluieren Projekt für blaues Ammoniak mit niedrigem CO2-Fußabdruck an der US-Golfküste*. Von https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2023/06/p-23-255 abgerufen

Bayerisches Landesamt für Umwelt. (2018). *UmweltWissen - Schadstoffe - Ammoniak und Ammonium.* Abgerufen am 24. 06 2025 von https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_6_ammoniak_ammonium.pdf

Berg, K., & Herrington, A. (2022). Ammonia Flaring: Today and Tomorrow. *Hydrocarbon Engineering*.

Bertagni, M. B., Socolow, R. H., Martirez, J. M., Carter, E. A., Greig, C., Ju, C., . . . Porporato, A. (2023). Minimizing the impacts of the ammonia economy on the nitrogen cycle and climate. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 120*(46). doi:10.1073/pnas.2311728120

BMWK. (07 2024). *Importstrategie Wasserstoff und Wasserstoffderivate*. Von https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/importstrategie-wasserstoff.html abgerufen

Bobbink, R., Loran, C., Tomassen, H., Aazem, K., Aherne, J., Alonso, R., . . . Zappala, S. (2022). *Review and revision of empirical critical loads of nitrogen for Europe; German Environment Agency.* Dessau-Roßlau: German Environment Agency. Von https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/1410/publikationen/2022-10-12_texte_110-2022_review_revision_empirical_critical_loads.pdf abgerufen

Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz. (2012). *Leitfaden zur Ermittlung und Bewertung von Stickstoffeinträgen.* Abgerufen am 04. 08 2025 von https://www.luft.sachsen.de/download/luft/LAI_N-Leitfaden_Langfassung_01.03.2012.pdf

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BKK). (2016). *Drucksache 18/10850 - Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2016 - Freisetzung chemischer Stoffe.* Abgerufen am 07. 05 2025 von https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/Risikomanagement/Risikoanalyse-Bund/Risikoanalyse_2016_Freisetzung_chemischer_Stoffe.pdf?__blob=publicationFile

Bundesregierung. (21. 08 2021). *Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft*. Von verwaltungsvorschriften-im-internet.de: https://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_18082021_IGI25025005.htm abgerufen

Cames, D. M., Wissner, N., & Sutter, J. (2021). *Ammonia as a marine fuel - Risks and perspectives* . Öko-Institut e.V.

Clarke, R. (2002). Environmental Issues in the Federal Republic of Yugoslavia. In *Environmental Problems in East* (S. 396-416). London: Carter, F.W. and Turnock, David,. Abgerufen am 16. 4 2025 von https://westminsterresearch.westminster.ac.uk/download/8dee89eee1f3294e41b8d804e32921ca974ef6b525817aca6dc0bb35ea80ccd9/293201/2002_2_Clarke_chapter_final_author_version.pdf

Dawson, L., Ware, J., & Vest, L. (2022). *Ammonia as a Shipping Fuel: Impacts of large spill scenarios.* Environmental Defence Fund. Abgerufen am 21. 07 2025 von https://www.edfeurope.org/sites/default/files/EDF-Europe-Ammonia-at-sea-FullReport.pdf

Deutsche ReGas. (28. 06 2024). Deutsche ReGas and Höegh-LNG to develop the world's first floating import terminal for hydrogen. Abgerufen am 21. 07 2025 von https://content.deutsche-regas.de/content/press-releases/240628_Pressinformation_Deutsche-ReGas-and-Hoegh-LNG-to-develop-Lubmin-H2-import-terminal_EN_2024-06-29-053647_qelm.pdf

Dharmavaram, S., & Pattabathula, V. (July 2023). Learning from the Worst Ammonia Accident. *AIChE - CEP*, 47-52. Abgerufen am 29. 04 2025 von https://www.aiche.org/sites/default/files/cep/20230747.pdf

DNV. (1987). *Preliminary Risk Analysis of an Ammonia/Urea Plant for CSBP & Farmers Ltd. & Norsk Hydro a.s.* Western Australia: Environmental Protection Authority. Abgerufen am 9. 4 2025 von https://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/PER_documentation/A0020_R0309_ERMP_Preliminary%20Risk%20Analysis.pdf

EEMUA. (2016). *Publication 147 Recommendations for refrigerated liquefied gas storage tanks.* The Engineering Equipment and Materials Users Association.

Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4.* The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES). Von https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/ abgerufen

EU. (28. 11 2023). *Annex on the first Union list of Projects of Common and Mutual Interest.* Von https://energy.ec.europa.eu/publications/annex-first-union-list-projects-common-and-mutual-interest_en abgerufen

EuropaWire. (2024). *Yara Launches Ammonia Import Terminal in Germany, Boosting Hydrogen Economy Efforts*. Von https://news.europawire.eu/yara-launches-ammonia-import-terminal-in-germany-boosting-hydrogen-economy-efforts/eu-press-release/2024/10/03/17/23/55/141584/ abgerufen

European Environment Agency. (10. 12 2024). *Risk of eutrophication measured as exceedance of critical loads of nitrogen deposition in Europe, in 2022.* Abgerufen am 04. 08 2025 von https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/risk-of-eutrophication-measured?activeTab=a7caf3b5-7254-4a24-8919-693d4115158b

EWI. (2020). *Hintergrund Nationale Wasserstoffstrategie*. Von Energiewirtschaftliches Institut Universität Köln: https://www.ewi.uni-koeln.de/de/publikationen/hintergrund-nationale-wasserstoffstrategie/ abgerufen

Fagerli, H., Benedictow, A., Blake, L., van Caspel, W., Denby, B. R., Gauss, M., . . . Tsyro, S. (2024). *EMEP Status Report 2024.* Norwegian Meteorological Institute. Von https://emep.int/publ/reports/2024/EMEP_Status_Report_1_2024.pdf abgerufen

fertilizer europe. (2014). GUIDANCE FOR INSPECTION OF ATMOSPHERIC, REFRIGERATED AMMONIA STORAGE TANKS.

FNBGAS, V. d. (15. 12 2025). *Wasserstoff-Kernnetz*. Von https://fnb-gas.de/wasserstofftransport/wasserstoff-kernnetz/ abgerufen

Franzaring, J., & Kösler, J. (2023). *Review of internationally proposed critical levels for ammonia;.* German Environment Agency. Von https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/review-of-internationally-proposed-critical-levels abgerufen

Fraunhofer-ISE. (2021). *Wege zu einem klimaneutralem Energiesystem*. Von https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html abgerufen

Friedrich-Schiller-Universität Jena. (o. D.). *Stickstoffbedingte Vegetationsveränderungen*. Von https://www.ecology.uni-jena.de/90/stickstoffbedingte-vegetationsveraenderungen abgerufen

Galert, W., Geupel, M., Loran, C., & Scheuschner, T. (2024). *Empirical Critical Loads of nitrogen in Europe.* Dessau-Roßlau: German Environment Agency. Abgerufen am 18. 06 2025 von https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/empirical-critical-loads-of-nitrogen-for-europe

Gant, S., Pearson, A., & Sullivan, E. (2024). Review of ammonia incidents and update on ongoing research activities on ammonia safety. *FABIG Technical Meeting on "Harnessing history: safe design and operation of future energy systems", 23.-24. October 2024.* London. Abgerufen am 4. 9 2025 von https://www.gant.org.uk/research/241023%20HSE%20at%20FABIG%20ammonia%20v9.pdf

Google Maps. (01. 11 2024). *36M4+9C Tarragona, Spanien*. Von https://www.google.com/maps/ abgerufen

Government of Western Australia - Department of Mines, Industry, Regulation and Safety. (2024). *Dangerous Goods Safety Significant Incident Report No. 01-19 - Ammonia release during ship unloading.* Abgerufen am 17. 4 2025 von https://www.worksafe.wa.gov.au/system/files/documents/2024-12/DGS_SIR_0119.pdf

Griffiths, R. F., & Kaiser, G. D. (1982). PRODUCTION OF DENSE GAS MIXTURES FROM AMMONIA RELEASES. *Journal of Hazardous Materials, 6*, 197-212.

Haywood, B. (26. 03 2012). UK's HSE REVIEW OF AMMONIA INCIDENTS 1992 – 1998. Abgerufen am 29. 04 2025 von https://safteng.net/uks-hse-review-of-ammonia-incidents-1992-1998/

Heldstab, J., Schäppi, B., Reutimann, J., Bach, M., Häußermann, U., Knoll, L., . . . Weber, T. (2020). *Integrierter Stickstoffindikator, nationalesStickstoffziel und IST-Zustand (DESTINO Teilbericht 1).* Umweltbundesamt (UBA). Abgerufen am 21. 07 2025 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_texte_96-2020_stickstoffbilanz-teil1.pdf

Hergoualch, K., Akiyama, H., Bernoux, M., Chirinda, N., del Prado, A., Kasimir, Å., . . . van der Weerden, T. J. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.* IPCC.

HPC. (31.10.2024). *Bericht zur Umweltverträglichkeitsprüfung, Mabanaft New Energy Gate Hamburg GmbH, Errichtung und Betrieb eines Ammoniak-Terminals im Blumensandhafen, Hamburg.* Von http://www.uvp-verbund.de/trefferanzeige?docuuid=ea99f74f-29f4-42d5-95d1-d5f2b6500cb5&rstart=0&currentSelectorPage=1&f=state%3Ahh&provider=hh abgerufen

ICP Vegetation. (2017). *Mapping Critical Levels for Vegetation.* Abgerufen am 24. 06 2025 von https://unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2017/AIR/EMEP/Final__new_Chapter_3_v2__August_2017_.pdf

IEA-AMF. (02. 11 2024). *Fuel Properties of Ammonia*. Von https://www.iea-amf.org/content/fuel_information/ammonia#properties abgerufen

ITOPF. (May 2024). *Fate, Behaviour, Potential Damage & Liabilities Arising from a Spill of Ammonia in the Marine Environment.* Abgerufen am 4. 9 2025 von Report for the International Group of P&I Clubs Alternative Fuels Working Group: https://www.itopf.org/fileadmin/uploads/itopf/data/Documents/Papers/ITOPF_Ammonia_-_Fate__Behaviour__Damage_and_Liability_Report.pdf

Jang, H., Mujeeb-Ahmed, M., Wang, H., Park, C., Hwang, I., Jeong, B., . . . Mickeviciene, R. (2023). Regulatory gap analysis for risk assessment of ammonia-fuelled ships. *Ocean Engineering*. doi:10.1016/j.oceaneng.2023.115751

KBR. (2024). Ammonia Cracking Technology - Technical Info Package. *Intern - nicht veröffentlicht*.

Keinan, E. (June 2017). An executive summary of the Professors' Report. *The Israel Chemist and Engineer*(3), 42-48. Von https://www.chemistry.org.il/wp-content/uploads/2022/08/ICE_June-2017.pdf abgerufen

Khan, E. A. (2016). Dap-1 ammonia tank explosion: safety and security concerns in chemical process plant in Bangladesh. *International Journal of Petrochemical Science & Engineering, 1*(1), 10-11. doi:10.15406/ipcse.2016.01.00003

Kranenburg, R., Schaap, P. D., Coenen, P., Thürkow, M., & Banzhaf, D. S. (2024). *PINETI-4: Modelling and assessment of acidifying and eutrophying atmospheric deposition to terrestrial ecosystems.* Umweltbundesamt (UBA). Abgerufen am 24. 06 2025 von https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/pineti-4-modelling-assessment-of-acidifying

Langeveld, J. (2025). PGS 12 Ammonia, New BAT document on ammonia storage in the Netherlands. *EU+OECD Hydrogen Fuel Risks Webinar 4 - 11.03.2025.* Abgerufen am 09. 05 2025 von https://minerva.jrc.ec.europa.eu/en/shorturl/minerva/hydrogen_fuel_risks_webinar_part_4

Linde plc. (2023). *SICHERHEITSDATENBLATT Ammoniak wasserfrei*. Von https://produkte.linde-gas.at/sdb_konform/NH3_10021772DE.pdf abgerufen

Liu, Y., Harikrishnan, B., Kolluru, R., & Mastorakos, E. (2024). Computational fluid dynamics simulation of ammonia leakage scenarios during ship-to-ship bunkering. *Ocean Engineering, 312*(2), 119136. doi:10.1016/j.oceaneng.2024.119136

Lonsdale, H. (k.A.). *Ammonia Tank Failure—South Africa.* Abgerufen am 29. 04 2025 von https://ammonia.co.nz/wp-content/uploads/2021/10/PotchefstroomAiche-17-024.pdf

Mabanaft. (13. Dezember 2024). *Bundesland Hamburg Zulassungsverfahren: Errichtung und Betrieb eines Ammoniak–Lagertanks mit einem Volumen von 80.000 m³ Ammoniak (ca. 55.000 t)*. Von UVP-Verbund: Umweltverträglichkeitsprüfungen der Länder: https://www.uvp-verbund.de/trefferanzeige;jsessionid=D28695198B085BEA5B360606FBDD1EB2?docuuid=ea99f74f-29f4-42d5-95d1-d5f2b6500cb5&f=state%3Ahh abgerufen

Maritime Integrated Decision Support Information System on Transport of Chemical Substances (REMPEC). (1976). *1976 - René 16 - Landskrona, Sweden.* Abgerufen am 29. 04 2025 von https://midsis.rempec.org/en/incidents/1976-rene-16

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., . . . B. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009157896

Ming, L., Mengyao, Y., & Clara, N. K. (2022). *Ammonia as a marine fuel-bunkering, safety and release simulations.* Maritime Energy and Sustainable Development Centre of Excellence. Nanyang Technological University.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2007). *Tampa Bay Pipeline Anhydrous Ammonia Release; Riverview, east of Tampa, FL.* Abgerufen am 29. 04 2025 von https://incidentnews.noaa.gov/incident/7711#!

National Transport Safety Board (NTSB). (2007). *PAB-07/02 - Pipeline rupture and leak with vapor cloud.* Abgerufen am 29. 04 2025 von https://www.ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Reports/PAB0702.pdf

National Transportation Safety Board. (2020). *PAB-20/01: Magellan Pipeline Anhydrous Ammonia.* Abgerufen am 29. 04 2025 von https://www.ntsb.gov/investigations/AccidentReports/Reports/PAB2001.pdf

NIST. (02. 11 2024). *Thermophysical Properties of Ammonia*. Von https://webbook.nist.gov/cgi/fluid.cgi?ID=C7664417&Action=Page abgerufen

Olaf Zinke, a. (2023). *BASF legt Ammoniak-Produktion still und baut 2600 Stellen ab*. Von https://www.agrarheute.com/management/agribusiness/basf-legt-ammoniak-produktion-still-baut-2600-stellen-ab-603952 abgerufen

Orooji, L., & Hosseininia, S. S. (2015). Technical Paper April 2015 - Lessons learned from decommissioning of a liquid ammonia storage tank. *Asian Nitrogen + Syngas 2013 International Conference (17 - 19 November 2014).* akarta, Indonesia. Abgerufen am 17. 04 2025 von https://ureaknowhow.com/wp-content/uploads/2015/04/2015-Orooji-Pardis-Lessons-learned-from-decommissioning-of-a-liqud-ammonia-storage-tank.pdf

Parnum, B. (o. D.). *Ammonia — an assessment of potential environmental impacts including preventation and mitigation measures.* Abgerufen am 21. 07 2025 von https://www.publish.csiro.au/ep/acc/EP23439/EP23439_AC.pdf

Pattabathula, V., Rani, B., & Timbres, D. (2011). The AIChE Ammonia Safety Symposium. *Process Paper.* Abgerufen am 16. 4 2025 von https://ureaknowhow.com/pdflib/535_2011_04_Venkat_AICHE_50_Years_of_Shared_Experiences.pdf

PGS. (2025). *PGS 12: Ammonia - Storage and Loading - Guideline for the safe storage and loading of ammonia.* Publikatiereeks Gevaarlijke Stoffen. Von https://publicatiereeksgevaarlijkestoffen.nl/publicaties/pgs12/ abgerufen

PNAS. (6. 11 2023). *Minimizing the impacts of the ammonia economy on the nitrogen cycle and climate*. doi:10.1073/pnas.2311728120

Riha, A. (26.01.2023). *Serbia: toxic substances and dangerous railways.* Von https://www.balcanicaucaso.org/eng/Areas/Serbia/Serbia-toxic-substances-and-dangerous-railways-223054 abgerufen

Sand, M., Bieltvedt Skeie, R., Sandstad, M., Krishnan, S., Myhre, G., Bryant, H., . . . Stevenson, F. (2023). *A multi-model assessment of the Global Warming Potential of hydrogen.* Communications Earth & Environment. Von 10.1038/s43247-023-00857-8 abgerufen

SEFE. (20. 01 2025). SEFE und Höegh Evi entwickeln internationale Lieferketten für sauberen Wasserstoff. Abgerufen am 21. 07 2025 von https://www.sefe.eu/newsroom/pressemitteilungen/sefe-und-hoeegh-evi-entwickeln-internationale-lieferketten-fuer-sauberen-wasserstoff

Solomon, S. D. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Von https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4_wg1_full_report-1.pdf abgerufen

Statistisches Bundesamt. (2024). *Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Warensystematik WA281410, Genesis Abfrage 51000-0010* .

Stewart, E. (February 2025). Revisiting the Jonava ammonia tank rupture – 35 years on. *Loss Prevention Bulletin, 295*. Abgerufen am 16. 4 2025 von https://www.icheme.org/media/26106/lpb295_pg02.pdf

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., . . . Midgley, P. M. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the*

Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Von http://ipcc.ch/report/ar5/ abgerufen

STÖRFALL-KOMMISSION beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit SFK-GS-26. (1999). *Abschlußbericht - Schadensbegrenzung bei Dennoch-Störfällen Empfehlungen für Kriterien zur Abgrenzung von Dennoch-Störfällen und für Vorkehrungen zur Begrenzung ihrer Auswirkungen.* Abgerufen am 17. 4 2025 von https://www.kas-bmu.de/418.html?_hash=pyndcxnf4Llb5n6PuOzKGVM%2BTmRcDKEk4cQEYLH5BqQ%3D&ctx=a%3A1%3A%7Bs%3A2%3A%22id%22%3Bi%3A22253%3B%7D&d=attachment&f=sfk_gs_26.pdf&p=publikationen%2FSFK-Publikationen%2Fchronologische+Reihenfolge%2Fsfk_gs_26.pdf

Sutton, M. A., Giles, E., & Baker, S. (2007). Atmospheric ammonia: detecting emission changes and environmental impacts–summary report of the UNECE Edinburgh workshop. *Ammonia emissions in agriculture*, 55-57. doi:10.3920/9789086866113_008

The Guardian. (2022). *Ukrainian town told to shelter after shelling causes ammonia leak at chemical factory*. Abgerufen am 26. November 2024 von https://www.theguardian.com/world/2022/mar/21/ukrainian-town-told-to-shelter-after-shelling-causes-ammonia-leak-at-chemical-factory

Topsoe. (2023). Efficient and proven ammonia cracking at scale. *Nitrogen+Syngas 385 | September - October 2023* .

U.S. Chemical Safety Board, CSB. (2016). *West Fertilizer Explosion and Fire.* Abgerufen am 21. 07 2025 von https://www.csb.gov/west-fertilizer-explosion-and-fire-/

UBA. (28. 02 2022). *Kurzeinschätzung von Ammoniak als Energieträger und Transportmedium für Wasserstoff. Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken*. Von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/dokumente/uba_kurzeinschaetzung_von_ammoniak_als_energietraeger_und_transportmedium_fuer_wasserstoff.pdf abgerufen

UBA. (2023). *Ammoniak*. Von https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/ammoniak#emittenten-quellen-fur-ammoniak-in-der-landwirtschaft abgerufen

UBA. (30. 01 2025). *Wie hoch sind die Treibhausgasemissionen pro Person in Deutschland und wie viel wäre klimaverträglich?* Von https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/wie-hoch-sind-die-treibhausgasemissionen-pro-person abgerufen

UK Centre for Ecology & Hydrology. (25. January 2017). *Critical Load Exceedance maps*. Von UK Centre for Ecology & Hydrology: http://www.cldm.ceh.ac.uk/exceedances/maps abgerufen

Umweltbundesamt (UBA). (23. 02 2023). *Luftschadstoffe im Überblick - Ammoniak*. Abgerufen am 18. 06 2025 von Ammoniak: https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe-im-ueberblick/ammoniak#emittenten-quellen-fur-ammoniak-in-der-landwirtschaft

Umweltbundesamt. (2004). *Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung vom März 2004.* Abgerufen am 17. 4 2025 von https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3225/dokumente/vollzugshilfe_stoerfall-vo_2004.pdf

Umweltbundesamt. (17. 09 2020). *Einträge von Nähr- und Schadstoffen in die Oberflächengewässer*. Abgerufen am 04. 08 2025 von https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser/eintraege-von-naehr-schadstoffen-in-die#nahrstoffeintrage-sinken-wieder-langsam

Umweltbundesamt. (04. 06 2024). *Nährstoffeinträge über Flüsse und Direkteinleiter in die Ostsee*. Abgerufen am 04. 08 2025 von https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/ostsee/naehrstoffeintraege-ueber-fluesse-direkteinleiter#zustandsbewertung-der-ostsee

Umweltbundesamt. (kein Datum). *Gestatten? Reaktiver Stickstoff!* Von https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/reaktiver-stickstoff/einfuehrung/gestatten-reaktiver-stickstoff/wie-veraendert-der-mensch-den-natuerlichen abgerufen

Umweltministerkonferenz 2019. (2019). *Hinweise zur Prüfung von Stickstoffeinträgen in der FFH-Verträglichkeitsprüfung für Vorhaben nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz - Stickstoffleitfaden BImSchG-Anlagen.* Abgerufen am 18. 06 2025 von https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlaufBericht2019_12.pdf

Umweltministerkonferenz. (2019). *Hinweise zur Prüfung von Stickstoffeinträgen in der FFH-Verträglichkeitsprüfung für Vorhaben nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz - Stickstoffleitfaden BImSchG-Anlagen.* Abgerufen am 18. 06 2025 von https://www.umweltministerkonferenz.de/umlbeschluesse/umlaufBericht2019_12.pdf

United Nations Environment Programme and United Nations Centre for Human Settlements (Habitat). (1999). *The Kosovo Conflict: Consequences for the Environment and Human Settlements.* Nairobi. Abgerufen am 09. 05 2025 von https://www.unep.org/resources/assessment/kosovo-conflict-consequences-environment-and-human-settlements

United States Environmental Protection Agency. (2013). *Aquatic Life Ambient Water Quality Criteria for Ammonia - Freshwater.* Abgerufen am 21. 07 2025 von https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-08/documents/aquatic-life-ambient-water-quality-criteria-for-ammonia-freshwater-2013.pdf

