

TEXTE

100/2023

Abschlussbericht

Berücksichtigung des Klimawandels in technischen Regeln für Anlagensicherheit

von:

Prof. Dr. Karl-Erich Köppke

Ingenieurbüro Prof. Dr. Köppke GmbH, Bad Oeynhausen

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 100/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3718 48 325 0
FB001026

Abschlussbericht

Berücksichtigung des Klimawandels in technischen Regeln für Anlagensicherheit

von

Prof. Dr. Karl-Erich Köppke
Ingenieurbüro Prof. Dr. Köppke GmbH, Bad Oeynhausen

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
[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)
[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Ingenieurbüro Prof. Dr. Köppke GmbH
Fritz-Jöde-Weg 15
32547 Bad Oeynhausen

Abschlussdatum:

November 2022

Redaktion:

Fachgebiet III 2.3 Anlagensicherheit
Roland Fendler

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juli 2023

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

Kurzbeschreibung: Berücksichtigung des Klimawandels in technischen Regeln für Anlagensicherheit

Zur Überprüfung der TRAS 310 und der TRAS 320 wurde im 1. Arbeitspaket eine Befragung von Betreibern von Anlagen, Sachverständigen und Behörden durchgeführt, um mögliche Probleme im Vollzug zu ermitteln. Während zur TRAS 310 mit Ausnahme der Ermittlung von Starkniederschlägen keine grundlegenden Einwände vorgetragen wurden, wurde bzgl. der TRAS 320 vor allem die Einstufung von Betriebsbereichen in die Schadensfolgenklasse CC 3 kritisiert, was de facto eine Erhöhung der anzusetzenden Windlast um 10 % bedeutet. Eine nachträgliche Anpassung der Standsicherheit von Anlagen sei nach Ansicht der Industrievertreter technisch schwierig und unverhältnismäßig. Im 2. Arbeitspaket wurde untersucht, ob neue sicherheitsrelevante Erkenntnisse durch Veränderungen der Naturgefahren infolge des Klimawandels berücksichtigt werden müssen. Die aktuellen Projektionen bestätigen den bisherigen Wissensstand, jedoch hat sich der Klimawandel beschleunigt. Im 3. Arbeitspaket wurden Vorschläge für die Weiterentwicklung der TRAS sowie der „Hinweise und Erläuterungen“ zu diesen erarbeitet. Für Starkregen wurden Niederschlagshöhen und Dauerstufen aus beobachteten Starkregenereignissen abgeleitet, die für die Gefahrenquellenanalyse herangezogen werden sollten, weil die in KOSTRA-DWD-2010R zusammengestellten Daten nicht den tatsächlichen Niederschlagsereignissen entsprechen. Sofern keine Gefahrenkarten für Starkniederschläge zur Verfügung stehen, ist der Betreiber verpflichtet, Niederschlags-/ Abflussberechnungen durchzuführen. Darüber hinaus wurde empfohlen, analog zu § 78c WHG die bisher in der TRAS 310 festgelegte Nachrüstungsfrist bis 2050 zu verkürzen. Bzgl. der Gefahrenquelle Wind sollte die Einstufung in die Schadensfolgenklasse CC 3 beibehalten werden, wobei im Einzelfall für Bestandsanlagen nach Prüfung der Verhältnismäßigkeit sowie der technischen Durchführbarkeit von Nachrüstungsmaßnahmen durch die Behörden eine Einstufung in CC 2 erfolgen kann oder organisatorische Maßnahmen, wie z.B. verstärkte Überwachungsmaßnahmen, als gleichwertig bewertet werden.

Abstract: Consideration of climate change in technical rules for plant safety

To review TRAS 310 and TRAS 320, a survey was carried out among plant operators, experts and authorities in the first work package in order to identify possible problems in implementation. With the exception of determining the amount of precipitations no fundamental objections were raised for TRAS 310. With regard to TRAS 320 the main criticism was the classification of installation and establishments in damage sequence class CC 3, which de facto means an increase of the wind load to be applied by 10%. According to the industry representatives, a subsequent adjustment of the stability of plants is technically difficult and disproportionate. In the second work package, it was examined whether new safety-relevant findings due to changes in natural hazards as a result of climate change must be taken into account. The current projections confirm previous knowledge, but climate change has accelerated. In the 3rd work package, proposals for the further development of the TRAS and the "notes and explanations" for them were drawn up. For heavy rain, precipitation amounts and duration levels were derived from observed heavy rain events, which should be used for the hazard source analysis. This was necessary because the data compiled in KOSTRA-DWD-2010R does not correspond to the actual precipitation events. If no hazard maps for heavy precipitation are available, the operator is obliged to carry out precipitation/runoff calculations. In addition, it was recommended to shorten the retrofitting period previously specified in TRAS 310 up to 2050 analogously to § 78c WHG. With regard to wind hazard, the classification in damage sequence class CC 3 should be retained, although in individual cases existing installations and establishments can be classified in CC 2 after the authorities have checked the proportionality and technical feasibility of retrofitting measures. Alternatively, organizational measures, such as increased surveillance measures, should be permitted if they can be assessed as equivalent.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	11
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	16
Zusammenfassung.....	17
Summary	17
1 Aufgabenstellung	36
1.1 Hintergrund und Problemstellung	36
1.2 Ziel und Gegenstand des Forschungsprojekts	36
2 Durchführung der Evaluation bei Betreibern, Genehmigungsbehörden und Sachverständigen .	38
2.1 Überprüfungsbedarfe für die TRAS 310.....	38
2.2 Überprüfungsbedarfe für die TRAS 320.....	39
3 Recherche nach vergleichbaren Ansätzen zum Natech Risikomanagement in anderen Staaten	41
3.1 Vergleich mit der TRAS 310 mit dem Vorgehen in Großbritannien bzgl. der Gefahrenquelle Hochwasser.....	41
3.2 Der Vergleich mit der TRAS 320 mit den französischen Normen gegenüber Erdbeben	42
4 Aktualisierung des Kenntnisstandes über die voraussichtlichen Wirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren.....	43
4.1 Umgebungsbedingte Gefahrenquellen der TRAS 310	43
4.1.1 Ausgangssituation	43
4.1.2 Tendenzen der Niederschlagsentwicklung	44
4.1.2.1 Niederschlagsentwicklung in vergangenen Jahrzehnten	44
4.1.2.2 Projektionen der Niederschlagsentwicklung.....	45
4.1.3 Entwicklungstendenzen von Starkniederschlägen	46
4.1.3.1 Starkniederschläge in vergangenen Jahrzehnten	47
4.1.3.2 Projektionen der Starkniederschlagsentwicklung	49
4.1.3.3 V _b -Wetterlage	50
4.1.4 Entwicklungstendenzen von Hochwasser.....	52
4.1.4.1 Hochwasserentwicklung in vergangenen Jahrzehnten	52
4.1.4.2 Projektionen der Hochwasserentwicklung (Rhein / Aller-Leine-Gebiet).....	52
4.1.4.3 Sturzfluten in vergangenen Jahrzehnten.....	54
4.1.4.4 Projektionen von Sturzfluten.....	56
4.1.5 Entwicklung des Meeresspiegels	56

4.1.5.1	Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs vergangener Jahrzehnte am Pegel Cuxhaven	57
4.1.5.2	Projektionen des Meeresspiegelanstiegs	57
4.2	Umgebungsbedingte Gefahrenquellen der TRAS 320	58
4.2.1	Entwicklungstendenzen von Winterstürmen	58
4.2.2	Projektionen von Winterstürmen	59
4.2.3	Entwicklungstendenzen von Schnee- und Eislasten	60
4.2.4	Projektionen zur Entwicklung der Zahl der Eistage	61
4.2.5	Ursachen für Wintereinbrüche mit hohen Schneemassen.....	62
4.3	Erkenntnisse über die globale Klimaentwicklung	64
4.3.1	SSP-Szenarien als Grundlage zur Betrachtung der Klimaentwicklung	64
4.3.2	Ergebnisse des IPCC-Berichts mit Bezug zur Anlagensicherheit	66
4.4	Zwischenergebnis und Schlussfolgerungen für die Sicherheit von Betriebsbereichen	68
5	Prüfung der Fortentwicklung des Standes der Technik in Bezug auf Risikomanagement sowie Vorkehrungen und Maßnahmen gegen die betrachteten Gefahrenquellen	73
5.1	Wasserrechtliche Anforderungen zum vorbeugenden Hochwasserschutz und Schlussfolgerungen für Störfallanlagen	73
5.1.1	Allgemeine Sorgfaltspflichten nach § 5 Abs. 2 WHG	74
5.1.2	Neue Anforderungen in Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten ...	74
5.1.3	Regelungen betreffend Heizölverbraucheranlagen.....	76
5.2	Stand der Technik des Risikomanagements	77
5.2.1	Natech-Risikomanagementmethoden zur systematischen, methodischen Analyse eines vergangenen Ereignisses	78
5.2.2	Natech-Risikomanagementmethoden zur vorausschauenden Störfallanalyse	80
5.2.2.1	Bow-Tie-Methode	80
5.2.2.2	Technische Regel für Anlagensicherheit TRAS 310 und TRAS 320	83
5.2.2.3	Probabilistische Methoden der vorausschauenden Risikoanalyse.....	86
5.3	Gefährdungsabschätzung durch windbedingte Projektile.....	90
5.3.1	Grundlagen für die Gefährdungsabschätzung durch windbedingte Projektile	90
5.3.2	Risikoanalyse für ein windbedingtes Projektil mit Hilfe eines excelbasierten Softwaretools am Beispiel einer Destillationskolonne	96
5.4	Risikoanalyse für Chemikalienbehälter bei Hitzewellen und Sonneneinstrahlung mit Hilfe eines excelbasierten Softwaretools	100
5.4.1	Temperaturverlauf des durchmischten Behälters	103
5.4.2	Temperaturveränderung durch Konvektion	105
5.4.2.1	Bestimmung der Nusselt-Zahl für freie Konvektion um einen Behälter.....	106

5.4.2.2	Bestimmung der Nusselt-Zahl für erzwungene Konvektion um einen Behälter	107
5.4.3	Temperaturveränderung durch Wärmestrahlung	107
5.4.4	Methodische Vorgehensweise für die Blockkapazitätsmethode	108
5.4.5	Berechnung der Temperaturentwicklung an einem Beispiel	109
5.4.6	Temperaturanstieg des nicht-durchmischten Behälters	111
5.4.7	Berechnung der maximalen Wandtemperatur eines nicht-durchmischten Behälters ..	112
5.5	Niederschlags-/Abflussberechnungen für Starkniederschläge	114
5.5.1	Datengrundlagen und Vorgehen	116
5.5.2	Untersuchungsergebnisse.....	116
5.5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Niederschlags-/Abflusssimulationen	120
6	Prüfung der Möglichkeiten und Notwendigkeit des Einbezugs weiterer Gefahrenquellen	121
6.1	Hagel	121
6.1.1	Tendenzen der Entwicklung des Hagelschlags	122
6.1.2	Projektionen des Hagelschlags	124
6.2	Hitzeperioden (Heiße Tage und Tropennächte)	124
6.2.1	Tendenzen der bisherigen Entwicklung von Hitzeperioden	124
6.2.2	Projektionen von zukünftigen Hitzeperioden	125
6.2.3	Zwischenergebnis bzgl. der Einbeziehung weiterer Gefahrenquellen	126
7	Empfehlungen zur Fortschreibung der TRAS 310	127
7.1	Ableitung von Niederschlagshöhen aus realen Ereignissen	131
7.2	Praxisrelevanten Extremwerten des Niederschlags (PEN)	134
7.3	Schlussfolgerungen	139
7.4	Nachrüstungsfrist für Vorkehrungen und Maßnahmen zur Verhinderung von Störfällen durch Hochwasser und Niederschläge sowie zur Begrenzung der Störfallauswirkungen ..	140
8	Empfehlungen zur Fortschreibung der TRAS 320	141
9	Anhang 1: Durchführung der Evaluation bei Betreibern, Immissionsschutzbehörden und Sachverständigen	148
9.1	Vorbereitung und Durchführung der Anwenderbefragung.....	148
9.2	Ergebnisse der Anwenderbefragung - Immissionsschutzbehörden	149
9.2.1	Einleitende Fragen	149
9.2.2	Grundlegende Fragen	151
9.2.3	Anwendung, Methodik und fehlende Gefahrenquellen (Frage 4 bis 8)	151
9.2.3.1	Sicherheitskonzept (gemäß TRAS), Sicherheitsbericht, Konzept zur Verhinderung von Störfällen (Frage 9 bis 11)	152

9.2.3.2	Unterweisungen, Gefahrenabwehrplanung, Hinweise zur TRAS, Zusammenarbeit (Frage 12 bis 16).....	152
9.2.4	Fragen zur TRAS 310	153
9.2.4.1	Gefahrenquellenanalyse (Frage 17 bis 23)	153
9.2.4.2	Szenarien, Schutzziele, Maßnahmen (Fragen 24 bis 31)	153
9.2.4.3	Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 32 bis 34)	153
9.2.5	Fragen zur TRAS 320	154
9.2.5.1	Unterlagen, Gefahrenquellen, Standsicherheitsnachweise (Frage 35 bis 41).....	154
9.2.5.2	Organisatorische Maßnahmen (Frage 42 bis 45).....	154
9.2.5.3	Windbedingte Projektile, Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 46 bis 48)....	155
9.3	Ergebnisse der Anwenderbefragung - Sachverständige	155
9.3.1	Einleitende Fragen	156
9.3.2	Grundlegende Fragen	156
9.3.3	Fragen zur TRAS 310	157
9.3.3.1	Gefahrenquellenanalyse (Frage 18 bis 24)	157
9.3.3.2	Szenarien, Schutzziele, Maßnahmen (Fragen 25 bis 33)	157
9.3.3.3	Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 34 bis 34)	158
9.3.4	Fragen zur TRAS 320	158
9.3.4.1	Unterlagen, Gefahrenquellen, Standsicherheitsnachweise (Frage 37 bis 43).....	158
9.3.4.2	Organisatorische Maßnahmen (Frage 44 bis 47).....	159
9.3.4.3	Windbedingte Projektile, Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 48 bis 54)....	159
9.4	Ergebnisse der Anwenderbefragung – Betriebsbereiche	159
9.4.1	Einleitende Fragen	159
9.4.2	Grundlegende Fragen	160
9.4.2.1	Anwendung, Methodik und fehlende Gefahrenquellen (Frage 4 bis 8).....	160
9.4.2.2	Sicherheitskonzept (gemäß TRAS), Sicherheitsbericht, Konzept zur Verhinderung von Störfällen (Frage 9 bis 11)	160
9.4.2.3	Unterweisungen, Gefahrenabwehrplanung, Hinweise zur TRAS, Zusammenarbeit (Frage 12 bis 16).....	160
9.4.3	Fragen zur TRAS 310	161
9.4.3.1	Gefahrenquellenanalyse (Frage 17 bis 23)	161
9.4.3.2	Szenarien, Schutzziele, Maßnahmen (Fragen 24 bis 31)	161
9.4.3.3	Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 32 bis 34)	162
9.4.4	Fragen zur TRAS 320	162
9.4.4.1	Unterlagen, Gefahrenquellen, Standsicherheitsnachweise (Frage 36 bis 42).....	162

9.4.4.2	Organisatorische Maßnahmen (Frage 43 bis 46).....	163
9.4.4.3	Windbedingte Projektile, Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 47 bis 50)....	163
9.5	Auswertung der Evaluation des Verbandes der Chemischen Industrie e.V.	163
9.6	Durchführung von Beispieluntersuchungen	164
9.6.1	Unternehmen der Stahlbranche	164
9.6.2	Unternehmen zur Lagerung und Umfüllung brennbarer Gase und Kältemittel.....	165
9.6.3	Unternehmen zur Herstellung von Chemieprodukten	168
9.6.4	Unternehmen zur Herstellung von pharmazeutischen Wirkstoffen	171
9.6.5	Unternehmen an der Westküste	172
9.6.6	Biogasanlagen	173
9.6.6.1	Kurzvorstellung der Anlagen.....	173
10	Anhang 2: Recherche nach vergleichbaren Ansätzen zum Natech Risikomanagement in anderen Staaten	175
10.1	Regelungen gegenüber Hochwasser in Großbritannien für COMAH-Anlagen	175
10.2	Leitfaden des Chemical and Downstream Oil Industries Forum (CDOIF)	179
10.3	National Planning Policy Framework	180
10.4	Regelungen gegenüber Erdbeben in Frankreich für Seveso-Anlagen	180
10.5	Internationale Regelungen zum Natech-Risikomanagement	184
11	Quellenverzeichnis	186

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Mittlere Niederschlagshöhe im Sommer (oben) und Winter (unten) in Deutschland von 1881/1882 bis 2017/2018	44
Abbildung 2:	Räumliche Projektion der Niederschlagsänderungen im Winter und Sommer in Deutschland für das Szenario RCP8.5	45
Abbildung 3:	Projizierte Änderungen des Niederschlags (%) für die Wintermonate für Deutschland relativ zu 1971 – 2000	46
Abbildung 4	Gesamtzahl der Niederschlagsstunden im Zeitraum 2001 – 2016 mit Überschreitung der Warnschwellen.....	47
Abbildung 5:	Zahl der Tage pro Jahr mit mehr als 30 mm Niederschlag von 1871 bis 2016.....	48
Abbildung 6	Höchste jemals beobachtete Niederschlagshöhen in Deutschland und der Welt	49
Abbildung 7:	Entstehung der V_b -Wetterlage	50
Abbildung 8:	Meeresoberflächentemperatur und regionale Temperaturänderungen des Mittelmeeres	51
Abbildung 9:	Veränderungen der Hochwasserentwicklung im Aller-Leine-Gebiet	54
Abbildung 10:	Abflussganglinien bei gleichem Niederschlag mit unterschiedlichem Versiegelungsgrad (0 bis 40 %) und einem Einzugsgebiet von 20 km ²	55
Abbildung 11:	Veränderungen des Meeresspiegels sowie Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs an der Messstelle Cuxhaven.....	57
Abbildung 12:	Projektion des Meeresspiegelanstiegs an der Messstelle Cuxhaven	57
Abbildung 13:	Anzahl der Tage mit Windböen > 90 km/h summiert von Oktober bis März.....	58
Abbildung 14	Zeitreihen des Jahresmittels der Windgeschwindigkeiten (vorne) und Anzahl von Tagen mit Spitzenböen von mindestens 8 Bft	59
Abbildung 15:	Anzahl der Eistage in Deutschland 1951 - 2018	61
Abbildung 16:	Zeitliche Abnahme der Zahl der Eistage verschiedener Projektionsrechnungen mit dem Szenario RCP8.5	61
Abbildung 17:	Wirkung der Polarwirbels auf den Jetstream	62
Abbildung 28:	Strahlungsantrieb 2005 bis 2100 nach verschiedenen SSP-Basiszenarien ohne klimapolitische Maßnahmen im Vergleich zu RCP-Szenarien.	65
Abbildung 19:	Strahlungsantrieb 2005 bis 2100 nach verschiedenen SSP-Szenarien mit klimapolitischen Maßnahmen im Vergleich zu RCP-Szenarien.	66
Abbildung 20:	Häufigkeit und Intensitätszunahme extremer Temperaturereignisse, die in einem Klima ohne menschlichen Einfluss durchschnittlich einmal in 10 Jahren auftraten	67
Abbildung 21:	Häufigkeit und Intensitätszunahme extremer Niederschläge, die in einem Klima ohne menschlichen Einfluss durchschnittlich einmal in 10 Jahren auftraten.....	67
Abbildung 22:	Beispiel einer Kartierung von Überschwemmungsgebieten und Risikogebieten ...	75

Abbildung 23:	Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen für die Ausweisung neuer Baugebiete und an die Aufstellung von Bauleitplänen in Überschwemmungs- und Risikogebieten nach § 78b WHG	76
Abbildung 24:	Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen für Heizölverbraucheranlagen in Überschwemmungs- und Risikogebieten nach § 78c WHG	77
Abbildung 25:	STEP-Analyse für die Raffinerie JX in Japan als Folge des Erdbebens im Jahr 2011	79
Abbildung 26:	MTO-Analyse für die Raffinerie JX in Japan als Folge des Erdbebens im Jahr 2011	80
Abbildung 27:	Die Bow-Tie-Methode angewandt auf umgebungsbedingte Gefahrenquellen (Naturgefahren).....	81
Abbildung 28:	Beispielanalyse der potentiellen Ursachen für die Überschwemmung eines Betriebsbereiches (Fehleranalyse)	82
Abbildung 29:	Beispielanalyse der Folgen einer Überschwemmung des Betriebsbereichs (Ereignisbaumanalyse)	82
Abbildung 30:	Methodische Vorgehensweise gemäß TRAS 310	84
Abbildung 31:	Fragilitätskurven für verankerte Stahltanks	88
Abbildung 32:	Beispiel einer Ausgabe von RAPID-N für eine Fallstudie eines Erdbebenszenarios	89
Abbildung 33:	Darstellung möglicher Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile	90
Abbildung 34:	Darstellung des waagerechten Wurfs	91
Abbildung 35:	Verminderung der Anströmfläche eines Rohres (Draufsicht)	93
Abbildung 36:	c_w -Wertermittlung in Anhängigkeit von der Reynolds-Zahl für eine Kugel und einen Zylinder	93
Abbildung 37:	Windzonenkarte nach DIN EN 1991-1-4.....	94
Abbildung 38:	Einteilung der Geländekategorien.....	95
Abbildung 39:	Xylol-Destillation der Raffinerie Heide	96
Abbildung 40:	Eingangsdaten der Flugweitenberechnung des Modellrohrs	97
Abbildung 41:	Maximale Flugweite des Modellrohrs	97
Abbildung 42:	Lage des ausgewählten Tanks Nr. 263	98
Abbildung 43:	Berechnung der Flugbahnen, der Projektilgeschwindigkeit sowie der Penetrationstiefe für 3 Aufprallpunkte am Beispiel des Tanks Nr. 263.	98
Abbildung 44:	Einfluss des Windschattens auf die Flugweite eines Projektils	99
Abbildung 45:	Verlauf der Tagestemperatur am 12.Juni 2022 am Standort des betroffenen Unternehmens.....	100
Abbildung 46:	Tagesgänge der Strahlungsintensität in Karlsruhe an den Tagen 2.7, 22.12 und 28.12.1991.....	101
Abbildung 47:	Temperaturprofil in und um einen mit einer Flüssigkeit gefüllten Behälter.....	102
Abbildung 48:	Exemplarische Tagesganglinien des Energiestroms der Sonnenstrahlung bei wolkenlosem Himmel im Sommer sowie der Lufttemperatur	103
Abbildung 49:	Methodische Vorgehensweise zur Berechnung der Temperaturerhöhung in einem gerührten Chemikalienbehälter durch Wärmekonvektion und Wärmestrahlung.....	109

Abbildung 50:	Temperaturentwicklung in einem gerührten Wassertank im Verlauf mehrerer Tage	110
Abbildung 51:	Temperaturentwicklung in einem gerührten Benzoltank im Verlauf mehrerer Tage	110
Abbildung 52:	Energiegleichgewichtsbetrachtung an der Wand eines nicht-gerührten Behälters.....	112
Abbildung 53:	Beispiel einer Energiegleichgewichtsbetrachtung an der Wand eines nicht-gerührten Behälters	113
Abbildung 54:	Lage des untersuchten Betriebs unterhalb des Wiehengebirges	114
Abbildung 55:	Ausschnitt des Betriebsgeländes.....	115
Abbildung 56:	Verschiedene Blicke auf das Betriebsgelände sowie auf die Randbedingungen des umgebenden Geländes	115
Abbildung 57:	Überflutungsflächen und -tiefen bei einer Niederschlagshöhe von 120 mm bei Zeitintervallen von 1, 3 und 6 Stunden	117
Abbildung 58:	Vergleich der Simulationsrechnungen für ausgewählte Punkte	118
Abbildung 59:	Örtliche Strömungsgeschwindigkeiten für ein Regenereignis mit 100 mm Niederschlagshöhe und der Dauer von 1 Stunde.....	119
Abbildung 60:	Maximale Volumenströme und Verzugszeiten zwischen Eintritt der maximalen Niederschlagsmenge und dem Eintreffen der maximalen Abflussmenge an verschiedenen Orten des Betriebsgeländes.....	120
Abbildung 61:	Anzahl der Tage, an denen Hagelsignale aus Radardaten des DWD zwischen 2005 und 2011 detektiert wurden	123
Abbildung 62:	Anzahl der Tage mit einer maximalen Lufttemperatur über 30°C.....	125
Abbildung 63:	Projizierte Klimaänderungen für die Zahl heißer Tage, Tropennächte und Hitzeperioden	125
Abbildung 64:	Gegenüberstellung der beobachtete Niederschlagshöhen in Deutschland und der Welt (Erweiterung der Abbildung 6) mit den 100-jährlichen Niederschlagshöhen nach KOSTRA-DWD-2010R	128
Abbildung 65:	Regionale Zuordnung der ausgewählten Starkregenereignisse	129
Abbildung 66:	Regionalisierte maximierte Gebietsniederschlagshöhen der Dauerstufe 24h für Gebiete von höchstens 25 km ² Größe	130
Abbildung 67:	Ableitung von plausiblen Niederschlagshöhen und Andauern für Starkregenereignisse	132
Abbildung 68:	PEN-Niederschlagshöhen für eine Dauer (D) von 6 Stunden und Jährlichkeiten von 1.000 und 10.000 Jahren	134
Abbildung 69:	Vergleich der PEN-Werte mit KOSTRA sowie den vorgeschlagenen anzusetzenden Niederschlagshöhen	135
Abbildung 70:	Überflutungsflächen und -tiefen bei einer Niederschlagshöhe von 73,2 mm (PEN- Wert) und 120 mm (Vorschlag nach Tabelle 14) bei einer Dauer von 1 Stunde..	137
Abbildung 71:	Überflutungsflächen und -tiefen bei einer Niederschlagshöhe von 82,8 mm (PEN-Wert) und 240 mm (Vorschlag nach Tabelle 14) bei einer Dauer von 1 Stunde.....	138

Abbildung 72	Festlegung des Böenstaudrucks in deutschen Normen; hier für Geländekategorie III	142
Abbildung 73:	Zusammenhang von Einwirkung, Tragwerkwiderstand und Teilsicherheitsbeiwerte	143
Abbildung 74:	Einstufung von Seveso-II-Anlagen in CC 3 nach ÖNORM B 1990-1 in Anhang B..	145
Abbildung 75:	Bedingungen für Szenarien der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung gegenüber Hochwasser und Starkregen	154
Abbildung 76:	Bedingungen für Szenarien der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung gegenüber Wind, Schnee- und Eislasten	155
Abbildung 77:	Hochwassergefahrenkarte für das Betriebsgelände des Unternehmens der Metallindustrie	165
Abbildung 78:	Hochwassergefahrenkarte für das Betriebsgelände des Unternehmens zur Lagerung und Umfüllung brennbarer Gase und Kältemittel	166
Abbildung 79:	Hochwassermarken für ein HQ ₁₀₀ und ein HQ ₃₀₀ im Eingangsbereich zum Betriebsgelände	166
Abbildung 80:	Rohrüberführung mit Vordach	170
Abbildung 81:	Hauptbereiche der Inspektionen.....	179
Abbildung 82:	Erdbebenzonen für Frankreich	181

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Kenndaten der RCP-Szenarien.....	44
Tabelle 2:	Warnstufen des DWD bei verschiedenen Dauerstufen für Stark- und Dauerregen.....	47
Tabelle 3:	Trends von Starkregenereignissen bis zum Jahr 2100	49
Tabelle 4:	Hochwasserereignisse durch Starkniederschläge aufgrund V _b -Wetterlagen	50
Tabelle 5:	Mittlere jährliche Hochwassermengen am Rhein (MHQ) für die Zeiträume 1901 – 1930 und 1971 - 2000.....	52
Tabelle 6:	Veränderungen der mittleren und extremen Hochwassermengen (Referenzzeitraum 1971 – 2000).....	53
Tabelle 7:	Einstufung von Schäden an Tankanlagen.....	88
Tabelle 8:	Böengeschwindigkeiten nach DIN EN 1991-1-4 mit NA	94
Tabelle 9:	Angaben zu den Faktoren K _F und Nu ₀	107
Tabelle 10:	Absorptionskoeffizienten verschiedener Farben und Materialien für die Sonnenstrahlung.....	108
Tabelle 11:	Dimensionen und Eigenschaften des gewählten Stahltanks.....	109
Tabelle 12:	Vereinfachte Skala für Hagelschlagwirkungen in Anlehnung an M. Kaschuba (2008).....	122
Tabelle 13:	Gegenüberstellung von gemessenen Werten, KOSTRA-Wert und MGN-Wert an zwei Beispielen	131
Tabelle 14:	Vorschlag von Niederschlagshöhen aus real gemessenen Starkregenereignissen	133
Tabelle 15:	Niederschlagshöhen nach KOSTRA und PEN für den untersuchten Standort.....	136

Tabelle 16:	Empfehlungen für Niederschlagshöhen und Dauerstufen zur Novellierung der TRAS 310	140
Tabelle 17:	Merkmale der Schadensfolgenklassen	144
Tabelle 18:	Zeitbedarfe für organisatorische Maßnahmen gegen Hochwasser – Sachverständigenbefragung	158
Tabelle 19:	Zeitbedarfe für organisatorische Maßnahmen gegen Hochwasser – Befragung von Betreibern von Betriebsbereichen	161
Tabelle 20:	Zeitbedarfe für organisatorische Maßnahmen gegen Wind, Schnee- und Eislasten – Befragung von Betreibern von Betriebsbereichen	163
Tabelle 21:	Überflutungsszenarien für die Prioritätensetzung von Inspektionen	178
Tabelle 22:	Bedeutungsbeiwerte für die jeweiligen Bedeutungskategorien	181
Tabelle 23:	Referenzwerte für die horizontale Beschleunigung (m/s^2) für Risikoanlagen	183

Abkürzungsverzeichnis

AGAP	Alarm- und Gefahrenabwehrplan
AR	Assessment Report
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CA	Competent Authority
CC 1 bis CC 3	Klassen für Schadensfolgen (eines Tragwerksversagens) nach DIN EN 1990 Anhang B
CDOIF	Chemical and Downstream Oil Industries Forum
COMAH	Control on Major Accident Hazards
DWD	Deutscher Wetterdienst
GZM	Größte zusammenhängende Menge
HSE	Health and Safety Executive (Großbritannien)
HQ₁₀₀	Hochwasserabfluss, der statistisch einmal in 100 Jahren erreicht oder überschritten wird.
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KAS	Kommission für Anlagensicherheit
K_{FI}	Bedeutungsfaktor des Bauwerks zur Anpassung der Lasthöhe
KOSTRA-DWD	Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD
MGN	Maximierte Gebietsniederschlagshöhen
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
PEN	Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags
RC 1 bis RC 3	Zuverlässigkeitsklassen für Tragwerke nach DIN EN 1990 Anhang B entsprechend der Schadensfolgeklassen CC 1-3
RCP	Representative Concentration Pathways
SRA	Sicherheitsrelevante Anlagenteile
SRB	Sicherheitsrelevanten Teile eines Betriebsbereichs
SSP	Shared Socioeconomic Pathways
StörfallV	Störfall-Verordnung (12. BImSchV)
TRAS	Technische Regel für Anlagensicherheit
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
WMO	World Meteorological Organization

Zusammenfassung

Das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) soll zusammen mit der Störfall-Verordnung (StörfallV) sicherstellen, dass Menschen und Umwelt vor Gefahren durch Anlagen bzw. Betriebsbereiche, in denen gefährliche Stoffe ab einer bestimmten Menge vorhanden sind (§ 2 Nr. 5 StörfallV), geschützt sind. Nach § 3 (2) der StörfallV sind auch natürliche, umgebungsbedingte Gefahrenquellen als potentielle Ursachen für Störfälle zu betrachten. Zur Konkretisierung dieser Anforderungen und zur Anpassung des Standes der Sicherheitstechnik an die Folgen des Klimawandels wurden folgende zwei technische Regeln für Anlagensicherheit (TRAS) vom Ministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz herausgegeben, die in der Kommission für Anlagensicherheit (KAS) zuvor erarbeitet und verabschiedet wurden:

Die TRAS 310 „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser“; sie wurde am 24.2.2012 im Bundesanzeiger veröffentlicht.

Die TRAS 320 „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten“; sie wurde am 16.07.2015 im Bundesanzeiger bekannt gemacht.

Diese veröffentlichten Regeln sind turnusmäßig zu überprüfen, um sie dem Stand der Sicherheitstechnik anzupassen. Hierzu sollte dieses Forschungsvorhaben die Arbeit der KAS vorbereiten und unterstützen. Dazu wurden folgende drei Arbeitspakete festgelegt:

1. Evaluation

In diesem Arbeitspaket sollte die Anwendung der beiden technischen Regeln in der Genehmigungs- und Überwachungspraxis auf Basis einer Umfrage und auf der Grundlage von Detailuntersuchungen an Beispielanlagen evaluiert werden. Darüber hinaus sollte eine Recherche nach vergleichbaren Ansätzen zum Natech Risk Management in anderen Staaten durchgeführt werden.

2. Fortentwicklung

In einem 2. Arbeitspaket soll geprüft werden, ob neuere Erkenntnisse über die Folgen des Klimawandels und/oder der Entwicklung des Standes der Sicherheitstechnik Anpassungen in den Technischen Regeln erforderlich machen. Hierzu zählt auch

- a) die Prüfung der Notwendigkeit (aufgrund fortgeschrittener Kenntnisse über den Klimawandel) des Einbezugs von weiteren umgebungsbedingten Gefahrenquellen, die bislang in den TRAS nicht berücksichtigt sind,
- b) der Vergleich der TRAS mit vergleichbaren Regelungen in anderen Staaten auf weitere Übereinstimmung mit dem Stand der Sicherheitstechnik.
- c) Aktualisierung des Kenntnisstandes über die voraussichtlichen Wirkungen des Klimawandels auf die zu berücksichtigenden Gefahrenquellen

3. Fortschreibung

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Arbeitspakete I und II sollen Entwürfe für die Weiterentwicklung der TRAS sowie der „Hinweise und Erläuterungen“ zu diesen erarbeitet werden.

Arbeitspaket 1: Evaluation der TRAS 310 und 320 bei Betreibern, Genehmigungsbehörden und Sachverständigen

Zur Durchführung der Evaluation wurden umfangreiche Fragebögen erstellt, um ein möglichst umfassendes und differenziertes Bild über die Anwendung der beiden technischen Regeln (TRAS 310 und 320) zu erhalten. Daher wurden die Fragebögen an die jeweilige Zielgruppe (Betreiber von Anlagen, die der StörfallV unterliegen, Genehmigungsbehörden, Sachverständigen nach § 29a BImSchG, mit dem Prüfbereich „umgebungsbedingten Gefahrenquellen“) angepasst. Darüber hinaus wurden insgesamt 7 Betreiber von Anlagen bzgl. der Anwendung bzw. Umsetzung der TRAS 310 und TRAS 320 befragt. Die Auswertung der beantworteten Fragebögen sowie die Ergebnisse der persönlichen Befragungen bei den Betreibern können wie folgt zusammengefasst werden:

TRAS 310

Die TRAS 310 wird von den meisten Befragten befürwortet. Ihre Anwendung auf Bestandsanlagen wird meist als unproblematisch angesehen. Akzeptanz findet die methodische Vorgehensweise vor allem bei Sachverständigen, während Anlagenbetreiber bisweilen eigene Vorgehensweise bevorzugen. Die Ermittlung von erforderlichen Informationen zur Gefahrenquellenanalyse stellt für Flusshochwasser in der Regel kein Problem dar, weil i.d.R. die erforderlichen Gefahrenkarten via Internet abgerufen werden können. Allerdings findet die Berücksichtigung des Klimaanpassungsfaktors bei der Gefahrenquellenanalyse sowie bei der Schutzzielefestlegung nur wenig Beachtung. Als sinnvoll hat sich die systematische Betrachtung der Zu- und Ablaufwege des Wassers erwiesen.

Bei der Analyse von Störfallszenarien wird oftmals auf Szenarien zurückgegriffen, bei denen Störfälle durch betriebliche Ursachen ausgelöst werden. Dabei wird in der Regel von mehr als der größten zusammenhängenden Masse (GZM) ausgegangen. Auch wird der Domino-Effekt in der Regel in die Untersuchung einbezogen. Die Durchführung von Maßnahmen zur Verhinderung von Störfallauswirkungen wird jedoch meist als nicht praktikabel angesehen.

Zu folgenden Punkten wurde eine Überprüfung der TRAS 310 angeregt:

1. Straffung der Inhalte in der TRAS 310 mit verbesserter Ausarbeitung der konkreten Anforderungen
2. Zu hohe fachliche Anforderung an die Ermittlung von Staudrücken durch die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers insbesondere bei Sturzfluten sowie der Berechnung von Lasten beim Aufprall von Treibgut
3. Mehrheitliche Ablehnung der Aufnahme weiterer Gefahrenquellen

Insgesamt hat die Befragung ergeben, dass sich die TRAS 310 im Vollzug bewährt hat und substantielle Änderung weder von Betreibern von Betriebsbereichen noch von Genehmigungsbehörden gefordert werden.

TRAS 320

Die TRAS 320 wird anders als die TRAS 310 in folgenden Punkten stark kritisiert.

1. Keine Berücksichtigung von organisatorischen Maßnahmen, insbesondere für Bestandsanlagen, bzgl. der Windlasten als Alternative zu technischen Nachrüstungsmaßnahmen

2. Problematische Nachrechnung der Tragwerksauslegung von Bestandsanlagen aufgrund der veränderten Grundlagen der Tragwerksplanung seit dem Jahr 2005
3. Zu großer Umfang der Darlegungen in der TRAS 320 sowie in den Hinweisen und Erläuterungen
4. Schwierigkeiten bei der Betrachtung von windbedingten Projektilen insbesondere gegenüber Biogasanlagen mit Membranabdeckungen

Insgesamt ist aufgrund der Ergebnisse der Befragung festzustellen, dass Betreiber von Betriebsbereichen, Sachverständige und Behördenvertreter eine Überprüfung der TRAS 320 insbesondere bzgl. der Anforderungen an bestehende Anlagen für dringend geboten halten. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund der Stichtagsregelung, die zu einer Verunsicherung der zuständigen Behörden beiträgt.

Recherche nach vergleichbaren Ansätzen zum Natech Risikomanagement in anderen Staaten

Regelungen gegenüber Hochwasser in Großbritannien für Control on Major Accident Hazards (COMAH)-Anlagen

In Großbritannien wurden umfangreiche Regulations und Leitlinien zum Hochwasserschutz für COMAH-Anlagen erarbeitet. Im Unterschied zur TRAS 310 werden in Großbritannien jedoch keine konkreten Schutzziele und auch kein Klimaanpassungsfaktor bzgl. Hochwasser und Starkniederschläge vorgegeben. Dennoch müssen vom Betreiber Informationen über den Einfluss des Klimawandels auf zukünftige Hochwasserrisiken von den Behörden eingeholt werden.

Beim Vergleich der britischen und deutschen Anforderungen sind darüber hinaus noch folgende Punkte festzuhalten:

1. Der Leitfaden der Environment Agency (EA 2015) macht Vorschläge zur Behandlung des Themas Hochwasser in Sicherheitsberichten. Ähnliches ist in der TRAS 310 nicht enthalten.
2. Der Operational Delivery Guide - Inspection of COMAH Operator Flood Preparedness (Health and Safety Executive (HSE) 2018) ist eine Anleitung für Inspektionen bezogen auf Überflutungen (damit implizit auch auf Starkniederschläge). Ein vergleichbares Dokument für Inspektionen als Verwaltungsvorschrift zur StörfallV oder Leitfaden des Bund/Länder-Ausschusses für Immissionsschutz & Störfallvorsorge steht in Deutschland nicht zur Verfügung.
3. Bei der Festsetzung von Prioritäten für Inspektionen sind auch die Wirkung von Überflutungen außerhalb des Betriebsbereichs zu berücksichtigen sind, wenn sie Wirkungen auf die Sicherheit des Betriebsbereichs haben. Dies betrifft z.B. den Ausfall der Stromversorgung oder der Kommunikationsinfrastruktur aber auch die Zugänglichkeit zum Betriebsgelände. Darüber hinaus kann die Verfügbarkeit von Hilfskräften eingeschränkt sein.