Universität Stuttgart. (24. April 2024). *Stoffdaten von Ammoniak und Wasser*. Von Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung: https://www.igte.uni-stuttgart.de/forschung/waermeuebertragung-und-kaeltetechnik/ammoniak/ abgerufen

VCI. (13. 11 2024). *Chemiewirtschaft in Zahlen 2024*. Von https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chiz-historisch/chemiewirtschaft-in-zahlen-2024.pdf abgerufen

VDI. (2010). *VDI Heat Atlas.* Verein Deutscher Ingenieure. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-540-77877-6

Wattigney, W. A., Coper, D., Drew, J. M., & Orr, M. F. (2009). State Programs to Reduce Uncontrolled Ammonia Releases and Associated Injury Using the Hazardous Substances Emergency Events Surveillance System. *Journal of Occupational and Environmental Medicine, 51*(3), 356-363. doi:10.1097/JOM.0b013e318197368e

A Anhang A: Eigenschaften von Ammoniak

A.1 Chemische Eigenschaften

Tabelle 49: Ausgewählte chemische Eigenschaften von Ammoniak

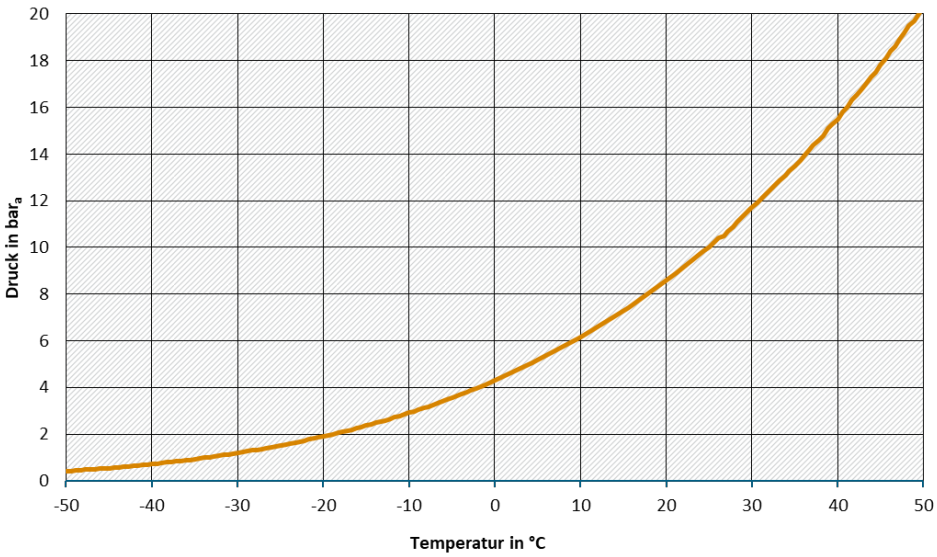
Eigenschaft	Einheit	Wert	Quelle
Chemische Formel		H_3N bzw. NH_3	(NIST, 2024)
Molekulargewicht	kg/kmol	17,0305	(NIST, 2024)
Massenanteil H	kg/kg	0,17755	
Massenverhältnis H/N	kg/kg	0,21588	
Reaktionsenthalpie Ammoniak-Cracking	kWh/kg_{NH3}	0.754	(Topsoe, 2023)

A.2 Physikalische Eigenschaften

Tabelle 50: Ausgewählte physikalische Eigenschaften von Ammoniak

Eigenschaft	Einheit	Wert	Quelle
Siedetemperatur bei 1,013 bar_a	°C	-33,32	(NIST, 2024)
Dichte Flüssigkeit bei 1,013 bar_a/ -33,32 °C	kg/m^3	681,64	(NIST, 2024)
Dichte Gas bei 1,013 bar_a / -33,32 °C	kg/m^3	0,8898	(NIST, 2024)
Dichte Gas bei 1,013 bar_a / 20 °C	kg/m^3	0,7159	(NIST, 2024)
Unterer Heizwert (LHV)	kWh/kg	18,6	(IEA-AMF, 2024)

Abbildung 39: Dampfdruck von Ammoniak als Funktion der Temperatur



Quelle: Eigene Darstellung, ILF – basierend auf Daten aus (VDI, 2010)

A.3 Gefahren

Einstufung gemäß der (EG) Verordnung 1272/2008 in der geänderten Fassung.
(Linde plc, 2023)

Physikalische Gefahren

- Entzündbares Gas
  Kategorie 2
  H221: Entzündbares Gas.

- Gase unter Druck
  Verflüssigtes Gas
  H280: Enthält Gas unter Druck; kann bei Erwärmung explodieren.

Gesundheitsgefahren

- Akute Toxizität (Einatmen - Gas)
  Kategorie 3
  H331: Giftig bei Einatmen.

- Ätzwirkung auf die Haut
  Kategorie 1B
  H314: Verursacht schwere Verätzungen der Haut und schwere Augenschäden.

- Schwere Augenschädigung
  Kategorie 1
  H318: Verursacht schwere Augenschäden.

Umweltgefahren

- Akute aquatische Toxizität
  Kategorie 1
  H400: Sehr giftig für Wasserorganismen.
- Chronische aquatische Toxizität
  Kategorie 2
  H411: Giftig für Wasserorganismen, mit langfristiger Wirkung

A.4 Umweltwirkungen

Ammoniak breitet sich in der Atmosphäre aus, wird transportiert und lagert sich in Ökosystemen ab, wo es dann zu ungewollten und unkontrollierbaren Eutrophierungseffekten kommen kann. Darüber hinaus trägt die atmosphärische Ammoniakdeposition auch zur Versauerung von Böden bei.

Ammoniak schädigt Ökosysteme und Pflanzen aber auch direkt, da es toxisch über die Blattorgane wirkt. Besonders empfindliche Arten sind Flechten, doch auch höhere Pflanzen in nährstoffarmen Heide- und Graslandökosystemen und Bodenvegetation in Wäldern reagieren empfindlich auf Ammoniak. Ammoniak kann dadurch zu Veränderungen in der Artenzusammensetzung von Lebensgemeinschaften und zum Absterben einzelner Arten führen. (UBA, 2023)

B Anhang B: Überlegungen zur Definition der Beispielstandorte

B.1 Landschafts-/Vegetationstypen

Küstenstandorte

An der Ostsee gibt es vor allem Kiefernwälder (in unmittelbarer Küstennähe bei sandigem Untergrund) sowie Heidenlandschaft und landwirtschaftlich genutzte Fläche. Das Land ist flach bis leicht hügelig (höchste Erhebung etwa 179 m). Es gibt mehrere Häfen. Die Umgebung von Rostock ist flach.

Der Hafen in Hamburg befindet sich weit im Inland. Das NH_3-Tankschiff muss hier über die Elbe vorbei an bewohnten Gebieten und auch durch eine Stadt. Das geplante NH_3-Terminal befindet sich in einem Industriegebiet in der Stadt. Hamburg liegt ebenfalls nur wenige Meter über den Meeresspiegel. Teile davon weniger als 3 m. Südlich von Hamburg gibt es eine Erhebung von etwa 150 m über dem Meeresspiegel (u.a. Naturschutzgebiet Buchenwalder und Rosengarten).

Der Nordsee-Tiefwasserhafen Wilhelmshaven und Umgebung liegen nur wenige Meter (bis etwa 3 m) über den Meeresspiegel, teilweise auf dem Niveau des Meeresspiegels. In Hauptwindrichtung befindet sich eine große Wasserfläche (Jadebusen).

Binnenstandorte

Beispielstandorte an Binnengewässern zeichnen sich durch eine große Vielfalt von möglichen Umgebungsbedingungen aus. An den Unterläufen in der Norddeutschen Tiefebene ist das Gelände flach und in der Regel durch landwirtschaftliche Nutzflächen geprägt. Allerdings sind selbst in einer Green-Field-Umgebung Wohnsiedlungen in wenigen Kilometer Entfernung nicht unwahrscheinlich. Am Mittellauf des Rheins (Weser, Elbe und Oder kommen hier wegen der unzureichenden Schiffbarkeit nicht in Betracht) ist das Flusstal zwar meist relativ breit, jedoch teilweise dicht besiedelt und von bewaldeten Mittelgebirgen (Siebengebirge, Taunus, Hunsrück, Odenwald, Schwarzwald etc.) begrenzt, die bei der Ausprägung der Hauptwindrichtung und der Ausbreitung von Emissionen ggf. spezifisch zu berücksichtigen sind.

B.2 Oberflächenbeschaffenheit (Rauigkeit)

Geländerauigkeiten beeinflussen ebenfalls die Ausbreitung des Ammoniaks im Störfall. Im Rahmen von Ausbreitungsrechnungen werden üblicherweise Standardrauigkeiten angenommen. Mit Blick auf die Küstenstandorte ist von vergleichbaren Rauigkeiten auszugehen.

B.3 Gewässertypen

Die Hafenstädte Rostock und Lubmin liegen nahe an der Ostsee. Rostock liegt an der Mündung der Warnow. Das Hafenbecken nur mit einer engen Verbindung mit dem offenen Meer bei Warnemünde verbunden.

Der Hamburger Hafen befindet sich hingegen etwa 80 km flussaufwärts der Elbe im Landesinnern. Trotzdem handelt es sich beim Hamburger Hafen um einen Seehafen, da auch Hochseeschiffe einfahren können. Es ist darüber hinaus ein Tidehafen, da er nicht durch Schleusen vom Meer abgetrennt ist.

In der Nähe der Elbmündung befinden sich ferner der Nationalpark Hamburgisches Wattenmeer, der Teil des Nationalparks Wattenmeer der Nordsee ist. Weitere Nationalparks im

Wattenmeer sind der Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und der Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer. Der größte Teil des Wattenmeers (Abbildung 40) ist Teil eines Nationalparks. Nicht zum Nationalpark gehören die als Schifffahrtsrouten verwendeten Flussmündungen einschließlich das Wattgebiet im Gebiet von Bremerhaven.

Abbildung 40: Wattenmeer Nordsee

Lage des Wattenmeers in der Deutschen Bucht
Quelle: Aotearoa – Eigenes Werk, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2999635

B.4 Wetterdaten

Vorherrschende Windrichtung

In Rostock liegt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit (Monatsmittel) bei etwa 3 m/s (Böen: 6 bis 7 m/s) in 5 m Höhe (basierend auf Messwerte zwischen Juni 2012 und September 2024). Der Wind weht dabei zeitweise von Süd-West (SW) in Richtung Meer und zeitweise von West-Nord-West (WNW) in Richtung Land (Tabelle 51).

In Hamburg beträgt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit 4 bis 5 m/s (Böen: 7-10 m/s) in 5 m Höhe (basierend auf Messwerte von November 2000 bis September 2024). Der Wind weht dabei zeitweise von Süd-West (SW) in Richtung Nord-Ost und zeitweise von West-Nord-West (WNW) in Richtung Ost-Süd-Ost.

In Wilhelmshaven liegen die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten und Böen bei 5 bis 10 m/s (basierend auf Messwerte von Dezember 2007 bis November 2014). Der Wind weht dabei in unterschiedlichen Richtungen.

In Ludwigshafen (am Rhein) liegen die durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten und Böen bei 1 bis 3 m/s (basierend auf Messwerte von Mai 2012 bis Februar 2017). Der Wind weht dabei in unterschiedlichen Richtungen.

Tabelle 51: Vorherrschende Windrichtung

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Ostsee												
Rostock	SW	SW	WSW	WNW	WNW	WNW	WNW	WSW	WSW	SW	SSW	SW
Nordsee												
Flughafen Hamburg-Fuhlsbüttel	SW	SW	WSW	W	WNW	W	WSW	WSW	SW	SSW	SSW	SW
Wilhelms-haven – (Marinestütz-punkt)	SSO	SSW	WSW	NNO	NNO	N	ONO	O	NNO	NNO	NNO	SSO
Ludwigs-hafen / Rheingön-heim	SSW	SSW	WNW	SW	WSW	SW	SSW	S	SSW	S	SO	S

Quelle: Windfinder, https://de.windfinder.com/windstatistics

Niederschlagsmenge

Regen bzw. Luftfeuchtigkeit haben Einfluss auf die Ausbereitung des Ammoniaks sowie die Lachenformierung und können daher mit Blick auf ein Störfallereignis und die Bewertung der daraus resultierenden Umweltwirkungen wichtige Bewertungsfaktoren sein[95]. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge bzw. die jährlichen Niederschlagsstunden und Mengen sind hier mögliche Proxys für die späteren Analysen.

B.5 Weitere Aspekte

Zahl der Anwohnenden

Die Definition der Modellterminals in Kapitel 2.2 sieht als Besiedelung in unmittelbarer Umgebung des Terminals die Kategorien Industriegebiet, Stadtgebiet sowie Green-Field vor.

Insbesondere mit Blick auf schwere Störfallszenarien kann eine stärkere Differenzierung hinsichtlich der tatsächlich potenziell betroffenen Personenzahl sinnvoll erscheinen. Als Proxy können beispielweise die tatsächliche Personenzahl in einem bestimmten Radius oder die Einwohnerdichte in der entsprechenden Region dienen.

[95] Siehe hierzu auch Nanyang Technological University - Maritime Energy & Sustainable Development (MESD) & Centre of Excellence (CoE) (2022): Ammonia as a Marine Fuel – Bunkering, Safety and Release Simulations.

Weitere Schutzobjekte

In § 50 Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG werden neben Wohngebieten außerdem weitere schutzbedürftige Gebiete genannt, von denen durch eine entsprechende räumliche Anordnung schädliche Umwelteinwirkungen oder durch schwere Unfälle hervorgerufene Auswirkungen „so weit wie möglich vermieden werden sollen“. Hierzu zählen insbesondere öffentlich genutzte Gebiete, wichtige Verkehrswege, Freizeitgebiete und unter dem Gesichtspunkt des Naturschutzes besonders wertvolle oder besonders empfindliche Gebiete und öffentlich genutzte Gebäude.[96]

Saisonale Schwankungen (Niedrigwasser)

Bei Standorten an Binnengewässern mit geeigneter Schiffbarkeit für 5.000 t Gastanker (ca. 3 m Tiefgang) ist zu berücksichtigen, das längere Trockenphasen die Schiffbarkeit durch sehr niedrigen Wasserstand einschränken können. Gleiches gilt für extremes Hochwasser.

Wegen der sicherheitstechnischen Anforderungen an die Verkehrstrennung vom sonstigen Schiffsverkehr ist der Jetty für Entladevorgänge in der Regel in einem vom Fluss klar separierten Hafenbecken anzuordnen (vergl. Ammoniakterminal Ludwigshafen im Landeshafen Nord). Hier können Gastanker auch Phasen mit extremen Wasserständen oder Stürme sicher abwettern.

[96] Siehe hierzu auch Verweis in KAS-18: insbesondere öffentlich genutzte Gebiete, wichtige Verkehrswege, Freizeitgebiete und unter dem Gesichtspunkt des Naturschutzes besonders wertvolle oder besonders empfindliche Gebiete und öffentlich genutzte Gebäude

C Anhang C: Vereinfachte Abstandsbestimmung auf Basis der VDI-Richtlinie 3783 Blatt 15.1

Die **VDI-Richtlinie 3783 Blatt 15.1** (2019-08)[97] liefert eine vereinfachte Methode zur Abstandsbestimmung auf Basis der Berechnung von Konzentrations- und Depositionswerten von Luftbeimengungen aus Emissionsquellen mit unterschiedlichen Austrittsbedingungen. Die beschriebenen vereinfachten Verfahren zur Einschätzung der Relevanz von Luftbeimengungen für Stickstoffoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO_2) und Ammoniak (NH_3) können im Rahmen der Genehmigungsverfahren eine wichtige Hilfe darstellen. Die Methode eignet sich allerdings nur zur Bestimmung von Mindestabständen für Quellen mit einer Quellhöhe von bis zu 20 m über Grund (etwa Tierhaltungsanlagen) und dient insbesondere zur Prüfung der Einhaltung von Irrelevanz- oder Bagatellwerten nach der TA Luft. Grundlage der beschriebenen Formeln sind diverse Ausbreitungsrechnungen mit unterschiedlichen Meteorologien und Rauigkeiten, sodass lokale Besonderheiten oder extreme topographische Einflüsse nicht berücksichtigt werden können.

Im Allgemeinen lässt sich beschreiben, dass die Konzentration am Boden und folglich die Deposition der emittierten Stoffe kontinuierlich mit der Entfernung zur Punktquelle abnehmen. Die ermittelten (standortunabhängigen) Abstände beschreiben den Wert, an dem der jeweils einzuhaltende Schwellenwert in Bezug auf das Langzeitmittel (üblicherweise Jahresmittel) der Emissionen unterschritten wird.

Eine Erläuterung der anzuwenden Formeln findet sich in dem Leitfaden „Hinweise zur Prüfung von Stickstoffeinträgen in der FFH-Verträglichkeitsprüfung für Vorhaben nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz - Stickstoffleitfaden BImSchG-Anlagen“ (Umweltministerkonferenz, 2019).

Das Dokument weist jedoch ferner darauf hin, dass „für industrielle und gewerbliche BImSchG-Anlagen mit Schornsteinhöhen von mehr als 20 m“ sich in der Regel nur beim Auftreten von Ammoniak-Emissionen relevante Stickstoffemissionen über 0,3 kg N ha^{-1} a^{-1} ergeben, da Ammoniak stärker im Nahbereich deponiert während Emissionen von Stickoxiden weiter transportiert werden.

Aufgrund der angenommenen Austrittshöhe >20 m im Falle eines NH_3-Crackers im Kontext des hier betrachteten möglichen NH_3-Terminals, müssen für diese Fälle eine separate Betrachtung zur Ermittlung des Einwirkbereichs über Ausbereitungsrechnungen erfolgen. Diese wird im Folgenden beschrieben.

[97] Siehe VDI-Richtlinie 3783 Blatt 15.1 (2019-08): Umweltmeteorologie - Vereinfachte Abstandsbestimmung für die Konzentration und Deposition von Luftbeimengungen - Emission von NOx, SO2 und NH3 aus bodennahen Quellen.

D Anhang D: Ausführungen zur eutrophierenden und toxischen Wirkung von Ammoniak auf Oberflächengewässer im Falle einer Freisetzung

Die Bedeutung einer (großflächigen) Freisetzung Ammoniaks in ein Gewässer liegt insbesondere in seiner toxischen Wirkung auf entsprechende Ökosysteme begründet. Gemäß Beschreibung der European Chemicals Agency (ECHA) ist die Substanz aufgrund ihrer Effekte auf Fische und andere Lebewesen als sehr giftig (H400) einzuordnen. [98]

Auswirkungen von Ammoniak auf marine Ökosysteme

Der Einfluss von Ammoniak auf Meeresökosysteme ist Teil der Diskussionen in (Parnum, o. D.). Hierbei wird insbesondere die exotherme Reaktion von Ammoniak mit Wasser sowie auch die hohe Löslichkeit von Ammoniak als große Herausforderungen für die Simulation dieser Vorgänge beschrieben. Neben der toxischen Wirkung spielt auch die eutrophierende Wirkung von Ammoniak eine wichtige Rolle, die beispielsweise Algenwachstum befördert.

Eine Studie des Environmental Defense Fund (EDF) aus dem Jahr 2022 untersuchte ebenfalls die Auswirkungen von (großen) Ammoniak-Freisetzungen auf marine Ökosysteme, etwa während der Bunkerung oder aufgrund von (unwahrscheinlichen) Schiffskollisionen. (Dawson, Ware, & Vest, 2022) Dabei werden die Auswirkungen auf acht marine Ökosysteme unter Berücksichtigung unterschiedlicher Rezeptoren diskutiert. Die Ergebnisse der Studie sind in Tabelle 52 und Tabelle 53 dargestellt. Während insbesondere die Zunahme des Algenwachstums und Eutrophierung negative Auswirkungen auf diverse Lebensräume darstellt, sind bei Überschreitung der toxischen Konzentrationen insbesondere negative Auswirkungen auf Lebewesen mit zum Teil signifikanten Auswirkungen entlang der Nahrungskette möglich. Hierbei ist zu beachten, dass sich insbesondere in eher alkalischen und warmen Gewässern, das Gleichgewicht von NH_4^+ zu NH_3 verschiebt und daher dieses Ökosysteme besonders von der toxischen Wirkung von Ammoniak betroffen sind. (ITOPF, 2024)

Tabelle 52: Übersicht über potenzielle Auswirkungen einer Ammoniakfreisetzung auf aquatische/marine Lebensräume (Dawson, Ware, & Vest, 2022)

Lebensraum	Wesentliche Auswirkungen von Ammoniak
Flüsse, Ästuare, Feuchtgebiete	Zunahme des Algenwachstums und des biochemischen Sauerstoffbedarfs könnte zu Eutrophierung führen. Toxizität gegenüber Fauna könnte Auswirkungen auf die Dynamik der Nahrungskette haben.
Küstengewässer, Korallenriffe	Zunahme des Algenwachstums und des biochemischen Sauerstoffbedarfs könnte zu Eutrophierung und Überdeckung intertidaler Lebensräume führen. Toxizität gegenüber Fauna könnte Auswirkungen auf die Dynamik der Nahrungskette haben.
Polare Regionen	Veränderungen im Phytoplankton und in der Häufigkeit ammoniakoxidierender Organismen. Toxizität gegenüber Fauna könnte Auswirkungen auf die Dynamik der Nahrungskette haben.

[98] Siehe https://echa.europa.eu/de/registration-dossier/-/registered-dossier/15557/6/1.

Lebensraum	Wesentliche Auswirkungen von Ammoniak
Mangroven	Potenziell positive Effekte auf das Wachstum von Mangroven und die Gesundheit des Ökosystems in nährstoffbegrenzten Systemen. Allerdings könnten Wachstumshemmung, erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit und Hypersalinität auftreten. Toxizität gegenüber Fauna könnte Auswirkungen auf die Dynamik der Nahrungskette haben.
Tiefsee	Auswirkungen unbekannt.

Tabelle 53: Übersicht über potenzielle Auswirkungen einer Ammoniakfreisetzung auf ökologische Rezeptoren (Dawson, Ware, & Vest, 2022)

Ökologische Rezeptoren	Wesentliche Auswirkungen von Ammoniak
Bakterien	Erhöhtes Wachstum bis zur Überschreitung der Toleranzschwelle, was zu verringerter Reproduktionsrate durch verlangsamtes Zellwachstum und Mortalität bei toxischen Konzentrationen führt.
Plankton	Erhöhtes Wachstum bis zur Überschreitung der Toleranzschwelle, was das Ionen-Gleichgewicht verändert, zu gehemmtem Wachstum und Photosynthese sowie Mortalität bei toxischen Konzentrationen führt.
Makrophyten	Erhöhtes Wachstum bis zur Überschreitung der Toleranzschwelle, was das Ionen-Gleichgewicht verändert, zu gehemmtem Wachstum und Photosynthese sowie Mortalität bei toxischen Konzentrationen führt.
Wirbellose Tiere	Verringerung des Wachstums und der Reproduktionsrate sowie Mortalität bei toxischen Konzentrationen.
Reptilien, Fische, Vögel, Meeressäuger	Physiologische Schäden und Mortalität bei toxischen Konzentrationen, Auswirkungen auf Habitat-Qualität und Verfügbarkeit von Beutetieren.

(ITOPF, 2024) beschreibt ferner die Auswirkungen von großen Leckagen von Ammoniak im Vergleich zu Schiffshavarien, bei denen große Mengen Schweröl freigesetzt werden: Aufgrund der Eigenschaften von Ammoniak sind die typischen Maßnahmen zur Schadenseingrenzung und -behebung von Schweröl nicht zu übertragen. Die Gefahren und Schadensschwerpunkte sind zwar auf einen kleinen Bereich beschränkt, doch aufgrund der akuten Toxizität dafür umso umfassender – sowohl hinsichtlich Personen als auch Umweltschäden. Dennoch werden insbesondere weitere Studien gefordert, die helfen, die Auswirkungen auf marine Ökosystem besser zu verstehen.

Während sich im offenen Meer der pH-Wert und die Temperatur jedoch schnell wieder auf das Niveau vor der Verschmutzung einpendeln wird (dies gilt insbesondere mit zunehmender Entfernung vom Schiff) – liegt in Küstenregionen mit geringer Durchmischung eine andere Situation vor: Der Abbau von Ammoniak und die hohe Nitratkonzentration könnten in Umgebungen wie z. B. Feuchtgebiete, Salzwiesen oder Mangroven zu Eutrophierung und

möglicherweise auch zu sauerstofffreien Wasserbedingungen führen, mit potenziellen Schäden auf die Ökosysteme. (ITOPF, 2024)

Im Zuge der vorliegenden Studie wird keine weiterführende Analyse der tatsächlichen Auswirkungen einer Störfallbedingten großskaligen Ammoniakfreisetzung untersucht.

Großflächige Ammoniak-Freisetzung aufgrund eines Störfallereignisses

Neben der Immissionen eines NH_3-Terminals (im Normalbetrieb) stellt sich mit Blick auf das Ökosystem Wasser jedoch generell die Frage, welche Konsequenzen ein Austritt von flüssigem Ammoniak während des Schifftransports oder während der Entladung haben würde. Insgesamt zeigt die Analyse bisheriger Störfallereignisse in Kapitel 5.1.2, dass erst wenige Fälle (mit stets kleinen Ammoniakmengen) für diesen Fall dokumentiert sind. Auch (Jang, et al., 2023) beschreiben weitere Ereignisse im Zusammenhang mit dem Schiffstransport von Ammoniak in den Jahren zwischen 1978 und 2021. Ein Großteil der beschriebenen Vorfälle betraf LPG-Tanker, darunter etwa Explosionen im Maschinenraum durch Lecks im Ammoniak-Tank. Die Autoren fokussieren sich jedoch auf die Auswirkungen an Bord und gehen nicht näher auf die Auswirkungen auf die Umwelt ein – wohl auch, da sich das Ammoniak auf offener See relative schnell verdünnen dürfte.

Inwieweit die Pläne unterschiedlicher Akteure zur Errichtung von sog. Floating Ammonia Crackern[99] eine Erhöhung des Risikos einer Ammoniak-Freisetzung in Gewässer zur Folge haben könnten, wäre Teil weiterführender Risikoanalysen. Es darf jedoch davon ausgegangen werden, dass hierdurch zusätzliche potenzielle Austrittsquellen geschaffen werden.

Generell lässt sich sagen, dass im Fall eines (großflächigen) Ammoniak-Austrittes in ein Gewässer (etwa aufgrund eines Störfall-Ereignisses) das tiefkalte Ammoniak rasch mit Wasser reagiert und unter Freisetzung von Wärme eine Schicht aus Ammoniumhydroxid ($NH_4^+OH^-$) unter der Oberfläche bildet. Während ein Teil hiervon sich zunehmend im Wasser verteilt, verdampft ein anderer Teil des Ammoniaks NH_3 durch die hohen Temperaturen und bildet mit der Luftfeuchtigkeit rasche eine Ammoniakwolke, die sich je nach Windverhältnissen über der Wasseroberfläche ausbreitet.

Diverse Studien modellieren die Auswirkungen eines Ammoniak-Austrittes während des Transports oder der Bunkerung. In (Ming, Mengyao, & Clara, 2022) wird beispielsweise die Freisetzung von etwa 17 t Ammoniak innerhalb 1 Minute angenommen. Die Autoren beschreiben, dass etwa 60% der freigesetzten Menge schließlich im Meerwasser gelöst werden, während 40% zu einer Bildung einer Ammoniakwolke führen. Die tatsächliche Löslichkeit im Wasser hängt demnach jedoch von einer Vielzahl von Faktoren ab, etwa der Verdampfungsrate, mögliche Eisbildung, Wasser- und Lufttemperatur oder auch Verunreinigungen im Wasser. Ein ähnliches Verhältnis von etwa 60% von gelöstem gegenüber verdampftem Ammoniak wird in (ITOPF, 2024) beschrieben. Nur im Falle von einem Austritt von unterhalb 2 m und mehr unter der Wasseroberfläche, nimmt der Anteil des verdampften Ammoniaks auf etwa 5 bis 15% ab.

Das Thema bleibt jedoch Teil weitergehender Analysen.

[99] Entsprechende Ankündigungen finden sich etwa durch die Norwegische Firme Höegh Evi zusammen mit SEFE (SEFE, 2025) oder Deutsche ReGas (Deutsche ReGas, 2024).

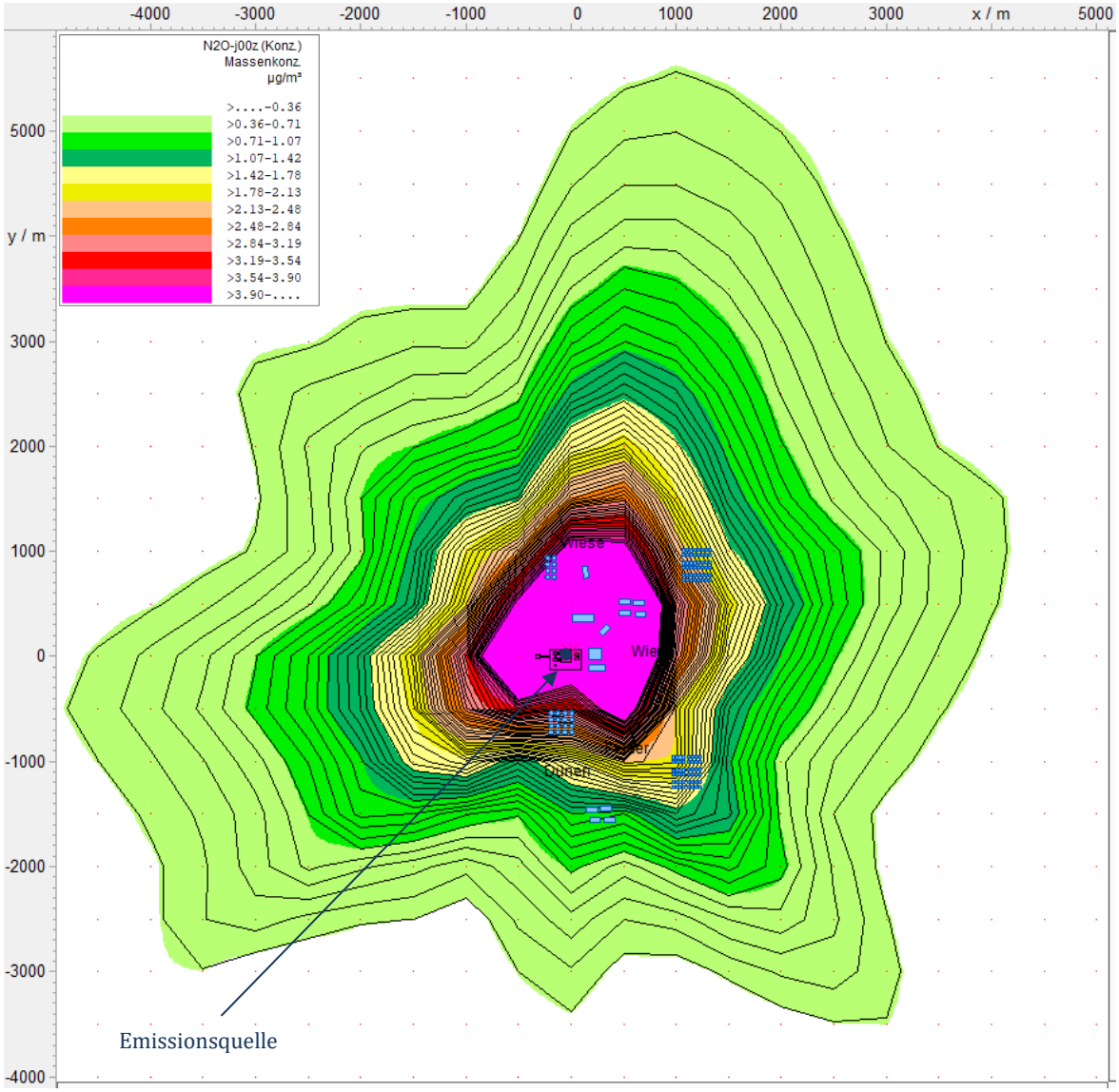
E Anhang E: Ergebnisse der Emissionen während des Normalbetriebs

Im Folgenden sind die Ergebnisse aus der IMMI Emissionsstudie für die verschiedenen Modellterminals zusammengefasst.

E.1 Ergebnisse N-Konzentrationen

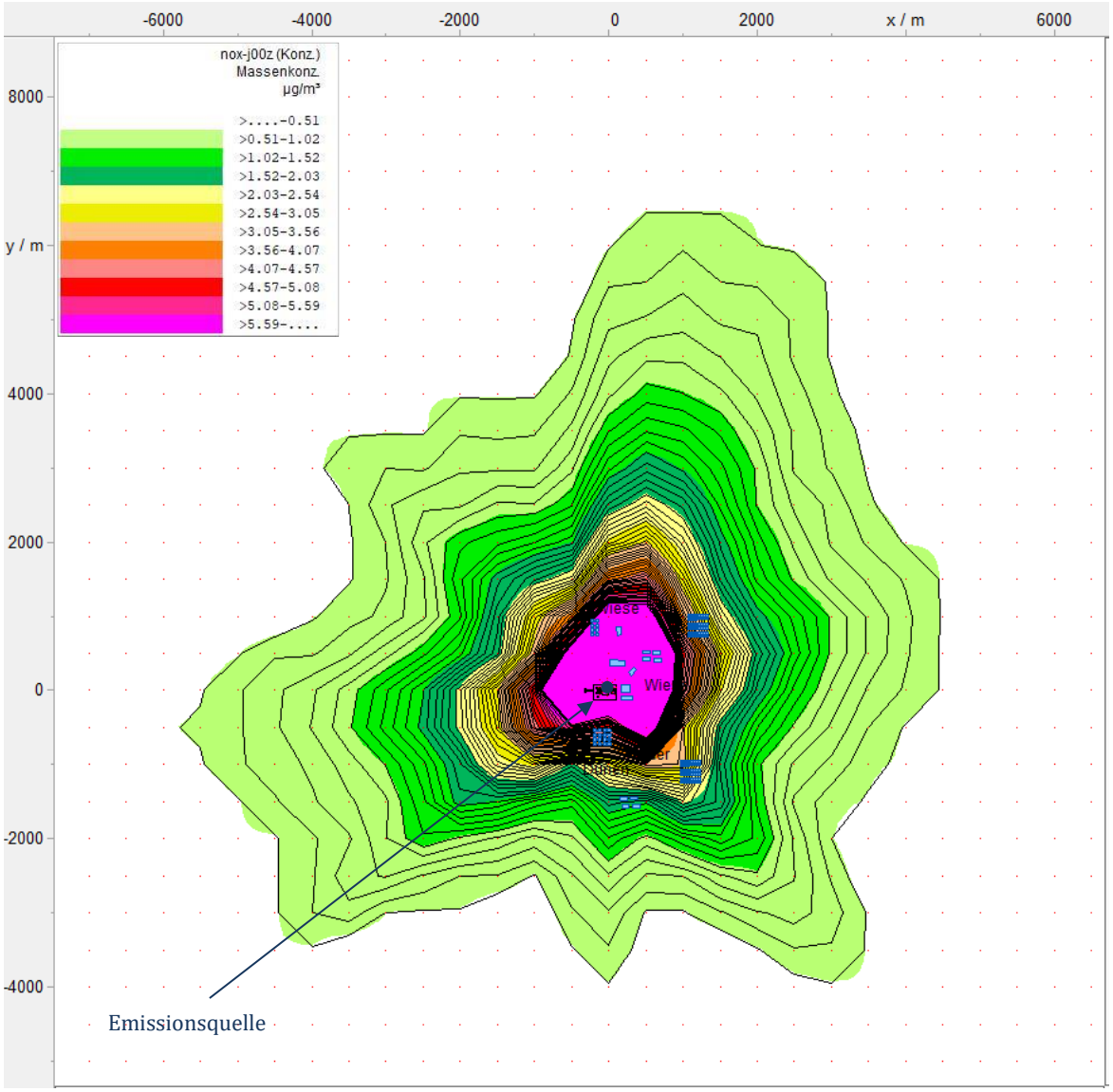
E.1.1 Modellterminal 1

Abbildung 41: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – N_2O-Konzentrationen



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

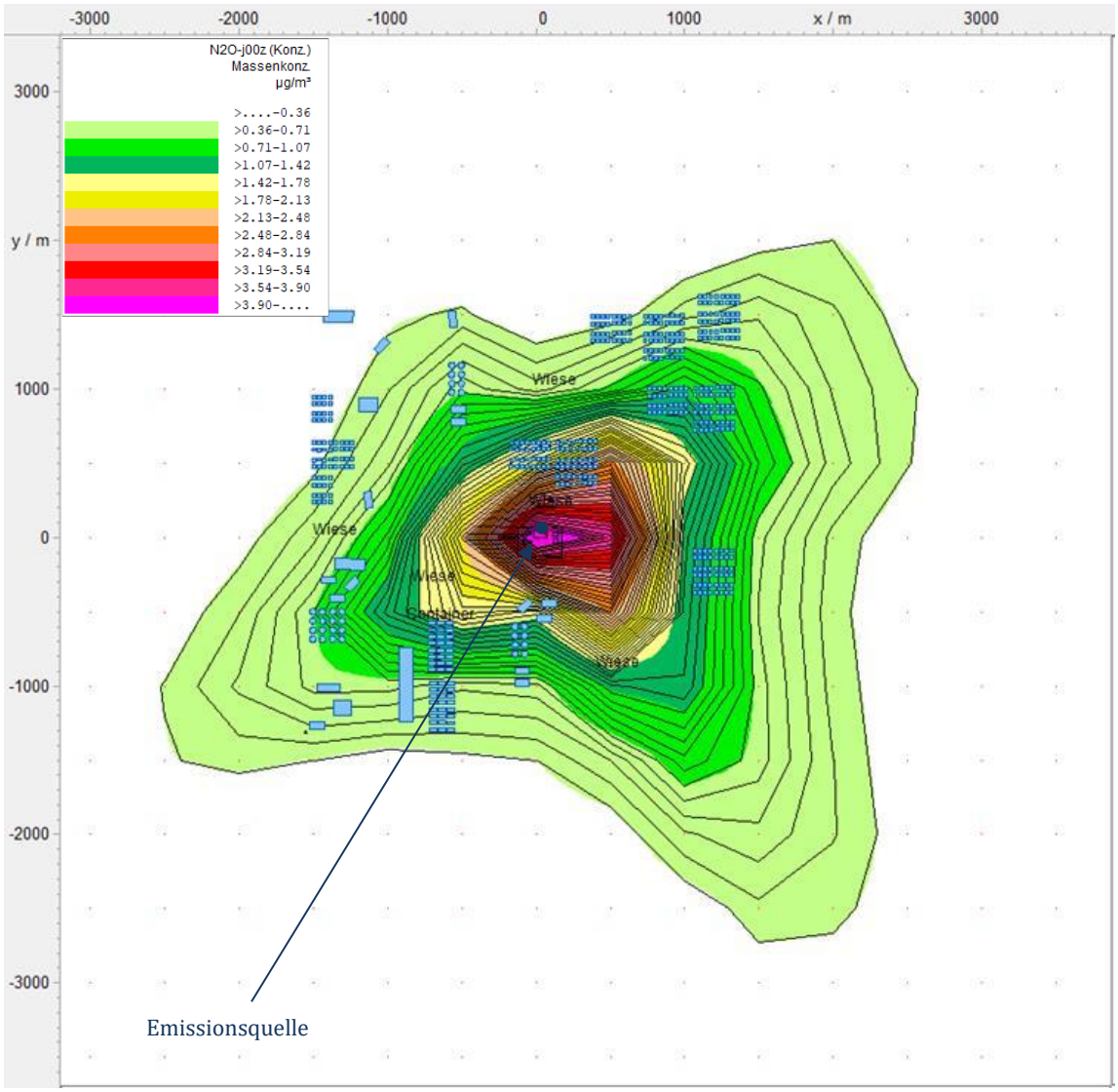
Abbildung 42: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO_x-Konzentrationen



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

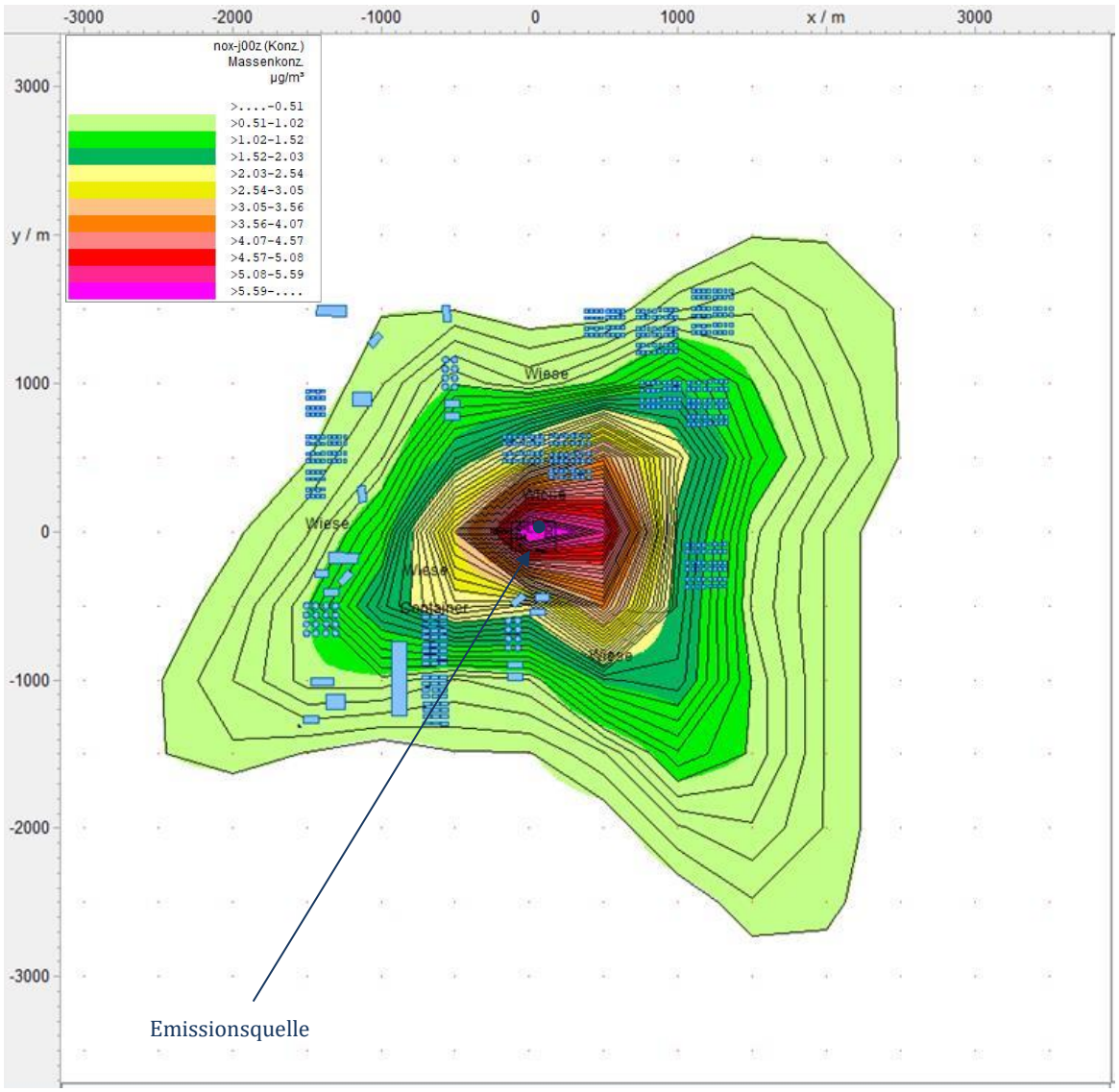
E.1.2 Modellterminal 2

Abbildung 43: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – N_2O-Konzentrationen