Regelungen gegenüber Erdbeben in den französischen Normen

Obwohl die Naturgefahr „Erdbeben“ eine andere ist als Wind, Schnee- und Eislasten, handelt sich dennoch um eine Gefahrenquelle, die auf die Tragwerke von Natech-Anlagen einwirkt. Die Gegenüberstellung von TRAS 320 mit der französischen Norm für Erdbeben (NF EN 1998-1:2005 bzw. NF EN 1998-1/NA:2007) zeigt folgende Unterschiede und Analogien:

1. In Deutschland unterliegen Anlagen der StörfallV, wenn die Mengen an gefährlichen Stoffen bestimmte Schwellen überschreiten. In Frankreich sind nicht die Mengenschwellen für die Anwendung von Anforderungen relevant, sondern wie im Fall eines Erdbebens die Wirkungen auf die benachbarte Umgebung. In Abhängigkeit vom Standort der Anlage wird somit die Zahl der betroffenen Risikoanlagen reduziert.
2. Ähnlich wie in der TRAS 320 beziehen sich die Anforderungen in Frankreich auf neue und bestehende Anlagen. Auch für bestehende Anlagen wird eine Berechnung der Standsicherheit gefordert. Allerdings werden in Frankreich für bestehende Anlagen geringere Referenzwerte für die Bodenbeschleunigung im Vergleich zu Neuanlagen angesetzt. Dies bedeutet, dass die Anforderungen für Bestandsanlagen geringer sind als für Neuanlagen. Der Stand der Sicherheitstechnik hat somit zwei unterschiedliche Anforderungsniveaus.
3. Bzgl. der Vermeidung eines Störfalls sind die Schutzzieldefinitionen identisch. Alternativ zu diesem Schutzziel wird in Frankreich die Verringerung der Unfallintensität genannt, um zu vermeiden, dass Personen außerhalb der Betriebsgrenzen von tödlichen Auswirkungen betroffen sind. Nach der StörfallV sind Störfälle zu verhindern (§ 3 Satz 1) und die Auswirkungen eines Dennoch-Störfalls durch vorbeugende Maßnahmen so gering wie möglich zu halten (§ 3 Satz 3). Im Gegensatz zu den französischen Normen muss für beide Fälle Vorsorge betrieben werden.
4. Auch in den französischen Normen gibt es Stichtagsregelungen zur Umsetzung der Anforderungen.

Arbeitspaket 2: Fortentwicklung der Technischen Regeln im Fall neuerer Erkenntnisse bzgl. des Klimawandels sowie des Standes der Sicherheitstechnik

- a) Einbeziehung von weiteren umgebungsbedingten Gefahrenquellen, die bislang in den TRAS nicht berücksichtigt sind

Hagel

Die wenigen Studien über die Entwicklung von Hagel deuten auf eine leichte Zunahme des Hagelpotentials für die Periode 2021 bis 2050 hin, wobei die Änderungen nur im Nordwesten und Süden Deutschlands statistisch signifikant sind. Dabei projizieren die einzelnen Modelle/ Szenarien eine Zunahme zwischen 4 und 41%.

Weil Hagelereignisse kleinräumig sind und messtechnisch nicht direkt erfassbar sind, ist die Erstellung einer aussagekräftigen Gefahrenkarte für Deutschland mit Hilfe der begrenzten Zahl von Beobachtungssystemen am Boden derzeit kaum möglich. Daher ist eine Konkretisierung von Anforderungen in der TRAS 310 derzeit nicht möglich.

Hitzewellen

Hitzeperioden sind definiert als Aufeinanderfolge von mindestens drei Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur > 30 °C und einer Tagestiefsttemperatur > 20 °C. Wie die bisherige Entwicklung der Anzahl heißer Tage sowie die entsprechenden Projektionen zeigen, werden in Zukunft die Zahl der Hitzeperioden zunehmen. Ob Hochtemperaturperioden in Deutschland Auswirkungen auf die Sicherheit von Anlagen, in denen gefährliche Stoffe (z.B. thermisch instabile Stoffe) vorhanden sind, haben können, ist bislang nicht systematisch untersucht worden.

Es wird empfohlen, die Veränderungen der Maximaltemperaturen aufgrund des Klimawandels im Rahmen der Umsetzung nach § 3 StörfallV zu berücksichtigen. Eine eigene technische Regel erscheint derzeit nicht erforderlich.

- b) Aktualisierung des Kenntnisstandes über die voraussichtlichen Wirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren

Der gegenwärtige Stand des Wissens über die neusten Erkenntnisse bzgl. der Veränderungen von umgebungsbedingten Gefahrenquellen kann für Deutschland wie folgt zusammengefasst werden:

Hochwasser und Niederschläge

Unbestritten bei allen Klimaforschern ist der Anstieg der Lufttemperatur aufgrund des Klimawandels. Eine Temperaturerhöhung um 1°C erhöht die Wasseraufnahmefähigkeit der Atmosphäre um 7%.

Die Projektionen zeigen je nach Klimaszenario eine Zunahme der durchschnittlichen Niederschlagsmengen in den Wintermonaten um 10 % bis 2050 und um 20% bis 2085 sowie eine Abnahme in den Sommermonaten. Hieraus resultiert eine Veränderung des Flusshochwassers für die nahe (bis 2050) und ferne Zukunft (bis 2100). Jedoch zeigen die Projektionen je nach Flusseinzugsgebiet regionale Unterschiede auf. Neben den Veränderungen beim mittleren Hochwasser sind aus Sicht der Anlagensicherheit vor allem Starkniederschläge von besonderer Bedeutung, weil diese das höchste Risikopotential für Betriebsbereiche darstellen.

Starkniederschläge aus konvektiven Gewitterzellen sind kleinräumige Ereignisse, bei denen in kurzer Zeit große Regenmengen auftreten. Derartige Ereignisse können in ganz Deutschland auftreten. Deren Intensität wird in den Wintermonaten je nach Klimaszenario bis 2.100 um 20 % (Representative Concentration Pathways (RCP)2.6) und bis 100 % (RCP8.5) bezogen auf die Referenzperiode 1951 – 2006 aufgrund des Klimawandels ansteigen, so dass dieser Gefahrenquelle verstärkte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Eine weitere Ursache für Starkniederschläge ist die sogenannte V_b -Wetterlage, die keineswegs selten ist und großräumig Starkniederschläge insbesondere im Südosten und Osten Deutschlands verursacht und zu massiven Überschwemmungen führt. Wenn sich die Temperaturen an der Wasseroberfläche des Mittelmeeres weiter erhöht, muss auch mit zunehmenden Niederschlagsintensitäten durch die V_b -Wetterlage gerechnet werden (vgl. Kapitel 4.1.3.3).

Problematisch erscheint jedoch die Verwendung der zugrundeliegenden Niederschlagsmengen im KOSTRA-Atlas (KOSTRA-DWD-2010R). Ausgehend von einem 100-jährlichen Ereignis bilden die angegebenen statistisch ermittelten Mittelwerte der Niederschlagshöhenhöhen für verschiedenen Dauerstufen nicht annähernd die schon heute beobachteten maximalen Starkniederschläge ab. Dies wurde in der Nachbetrachtung des Ereignisses an Ahr und Erft im Juli 2021 erneut sichtbar.

Fasst man die Erkenntnisse der Folgen des Klimawandels zusammen, ist ein Klimaanpassungsfaktor von 1,2 für Flusshochwasser und Starkniederschläge, wie er in der TRAS 310 im Jahr 2011 eingeführt und in den Hinweisen und Erläuterungen begründet wurde, nach wie vor gerechtfertigt.

Umgekehrt sind in den Sommermonaten längere Trockenperioden mit niedrigen Wasserständen in den Flüssen und Bächen zu erwarten. Welche Auswirkungen dies auf die Anlagensicherheit hat, wurde bislang nicht vertieft untersucht. Deshalb fehlen derzeit die systematisch eruierten Grundlagen, um diese Naturgefahr in einer TRAS zu berücksichtigen.

Anstieg des Meeresspiegels

Der Meeresspiegel wird u.a. aufgrund des Abschmelzens der Eisbedeckungen in der Antarktis und auf Grönland sowie durch die Volumenzunahme bei steigender Wassertemperatur ansteigen. Die Prognosen schwanken gegenwärtig zwischen 0,6 m bis 1 m bis zum Jahr 2100, wobei es regionale Unterschiede geben wird. In Verbindung mit Orkanen wird sich die Intensität von Sturmfluten in der Küstenregion erhöhen. Hiervon wird die Deutsche Bucht am stärksten betroffen. Eine Nacherhöhung von Hochwasserschutzmaßnahmen im Küstenbereich, wie sie die TRAS 310 bis zum Jahr 2050 empfiehlt, ist trotz des langsamen Anstiegs des Meeresspiegels dringend geboten.

Wind- und Böengeschwindigkeit

Obwohl bislang keine bzw. keine einheitliche Zunahme der Tage mit Böengeschwindigkeiten über 8 bzw. 9 Bft zu erkennen ist, gehen die Klimaforscher von einer zunehmenden Häufigkeit solcher Ereignisse aus. Die Projektionen zeigen jedoch keinen einheitlichen Trend für eine Zunahme der Intensität, so dass die Einführung eines Klimaanpassungs-faktors nach wie vor wissenschaftlich nicht eindeutig begründet werden kann. Auch die regionale Verteilung auslegungsrelevanter Böengeschwindigkeiten und Windspitzen kann sich aufgrund des Klimawandels ändern.

Eis- und Schneetage

Mit zunehmender Lufttemperatur verringert sich die Zahl der Eistage in Deutschland. Auch die mittleren Schneemengen werden im Durchschnitt zurückgehen. Gleichwohl wird es auch in Zukunft Perioden mit starkem Frost und hohen Schneemengen geben. Dass dies keineswegs im Widerspruch zum Klimawandel steht, kann mit vier Effekten begründet werden:

1. Schwächung des Jetstreams durch die zunehmende Verringerung der Temperaturdifferenz zwischen Äquator und Arktis
2. temporär auftretende Schwächung des Polarwirbels über der nördlichen Polarkappe
3. V_b-Wetterlage (vgl. Kapitel 4.1.3.3.)
4. „Lake-Snow-Effekt“ (z.B. im Winter 1978/79; vgl. Kapitel 4.2.5)

Im Mittel wird der Klimawandel zu einem Rückgang der Schneefälle führen, wahrscheinlich aber nicht zu einem Rückgang der Extremwerte des Niederschlags als Schnee- und Schneeregen. Solche Extremfälle werden vermutlich seltener werden, doch können auch höhere Schneelasten als bisher beobachtet nicht völlig ausgeschlossen werden. Zur Berücksichtigung möglicherweise bereits eingetretener oder bis 2050 zu erwartender Wirkungen des Klimawandels auf extreme Schneelastereignisse wird daher angeregt, die Forderung nach einer Berücksichtigung außergewöhnlicher Schneelasten als außer-gewöhnlichen Lastfall – wie sie bereits für das Norddeutsche Tiefland besteht – auf das gesamte Bundesgebiet auszudehnen.

Globale Betrachtung des Klimawandels

Der 6. Assessment Report (AR) bestätigt die schon seit längerem bekannten Aussagen bezüglich des globalen Klimawandels, wobei diese nunmehr aufgrund verbesserter Klimamodelle und leistungsstärkerer Computer ein höheres Vertrauen besitzen. Höchste Aufmerksamkeit verdienen die Aussagen jedoch zur Geschwindigkeit des Klimawandels. So wird für das Jahr 2030 davon ausgegangen, dass die mittlere globale Temperatur schon um 1,5 Grad angestiegen sein könnte und damit 10 Jahre früher als noch im 5. AR angenommen wurde.

Der beschleunigte Temperaturanstieg macht es erforderlich, dass die Maßnahmen zur deutlichen Emissionsminderung von Treibhausgasen sehr viel schneller durchgeführt werden müssen. Dies gilt auch für Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel und damit auch für die Anlagensicherheit. Bislang wurde die Berücksichtigung eines Klimaanpassungsfaktors in der TRAS 310 für das Jahr 2050 vorgesehen, was vor dem Hintergrund der Erkenntnisse des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) als zu spät erscheint.

- c) Prüfung der Fortentwicklung des Standes der Technik in Bezug auf Risikomanagement sowie Vorkehrungen und Maßnahmen gegen die betrachteten Gefahrenquellen

Neue Anforderungen zum Hochwasserschutz in Risikogebieten

In der Vergangenheit hat sich gezeigt, dass erhebliche Hochwasserschäden auch in Gebieten entstehen können, die als Überschwemmungsgebiete nicht ausgewiesen wurden. Gleichwohl sind sie dennoch „Risikogebiete“ nach der EU-Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (Richtlinie 2007/60/EG). Mit der Einführung des § 78b WHG wird der Tatsache Rechnung getragen, dass es auch hinter dem Deich keinen absoluten Schutz gibt und entsprechend Vorsorge zu treffen ist. Mit § 78b WHG wird eine Rechtsgrundlage geschaffen, um Hochwasserschutzmaßnahmen zur Schadensminimierung auch außerhalb von Überschwemmungsgebieten zu ermöglichen. Dies ergibt sich auch aus dem voranschreitenden Klimawandel. Hochwasserschutz ist nicht allein Aufgabe der öffentlichen Hand, sondern eine gesamt-gesellschaftliche Aufgabe, an der sich jeder Betroffene zu beteiligen hat.

Im Gegensatz zu Überschwemmungsgebieten werden in Risikogebieten für bauliche Anlagen keine Verbote ausgesprochen, sondern eine dem Hochwasserrisiko angepasste Bauweise für neue Anlagen gefordert. Damit wird auch der Bauherr mit in die Verantwortung zum Hochwasserschutz genommen und kann sich nicht auf die Verantwortung der Behörden zurückziehen. Darüber hinaus ist das Hochwasserrisiko bei der Ausweisung neuer Baugebiete und bei der Aufstellung von Bauleitplänen bzw. einzelnen baulichen Maßnahmen zu berücksichtigen.

Mit dem neu eingeführten § 78c wurde ein eingeschränktes Errichtungsverbot für neue Heizölverbraucheranlagen in Risikogebieten erlassen. Sofern wirtschaftlich vertretbar müssen bestehende Anlagen bis 2033 nachgerüstet werden.

Stand der Technik des Risikomanagements

Neben der methodischen Vorgehensweise in den technischen Regeln TRAS 310 und 320 werden international eingeführte Methoden der Risikoanalyse bzgl. ihrer Anwendbarkeit auf Naturgefahren vorgestellt. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob ein vergangenes Ereignis systematisch analysiert werden soll, um Fehler zu erkennen und abzustellen

oder ob die Anlagensicherheit für ein zukünftiges Ereignis bestimmter Intensität überprüft werden soll. Einzelne Managementmethoden sind aber auch für beide Zielsetzungen anwendbar (z.B. Bow-Tie-Methode).

Für die Analyse vergangener Ereignisse werden am Beispiel einer Raffinerie in Japan, die vom Tsunami im Jahr 2011 betroffen war, zwei Analysemethoden (STEP und MTO) vorgestellt. Beide Methoden benutzen Charts, um die Ereignisabläufe zu visualisieren und um Fehler zu erkennen.

Eine anschauliche Methode, die zur Untersuchung vergangener Störfallereignisse sowie zur Überprüfung der Anlagensicherheit gegenüber zukünftigen Ereignissen herangezogen werden kann, ist die Bow-Tie-Analyse. Sie ist eine grafische Methode, mit der eine logische Beziehung zwischen den Ursachen, Auslösern und den Folgen eines Störfalls dargestellt werden. Auf dieser Grundlage können Vorkehrungen und Maßnahmen (Barrieren) zur Risikoverminderung entwickelt werden.

Neben diesen Vorgehensweisen wurde im Joint Research Center das web-basiertes System mit dem Namen RAPID-N entwickelt. Hierbei handelt es sich um eine probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA), die die Risiken für Industrieanlagen gegenüber Naturgefahren auf der Grundlage von Wahrscheinlichkeits- und Schadensausmaßbetrachtungen abschätzt. Die Grundlage hierfür bilden vergangene Ereignisse, bei denen in Abhängigkeit von der Intensität eines Naturereignisses die Schadensbilder für einzelne Anlagen-komponenten (z. B. Tank) aufgenommen und ausgewertet wurden. Für eine bestehende Anlage kann unter der Annahme einer bestimmten Intensität eines auslösenden Ereignisses, wie z.B. Erdbeben, und den definierten Schadensbilder (Damage State) vergangener Ereignisse abgeleitet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese Schadensbilder für die betrachtete Anlage eintreten werden. Mit den Schadensbildern wird auch eine Abschätzung der freigesetzten Stoffmenge vorgenommen.

Mit RAPID-N kann eine Natech-Risikoanalyse für eine einzelne Anlage oder einen Industriepark durchgeführt werden. Das Tool kann für Landnutzungs- oder Notfallplanungszwecke verwendet werden, indem die möglichen Folgen verschiedener Natech-Szenarien analysiert werden. Es kann auch Notfallmaßnahmen unterstützen, indem es schnell Standorte identifiziert, an denen möglicherweise Natech-Unfälle aufgetreten sind, sodass Ersthelfer und die Bevölkerung in der Nähe der Anlagen rechtzeitig gewarnt werden können. Schwerpunktmäßig wurde es für die Betrachtung der Folgen eines Erdbebens entwickelt.

Eine spezielle excelbasierte Software wurde für die Risikoanalyse für windbedingte Projektile entwickelt. Das Tool soll näherungsweise folgende zwei Fragen beantworten:

1. Wie stark kann ein Körper von einer bestimmten Höhe über dem Erdboden durch Wind bzw. einem Orkan beschleunigt werden und welche Geschwindigkeit hat er am Aufprallort?
2. Wie tief kann dieses Projektil in Stahl eindringen und zu einer Beschädigung eines Stahltanks führen?

Trotz verschiedener Vereinfachungen und des Fehlens einer technischen Prüfung unter realen Bedingungen, bietet das Softwaretool die Möglichkeit einer ersten Risikoabschätzung.

Ein weiteres Tool betrachtet die Erwärmung von Tankinhalten unter Sonneneinstrahlung bei längeren Hitzeperioden. Auf diese Weise lässt sich abschätzen, ob sich z.B. thermisch instabile Stoffe zersetzen, wie z.B. organischen Peroxide, oder ob sich chemische Reaktionen bei bestimmten Stoffen einstellen können. Auch können derartige Abschätzungen einen Betrag zur Auslegung von Kühlanlagen für Chemikaliertanks liefern.

Arbeitspaket 3: Erarbeitung von Entwürfen für die Weiterentwicklung der TRAS sowie der „Hinweise und Erläuterungen“ auf der Grundlage der Arbeitspakete 1 und 2

Empfehlungen zur Fortschreibung der TRAS 310

Infolge der Ereignisse an Ahr und Erft im Juli 2021 wurde im Verlauf der Arbeiten überprüft, ob die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) herausgegebenen KOSTRA-Werte für Starkregenereignisse mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren den tatsächlich eingetretenen Niederschlagshöhen entsprechen. Durch die Zusammenstellung zahlreicher historischer Starkniederschlagsereignisse konnte nachgewiesen werden, dass dies nicht der Fall ist. Daher wurde aus den historischen Starkregenereignissen Niederschlagshöhen abgeleitet, die für Gefahrenquellenanalyse sowie für die Festlegung von Vorkehrungen zur Störfallverhinderung nach § 3 StörfallV geeignet sind. Darüber hinaus wurden Niederschlagshöhen für die Maßnahmen zur Begrenzung der Störfallauswirkungen nach § 3 und für die Gefahrenabwehr nach § 10 StörfallV vorgeschlagen.

Mit Hilfe einer Niederschlags-/Abflusssimulation konnte am Beispiel eines Betriebes nachgewiesen werden, dass die entwickelten Starkniederschlagshöhen zu realistischen Ergebnissen führen. Darüber hinaus konnte durch die Simulationsrechnungen gezeigt werden, dass PEN-Werte (praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags) mit den Jährlichkeiten von 200 Jahren zur Störfallverhinderung und 500 Jahren für die Störfallauswirkungsbegrenzung nicht ausreichend sind, weil wichtige Informationen über die Gefährdung einer Anlage nicht erkennbar sind.

Daher erscheint es notwendig, neben diesen PEN-Werten auch Mindestniederschlagshöhen festzulegen, die bundesweit anzusetzen sind. Diese sollten sich an den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens abgeleiteten Niederschlagshöhen orientieren. Es wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nachgewiesen, dass sich die Vorgabe von Jährlichkeiten zur Festlegung von Niederschlagshöhen nicht zielführend ist. Neben den Niederschlagshöhen ist auch die Dauer der Niederschläge von großer Bedeutung. Mit Hilfe der Niederschlags-/Abflussberechnungen konnte verdeutlicht werden, dass das höchste Gefahrenpotential für Anlagen innerhalb der ersten Stunden nach Niederschlagsbeginn eintritt. Deshalb wurden die Dauerstufen 1, 3 und 6 Stunden empfohlen.

Darüber hinaus sollte analog zu den Heizölverbraucheranlagen in Risikogebieten (§ 78c WHG) die Nachrüstungspflicht für Betriebsbereiche von 2050 auf den 5.1.2033 verkürzt werden.

Empfehlungen zur Fortschreibung der TRAS 320

Die Baurechtsnormen in Deutschland wurden über die vergangenen Jahre mehrfach überarbeitet, wobei im Jahr 2005 eine grundlegende Änderung für die Bemessung von Anlagen und Bauwerken eingeführt wurde. Während vor 2005 eine bundesweit einheitliche Regelung für die Windlast bestand, wurde mit der Novellierung der DIN 1055-4 eine Windzonenkarte eingeführt, die eine regionale Differenzierung der anzusetzenden Windlast ermöglicht. Gleichzeitig wurden

die Grundlagen der statischen Auslegung durch die Einführung von Teilsicherheitsbeiwerten verändert. Vor diesem Hintergrund ist eine Nachrechnung der Statik bestehender Anlagen grundsätzlich problematisch. Die Einführung der Windzonen führte dazu, dass sich in den Windzonen I und II eine Verminderung der anzusetzenden Windlast ergab, während umgekehrt in den Windzonen III und IV die Windlast zum Teil deutlich erhöht wurde. Als Folge der veränderten Bemessungsgrundlagen ist davon auszugehen, dass einzelne Anlagen in den Windzonen III und IV nicht ausreichend gegen Starkwinde ausgelegt sind. Diese Problematik ist rechtlich für die Anlagenbetreiber nicht von Bedeutung, weil das Baurecht einen Bestandsschutz für bestehende Anlagen vorsieht. Mit Einführung der TRAS 320 wurde durch die Einstufung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen in die Schadenfolgenklasse CC 3 die anzusetzende Windlast um weitere 10 % erhöht. Diese Anforderung basiert jedoch nicht auf einer Veränderung der Baurechtsnormen, sondern auf einer Anforderung des Störfallrechts. Der Stand der Sicherheitstechnik ist dynamisch zu interpretieren und kennt somit keinen Bestandsschutz.

Die Kriterien für „ernste Gefahr“ der StörfallIV entsprechen denen, die in der Baunorm DIN EN 1990 bei „hohe Folgen“ genannt werden. Auch deshalb wird empfohlen, eine Einstufung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile in die Klassen CC 3 vorzunehmen.

Summary

The Federal Immission Control Act (BImSchG), together with the Mayor Accident Ordinance (StörfallV), is intended to ensure that people and the environment are protected against hazards from plants or establishments in which hazardous substances are present from a certain quantity (§ 2 No. 5 StörfallV). According to § 3 (2) of the Mayor Accident Ordinance natural hazards are also to be regarded as potential reasons of mayor accidents. In order to concretise these requirements and to adapt the state of the art safety technology to the consequences of climate change, the following two Technical Rules on Installation Safety (TRAS) have been issued by the Federal Minister of the Environment, Nature Conservation, Nuclear Safety and Consumer Protection, which were previously developed and adopted in the Commission on Process Safety (KAS):

The TRAS 310 "Precautions and Measures against the Hazard Sources Precipitation and flooding"; it was published in the Federal Gazette on 24.2.2012.

The TRAS 320 "Precautions and Measures against Hazard Sources Wind, Snow and Ice Loads"; it was announced in the Federal Gazette on 16.07.2015.

These published rules must be reviewed regularly in order to adapt them to the State of the Art on Process Safety. This research project should prepare and support the work of the KAS. For this purpose, the following three work packages have been defined:

1. Evaluation

In this work package, the application of the two technical rules in approval and monitoring practice should be evaluated based on a survey and detailed studies on sample plants. In addition, a research for comparable approaches to Natech Risk Management in other countries should be carried out.

2. Further development

In a 2nd work package is to be examined, whether new findings about the consequences of climate change and/or the development of the State of the Art on Process Safety require adjustments to the technical rules. This also includes:

- a) The examination of the need (due to advanced knowledge of climate change) to include other environmental hazard sources that have not yet been taken into account in the TRAS,
- b) The comparison of TRAS with regulations in other countries for further compliance with the State of the Art on Process Safety.
- c) Updating the knowledge about the expected effects of climate change on the considered hazard sources.

3. Updating

On the basis of the results of work packages I and II, drafts for the further development of the TRAS and the "Notes and Explanations" on them are to be developed.

Work package 1: Evaluation of TRAS 310 and 320 among operators, licensing authorities and experts

Extensive questionnaires were created to carry out the evaluation in order to obtain a most comprehensive and differentiated picture of the application of the two technical rules (TRAS 310 and 320). Therefore, the questionnaires were adapted to the respective target group (operators of establishments, authorities and experts according to § 29a BImSchG with expertise

"environmental hazard sources". In addition, 7 plant operators were interviewed about the application or implementation of TRAS 310 and TRAS 320. The evaluation of the answered questionnaires as well as the results of the personal interviews with the operators can be summarized as follows:

TRAS 310

The TRAS 310 is supported by most respondents. Their application to existing systems is usually regarded as unproblematic. The methodological approach is mainly accepted by experts, while plant operators sometimes prefer their own approach. As a rule, the determination of the necessary information for the hazard source analysis does not pose a problem for river floods, because the necessary risk maps can usually be accessed via the Internet. However, little attention is paid to the consideration of the climate adaptation factor in the hazard sources analysis and for the elaboration of a protection concept. The systematic consideration of the inflow and outflow pathways of the water has proven to be useful. When analyzing incident scenarios, scenarios are often used in which incidents are triggered by operational causes. Usually, more than the largest connected mass (GZM) is assumed. The domino effect is also usually included in the investigation. However, the implementation of measures to prevent the effects of accidents is usually regarded as impractical. A review of TRAS 310 was suggested for the following points:

1. Tightening of the content in the TRAS 310 with improved elaboration of the specific requirements
2. Too high technical requirements for the determination of dynamic pressures due to the flow speed of the water, especially in the case of flash floods and the calculation of loads triggered by debris impacts
3. Majority rejection of the inclusion of further sources of danger

Overall, the survey showed that the TRAS 310 has proven its worth in implementation and that substantial changes are not required neither by the operators nor by the authorities.

TRAS 320

Unlike the TRAS 310, the TRAS 320 is heavily criticized in the following points.

1. No consideration of organizational measures, especially for existing establishments, with regard to wind loads as an alternative to technical retrofitting measures
2. Problematic recalculation of the structural design of existing establishments due to the changed fundamentals of structural planning since 2005
3. Excessive scope of explanations in TRAS 320 and in the notes and explanations
4. Difficulties in considering windborne debris, especially compared to biogas plants with membrane covers

Overall, based on the results of the survey, it can be stated that operators of establishments, experts and representatives of the authorities consider a review of TRAS 320, particularly with regard to the requirements for existing systems, to be urgently required. In particular, the deadline regulation leads to uncertainty among the responsible authorities.

Research for comparable approaches to Natech risk management in other countries

Flood regulations for COMAH installations in UK

Extensive regulations and guidelines for flood protection for COMAH systems have been drawn up in Great Britain. With regard to floods and heavy precipitation and in contrast to TRAS 310 no defined protection target and no climate adaptation factor are specified. Nevertheless, the operator must obtain information from the authorities about the influence of climate change on future flood risks. When comparing the British and German requirements, the following points should also be noted:

1. The Environment Agency guidance (EA 2015) makes suggestions for addressing flood issues in safety reports. The TRAS 310 does not contain anything similar.
2. The Operational Delivery Guide - Inspection of COMAH Operator Flood Preparedness (HSE 2018) is a guide for inspections related to floods (and thus implicitly also to heavy precipitation). A comparable document for inspections as an administrative regulation to the StörfallV or guidelines of the federal/state committee for immission control & accident prevention is not available in Germany.
3. When prioritizing inspections, the effect of flooding outside the area of operation should also be considered if it affects the safety of establishments. This applies, for example, to the failure of the power supply or the communication infrastructure, but also to accessibility to the company. In addition, the availability of assistants may be limited.

Regulations against earthquakes in the French standards

Although the natural hazard "earthquake" is different from wind, snow and ice loads, it is still a hazard source that affects the structures of Natech systems. The comparison of TRAS 320 with the French standard for earthquakes (NF EN 1998-1:2005 or NF EN 1998-1/NA:2007) showed the following differences and analogies:

1. In Germany, plants are subject to the Major Accident Ordinance if they exceed certain quantity thresholds for hazardous substances. In France, it is not the tonnage thresholds that are relevant for the application of requirements, but the effects on the surrounding environment in the event of an earthquake. Depending on the location of the plant, the number of affected risky plants is thus reduced.
2. Similar to TRAS 320, the requirements in France relate to new and existing installations. A calculation of the stability is also required for existing systems. However, in France, lower reference values for peak ground acceleration are used for existing plants compared to new plants. This means that the requirements for existing systems are lower than for new systems. The state of the art in safety technology therefore has two different requirement levels.
3. With regard to the avoidance of an accident, the protection goal definitions are identical. As an alternative to this protection goal, reducing the intensity of accidents is mentioned in France in order to prevent people outside the operational limits from being affected by fatal consequences. According to the Major Accidents Ordinance, major accidents are to be prevented (§ 3 (1) StörfallV) and the effects of major accidents are to be kept as low as possible through preventive measures (§ 3 (3) StörfallV). Contrary to the French standards precautions must be taken for both cases.

4. The French standards also have deadline regulations for the implementation of the requirements.

Work package 2: Further development of the technical rules in the case of recent findings regarding climate change and the State of the Art on Process Safety

- a) Inclusion of other environmental hazard sources that have not yet been taken into account in the TRAS

Hail

The few studies about the development of hail indicate a slight increase in the hail potential for the period 2021 to 2050, with the changes only being statistically significant in north-west and south of Germany. The individual models/scenarios project an increase of 4 up to 41%. Because hail events are small-scale and cannot be measured directly, it is currently hardly possible to create a meaningful hazard map for Germany due to the limited number of observation systems on the ground. It is therefore currently not possible to specify requirements in TRAS 310.

Heat waves

Heat periods are defined as a sequence of at least three days with a daily maximum temperature > 30 °C and a daily low temperature > 20 °C. As the previous development of the number of hot days and the corresponding projections show, heat periods will increase in the future. Whether high-temperature periods in Germany can have an impact on the safety of plants in which dangerous substances (e.g. thermally unstable substances) are present has not yet been systematically investigated.

It is recommended to take into account the changes in maximum temperatures due to climate change in the context of implementation according to § 3 StörfallV. A separate technical rule does not appear to be required at the moment.

- b) Updating the state of knowledge about the likely effects of climate change on natural hazards

The current state of knowledge about the latest findings regarding the changes in environmental sources of danger can be summarized for Germany as follows:

Floods and rainfall

Undisputed among all climate researchers is the increase in air temperature due to climate change. A temperature rise of 1°C increases the water absorption capacity of the atmosphere by 7%.

Depending on the climate scenario, the projections show an increase in average rainfall in the winter months by 10% by 2050 and by 20% by 2085 as well as a decrease in the summer months. This results in a change in river floods for the near (until 2050) and further future (until 2100). However, the projections show regional differences depending on the river basin. In addition to the changes in the medium flood, heavy rainfall is particularly important for plant safety, because they represent the highest risk potential for the establishments.

Heavy rainfall from convective thunderstorm cells are small-scale events in which large amounts of rain occur in a short time. Such events can occur all over Germany. Depending on the climate scenario, their intensity will increase in the winter months by 20% (RCP2.6 and up to 100% (RCP8.5 in relation to the reference period 1951 - 2006 due to climate change, so greater attention must be paid to this hazard source.

Another reason for heavy precipitation is the so-called V_b weather situation, which is not rare and causes large-scale heavy precipitation, especially in the south-east and east of Germany, and leads to massive flooding. If the temperatures on the water surface of the Mediterranean Sea continue to rise, increasing precipitation intensities must also be expected due to the V_b weather situation.

However, the use of the precipitation amounts in the KOSTRA Atlas seems problematic. Based on a 100-year event, the stated statistically determined averages of the precipitation amounts for different durations do not reflect nearly the maximum heavy rainfall observed today. This became visible again in the review of the event at Ahr and Erft in July 2021.

Summarizing the findings of the consequences of climate change, a climate adaptation factor of 1.2 for river floods and heavy rainfall, as introduced in TRAS 310 in 2011 and substantiated in the instructions and explanations, is still justified.

Conversely, longer dry periods with low water levels in the rivers and streams are to be expected in the summer months. Whether this has an effect on plant safety has not yet been investigated in depth. Therefore, the systematically determined foundations for taking this natural hazard into account in a TRAS are currently lacking.

Rise of the sea level

Due to the melting of the ice cover in Antarctica and Greenland and the increase in volume with rising water temperatures the sea level will rise. Projections currently vary between 0.6 m to 1 m by the year 2100, with regional variations. In combination with hurricanes, the intensity of storm surges in the coastal region will increase. Despite the slow rise in sea level a subsequent increase in flood protection measures in the coastal area, as recommended in TRAS 310, is urgently required.

Wind and gust speed

Although no consistent increase of days with gust speeds above 8 or 9 Bft can be identified, climate researchers assume an increasing frequency of such events. However, the projections do not show a consistent trend for an increase of the intensity, so the introduction of a climate adaptation factor can still not be clearly scientifically justified. The regional distribution of design-relevant gust speeds and wind peaks can also change due to climate change.

Ice and snow days

With the increasing air temperature, the number of ice days in Germany decreases. The average amount of snow will also decrease. Nevertheless, there will be periods of heavy frost and high amounts of snow in the future. This fact is not in contrary to climate change and can be justified in particular by four different effects:

1. Weakening of the jet stream due to the progressive reduction in the temperature difference between the equator and the Arctic
2. Temporary weakening of the polar vortex over the northern polar cap

3. V_b weather conditions
4. 4. "Lake Snow Effect" (e.g. in the winter of 1978/79)

On average, climate change will lead to a decrease in snowfall, but probably not to a decrease in the extreme values of precipitation as snow. Such extreme cases will probably become rarer, but higher snow loads than previously observed cannot be completely ruled out. In order to take into account effects of climate change on extreme snow load events that may have already occurred or are expected upto 2050, it is therefore suggested that the requirement to take extraordinary snow loads into account as an extraordinary load case - as it already exists for the North German - should be extended to the entire country.

Global view of climate change

The 6th Assessment Report (AR) confirms the long-known statements regarding global climate change, which now have higher confidence due to improved climate models and more powerful computers. However, the statements on the speed of climate change deserve the utmost attention. For 2030, it is assumed that the average global temperature could have already risen by 1.5 degrees and thus 10 years earlier than in the 5th. AR was assumed.

The accelerated rise in temperature makes it necessary for the measures to significantly reduce emissions of greenhouse gases to be implemented much faster. This also applies to adaptation measures to climate change and thus also to plant safety. So far, the inclusion of a climate adaptation factor in TRAS 310 has been planned for 2050, which seems too late in the light of the findings of the IPCC.

- c) Examination of the further development of the state of the art with regard to risk management as well as precautions and measures against the sources of danger considered

New requirements for flood protection in risk areas

The past has shown that considerable flood damage can also occur in areas that have not been designated as flood areas. Nevertheless, they are "risk areas" according to the EU Flood Risk Management Directive (Directive 2007/60/EC). With the introduction of § 78b Federal Water Act (WHG), account is taken of the fact that there is no absolute protection even behind the dyke and that appropriate precautions must be taken. With § 78b WHG a legal basis is created to enable flood protection measures to minimize damage outside of flood areas. This is also due to the progressing climate change. Flood protection is not just a task for the public sector, but a task for society as a whole, in which everyone affected has to participate.

In contrast to flood areas, no bans are issued for structural systems in risk areas, but a construction method for new systems that is adapted to the flood risk is required. This means that the builder is also responsible for flood protection and cannot withdraw from the responsibility of the authorities. In addition, the risk of flooding must be taken into account when designating new building areas and drawing up land use plans or individual structural measures.

With the newly introduced § 78c, a limited ban on the construction of new heating oil consumer systems in risk areas was issued. If economically justifiable, existing plants must be retrofitted up to 2033.

State of the art of risk management

In addition to the methodological procedure in the technical rules TRAS 310 and 320, internationally introduced methods of risk analysis are presented with regard to their applicability to natural hazards. Basically, a distinction must be made between whether a past event should be systematically analyzed in order to detect and eliminate errors or whether the plant safety should be checked for a future event of a certain intensity. However, individual management methods are also applicable to both objectives (e.g. Bow-Tie method).

For the analysis of past events, two analysis methods (STEP and MTO) are presented using the example of a refinery in Japan affected by the tsunami in 2011. Both methods use charts to visualize the event sequences and to detect errors.

An illustrative method that can be used to examine past accident events as well as to check plant safety against future events is the Bow-Tie Analysis. It is a graphical method used to show a logical relationship between the causes, triggers and consequences of a major accident. On this basis, precautions and measures (barriers) to reduce risk can be developed.

In addition to these procedures, the web-based system called RAPID-N was developed in the Joint Research Center. This is a probabilistic risk assessment (PRA) that evaluates the risks for industrial plants against natural hazards on the basis of probability and damage impact. The basis of this method are past events, in which, depending on the intensity of a natural event, the damage patterns for individual plant components (e.g. tank) were recorded and evaluated. The probability for occurring damage patterns for an existing plant can be calculated with assuming a certain intensity of a triggering event (e.g. earthquakes) and the defined damage states based on past events. These interim results can be used to draw conclusions about, the subsequent events release, fire and explosion.

With the help of RAPID-N, the Natech risk analysis can be carried out for a single plant or an industrial park. The tool can be applied for land use or emergency planning by analyzing the possible consequences of various Natech scenarios. It can also support emergency measures by quickly identifying locations, where Natech accidents may have occurred, so that first responders and the population near the facilities can be warned in time. It was mainly developed for the consideration of the consequences of an earthquake. A special excel-based software was developed for risk analysis for windborne projectiles. The tool should answer the following two questions:

1. How much can a potential projectile be accelerated from a certain height above the ground by wind or a hurricane and what speed does it have at the impact spot?
2. How deep can this projectile penetrate in steel and can it damage a steel tank?

Despite various simplifications and the lack of a technical examination under real conditions, the software tool offers the possibility of an initial risk assessment.

Another tool considers the heating of tank contents under solar radiation during longer heat periods. In this way, it is possible to estimate whether thermally unstable substances (e.g. organic peroxides) can decompose or whether chemical reactions can occur with certain substances. Such estimates can also provide important information for the design of cooling systems for chemical tanks.

Work package 3: Development of drafts for the further development of the TRAS as well as the "Notes and explanations" on the basis of work packages 1 and 2

Recommendations for updating TRAS 310

As a result of the events on the Ahr and Erft rivers in July 2021, it was checked whether the KOSTRA values for heavy rainfall events published by the German Meteorological Service (DWD) with an annuality of 100 years correspond to the precipitation levels that actually occurred. By compiling numerous historical heavy precipitation events, it could be proven that this is not the case. Therefore, precipitation heights were derived from the historical heavy precipitation events, which are suitable for hazard source analysis as well as for the determination of precautions for the prevention of major accidents according to § 3 StörfallV. In addition, precipitation depths were proposed for measures to limit the effects of major accidents in accordance with Article 3 and for hazard prevention in accordance with Article 10 of the Major Accidents Ordinance.

With the help of a precipitation/runoff simulation, it was possible to demonstrate that the developed heavy precipitation levels lead to realistic results. Furthermore, it could be shown by the simulation calculations that PEN values (practically relevant extreme values of precipitation) with the annualities of 200 years for the prevention of major accidents and 500 years for the limitation of the effects of major accidents are not sufficient, because important information about hazards affecting a plant are not recognizable.