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

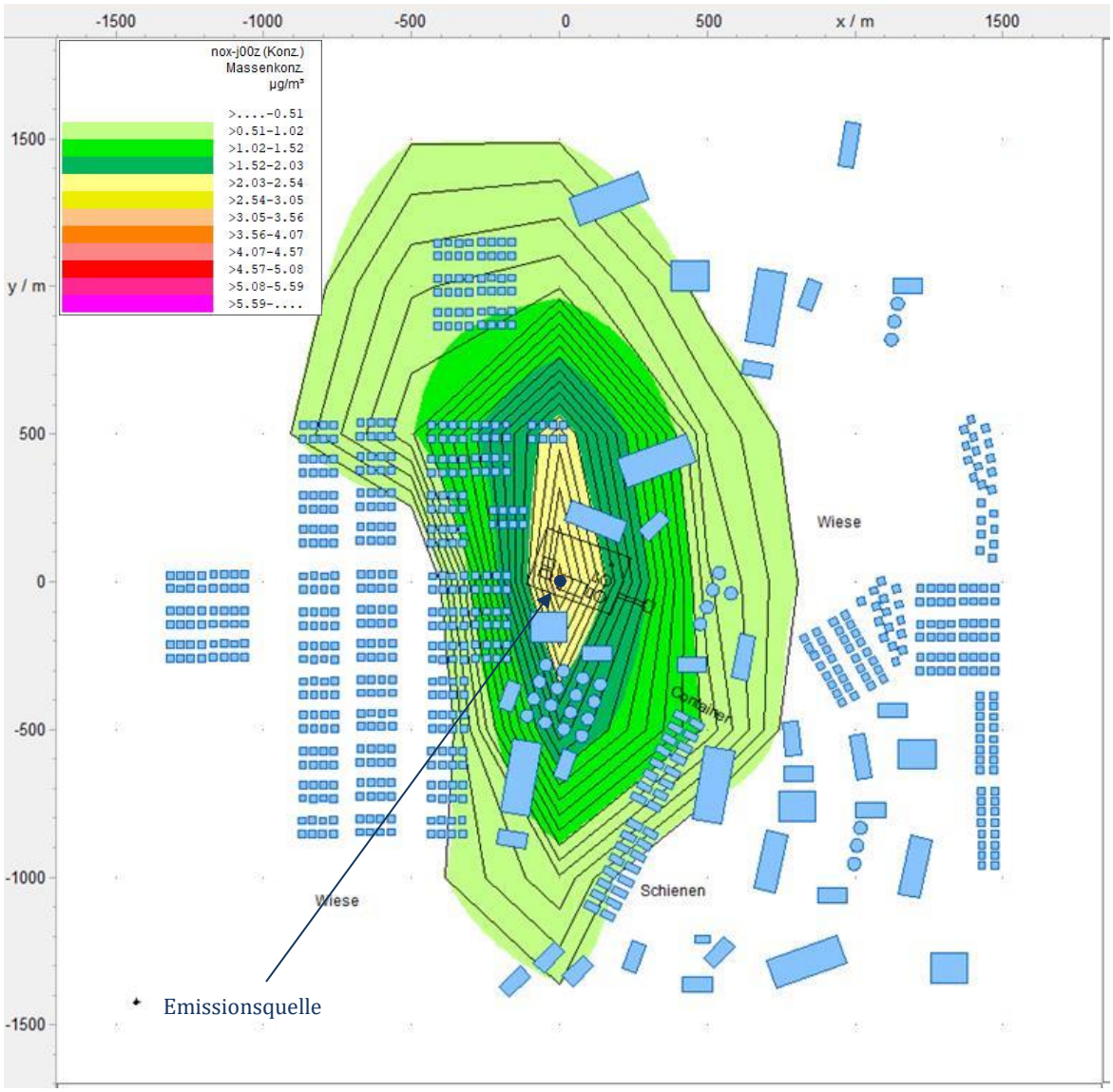
Abbildung 44: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NO_x-Konzentrationen



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

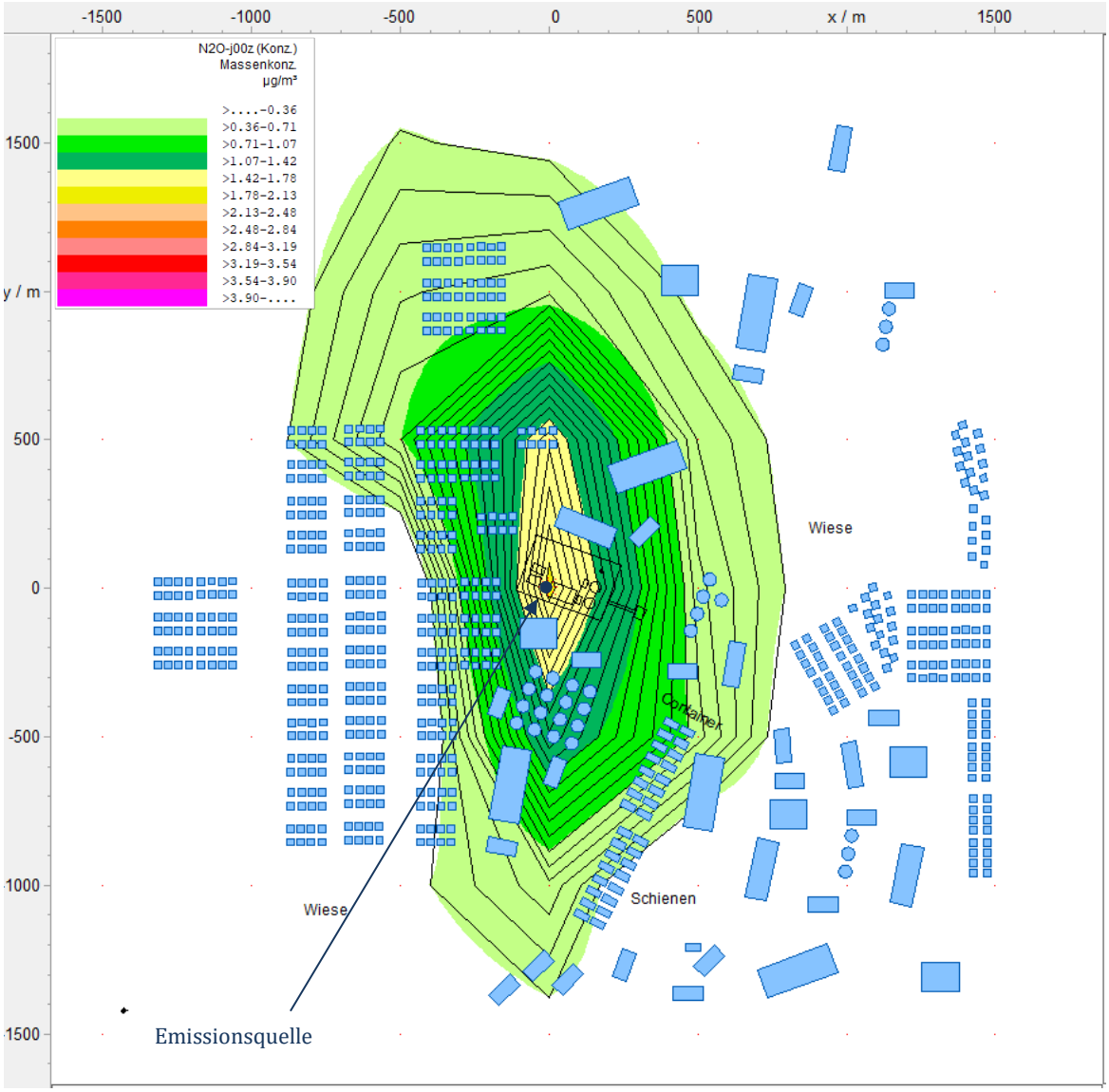
E.1.3 Modellterminal 3

Abbildung 45: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – NO_x-Konzentrationen



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Abbildung 46: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – N_2O-Konzentrationen

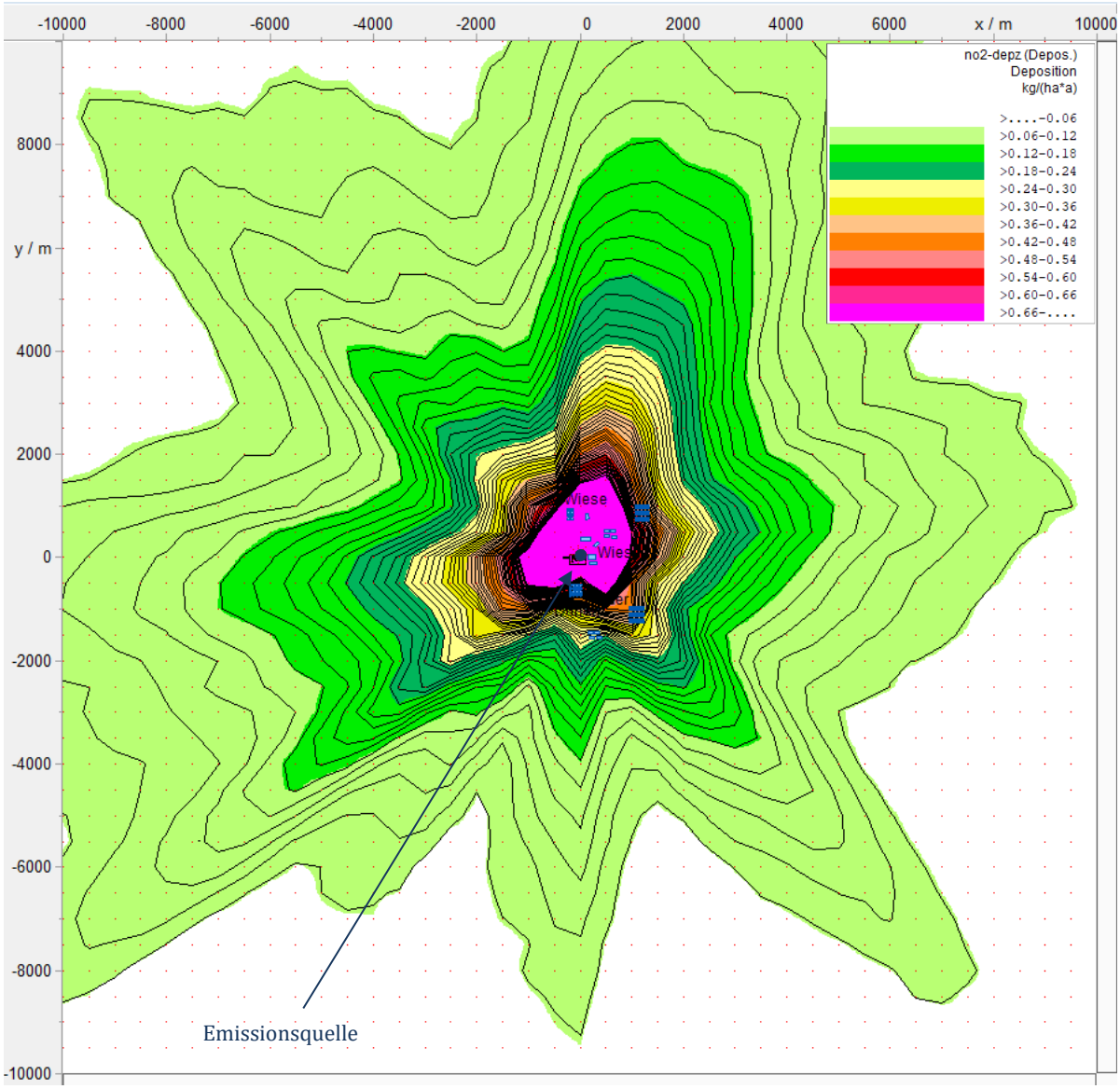


Quelle: eigene Darstellung, ILF.

E.2 Ergebnisse N-Deposition

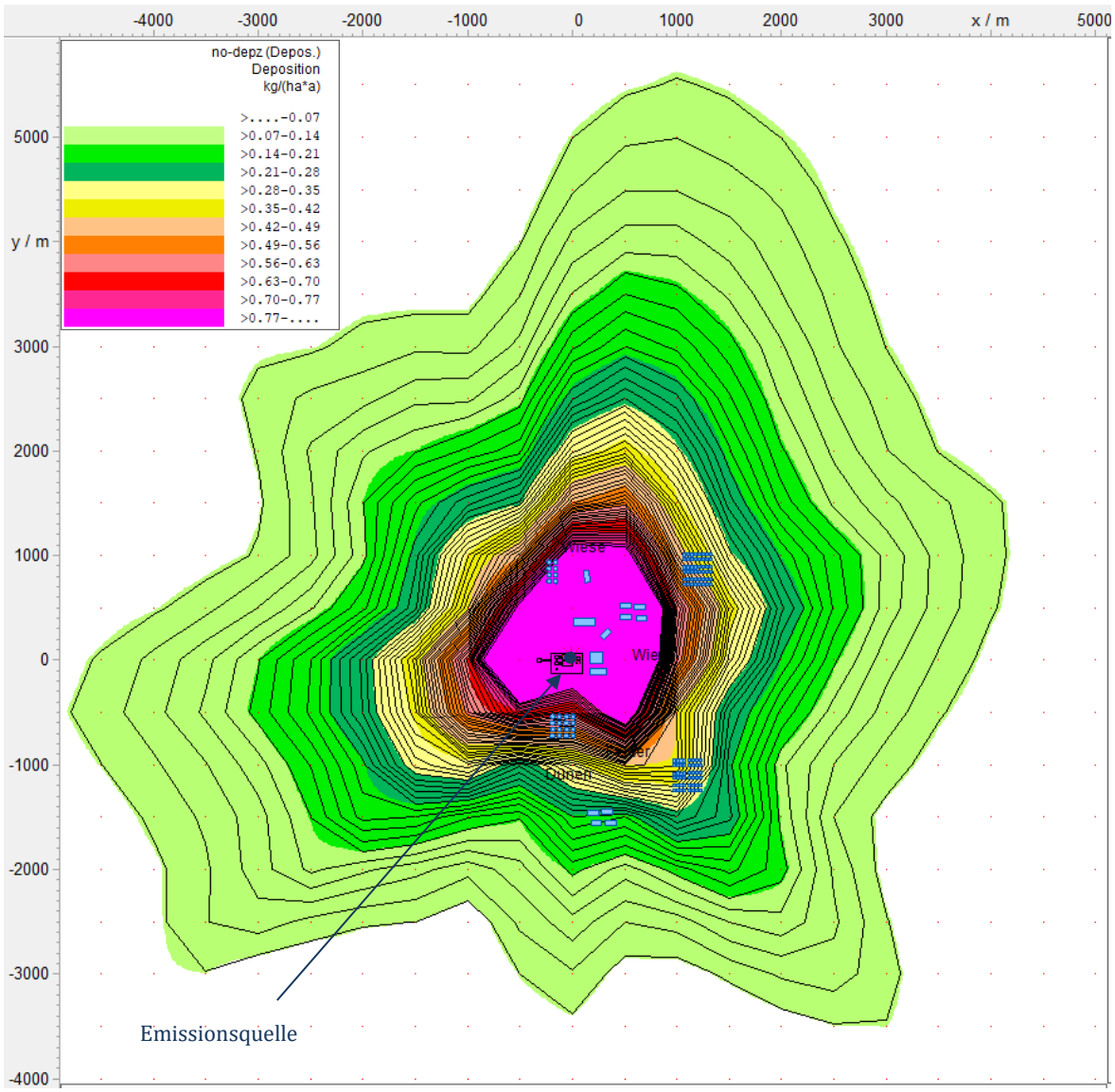
E.2.1 Modellterminal 1

Abbildung 47: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO_2-Depositionen



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

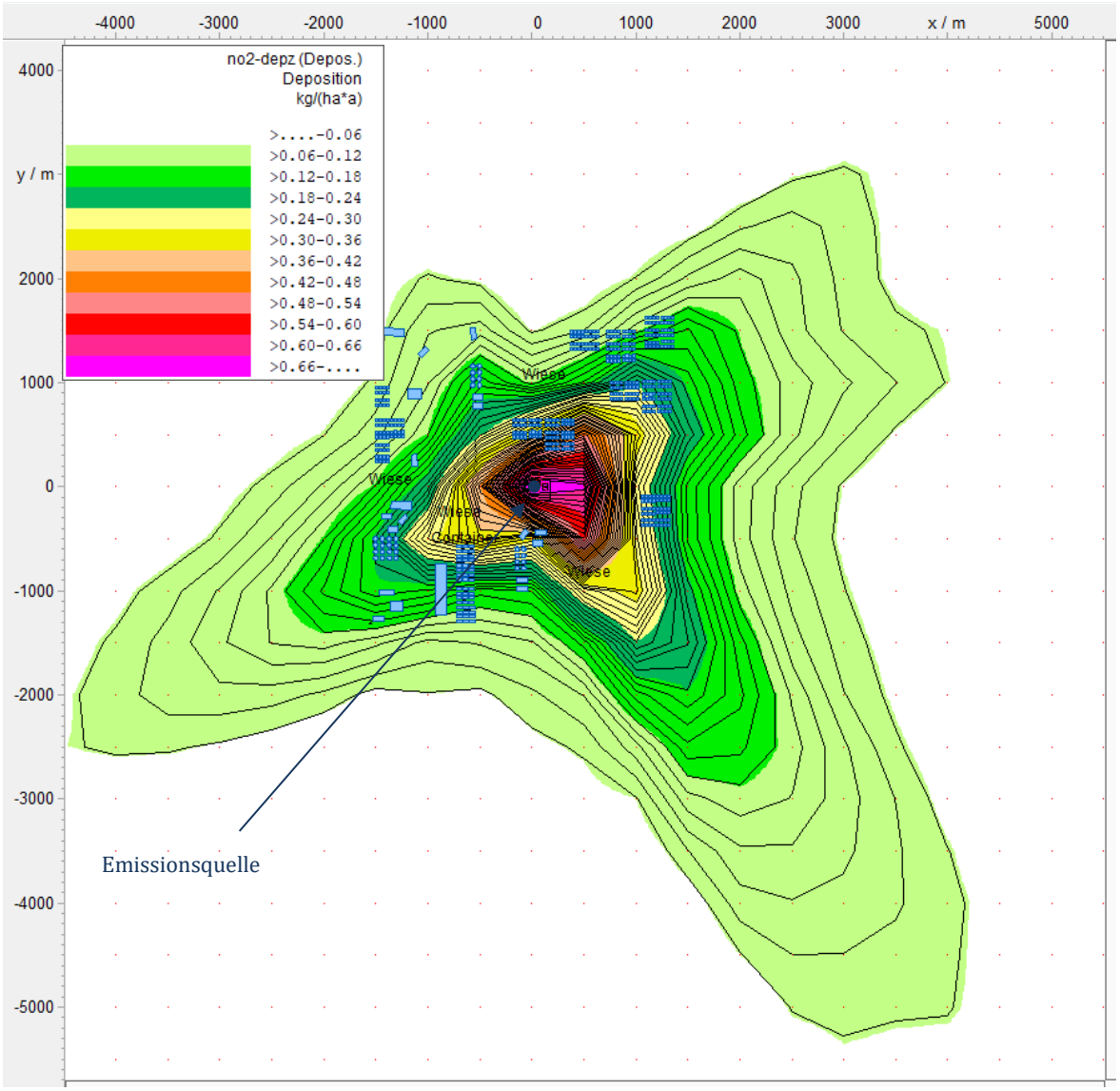
Abbildung 48: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO-Depositionen



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

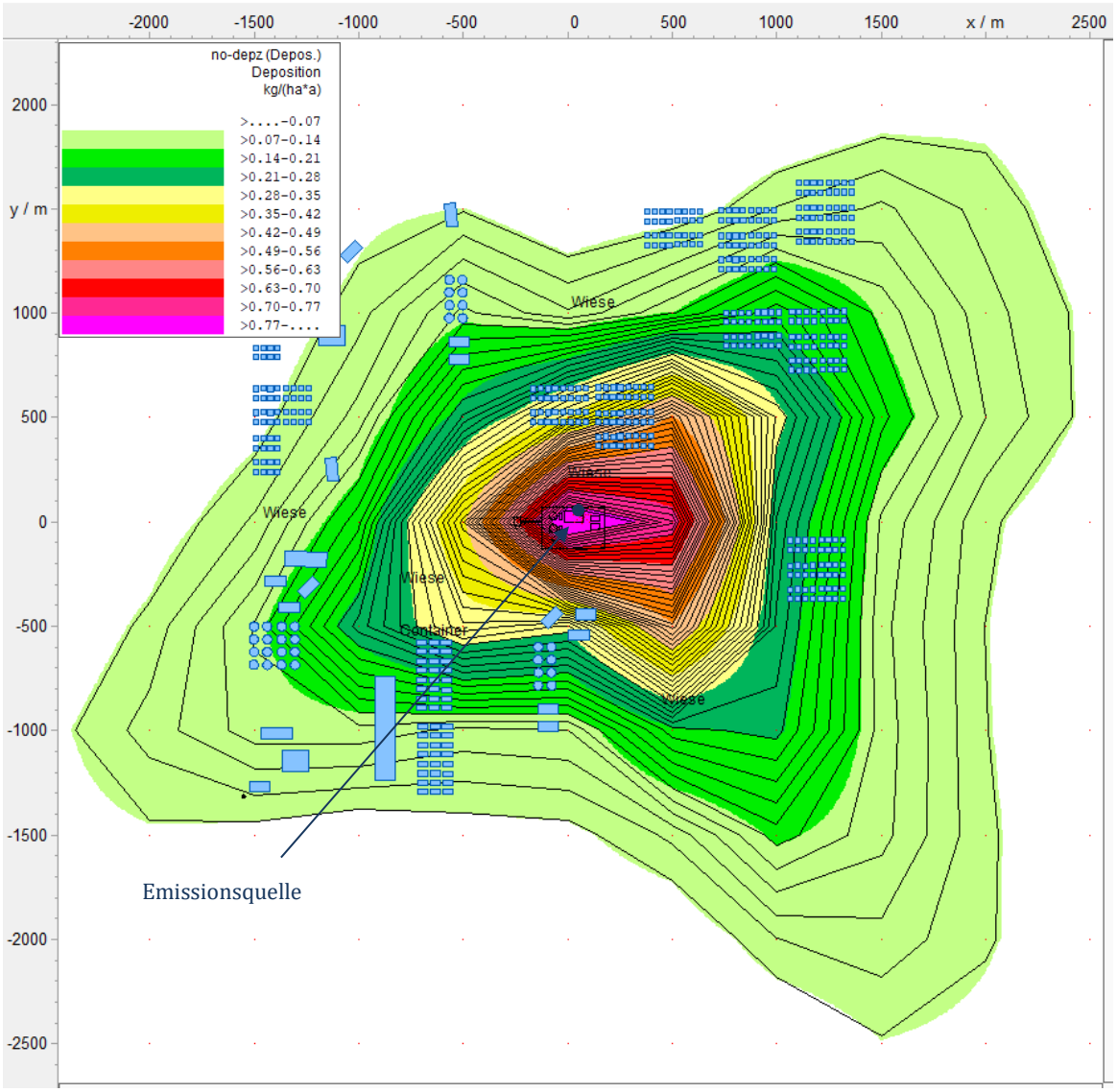
E.2.2 Modellterminal 2

Abbildung 49: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NO_2-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