Therefore, it seems necessary to define minimum precipitation levels in addition to these PEN values, which are to be applied nationwide. These should be based on the precipitation levels derived within the framework of this research project. Within the scope of this research project, it was proven that the specification of annualities for the determination of precipitation heights is not expedient. In addition to the precipitation height, the duration of the precipitation is also of great importance. With the help of the precipitation/runoff calculations, it could be demonstrated that the highest risk potential for plants occurs within the first hours after the beginning of precipitation. Therefore, the duration levels 1, 3 and 6 hours were recommended.

Furthermore, analogous to the fuel oil consumer plants in risk areas (§ 78c WHG), the retrofitting obligation for installations and establishments should be shortened from 2050 to the 5th of January 2033.

Recommendations for updating the TRAS 320

The building code in Germany have been revised several times over the past few years, with a fundamental change for the design of plants and buildings being introduced in 2005. While before 2005 there was a nationwide uniform regulation for the wind load, with the amendment of DIN 1055-4, a wind zone map was introduced, which allows a regional differentiation of the wind load to be determined. At the same time, the basics of static design were changed by the introduction of partial safety coefficients. Against this background, recalculation of the statics of existing plants is fundamentally problematic. The introduction of the wind zones led to a reduction in the wind load to be set in wind zones I and II, while conversely in wind zones III and IV the wind load was partly significantly increased. As a result of the changed design bases, it can be assumed that individual plants in wind zones III and IV are not sufficiently designed against strong winds. This problem is not legally important for plant operators, because building code provides for stock protection for existing plants. With the introduction of the TRAS 320, the wind load to be applied was increased by a further 10% with the classification of safety-relevant

installations in the damage sequence class CC 3. However, this requirement is not based on a change in the building code, but on a requirement of the Major Accident Ordinance. The state of the art of process safety must be interpreted dynamically and thus the state of the art knows no stock protection for existing plants.

The criteria for "serious hazard" of the Major Accidents Ordinance correspond to those mentioned in the construction standard DIN EN 1990 for "high consequences". For this reason, too, it is recommended that safety-relevant installations should be classified as CC 3.

1 Aufgabenstellung

1.1 Hintergrund und Problemstellung

Das BImSchG soll zusammen mit der StörfallV (12. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV)) sicherstellen, dass Menschen und Umwelt vor Gefahren durch Anlagen bzw. Betriebsbereiche, in denen gefährliche Stoffe ab einer bestimmten Menge vorhanden sind (§ 2 Nr. 5 StörfallV), geschützt sind. Hierzu sind von den Betreibern Vorkehrungen und Maßnahmen zur Vorbeugung gegen Störfälle zu ergreifen. Nach § 3 StörfallV sind auch natürliche, umgebungsbedingte Einflüsse als auslösende Gefahrenquellen für Störfälle zu betrachten. Weil zahlreiche Naturgefahren, wie z.B. Hochwasser und Starkniederschläge, vom Klimawandel beeinflusst werden, ist eine Neubewertung dieser Gefahrenquellen erforderlich. Als Resultat müssen ggf. technische Regeln und Verwaltungsvorschriften überprüft werden.

Bislang gibt es zwei Technische Regeln für Anlagensicherheit (TRAS), die die Betreiberpflichten bezüglich der Vorbeugung vor Störfälle ausgelöst durch natürliche, umgebungsbedingte „Gefahrenquellen“ konkretisieren:

1. Die TRAS 310 „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser“; sie wurde am 24.2.2012 im Bundesanzeiger veröffentlicht.
2. Die TRAS 320 „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten“; sie wurde am 16.07.2015 im Bundesanzeiger bekannt gemacht.

Nach § 51a BImSchG sind die Technischen Regeln für Anlagensicherheit innerhalb angemessener Zeitabstände, spätestens nach jeweils fünf Jahren, von der KAS daraufhin zu überprüfen, ob die veröffentlichten sicherheitstechnischen Regeln weiterhin dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen. Da beide technische Regeln Naturgefahren zum Gegenstand haben und auf einer einheitlichen Methodik basieren, erschien eine gemeinsame Überprüfung sinnvoll.

1.2 Ziel und Gegenstand des Forschungsprojekts

Dieses Forschungsvorhaben soll die Überprüfung der TRAS 310 und 320 durch die KAS vorbereiten und unterstützen. Dazu wurden folgende drei Arbeitspakete festgelegt:

1. Evaluation

In diesem Arbeitspaket soll die Anwendung der beiden technischen Regeln in der Genehmigungs- und Überwachungspraxis auf Basis einer Umfrage und auf der Grundlage von Detailuntersuchungen an Beispielanlagen evaluiert werden.

2. Fortentwicklung

In einem 2. Arbeitspaket soll geprüft werden, ob neuere Erkenntnisse über die Folgen des Klimawandels und/oder der Entwicklung des Standes der Sicherheitstechnik Anpassungen in den Technischen Regeln erforderlich machen. Hierzu zählt auch

- a) die Prüfung der Notwendigkeit (aufgrund fortgeschrittener Kenntnisse über den Klimawandel) des Einbezugs von weiteren umgebungsbedingten Gefahrenquellen, die bislang in den TRAS nicht berücksichtigt sind,
- b) der Vergleich der TRAS mit Regelungen in anderen Staaten auf weitere Übereinstimmung mit dem Stand der Sicherheitstechnik.

- c) Aktualisierung des Kenntnisstandes über die voraussichtlichen Wirkungen des Klimawandels auf die zu berücksichtigenden Gefahrenquellen

3. Fortschreibung

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Arbeitspakete I und II sollen Entwürfe für die Weiterentwicklung der TRAS sowie der „Hinweise und Erläuterungen“ zu diesen erarbeitet werden.

2 Durchführung der Evaluation bei Betreibern, Genehmigungsbehörden und Sachverständigen

Im Rahmen der Novellierung der TRAS 310 und 320 erschien es notwendig über die praktische Anwendung der beider technischen Regeln ein detailliertes Bild zu erhalten. Deshalb wurden zu Beginn der Arbeiten umfangreiche Fragebögen an folgende Zielgruppen versendet:

1. Betreiber von Anlagen, die der TRAS 310 und 320 unterliegen
2. Genehmigungs- und Überwachungsbehörden (Immissionsschutzbehörden)
3. bekannt gegebene Sachverständige gemäß § 29a BImSchG, mit dem Prüfbereich 8 „umgebungsbedingten Gefahrenquellen“ gemäß Anlage 2 der 41.BImSchV.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse dieser Befragung zusammenfassend vorgestellt. Eine detaillierte Darstellung der Befragung und Auswertung der Ergebnisse ist als Anhang 1 diesem Forschungsbericht beigefügt.

2.1 Überprüfungsbedarfe für die TRAS 310

Allgemein wird die TRAS 310 von den meisten Befragten anerkannt. Dies gilt sowohl für die Anwendung auf Bestandsanlagen als auch für Neuanlagen. Die methodische Vorgehensweise findet vor allem bei Sachverständigen Akzeptanz, während Anlagenbetreiber bisweilen eigene Vorgehensweise bevorzugen. Die Ermittlung von erforderlichen Informationen zur Gefahrenquellenanalyse stellt in der Regel kein Problem dar, weil insbesondere die erforderlichen Gefahrenkarten für Hochwasser von den Behörden meist via Internet zur Verfügung gestellt werden. Allerdings findet die Berücksichtigung des Klimaanpassungsfaktors bei der Gefahrenquellenanalyse sowie bei der Schutzzielefestlegung nur wenig Beachtung. Als sinnvoll hat sich auch die systematische Betrachtung der Zu- und Ablaufwege des Wassers erwiesen.

Als Störfallszenarien werden in der Regel die mögliche Ausbreitung von Stoffen über den Wasserweg sowie über die Atmosphäre betrachtet. Auch wird in der Regel mehr als die größte zusammenhängende Masse (GZM) für die Analyse von Störfallszenarien angenommen. Der Domino-Effekt wird in der Regel in die Untersuchung einbezogen. Wie ein Hinweis verdeutlicht, wird hierbei auf Szenarien zurückgegriffen, bei denen betriebliche Ursachen von Störfällen betrachtet werden. Die Durchführung von Maßnahmen zur Verhinderung der Ausbreitung von Stoffen im Fall von Dennoch-Störfällen wird jedoch meist als nicht praktikabel angesehen.

Zu folgenden Punkten wurde eine Überprüfung der TRAS 310 angeregt:

Grundsätzliches

Eine Straffung der Inhalte in der TRAS 310 wird von den meisten Befragten gewünscht. Insbesondere die konkreten Anforderungen könnten besser hervorgehoben werden, um die Anwendung der TRAS zu erleichtern.

Gefahrenquellenanalyse

In der Praxis hat sich die Ermittlung von Staudrücken aufgrund der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Last bei Aufprall aufgrund der Kombination Strömungsgeschwindigkeit und Treibgut als sinnvoll, aber oftmals als fachliche Überforderung erwiesen.

Die Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels wird bei der Umsetzung der TRAS 310 bei der Gefahrenquellenanalyse sowie der Schutzzielfestlegung oftmals nicht durchgeführt.

Weitere Gefahrenquellen

Die Aufnahme weiterer Gefahrenquellen wird überwiegend abgelehnt, jedoch werden Trockenperioden von zwei Befragten genannt. Durch längere Trockenzeiten wird die Verfügbarkeit von Wasser reduziert und die Waldbrandgefahr erhöht. Je nach örtlicher Lage kann hierdurch eine Gefahr für die Sicherheit von Betriebsbereichen entstehen. Trockenheit kann zu einer Verminderung des zur Verfügung stehenden Löschwassers aus Löschwasserteichen und Löschwasserbrunnen führen. In einem Fall wurde sogar betont, dass wegen Brandgefahr keine Bäume in der Nähe von besonders kritischen Bereichen stehen dürfen.

Darüber hinaus wird die Abgrenzung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen zu nicht-sicherheitsrelevanten Anlagenteilen bei der Anwendung von TRAS 310 und 320 bisweilen als schwierig empfunden, wenn die Anlagenteile im Verbund betrieben werden. Wenngleich dies im Einzelfall durchaus nachvollziehbar ist, so stellt die Abgrenzung kein spezifisches Problem der TRAS 310 oder 320 dar.

Insgesamt hat die Befragung ergeben, dass sich die TRAS 310 im Vollzug bewährt hat und substanzielle Änderung weder von Betreibern von Betriebsbereichen noch von Genehmigungsbehörden gefordert werden. Dass die Bearbeitung einzelner Anforderungen, wie z.B. die Ermittlung von Staudrücken, im Einzelfall zu Problemen führt, ist niemals gänzlich auszuschließen und hängt neben den örtlichen Randbedingungen auch von der Qualifikation des Bearbeiters bzw. Sachverständigen ab. Auch in den persönlichen Gesprächen mit Betreibern von Betriebsbereichen wurde immer wieder betont, dass „man mit der TRAS 310 leben kann.“

2.2 Überprüfungsbedarfe für die TRAS 320

Die TRAS 320 wird anders als die TRAS 310 in einigen Punkten stark kritisiert. Eine Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Rechtsgedanken in den verschiedenen Fachrechtsbereichen, die in der TRAS 320 aufeinandertreffen. Der Bestandsschutz nach Baurecht und die Pflicht zur Anpassung an den sich dynamisch entwickelnden „Stand der Sicherheitstechnik“ im Störfallrecht führen in der Praxis zu einer Verunsicherung von Betrieben und den jeweils zuständigen Behörden. Dieser Konflikt muss juristisch aufgearbeitet und bewertet werden und wird deshalb an dieser Stelle nicht weiter diskutiert.

Dies gilt auch für den Rechtsstatus bzw. die Verbindlichkeit einer TRAS zur Festlegung des Standes der Sicherheitstechnik. Vor diesem Hintergrund wird auch die Festlegung von Fristen zur Umsetzung der Anforderungen für Bestandsanlagen in der TRAS 320 kritisch hinterfragt. Behörden und Unternehmen beklagen gleichermaßen, dass u.a. dieser Punkt zu erheblichen Unsicherheiten und damit zum Vollzugsdefizit der TRAS 320 beiträgt.

Die Problematik der Aufwendungen für die Umsetzung der Anforderungen der TRAS 320 bei Bestandsanlagen kann zwar grundsätzlich nachvollzogen werden, jedoch erfolgt im Rahmen dieses Forschungsvorhabens keine vertiefende Untersuchung dieses Themas. Letztlich kann die Frage der Verhältnismäßigkeit von Anforderungen an bestehende Anlagen nicht in der TRAS sondern nur von den Vollzugsbehörden unter Kenntnis der Umstände des Einzelfalls geklärt werden.

Vor diesem Hintergrund konzentrieren sich die folgenden Ausführungen ausschließlich auf die von den Befragten angeführten Überprüfungsbedarfe, die folgende Hauptpunkte betreffen.

Gleichwertigkeit von technischen und organisatorischen Maßnahmen

Die meisten Befragten weisen darauf hin, dass bzgl. der Bestandsanlagen als Alternative zu den technischen Maßnahmen (Nachrüstung) keine organisatorischen Maßnahmen genannt werden, die ebenfalls ein dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechendes Niveau gewährleisten. Im Rahmen der Überarbeitung der TRAS 320 ist daher zu prüfen, ob und welche organisatorischen Maßnahmen in Frage kommen, wie für diese ein Nachweis der Gewährleistung eines gleichwertigen Niveaus geführt werden kann und ob diese als gleichwertig zu den technischen Maßnahmen anzusehen sind.

Umsetzbarkeit der Anforderungen der TRAS 320 für Bestandsanlagen

Vor dem Hintergrund, dass sich die Grundlagen für die Tragwerksplanung seit 2005 grundlegend verändert haben und für ältere Anlagen meist keine Statiken vorliegen, muss geprüft werden, ob eine Nachrechnung der Tragwerksauslegung von Bestandsanlagen bis zu einem Stichtag überhaupt möglich ist, zumal die Verfügbarkeit qualifizierter Tragwerksplaner offenbar begrenzt ist. Möglicherweise müssen hier individuelle Lösungen geschaffen werden, um dem Vollzug eine gewisse Flexibilität zu ermöglichen. Für die Überprüfung kann es hilfreich sein, die verschiedenen Facetten zu unterscheiden:

1. Änderung der Anforderungen an die Tragwerksauslegung: Hier lässt die TRAS 320 bei Bestandsanlagen bereits eine weitere Verwendung älterer Normen zu. Es ist zu überprüfen, ob diese Regelungen erweitert werden können.
2. Änderung der Auslegungsanforderungen: Für die Gefahrenquelle Wind haben sich die Auslegungsanforderungen 2005 nur für einen Teil des Bundesgebietes geändert und die zusätzlichen Anforderungen der TRAS sind eher gering. Es wäre zu prüfen, ob bei bestehenden Anlagen, wenn sich die Auslegungsanforderungen nicht wesentlich verändert haben, auf eine Überprüfung und Nachrechnung der Tragwerksauslegung bis zur nächsten wesentlichen Änderung der Anlage verzichtet werden kann.
3. Verfügbarkeit von Tragwerksplanern: Bei der Abfassung der TRAS 320 und dem Empfehlen von Umsetzungsfristen wurden bereits Überlegungen hinsichtlich der Verfügbarkeit von entsprechenden Experten angestellt.

Grundsätzliches

Eine Straffung der Inhalte für die TRAS 320 wird ebenso wie für die TRAS 310 als wünschenswert angesehen, was das Erkennen der Anforderungen erleichtern würde. Auch die Hinweise und Erläuterungen erscheinen den meisten Befragten als zu weitgehend und bieten daher nur wenig Hilfestellung bei der Umsetzung.

Weitere Gefahrenquellen

Die Gefahr von Projektilen insbesondere gegenüber Biogasanlagen mit Membranabdeckungen sollte im Rahmen der Überarbeitung der TRAS 320 noch einmal diskutiert werden.

Insgesamt ist aufgrund der Ergebnisse der Befragung festzustellen, dass Betreiber von Betriebsbereichen, Sachverständige und Behördenvertreter, sofern letztere sich im Vollzug mit der TRAS 320 befasst haben, eine Überprüfung der TRAS 320 insbesondere bzgl. der Anforderungen an bestehende Anlagen für dringend geboten halten. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund der Stichtagsregelung, die zu einer Verunsicherung der zuständigen Behörden beiträgt.

3 Recherche nach vergleichbaren Ansätzen zum Natech Risikomanagement in anderen Staaten

In anderen Staaten wurden rechtliche und technische Regeln oder Leitfäden mit vergleichbarer Zielsetzung zum Natech Risikomanagement entwickelt. Für diese Studie wurden Regelungen für Anlagen im Anwendungsbereich der Seveso-Richtlinie (2012/18/EU) im Vereinigten Königreich (COMAH-Anlagen) und Frankreich (Risikoplanen) ausgewählt. Analog zu Kapitel 2 werden im Folgenden die wichtigsten Vergleichsergebnisse zusammenfassend dargestellt. Die detaillierten Rechercheergebnisse sind als Anhang 2 beigefügt.

3.1 Vergleich mit der TRAS 310 mit dem Vorgehen in Großbritannien bzgl. der Gefahrenquelle Hochwasser

In Großbritannien wurden umfangreiche Regulations und Leitlinien zum Hochwasserschutz für COMAH-Anlagen erarbeitet. Im Unterschied zur TRAS 310 werden in Großbritannien jedoch keine konkreten Schutzziele vorgeben. Auch wurde kein Klimaanpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels bzgl. Hochwasser und Starkniederschläge. Gleichwohl wird im Leitfaden „Preparing for flooding“ der Environment Agency darauf hingewiesen, dass Informationen über den Einfluss des Klimawandels auf zukünftige Hochwasserrisiken von den Behörden einzuholen sind. Eine konkrete Vorgabe zur Nutzung dieser Informationen z.B. zur Festlegung des Schutzziels ist nicht festgelegt.

Beim Vergleich der englischen und deutschen Anforderungen sind darüber hinaus noch folgende Punkte festzuhalten:

1. Der Leitfaden der Environment Agency (EA, 2015) macht Vorschläge zur Behandlung des Themas Hochwasser in Sicherheitsberichten. Ähnliches ist in der TRAS 310 nicht enthalten. In der Vollzugshilfe des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMU) zur StörfallV sind im Kapitel 9.2 (insbesondere Kapitel 9.2.6.1.2) und Anhang 1 zwar auch Anforderungen an die Behandlung von Hochwasser als Gefahrenquelle enthalten, jedoch nicht in vergleichbarem Umfang und vergleichbarem Detaillierungsgrad.
2. Der Operational Delivery Guide - Inspection of COMAH Operator Flood Preparedness (HSE, 2018) ist eine Anleitung für Inspektionen bezogen auf Überflutungen (damit implizit auch auf Starkniederschläge). Ein vergleichbares Dokument für Inspektionen als Verwaltungsvorschrift zur StörfallV oder Leitfaden des Bund/Länder-Ausschusses für Immissionsschutz & Störfallvorsorge steht in Deutschland nicht zur Verfügung. In der Arbeitshilfe zum Überwachungssystem nach § 16 der StörfallV vom Ausschuss Immissionsschutz und Störfallvorsorge (AISV) und der Länder-Arbeitsgemeinschaft Sicherheitstechnik (LASi; Stand 2004) wird im Anhang Teil 16 lediglich die Erdbebensicherheit angesprochen.
3. Bei der Festsetzung von Prioritäten für Inspektionen sind auch die Wirkung von Überflutungen außerhalb des Betriebsbereichs zu berücksichtigen, wenn sie Wirkungen auf die Sicherheit des Betriebsbereichs haben. Dies betrifft z.B. den Ausfall der Stromversorgung oder der Kommunikationsinfrastruktur aber auch die Zugänglichkeit zum Betriebsgelände. Darüber hinaus kann die Verfügbarkeit von Hilfskräften eingeschränkt sein. Vergleichbares fordert die TRAS 310 nur teilweise.

3.2 Der Vergleich mit der TRAS 320 mit den französischen Normen gegenüber Erdbeben

Wenngleich die technischen Regeln (TRAS 320 und NF EN 1998-1:2005 bzw. NF EN 1998-1/NA:2007) unterschiedliche Naturgefahren zum Gegenstand haben, lassen sich dennoch bestimmte Vorgehensweisen in den Regelwerken miteinander vergleichen. Im Einzelnen können folgende Unterschiede und Analogien festgestellt werden:

1. Der Anwendungsbereich für Natech-Anlagen (in Bezug auf Erdbeben) in Frankreich und für Betriebsbereiche in Deutschland ist sehr unterschiedlich definiert. In Deutschland unterliegen Anlagen der StörfallV, wenn sie bestimmte Mengenschwellen gefährlicher Stoffe überschreiten. In Frankreich sind nicht die Mengenschwellen für die Anwendung von Anforderungen relevant, sondern die Wirkungen eines Erdbebens auf die benachbarte Umgebung. In Abhängigkeit vom Standort der Anlage wird somit die Zahl der betroffenen Risikoanlagen reduziert.
2. Ähnlich wie in der TRAS 320 (Stand 2015) beziehen sich die Anforderungen in Frankreich auf neue und bestehende Anlagen. Auch für bestehende Anlagen wird eine Berechnung der Standsicherheit gefordert. Allerdings werden in Frankreich für bestehende Anlagen geringere Referenzwerte für die Bodenbeschleunigung im Vergleich zu Neuanlagen angesetzt. Dies bedeutet, dass die Anforderungen für Bestandsanlagen geringer sind als für Neuanlagen. Der Stand der Sicherheitstechnik hat somit zwei unterschiedliche Anforderungsniveaus.
3. Bzgl. der Vermeidung eines Störfalls sind die Schutzzieldefinitionen identisch. Alternativ zu diesem Schutzziel wird in Frankreich die Verringerung der Unfallintensität genannt, um zu vermeiden, dass Personen außerhalb der Betriebsgrenzen von tödlichen Auswirkungen betroffen sind. In der StörfallV sind Störfälle zu verhindern (§ 3 Satz 1) und die Auswirkungen eines Dennoch-Störfalls durch vorbeugende Maßnahmen so gering wie möglich zu halten (§ 3 Satz 3). Im Gegensatz zu den französischen Normen muss gemäß der StörfallV für beide Fälle Vorsorge betrieben werden.
4. Auch in den französischen Normen gibt es Stichtagsregelungen zur Umsetzung der Anforderungen.

4 Aktualisierung des Kenntnisstandes über die voraussichtlichen Wirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren

Im Kapitel 5 werden die Ergebnisse der neusten wissenschaftlichen Erkenntnisse bzgl. der Veränderung der umgebungsbedingten Gefahrenquellen, die in der TRAS 310 und der TRAS 320 behandelt werden, zusammenfassend dargestellt. Dabei werden die einzelnen Naturgefahren entsprechend der jeweiligen TRAS betrachtet.

4.1 Umgebungsbedingte Gefahrenquellen der TRAS 310

4.1.1 Ausgangssituation

Der Anwendungsbereich der TRAS 310 umfasst nach Kapitel 3 der TRAS folgende Gefahrenquellen, die aus

1. Überflutungen durch Gewässer (Hochwasser oder Sturmfluten), einschließlich dem Versagen von Hochwasserschutzanlagen,
2. sonstige Überflutungen, zum Beispiel durch starke Niederschläge oder Rückstau aus der Kanalisation,
3. aufsteigendem Grundwasser

resultieren. Darüber hinaus wird in der TRAS 310 in Kapitel 5 vermerkt, dass mit Niederschlägen und Überflutungen weitere Gefahrenquellen in direktem oder indirektem Zusammenhang stehen. Hierzu zählen Hagelschlag, Eissturz, Steinschlag und Erdbeben. Allerdings, so wird in der TRAS 310 angemerkt, standen für die Ausarbeitung für diese Gefahrenquellen noch keine ausreichenden Informationen (wie Gefahrenkarten) zur Verfügung.

Im Rahmen der Überprüfung der technischen Regel TRAS 310 ist es somit erforderlich, den Kenntnisstand bzgl. der aufgezählten umgebungsbedingten Gefahrenquellen darzustellen. Dabei wird jeweils zwischen den Entwicklungen vergangener Jahrzehnte und den Projektionen, die auf der Grundlage von Klimamodellen erstellt wurden, unterschieden.

Grundlage für die Modellrechnungen der zukünftigen Klimaentwicklung sind seit dem 5. Sachstandsbericht des IPCC die sogenannten „Repräsentativen Konzentrationspfade“ (Representative Concentration Pathways - RCPs). Festgelegt wurden 4 Szenarien, die als RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5 bezeichnet werden. Ihnen sind bestimmte Treibhausgaskonzentrationen zugeordnet. Mit Hilfe von Klimamodellen werden die Klimaveränderung berechnet. Als Maßeinheit wurde der Strahlungsantrieb in W/m^2 gewählt, der durch die Treibhausgasemissionen ausgelöst wird. Bezogen wird der Strahlungsantrieb auf das Jahr 1850 (vorindustrieller Zustand) und bis zum Jahr 2100 berechnet. RCP8.5 steht z.B. für einen Strahlungsantrieb durch anthropogene Treibhausgase von $8,5 W/m^2$ im Jahre 2100 im Vergleich zum Jahr 1850. Es wird auch als „Weiter-wie-bisher-Szenario“ bezeichnet, was bedeutet, dass keine Maßnahmen zur Verminderung der Treibhausgasemissionen durchgeführt werden. Im Gegensatz hierzu werden im RCP2.6-Szenario weitreichende Maßnahmen durchgeführt. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Kenndaten der RCP-Szenarien zeigt **Tabelle 1**.

Tabelle 1: Kenndaten der RCP-Szenarien

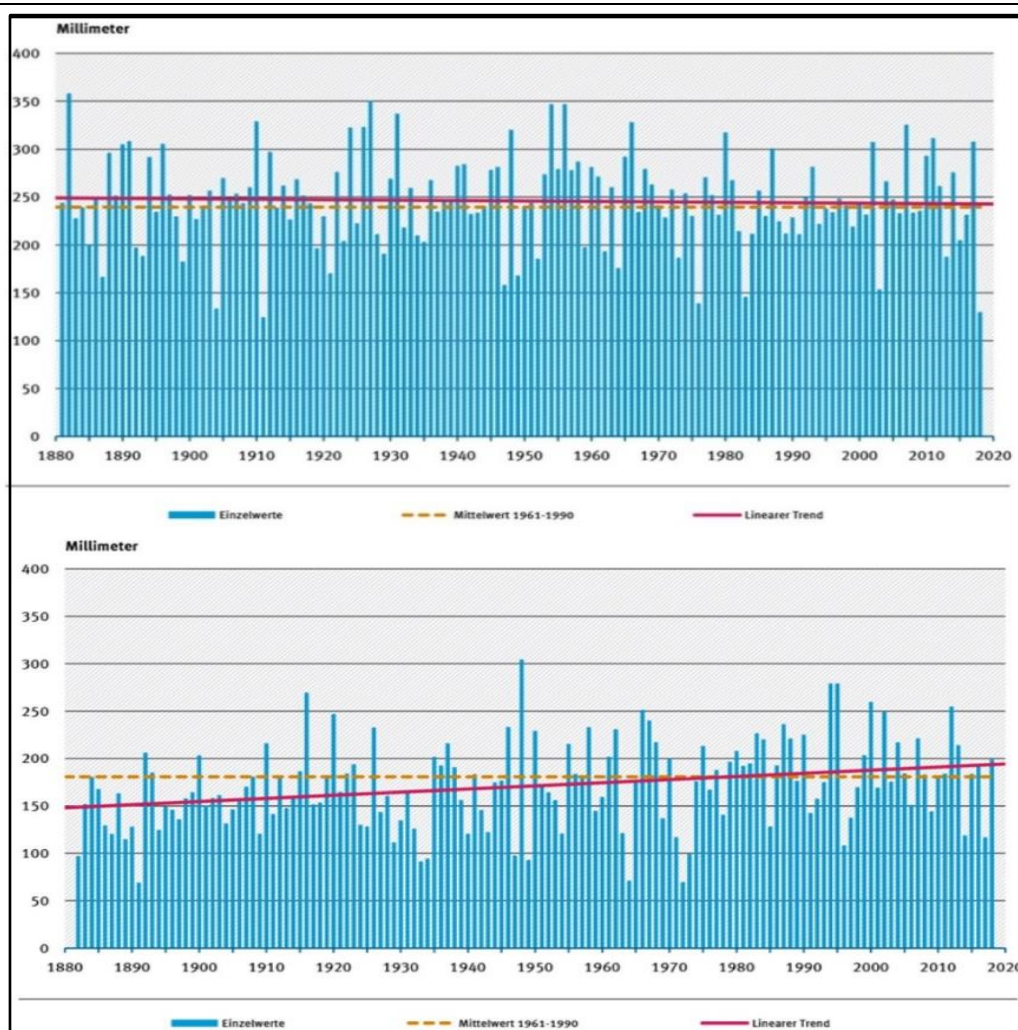
RCP-Szenarien				
Bezeichnung	RCP8.5	RCP6.0	RCP4.5	RCP2.6
Treibhausgas-konzentration im Jahre 2100	1.370 ppm CO ₂ -äq	850 ppm CO ₂ -äq	650 ppm CO ₂ -äq	400 ppm CO ₂ -äq
Strahlungsantrieb 1850 – 2100	8,5 W/m ²	6,0 W/m ²	4,5 W/m ²	2,6 W/m ²
Einstufung	sehr hoch	Hoch	mittel	sehr niedrig

4.1.2 Tendenzen der Niederschlagsentwicklung

4.1.2.1 Niederschlagsentwicklung in vergangenen Jahrzehnten

Die Entwicklung des mittleren Niederschlagshöhe im Sommer ist für den Zeitraum von 1881 bis 2018 in **Abbildung 1** dargestellt. Zu erkennen ist eine leicht abfallende Tendenz, während für die Wintermonate eine deutlich ansteigende Tendenz erkennbar ist.

Abbildung 1: Mittlere Niederschlagshöhe im Sommer (oben) und Winter (unten) in Deutschland von 1881 bis 2018

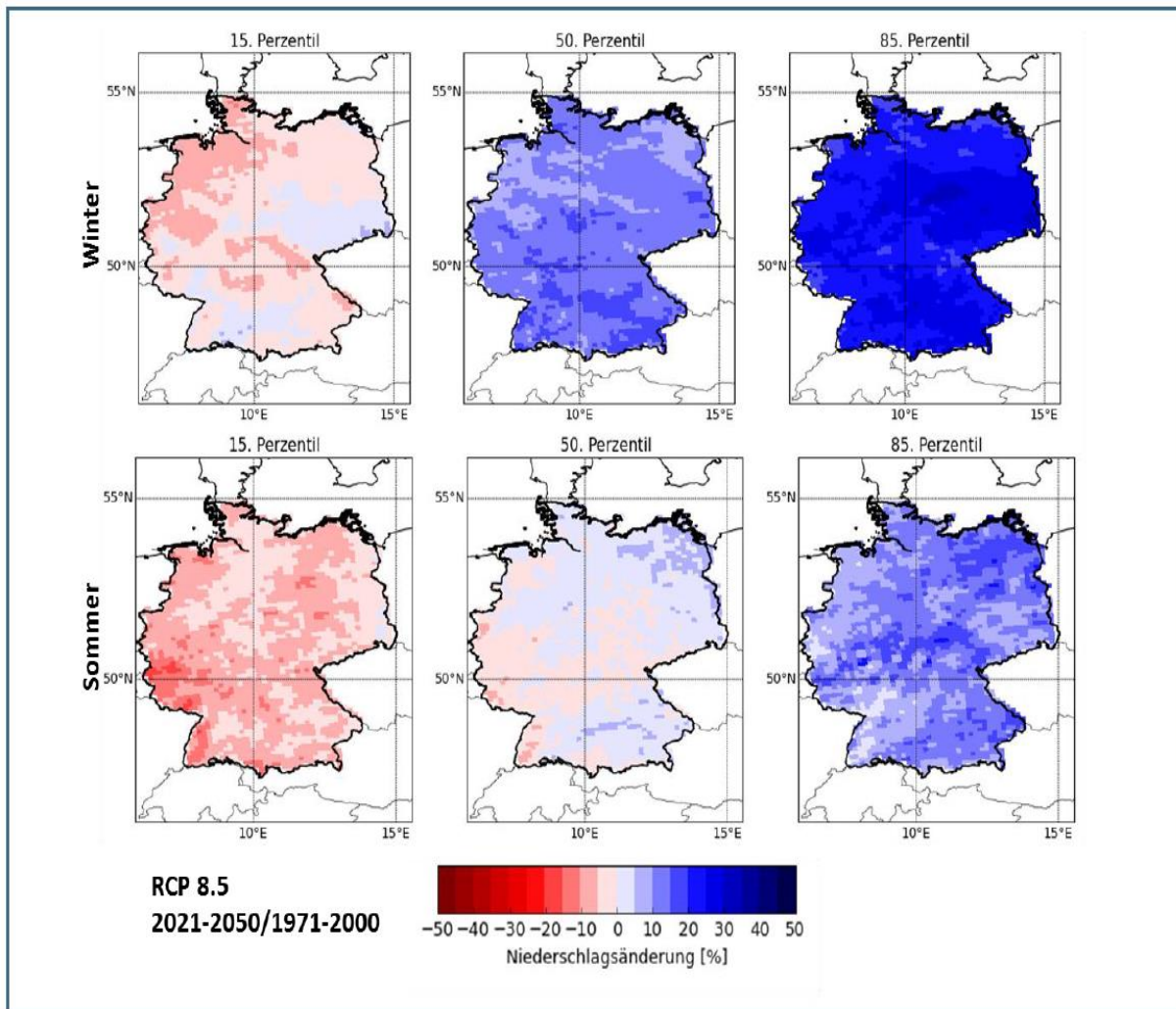


Quelle: Umweltbundesamt (2019)

4.1.2.2 Projektionen der Niederschlagsentwicklung

In **Abbildung 2** sind die projizierten relativen prozentualen Änderungen des mittleren Winter-niederschlags für die Monate Dezember, Januar und Februar (oben) und des Sommernieder-schlages für die Monate Juni, Juli und August (unten) dargestellt.

Abbildung 2: Räumliche Projektion der Niederschlagsänderungen im Winter und Sommer in Deutschland für das Szenario RCP8.5



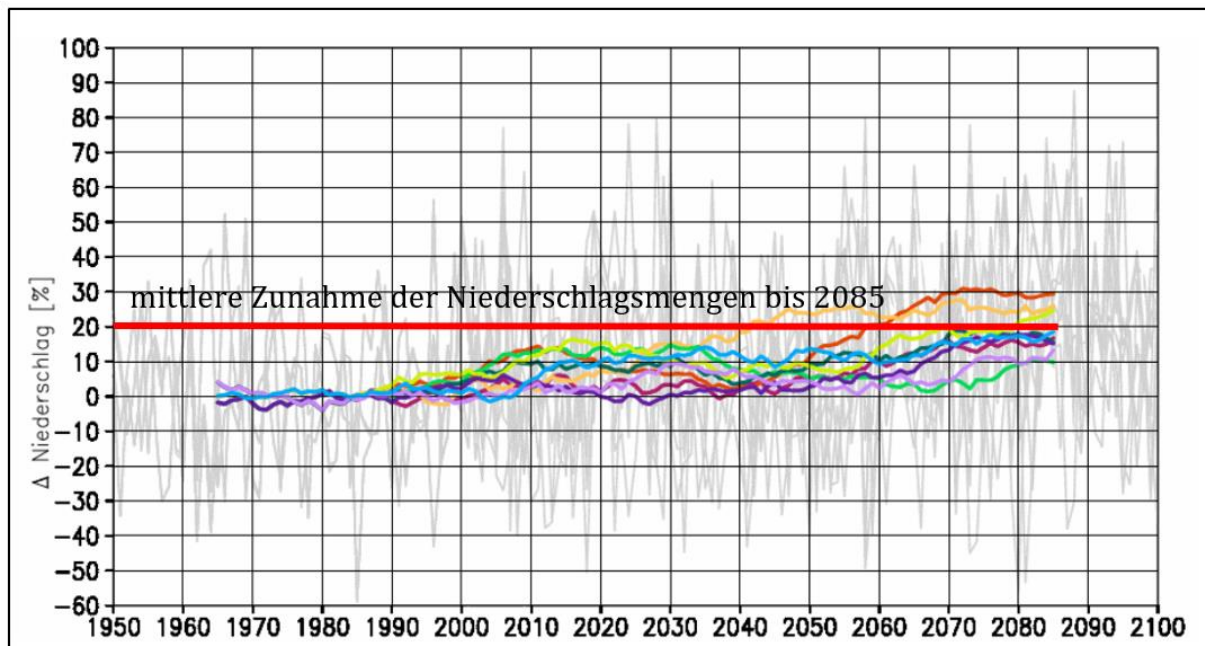
Quelle: DWD zitiert von der LAWA (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder

Hierbei handelt es sich um Mittelwerte über den Projektionszeitraum 2021–2050 auf Basis des RCP8.5-Szenarios. Das Mittel des Ensembles entspricht dem 50. Perzentilwert, das 15. und 85. Perzentil ergeben die Spannweite. Bezogen sind die prozentualen Niederschlagsänderungen auf die Zeitspanne 1971 – 2000.

Es ist für das Szenario RCP8.5 zu erkennen, dass bei Betrachtung des 50. Perzentilwertes eine Tendenz zur Zunahme der mittleren Niederschlagsmenge in den Wintermonaten um 5 – 20 % für die nahe Zukunft (2021- 2050) zu erwarten ist. Für den Sommer sind die Entwicklungen in der nahe Zukunft nicht eindeutig.

Während die Niederschlagsmengen in den Sommermonaten sinken wird, zeigt die **Abbildung 3** die zeitliche Entwicklung der Niederschlagsmengen in den Wintermonaten.

Abbildung 3: Projizierte Änderungen des Niederschlags (%) für die Wintermonate für Deutschland relativ zu 1971 – 2000



Quelle: Climate Service Center, Report 6

Es handelt sich hierbei um insgesamt 9 Projektionen mit dem Klimamodell REMO. Während die Niederschlagsmenge im Sommer tendenziell abnehmen wird, ist mit einer Zunahme im Winter zu rechnen. Die mittlere Zunahme der Niederschlagsmenge im Winter liegt bis zum Jahre 2085 bei ca. 20 %.

4.1.3 Entwicklungstendenzen von Starkniederschlägen

Die Gefahr von Starkniederschlägen wird stark durch die Lufttemperatur und damit durch deren Aufnahmefähigkeit von Wasserdampf beeinflusst. Ein Grad Temperaturanstieg erhöht die Niederschlagsmenge weltweit um 2 % (Kreienkamp et al. 2016). Die extremen, gewittrigen Starkniederschläge sind in der Regel lokal begrenzt. Die Wirkungen von Starkniederschlägen erhöhen sich immer dann, wenn sich die Tiefdruckgebiete nur zögernd abschwächen oder nur langsam weiterziehen (DWD, 2016). Vor dem Hintergrund der Anlagensicherheit sind somit weniger die mittleren Niederschlagshöhen interessant, sondern vielmehr die Entwicklung von Starkniederschlägen.

Der DWD definiert die Warnstufen für Starkniederschläge und Dauerregen entsprechen der **Tabelle 2**.

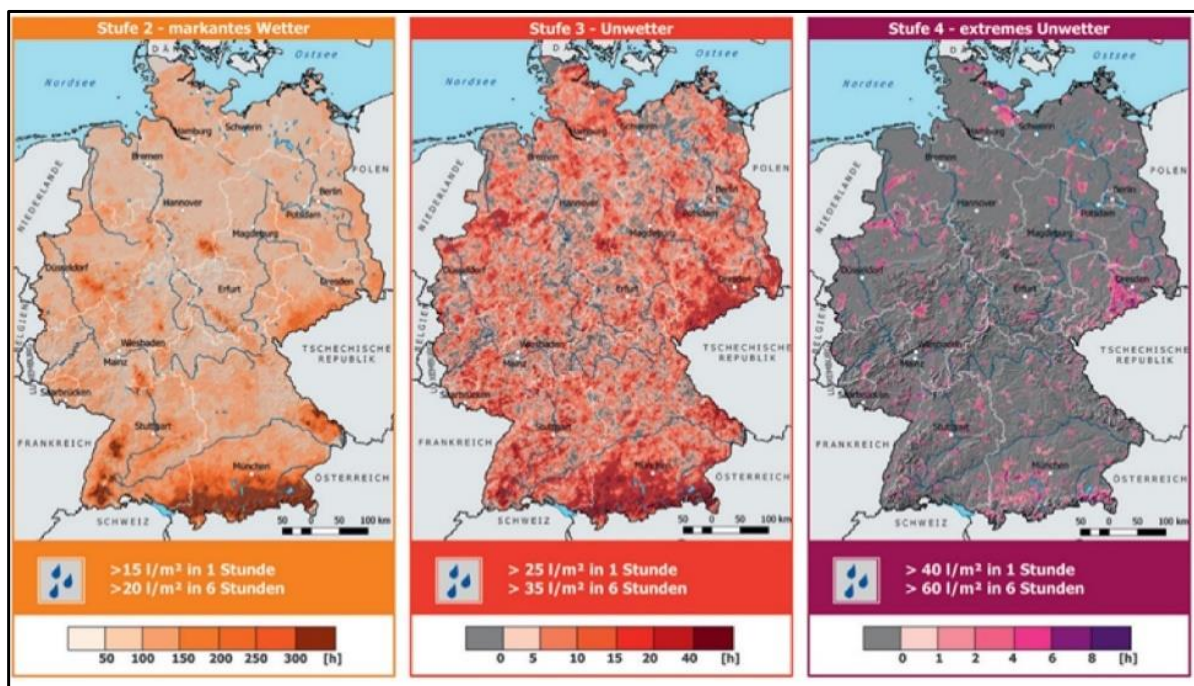
Tabelle 2: Warnstufen des DWD bei verschiedenen Dauerstufen für Stark- und Dauerregen

	Starkregen		Dauerregen	
	1 Stunde	6 Stunden	24 Stunden	48 Stunden
Markantes Wetter	10 – 25 l/m ²	20 – 35 l/m ²	30 – 50 l/m ²	40 – 60 l/m ²
Unwetter	25 – 40 l/m ²	35 – 60 l/m ²	50 – 80 l/m ²	60 – 90 l/m ²
Extremes Unwetter	> 40 l/m ²	> 60 l/m ²	> 80 l/m ²	> 90 l/m ²

4.1.3.1 Starkniederschläge in vergangenen Jahrzehnten

Basierend auf den Messdaten des DWD zeigt **Abbildung 4** die regionale Verteilung von Starkniederschlägen der Warnstufen 2 bis 4 vergangener Ereignisse (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2018). Es ist zu erkennen, dass vor allem der Alpenraum und Voralpenraum sowie der Erzgebirgsraum von Starkregenereignissen betroffen sind, die auch länger anhalten und damit zu Hochwasser führen können. Wie insbesondere die Karten für die Warnstufen 3 und 4 aber auch verdeutlichen, treten Starkregenereignisse in ganz Deutschland auf.

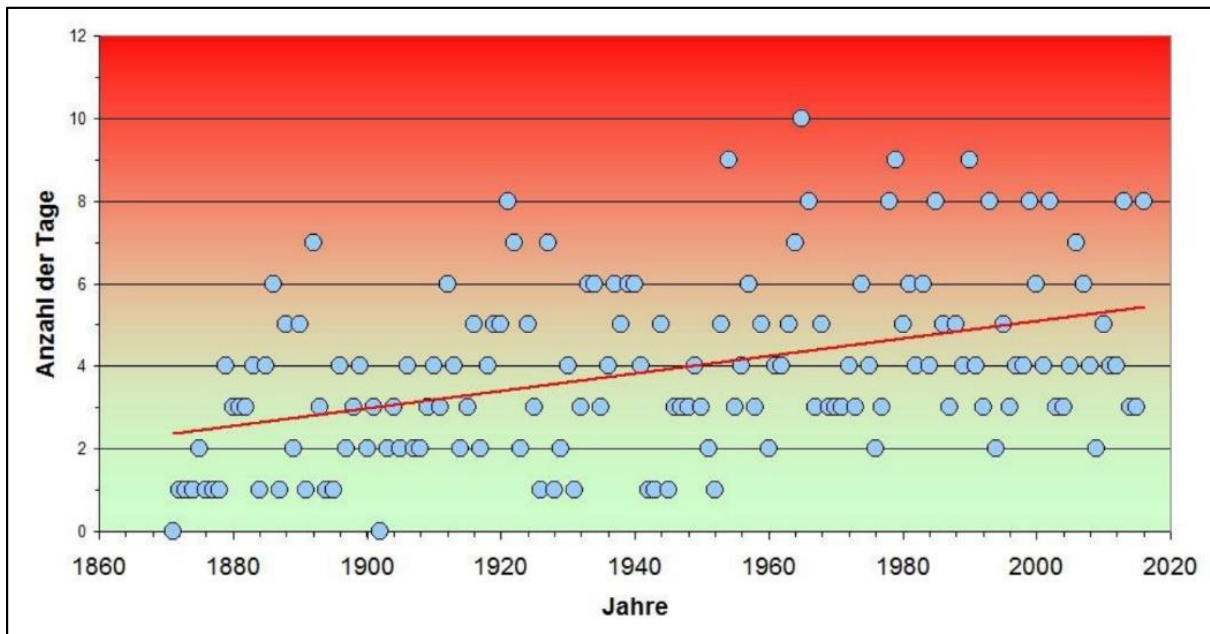
Abbildung 4 Gesamtzahl der Niederschlagsstunden im Zeitraum 2001 – 2016 mit Überschreitung der Warnschwellen



Quelle: BBSR (2018)

Wie sich die Zahl der Tage mit Starkniederschlägen von 1871 bis 2016 verändert hat, zeigt die **Abbildung 5**. Der Trend zeigt einen stetigen Anstieg der Tage mit Niederschlägen > 30 mm.

Abbildung 5: Zahl der Tage pro Jahr mit mehr als 30 mm Niederschlag von 1871 bis 2016



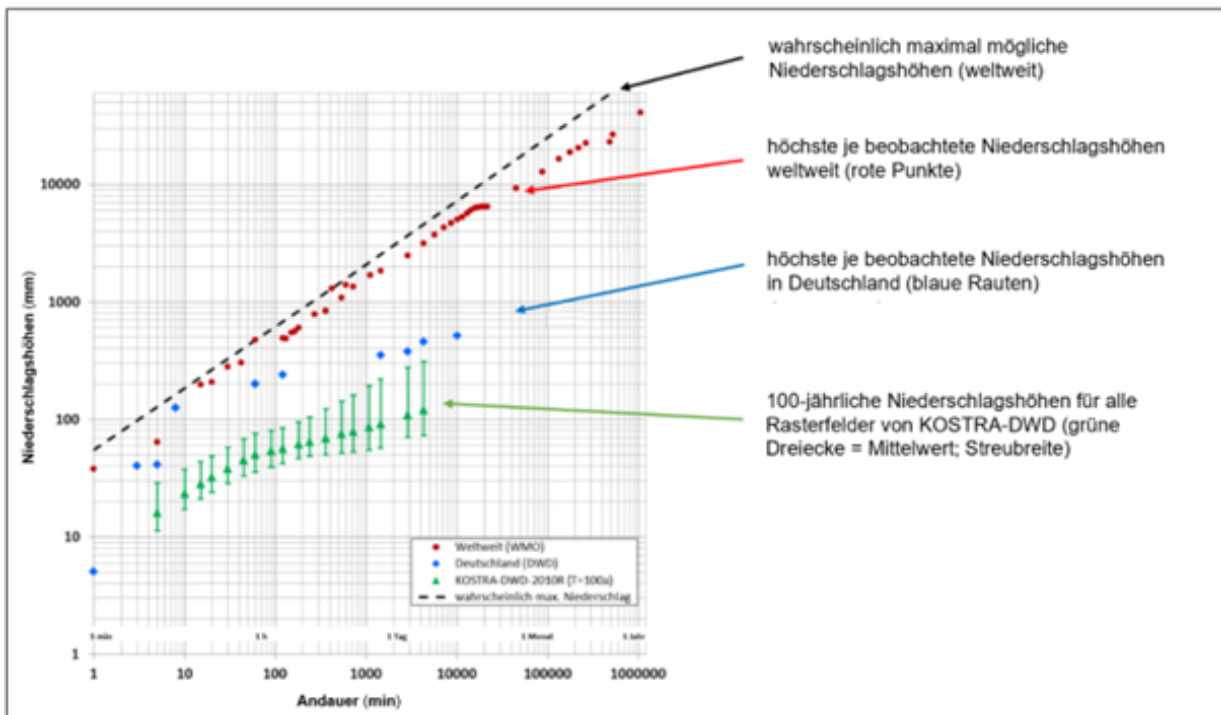
Quelle: DWD zitiert bei Dallmeier, A. (2017)

Die gemessenen Starkniederschlagshöhen verschiedener Dauerstufen und Wiederkehrintervalle sind für Koordinierte Starkniederschlagsregionalisierung und -auswertung des DWD (KOSTRA-DWD)-2010R statistisch ausgewertet und tabellarisch für alle Regionen in Deutschland zusammengestellt worden. KOSTRA-DWD-2010R ist ein vom DWD herausgegebener Starkregen-katalog und steht für Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen.

In der **Abbildung 6** sind für einige Dauerstufen die Niederschlagshöhen markiert, die gemäß KOSTRA-DWD-2010R einem 100-jährlichen Niederschlagsereignis entsprechen (grüne Dreiecke und Balken). Die Darstellung des 100-jährlichen Niederschlagsereignisses in Form von Spannbreiten zeigt die regionalen Unterschiede der Starkniederschlagsintensität innerhalb Deutschlands. Zum Vergleich sind außerdem die höchsten jemals beobachteten Niederschlagshöhen in Deutschland (blaue Rauten) in die **Abbildung 6** eingetragen. Ergänzt werden die vergleichenden Angaben noch durch die weltweit höchsten je beobachteten Niederschlagshöhen (rote Punkte). Hieraus ergibt auf der Grundlage der Messungen vergangener Ereignisse die wahrscheinlich maximal möglichen Niederschlagshöhen weltweit.

Aus dieser Gegenüberstellung wird erkennbar, dass die als Ergebnis statistischer Analysen errechneten Niederschlagshöhen nicht mit den gemessenen bzw. registrierten Niederschlagshöhen übereinstimmen. Die Angaben des KOSTRA-DWD-2010R für ein 100-jährliches Niederschlagsereignis, die auch Grundlage für die Berücksichtigung von Starkniederschlägen gemäß TRAS 310 in der Fassung vom 15.11.2011 bilden, liegen deutlich unter den gemessenen maximalen Starkniederschlägen der Einzelereignisse.

Abbildung 6: Höchste jemals beobachtete Niederschlagshöhen in Deutschland und der Welt



Quelle: KLIWA (2019)

4.1.3.2 Projektionen der Starkniederschlagsentwicklung

Wie schon erläutert wurde, ist mit steigender Lufttemperatur auch eine Erhöhung der Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf verbunden. Damit steigt auch die potentielle Gefahr von Starkniederschlägen. Weil Starkniederschläge oftmals kleinräumige Ereignisse sind, hängen sie neben der jeweiligen Wetterlage u.a. von der lokalen Orographie und Vegetation ab. Trendanalysen von Starkniederschlägen sind daher schwierig durchzuführen. Darüber hinaus werden kleinräumige Starkregenereignisse nicht immer von den meteorologischen Stationen erfasst. Insgesamt ergibt sich für Deutschland ein sehr heterogenes Bild der zukünftig zu erwartenden Starkniederschlagsentwicklung. Die gegenwärtig zur Verfügung stehenden Projektionen regionaler Klimamodelle zeigen eine Tendenz zur Zunahme von Extremniederschlägen. Sie sind jedoch aufgrund der groben Auflösung derzeit nicht in der Lage, lokale Angaben zu liefern (DWD, 2016). Daher sind die in **Tabelle 3** zusammengefassten Ergebnisse der Projektionen eher als überregionale Trends zu verstehen (LAWA, 2017):

Tabelle 3: Trends von Starkregenereignissen bis zum Jahr 2100

Jahreszeit	Trends von Starkregenereignissen der Dauerstufe 24 Stunden bezogen auf die Referenzperiode 1951 – 2006	
Klimaszenarien	RCP2.6	RCP8.5
Winterhalbjahr	+ 20 %	+ 100 %
Sommerhalbjahr	kein einheitlicher Trend	kein einheitlicher Trend

4.1.3.3 V_b-Wetterlage

Die sogenannte V_b-Wetterlage ist dafür verantwortlich, dass extreme Niederschläge im östlichen Alpenraum sowie vor allem auch im Erzgebirgsraum niedergehen können. Ausgangspunkt einer V_b Wetterlage ist ein Kaltlufteinbruch von Norden, der ein Tiefdruckgebiet über dem Atlantik dazu zwingt, in den Mittelmeerraum auszuweichen (vgl. **Abbildung 7**).

Abbildung 7: Entstehung der V_b-Wetterlage



Quelle: K.-E. Köpke

Dort kann es sich angetrieben durch das warme Wasser des Mittelmeeres im Raum Genua mit Wasserdampf weiter auffüllen. Anschließend zieht es in einem nordöstlichen Bogen über die östlichen Alpen und trifft dort wiederum auf die Kaltluft (V_b-Zugbahn). Hierdurch werden ungeheure Wassermengen freigesetzt, die in den vergangenen Jahren zu außergewöhnlichen Hochwasserereignissen geführt haben. In **Tabelle 4** sind einige wenige Beispiele der letzten Jahre aufgelistet.

Tabelle 4: Hochwasserereignisse durch Starkniederschläge aufgrund V_b-Wetterlagen

Jahr	Hochwasserereignis
1997	Oder (zwei V _b -Wetterlagen)
2001	Weichsel
2002	Elbe/Donau mit Nebenflüssen
2005	Donau
2013	Elbe/Donau
2019	Donau mit Nebenflüssen

Im Projekt WETRAX (Weather Patterns, Cyclone Tracks and related precipitation Extremes) wurde die Veränderung von großräumigen Starkniederschlägen für den Zeitraum von 1951-2100 untersucht. Das Untersuchungsgebiet umfasste Süddeutschland, Österreich und angrenzende Teile der Schweiz sowie Tschechiens. Gegenstand der Untersuchung waren Zirkulationsmuster von Tiefdruckgebieten, wie zum Beispiel die V_b -Wetterlage.

Bezogen auf die Referenzperiode von 1971 – 2000 können die Projektionen bis 2100 wie folgt zusammengefasst werden (Jacobeit, J.; Hofstätter, M., 2015):

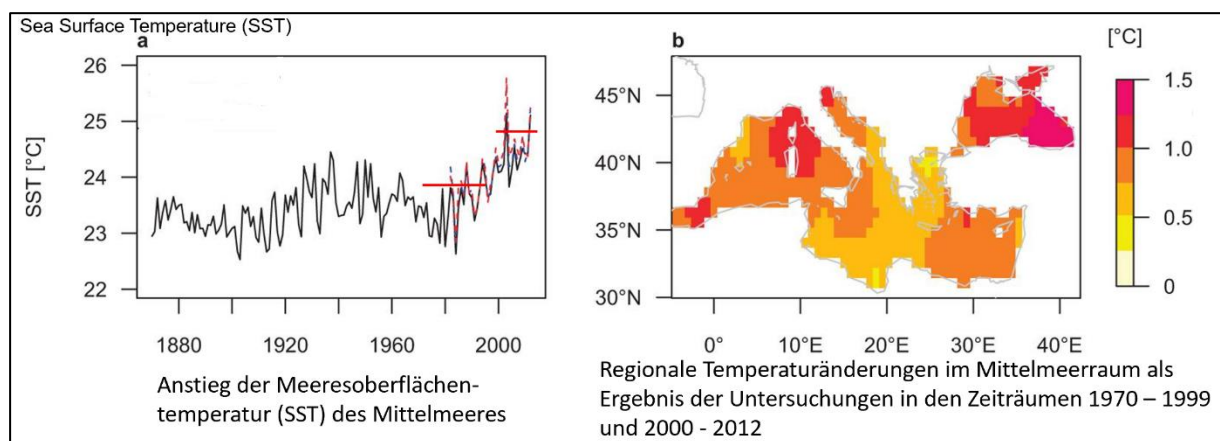
1. Abnahme der Niederschlagsmengen extremer Ereignisse im Sommer (-10% - 30%)
2. Zunahme der Mengen im Winter/Frühling (+5% bis 15%)

Die V_b -Wetterlage stellt jedoch hierbei eine Ausnahmewetterlage dar. Je nach Modell wird eine Zunahme der Niederschlagsmengen sogar im Sommerhalbjahr um 5 – 20% prognostiziert, wobei auch die Häufigkeit zunehmen wird.

Volosciuk et al. (2016) untersuchten den Zusammenhang zwischen der Oberflächentemperatur des Mittelmeeres, mit der eine Zunahme der Luftfeuchtigkeit verbunden ist, und der durchschnittlichen Niederschlagsmenge in Zentraleuropa. In **Abbildung 8** ist die Entwicklung der Meeresoberflächentemperatur der vergangenen Jahrzehnte sowie die Veränderung der regionalen Temperatur an der Wasseroberfläche dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass der Raum Genua ein Hotspot im Mittelmeer darstellt.

Grundlage der Untersuchungen waren die Perioden 1970 – 1999 und 2000 – 2012. Der Vergleich der Daten dieser Perioden mit den durchschnittlichen Regenmengen in Zentraleuropa ergab eine Zunahme um 17 %. Hieraus wurde der Schluss gezogen, dass mit weiter steigenden Oberflächentemperatur des Mittelmeeres die Niederschlagsmengen in Zentraleuropa weiter zunehmen werden.

Abbildung 8: Meeresoberflächentemperatur und regionale Temperaturänderungen des Mittelmeeres



Quelle: Volosciuk et al. (2016)

Die Starkniederschläge im Westen von Rheinland-Pfalz und im Süden von Nordrhein-Westfalen vom 12. bis 19. Juli 2021 sind nicht einer V_b -Wetterlage zuzuordnen, wenngleich auch hier warme und feuchte Luftmassen aus dem Mittelmeerraum eine entscheidende Rolle spielten. Der DWD fasst die Wetterlage wie folgt zusammen (DWD, 2021):

Die Wetterlage an den Tagen vom 12. bis 15.07.21 zeichnete sich vor allem durch tiefen Luftdruck über Mitteleuropa aus. In Verbindung mit einem Höhentief, das sich langsam von Frankreich her näherte, war die Troposphäre zunehmend instabil geschichtet. Warme und

sehr feuchte Luftmassen gelangten aus dem Mittelmeerraum in einer Drehbewegung um das Bodentief „Bernd“ nach Deutschland. Durch erzwungene Hebung (orografisch und dynamisch) und leichte Staueffekte an den westlichen Mittelgebirgen (Sauerland, Westerwald und Eifel), kam es zunächst regional, später großflächig zu wiederkehrendem bzw. anhaltendem Starkregen. In den folgenden Tagen drängte Hoch „Dana“ Tief „Bernd“ in Richtung Südosteuropa ab. Dadurch kam es noch einmal zu anhaltenden Starkniederschlägen im Osterzgebirge und der Lausitz, sowie im Berchtesgadener Land. Ab dem 19.07.21 entspannte sich die Wettersituation etwas.

4.1.4 Entwicklungstendenzen von Hochwasser

4.1.4.1 Hochwasserentwicklung in vergangenen Jahrzehnten

Tabelle 5 zeigt am Beispiel des Rheins mit seinen Nebenflüssen Main und Mosel, wie sich die mittleren Jahreshochwassermengen (MHQ) im Verlauf der letzten Jahrzehnte verändert haben (IKSR, 2011). Mit Ausnahme an der Messstelle Würzburg sind schon in den vergangenen Jahrzehnten die mittleren jährlichen Hochwassermenge angestiegen. Die IKSR erläutert hierzu: „Der Hochwasserabfluss (MHQ), der für das gesamte hydrologische Jahr (Nov.-Okt.) ausgewertet wurde, zeigt eine Zunahme um etwa +10%. Diese ist bei genauerer Betrachtung der Daten nicht auf eine Erhöhung der extremen Scheitelabflüsse zurückzuführen, sondern vielmehr durch ein gehäuftes Auftreten mittlerer und großer Hochwasser.“

Tabelle 5: Mittlere jährliche Hochwassermengen am Rhein (MHQ) für die Zeiträume 1901 – 1930 und 1971 - 2000

Bezeichnung	1901 – 1930 MHQ (m ³ /s)	1971 – 2.000 MHQ (m ³ /s)	Prozentuale Veränderung
Basel	2.492	2.734	+ 9,7
Maxau	2.861	3.168	+ 10,7
Worms	3.155	3.568	+ 13,1
Kaub	3.916	4.344	+ 10,9
Köln	5.924	6.538	+ 10,4
Lobith	6.454	6.642	+ 2,9
Würzburg (Main)	631	583	- 7,6
Trier (Mosel)	1.683	2.010	+ 19,4

4.1.4.2 Projektionen der Hochwasserentwicklung (Rhein / Aller-Leine-Gebiet)

Grundlage für Einführung eines Klimaänderungsfaktors in der TRAS 310 waren die Ergebnisse der Projektes KLIWA, das die zukünftigen Hochwässer der Flüsse in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz untersuchte. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde ein Anstieg um 20 % auf die in den Gefahrenkarten angesetzten Durchflussmengen für ein 100-jährliches Hochwasser festgelegt. Weil diese Untersuchungen den süddeutschen Raum betrafen, werden an dieser Stelle die Ergebnisse von Projektionen für den Rhein sowie für das Aller-Leine-Gebiet vorgestellt.

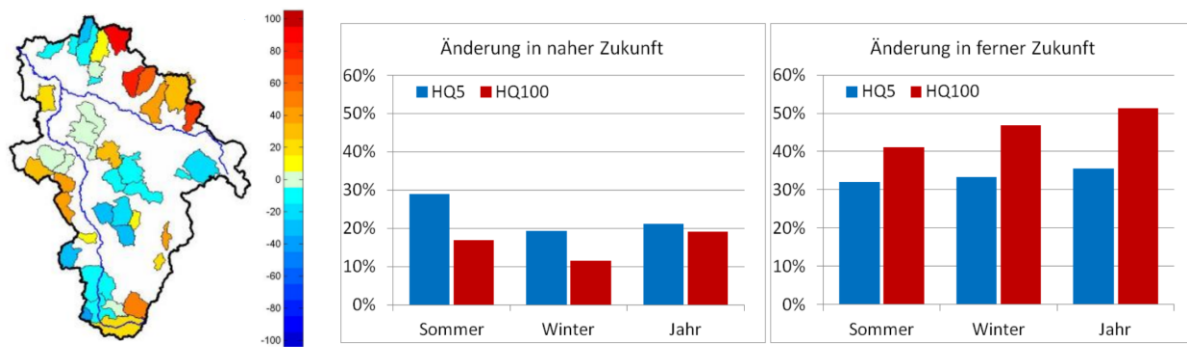
In **Tabelle 6** sind die Veränderungen der mittleren und extremen Hochwasser für den Rhein mit seinen Nebenflüssen Main und Mosel zusammengefasst (IKSR, 2011). Die Angaben in Fettdruck weisen auf eine Zunahme der Hochwassermengen hin (> 5 %).

Tabelle 6: Veränderungen der mittleren und extremen Hochwassermengen (Referenzzeitraum 1971 – 2000)

Bezeichnung	Messstelle	2021 – 2.050	2071 - 2100
Abfluss bei „mittlerem“ Hochwasser 100 Jahre	Basel	- 20 % bis +10 %	- 30 % bis +25 %
	Maxau	- 10 % bis +15 %	- 25 % bis +30 %
	Worms	- 5 % bis +20 %	- 25 % bis +35 %
	Kaub	- 5 % bis +20 %	- 10 % bis +25 %
	Köln	0 % bis +20 %	0 % bis +25 %
	Lobith	0 % bis +20 %	0 % bis +25 %
	Raunheim (Main)	0 % bis +20 %	0 % bis +35 %
	Trier (Mosel)	5 % bis +30 %	-5 % bis +25 %
Abfluss bei „extremem“ Hochwasser 1.000 Jahre	Basel	- 20 % bis +35 %	- 10 % bis +50 %
	Maxau	- 20 % bis +35 %	- 20 % bis +65 %
	Worms	- 15 % bis +30 %	- 20 % bis +45 %
	Kaub	- 5 % bis +25 %	- 10 % bis +35 %
	Köln	- 5 % bis +25 %	0 % bis +30 %
	Lobith	- 5 % bis +20 %	- 5 % bis +30 %
	Raunheim (Main)	- 5 % bis +40 %	0 % bis +45 %
	Trier (Mosel)	- 35 % bis +20 %	- 20 % bis +45 %

In **Abbildung 9** sind bezogen auf die Referenzperiode 1971- 2000 die Veränderungen der Hochwasserentwicklung im Aller-Leine-Gebiet dargestellt. Für das im Rahmen der Überprüfung der TRAS relevante HQ₁₀₀ wird für die nahe Zukunft eine größere Zunahme im Sommer mit ca. + 16 % als im Winter mit ca. + 12 % prognostiziert. In der ferneren Zukunft bis 2100 kehrt sich das Verhältnis um, wobei der Anstieg sowohl im Sommer als auch im Winter über 40 % liegt. Für das HQ₁₀₀ des Gesamtjahres wurde für die nahe Zukunft eine Erhöhung um 19 % bis 2100 sogar um 51 % bestimmt (KLIFF, 2013).

Abbildung 9: Veränderungen der Hochwasserentwicklung im Aller-Leine-Gebiet



Quelle: KLIFF, 2013

4.1.4.3 Sturzfluten in vergangenen Jahrzehnten

Sturzfluten werden von kleinräumigen, konvektiven Starkregenereignissen ausgelöst, wobei die Verweildauer sowie die Orographie am Ort des Starkregenereignisses entscheidend für das Auftreten und die Intensität einer Sturzflut ist. Welche Folgen beide Faktoren auslösen können, wurde im Juli 2021 im Erftkreis und im Kreis Ahrweiler besonders deutlich. Aber auch frühere Ereignisse, wie z.B. in der Stadt Simbach am Inn (2016) zeigten, welches Zerstörungspotential Starkregenereignisse mit anschließender Sturzflut besitzen.

Sturzfluten können überall in Deutschland auftreten, wobei das höchste Gefahrenpotential in gebirgigen und urbanen Räumen von ihnen ausgeht (Kind et al., 2019). Aber auch im Flachland können Sturzfluten dann auftreten, wenn das Wasser nicht versickert oder abläuft. Wie die Durchsicht der Literatur ergab, ist der Begriff „Sturzflut“ nicht einheitlich definiert.

Die Europäische Kommission beschreibt mit dem englischen Begriff flash flood eine Sturzflut wie folgt (EC, 2013):

Flash floods are serious natural Hazards that are caused by intense rainfall and are usually associated with extensive flooding. They arise very quickly (often less than six hours between rain falling and flooding) and can endanger lives and damage infrastructure through their swift flow and the debris carried in the flood waters.

Weiter beschreibt die Kommission, dass bei einer Sturzflut ein Einzugsgebiet von meist weniger als 1.000 m² betroffen wird. Auch andere Institutionen, wie z.B. der National Weather Service in den USA, definiert eine Sturzflut in ähnlicher Weise (National Weather Service, 2021):

Flooding that begins within 6 hours, and often within 3 hours, of the heavy rainfall (or other causes).

Hierbei erweitert der National Weather Service die Ursachen einer Sturzflut über ein Starkregenereignis hinaus auf Deichbrüche und Schlammlawinen.

Mit der Festlegung von maximal 6 Stunden zwischen dem Starkregenereignis und dem Auftreten einer Überschwemmung werden Sturzfluten gegenüber Hochwasser in größeren Flüssen abgegrenzt. Folgende Kriterien sind kennzeichnet für Sturzfluten (Borga et al., 2014, Kron, 2014 und Stahl et al., 2016):

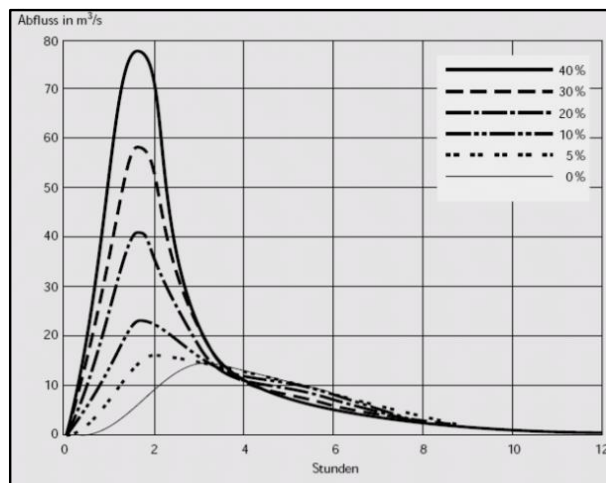
1. begrenztes räumliches und zeitliches Ausmaß
2. intensive meteorologische und hydrologische Prozesse
3. mögliche örtliche Unabhängigkeit von Fließgewässern

Das hohe Gefahrenpotential von Sturzfluten resultiert aus den folgenden Charakteristiken:

1. Geringe Vorwarnzeit: Die Vorwarnzeit bei Sturzfluten ist extrem kurz. Insbesondere wegen der Kleinräumigkeit des auslösenden Starkniederschlags ist eine präzise Vorhersage derzeit kaum möglich.
2. Hohe Fließgeschwindigkeiten: In den Mittelgebirgen sowie in den Alpen erreichen die Abflüsse von Starkregenereignissen hohe Fließgeschwindigkeiten. Darüber hinaus verursacht Treibgut extreme Schäden an Gebäuden und Anlagen sowie an der Infrastruktur.
3. Überschwemmungen durch Abflussbehinderung: Überschwemmungen treten oftmals in Folge einer Abflussbehinderung durch Treibgut auf, das sich z.B. vor Unterführungen an Bahn- oder Straßendämmen sowie an Brücken ansammelt und einen Rückstau verursacht. In urbanen Räumen sind große Flächen versiegelt, so dass dort keine Versickerung möglich ist. Darüber hinaus sind für derartige Starkniederschläge die Abwasser- und Entwässerungssysteme nicht dimensioniert.

Bei hoher Flächenversiegelung (wie in Betriebsbereichen nicht unüblich) kann nahezu 100 % des Niederschlags abflusswirksam. Dies bedeutet, dass der Abfluss unmittelbar einsetzt und, wie zuvor schon angedeutet wurde, die Vorwarnzeiten extrem kurz sind (Bronstert, 2016). Welchen Einfluss die Flächenversiegelung in urbanen Räumen auf den Volumenstrom hat, verdeutlicht **Abbildung 10** an einem Beispiel. Aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren (Niederschlagsmenge, Flächenversiegelung, Orografie usw.) ist es viel schwieriger, Sturzfluten zu simulieren als Flussgebietsüberschwemmungen. Insofern liegen nur wenige fundierte Aussagen zu zeitlichen Veränderungen der Sturzflutgefährdung vor. Auch ist es derzeit nicht möglich, eine regionale Differenzierung wie bei den Flussüberschwemmungen vorzunehmen.

Abbildung 10: Abflussganglinien bei gleichem Niederschlag mit unterschiedlichem Versiegelungsgrad (0 bis 40 %) und einem Einzugsgebiet von 20 km²



Quelle: Rieger, 2015b

Gewerbegebiete und Industrieparks zeichnen sich in urbanen Räumen meist durch eine hohe Flächenversiegelung aus. Weil für konvektive Starkregenereignissen die städtischen Entwässerungssysteme nicht ausgelegt sind, erfolgt der Ablauf der Niederschlagsmengen während solcher Ereignisse entlang dem örtlichen Gefälle über die freie Geländeoberfläche im Stadtgebiet. Trotz der bundesweiten Zunahme solcher Starkregenereignisse infolge des Klimawandels können konkrete Aussagen zu den Folgen in einer Stadt mit seinen Industriegebieten nur durch kleinräumige Projektionen ermittelt werden.

In den letzten Jahren wurden Gefahrenkarten für Überschwemmungsgebiete ausgelöst durch Starkniederschläge für zahlreiche meist größere Städte erarbeitet. Grundlage hierfür sind digitalisierte topografische Karten und ausgewählte Modellniederschläge. Mit Hilfe instationärer 2D-Simulationen werden Aussagen zu zeitabhängigen Fließtiefen, Fließrichtungen und Fließgeschwindigkeiten berechnet. Auf diese Weise können auch Überflutungen durch Starkniederschläge in gewässerfernen Gebieten, wie z.B. in Muldenlagen oder in dicht bebauten Gebieten mit großflächiger Oberflächenversiegelung, ermittelt werden.

4.1.4.4 Projektionen von Sturzfluten

Obwohl davon ausgegangen werden kann, dass infolge der Klimaerwärmung mehr Wasserdampf in der Atmosphäre aufgenommen wird und damit Starkniederschläge in ihrer Häufigkeit und Intensität zunehmen werden (Bröker, 2017), ist das Wissen zu den Auswirkungen auf Sturzfluten noch begrenzt. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass derzeit nur in wenigen Klimamodellen und nur für relativ kurze Simulationszeiträume die zu Sturzfluten führenden konvektiven Starkregenereignisse adäquat abgebildet werden können. Darüber hinaus müssen zur Simulation von Prozessen der Ablaufkonzentration hochdetaillierte Geländeinformationen (Meterauflösung) für größere Gebiete ausgewertet werden (Köppke und Buchholz, 2020).

4.1.5 Entwicklung des Meeresspiegels

Der Anstieg des Meeresspiegels wird durch folgende zwei Faktoren beeinflusst:

1. Volumenzunahme durch Erwärmung des Wassers (Antonov et al., 2005)
2. Abschmelzen des Inlandeises, insbesondere in Grönland und der Antarktis

Klimawissenschaftler schätzen, dass Grönland und die Antarktis zusammen seit 1992 pro Jahr rund 208 Kubikkilometer Eis verloren haben – also rund 200 Milliarden Tonnen Eis jährlich.

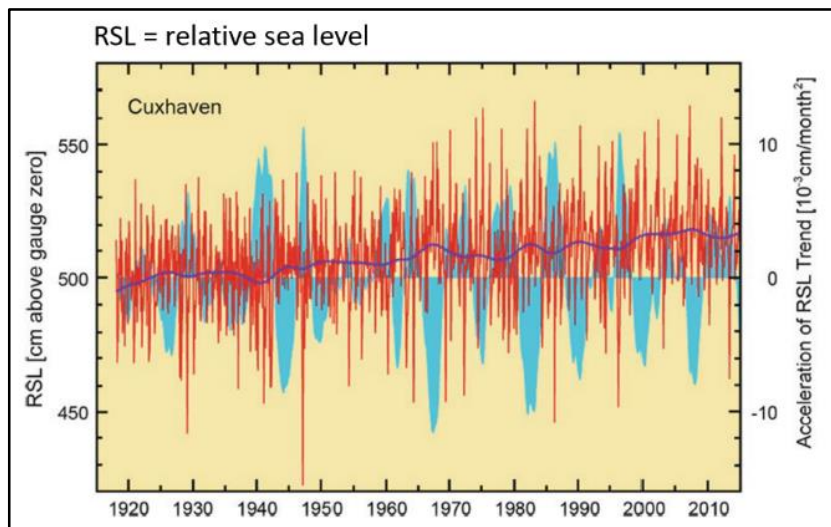
Der Weltklimarat (IPCC) ging in seinem 4. Sachstandsbericht noch von einem Anstieg des Meeresspiegels um 0,5 m bis 2100 aus. Im 5. Sachstandsbericht von 2013 wird die Prognose auf 0,98 m angehoben. Der Weltklimarat weist zudem darauf hin, dass die möglichen Beiträge der Eisschilde von Grönland und der Antarktis bislang unzureichend berücksichtigt worden sind. Durch neuere Messung an den Rändern der Eisschilde konnte festgestellt werden, dass erwärmtes Ozeanwasser die Eisschelfe unterhöhlt und der Kontakt zwischen Eis und dem unterlagernden Festgestein mehr und mehr aufschmilzt. Beides führt zu einer Beschleunigung des Eisverlustes und des Anstiegs des Meeresspiegels. Ein stärkerer Anstieg ist schon aktuell zu beobachten und führt, wenn keine Änderung des bisherigen Wirtschaftens erfolgt, für die deutschen Küsten bis hin zu Werten von deutlich über einen Meter bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Allerdings ist weiterhin noch nicht die sich abzeichnende Möglichkeit eines Kollabierens der beiden Eisschilde einbezogen. Der Meeresspiegelanstieg erfolgt jedoch weltweit nicht gleichmäßig. Beispielsweise sinkt, außer in der südwestlichen Ostsee, in allen anderen Küstenregionen der Ostsee der relative Meeresspiegel aufgrund der noch stattfindenden nacheiszeitlichen Landhebung (DWD, 2017). Während der weltweite Anstieg des Meeresspiegels in der Wissenschaft unstrittig ist, zeigt die Sichtung der Literatur, dass sich die Projektionen für den Anstieg des Meeresspiegels noch in einer großen Bandbreite bewegen. Nach Untersuchungen von Nerema et al. betrug der Anstieg des Meeresspiegels seit 1993 ca. 3 mm/y +/- 0,4 mm/y (Nerema et al., 2018). Dies ergab eine Auswertung von Daten satellitengestützter Präzisionshöhenmessungen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass sich in diesem Zeitraum der Anstieg des Meeresspiegels um ca. 0,084 + 0,025 mm/a beschleunigt hat.

Sofern sich die Beschleunigung nicht weiter erhöht, wird sich nach diesen Untersuchungen der Meeresspiegel um 65 cm (2100) bezogen auf das Jahr 1993 erhöhen.

4.1.5.1 Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs vergangener Jahrzehnte am Pegel Cuxhaven

In **Abbildung 11** sind die Monatsmittelwerte (rot) des Meeresspiegels am Pegel Cuxhaven von 1918 bis 2015 mit geglätteter Kurve (dunkelblau) sowie der Beschleunigung des Anstiegs (hellblau, rechte Ordinate) dargestellt. Wie zu erkennen ist, steigt der Meeresspiegel an der Messstelle Cuxhaven seit 1918 stetig an.

Abbildung 11: Veränderungen des Meeresspiegels sowie Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs an der Messstelle Cuxhaven

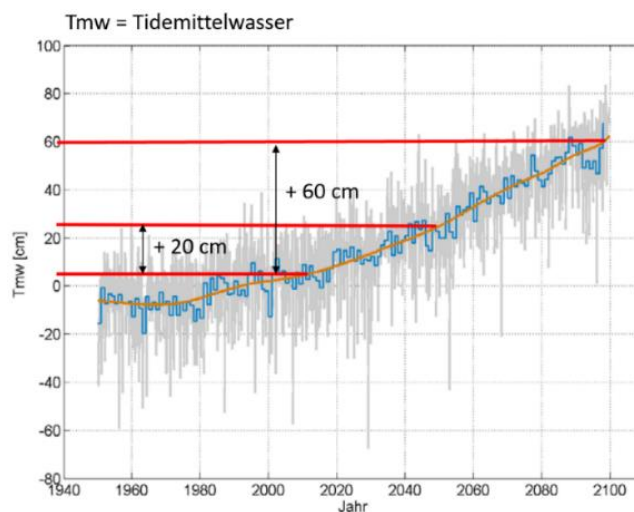


Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

4.1.5.2 Projektionen des Meeresspiegelanstiegs

In der **Abbildung 12** ist das Ergebnis der Projektion des Meeresspiegelanstiegs am Pegel Cuxhaven dargestellt. Bezogen auf das Jahr 2010 wird danach der Pegel bis 2050 um 20 cm und bis zum Jahr 2100 um 60 cm ansteigen.

Abbildung 12: Projektion des Meeresspiegelanstiegs an der Messstelle Cuxhaven



Quelle: BMVI, 2015

Wissenschaftler des Instituts für Küstenforschung am Helmholtz-Zentrum in Geestacht gehen davon aus, dass bis 2030 der derzeitige Küstenschutz an der Nordsee nahezu unverändert wirksam ist. Danach kann jedoch Handlungsbedarf entstehen, weil bis zum Ende des Jahrhunderts Sturmfluten 30 bis 110 cm höher auflaufen können (Meinke et al., 2011). Dies wird jedoch nicht nur mit dem Anstieg des Meeresspiegels begründet, sondern auch mit einer Intensitätszunahme der Nordseestürme im Winter. Bislang haben sich die Windverhältnisse über der Nordsee durch den Klimawandel jedoch noch nicht erkennbar verändert.