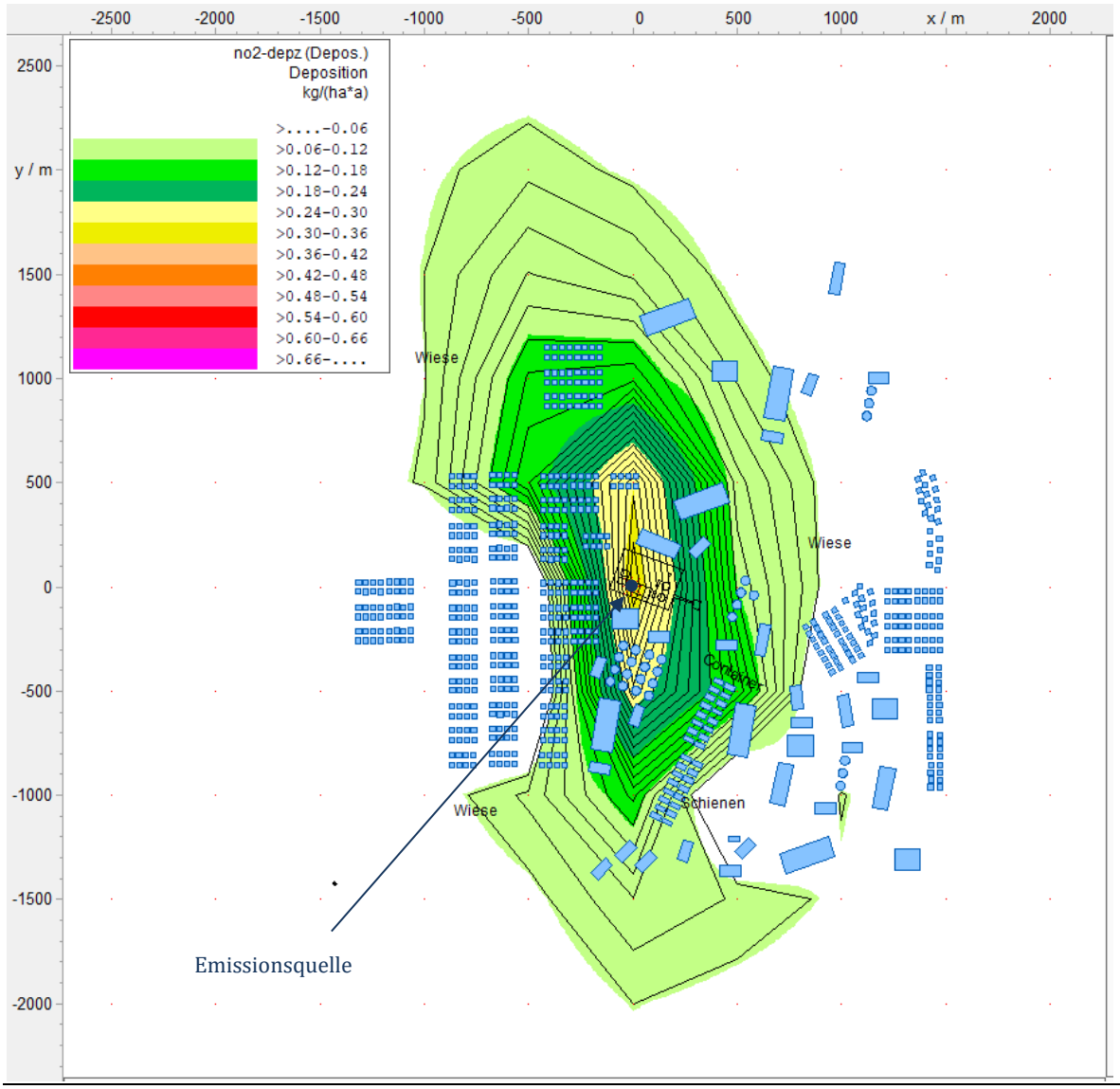
Abbildung 50: Emissionsausbreitung am Modellterminal 2 – NO-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

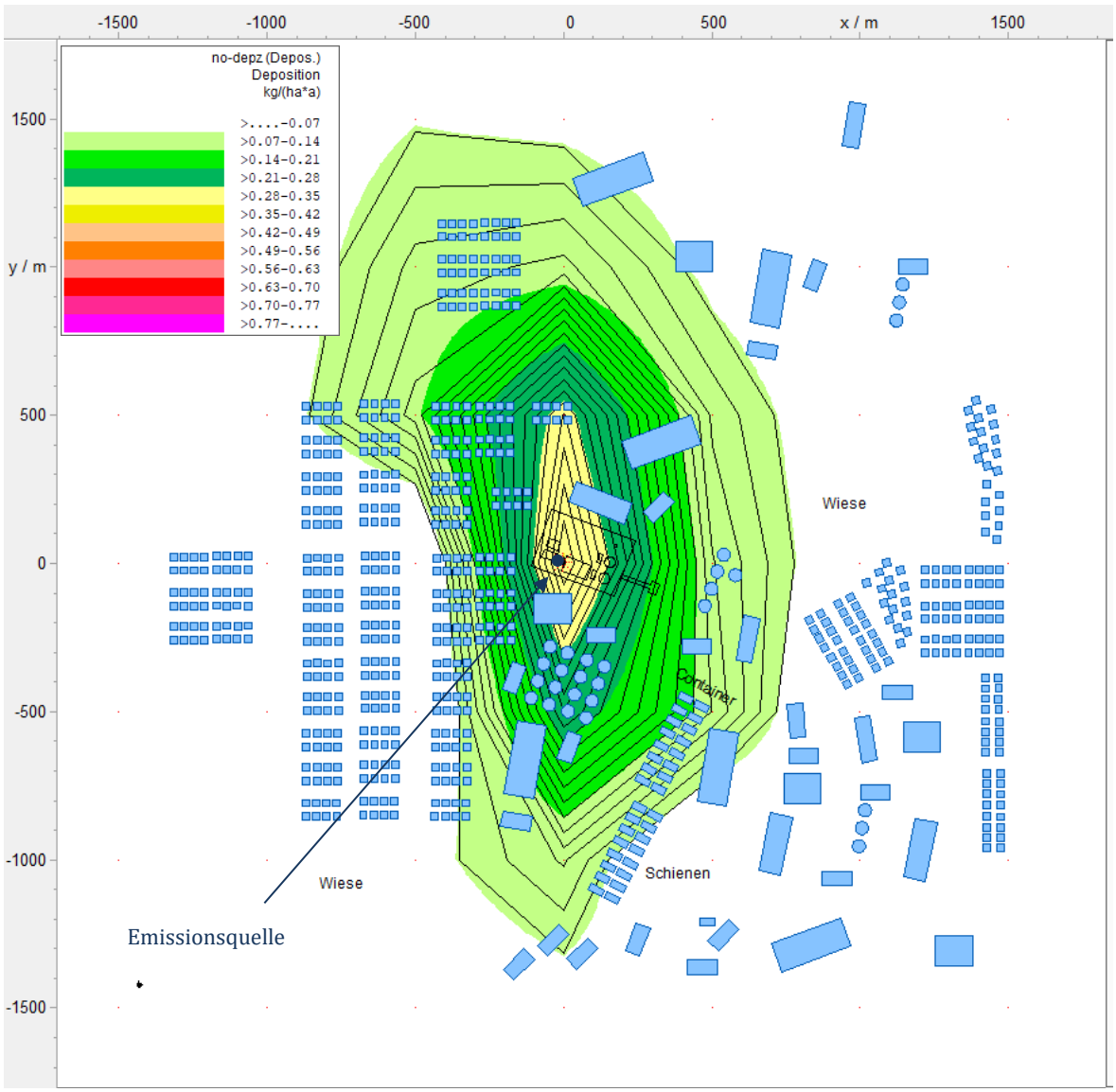
E.2.3 Modellterminal 3

Abbildung 51: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 - NO_2-Depositionen mit modellhaften Gebäuden/Tanks (blau)



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Abbildung 52: Emissionsausbreitung am Modellterminal 3 – NO-Depositionen



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

F Anhang F: Emissionen und Immissionen im Normalbetrieb bei erwarteten Emissionsmengen

In dieser Studie wurden Emissionen im Normalbetrieb gemäß den jeweiligen Grenzwerten bzw., falls diese fehlen, anhand von entsprechenden Arbeitshypothesen, betrachtet (siehe Tabelle 19).

Die tatsächlich erwarteten Emissionen an NO_x und N_2O im Normalbetrieb, insbesondere aus dem Ammoniak-Cracker als einzig wesentliche Emissionsquelle, sind entsprechend der Hinweise von einschlägigen Technologieeignern aber erheblich geringer.

Um diese günstigere Situation am Beispiel des großen Modellterminals 1 zu verdeutlichen, wurden in diesem Anhang erwartete Emissionsmengen im Normalbetrieb definiert und hinsichtlich der resultierenden N-Depositionen untersucht.

F.1 Erwartete Emissionen am Abgaskamin des Ammoniak-Crackers im Normalbetrieb

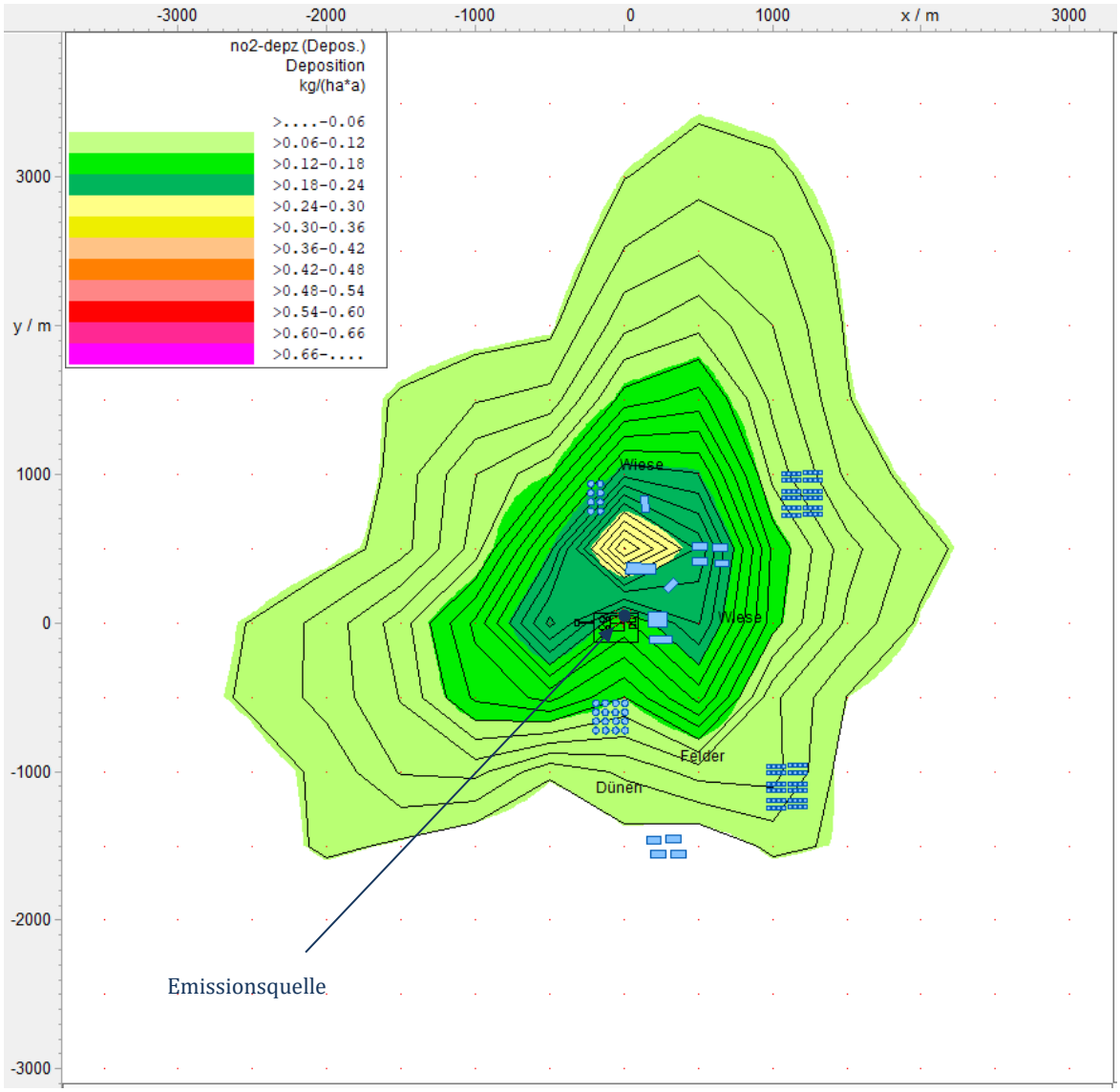
Tabelle 54: Erwartete Emissionen aus dem Ammoniak-Cracker im Normalbetrieb (Modellterminal 1, Jahresmittelwerte)

	Ermittelt aus Grenzwerten bzw. Arbeitshypothesen für diese (siehe Tabelle 21)	Erwartete Betriebswerte[100]	Hinweis
NH_3 (kg/h)	4	4	Kein Unterschied Grenzwert zu Betriebswert
NO_x (kg/h)	40	8	Berechnung N-Deposition siehe F.2 (Aufteilung in NO zu NO_2 90:10)
N_2O (kg/h)	28	2	Nachdem N_2O ein Treibhausgas ist und sich nicht absetzt, wurde es bzgl. N-Deposition nicht weiter betrachtet

[100] Umgerechnet und aufgerundet aus von einem Lizenzgeber (KBR) mitgeteilten Erwartungswerten.

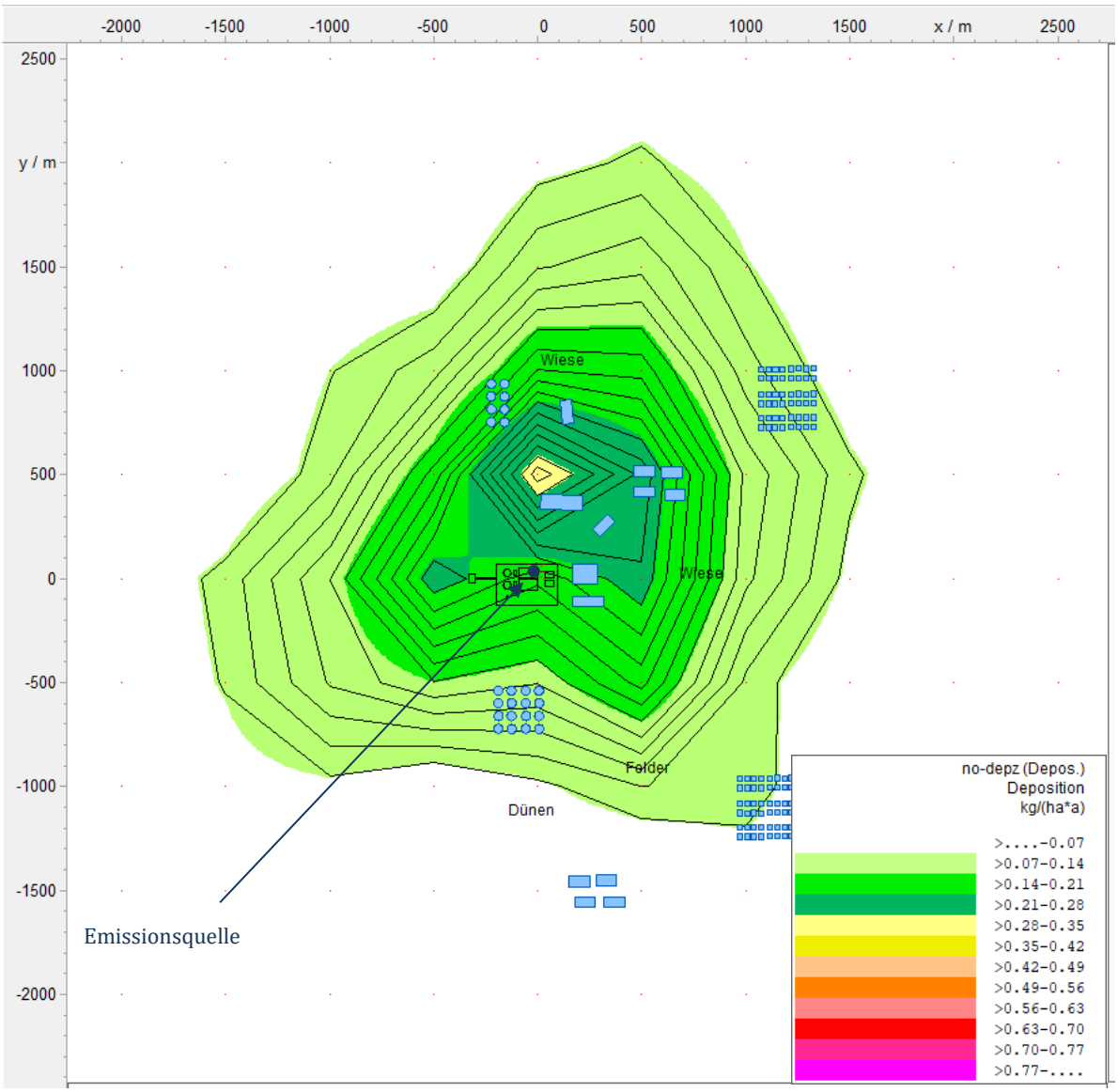
F.2 Erwartete N-Deposition im Normalbetrieb

Abbildung 53: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO_2-Depositionen basierend auf Betriebswerten



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Abbildung 54: Emissionsausbreitung am Modellterminal 1 – NO-Depositionen basierend auf Betriebswerten



Quelle: eigene Darstellung, ILF.

Analog zu den Berechnungen für die Grenzwerte für Terminal 1 (Abbildung im Anhang C2.1) zeigt sich der Einfluss der Wetterbedingung, welche eine Anreicherung der Emissionen nördlich der Anlage verursachen. Vergleicht man die Ausbreitung der Grenzwerte mit den erwarteten Betriebswerten, ist erkennbar, dass die Deposition nicht proportional abnimmt. Die erwarteten Betriebswerte sind um den Faktor 5 kleiner als die Grenzwerte bzw. Arbeitshypothesen. Bei NO wird der Wert von 0,07 kg ha^{-1} a^{-1} bei den erwarteten Betriebswerten bei einer Distanz von 2100 m unterschritten, im Falle der Grenzwerte wird die Isolinie von 0,07 kg ha^{-1} a^{-1} bei einer Distanz von 5500 m zur Emissionsquelle unterschritten, wodurch die Ausbreitung um den Faktor 2,6 kleiner wird. Betrachtet man die maximale Durchschnittskonzentration, wird im Falle der erwarteten Betriebswerte eine maximal Durchschnittsdeposition von 0,305 kg ha^{-1} a^{-1} erreicht, im Falle der verwendeten Grenzwerte liegt bei der verwendeten Rastergröße der maximale Wert bei 1,524 kg ha^{-1} a^{-1} und entspricht somit dem fünffachen Depositionswert des erwarteten Betriebswertes. Das gleiche kann bei NO_2 festgestellt werden, wobei im Falle der erwarteten Betriebswerte eine maximale Deposition von 0,29 kg ha^{-1} a^{-1} erreicht wird, bei der Verwendung

des Grenzwertes hingegen eine maximale Deposition von 1,452 kg ha^{-1} a^{-1}, welches dem fünffachen der Betriebswertdeposition entspricht. Durch die Umwandlung von NO zu NO_2 wird Ausbreitung der einzelnen Emissionen beeinflusst, was die Abweichung zwischen Ausbreitungsflächen erklären kann.

Tabelle 55: Depositionen basierend auf Betriebswerten am Beispiel des Modellterminal 1

Maximale und durchschnittliche Depositionswerte in Bereichen um Emissionsquelle.
Rechnung für 500 m x 500 m Raster.

	Maximale Deposition	Durchschnittliche Deposition in Rasterfläche				
		1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
Deposition in kg ha^{-1} a^{-1}						
NH_3*	2,813	1,679	1,253	0,492	0,122	0,033
NO_2	0,290	0,162	0,143	0,075	0,030	0,014
NO	0,305	0,177	0,139	0,058	0,015	0,004
Deposition in kg-N ha^{-1} a^{-1} (normiert auf N-Anteil)						
NH_3*	2,314	1,381	1,030	0,404	0,101	0,027
NO_2	0,088	0,049	0,044	0,023	0,009	0,004
NO	0,142	0,083	0,065	0,027	0,007	0,002
Gesamt N	-	**1,513**	**1,139**	**0,454**	**0,117**	**0,033**

* keine Veränderung gegenüber Annahmen in Tabelle 26.

Mit Blick auf die Umweltwirkungen ergäben sich durch die angenommenen Betriebswerte für die Depositionsbetrachtung des Modellterminal 1 folgende Anpassungen:

- **Terrestrische Ökosysteme sowie Oberflächen- und Meeresgewässer:** Die Gesamtstickstoff-Deposition liegt um etwa 26% (für 1x1 km-Rasterfläche) bis 43% (20x20 km) unter der auf Basis der Grenzwerte in Kapitel 4 ermittelten Deposition. Folglich ist aufgrund dieser geringeren Zusatzbelastung durch den NH_3-Terminal von einer entsprechend geringeren Umweltwirkung auszugehen.

Tabelle 56: Vergleich Gesamtstickstoff-Deposition Grenzwert- und Betriebswertbetrachtung

[kg N /ha a]	Durchschnittliche Deposition in Rasterfläche				
	1x1 km / 0-0,5 km	2x2 km / 0,5-1 km	4x4 km / 1-2 km	10x10 km / 2-5 km	20x20 km / 5-10 km
Kapitel 4: Grenzwert-betrachtung	2,040	1,572	0,653	0,180	0,058
Betriebswerte	**1,513**	**1,139**	**0,454**	**0,117**	**0,033**
Reduktion in %	26%	28%	30%	35%	43%

- **Vegetation:** keine Anpassungen hinsichtlich der NH_3-Konzentrationswerte.

- **Klimawirkung:** Aufgrund der geringeren erwarteten Emissionen für NO_x und N_2O verändern sich auch die daraus abgeleiteten THG-Emissionen. Diese sinken um 92,5% im Vergleich zu den in Kapitel 4 angesetzten (konservativen) Grenzwerten.

Tabelle 57: Erwartete Emissionen aus dem Ammoniak-Cracker im Normalbetrieb

	Einheit	Normalbetrieb (basierend auf konservativen Grenzwerten siehe Kapitel 4)	Normalbetrieb (basierend auf erwarteten Betriebswerten)
Annahmen		8.500 h/a	8.500 h/a
Ammoniak, NH_3	kg/h	4	4
	t/a	34	34
Stickoxide, NO_x	kg/h	40	8
	t/a	340	68
Lachgas, N_2O	kg/h	28[a]	2
	t/a	238	17
Wasserstoff, H_2	kg/h	0	0
	t/a	0	0

Tabelle 58: Vergleich THG-Berechnung Grenzwertbetrachtung vs. erwartete Betriebswerte

	Einheit	Normalbetrieb (basierend auf konservativen Grenzwerten, siehe Kapitel 4)	Normalbetrieb (basierend auf erwarteten Betriebswerten)
Annahmen		8.500 h/a	8.500 h/a
Ammoniak, NH_3	$t_{CO2\text{-}Äq.}$/a	168	168
Stickoxide, NO_x	$t_{CO2\text{-}Äq.}$/a	622	124
Lachgas, N_2O	$t_{CO2\text{-}Äq.}$/a	64.974[a]	4.641
Wasserstoff, H_2	$t_{CO2\text{-}Äq.}$/a	-	-
Gesamt THG-Wirkung	**$t_{CO2\text{-}Äq.}$/a**	**65.764**	**4.933**

Quelle: eigene Berechnungen, LBST.