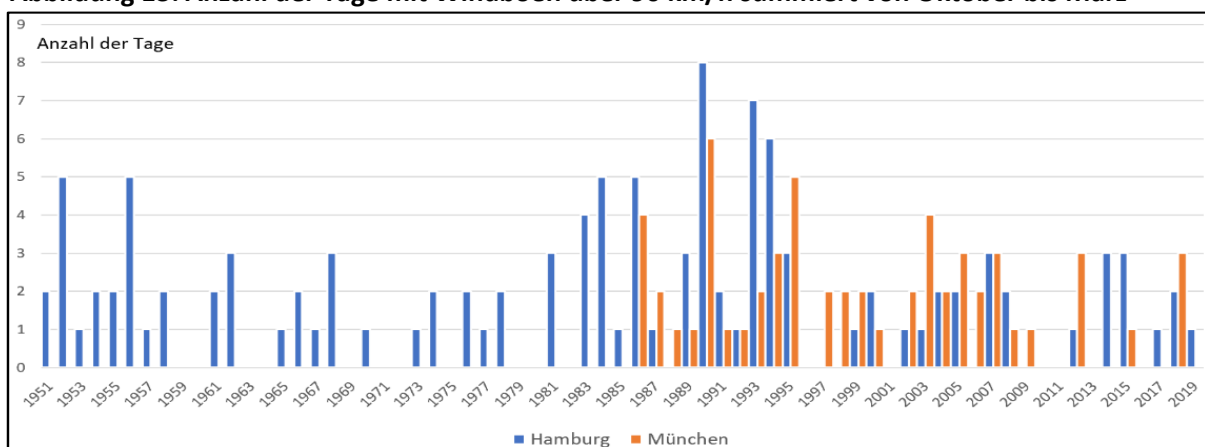
Gleichwohl erfordert der Meeresspiegelanstieg in Verbindung mit Sturmfluten eine Verbesserung des Küstenschutzes, insbesondere im Bereich der Deutschen Bucht. Dies gilt auch für zahlreiche Betriebsbereiche, die der StörfallV unterliegen. Auch die Maßnahmen zur Sicherung der Tanklager in den Überseehäfen müssen für zukünftige Sturmflutereignisse an den gestiegenen Meeresspiegel angepasst werden.

4.2 Umgebungsbedingte Gefahrenquellen der TRAS 320

4.2.1 Entwicklungstendenzen von Winterstürmen

Der Deutsche Wetterdienst betreibt an allen seiner ca. 180 hauptamtlichen Messstationen (Stand 2021) im Bundesgebiet Windmessanlagen. Hinzu kommen zahlreiche automatische Stationen und Anlagen von Fremdbetreibern, wie z.B. von Umweltämtern. Die Messung der Windgeschwindigkeiten erfolgen üblicherweise nach den Anforderungen der Weltorganisation für Meteorologie (WMO) in 10 m über Grund und sind stark von der Bodenrauigkeit sowie der Verdrängungshöhe beeinflusst. Änderung in der Umgebung einer Messstation haben folglich auch Auswirkungen auf die Messungen selbst. Um die Entwicklungstendenzen von Windböen mit Geschwindigkeiten über 90 km/h zu verdeutlichen, sind in **Abbildung 13** die Messergebnisse zweier Messstationen (Hamburg-Fuhlsbüttel und München-Stadt) dargestellt, deren Einflussgrößen über große Zeiträume weitgehend unverändert geblieben sind. Darüber hinaus liegt eine Messstation im Norden (Zeitreihe von 1951 – 2019) und die andere im Süden Deutschlands (Zeitreihe von 1986 – 2019). Für die Auswertung der Datenreihen wurden nur die Böengeschwindigkeiten zwischen Oktober bis März herangezogen. Hohe Böengeschwindigkeiten außerhalb dieses Zeitraums werden nicht durch Winterstürme oder Orkane verursacht, sondern haben meist andere Ursachen, wie z.B. schwere Gewitter. Wie die Abbildung 13 verdeutlicht, ist bei beiden Zeitreihen kein Trend für eine Zunahme der Böengeschwindigkeiten in den vergangenen Jahrzehnten erkennbar.

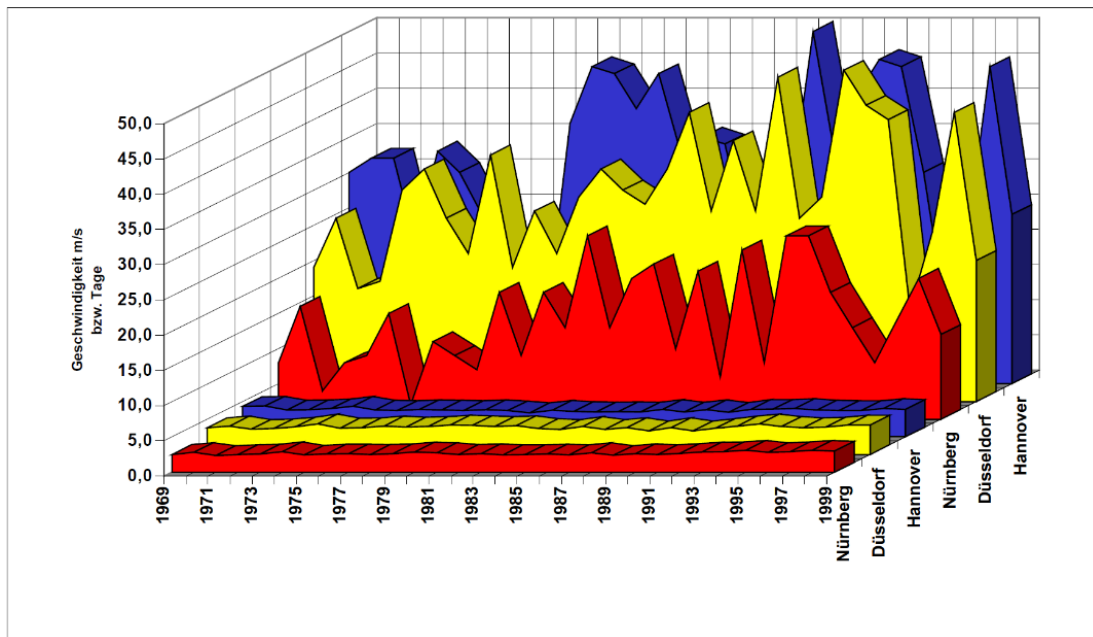
Abbildung 13: Anzahl der Tage mit Windböen über 90 km/h summiert von Oktober bis März



Quelle: K.-E. Köppke in Anlehnung an T. Ruhnau, 2021

Eine ältere Untersuchung von U. Otte (1999) zeigt dagegen einen Anstieg der Tage mit einer Böengeschwindigkeit von mindestens 8 Bft für die Städte Nürnberg und Düsseldorf, nicht jedoch für Hannover (**Abbildung 14**). Die Zeitreihen des Jahresmittels der Windgeschwindigkeit hat sich für alle drei Städte dagegen nicht verändert. Eine mögliche Erklärung ist nach Otte, „dass mehr Tage mit maximalen Böen oberhalb der Sturmschwelle durch mehr Tage oder Episoden mit niedrigen Windgeschwindigkeiten in den Sommermonaten kompensiert werden, um letztlich zu einer über die Zeit konstanten mittleren Windgeschwindigkeit zu kommen.“

Abbildung 14: Zeitreihen des Jahresmittels der Windgeschwindigkeiten (vorne) und Anzahl von Tagen mit Spitzenböen von mindestens 8 Bft



Quelle: U. Otte, DWD

Deutlich wird in Abbildung 14, dass die Häufigkeit von Sturmböen keineswegs einheitlich zunimmt, sondern vermutlich mit einer veränderten Klimavariabilität zu erklären ist.

4.2.2 Projektionen von Winterstürmen

In einer Vielzahl von Veröffentlichungen werden die Ergebnisse der Projektionen der Windgeschwindigkeiten vorgestellt. Gegenstand der Untersuchungen waren meist die Veränderungen der mittleren Windgeschwindigkeiten. Untersuchungen bzgl. der Intensitäten von Winterstürmen sind vergleichsweise selten. So wird z.B. im Projekt ReKliEs-De (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2017) dargestellt, dass die Änderungssignale für den bodennahen Wind insgesamt sehr gering sind. Im Einzelnen wird sogar für die Jahreszeiten Frühling, Sommer und Herbst ein leichter Rückgang der mittleren Windgeschwindigkeiten um 0,1 m/s für den Zeitraum 2021 – 2050 und um 0,2 m/s für den Zeitraum 2071- 2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 erwartet. Für den Winter deuten die Ergebnisse dagegen eine Zunahme um ca. 0,1 m/s für den Zeitraum 2021 – 2050. Darüber hinaus wird keine weitere Verstärkung der mittleren Windgeschwindigkeit angezeigt. Zusammenfassend wird im Bericht festgestellt, dass die Änderungen der mittleren Windgeschwindigkeit für die untersuchten Szenarien (RCP8.5 und RCP2.6) gering und statistisch nicht signifikant sind.

Bezüglich der Projektionen für Winterstürme weist der DWD (2018) daraufhin, dass bislang kein eindeutiger Trend erkennbar ist. Andere Veröffentlichungen gehen jedoch von einer

Zunahme der Böengeschwindigkeiten im Norden aus, wobei sich aus den verschiedenen Rechenläufen der verwendeten Klimamodelle für die Mitte und den Süden Deutschlands keine einheitlichen Änderungssignale ergeben haben (Frank et al., 2010). Über Nordwestdeutschland ist bezogen auf die Referenzperiode 1971 – 2000 mit einer Zunahme der Böengeschwindigkeiten zwischen 2 und 8 % (Ensemblemittel) bei einer Wiederkehrperiode von 10 Jahren zu rechnen.

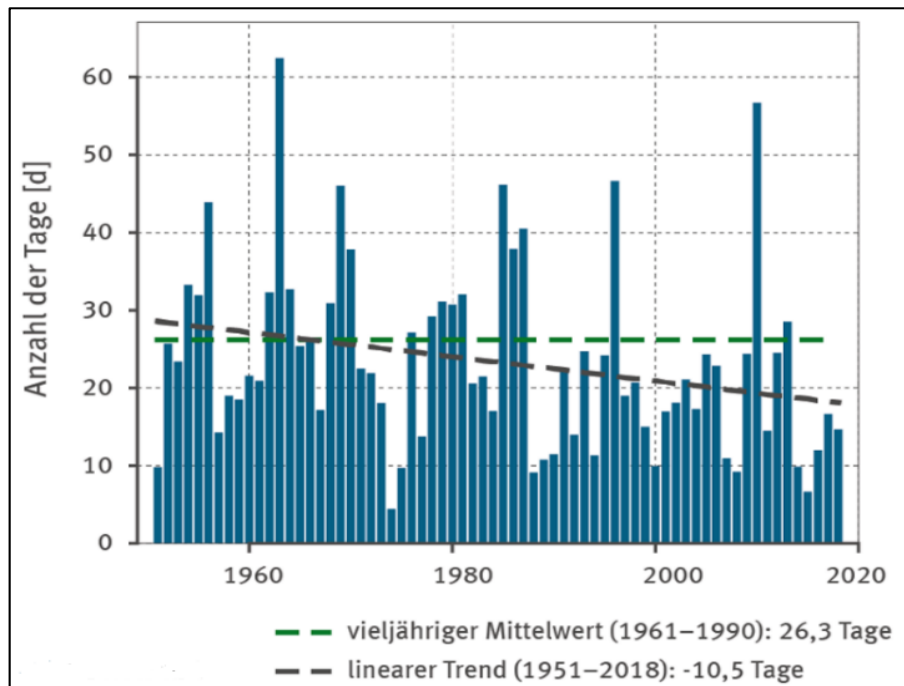
Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Donat et al. (2011). Für diese Studie wurde ein A1B Szenario, was ein klimapolitisch ambitioniertes Szenario darstellt, zugrunde gelegt. Die Projektionen ergaben für die extreme Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe im Ensemble-Mittelwert eine Erhöhung bis zu 5% über den nördlichen Teilen Mittel- und Westeuropas für die Periode 2071- 2100 bezogen auf die Referenzperiode 1960 - 2000. Umgekehrt wurde in Südeuropa ein Rückgang der extremen Windgeschwindigkeiten festgestellt.

Erkenntnisse über extreme Windspitzen in Deutschland aufgrund konvektiver Ereignisse liegen beim Deutschen Wetterdienst hinsichtlich Intensität und Eintrittshäufigkeit vor (Augter und Roos, 2011). Bei tropischen Wirbelstürmen zeichnet sich bereits eine Veränderung hin zu heftigeren Ereignissen mit der globalen Erwärmung ab (Stock, 2009). Welche Veränderungen hingegen bei Gewitterstürmen und Tornados durch den Klimawandel zu erwarten sind, ist nach wie vor eine offene Frage (Brooks, 2013). Schwere Gewitterstürme nehmen an Heftigkeit mit der Erhöhung zweier atmosphärischer Parameter zu, der potenziell verfügbaren konvektiven Energie (CAPE) und der vertikalen Windscherung in der Troposphäre (SHR6), wobei insbesondere hohe Werte beim letzten Parameter maßgeblich für die Ausbildung von Tornados sind. Einfache physikalische Ansätze lassen erwarten, dass die globale Erwärmung infolge erhöhter Oberflächentemperatur und steigender Luftfeuchte im Mittel auch höhere verfügbare Energiewerte für CAPE ergeben. Dagegen könnte die Windscherung SHR6 mit niedriger werdendem Temperaturgradienten Äquator-Pol abnehmen. Diese Erwartungen werden durch die Mehrzahl (~2/3) von Klimamodellsimulationen gestützt, die diese Parameter betrachten (Brooks 2013). Wären die Prozesse so einfach, wie in dieser großskaligen vereinfachenden Betrachtung, dann würden mit dem Klimawandel Gewitterstürme stärker und Tornados schwächer werden. Leider sind die Prozesse komplexer, da die Ausbildung von Gewitterzellen und daran anschließend die Bildung von Superzellen sehr stark von lokalen Parametern der Geländeoberfläche sowie der sich darüber ausbildenden atmosphärischen Schichtung abhängen.

4.2.3 Entwicklungstendenzen von Schnee- und Eislasten

Im Zuge der Erderwärmung hat in den vergangenen Jahrzehnten die Zahl der Eistage ($< 0^{\circ}\text{C}$) abgenommen. **Abbildung 15** zeigt die Messergebnisse des DWD, veröffentlicht im Monitoring 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel (Umweltbundesamt, 2021)

Abbildung 15: Anzahl der Eistage in Deutschland 1951 - 2018

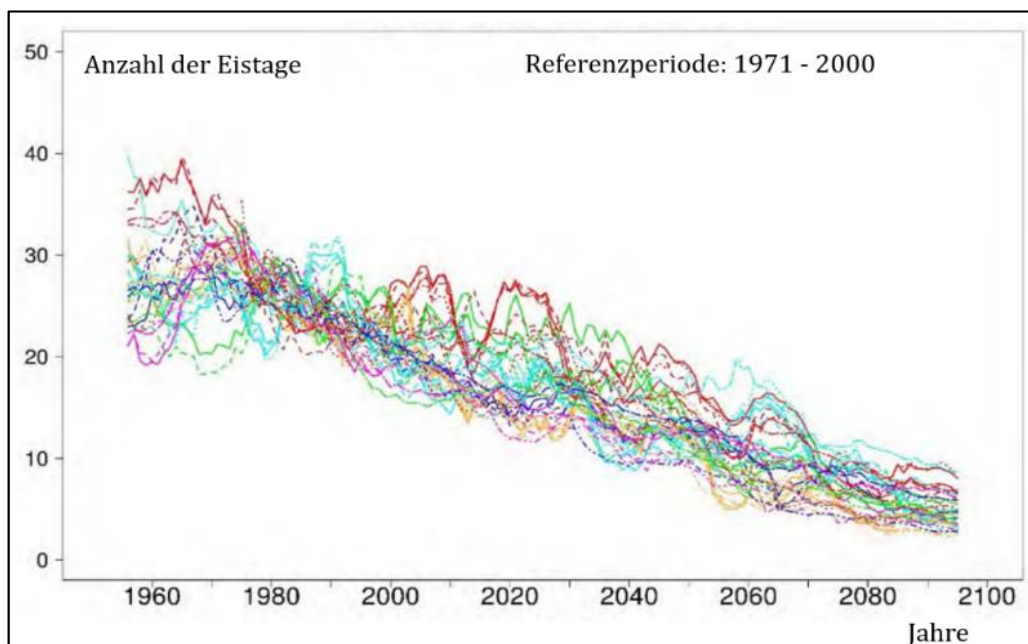


Quelle: DWD / UBA

4.2.4 Projektionen zur Entwicklung der Zahl der Eistage

Zu den zukünftigen Entwicklungstendenzen bzgl. der Anzahl der Eistage gibt es nur sehr wenig aktuelle Informationen. So wurde z.B. für das Szenario RCP8.5 (weiter-wie-bisher-Szenario) die Entwicklung der Eistage ($T < 0^{\circ}\text{C}$) auf der Grundlage der Referenzperiode 1971- 2000 projiziert, wonach eine weitere Abnahme der Zahl der Eistage zu erwarten ist (**Abbildung 16**).

Abbildung 16: Zeitliche Abnahme der Zahl der Eistage verschiedener Projektionsrechnungen mit dem Szenario RCP8.5



Quelle: ReKliEs-De (2017)

4.2.5 Ursachen für Wintereinbrüche mit hohen Schneemassen

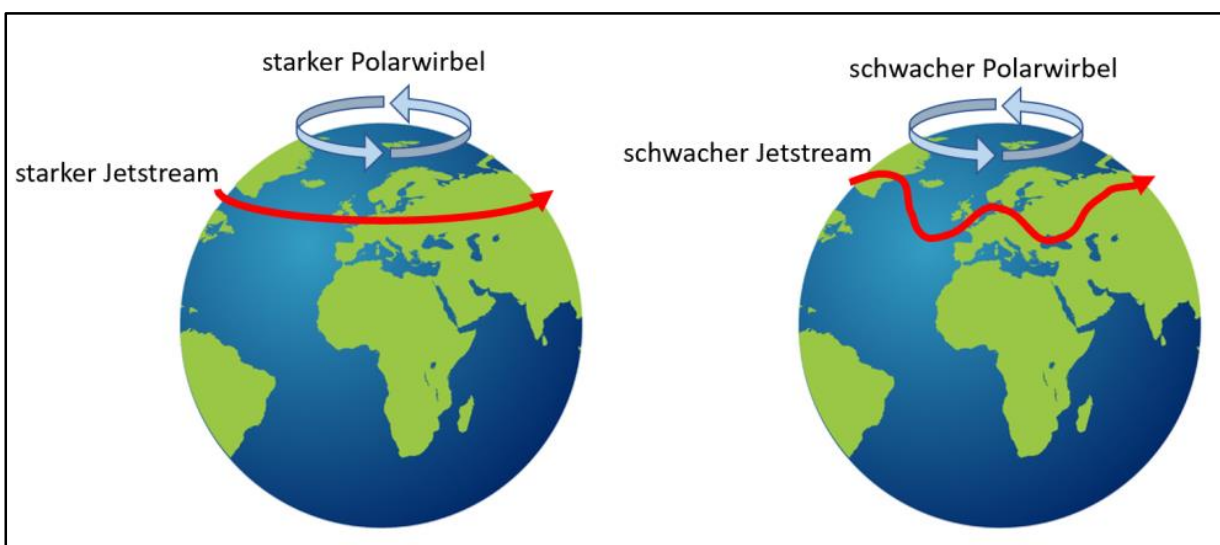
Vor dem Hintergrund der Schneehöhen im Winter 2020/2021 wurde in der Öffentlichkeit die Frage diskutiert, wie dies mit dem Klimawandel in Zusammenhang zu bringen ist. Grundsätzlich gilt, dass wärmere Luft mehr Wasser aufnehmen kann. Demzufolge wird die aufgenommene Wassermenge zu erhöhten Regenmengen oder ggfs. auch als Schnee führen. Letzteres ist immer dann der Fall, wenn warme feuchte Luftströmungen auf kalte Luftströmungen treffen. In der Regel ist dies vor allem im Alpenraum der Fall. Im Winter 2019/2020 kam es in den Alpen zu massiven Schneefällen, die durch warme und feuchte Luftmassen ausgelöst wurden. Experten vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung führen dies auf den langen heißen Sommer zurück, der die Ozeane erwärmt hat, wodurch viel Wasser verdunsten konnte. Luftströmungen haben diese Feuchtigkeit in den Alpenraum transportiert, die dort als Schnee niederkam und u.a. zu einer erhöhten Lawinengefahr führte (DWD, 2021).

Demgegenüber wurden die Schneemassen im Winter 2020/2021, die vor allem im Norden und in der Mitte Deutschlands nieder kamen, durch eine Schwächung des nördlichen stratosphärischen Polarwirbels verursacht. Der Polarwirbel bildet sich jedes Jahr im Herbst und verbleibt während der Wintermonate stationär über dem Nordpol in einer Höhe von 30 km. Es konnte von M. Kretschmer nachgewiesen werden, dass durch einen schnellen Temperaturanstieg (meist in wenigen Tagen) über dem Nordpol eine temporäre Schwächung des Polarwirbels verursacht wird. Dieses Phänomen tritt meist im Abstand von mehreren Jahren auf. Es wurde festgestellt, dass während des Untersuchungszeitraums 1979 – 2015 diese Schwächung zunehmend länger anhält (Kretschmer, 2017).

Der Polarwirbel schließt die arktische Kaltluft über der nördlichen Polkappe wie ein doppelter Ring ein. Wird dieser geschwächt, beeinflusst er auch den Jetstream, der von West nach Ost über der nördlichen Halbkugel als Band in einer Höhe von 10 km strömt.

Wird der Polarwirbel geschwächt, schwächt er auch den Jetstream, der dann zu oszillieren beginnt (**Abbildung 17**). Bei Tiefdruckgebieten kann hierdurch Kaltluft sehr weit nach Süden transportiert werden. Temperaturanomalien und Kaltlufteinbrüche, verursacht durch eine Schwächung des stratosphärischen Polarwirbels, werden aufgrund des Klimawandels möglicherweise noch zunehmen.

Abbildung 17: Wirkung der Polarwirbels auf den Jetstream



Quelle: in Anlehnung an wetteronline

Eine Schwächung des Jetstreams wird vor allem durch die fortschreitende Erwärmung der Arktis induziert, wodurch sich der Temperaturunterschied zwischen Äquator und der Arktis verringert. Der Jetstream mäandert dann mal weit nach Norden, mal weit nach Süden. Durch die stärkere Ausprägung der Wellenberge und -täler verringert sich auch deren Wanderungsgeschwindigkeit. Längere Hitzeperioden treten dann im Bereich eines Wellenberges auf. Ein langgezogenes Wellental kann dagegen extreme winterliche Kälteeinbrüche verursachen (Lingenhöhl, 2014).

Darüber hinaus erhöht sich durch die Reduktion von Meereis der atmosphärische Wasserdampfgehalt in den Luftströmungen aus der Arktis im Spätherbst und Winter. Hierdurch könnte zukünftig die Wahrscheinlichkeit starker Schneefälle im frühen Winter in Europa erhöhen werden. Ähnliche physikalische Ursachen hat das meteorologische Phänomen „Lake-Effect Snow“ (LES). Es entsteht, wenn in der kalten Jahreszeit Kaltluft über größere, wärmere Wasserflächen strömt wodurch sich die kalte Luft von unten erwärmt und zusätzliche Feuchtigkeit aufnimmt. Die so angereicherten und erwärmte Luft steigt auf und es kann zu flächenmäßig eng begrenzten Niederschlagsbändern mit teils heftigen Schneefällen kommen. Der Effekt kann durch orografisch bedingte Aufwärtsströmung der Luft verstärkt werden, wodurch es zu schmalen, dafür aber sehr intensiven Niederschlagsbändern auf dem Lee-Ufer des Sees kommen kann. Aufgrund der geringen Breite der Niederschlagsbänder von meist nur wenigen Kilometern kann ein bestimmtes Gebiet z.B. im Schnee versinken, während in der Nachbarschaft deutlich weniger oder gar kein Schnee fällt. Der beschriebene Effekt wird durch die Veränderungen der großräumigen atmosphärischen Strömungen sowie weiterer regionaler Besonderheiten verstärkt (National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2015).

Zwar ist der LES-Effekt vor allem aus Nordamerika bekannt, aber auch an der Ostseeküste trat er zuletzt am 11. März 2013 in Schleswig-Holstein auf. 50 cm Neuschnee gingen in einigen Teilen der Stadt Lübeck in 24 Stunden nieder. Aufgrund einer ähnlichen Wetterlage wurden am 30. November 2010 im mittleren Teil des Kreises Ostholstein sogar Schneehöhen von bis zu 76 cm erreicht (Krätzig et. al., 2016), wobei die Schneeverwehungen noch deutlich darüber lagen. Am bekanntesten ist der Winter 1978/79 mit seinen massiven Schneefällen in Norddeutschland. Auch für dieses Wetterereignis kann aufgrund der Wetterlage von einem "Lake-Snow-Effekt" ausgegangen werden. Während noch relativ mildes Wetter mit Temperaturen deutlich über dem Gefrierpunkt um die Weihnachtsfeiertage 1978 herrschte, drang nach dem 28.12.1978 bis zum Jahreswechsel arktische Kaltluft aus Nordosten mit anhaltend starkem Wind nach Norddeutschland und weiter nach Mitteleuropa ein. Neben den sturmbedingten Verwehungen lassen sich die beobachteten außergewöhnlich extremen Schneehöhen durch die Aufladung der Luft mit Feuchtigkeit über der noch relativ warmen Ostsee erklären.

Eine weitere Ursache für große Schneemassen ist die V_b -Wetterlage, die in Kapitel 4.1.3.3 erläutert wurde. So wurde beispielsweise durch diese Wetterlage im Dezember 2020 Unwetteralarm im Alpenraum ausgelöst. Besonders stark betroffen war die Alpensüdseite, aber auch in Deutschland wurden selbst in Tallagen Schneehöhen von 70 cm und mehr erreicht. Hinzu kam, dass die Temperatur um den Gefrierpunkt schwankte, so dass der Schneefall zeitweise in Regen überging und somit sehr schwer wurde. (Eine umfangreiche Auflistung von V_b -Wetterlagen gibt Wikipedia unter dem Begriff „Mittelmeertief“.)

Aus den genannten Gründen kann es trotz der zunehmenden Erwärmung der Erde und der damit verbundenen Verringerung der Eisbedeckungen in der Antarktis, auf Grönland sowie der Gletscher zu extremen Wintereinbrüchen mit z.T. hohen Schneemassen kommen.

4.3 Erkenntnisse über die globale Klimaentwicklung

Am 9.8.2021 wurde vom Intergovernmental Panel on Climate Change der 6. Assessmentreport (AR) "The Physical Science Basis" der Arbeitsgruppe 6 vorgelegt (IPCC, 2021). Das IPCC verfolgt das Ziel, die Klimaveränderungen der vergangenen Jahrhunderte aufzuarbeiten und Projektionen für die zukünftige Entwicklung des Klimas als Grundlage für politische Entscheidungsträger zu entwickeln. Danach sind nur das SSP 5- mit dem RCP 8.5- sowie das SSP 1- mit dem RCP 6.0-Szenario näherungsweise vergleichbar.

4.3.1 SSP-Szenarien als Grundlage zur Betrachtung der Klimaentwicklung

Wurden im 5. Assessmentreport noch die RCP-Szenarien als Grundlage herangezogen (vgl. Kapitel 5.1.1), die den „Strahlungsantrieb“ der Treibhausgaskonzentrationen abbilden sollen, gehen die Wissenschaftler im 6. AR von sogenannten SSP-Szenarien (Shared Socioeconomic Pathways) aus, die auf der Grundlage unterschiedlicher Szenarien für zukünftige Treibhausgasemissionen sowie für Veränderungen der ökonomischen, sozialen und politischen Bedingungen entwickelt wurden. Entsprechend breit ist die Varianz der Projektionsergebnisse.

Bei den SSP-Szenarien wird zwischen den Basis-Szenarien, bei denen keine neuen Maßnahmen zur Minderung der Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden, unterschieden und den Klimaschutz-Szenarien, bei denen die Emissionen mehr oder weniger reduziert werden.

Fünf sozioökonomischen Entwicklungspfad (SSP1 bis SSP5) bilden die folgenden Basis-Szenarien, die die wichtigsten sozioökonomischen, demographischen, technologischen, politischen, institutionellen und Lebensstil-Trends beschreiben. Das Deutsche Klimarechenzentrum beschreibt auf seiner Internetseite die SSP-Szenarien wie folgt:

SSP1: Der nachhaltige und grüne Weg beschreibt eine zunehmend nachhaltige Welt. Globale Gemeinschaftsgüter werden bewahrt, die Grenzen der Natur werden respektiert. Statt Wirtschaftswachstum steht zunehmend das menschliche Wohlbefinden im Fokus. Einkommensungleichheiten zwischen den Staaten und innerhalb der Staaten werden reduziert. Der Konsum orientiert sich an geringem Material- und Energieverbrauch.

SSP2: Der mittlere Weg schreibt die bisherige Entwicklung fort. Einkommensentwicklungen einzelner Länder gehen weit auseinander. Es gibt eine gewisse Zusammenarbeit zwischen den Staaten, die jedoch nur geringfügig weiterentwickelt wird. Das globale Bevölkerungswachstum ist moderat und schwächt sich in der zweiten Jahrhunderthälfte ab. Umweltsysteme erfahren eine gewisse Verschlechterung.

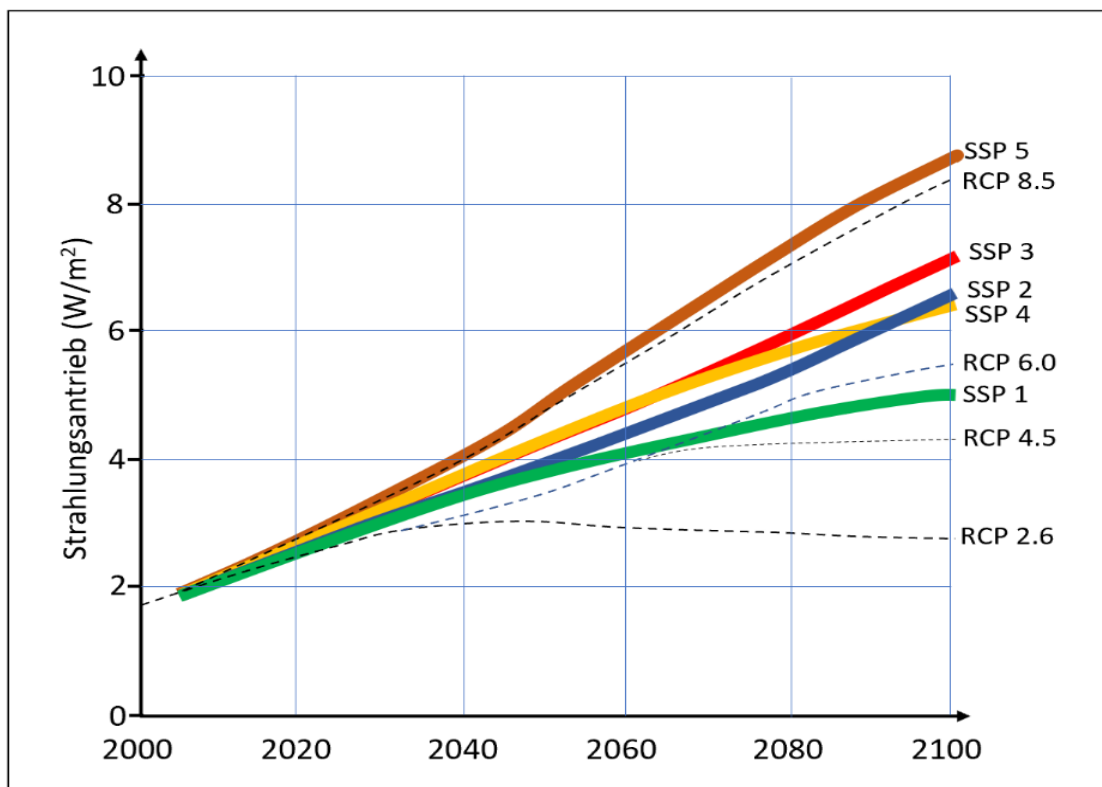
SSP3: Regionale Rivalitäten. Eine Wiederbelebung des Nationalismus und regionale Konflikte rücken globale Themen in den Hintergrund. Die Politik orientiert sich zunehmend an nationalen und regionalen Sicherheitsfragen. Investitionen in Bildung und technologische Entwicklung nehmen ab. Ungleichheiten nehmen zu. In einigen Regionen kommt es zu starken Umweltzerstörungen.

SSP4: Ungleichheit. Die Kluft zwischen entwickelten Gesellschaften, die auch global kooperieren, und solchen, die auf einer niedrigen Stufe der Entwicklung mit niedrigem Einkommen und geringem Bildungsstand verharren, nimmt weiter zu. In einigen Regionen ist Umweltpolitik bei lokalen Problemen erfolgreich, in anderen nicht.

SSP5: Die fossile Entwicklung. Die globalen Märkte sind zunehmend integriert, mit der Folge von Innovationen und technologischem Fortschritt. Die soziale und ökonomische Entwicklung basiert jedoch auf der verstärkten Ausbeutung fossiler Brennstoffressourcen mit einem hohen Kohleanteil und einem weltweit energieintensiven Lebensstil. Die Weltwirtschaft wächst und lokale Umweltprobleme wie die Luftverschmutzung werden erfolgreich bekämpft

Für eine Vergleichbarkeit mit den RCP-Szenarien ist in **Abbildung 18** der zukünftige Strahlungsantrieb entsprechend den SSP1-5-Szenarien ohne klimapolitische Maßnahmen dargestellt.

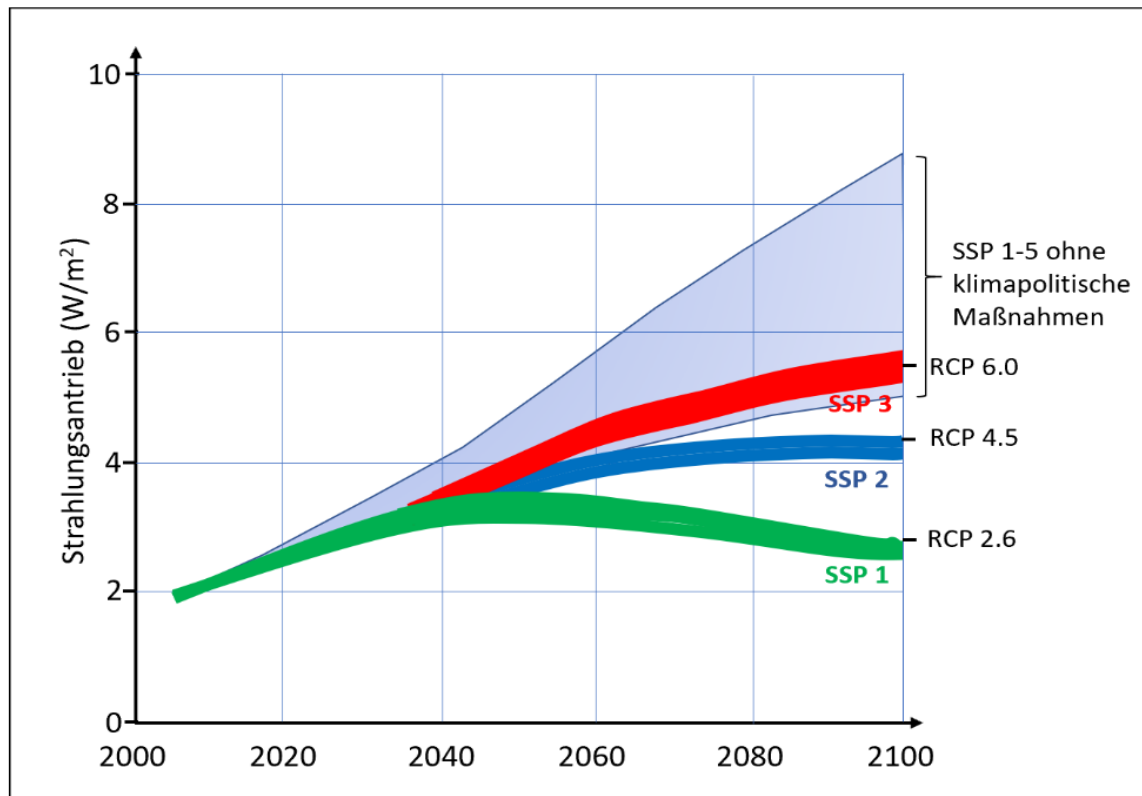
Abbildung 18: Strahlungsantrieb 2005 bis 2100 nach verschiedenen SSP-Basiszenarien ohne klimapolitische Maßnahmen im Vergleich zu RCP-Szenarien.



Quelle: wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/SSP-Szenarien

Demgegenüber werden in **Abbildung 19** die SSP-Klimaschutzszenarien mit den RCP-Szenarien verglichen. Für das Jahr 2100 erreichen die SSP-Klimaschutzszenarien (SSP 1- 3) Strahlungsantriebe, die mit RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 6.0 vergleichbar sind. Zum Vergleich ist in Graublau die Varianz der Szenarien SSP1-5 ohne klimapolitische Maßnahmen dargestellt.

Abbildung 19: Strahlungsantrieb 2005 bis 2100 nach verschiedenen SSP-Szenarien mit klimapolitischen Maßnahmen im Vergleich zu RCP-Szenarien.



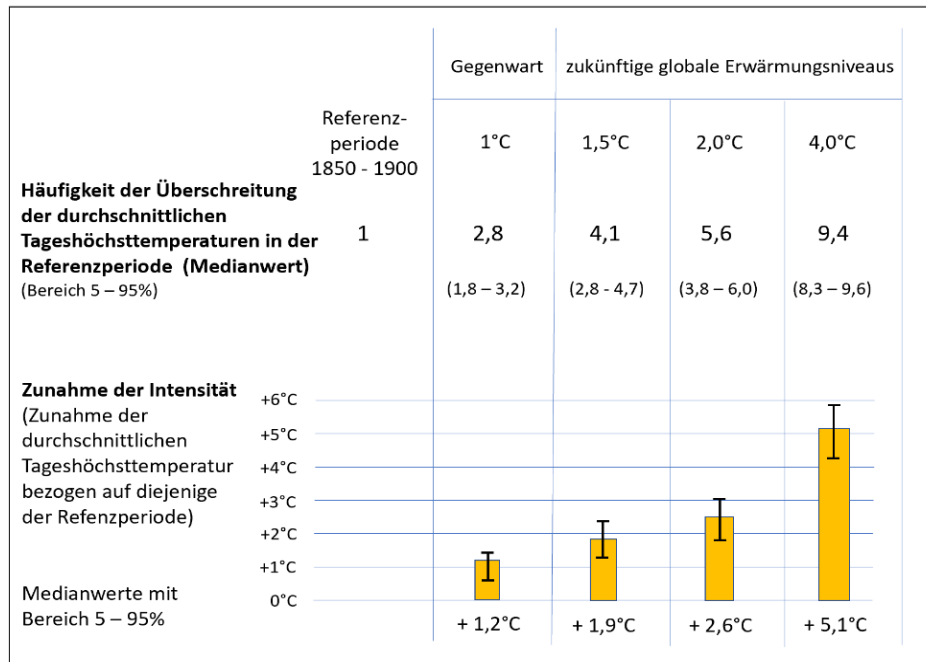
Quelle: wiki.bildungserver.de/klimawandel/index.php/SSP-Szenarien

4.3.2 Ergebnisse des IPCC-Berichts mit Bezug zur Anlagensicherheit

Mit Blick auf die Anlagensicherheit werden in diesem Kapitel die wichtigsten Aussagen der Klimaprojektionen des IPCC-Berichts zusammengefasst. Der 6. AR verdeutlicht u.a. für verschiedene Erhöhungen der globalen Atmosphärentemperatur (1°C, 1,5°C, 2°C und 4°C) die Folgewirkungen für verschiedene Extremereignisse. Die projizierten Veränderungen sind relativ zur Referenzperiode 1850-1900, was ein Klima ohne menschlichen Einfluss darstellt.

Heiße Temperaturextreme sind definiert als die Tageshöchsttemperaturen über Land, die während des Referenzzeitraums 1850–1900 durchschnittlich einmal in einem Jahrzehnt (10-Jahres-Ereignis) überschritten wurden. Bei einer Erhöhung der Globaltemperatur z.B. um 1,5 °C wird Tageshöchsttemperatur des Zeitraums 1850-1900 statistisch 4,1 Mal (Medianwert) überschritten (**Abbildung 20**). Die Intensität liegt dabei um 1,9 °C höher als die Tageshöchsttemperatur der Referenzperiode.

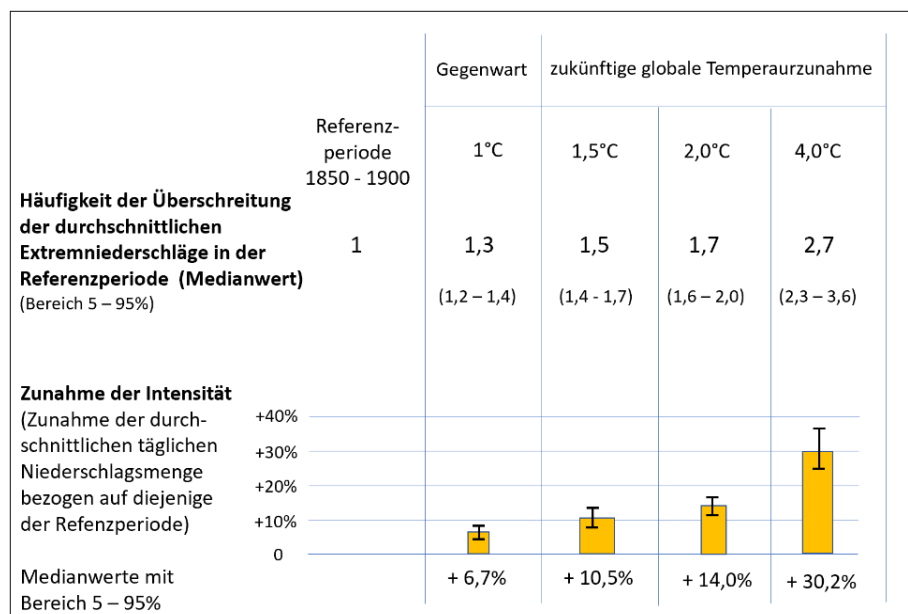
Abbildung 20: Häufigkeit und Intensitätszunahme extremer Temperaturereignisse, die in einem Klima ohne menschlichen Einfluss durchschnittlich einmal in 10 Jahren auftraten



In Anlehnung an: IPCC, 6. AR

Extremniederschlagsereignisse sind definiert als die tägliche Niederschlagsmenge über Land, die während des Referenzzeitraums 1850–1900 durchschnittlich einmal in einem Jahrzehnt überschritten wurde. In **Abbildung 21** sind analog zu Abbildung 20 die Häufigkeiten der Überschreitung der täglichen Extremniederschläge, wie sie durchschnittlich bei einer Wiederkehrperiode von 10 Jahren im Zeitraum 1850 – 1900 auftraten, für die verschiedenen Temperaturanstiege zusammengefasst. Darüber hinaus ist auch die Zunahme der jeweils zu erwartenden Intensitäten dargestellt.

Abbildung 21: Häufigkeit und Intensitätszunahme extremer Niederschläge, die in einem Klima ohne menschlichen Einfluss durchschnittlich einmal in 10 Jahren auftraten



In Anlehnung an: IPCC, 6. AR

Für landwirtschaftliche und ökologische Dürren werden im 6. AR nur Ergebnisse für Trockengebiete gezeigt, in denen mindestens ein mittleres Vertrauen in eine projizierte Zunahme der landwirtschaftlichen/ökologischen Dürre auf dem Erwärmungsniveau von 2°C im Vergleich zu 1850–1900 besteht. Zu diesen Regionen gehören auch West- und Mitteleuropa sowie die Mittelmeerregion. Die Aussagen im 6. AR beziehen sich auf die Veränderungen der Bodenfeuchte und sind daher nicht relevant für die Anlagensicherheit.

Bezüglich der Veränderung von Stürmen stellt das IPCC fest, dass ein mittleres Vertrauen in eine anhaltende Polwärtsverschiebung von Stürmen und deren Niederschlag im Nordpazifik besteht. Demgegenüber ist das Vertrauen in die projizierten Veränderungen der nordatlantischen Zugbahnen von Stürmen nur gering. Im Gegensatz zu den Aussagen bezüglich der Entwicklung tropischer Wirbelstürme lässt das IPCC damit nicht erkennen, ob in Mitteleuropa mit einer Zunahme der Zahl von Stürmen oder gar einer Zunahme der Windgeschwindigkeit zu rechnen ist.

Die Aussagen im 5. Assessment Report zu dem Meeresspiegelanstieg werden im 6. AR mit einer größeren Sicherheit bestätigt. Bei einem 1,5 Grad-Szenario kann der Meeresspiegelanstieg bis zum Jahr 2100 vermutlich unter einem halben Meter gehalten werden. Gelingt es nicht, die Treibhausgasemissionen deutlich zu vermindern, kann bis 2100 der Meeresspiegel um 1 Meter bezogen auf das Jahr 1900 ansteigen.

4.4 Zwischenergebnis und Schlussfolgerungen für die Sicherheit von Betriebsbereichen

Der gegenwärtige Stand des Wissens über die neusten Erkenntnisse bzgl. der Veränderungen von umgebungsbedingten Gefahrenquellen kann für Deutschland wie folgt zusammengefasst werden:

Hochwasser und Niederschläge

Unbestritten bei allen Klimaforschern ist je nach Klimaszenario der Anstieg der Lufttemperatur aufgrund der Klimawandels. Hieraus ergibt sich eine höhere Wasseraufnahmefähigkeit der Atmosphäre, so dass in Zukunft insbesondere in den Wintermonaten die Niederschlagsmengen ansteigen werden.

Die Projektionen zeigen je nach Klimaszenario eine Zunahme der durchschnittlichen Niederschlagsmengen in den Wintermonaten um 10 % bis 2050 und um 20% bis 2085 sowie eine Abnahme in den Sommermonaten. Hieraus resultiert eine Veränderung des Flusshochwassers für die nahe (bis 2050) und ferne Zukunft (bis 2100). Jedoch zeigen die Projektionen je nach Flusseinzugsgebiet regionale Unterschiede auf. Während für Rhein, Mosel und Main einheitlich mit einer Zunahme des mittleren Hochwassers gerechnet werden muss, sind die Projektionen für Elbe, Saale und Havel uneinheitlich. Bezogen auf die Referenzperiode 1961 – 1990 zeigen die Projektionen für den Inn und die Donau eher eine abnehmende Tendenz für das mittlere Hochwasser (Köppke und Buchholz, 2020). Neben den Veränderungen beim mittleren Hochwasser sind aus Sicht der Anlagensicherheit auch extreme Ereignisse zu betrachten.

Dazu gehört z.B. die sogenannte V_b -Wetterlage, die keineswegs selten ist und Starkniederschläge insbesondere im Südosten und Osten Deutschlands verursacht. Massive Überschwemmungen sind meist Folgen dieser Wetterlage. Besonders stark können sie ausfallen, wenn es zu einer Überlagerung mit feuchtigkeitsgesättigten Böden aus einem zeitlich nahen Vorereignis kommt. Aufgrund des Anstieges der Oberflächentemperatur im Mittelmeer können sich die Niederschlagsmengen der V_b -Wetterlage in Zukunft noch verstärken.

Unabhängig von der V_b -Wetterlage können durch Gewitterzellen Starkregenereignisse in ganz Deutschland auftreten. Deren Intensität wird in den Wintermonaten je nach Klimaszenarium bis 2.100 um 20 % (RCP2.6) und bis 100 % (RCP8.5) bezogen auf die Referenzperiode 1951 – 2006 aufgrund des Klimawandels ansteigen, so dass dieser Gefahrenquelle verstärkte Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Daher ist die Einführung des Klimaanpassungsfaktors in der TRAS 310 von 1,2 auch für Starkniederschläge angemessen. Problematisch erscheint jedoch die Verwendung der zugrundeliegenden Niederschlagsmengen im KOSTRA-Atlas. Ausgehend von einem 100-jährlichen Ereignis bilden die angegebenen statistisch ermittelten Mittelwerte der Niederschlagsmengen für verschiedenen Dauerstufen nicht annähernd die schon heute beobachteten maximalen Starkniederschläge ab. Dies wurde in der Nachbetrachtung des Ereignisses an Ahr und Erft erneut sichtbar (DWD, 2021).

Weil auch Stadtverwaltungen die Gefährdung durch Starkregen immer bewusster wird, werden zunehmend Gefahrenkarten für urbane Starkregenereignisse erarbeitet, die auch den Betreibern von ortsansässigen Betriebsbereichen Hinweise zur Bemessung von Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen gegeben können. Für die Erstellung von Gefahrenkarten für Starkniederschläge werden z.B. in Baden-Württemberg folgende Ereignisse zugrunde gelegt (LUBW, 2016):

1. seltenes Ereignis der Dauerstufe 1 Stunde mit einer Jährlichkeit von 30 Jahren
2. außergewöhnliches Ereignis der Dauerstufe 1 Stunde einer Jährlichkeit von 100 Jahren
3. extremes Ereignis mit der Dauerstufe 1 Stunde und einer Niederschlagsmenge von 128 mm

Das extreme Ereignis entspricht näherungsweise den maximal beobachteten Starkniederschlagsmengen, jedoch nur für die Dauer einer Stunde (vgl. Abbildung 6). Starkniederschläge mit einer längeren Dauer werden dagegen nicht betrachtet. Zum Vergleich wird in Nordrhein-Westfalen zur Erstellung von Starkniederschlagsgefahrenkarten eine Niederschlagshöhe von 90 mm in einer Stunde empfohlen (MULNV NRW, 2018).

Die Anwendung der auf diesen Grundlagen erstellten Gefahrenkarten ist somit für die Gefahrenanalyse nur eingeschränkt anwendbar. Hieraus ergibt sich ein Handlungsbedarf, um auch extreme Starkniederschläge höherer Dauerstufen zu betrachten. Darüber hinaus ist festzustellen, dass Gefahrenkarten für urbane Starkniederschläge noch nicht flächendeckend vorliegen.

Schwierig gestaltet sich auch die Erarbeitung von Gefahrenkarten für Sturzfluten, weil neben der Simulation von konvektiven Starkregenereignissen auch hochdetaillierte Geländeinformationen in Meterauflösung für größere Gebiete ausgewertet werden müssen. Aus diesem Grund sind für die nächsten Jahre vermutlich keine wesentlichen Informationen zu erwarten, die für eine Gefahrenquellenanalyse genutzt werden können. Die praktische Umsetzung einer Gefahrenquellenanalyse für Sturzflutereignisse kann sich im Einzelfall für den Betreiber eines Betriebsbereichs daher schwierig gestalten.

Fasst man die Erkenntnisse der Folgen des Klimawandels zusammen, ist ein Klimaanpassungsfaktor von 1,2 für Flusshochwasser und Starkniederschläge, wie er in der TRAS 310 im Jahr 2011 eingeführt und in den Hinweisen und Erläuterungen begründet wurde (Köppke et al., 2012), nach wie vor gerechtfertigt.

Umgekehrt sind in den Sommermonaten längere Trockenperioden mit niedrigen Wasserständen in den Flüssen und Bächen zu erwarten. Welche Auswirkungen dies auf die Anlagensicherheit hat, wurde bislang nicht vertieft untersucht. Deshalb fehlen derzeit die systematisch eruierten Grundlagen, um diese Naturgefahr in einer TRAS zu berücksichtigen.

Anstieg des Meeresspiegels

Der Meeresspiegel wird u.a. aufgrund des Abschmelzens der Eisbedeckungen in der Antarktis und auf Grönland sowie durch die Volumenzunahme bei steigender Wassertemperatur ansteigen. Die Prognosen schwanken gegenwärtig zwischen 0,6 m bis 1 m bis zum Jahr 2100, wobei es regionale Unterschiede durch Landsenkungen oder -hebungen geben wird. Auf diese Entwicklung müssen sich Betreiber von Betriebsbereichen in der Küstenregion vorbereiten. In Verbindung mit Orkanen werden aufgrund des Meeresspiegelanstiegs die Intensitäten von Sturmfluten zunehmen. Hiervon wird die Deutsche Bucht am stärksten betroffen. Eine Nacherhöhung von Hochwasserschutzmaßnahmen im Küstenbereich und in den Ästuaren von Flüssen, wie sie die TRAS 310 bis zum Jahr 2050 empfiehlt, ist trotz des langsamen Anstiegs des Meeresspiegels dringend geboten. Dies gilt umso mehr, weil in der Regel der Betrieb derartiger Schutzanlagen langfristig, also über das Jahr 2050 geplant wird.

Wind- und Böengeschwindigkeit

Obwohl bislang keine bzw. keine einheitliche Zunahme der Tage mit Böengeschwindigkeiten über 8 bzw. 9 Bft zu erkennen ist, gehen die Klimaforscher von einer zunehmenden Häufigkeit solcher Ereignisse aus. Die Projektionen zeigen jedoch keinen einheitlichen Trend für eine Zunahme der Intensität. Über Norddeutschland wurde für eine Wiederkehrperiode von 10 Jahren eine Änderung zwischen den untersuchten Zeiträumen von +6 % bis -1.5 % festgestellt. Dieses Ergebnis wird auch von der Mehrheit der Modellläufe bestätigt. Im übrigen Deutschland sind die Ergebnisse nicht eindeutig. Gleichwohl wird über einigen Regionen Mittel- und Süddeutschlands durch die Mehrheit der Modellläufe eine leichte Abnahme der Böengeschwindigkeit projiziert. Insgesamt ergibt sich damit, dass das derzeitige hohe Niveau in der Sturmaktivität bis 2050 nicht wesentlich absinken und in Norddeutschland sogar noch weiter ansteigen wird. Im Unterschied zur relativ grob eingeteilten Ableitung von auslegungsrelevanten Böengeschwindigkeiten nach DIN EN 1991 zeigen neuere Verfahren räumlich sehr viel differenziertere Verteilungen der zu erwartenden Windlasten in Deutschland.

Die größten Unsicherheiten in den Prognosen betreffen die Projektionen zukünftiger Extremwinde. Vor diesem Hintergrund kann derzeit kein Klimaanpassungsfaktor empfohlen werden.

Es besteht zwar durchaus Anlass anzunehmen, dass der Klimawandel auch in Mitteleuropa zu höheren Spitzenwindlasten führen wird, z.B. bei Gewitterstürmen. Auch dürfte sich wahrscheinlich die regionale Verteilung der auslegungsrelevanten Böengeschwindigkeiten und Windspitzen gegenüber bisherigen Daten (DIN EN 1991) verändern, da sich Veränderungen bei den für Winterstürme zugrundeliegenden Wetterlagen abzeichnen. Eine gesicherte Quantifizierung beider Veränderungen erscheint aber beim derzeitigen Stand der Wissenschaft nicht möglich. Mögliche regionale quantitative Veränderungen bei auslegungsrelevanten Böengeschwindigkeiten und Windspitzen lassen sich theoretisch durch aufwendige Simulationsrechnungen mittels hochauflösender regionaler Klimamodelle ermitteln. Hier sind zwar in jüngster Zeit enorme Fortschritte erzielt worden, die einige wesentliche physikalische Prozesse von Wolkendynamik, Mehrphasenprozessen und konvektivem Energietransport in den Modellen abbilden, aber die Reanalysen beobachteter Ereignisse mit Hilfe dieser weiterentwickelten Modelle zeigen noch unbefriedigende Ergebnisse (Krätzig et al., 2016). Das Fazit ist demzufolge auf eine Erhöhung oder Änderung der regionalen Verteilung auslegungsrelevanter Böengeschwindigkeiten und Windspitzen aufgrund des Klimawandels bis zur qualitativen, evaluierten Verbesserung der Modelle zu verzichten.

Eis- und Schneetage

Mit zunehmender Lufttemperatur verringert sich die Zahl der Eistage in Deutschland. Auch die mittleren Schneemengen werden im Durchschnitt zurückgehen. Gleichwohl wird es auch in Zukunft Perioden mit starkem Frost und hohen Schneemengen geben. Dass dies keineswegs im Widerspruch zum Klimawandel steht, kann insbesondere mit einer Schwächung des Jetstream durch die zunehmende Verringerung der Temperaturdifferenz zwischen Äquator und Arktis sowie durch die von Zeit zu Zeit temporär auftretende Schwächung des Polarwirbels über der nördlichen Polarkappe begründet werden. Auch die V_b -Wetterlage kann im Winter erhebliche Schneemengen verursachen. Ein weiterer Effekt, der große Schneemengen verursachen kann, ist der „Lake-Snow-Effekt“, wie er z.B. im Winter 1978/79 auftrat.

Daher kommen Krätzig et. al. (2016) zu dem Schluss, dass mit den auch weiter steigenden Temperaturen mit höherer Luftfeuchte im Winter zu rechnen ist. Weiter stellen die Autoren fest: „Daher kann mit weiter fortschreitenden Klimawandel erwartet werden, dass sich der beobachtete Trend zunehmender Niederschläge im Winter weiter fortsetzt. Im Mittel wird dies zu einem Rückgang der Schneefälle führen, wahrscheinlich aber nicht zu einem Rückgang der Extremwerte des Niederschlags als Schnee- und Schneeregen. Solche Extremfälle werden vermutlich seltener werden, doch können auch höhere Schneelasten als bisher beobachtet nicht völlig ausgeschlossen werden.“

Bei Winterstürmen ist nicht mit einem Rückgang im Klimawandel zu rechnen, sodass stürmische Winde infolge Winddrift und Schneeverwehungen Schneelasten lokal im Rahmen der bisherigen Beobachtungen erhöhen können. Für neue außergewöhnliche Schneelasten müssen weitere Faktoren hinzukommen, wie zum Beispiel der folgende.

Regionale geografische Besonderheiten infolge hoher Gradienten von Luftfeuchte und Temperaturschwankungen um den Gefrierpunkt sowie Winddrift können zu extremen Schneelasten beitragen. Dieser Effekt ist aber derzeit nur schwer und vor allem nicht pauschal quantifizierbar. Als Fazit lässt sich feststellen, dass durch die im Klimawandel zukünftig zu erwartenden Entwicklungen der meteorologischen Faktoren höhere Werte als bisher angenommen für Schnee- und Eislasten in weiterhin eher seltenen Extremereignissen nicht ausschließen lassen. Eventuelle Zunahmen bei Schnee- und Eislasten können regional sehr unterschiedlich sein und auch die räumliche Verteilung könnte anderes aussehen, als die bisher aus Erfahrungswerten abgeleitete. Die zukünftig zu erwartende räumlich differenzierte Verteilung von Schnee- und Eislasten lässt sich theoretisch mittels hochauflösender regionaler Klimamodelle ermitteln, dieses Verfahren ist aber sehr aufwendig und die Modelle sind trotz bemerkenswerter Fortschritte bei der Implementierung der physikalischen Mehrphasenprozesse dazu noch nicht ausreichend in der Lage. Als Vorsorgemaßnahme der Anpassung an die Folgen des Klimawandels erscheint daher ein „Schneelastfaktor“ (Teilsicherheitsfaktor für die Einwirkung Schneelast wegen möglicher Änderungen des Klimas) sinnvoll, ist aber beim derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand kaum quantifizierbar. Der vorgeschlagene pauschale Wert von 1,2 begründet sich analog zum Klimaanpassungsfaktor für Niederschläge und Hochwasser in der TRAS 310, da der gleiche physikalische Prozess des Anstiegs der Luftfeuchte mit der Temperatur eine Rolle spielt.

Somit ergibt sich folgende Empfehlung: Mit einem Klimaanpassungsfaktor analog zu dem in der TRAS 310 ließen sich zwar mögliche seltene Schneelast-Extremereignisse berücksichtigen, dies erscheint jedoch aufgrund der obenstehenden Erkenntnisse wenig sinnvoll. Insbesondere aufgrund der Erkenntnisse über bereits als eingetreten anzunehmende Klimaänderungen und solche Klimaänderungen, die bis 2050 erwartet werden, erscheint eine kurzfristig wirkende Anforderung bezogen auf die Auslegung gegen Schneelastextremereignisse sinnvoller. Zur Berücksichtigung möglicherweise bereits eingetretener oder bis 2050 zu erwartender Wirkungen des Klimawandels auf extreme Schneelastereignisse wird daher angeregt, die Forderung nach einer Berücksichtigung außergewöhnlicher Schneelasten als außergewöhnlichen Lastfall – wie sie bereits für das Norddeutsche Tiefland besteht – auf das gesamte Bundesgebiet auszudehnen.“

Globale Betrachtung des Klimawandels

Der 6. Assessment Report bestätigt die schon seit längerem bekannten Aussagen bezüglich des globalen Klimawandels, wobei diese nunmehr aufgrund verbesserter Klimamodelle und leistungsstärkerer Computer ein höheres Vertrauen besitzen. Höchste Aufmerksamkeit verdienen die Aussagen jedoch zur Geschwindigkeit des Klimawandels. So wird für das Jahr 2030 davon ausgegangen, dass die mittlere globale Temperatur schon um 1,5 Grad angestiegen sein könnte und damit 10 Jahre früher als noch im 5. AR angenommen wurde. Zum Vergleich wird daraufhin gewiesen, dass in Deutschland nach Erkenntnissen des DWD die Erwärmung inzwischen bei 1,6 °C gegenüber dem Jahr 1881 liegt. Damit hat sich das Klima in Deutschland schon mehr erwärmt als im weltweiten Durchschnitt. Grundsätzlich gilt jedoch, dass der Temperaturanstieg über Land generell stärker ausgeprägt als im weltweiten Mittel, so dass diese Aussage für viele Länder gilt (Kasper et al., 2020).

Der beschleunigte Temperaturanstieg macht es erforderlich, dass die Maßnahmen zur deutlichen Emissionsminderung von Treibhausgasen sehr viel schneller durchgeführt werden müssen. Dies gilt auch für Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel und damit auch für die Anlagensicherheit. Bislang wurde die Berücksichtigung eines Klimaanpassungsfaktors in der TRAS 310 für das Jahr 2050 vorgesehen, was vor dem Hintergrund der Erkenntnisse des IPCC als zu spät erscheint.

5 Prüfung der Fortentwicklung des Standes der Technik in Bezug auf Risikomanagement sowie Vorkehrungen und Maßnahmen gegen die betrachteten Gefahrenquellen

In diesem Kapitel werden die Fortentwicklungen des Standes der Technik für folgende Bereiche dargestellt:

1. Rechtliche Vorgaben nach Wasserhaushaltsgesetz (§ 78b und c WHG)
 - baurechtliche Anforderungen in Risikogebieten
 - Anforderungen an Heizölverbraucheranlagen in Risikogebieten
2. Stand der Technik zum Risikomanagement gegenüber umgebungsbedingten Gefahrenquellen
3. Tools zur Gefahrenanalyse
 - Gefährdungsabschätzung durch windbedingte Projektile
 - Risikoanalyse für Chemikalienbehälter bei Hitzewellen und Sonneneinstrahlung
 - Niederschlags-/Abflussberechnungen für Starkniederschläge

5.1 Wasserrechtliche Anforderungen zum vorbeugenden Hochwasserschutz und Schlussfolgerungen für Störfallanlagen

Im Verlauf der erstmaligen Erarbeitung der TRAS 310 wurde schnell deutlich, dass gemäß § 3 der StörfallV Hochwasser (incl. Sturzfluten, Überflutungen) zu den umgebungsbedingten Gefahrenquellen gehört, gegen die im Rahmen der „Allgemeinen Betreiberpflichten“ vom Betreiber Vorkehrungen und Maßnahmen zu treffen sind (Hochwasserschutz); über die Konsequenzen, wenn staatlicher Hochwasserschutz nicht dem Stand der Technik entspricht und über den räumlichen Bezug dieser Pflicht, wurde jedoch intensiv diskutiert.

Bei allen Beteiligten war die Pflicht zum Hochwasserschutz im Bereich von Überschwemmungsgebieten bzw. unmittelbar am Rand eines Gewässers unbestritten. Eine kontroverse Debatte wurde jedoch über die Pflicht zum vorbeugenden Hochwasserschutz für Betriebsbereiche und Anlagen geführt, die hinter einer öffentlichen Hochwasserschutzanlage, wie z.B. einem Deich, angesiedelt sind.

Umstritten war darüber hinaus, ob Betreiber zu eigenem Hochwasserschutz verpflichtet sind, wenn bei Hochwasserschutzanlagen die Bemessung oder der Zustand nicht (mehr) dem Stand der Technik entspricht. Hier wurde von Seiten der Betreiber von Betriebsbereichen auf den Hochwasserschutz als gesellschaftliche Aufgabe verwiesen, die von den Ländern wahrzunehmen sei.

Offen war seinerzeit (2011) auch, ob die Betreiberpflichten auch dann greifen, wenn von einem Hochwasser die Bemessung der Hochwasserschutzanlagen überschritten wird, wie z.B. durch Hochwasser mit sehr niedriger Wahrscheinlichkeit. Dies betraf insbesondere Betriebsbereiche in Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten.

5.1.1 Allgemeine Sorgfaltspflichten nach § 5 Abs. 2 WHG

Bezüglich der Verantwortlichkeit für den Hochwasserschutz ist in § 5 Abs. 2 WHG „Allgemeine Sorgfaltspflichten“ nunmehr festgelegt:

Jede Person, die durch Hochwasser betroffen sein kann, ist im Rahmen des ihr Möglichen und Zumutbaren verpflichtet, geeignete Vorsorgemaßnahmen zum Schutz vor nachteiligen Hochwasserfolgen und zur Schadensminderung zu treffen, insbesondere die Nutzung von Grundstücken den möglichen nachteiligen Folgen für Mensch, Umwelt oder Sachwerte durch Hochwasser anzupassen.

§ 5 Abs. 2 WHG verlangt von jeder Person, die durch Hochwasser betroffen sein kann, „geeignete Vorsorgemaßnahmen.“ Hiermit wird klargestellt, dass jede Person, die durch Hochwasser betroffen werden kann, eine Eigenverantwortung trägt und somit im Rahmen ihrer Möglichkeiten geeignete Vorsorgemaßnahmen gegenüber Hochwasserfolgen zu treffen hat. Dies bedeutet, dass sie sich nicht allein auf staatliche Schutzvorkehrungen verlassen kann, sondern ihren persönlichen Beitrag zum Hochwasserschutz leisten muss. Dieser Grundsatz gilt konsequenterweise auch für die Betreiber von Anlagen mit Gefahrstoffen und von Betriebsbereichen. Allerdings ist damit noch nicht geregelt, ob hinter einem Deich, der nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik errichtet wurde und betrieben wird, eine Betroffenheit gegenüber Hochwasser überhaupt gegeben ist.

Die „Jedermannspflicht“ des § 5 Abs. 2 WHG wird durch das Korrektiv des Möglichen und Zumutbaren eingeschränkt. Durch die Formulierung wird klargestellt, dass die auf Grund der Bedeutung des Hochwasserschutzes absichtlich weit und offen gefasste Pflicht in diesem Rahmen im besonderen Maße dem Grundsatz der Verhältnismäßigkeit unterliegt.

In § 5 Abs. 2 WHG wird nicht gesagt, wer als vom Hochwasser betroffen anzusehen ist. Dies ergibt sich vielmehr aus den übrigen Vorschriften zum vorbeugenden Hochwasserschutz, wobei aus der Schadensminderungspflicht des § 5 Abs. 2 WHG eine Verpflichtung zur aktiven Informationsbeschaffenheit abzuleiten ist, mit der sich der Einzelne über seine Betroffenheit bei Hochwasser Gewissheit beschaffen kann.

5.1.2 Neue Anforderungen in Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten

Konkrete Anforderung in Form von Verboten bestehen schon seit 2009 für festgesetzte Überschwemmungsgebiete. In diesen ist nach § 78 Abs. 1 WHG die Ausweisung von neuen Baugebieten im Außenbereich und nach § 78 Abs. 4 WHG die Errichtung oder Erweiterung baulicher Anlagen untersagt. Weitere Verbote ergeben sich aus § 78a WHG. Darüber hinaus wurden in § 78 Abs. 2 WHG die Bedingungen für Ausnahmen von dem grundsätzlichen Verbot der Ausweisung von neuen Baugebieten im Außenbereich festgelegt, deren Zulassung von den zuständigen Behörden zu prüfen und zu entscheiden ist.

Erst seit der Einführung des § 78b WHG im Jahr 2017 werden auch Anforderungen an Risikogebiete gestellt. Dies sind Gebiete, die durch Überspülung von Deichen oder durch Deichversagen überschwemmt werden können. Eine mögliche Ursache hierfür sind Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit oder Extremereignisse (vgl. § 74 Abs. 2 WHG). Die Kartierung der Risikogebiete ist in den Bundesländern weitgehend abgeschlossen. Die Risikokarten sind bei den zuständigen Behörden sowie im Internet verfügbar (vgl. **Abbildung 22**).

Abbildung 22: Beispiel einer Kartierung von Überschwemmungsgebieten und Risikogebieten



Quelle: NLWKN

Die Einführung des § 78b erfolgte vor dem Hintergrund der Erfahrungen aus verschiedenen Hochwasserereignissen, bei denen große Schäden in Gebieten außerhalb der festgesetzten Überschwemmungsgebiete auftraten. Ursache waren Ereignisse, die statistisch weniger als einmal in 100 Jahren auftraten ($HQ > HQ_{100}$). Daher wurden vom Gesetzgeber Rechtsgrundlagen geschaffen, die einen vorbeugenden Hochwasserschutz auch in Risikogebieten fordern. Im Einzelnen wurden folgende Anforderungen in § 78b WHG festgelegt:

Für Risikogebiete außerhalb von Überschwemmungsgebieten gilt Folgendes:

1. bei der Ausweisung neuer Baugebiete im Außenbereich sowie bei der Aufstellung, Änderung oder Ergänzung von Bauleitplänen für nach § 30 Absatz 1 und 2 oder nach § 34 des Baugesetzbuches zu beurteilende Gebiete sind insbesondere der Schutz von Leben und Gesundheit und die Vermeidung erheblicher Sachschäden in der Abwägung nach § 1 Absatz 7 des Baugesetzbuches zu berücksichtigen; dies gilt für Satzungen nach § 34 Absatz 4 und § 35 Absatz 6 des Baugesetzbuches entsprechend;

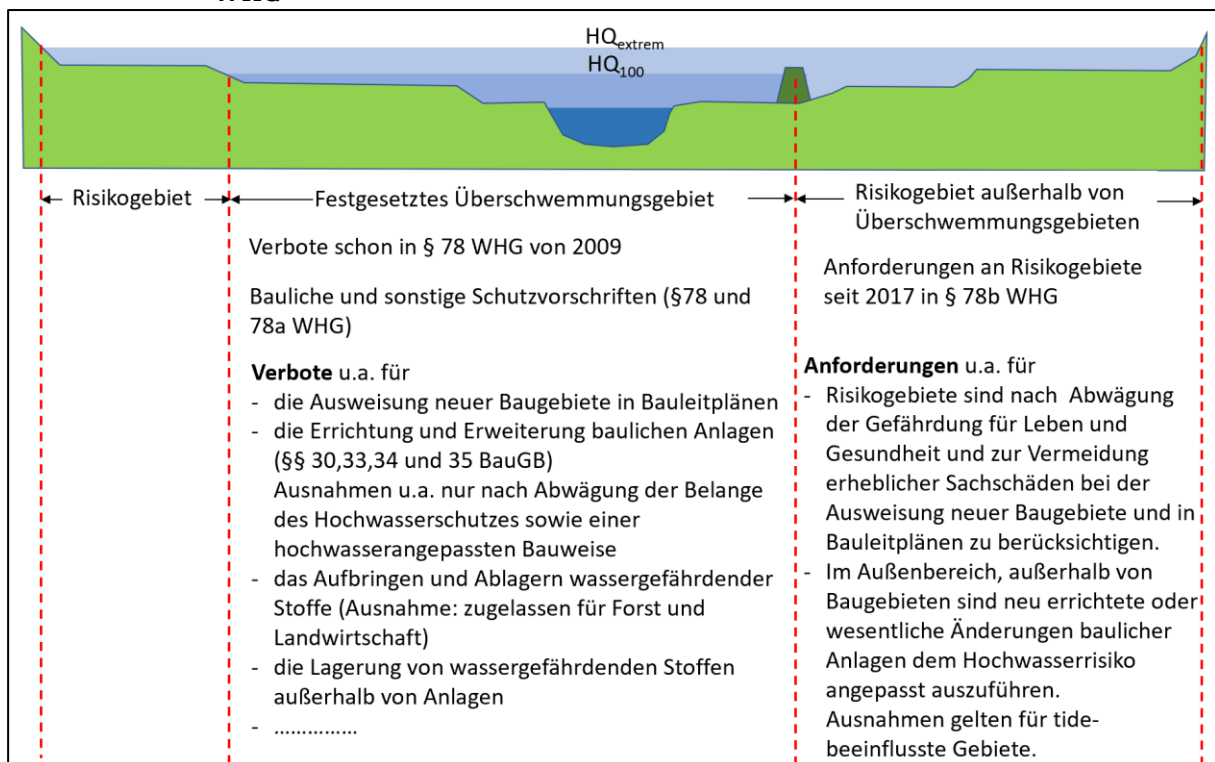
2. außerhalb der von Nummer 1 erfassten Gebiete sollen bauliche Anlagen nur in einer dem jeweiligen Hochwasserrisiko angepassten Bauweise nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik errichtet oder wesentlich erweitert werden, soweit eine solche Bauweise nach Art und Funktion der Anlage technisch möglich ist; bei den Anforderungen an die Bauweise sollen auch die Lage des betroffenen Grundstücks und die Höhe des möglichen Schadens angemessen berücksichtigt werden.

Für die Risikogebiete werden somit keine Verbote wie bei den festgesetzten Überschwemmungsgebieten ausgesprochen, sondern es werden risikoangepasste Vorsorgemaßnahmen gefordert. Die hochwasserangepasste Bauweise für neu errichtete oder wesentlich erweiterte bauliche Anlagen außerhalb von Baugebieten wurde als „Soll“-Vorschrift formuliert, weshalb ein Verzicht auf eine hochwasserangepasste Bauweise zu begründen ist (Sieder, Zeitler, Dahme und Knopp, 2021). Damit wird auch der Bauherr mit in die Verantwortung zum Hochwasserschutz genommen und kann sich nicht auf die Verantwortung der Behörden zurückziehen (vgl. § 5 Abs. 2 WHG).

Die hochwasserangepasste Bauweise nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik ist eine Vorsorgemaßnahme zur Verhinderung von Gefahren. Demgegenüber stehen Notfallmaßnahmen, wie z.B. der Einsatz von Sandsäcken, die zur Gefahrenabwehr eingesetzt werden können. Derartige Notfallmaßnahmen erfüllen die Forderung nach § 78b Abs. 2 WHG nach einer hochwasserangepassten Bauweise nicht.

Die wichtigsten Anforderungen für Überschwemmungs- und Risikogebiete sind in **Abbildung 23** als Übersicht zusammengestellt.

Abbildung 23: Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen für die Ausweisung neuer Baugebiete und an die Aufstellung von Bauleitplänen in Überschwemmungs- und Risikogebieten nach § 78b WHG



Quelle:K.-E. Köppke

5.1.3 Regelungen betreffend Heizölverbraucheranlagen

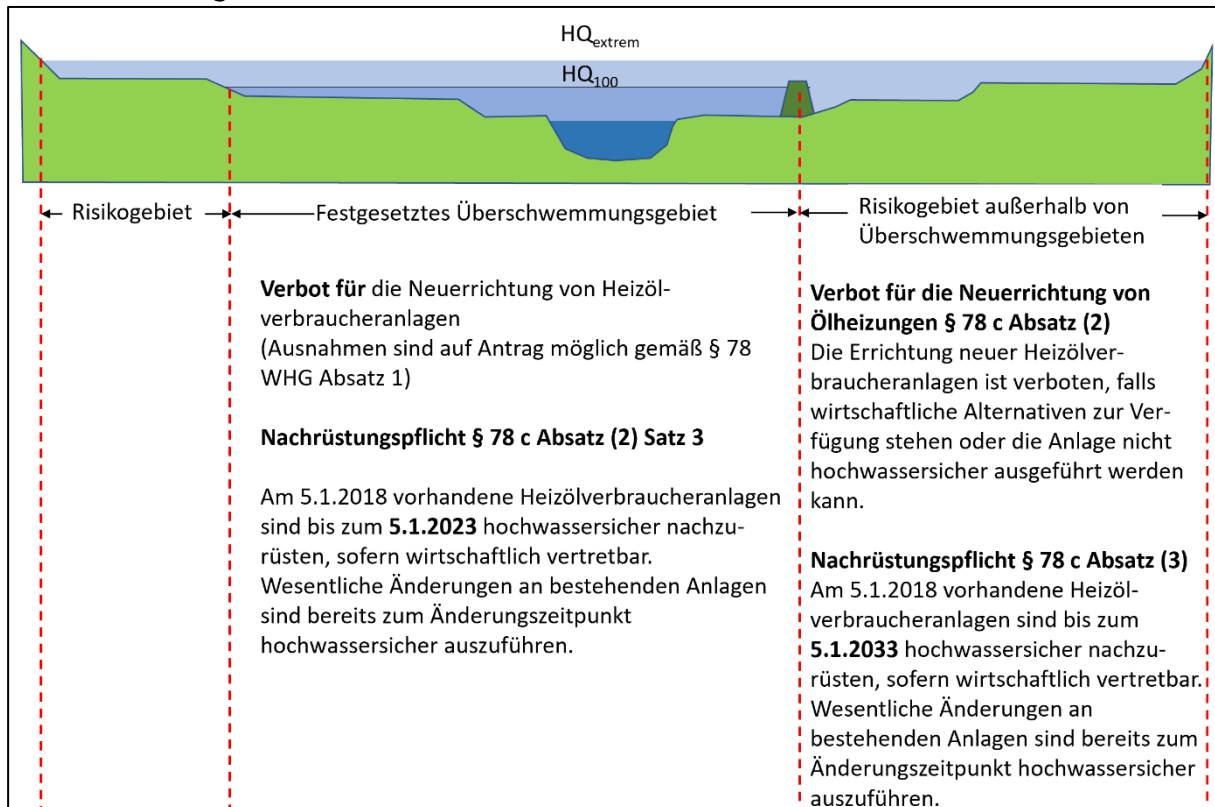
Die Errichtung neuer Heizölverbraucheranlagen in festgesetzten und vorläufig gesicherten Überschwemmungsgebieten ist nach § 78c Abs.1 verboten. Die zuständige Behörde kann auf Antrag Ausnahmen von dem Verbot nach Satz 1 zulassen, wenn keine anderen weniger wassergefährdenden Energieträger zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten zur Verfügung stehen und die Heizölverbraucheranlage hochwassersicher errichtet wird. Eine Nachrüstung für bestehende Anlagen zur Sicherung gegenüber Hochwasser muss bis 5.1.2023 erfolgt sein, sofern dies wirtschaftlich vertretbar ist.

Nach § 78c Abs. 2 ist die Errichtung neuer Heizölverbraucheranlagen in Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten verboten, wenn andere weniger wassergefährdende Energieträger zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten zur Verfügung stehen oder die Anlage nicht hochwassersicher errichtet werden kann. Heizölverbraucheranlagen, die am 5. Januar 2018 in Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten vorhanden sind, sind bis zum

5. Januar 2033 nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik hochwassersicher nachzurüsten, soweit dies wirtschaftlich vertretbar ist.

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Bestimmungen für Heizölverbraucheranlagen zeigt **Abbildung 24**.