G Anhang G: Ergebnisse der Störfallauswirkungsberechnungen

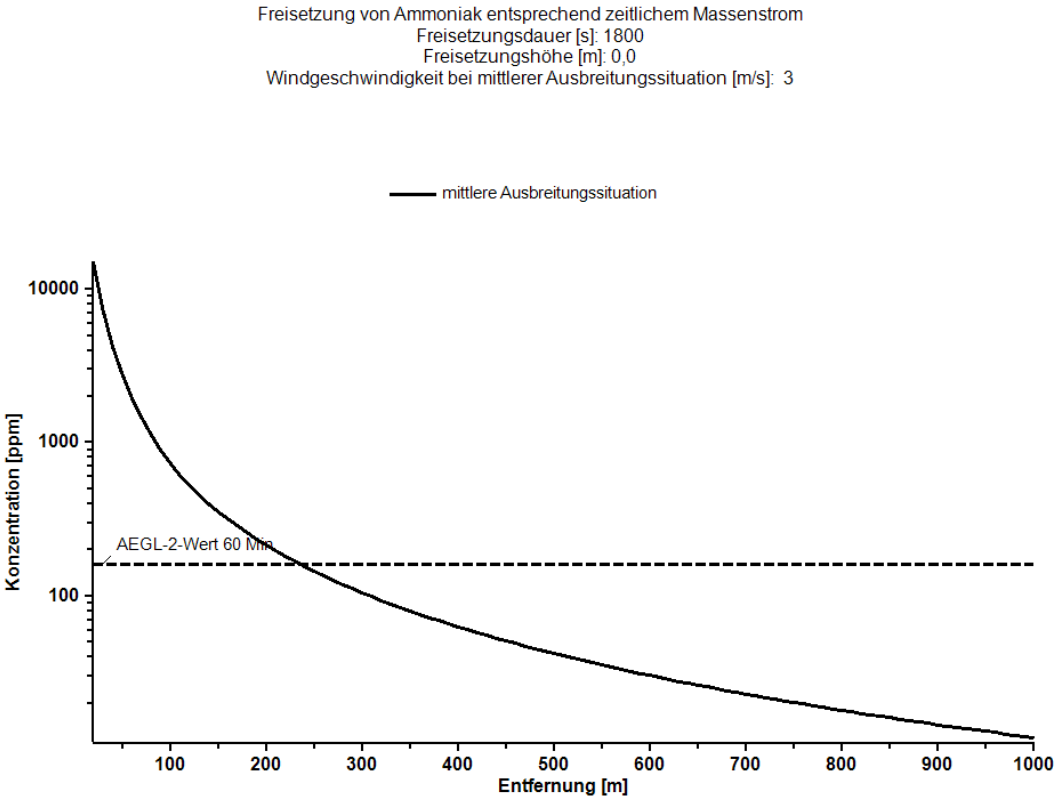
G.1 Szenario A: Angemessene Sicherheitsabstände auf Basis KAS-18

G.1.1 Szenario A1a)/b) Leitung 5 bar Schiff - Tank über Land

Tabelle 59: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario A1a)/b)

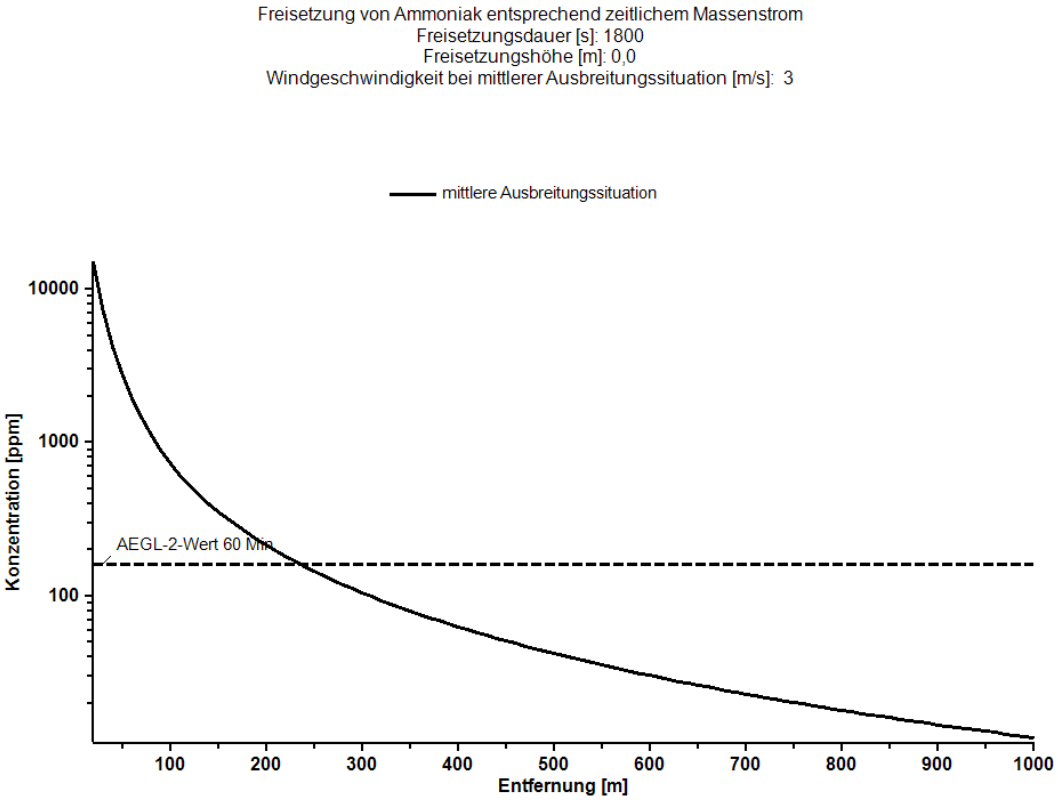
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Ammoniak – NH_3		Massenstrom flüssig / gasförmig aus Leck	7,94 kg/s / 0,006 kg/s
Dichte	681,5 kg/m³ (flüssig)		Freisetzungsdauer / Berechnungsdauer nach KAS-18	600 s / 1800 s
Temperatur	240 K / -33,15 °C		Form der Freisetzung	drucklos verflüssigt
Druck	5 $bar_ü$		Lachenfläche	keine Begrenzung
Freisetzungsart	flüssig		Lachenhöhe	5 mm (Beton)
Ausflussziffer	0,62		Lachenausbreitungsmodell Verdunstungsmodell	Briscoe Shaw mod Habib / Schalau
Leckfläche Austritt	490 mm²		Ausbreitungsberechnung	VDI 3783 Blatt 1/ Blatt 2
Ausbreitungssituation	Mittel		Schwergaseffekt nach Blatt 2 zu berücksichtigen	nein
Bodenrauhigkeit	sehr rau		Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Windgeschwindigkeit	3 bzw. 5 m/s

Abbildung 55: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung Schiff - Tank über Land bei 3 m/s Windgeschwindigkeit



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 56: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung Schiff - Tank über Land bei 5 m/s Windgeschwindigkeit



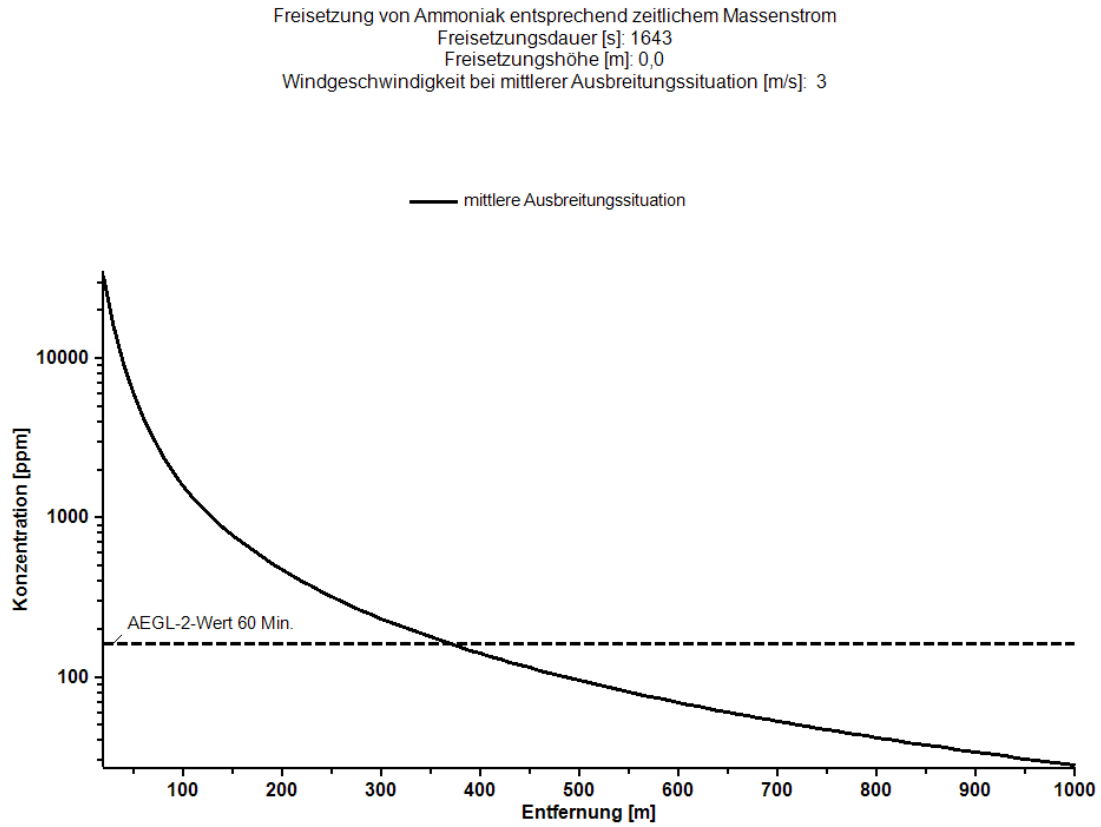
Quelle: TÜV SÜD.

G.1.2 Szenario A2a)/b) Leitung 5 bar Schiff - Tank über Wasser

Tabelle 60: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario A2a)/b)

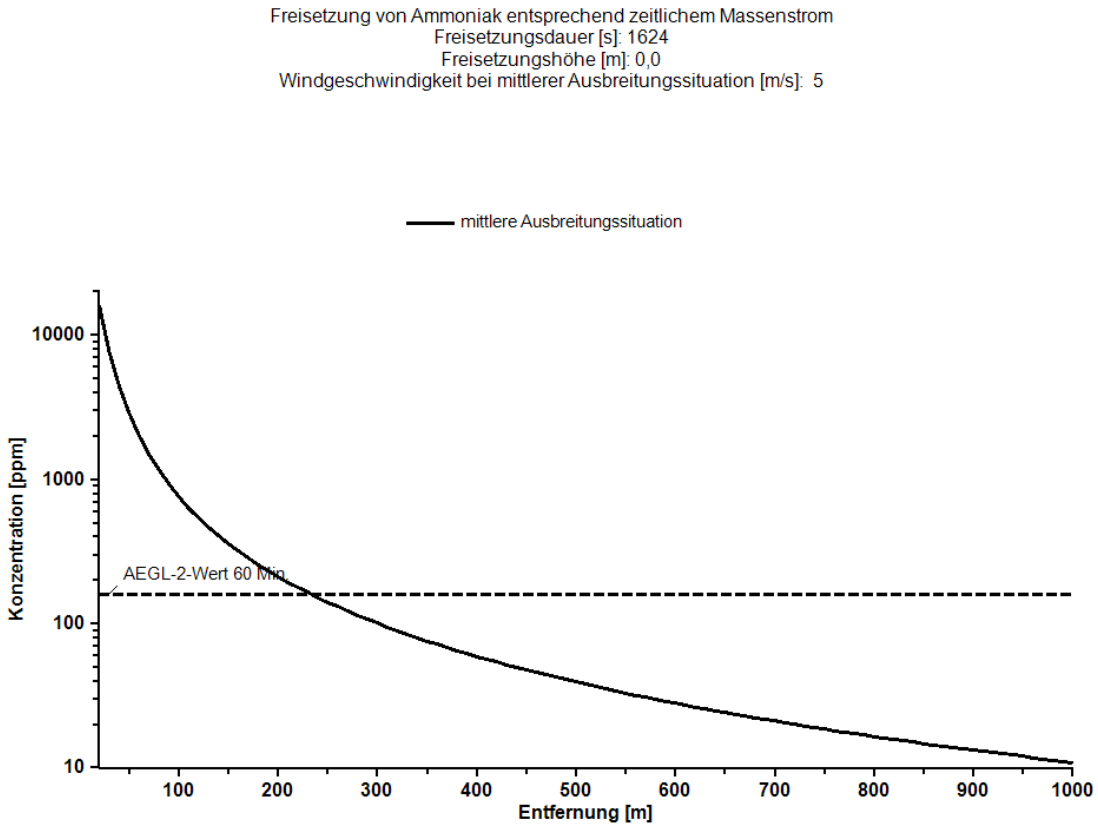
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Ammoniak – NH_3		Massenstrom flüssig / gasförmig aus Leck	7,94 kg/s / 0,006 kg/s
Dichte	681,5 kg/m³ (flüssig)		Freisetzungsdauer / Berechnungsdauer nach KAS-18	600 s / 1800 s
Temperatur	240 K / -33,15 °C		Form der Freisetzung	drucklos verflüssigt
Druck	5 $bar_ü$		Lachenfläche	keine Begrenzung
Freisetzungsart	flüssig		Lachenhöhe	500 W/K/m²
Ausflussziffer	0,62		Lachenausbreitungsmodell Verdunstungsmodell	Briscoe Shaw mod Habib / Schalau
Leckfläche Austritt	490 mm²		Ausbreitungsberechnung	VDI 3783 Blatt 1/ Blatt 2
Ausbreitungssituation	mittel		Schwergaseffekt nach Blatt 2 zu berücksichtigen	Nein
Bodenrauhigkeit	extrem glatt		Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Windgeschwindigkeit	3 bzw. 5 m/s

Abbildung 57: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung Schiff - Tank über Wasser bei 3 m/s Windgeschwindigkeit



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 58: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung Schiff - Tank über Wasser bei 5 m/s Windgeschwindigkeit



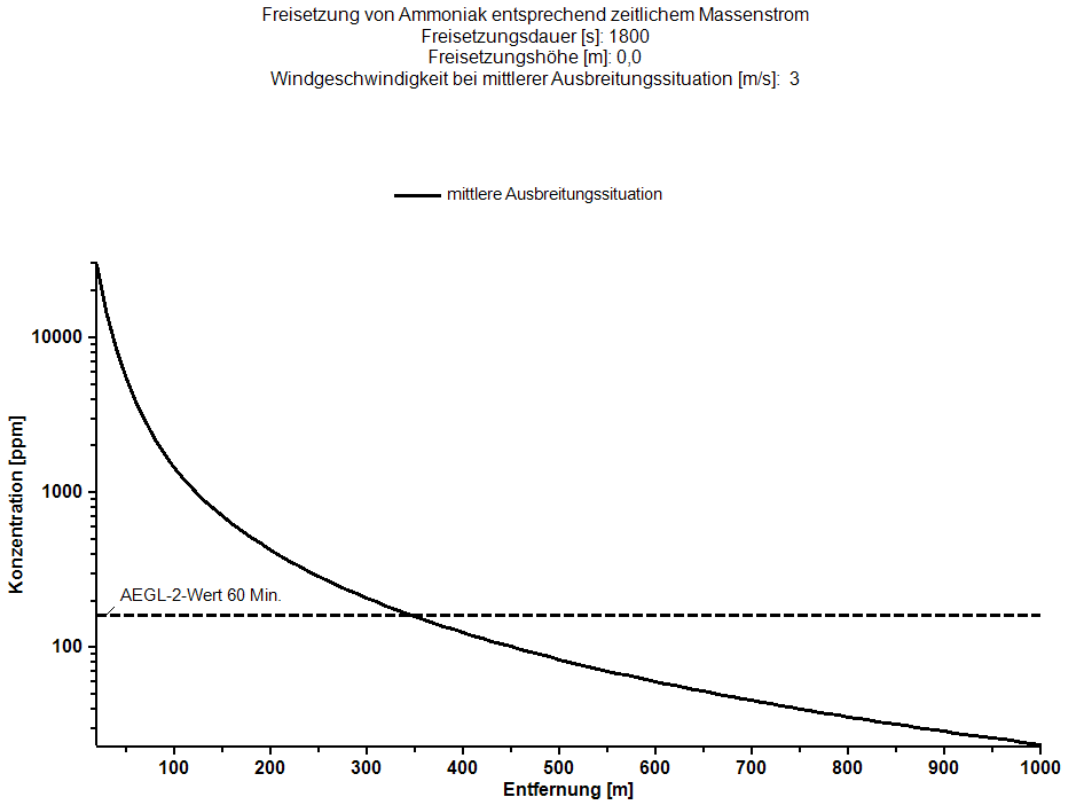
Quelle: TÜV SÜD.

G.1.3 Szenario A3a)/b) Füllleitung Tank zu Transportbehälter ohne Druckausgleich 20 bar

Tabelle 61: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario A3a)/b)

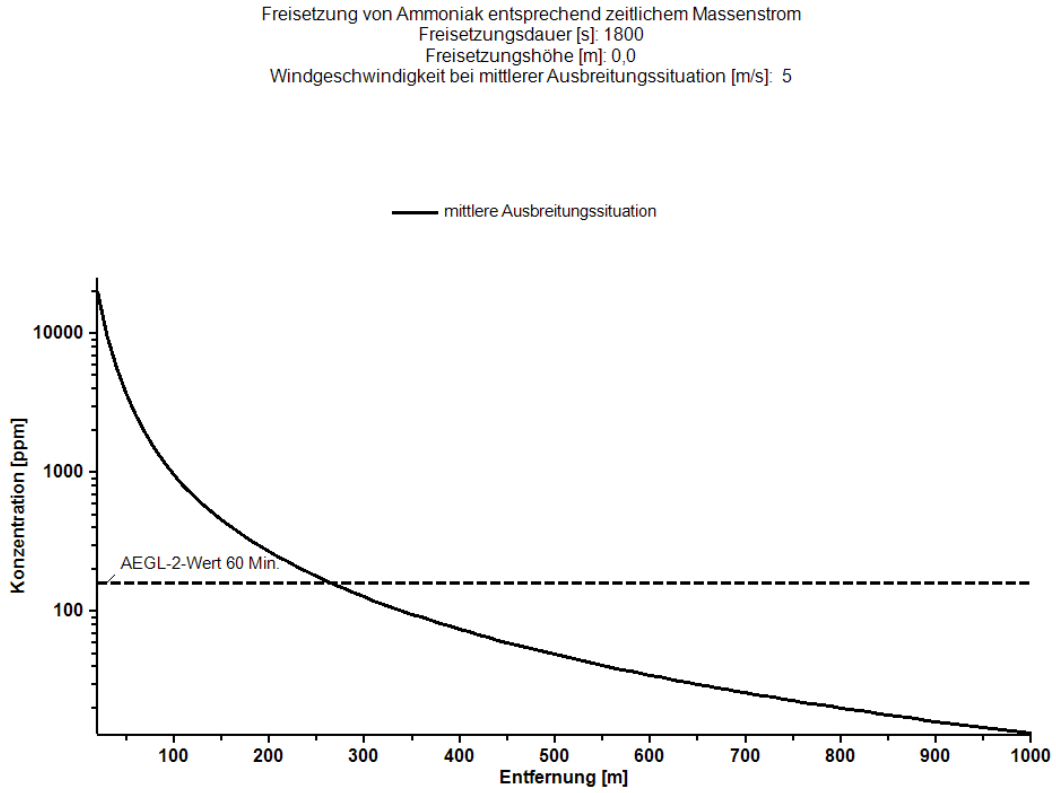
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Ammoniak – NH_3		Massenstrom flüssig / gasförmig aus Leck	15,85 kg/s / 0,013 kg/s
Dichte	681,5 kg/m³ (flüssig)		Freisetzungsdauer / Berechnungsdauer nach KAS-18	600 s / 1800 s
Temperatur	240 K / -33,15 °C		Form der Freisetzung	drucklos verflüssigt
Druck	20 $bar_ü$		Lachenfläche	keine Begrenzung
Freisetzungsart	flüssig		Lachenhöhe	5 mm (Beton)
Ausflussziffer	0,62		Lachenausbreitungsmodell Verdunstungsmodell	Briscoe Shaw mod Habib / Schalau
Leckfläche Austritt	490 mm²		Ausbreitungsberechnung	VDI 3783 Blatt 1/Blatt 2
Ausbreitungssituation	mittel		Schwergaseffekt nach Blatt 2 zu berücksichtigen	Nein
Bodenrauhigkeit	sehr rau		Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Windgeschwindigkeit	3 bzw. 5 m/s

Abbildung 59: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Füllleitung Tank - Transportbehälter bei 3 m/s Windgeschwindigkeit



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 60: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Füllleitung Tank - Transportbehälter bei 5 m/s Windgeschwindigkeit



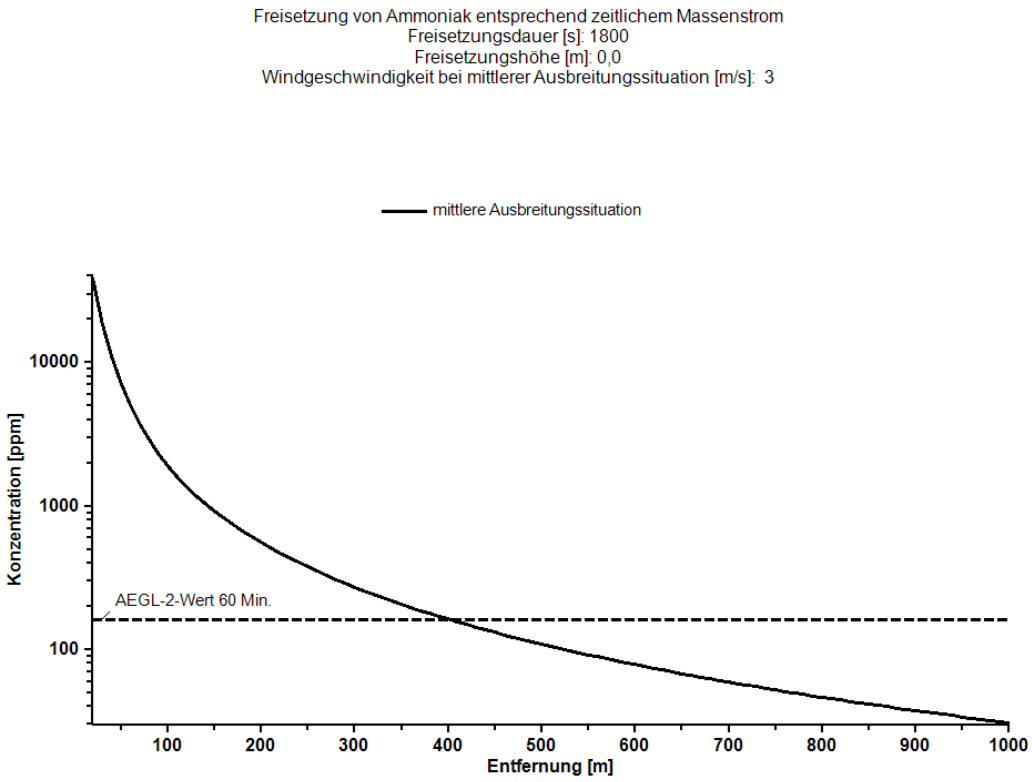
Quelle: TÜV SÜD.