Abbildung 24: Zusammenfassung der wichtigsten Anforderungen für Heizölverbraucheranlagen in Überschwemmungs- und Risikogebieten nach § 78c WHG



Quelle: K.-E. Köpke

5.2 Stand der Technik des Risikomanagements

Ereignisse und Störfälle mit Auswirkungen auf Beschäftigte, Umwelt oder Nachbarschaft können von verfahrenstechnischen Anlagen bzw. Betriebsbereichen verursacht werden. Ausgelöst werden Störfälle i.d.R. durch

1. technische Fehler oder technisches Versagen,
2. menschliche Fehler wie Auslegungsfehler, Bedienungsfehler bis interorganisationales Versagen oder
3. umgebungsbedingte Gefahrenquellen, einschließlich Naturgefahren, wie Hochwasser Starkniederschläge, Erdbeben usw.,

mit der Folge einer Freisetzung von gefährlichen Stoffen, einem Brand oder einer Explosion.

Eine umfangreiche Darstellung verschiedener Methoden zur Gefahrenermittlung und Gefahrenbewertung hat die Sektion für Prävention in der chemischen Industrie als Teil der Internationalen Vereinigung für Soziale Sicherheit (IVSS) herausgegeben (IVSS, 2012). Hierbei handelt es sich um in der Praxis bewährte Methoden, auf die an dieser Stelle nur verwiesen wird. In den folgenden Kapiteln werden weitere Verfahren zum Natech-Risikomanagement

vorgestellt, die sich speziell mit umgebungsbedingten Gefahrenquellen beschäftigen. Ergänzt werden die Darstellungen durch aktuelle Beispiele.

Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob ein vergangenes Ereignis systematisch analysiert werden soll, um Fehler zu erkennen und abzustellen oder ob die Anlagensicherheit für ein zukünftiges Ereignis bestimmter Intensität überprüft werden soll. Einzelne Managementmethoden sind aber auch für beide Zielsetzungen anwendbar (z.B. Bow-Tie-Methode).

5.2.1 Natech-Risikomanagementmethoden zur systematischen, methodischen Analyse eines vergangenen Ereignisses

Zur Ereignisanalyse werden verschiedene Methoden eingesetzt, bei denen die Ursachen und Folgewirkungen für ein Ereignis, einschließlich eines Störfalles, ermittelt werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens des Umweltbundesamtes (UBA) „Ausarbeitung von Arbeitshilfen zur methodischen Ereignisanalyse und Ergebnisauswertung zur Fortschreibung des Standes der Technik“ (Fahlbruch, 2017) wurden die Verfahren „Change Analysis“, „SOL 3.0“ and „Storybuilder/BowTie“ für den Erfüllung der behördlichen Pflichten, die international in der Seveso-III-Richtlinie (Artikel 17) und national in der StörfallV festgeschrieben sind, ausgewählt, um deren Praxistauglichkeit zu überprüfen. Eine systematische Aufarbeitung vergangener Störfälle findet sich darüber hinaus im Bericht des Umweltbundesamtes „Umfassende systematische Auswertung von Störfällen und sonstigen Ereignissen in industriellen Anlagen, insbesondere mit Auswirkungen auf die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft“ (Fahlbruch, 2021).

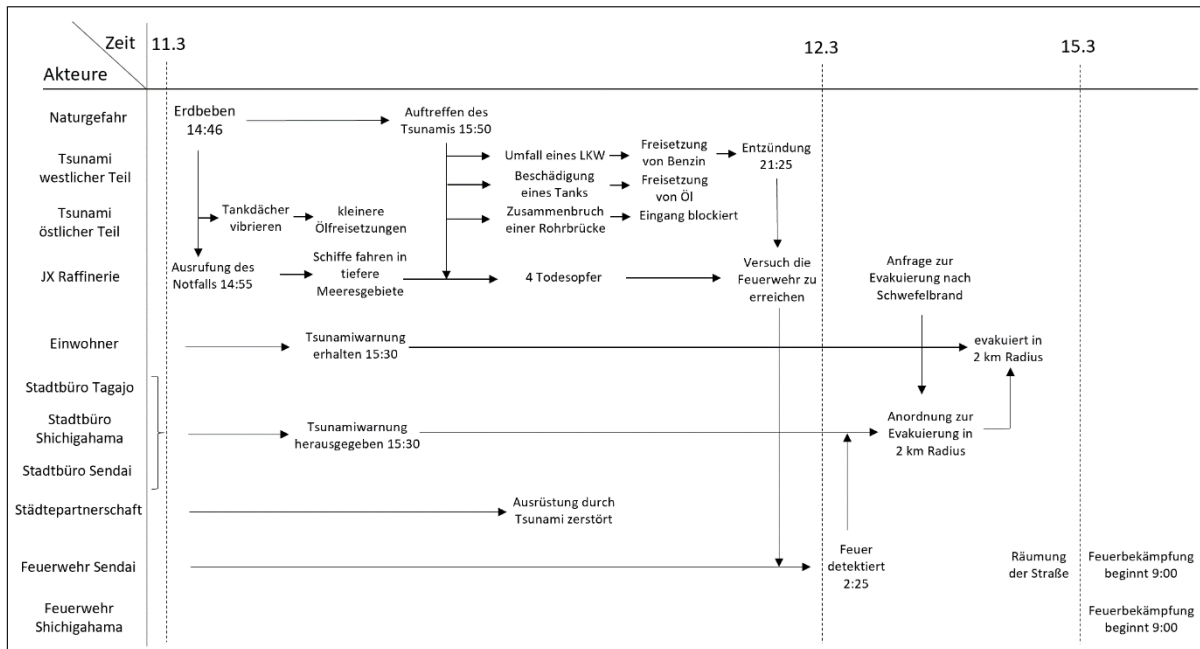
Grundsätzlich haben sich Charts, um zuerst die Abläufe vor, während und nach dem „Top-Ereignis“ visuell darzustellen, als geeignet herausgestellt. Auf diesen Abläufen basiert dann die eigentliche Ereignisanalyse.

Die für technische oder menschliche Fehler konzipierten Ereignisanalyseverfahren können grundsätzlich auch für die Analyse von Ereignissen mit Beteiligung von natürlichen Gefahrenquellen genutzt werden. Um dies zu verdeutlichen, werden für Störfälle, die durch Naturgefahren (Erdbeben und Hochwasser) ausgelöst wurden, die folgenden Methoden einer Ereignisanalyse an dieser Stelle kurz beschrieben:

STEP-Analyse (Sequential timed events plotting)

Bei der STEP-Methode wird die Chronologie eines Unfalls auf einer Zeitachse (X-Achse) aufgetragen. Die Zeitachse in STEP muss keiner definierten Zeitskala folgen und kann somit Ereignisse, die tagelang andauern, in einem Diagramm festhalten. Die Ereignisse werden in Zeilen angeordnet, weil damit ihnen Akteure auf der y-Achse zugeordnet werden können. Auf diese Weise wird die Geschichte eines Ereignisses dargestellt, um hieraus Schlussfolgerungen für Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten. In **Abbildung 25** sind die Ereignisse, die sich in der Raffinerie JX im Sendai Industriepark (Japan) nach dem Erdbeben mit dem hierdurch ausgelösten Tsunami im Jahr 2011 abspielten, dargestellt.

Abbildung 25: STEP-Analyse für die Raffinerie JX in Japan als Folge des Erdbebens im Jahr 2011



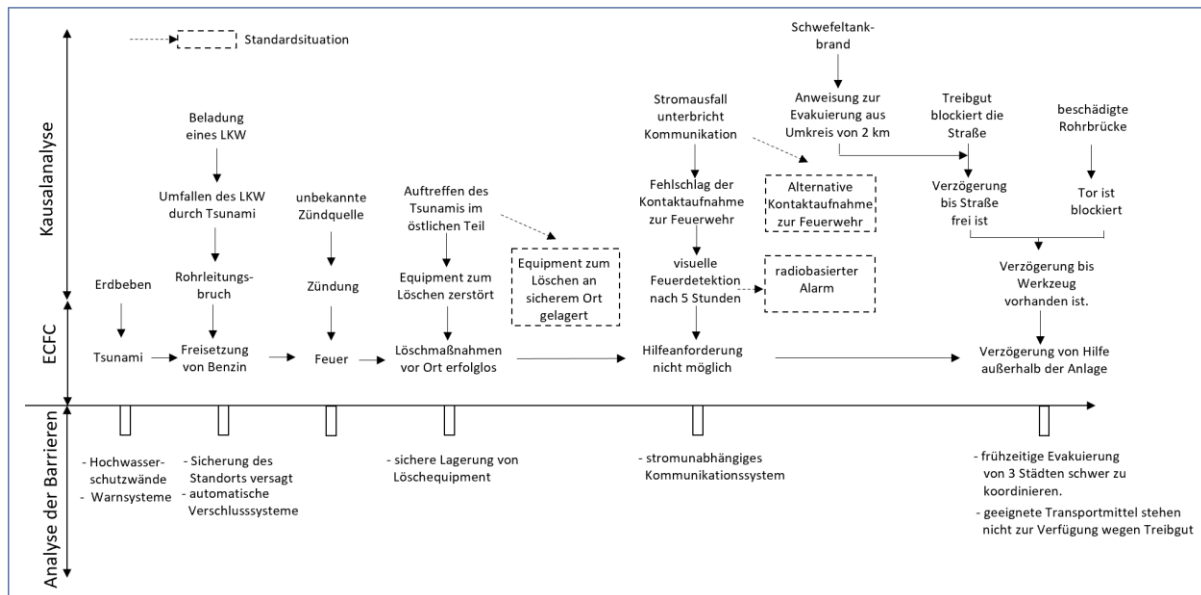
Quelle in Anlehnung an Chakraborty et al., (2018)

Ohne im Detail auf den Ereignisablauf einzugehen, verdeutlicht die Abbildung 25, dass der Ablauf eines Ereignisses nachvollziehbar wird, jedoch Barrieren zur Vermeidung des Störfalls und Verminderung der Störfallauswirkungen noch nicht betrachtet werden. Gleichwohl bietet die STEP-Analyse eine brauchbare Grundlage für eine detaillierte Betrachtung, die z.B. mit Hilfe der nachfolgend beschriebenen MTO-Analyse oder auch der Bow-Tie-Methode erfolgen kann.

MTO-Analyse (Mensch, Technik, Organisation)

Bei der MTO-Methode werden menschliche, organisatorische und technische Faktoren gleichermaßen berücksichtigt. **Abbildung 26** zeigt das MTO-Arbeitsblatt für den JX-Raffinerieunfall (vgl. Abbildung 25), das aus drei Ebenen besteht und drei verschiedene Methoden verwendet. Die Basis- und die erste Ebene werden in der Mitte mithilfe der Ereignis- und Kausalfaktorcharts (ECFC) dargestellt. In ECFC wurden die Ereignisse beginnend mit dem Tsunami (Hauptauslöser) aufgezeichnet, gefolgt von den nachfolgenden Ereignissen (Chakraborty et al., 2017). Die Kausalanalyse ist die zweite Ebene, die über der ersten Ebene dargestellt wird. Ähnlich wie bei einer Fehlerbaumanalyse werden die Ereignisse auf ihre Grundursache zurückgeführt und bei jeder Fehlersituation wird die Standardsituation hervorgehoben. Die dritte Ebene, die unter der ersten dargestellt ist, ist die Barriereanalyse. Für jedes Ereignis in der ECFC-Sequenz werden Barrieren aufgelistet, die das Auftreten des Ereignisses hätten verhindern können.

Abbildung 26: MTO-Analyse für die Raffinerie JX in Japan als Folge des Erdbebens im Jahr 2011



Quelle: in Anlehnung an Chakraborty et al., 2017

Eine Untersuchung der Eignung methodischer Ereignisanalyseverfahren für die Analyse von Störfällen ausgelöst durch natürliche Gefahrenquellen wäre hilfreich, um Anpassungen und spezielle Entwicklungen vornehmen zu können.

5.2.2 Natech-Risikomanagementmethoden zur vorausschauenden Störfallanalyse

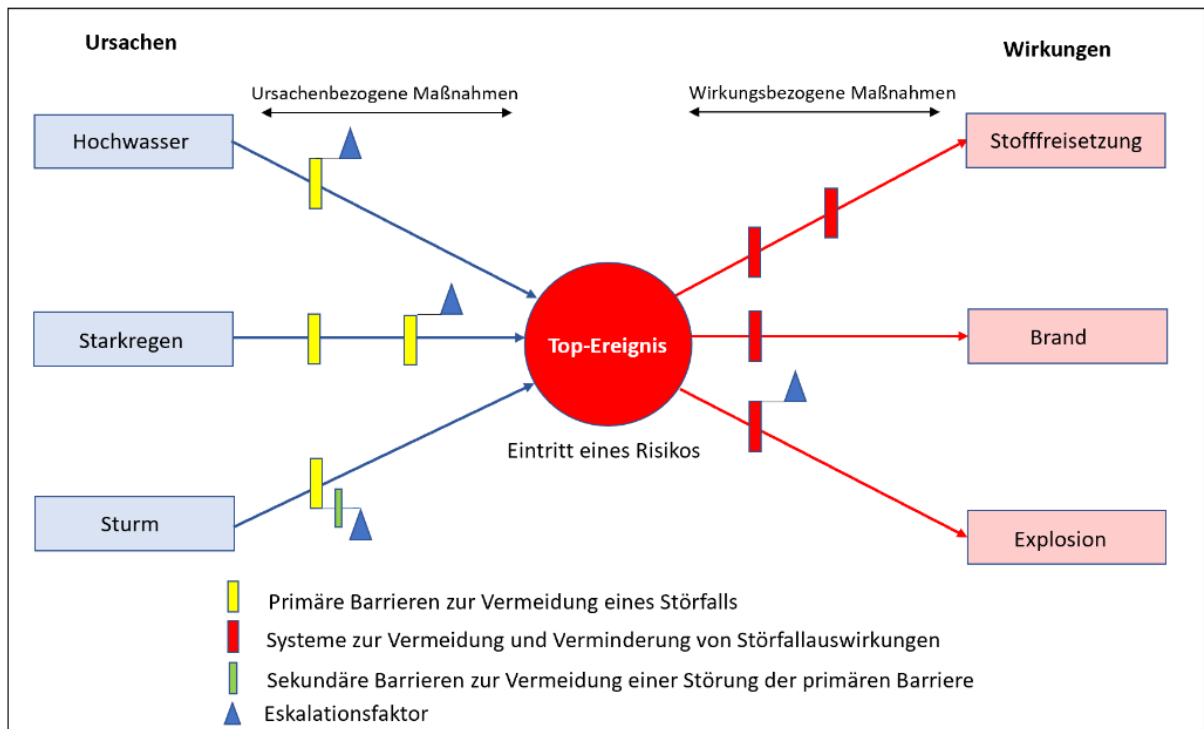
5.2.2.1 Bow-Tie-Methode

Die Bow-Tie-Analyse ist eine grafische Methode, mit der eine logische Beziehung zwischen den Ursachen, Auslösern und den Folgen eines unerwünschten Ereignisses dargestellt wird (Cozzani, 2012). Mit dieser Methode können Schwachpunkte für die Betriebssicherheit einer Anlage sowie die möglichen schädlichen Wirkungen im Fall eines Störfalls identifiziert werden. Bei der Risikoanalyse gegenüber umgebungsbedingten Gefahrenquellen müssen alle nicht auszuschließenden Naturgefahren betrachtet werden, die innerhalb und außerhalb der Anlage auftreten können. Auf dieser Grundlage können Maßnahmen (Barrieren) zur Risikoverminderung entwickelt werden. Grundsätzlich eignet sich diese Methode jedoch auch, um vergangene Ereignisse systematisch aufzuarbeiten.

Die in der **Abbildung 27** illustrierte Bow-Tie-Methode hat die Form einer Fliege. Dabei werden auf dem linken Teil der Fliege die Ursachen und Auslöser, also hier die umgebungsbedingten Gefahrenquellen, betrachtet. In der Mitte der Fliege wird das „TOP-Ereignis“ definiert. Auf der rechten Seite sind die Maßnahmen zur Auswirkungsbegrenzung und die Folgen dargestellt.

Der erste Schritt beim Erstellen eines Bow-Tie-Diagramms ist die Identifikation des Top-Ereignisses. Dieses steht im Zentrum des Bow-Tie-Diagramms und stellt die Situation dar, bei der noch keine nachteiligen Folgen aufgetreten sind, die Kontrolle über den Prozess jedoch schon verloren gegangen ist. Ein Top-Ereignis kann durch eine oder mehrere Bedrohungen ausgelöst werden. Bedrohungen befinden sich im Bow-Tie-Diagramm auf der linken Seite. Das Top-Ereignis führt zu einer Reihe von Konsequenzen, die auf der rechten Seite des Diagramms angeordnet sind.

Abbildung 27: Die Bow-Tie-Methode angewandt auf umgebungsbedingte Gefahrenquellen (Naturgefahren)



Quelle: K.-E. Köpke

Das Bow-Tie-Diagramm kann anschließend durch die Verbindung zweier etablierter Risikoanalysewerkzeuge detailliert ausgearbeitet werden. Dies sind die Fehler- und die Ereignisbaumanalyse. Fehlerbäume zeigen alle Möglichkeiten auf, wie es zu einem Ereignis kommen kann. Ereignisbäume funktionieren umgekehrt. Sie beginnen mit einem einzelnen Ereignis und modellieren, welche Konsequenzen sich daraus ergeben können. Im Bow-Tie-Diagramm werden Fehler- und Ereignisbaum zusammengeführt, so dass im Diagramm Ursachen und Konsequenzen um ein zentrales Ereignis dargestellt werden.

Der nächste Schritt beinhaltet die Ermittlung vorbeugender Hindernisse. Dies sind Barrieren, die bereits auf dem Weg der Bedrohungen vorhanden sind, um deren Auslösung zu verhindern sowie um Schutzbarrieren zur Vermeidung und Verminderung von Störfallauswirkungen. Vorbeugende Barrieren befinden sich auf der linken Seite des Modells und Schutzbarrieren auf der rechten Seite des Modells.

Anschließend sind die Eskalationsfaktoren zu ermitteln, die zu einem erhöhten Risiko führen können, indem die Wirksamkeit der verfügbaren Hindernisse eingeschränkt oder sogar blockiert wird. Daher müssen im nächsten Schritt die verfügbaren Mechanismen zur Kontrolle von Fehlfunktionen der primären Barriere identifiziert werden (sekundäre Barrieren). Ein vollständiges Bow-Tie-Diagramm stellt ein mögliches Szenario dar, bei dem alle Bedrohungs- und Eskalationspfade einschließlich aller Barrieren dargestellt sind.

Die **Abbildungen 28** und **29** zeigen am Beispiel des Top-Ereignisses „Überschwemmung eines Betriebsbereichs“ mögliche Ursachen der Gefährdung des Betriebsbereichs (Abbildung 28) sowie die Folgen bzw. Eskalationspfade (Abbildung 29).

Abbildung 28: Beispielanalyse der potentiellen Ursachen für die Überschwemmung eines Betriebsbereiches (Fehleranalyse)

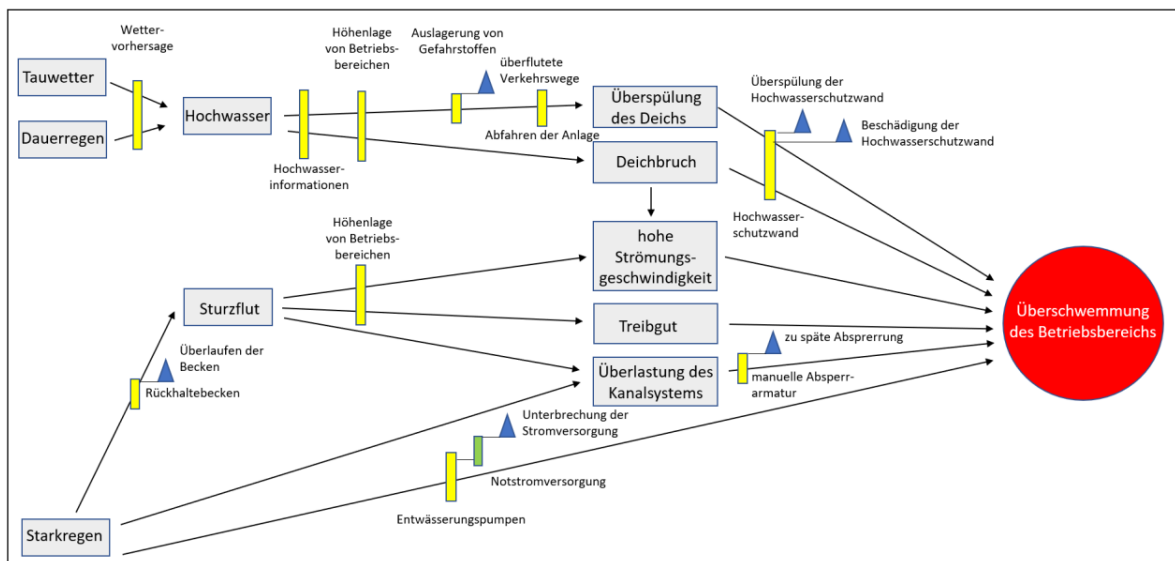
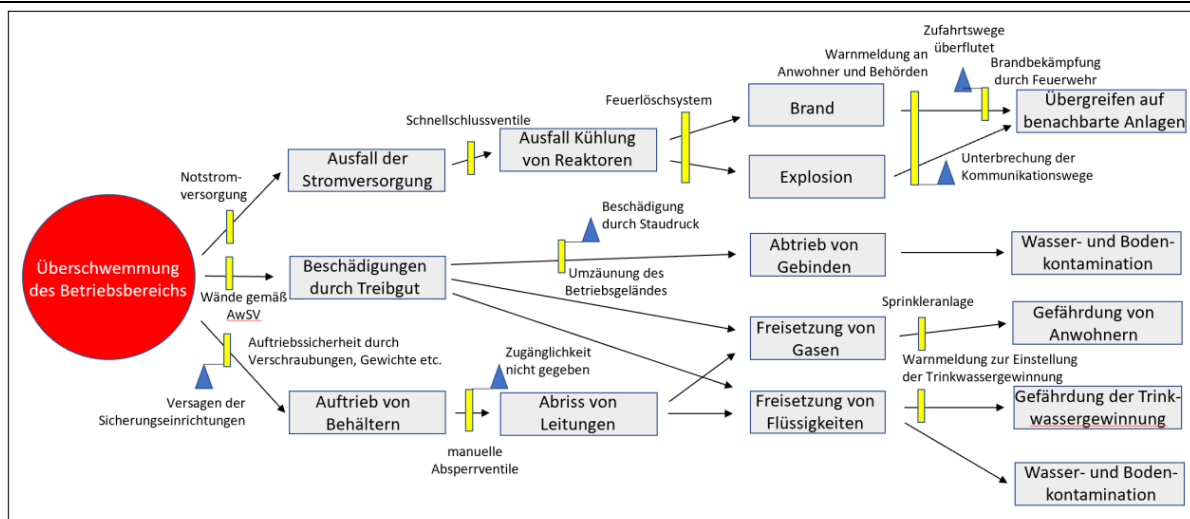


Abbildung 29: Beispielanalyse der Folgen einer Überschwemmung des Betriebsbereichs (Ereignisbaumanalyse)



Quelle: K.-E. Köppke

Die Abbildung 28 und 29 verdeutlichen, dass nicht nur technische, sondern auch menschliche Faktoren erfasst werden können. Dies wird am Beispiel eines manuellen Absperrentils ersichtlich, bei dem das Risiko besteht, dass es zu spät verschlossen wird (Abbildung 29).

Auf der Grundlage der Risikoanalyse mit Hilfe der Bow-Tie-Methode muss anschließend geprüft werden, ob zusätzliche Barrieren erforderlich sind sowie vorhandene Barrieren an die zukünftigen Intensitäten der Naturgefahren, die durch den Klimawandel beeinflusst werden, anzupassen sind. Auch organisatorische Maßnahmen sind kritisch zu hinterfragen. Hierzu zählt zum Beispiel die Schulung und die Durchführung von Übungen für einen Ereignisfall.

Die Bow-Tie-Methode umfasst analog zur Methode, die in den TRAS 310 und 320 vorgeschlagen wird, alle Aspekte eines umfassenden Natech-Risikomanagements. Der Vorteil liegt in der visuellen Darstellung und damit der leichten Nachvollziehbarkeit der potentiellen Risiken.

Als Schwachpunkte des Verfahrens wird diskutiert, dass es gerade bei Störfällen von verfahrenstechnischen Anlagen nicht nur ein „Top-Ereignis“ geben kann. Mehrere „Top-Ereignisse“ sind möglich oder ein zeitlich lang andauerndes Ereignis. Auch sind die einzelnen Ursachen, Auslöser und Barrieren sowie Begrenzungsmaßnahmen und Folgen ggf. nicht so isoliert, wie es das Bild darstellt, denn sie können interagieren.

5.2.2.2 Technische Regel für Anlagensicherheit TRAS 310 und TRAS 320

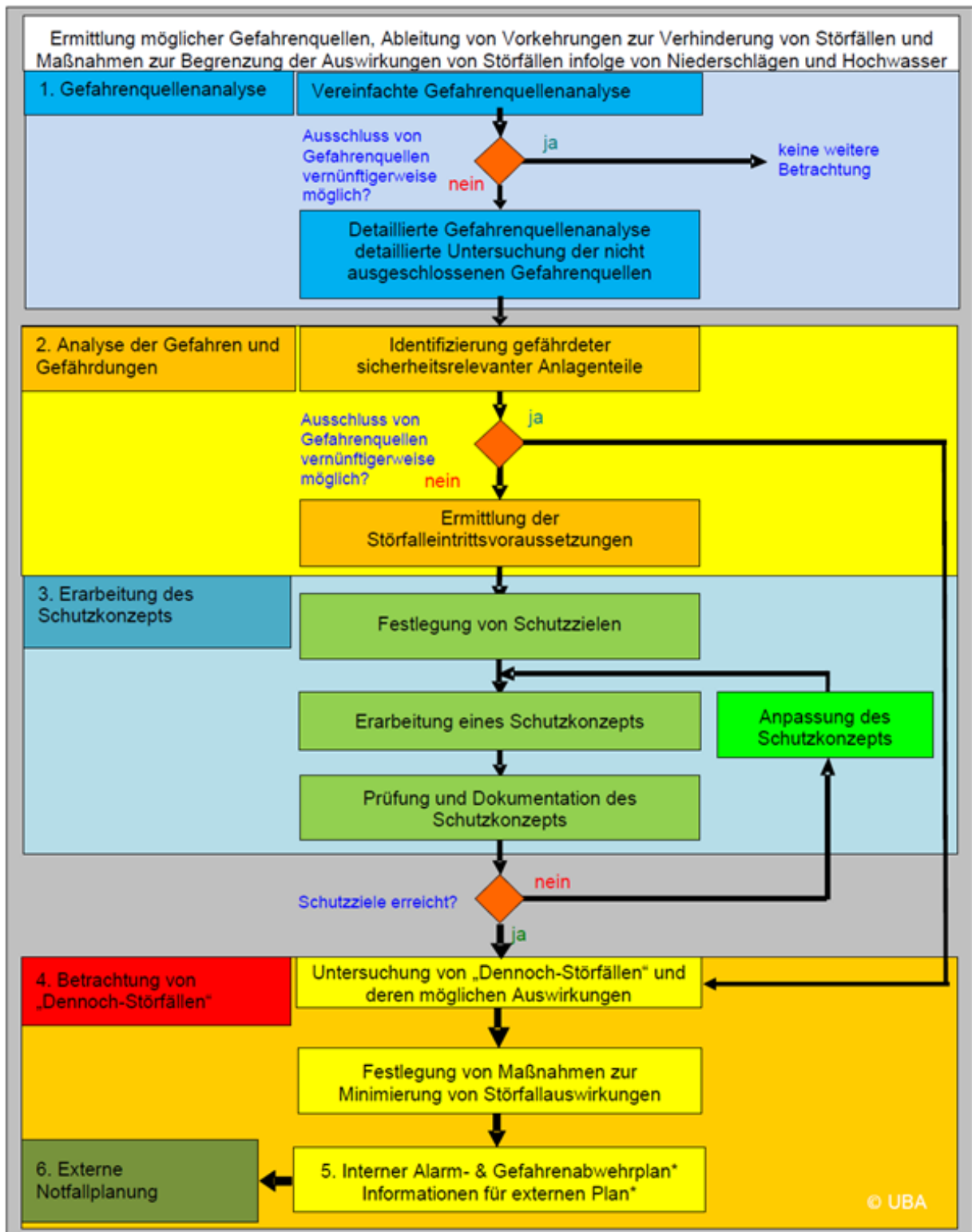
Die methodische Vorgehensweise der TRAS 310 und 320 sind ausführlich in den Technischen Regel selbst und in den jeweiligen „Hinweisen und Erläuterungen“ dargestellt. Daher werden an dieser Stelle nur die wesentlichen fünf Elemente noch einmal kurz vorgestellt, die in **Abbildung 30** detaillierter abgebildet sind.

Das Risikomanagement nach der TRAS 310 beinhaltet folgende fünf Schritte:

1. *Gefahrenquellenanalyse, als Beschreibung der verschiedenen Gefahrenquellen, deren mögliches Auftreten und den daraus resultierenden Zuständen, Ereignissen und deren Folgen,*
2. *Analyse der Gefahren und Gefährdungen, in der geprüft wird, ob und wie durch Einwirkungen auf den gesamten Betriebsbereich, SRB und SRA Gefahren und Störfälle auftreten können,*
3. *Erstellung eines Schutzkonzepts, in dem Vorkehrungen zur Störfallverhinderung festgelegt werden,*
4. *Betrachtung von „Dennoch- Störfällen“, durch die Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Dennoch-Störfällen und Grundlagen für die externe Notfallplanung festgelegt werden.*
5. *Gefahrenabwehrplanung Erstellung eines internen Alarm- und Gefahrenabwehrplans für Betriebsbereiche der oberen Klasse und externe Gefahren- und Abwehrplanung*

Quelle: Textpassagen in kursiver Schrift sind als Zitat der TRAS 310 entnommen.

Abbildung 30: Methodische Vorgehensweise gemäß TRAS 310



(*sofern erforderlich)

Quelle: TRAS 310

Zu 1. Gefahrenquellenanalyse:

„Ausgangspunkt ist eine Gefahrenquellenanalyse. In der vereinfachten Gefahrenquellenanalyse werden zunächst nur qualitativ die regional möglichen (vernünftigerweise nicht auszuschließenden) Gefahrenquellen am Standort (Betriebsbereich) identifiziert. In der detaillierten Gefahrenquellenanalyse werden weitere Informationen herangezogen, um die möglichen Gefahrenquellen genauer zu analysieren.“

Die Gefahrenquellenanalyse ist das wesentliche, charakteristische Element des Risikomanagementprozesses nach TRAS 310 und 320; das Vorgehen in den nachfolgenden Schritten entspricht einem Vorgehen, wie es bei technischen Gefahrenquellen etabliert ist. Dieser Ansatz soll den Umsetzungsaufwand und Vorbehalte senken.

In der vereinfachten Gefahrenquellenanalyse ist darauf zu achten, dass nur die an einem Standort (Betriebsbereich) belegbar offensichtlich nicht möglichen natürlichen Gefahrenquellen ausgeschlossen werden. Diese könnten als „exzeptionelle Gefahrenquellen“ bezeichnet werden. Es ist darauf zu achten, dass der Klimawandel natürliche Gefahrenquellen wirksam werden lassen kann, die an einem Standort bisher unbekannt sind oder historische probabilistische Daten weder die gegenwärtigen noch die zukünftigen Eintrittshäufigkeiten treffend beschreiben können, da sie Veränderungen aufgrund des Klimawandels nicht abbilden.

Können bestimmte Naturgefahren nicht offensichtlich ausgeschlossen werden, sind sie einer detaillierten Gefahrenquellenanalyse zu unterziehen. Hierzu sind die Intensitäten und Häufigkeiten der jeweiligen Naturgefahr am Standort zu ermitteln. Datenbanken und Gefahrenkarten sind dabei wichtige Hilfsmittel, deren Darstellungsinhalte genau zu beachten sind. Insbesondere die neueren Karten über Starkregen und Sturzfluten sind von hoher Bedeutung für Standorte, weichen jedoch untereinander im Darstellungsinhalt deutlich ab.

Zu 2. Analyse der Gefahren und Gefährdungen:

„Im nächsten Schritt sind die gefährdeten SRB und SRA zu identifizieren.“

Es ist zu prüfen, welche sicherheitsrelevanten Teile eines Betriebsbereichs (SRB) oder Anlagenteile (SRA) durch die zu betrachtende Naturgefahr (z.B. Hochwasser, Starkregen, Orkan) gefährdet werden können. Hierbei ist zu beachten, dass diese von denen zu den technischen Gefahrenquellen gehörenden SRB und SRA abweichen können. Z.B. ist es möglich, dass sich durch natürliche, umgebungsbedingte Gefahrenquellen gefährdete SRB oder SRA auch außerhalb eines Betriebsbereichs befinden können. Für alle SRB und SRA sind die Störfalleintrittsvoraussetzungen zu ermitteln. Es ist zu bestimmen, ob die Störfalleintrittsvoraussetzungen durch die Naturgefahren eintreten können und Auslegungswerte erreicht oder überschritten werden. Ergänzend sind die Folgen und Schäden durch entsprechende Störfälle zu ermitteln. Damit sind Störfalleintrittsvoraussetzungen und potenzielle Schadensausmaße bekannt.

Zu 3. Erstellung eines Schutzkonzepts

„Abhängig von der Sicherheitsrelevanz und den möglichen Störfallauswirkungen, sind Schutzziele im Sinne von Auslegungsanforderungen festzulegen und ein Schutzkonzept zu erarbeiten, mit dem die Schutzziele erreicht werden.“

Die Festlegung von Schutzziele bedeutet, dass Ziele definiert werden, inwieweit gegen die Wirkungen, Intensitäten und Häufigkeiten der vernünftigerweise nicht auszuschließenden Gefahrenquellen und -abläufe Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen getroffen werden müssen (Auslegungsvorgaben).

Darauf aufbauend sind die konkreten technischen und organisatorischen Vorkehrungen zu bestimmen, die zur Zielerreichung und Einhaltung erforderlich sind (Auslegung zur Störfallverhinderung). Hierbei sind Besonderheiten der Naturgefahren zu berücksichtigen, z.B. ist es zu bedenken, dass Naturereignisse meist auf mehrere Anlagen gleichzeitig einwirken, wodurch bei Störfällen mehr als die größte zusammenhängende Masse (GZM) an gefährlichen Stoffen beteiligt sein kann. Auch kann die Ausbreitung von Stoffen nicht nur über die Atmosphäre, sondern auch über den Wasserweg erfolgen.

„Danach ist das Schutzkonzept bzgl. seiner Wirksamkeit zu prüfen und zu dokumentieren. Gegebenenfalls ist das Schutzkonzept weiter anzupassen.“ Es ist insbesondere zu prüfen, ob durch die eingesetzten Vorkehrungen die definierten Schutzziele und der Stand der Sicherheitstechnik tatsächlich erreicht wurden. Wenn nicht, dann sind die Vorkehrungen nachzubessern.

Zu 4. Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“:

„Anschließend werden vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen (Dennoch-Störfälle) untersucht, deren Eintreten zwar nicht zu verhindern ist, gegen deren Auswirkungen jedoch unabhängig von den störfallverhindernden Vorkehrungen nach § 3 Absatz 1 StörfallV zusätzliche störfallauswirkungsbegrenzende Maßnahmen nach § 3 Absatz 3 StörfallV zu treffen sind.“ Als Dennoch-Störfälle werden hierbei Störfälle bezeichnet, bei denen die Vorkehrungen zur Störfallverhinderung versagen oder Gefahrenquellen auftreten, die „vernünftigerweise“ ausgeschlossen wurden (Auslegungsüberschreitung oder von neuer Qualität). Für diese Fälle sind vorbeugend Maßnahmen zur Störfallauswirkungsbegrenzung zu ergreifen. „Vernünftigerweise ausgeschlossene Gefahrenquellen“ können in diesem Zusammenhang sowohl solche sein, die auf einer geringeren Häufigkeit (z.B. 500-jährliches statt 100-jährliches Hochwasser) beruhen, als auch solche, die sich qualitativ unterscheiden (z.B. Sturzflut durch Starkniederschlag statt Flusshochwasser). Es ist daher zu prüfen, ob wegen dieser Änderungen auch die zugehörigen Störfallablaufsznarien fortentwickelt werden müssen.

Zu 5. Gefahrenabwehrplanung

Abschließend sind interne und externe Alarm- und Gefahrenabwehrpläne für das Eintreten natürlicher Gefahrenquellen auszuarbeiten oder zu ergänzen (soweit diese gefordert oder vorhanden sind). Hierbei ist auf eine Abstimmung zwischen den Planungen wegen der natürlichen Gefahrenquelle selbst und den sekundären Planungen aufgrund von Störungen am Betriebsbereich aufgrund dieser natürlichen Gefahrenquellen zu achten. Während die Untersuchungen zur Erforderlichkeit von Maßnahmen zur Auswirkungsbegrenzung vorrangig auf anlagenbezogenen Szenarien basieren werden, sind für die Notfallplanung auf den gesamten Betriebsbereich bezogene Planungen und Maßnahmen erforderlich.

5.2.2.3 Probabilistische Methoden der vorausschauenden Risikoanalyse

Die Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA) untersucht die Risiken von Industrieanlagen auf der Grundlage von Wahrscheinlichkeits- und Schadensausmaßbetrachtungen. Die Grundlage hierfür bilden vergangene Ereignisse, bei denen in Abhängigkeit von der Intensität eines

Naturereignisses die Schadensbilder für einzelne Anlagenkomponenten (z. B. Tank) aufgenommen und ausgewertet wurden. Für eine bestehende Anlage kann unter der Annahme einer bestimmten Intensität eines auslösenden Ereignisses, wie z.B. Erdbeben, und den bekannten Schadensbildern vergangener Ereignisse abgeleitet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit diese Schadensbilder für die betrachtete Anlage eintreten werden. Mit diesem Zwischenergebnis kann auf die Folgeereignisse Freisetzung, Brand und Explosion geschlossen werden.

Ein umfassendes webbasiertes System mit dem Namen RAPID-N wurde von der Gemeinsamen Forschungsstelle der Europäischen Kommission (GFS) mit anfänglicher Unterstützung des Wissenschaftlich-Technologischen Forschungsrates der Türkei (TUBITAK) entwickelt. Das System ist seit 2012 in Betrieb und unter <http://rapidn.jrc.ec.europa.eu> öffentlich verfügbar. Mit RAPID-N kann die Natech-Risikoanalyse für eine einzelne Anlage oder einen Industriepark durchgeführt werden. Das Tool kann für Landnutzungs- oder Notfallplanungszwecke verwendet werden, indem die möglichen Folgen verschiedener Natech-Szenarien analysiert werden. Es kann auch Notfallmaßnahmen unterstützen, indem es schnell Standorte identifiziert, an denen möglicherweise Natech-Unfälle aufgetreten sind, sodass Ersthelfer und die Bevölkerung in der Nähe der Anlagen rechtzeitig gewarnt werden können. Schwerpunktmäßig wurde es für die Betrachtung der Folgen eines Erdbebens entwickelt.