G.1.4 Szenario A4a)/b) Leitung zum Cracker 35 bar

Tabelle 62: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario A4a)/b)

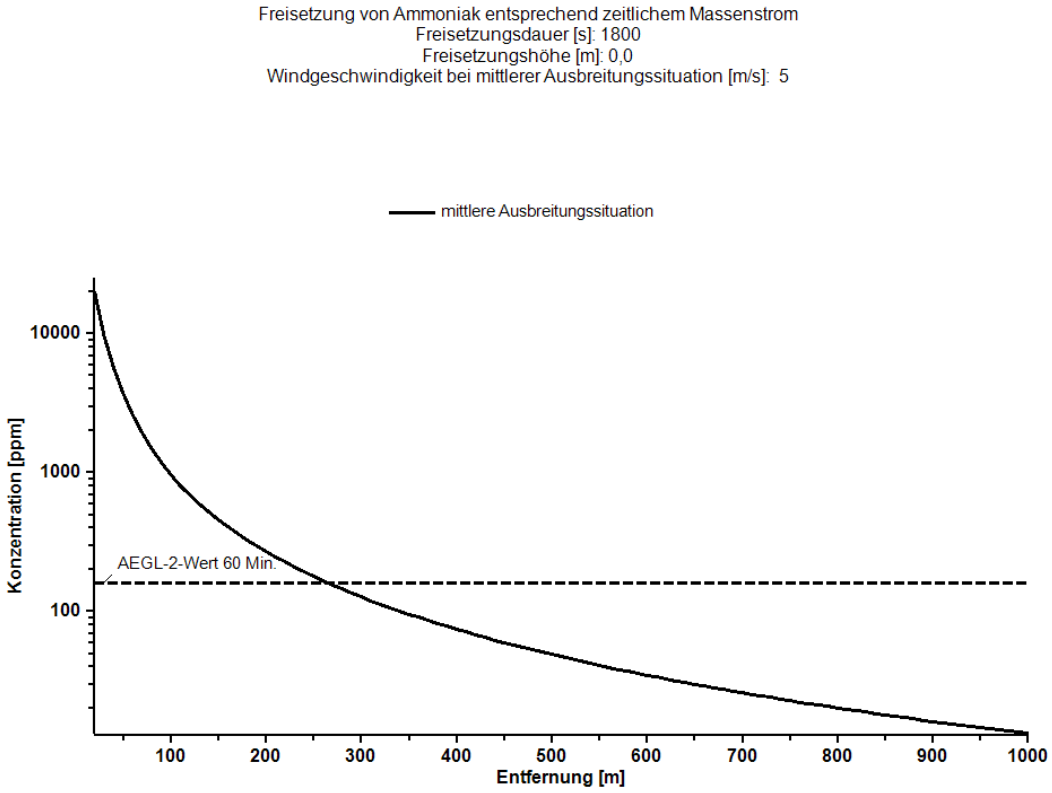
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Ammoniak – NH_3		Massenstrom flüssig / gasförmig aus Leck	20,97 kg/s / 0,017 kg/s
Dichte	681,5 kg/m³ (flüssig)		Freisetzungsdauer / Berechnungsdauer nach KAS-18	600 s / 1800 s
Temperatur	240 K / -33,15 °C		Form der Freisetzung	drucklos verflüssigt
Druck	35 $bar_ü$		Lachenfläche	keine Begrenzung
Freisetzungsart	flüssig		Lachenhöhe	5 mm (Beton)
Ausflussziffer	0,62		Lachenausbreitungsmodell Verdunstungsmodell	Briscoe Shaw mod Habib / Schalau
Leckfläche Austritt	490 mm²		Ausbreitungs-berechnung	VDI 3783 Blatt 1/Blatt 2
Ausbreitungssituation	mittel		Schwergaseffekt nach Blatt 2 zu berücksichtigen	Nein
Bodenrauhigkeit	sehr rau		Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Windgeschwindigkeit	3 bzw. 5 m/s

Abbildung 61: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung zum Cracker bei 3 m/s Windgeschwindigkeit



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 62: Dennoch-Szenario$_{KAS-18}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung zum Cracker bei 5 m/s Windgeschwindigkeit



Quelle: TÜV SÜD.

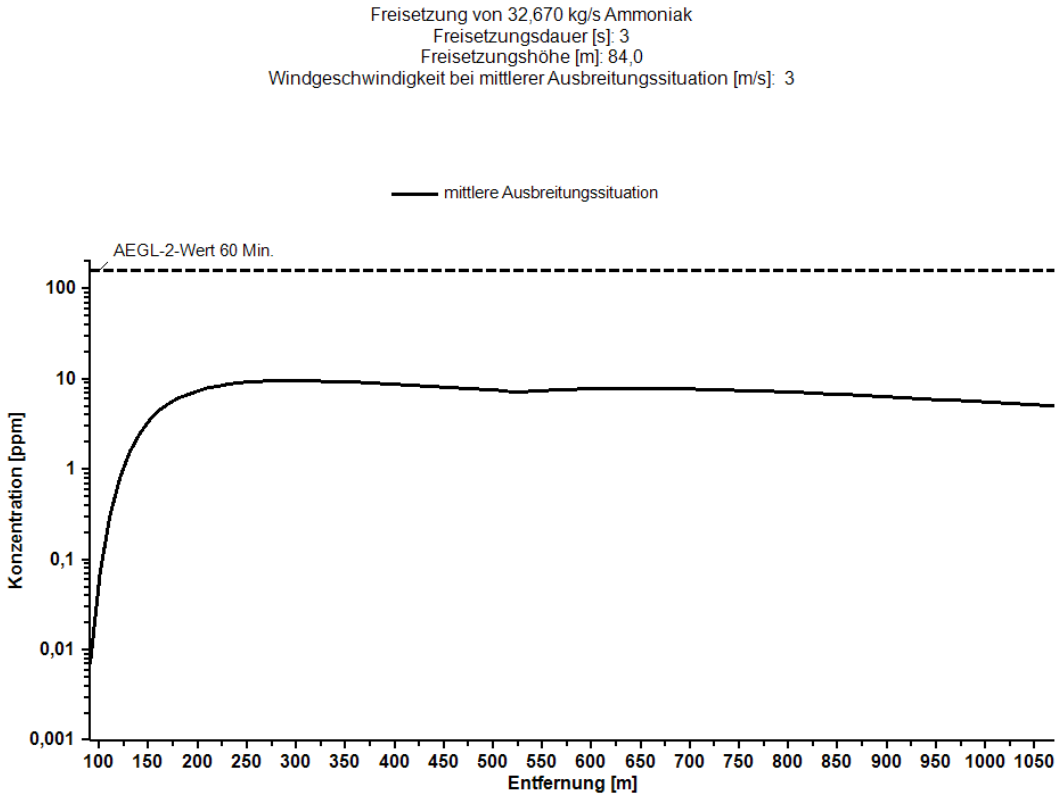
G.2 Szenario B: Abstände auf Basis von Dennoch-Szenarien$_{KatS}$

G.2.1 Szenario B1a)/b) NH_3-Heißgasleitung Cracker 33 bar/600 °C Freistrahl 45° mit thermischer Überhöhung (Auftrieb), 82 kg GZM, DN 400

Tabelle 63: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B1a)/b)

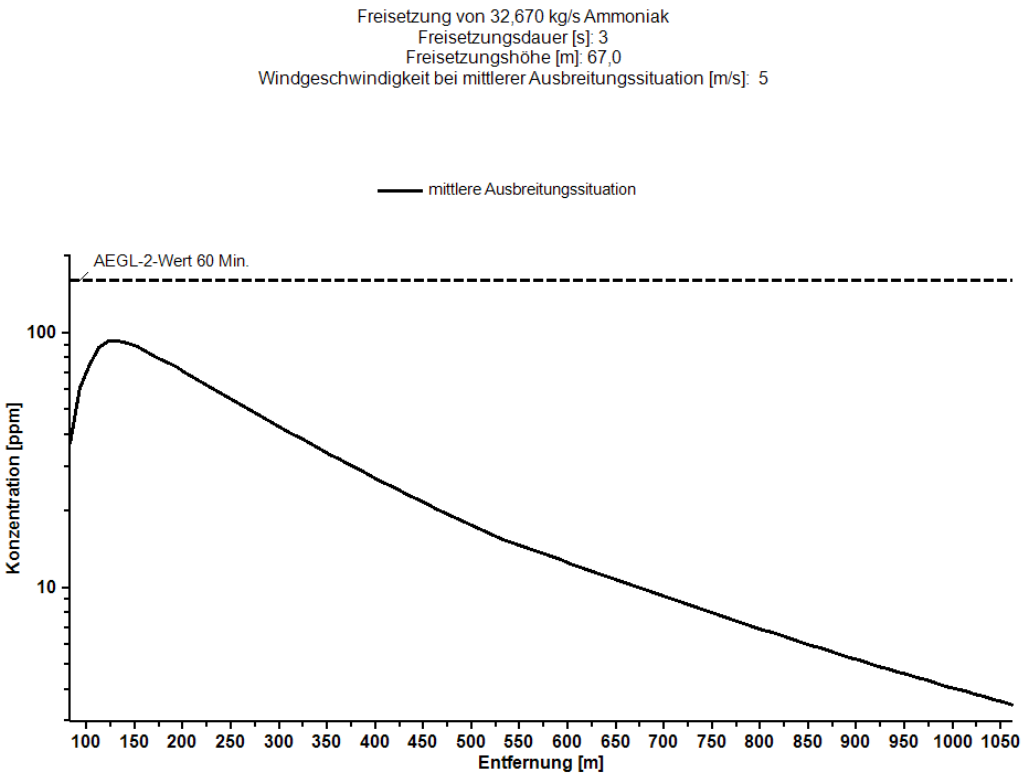
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Ammoniak – NH_3		Massenstrom	32,67 kg/s
Dichte	7,99 kg/m³ (gasförmig)		Freisetzungsdauer / Berechnungsdauer	2,51 s / 1800 s
Temperatur	873,15 K / 600 °C		Form der Freisetzung	Freistrahl, gasförmig
Druck	33 $bar_ü$		Wärmeemission	6,1 MW (> 6 MW)
Freisetzungsart	gasförmig		Austritt über Erdgleiche	1 m (konservativ)
Ausflussziffer	-		Freisetzungshöhe aus Freistrahl 45 ° nach oben	84 m
Leckfläche Austritt	entspr. DN 400		Freistrahlmodell	Schatzmann, modifiziert
Ausbreitungssituation	mittel		Ausbreitungsberechnung	VDI 3783 Blatt 1
Bodenrauhigkeit	sehr rau		Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Windgeschwindigkeit	3 bzw. 5 m/s

Abbildung 63: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus Heißgasleitung Cracker bei 3 m/s Windgeschwindigkeit



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 64: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus Heißgasleitung Cracker bei 5 m/s Windgeschwindigkeit



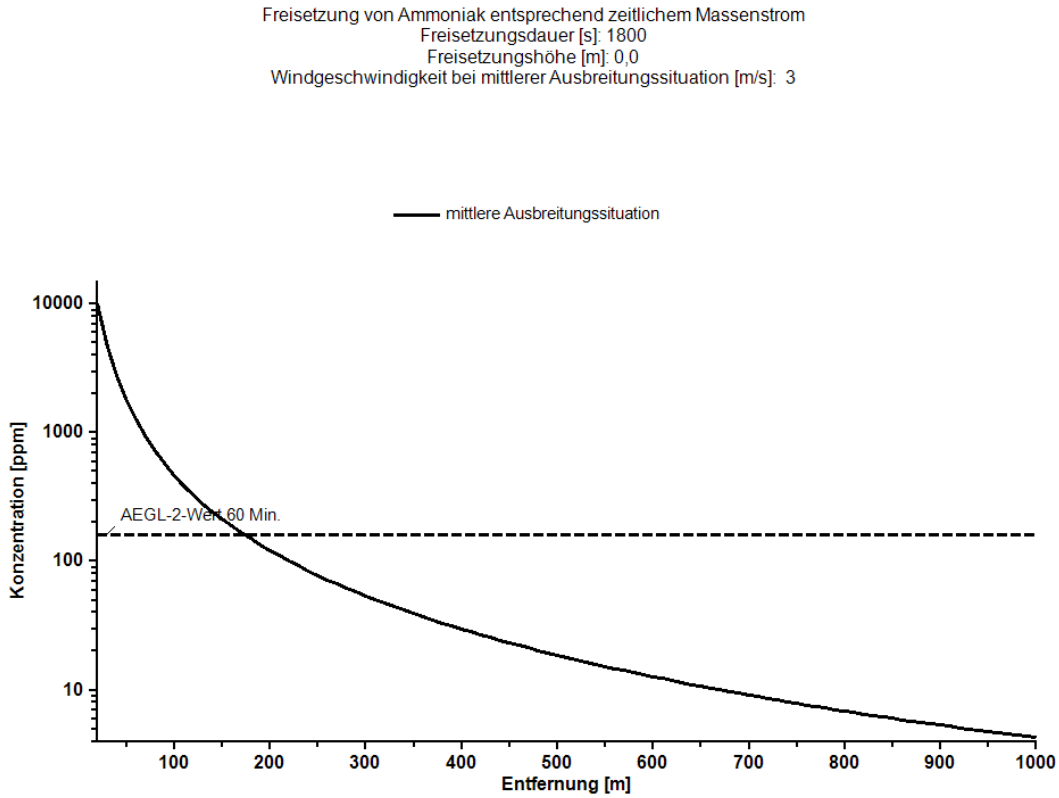
Quelle: TÜV SÜD.

G.2.2 Szenario B2a)/b) DN 200 flüssig-NH3-Leitung (35 bar) zum Cracker

Tabelle 64: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B2a)/b)

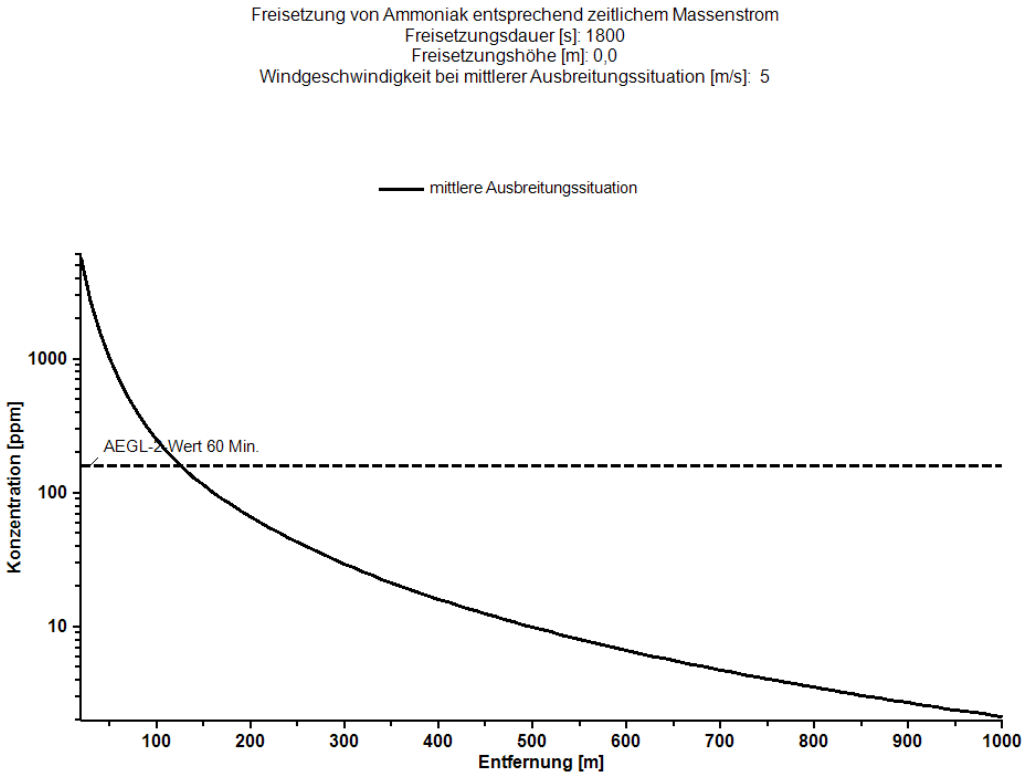
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Ammoniak – NH_3		Massenstrom flüssig	32,67 kg/s
Dichte	681,5 kg/m³ (flüssig)		Freisetzungsdauer / Berechnungsdauer	33,33 s / 1800 s
Temperatur	240 K / -33,15 °C		Form der Freisetzung	drucklos verflüssigt
Druck	35 $bar_ü$		Lachenfläche	keine Begrenzung
Freisetzungsart	flüssig		Lachenhöhe	5 mm (Beton)
Ausflussziffer	-		Lachenausbreitungsmodell Verdunstungsmodell	Briscoe Shaw mod Habib / Schalau
Leckfläche Austritt	entspr. DN 200		Ausbreitungsberechnung	VDI 3783 Blatt 1/Blatt 2
Ausbreitungssituation	mittel		Schwergaseffekt nach Blatt 2 zu berücksichtigen	Nein
Bodenrauhigkeit	sehr rau		Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Windgeschwindigkeit	3 bzw. 5 m/s

Abbildung 65: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung zum Cracker bei 3 m/s Windgeschwindigkeit



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 66: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus Leitung zum Cracker bei 5 m/s Windgeschwindigkeit



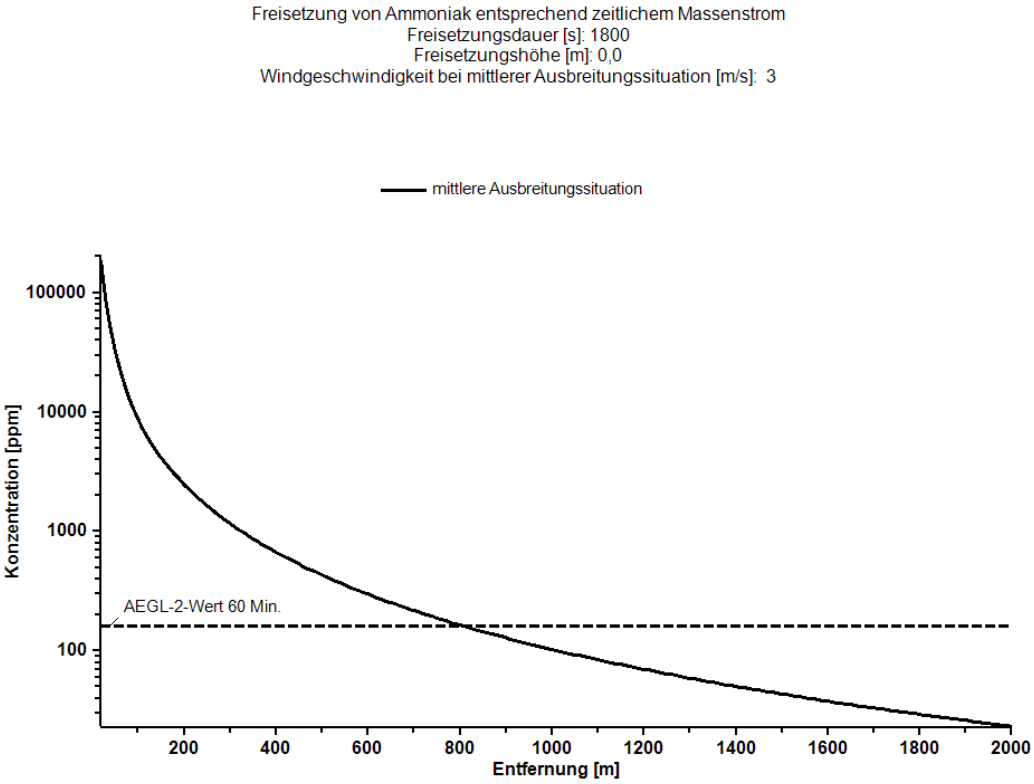
Quelle: TÜV SÜD.

G.2.3 Szenario B3a)/b) DN 600 flüssig-NH_3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Land

Tabelle 65: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B3a)/b)

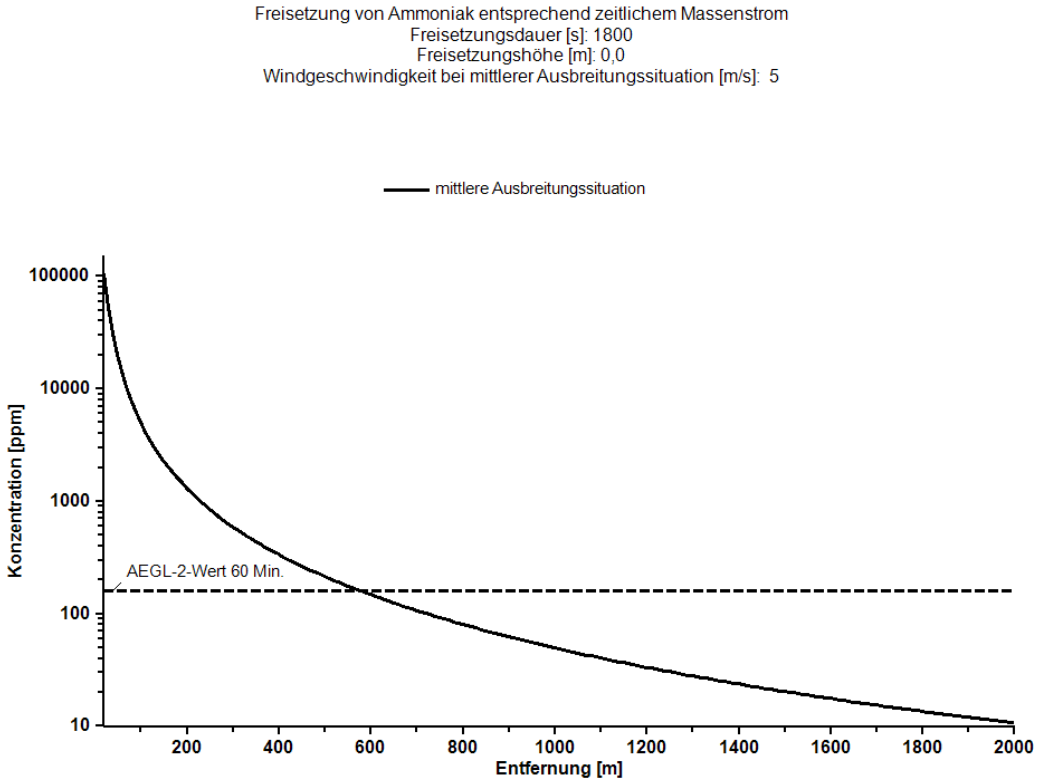
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Ammoniak – NH_3		Massenstrom flüssig	578,7 kg/s
Dichte	681,5 kg/m³ (flüssig)		Freisetzungsdauer / Berechnungsdauer	50,11 s / 1800 s
Temperatur	240 K / -33,15 °C		Form der Freisetzung	drucklos verflüssigt
Druck	5 $bar_ü$		Lachenfläche	keine Begrenzung
Freisetzungsart	flüssig		Lachenhöhe	5 mm (Beton)
Ausflussziffer	-		Lachenausbreitungsmodell Verdunstungsmodell	Briscoe Shaw mod Habib / Schalau
Leckfläche Austritt	entspr. DN 600		Ausbreitungsberechnung	VDI 3783 Blatt 1/Blatt 2
Ausbreitungssituation	mittel		Schwergaseffekt nach Blatt 2 zu berücksichtigen	Nein
Bodenrauhigkeit	sehr rau		Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Windgeschwindigkeit	3 bzw. 5 m/s

Abbildung 67: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Land, Windgeschwindigkeit 3 m/s



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 68: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Land, Windgeschwindigkeit 5 m/s



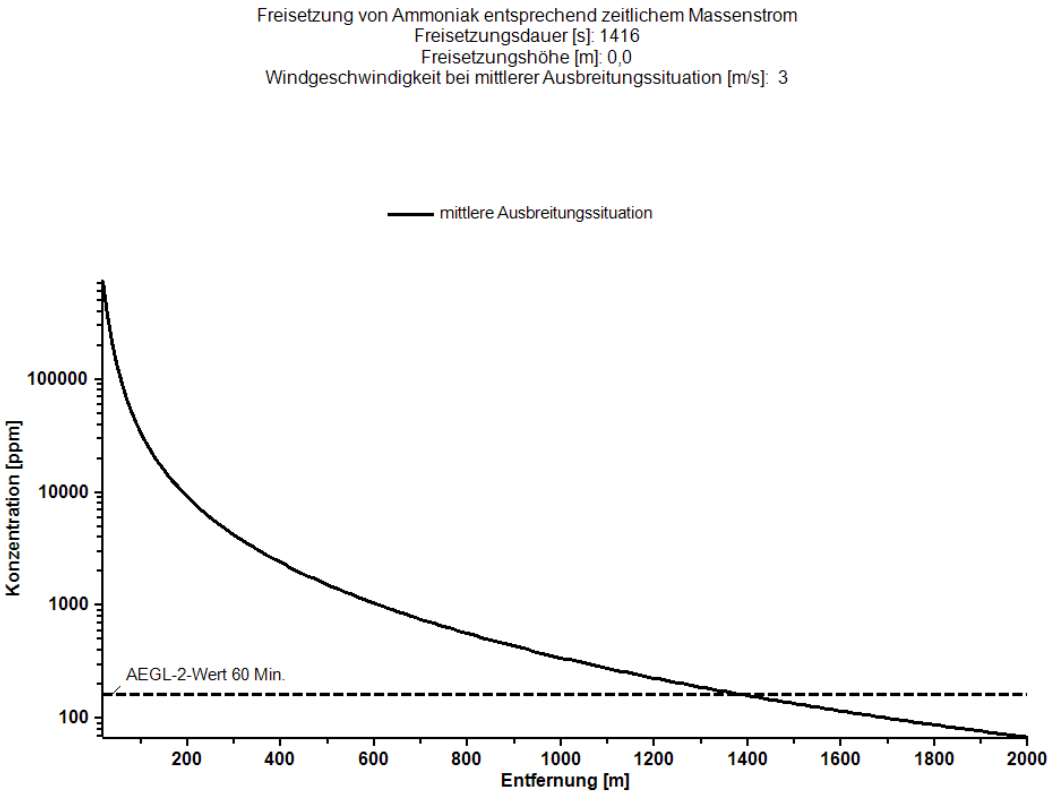
Quelle: TÜV SÜD.

G.2.4 Szenario B4a)/b) DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Wasser

Tabelle 66: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B4a)/b)

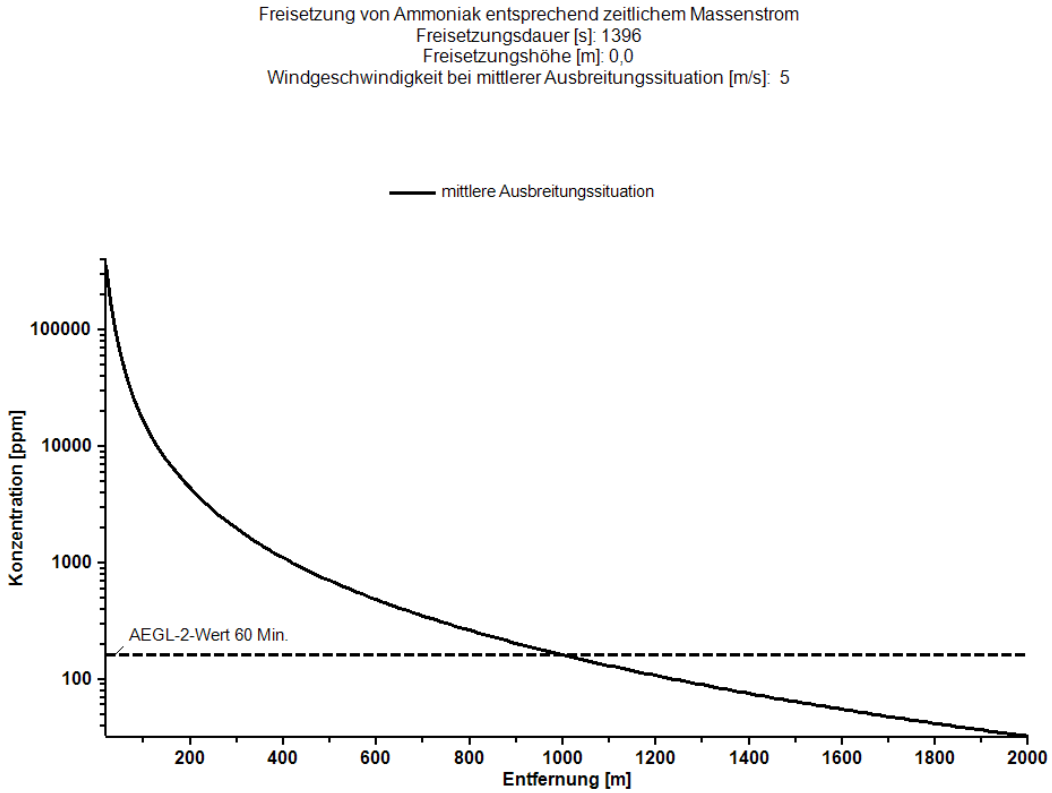
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Ammoniak – NH_3		Massenstrom flüssig	578,7 kg/s
Dichte	681,5 kg/m³ (flüssig)		Freisetzungsdauer / Berechnungsdauer	50,11 s / 1800 s
Temperatur	240 K / -33,15 °C		Form der Freisetzung	drucklos verflüssigt
Druck	5 $bar_ü$		Lachenfläche	keine Begrenzung
Freisetzungsart	flüssig		Wärmeübergangs-koeffizient bei 20° Wassertemperatur	500 W/K/m²
Ausflussziffer	-		Lachenausbreitungsmodell Verdunstungsmodell	Briscoe Shaw mod Habib / Schalau
Leckfläche Austritt	490 mm²		Ausbreitungsberechnung	VDI 3783 Blatt 1/Blatt 2
Ausbreitungssituation	mittel		Schwergaseffekt nach Blatt 2 zu berücksichtigen	Nein
Bodenrauhigkeit	extrem glatt		Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Windgeschwindigkeit	3 bzw. 5 m/s

Abbildung 69: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Wasser, Windgeschwindigkeit 3 m/s



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 70: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t ohne Lachenbegrenzung über Wasser, Windgeschwindigkeit 5 m/s



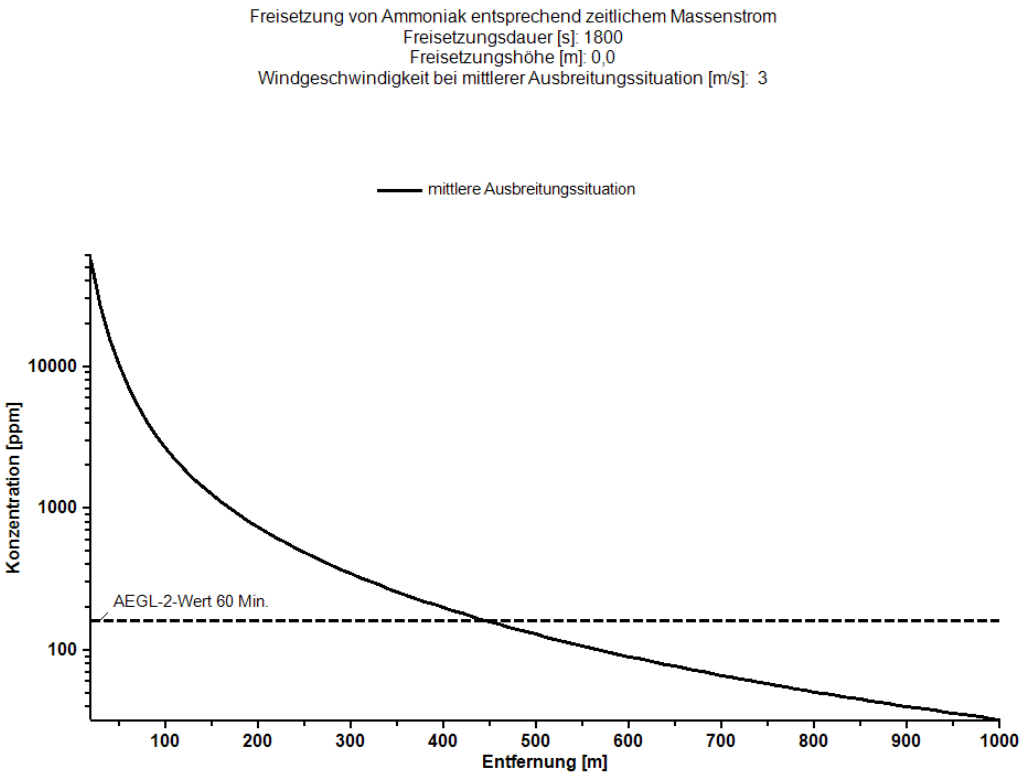
Quelle: TÜV SÜD.

G.2.5 Szenario B5a)/b) DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t mit Lachenbegrenzung 1500 m² über Land

Tabelle 67: Berechnungsparameter für die Freisetzung von Ammoniak – Szenario B5a)/b)

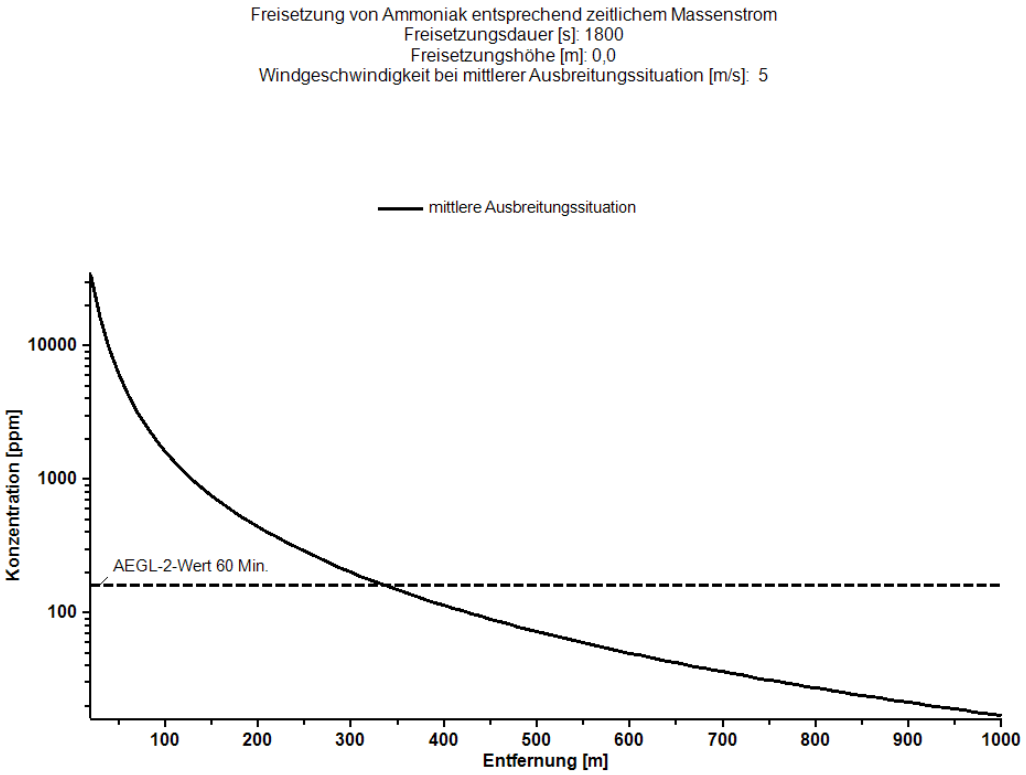
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Ammoniak – NH_3		Massenstrom flüssig	578,7 kg/s
Dichte	681,5 kg/m³ (flüssig)		Freisetzungsdauer / Berechnungsdauer	50,11 s / 1800 s
Temperatur	240 K / -33,15 °C		Form der Freisetzung	drucklos verflüssigt
Druck	5 $bar_ü$		Lachenfläche	1500 m²
Freisetzungsart	flüssig		Lachenhöhe	5 mm (Beton)
Ausflussziffer	-		Lachenausbreitungsmodell Verdunstungsmodell	Briscoe Shaw mod Habib / Schalau
Leckfläche Austritt	entspr. DN 600		Ausbreitungsberechnung	VDI 3783 Blatt 1/Blatt 2
Ausbreitungssituation	mittel		Schwergaseffekt nach Blatt 2 zu berücksichtigen	Nein
Bodenrauhigkeit	sehr rau		Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Windgeschwindigkeit	3 bzw. 5 m/s

Abbildung 71: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t mit Lachenbegrenzung über Land, Windgeschwindigkeit 3 m/s



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 72: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freisetzung von Ammoniak aus DN 600 flüssig-NH3-Leitung (5 bar) GZM 29 t mit Lachenbegrenzung über Land, Windgeschwindigkeit 5 m/s



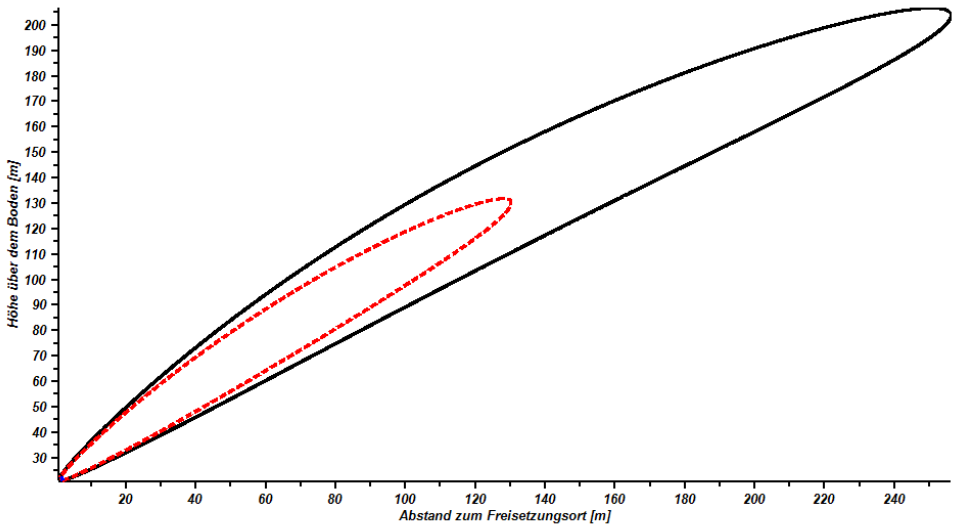
Quelle: TÜV SÜD.

G.2.6 Szenario B6) Große Wasserstoffleckage Brand/Explosion Cracker DN300 GZM 327 kg

Tabelle 68: Berechnungsparameter für die Freisetzung und Entzündung von Wasserstoff – Szenario B6

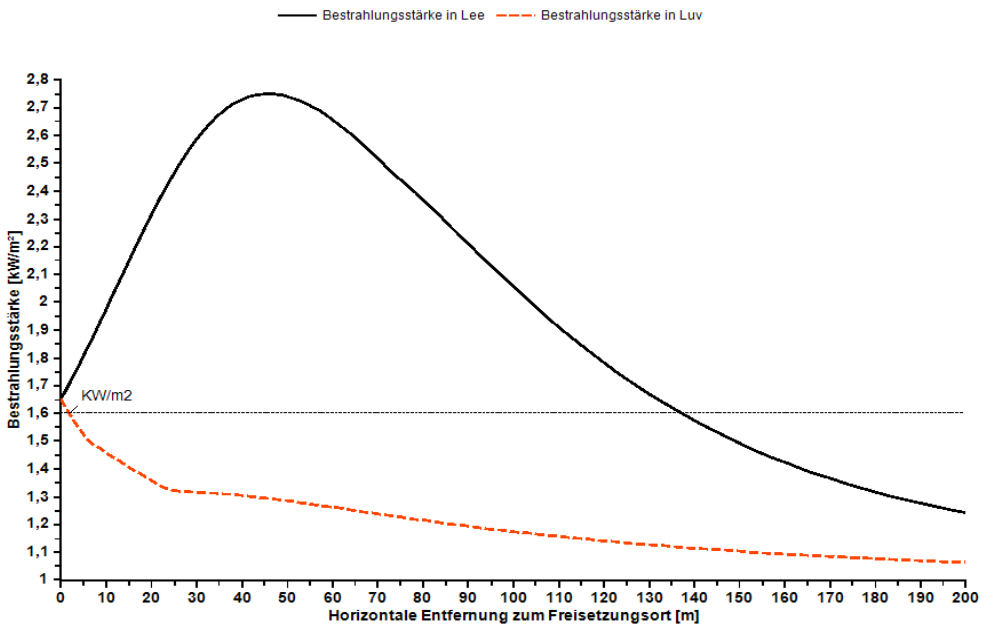
Parameter	Wert		Parameter	Wert
Stoff	Wasserstoff – H_2		Massenstrom	32,67 kg/s
Dichte	1,28 kg/m³ (gasförmig)		Freisetzungsdauer	10 s
Temperatur	586,1 K / 313 °C		Form der Freisetzung	Freistrahl, gasförmig
Druck	30 $bar_ü$			
Freisetzungsart	gasförmig		Austritt über Erdgleiche	20 m
Ausflussziffer	-		Flammenlänge Freistrahl 45 ° nach oben	107 m
Leckfläche Austritt	entspr. DN 400		Freistrahlmodell	Schatzmann, modifiziert
Ausbreitungssituation	mittel		Gaswolkenmodell	Gaswolkenexplosion über dem Boden (BST-Modell)
Bodenrauhigkeit	sehr rau		Explosionsfähige Masse	160 kg
Sonneneinstrahlung	1 kW/m²		Verblockung/ Verdämmung	Mittel
Exponent des Windgeschw.-Profils (entspricht einer indifferenten Schichtung ohne Inversion)	0,28		Reaktivität	Hoch
Windgeschwindigkeit	3 m/s			

Abbildung 73: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Freistrahl bei Freisetzung von Wasserstoff



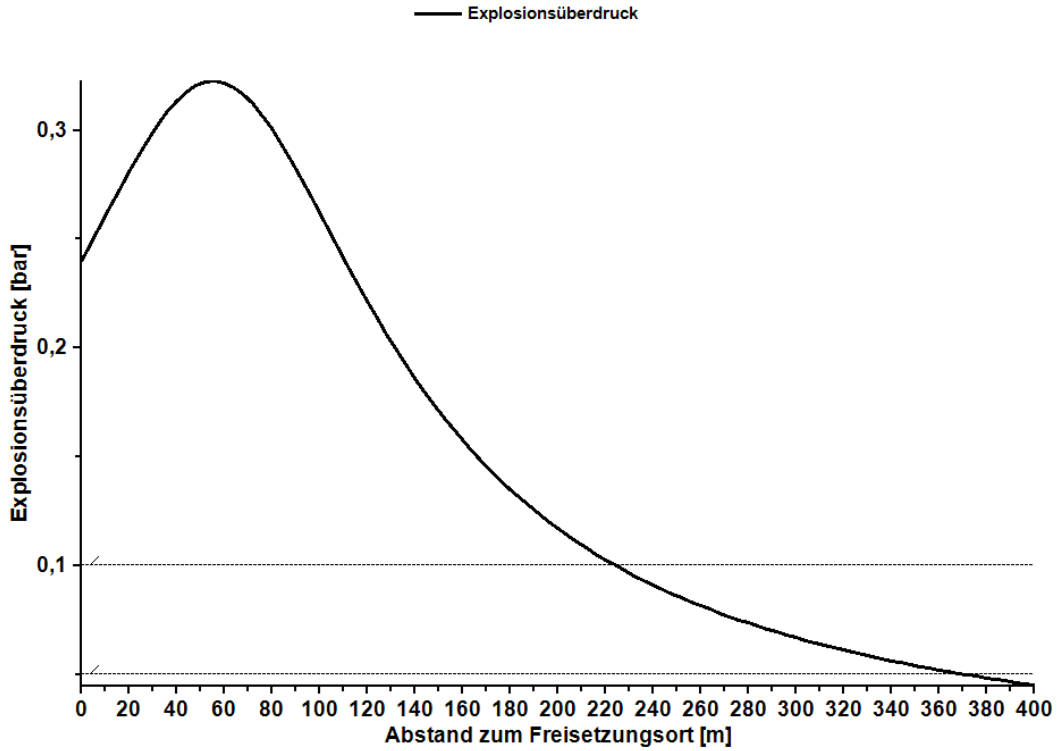
Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 74: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Bestrahlungsstärke durch gezündeten Freistrahl bei Freisetzung von Wasserstoff



Quelle: TÜV SÜD.

Abbildung 75: Dennoch-Szenario$_{KatS}$, Explosionsüberdruck durch zündenden Freistrahl bei Freisetzung von Wasserstoff



Quelle: TÜV SÜD.