RAPID-N besteht im Wesentlichen aus folgenden Modulen, die hier kurz beschrieben werden (Krausmann et al., 2017):

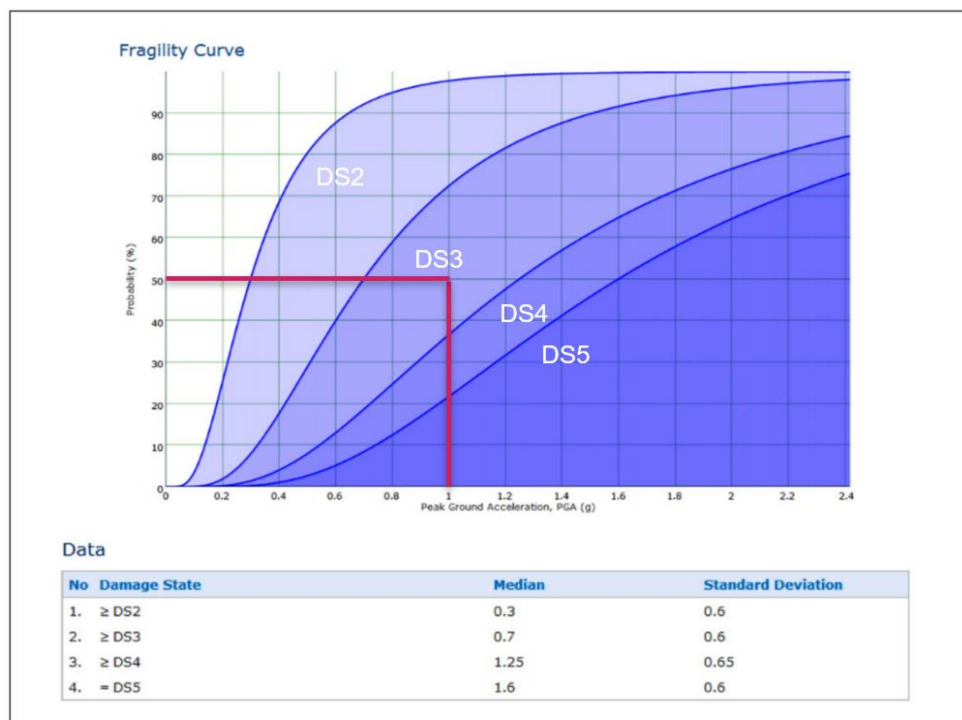
1. Wissenschaftsmodul: In diesem Modul werden alle anlagenbezogenen Daten eingegeben. Hierzu zählen z. B. Angaben zu den vorhandenen Tanktypen, ihren Dimensionen sowie Angaben zu den bevorrateten Stoffen (z.B. Gefährlichkeit und Eigenschaften). Fehlende Daten können mithilfe von mathematischen Näherungsgleichungen abgeschätzt werden. Das Naturwissenschafts-Modul bietet die gesamte zugrunde liegende Berechnungsunterstützung für die RAPID-N Simulation. Dies beinhaltet die Datenverarbeitung, die Statistiken, die Kartierungen der Ergebnisse und vieles mehr.
2. Modul zur Charakterisierung der Naturgefahr: RAPID-N kann durch die Eingabe von charakteristischen Daten für Erdbeben (Epicenter, Stärke, Tiefe des Bebens) die Beschleunigung des Bodens unter Berücksichtigung von Dämpfungsgleichungen zur Abschätzung der seismischen Kräfte am Anlagenstandort berechnen. Grundlage sind Gefahrenkarten für Erdbeben sowie Daten von vergangenen Ereignissen. Die Datenbank der Naturgefahren enthält seit Anfang der 1970er Jahre Quelldaten weltweiter Erdbeben mit einer Stärke >5,5 zur Beurteilung historischer Szenarien.
3. Natech-Risikomodul: Das Modul schätzt die durch das Erdbeben verursachten Anlagenschäden auf der Grundlage von Fragilitätskurven für einzelne Anlagenteile ab. Hierzu werden die Schäden vergangener Ereignisse in sogenannte „Damage States“ eingestuft, wobei die Schadenbeschreibungen mit ihren Wahrscheinlichkeiten je nach Autor unterschiedlich ausfallen (**Tabelle 7**).

Tabelle 7: Einstufung von Schäden an Tankanlagen

Damage State (DS) Einstufung des Schadens	Schadenbeschreibung nach O'Rourke und So (2000)	Schadenbeschreibung nach Moschonas et al. (2014)
DS1	Keine Freisetzung von Stoffen	Keine Freisetzung von Stoffen
DS2	2 % Freisetzung; 30% Wahrscheinlichkeit	Keine Freisetzung von Stoffen
DS3	5 % Freisetzung; 50% Wahrscheinlichkeit	2 % Freisetzung; 60 Minuten, 50% Wahrscheinlichkeit
DS4	50 % Freisetzung; 80% Wahrscheinlichkeit	20 % Freisetzung; 60 Minuten, 80% Wahrscheinlichkeit
DS5	100 % Freisetzung; 100 % Wahrscheinlichkeit	100 % Freisetzung; 10 Minuten, 100 % Wahrscheinlichkeit

Die statistisch ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten für die in Tabelle 7 aufgelisteten Damage States werden gegen die Bodenbeschleunigung am Standort (Peak Ground Acceleration) aufgetragen. Die sich hieraus ergebenden Fragilitätskurven sind das Kernelement probabilistischer Risikoanalysen. Ein Beispiel zeigt die **Abbildung 31** für einen verankerten Stahltank.

Abbildung 31: Fragilitätskurven für verankerte Stahltanks



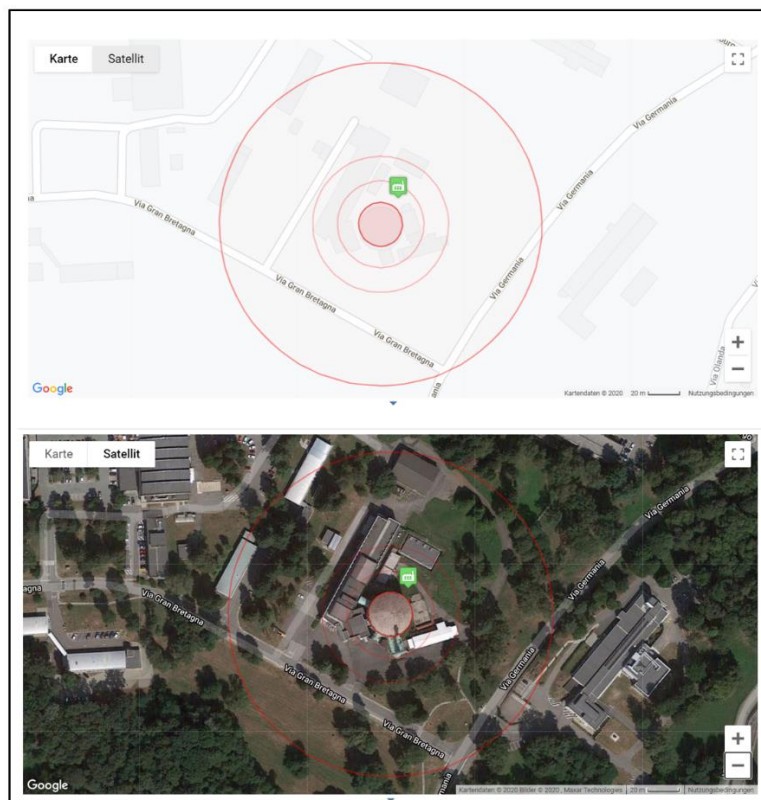
Quelle: in Anlehnung an (Krausmann et. al., 2017)

Wie Abbildung 31 verdeutlicht, liegt bei einer Bodenbeschleunigung von 1 g die Wahrscheinlichkeit eines Schadens der Klasse DS5 bei maximal 21 %, während ein Schaden der Klasse DS3 mit einer Wahrscheinlichkeit von bis zu 72 % zu erwarten ist. Nach Untersuchungen von O'Rourke muss für diesen Fall mit einer Freisetzung des Stoffes von 5 % des Tankinhalts gerechnet werden (vgl. Tabelle 7).

RAPID-N ordnet somit bestimmten Risikozuständen ein bestimmtes Schadensausmaß mit den sich herausergebenden Folgeszenarien zu. Diese Risikozustände bestimmen das mögliche Ausmaß der Schadenhöhe am Behälter und somit das Ausmaß der Freisetzung gefährlicher Stoffe. Darüber hinaus wird die Wahrscheinlichkeit der Entzündung des freigesetzten Stoffes abgeschätzt. Die Folgen eines solchen Ereignisses werden mit Hilfe eines Simulationsmodells mit Hilfe von in der Datenbank verfügbaren Methoden und Gleichungen abgeschätzt. Für entzündbare Stoffe können die Endpunkte berechnet werden, die durch eine Wärmestrahlungsintensität von 5 kW/m^2 für 40 s (entspricht Verbrennungen zweiten Grades) und durch Überdrücken von 7 kPa (1 psi) für Dampfwellenexplosionen definiert sind. Es handelt sich somit um die Berechnung eines Radius vom Unfallgeschehen bis zu den genannten Endpunkten.

Als Ergebnis wird eine Risikokarte mit den ermittelten Einwirkzonen in Abhängigkeit von den Damage States und den Schadenswahrscheinlichkeiten ausgegeben. Die **Abbildung 32** zeigt ein Beispiel für die Ausgabe einer Fallstudie (Krausmann et. al., 2017).

Abbildung 32: Beispiel einer Ausgabe von RAPID-N für eine Fallstudie eines Erdbebenszenarios



Quelle: in Anlehnung an (Krausmann et. al., 2017)

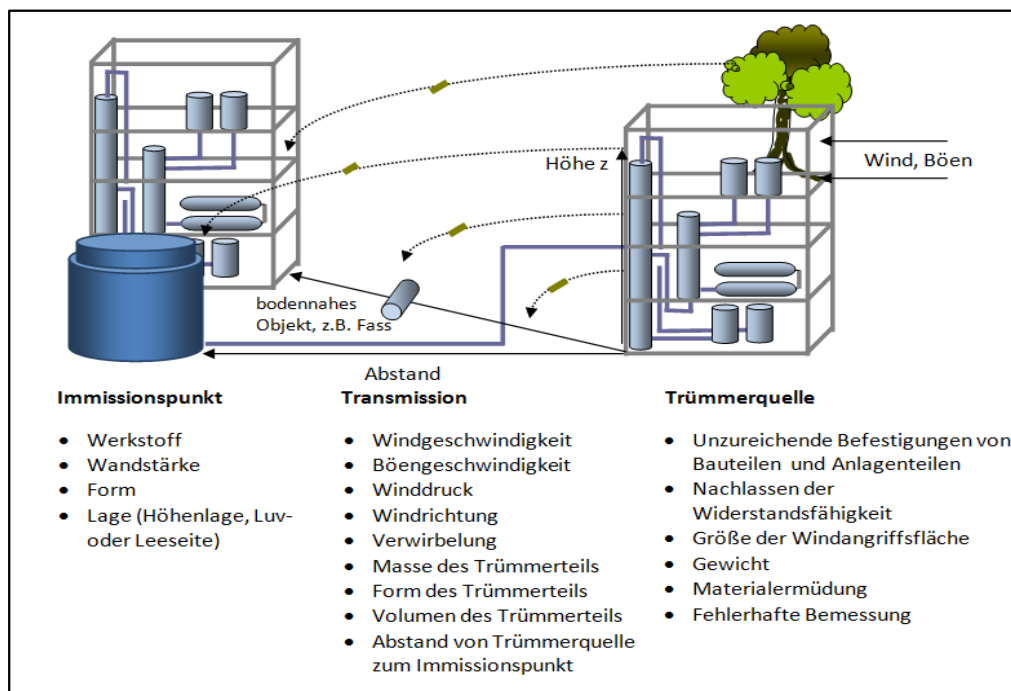
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das hier vorgestellte Tool zur Risikoanalyse brauchbare Ergebnisse liefert. Zentrales Element sind Fragilitätskurven, die auch für andere probabilistische Methoden zur Risikoanalyse verwendet werden. Sie stehen jedoch nur für ausgewählte Anlagenteile, wie z.B. Stahltanks, zur Verfügung. Dies gilt jedoch nicht für andere sicherheitsrelevante Anlagenteile, wie z.B. Stromverteilungsanlagen, Prozessleit- und Kühlsysteme. Insbesondere durch Versagen dieser Anlagenteile wurden in der Vergangenheit oftmals Störfälle ausgelöst (Cozzani, 2018).

5.3 Gefährdungsabschätzung durch windbedingte Projektile

Im Zusammenhang mit Dominoeffekten wurde die Gefahr von Projektilen aufgrund einer Explosion schon vielfach diskutiert und Untersuchungen, wie z.B. nach Staubexplosionen, durchgeführt (Lorenz, 1996). In dem hier betrachteten Fall werden Projektile durch Starkwinde, wie z.B. Orkane, verursacht. In den USA werden seit Jahren die Wirkungen von Projektilen ausgelöst durch Tornados oder Hurrikans für die Dimensionierung von Schutzräumen untersucht (FEMA P-361, 2008).

Wenngleich die Häufigkeit insbesondere starker Tornados in Europa seltener ist als in den USA, so verursachen auch Orkane große Zerstörungen aufgrund ihrer hohen Windgeschwindigkeiten sowie der hierdurch ausgelösten Trümmer. Mit Fokus auf die Sicherheit von Störfallanlagen illustriert die **Abbildung 33** die Gefährdung durch windbedingte Projektile. Anlagenteile oder auch Baumteile können abgerissen, fortgetragen und auf andere Anlagenteile stürzen, wo sie potentiell einen Störfall auslösen können. Neben den Ursachen für die Entstehung windbedingter Projektile (Trümmerquelle) sind zudem zahlreiche Einflussfaktoren der Transmission sowie der Wirkungen am Immissionsort aufgelistet.

Abbildung 33 Darstellung möglicher Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile



Quelle: (Krätzig et al., 2016)

Mit Blick auf Abbildung 33 wird schnell klar, dass eine exakte mathematische Beschreibung der Projektilbahn sowie der Wirkung des Projektils beim Aufprall auf einen Stahltank praktisch kaum möglich oder mit einem großen Rechenaufwand verbunden ist. Um dennoch eine Risikoanalyse durchführen zu können, sind plausible vereinfachende Annahmen zu treffen.

5.3.1 Grundlagen für die Gefährdungsabschätzung durch windbedingte Projektile

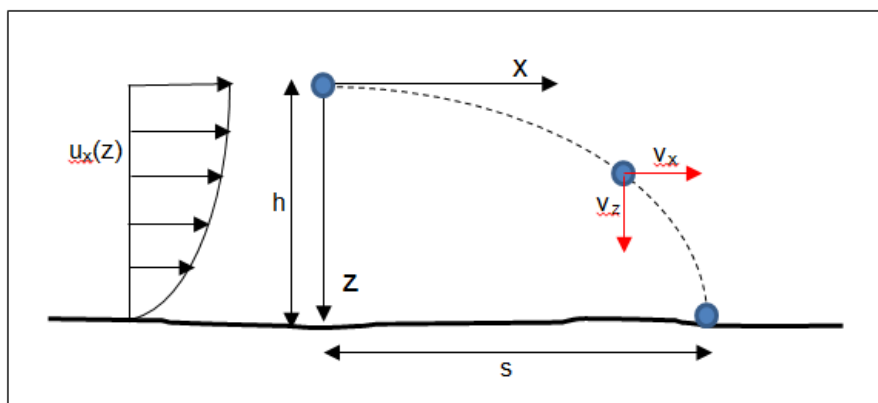
Im Forschungsbericht des Umweltbundesamtes „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten“ wurde erstmals ein Modell zur Gefährdungsabschätzung durch windbedingte Projektile, die auf Stahltanks prallen, von K.-E. Köpke entwickelt (Krätzig et al., 2016).

Es basiert im Wesentlichen auf folgenden zwei Fragestellungen:

1. Wie stark kann ein Körper von einer bestimmten Höhe über dem Erdboden durch Wind bzw. einem Orkan beschleunigt werden und welche Geschwindigkeit hat er am Aufprallort?
2. Wie tief kann dieser Körper in Stahl eintreten und zu einer Beschädigung eines Stahltanks führen?

Zur Beantwortung der ersten Frage wurden mathematische Grundlagen zur Berechnung des waagerechten Wurfs herangezogen, um die Bewegung eines Körpers unter dem Einfluss von Starkwind (horizontal wirkende Kraft) und der Erdanziehung (vertikal wirkende Kraft) zu beschreiben. Allerdings müssen anders als beim waagerechten Wurf verschiedene Effekte berücksichtigt werden. Beim waagerechten Wurf wird das Objekt zum Zeitpunkt $t = 0$ auf eine bestimmte Geschwindigkeit gebracht, das anschließend ohne weitere Beschleunigung in x -Richtung zu Boden fällt. Im Rahmen dieser Betrachtung wird das Objekt beim Fallen jedoch weiter in x -Richtung beschleunigt, es sei denn, es befindet sich im Windschatten eines Gebäudes. Ein analoger Ansatz wird auch von Lorenz zur Berechnung der Flugbahnen von Trümmerteilen nach Staubexplosionen verwendet (Lorenz, 1996).

Abbildung 34: Darstellung des waagerechten Wurfs



Quelle: K.-E. Köppke

Das Kräftegleichgewicht in x -Richtung, das auf einen umströmten Körper wirkt, kann wie folgt beschrieben werden:

$$m \cdot a_x = - \frac{\rho_L}{2} c_w (u_x(z) - v_x)^2 A$$

Mit: m = Masse des Projektils (kg)

a_x = Beschleunigung des Projektils in x -Richtung (m/s^2)

c_w = Widerstandsbeiwert des umströmten Körpers (-)

ρ_L = Dichte der Luft (kg/m^3)

$u_x(z)$ = Wind- oder Böengeschwindigkeit der Luft in x -Richtung (m/s) als Funktion der Höhe z

v_x = Geschwindigkeit des umströmten Körpers in x -Richtung (m/s)

A = Querschnittsfläche (m^2)

Für das Kräftegleichgewicht in z-Richtung gilt:

$$m \cdot a_z = m g - c_w \frac{\rho_L}{2} v_z^2 A$$

Mit: m = Masse des Projektils (kg)

a_z = Beschleunigung des Projektils in z-Richtung (m/s^2)

g = Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m/s}^2$)

c_w = Widerstandsbeiwert des umströmten Körpers (-)

ρ_L = Dichte der Luft (kg/m^3)

v_z = Geschwindigkeit des umströmten Körpers in z-Richtung (m/s)

A = Querschnittsfläche (m^2)

Die Lösung der beiden Gleichungen ist nur iterativ möglich, weil die Beschleunigung nicht konstant ist und sich in jedem Moment der Bewegung ändert. Zur Lösung der Gleichungen gibt es verschiedene Ansätze. Einer basiert auf dem Euler-Verfahren, das davon ausgeht, dass zu einem bestimmten Startzeitpunkt ($t = 0$) die Startwerte der Geschwindigkeit $v(t)$, des Ortes $h(t)$ bzw. $s(t)$ und der Beschleunigung $a(t)$ bekannt sind. Es können dann die weiteren Funktionswerte mit einem vorgegebenen Δt für den Zeitpunkt $t + \Delta t$ berechnet werden. Mit der Definition der Beschleunigung

$$a(t) = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t}$$

kann die Projektilgeschwindigkeit zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ wie folgt berechnet werden:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t) \Delta t$$

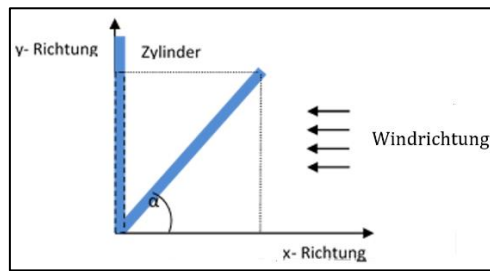
Mit der Definition der Geschwindigkeit $v(t)$ kann die aktuelle Flugstrecke s berechnet werden, wobei der Parameter s der Weg in x-Richtung ist; ersetzt man s durch h , wird der Weg in z-Richtung beschrieben.

$$v(t) = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s(t + \Delta t) - s(t)}{\Delta t}$$

$$s(t + \Delta t) = s(t) + v(t) \Delta t$$

Die Berechnung der Flugweite eines Rohrs, wie er als Modellkörper ausgewählt wurde, setzt voraus, dass der Wind den Körper quer anströmt. Tatsächlich ist diese Voraussetzung nicht zu jedem Zeitpunkt t gegeben. So kann sich der Körper in der Luft drehen, wobei die Anströmfläche durch die Rotation laufend verändert wird. Ein einfacher Weg die Drehbewegungen zu berücksichtigen, ist die Einführung eines Drehwinkels α (**Abbildung 35**).

Abbildung 35: Verminderung der Anströmfläche eines Rohres (Draufsicht)



$$\sin \alpha = \frac{\text{Anströmfläche beim Drehwinkel } \alpha}{\text{Anströmfläche bei senkrechter Anströmung}}$$

Ist $\alpha = 90^\circ$, dann ist $\sin \alpha = 1$, d.h. maximale Anströmfläche. Wird der Winkel kleiner, verringert sich auch die Anströmfläche.

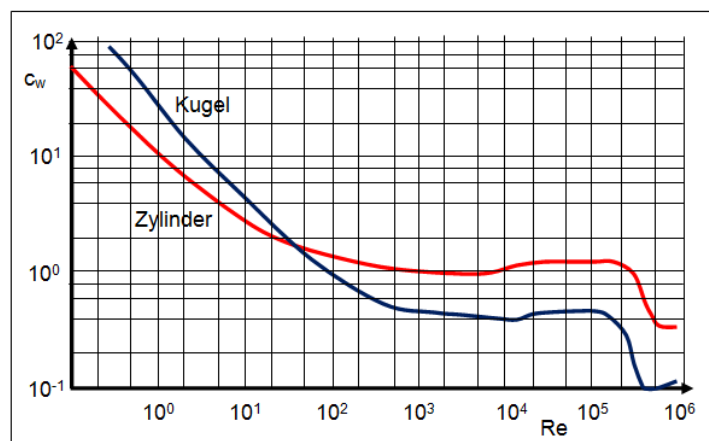
Für die Berechnung der Einwirkung eines Stahlrohrs auf eine Stahlwand (z.B. Tank) oder eine Betonwand wird davon ausgegangen, dass der Aufprall mit der Stirnseite des Rohres erfolgt. Dies bedeutet, dass auch bei der Berechnung der Flugweite eine Rotation von mindestens 90° zu berücksichtigen ist. Zur Berücksichtigung der Rotation vom Startpunkt bis zum Aufprall wird als durchschnittlichen Anströmwinkel ein Winkel von 45° angenommen.

Die am Aufprallpunkt erreichte Endgeschwindigkeit des Projektils v_p wird mit den Geschwindigkeitsvektoren in x- und z-Richtung wie folgt berechnet:

$$v_p = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$$

Weil Widerstandsbeiwerte (c_w -Wert), die für die Berechnung der Widerstandskraft von Körpern erforderlich sind, i.d.R. nur für definierte Körper zur Verfügung stehen, muss für die weitere Berechnung entweder eine Kugel oder ein Zylinder als Modellkörper angenommen werden (**Abbildung 36**).

Abbildung 36: c_w -Wertermittlung in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl für eine Kugel und einen Zylinder



Die Wind- bzw. Böengeschwindigkeiten für die einzelnen Windzonen in Deutschland können der DIN EN 1991-1-4:2010-12 mit dem zugehörigen nationalen Anhang entnommen werden (**Tabelle 8**). In Abhängigkeit von der Geländekategorie und der Höhenlage des Modellkörpers

lässt sich nunmehr die Flugbahn des Körpers mit seiner Momentangeschwindigkeit iterativ berechnen (Köppke, 2018).

Tabelle 8: Böengeschwindigkeiten nach DIN EN 1991-1-4 mit NA

Windzone	Geländekategorie	Böengeschwindigkeit v_p in m/s in 10 m Höhe über Grund			
		R = 50a	R = 100a	R = 500a	R = 1000a
1	GK I	36,2	38,0	42,2	44,1
	GK II	32,6	34,2	38,0	39,7
	GK III	28,6	30,0	33,3	34,7
2	GK I	40,2	42,2	46,9	48,9
	GK II	36,2	38,0	42,2	44,1
	GK III	31,8	33,3	37,0	38,6
3	GK I	48,3	50,7	56,3	58,7
	GK II	43,5	45,7	50,7	52,9
	GK III	38,1	40,0	44,4	46,3
4	GK I	48,3	50,7	56,3	58,7
	GK II	43,5	45,7	50,7	52,9
	GK III	38,1	40,0	44,4	46,3

Die in Tabelle 8 angegebenen Böengeschwindigkeiten differieren in Abhängigkeit von der Windzone (**Abbildung 37** sowie der Geländekategorie (**Abbildung 38**).

Abbildung 37: Windzonenkarte nach DIN EN 1991-1-4

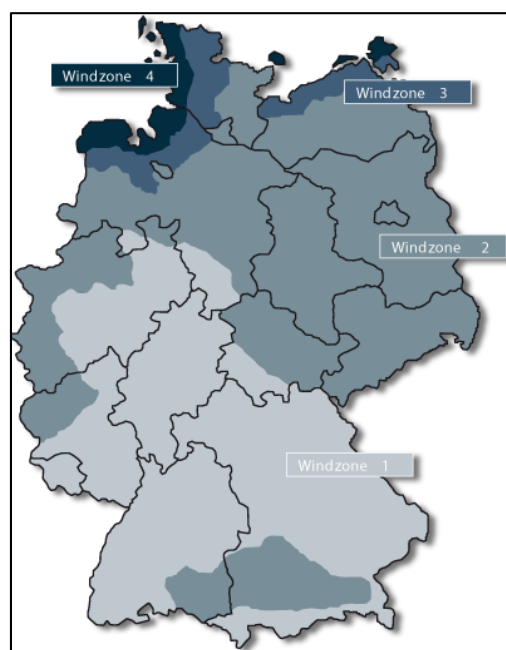


Abbildung 38: Einteilung der Geländekategoriennach DIN EN 1991-1-4

Geländekategorie I		Offene See; Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung; glattes, flaches Land ohne Hindernisse
Geländekategorie II		landwirtschaftlich genutztes Gelände mit Begrenzungshecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen
Geländekategorie III		Vororte von Städten oder Industrie- und Gewerbeflächen; Wälder
Geländekategorie IV		Stadtgebiete, bei denen mindestens 15 % der Fläche mit Gebäuden bebaut ist, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet

Weil sich die angegebenen Böengeschwindigkeiten auf eine Höhe von 10 Metern über Geländeneiveau beziehen, muss eine Anpassung an die tatsächlichen Gegebenheiten vor Ort erfolgen. Weil die Wind- bzw. Böengeschwindigkeiten mit zunehmender Höhe stärker werden, erfolgt die Umrechnung auf die Höhenlage des potenziellen Projektils mit Hilfe der folgenden Gleichungen gemäß DIN EN 1991-1-4:

$$\text{Geländekategorie I} \quad u_x(z) = u_x(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,095}$$

$$\text{Geländekategorie II} \quad u_x(z) = u_x(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12}$$

$$\text{Geländekategorie III} \quad u_x(z) = u_x(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,155}$$

$$\text{Geländekategorie IV} \quad u_x(z) = u_x(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,2}$$

wobei der Wert $u_x(10)$ für die betreffende Geländekategorie und die angesetzte Jährlichkeit der Tabelle 8 zu entnehmen ist. Auf diese Weise lässt sich die Böengeschwindigkeit, die einen Körper losreißen bzw. beschleunigen kann, in Abhängigkeit von der Höhenlage errechnen.

Die Beantwortung der zweiten Frage basiert auf Untersuchungsergebnissen des US Ballistic Research Laboratory (Dietrich, 1976; Konersmann, 2012). Obwohl die Untersuchungen ursprünglich zur Ermittlung der Wirkung von Trümmerteilen bei einem Flugzeugabsturz auf ein atomgetriebenes Schiff entwickelt wurden, handelt es sich bei der Berechnung der Wirkungen eines windbedingten Projektils um eine vergleichbare Aufgabenstellung. Daher wurde davon ausgegangen, dass eine Übertragung der Ergebnisse möglich ist. So kann die Perforationstiefe bei Stahl t_{Stahl} in Abhängigkeit von der Projektilmasse, dem Projektildurchmesser und der Aufprallgeschwindigkeit näherungsweise wie folgt berechnet werden:

$$t_p = K_{\text{Stahl}} \frac{m^{0,67}}{d} \left(\frac{v_p}{100}\right)^{1,33}$$

- mit t_p = Perforationstiefe von Stahl (m)
 K_{Stahl} = empirischer Projektilfaktor = $4,16 \cdot 10^{-5}$
 m = Projektilmasse (kg)
 d = Projektildurchmesser (m)
 v_p = Aufprallgeschwindigkeit (km/h)

Ist die so ermittelte Perforationstiefe größer als die tatsächliche Stahlwanddicke des Behälters, ist eine Freisetzung des gelagerten Stoffes nicht auszuschließen. Aufbauend auf den zuvor

dargestellten Grundlagen wurde ein Softwaretool entwickelt, dessen Funktionsweise im Folgenden an einem Beispiel kurz dargestellt wird (Köppke, 2018). Anschließend werden die Ergebnisse auf Plausibilität geprüft und bewertet.

5.3.2 Risikoanalyse für ein windbedingtes Projektil mit Hilfe eines excelbasierten Softwaretools am Beispiel einer Destillationskolonne

Am Beispiel einer Destillationskolonne der Raffinerie Heide am Rand der Norddeutschen Bucht wurde die Wirkung eines Rohres geprüft, das sich in 70 m Höhe von der Kolonne gelöst hat, von einem Orkan fortgetragen wird und auf einen Tank (hier: Tank 263) in der Nähe der Destillationskolonne fällt (**Abbildung 39**). Die Destillationsanlage befindet sich inmitten der Produktionsanlagen sowie verschiedener Produkttanks, die potentiell von einem Projektil getroffen werden können. Alle Anlagen unterliegen den Anforderungen der oberen Klasse der StörfallV.

Abbildung 39: Xylol-Destillation der Raffinerie Heide



Quelle: K.-E. Köppke

Für die Berechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

1. Der Wind bläst ohne Berücksichtigung von Turbulenzen horizontal über das Gelände.
2. Im Fall eines Worst-Case-Szenarios trifft ein Rohrstück mit der Stirnseite auf den Tank.
3. Plastische Verformungen des Stahl tanks oder des Modellkörpers werden beim Aufprall nicht berücksichtigt.

Um die mögliche Flugweite potenzieller Projektile einzugrenzen, ist die Festlegung von Modellkörpern erforderlich. Gewählt wird für die Betrachtung ein Rohr mit folgenden Maßen:

- Länge 2 m
- Durchmesser 5 cm
- Gewicht: 3,85 kg

In **Abbildung 40** sind die erforderlichen Eingabedaten in der Eingabemaske zusammengestellt.

Abbildung 40: Eingangsdaten der Flugweitenberechnung des Modellrohrs

Projektilflug - Trümmerflug

- Eingaben zur Berechnung			- Eingaben zur Luftdichteberechnung			- Sonstige Angaben	
Starthöhe	<input type="text" value="70"/> m	Angriffsfläche	<input type="text" value="0,1"/> m ²	Projektildurchmesser	<input type="text" value="0,05"/> m	Temperatur	<input type="text" value="25"/> °C
Zeitintervall	<input type="text" value="0,03"/> s	cw-Wert	<input type="text" value="1,2"/>	Windschatten	<input type="text" value="0"/> m	Luftfeuchtigkeit	<input type="text" value="70"/> %
Projektilmasse	<input type="text" value="3,8"/> kg	Anströmwinkel	<input type="text" value="15"/> Grad	Anfangsgeschw.	<input type="text" value="0"/> m/s	Umgebungsdruck	<input type="text" value="985"/> mbar

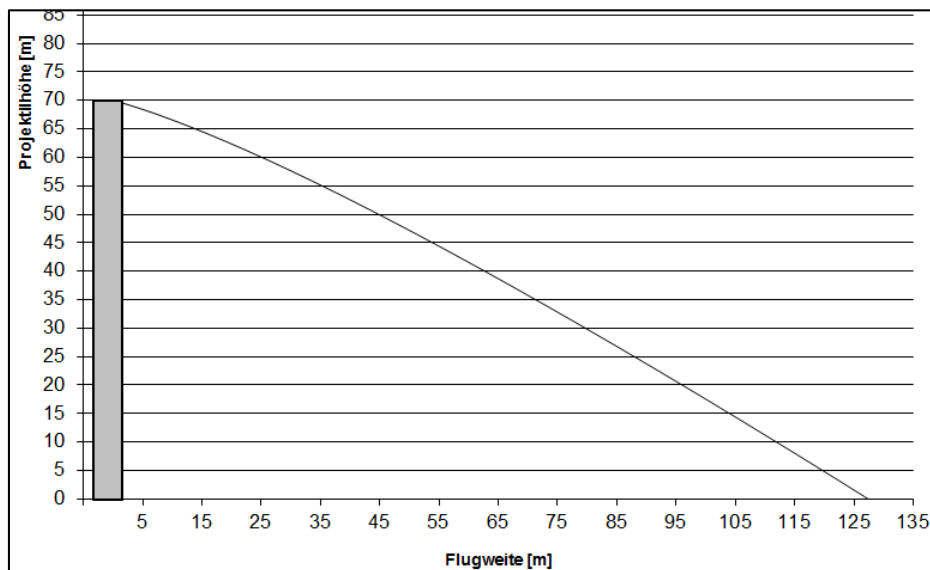
- Berechnete Werte	
Windgeschwindigkeit in Starthöhe	<input type="text"/> m/s
max. Projektilgeschwindigkeit im Ziel	<input type="text"/> km/h
Luftdichte	<input type="text"/> kg/m ³

Für die in diesem Programm verwendeten Berechnungen gelten folgende Randbedingungen:

- Maximale Höhe der Anlage 800 m ü. NN
- Besondere Einflüsse der Topographie laut N.A.B.4 werden nicht berücksichtigt
- Unterhalb der Mindesthöhe zur Berechnung der Böengeschwindigkeit nach N.A.B.3 werden die Formeln weiterverwendet.

Mit diesen Eingangsdaten errechnet das Programm zunächst die maximale Flugweite des Rohrs. Das Ergebnis dieser Berechnung ist grafisch in **Abbildung 41** dargestellt. Wie zu erkennen ist, kann das Rohr bei einer Starthöhe von 70 m in der Windzone 4 bei Geländekategorie II ca. 127 m weit getragen werden.

Abbildung 41: Maximale Flugweite des Modellrohrs



Quelle: K.-E. Köppke

Nach dieser Berechnung wird nunmehr ein Radius von 127 m um die Destillationsanlage gelegt, um die Anlagenteile zu erfassen, die potenziell von dem Rohr getroffen werden können (**Abbildung 42**). Wie in **Abbildung 42** zu erkennen ist, können nicht alle Anlagenteile, die potenziell getroffen werden können, untersucht werden. Aufgrund der hohen Schadstoffmenge wurde der Tank Nr. 263 (vgl. **Abbildung 39**) ausgewählt. Bei der Wahl des Tanks 263 wurde die Hauptwindrichtung (Nordwestwind) nicht berücksichtigt.

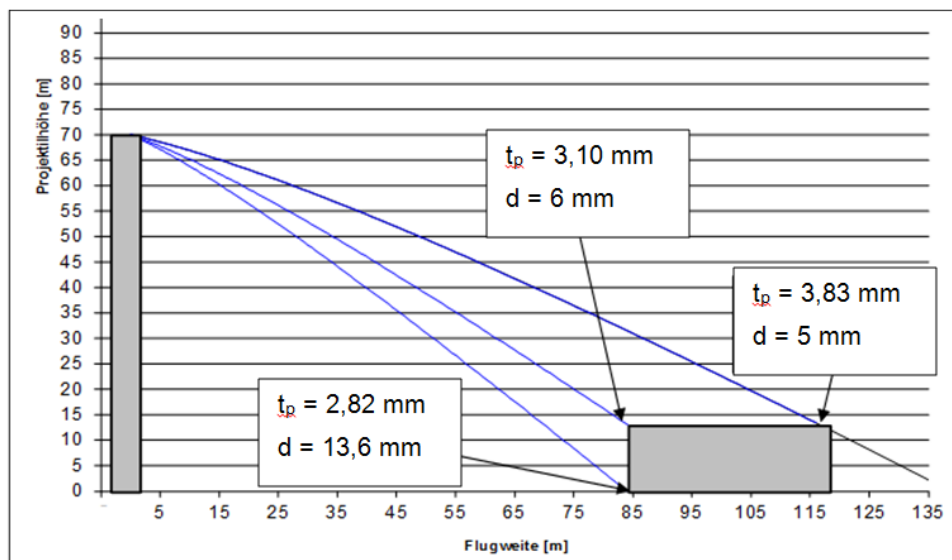
Abbildung 42: Lage des ausgewählten Tanks Nr. 263



Quelle: K.-E. Köpke

Das Programm berechnet zunächst die Projektilgeschwindigkeiten an drei Punkten des Tanks, sofern diese innerhalb der maximalen Flugweite des Projektils liegen. Anschließend werden an den Aufprallpunkten die Penetrationstiefen t_p berechnet (**Abbildung 43**).

Abbildung 43: Berechnung der Flugbahnen, der Projektilgeschwindigkeit sowie der Penetrationstiefe für 3 Aufprallpunkte am Beispiel des Tanks Nr. 263.



Quelle: K.-E. Köpke

In Abbildung 43 sind neben die berechneten Penetrationstiefen t_p auch die Wandstärken an den drei Aufprallpunkten zusammengestellt. Es wird deutlich, dass der am wenigsten gefährdete Bereich des Tanks sich in Bodennähe befindet, weil dort die größten Wanddicken vorliegen. Dagegen ist der am stärksten gefährdete Bereich das Dach des Behälters, das mit einer

Wandstärke von $d = 5$ mm am schwächsten ausgeführt wurde. Die Gegenüberstellung von Penetrationstiefen t_p und Wandstärken d zeigt, dass der ausgewählte Modellkörper die Behälterwandung wahrscheinlich nicht durchschlagen kann.

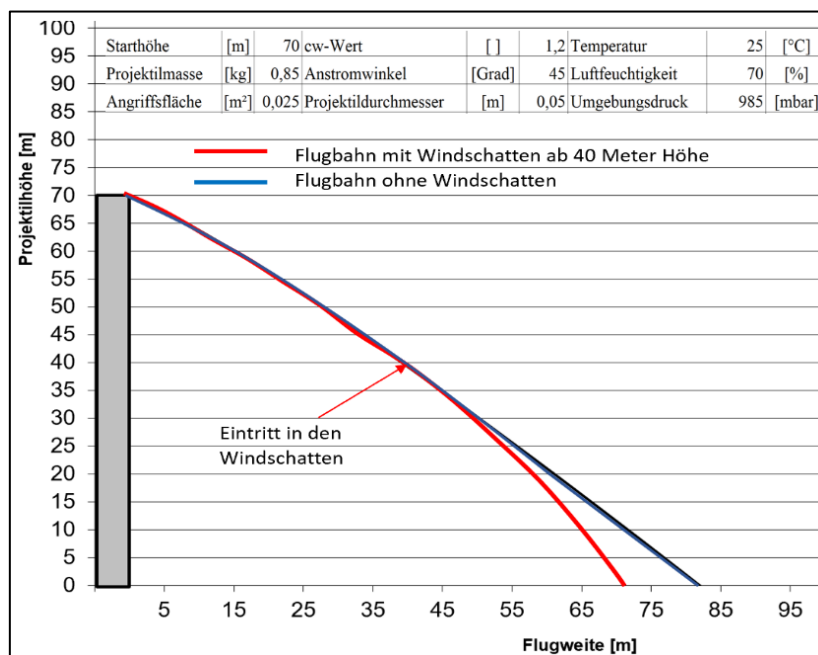
Wie der Vergleich zeigt, liegen die Wandstärken und die ermittelten Perforationstiefen in der gleichen Größenordnung. Dies bedeutet, dass das Softwaretool brauchbare Ergebnisse liefert. Kritisch ist jedoch anzumerken, dass keine gemessenen Ergebnisse für einen Vergleich mit den berechneten Perforationstiefen vorliegen. Darüber hinaus handelt es sich um eine Worst-Case-Betrachtung, weil die Wahrscheinlichkeit eines stirnseitigen Aufpralls eines Rohres als sehr niedrig eingeschätzt werden kann.

Die Wahl eines Rohres als Modellkörper ist für die rechnerische Beschreibung der Projekttilbahn eine Vereinfachung. Tatsächlich treten bei Orkanen meist Trümmerteile auf, die nicht mit den Eigenschaften eines Rohres (c_w -Wert) beschrieben werden können.

Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass trotz aller Vereinfachungen und des Fehlens einer technischen Prüfung unter realen Bedingungen das Softwaretool die Möglichkeit einer ersten Risikoabschätzung bietet.

Das Programm lässt es darüber hinaus zu, dass das Projektil ab einer bestimmten Höhe in einen Windschatten eintaucht und somit nicht mehr durch den Wind beschleunigt wird. In einem ähnlichen Beispiel wurde daher der Einfluss eines Windschattens auf die maximale Flugweite eines Rohres berechnet. Die Projektilquelle befindet sich erneut auf 70 m Höhe über Geländeneiveau. Die Anlage liegt diesmal in Windzone 1 bei einer Geländekategorie III. Wie **Abbildung 44** zeigt, wird das Rohr ohne Windschatten auf maximal 82 Meter fortgetragen. Die Flugweite wird auf 71 m verkürzt, wenn das Projektil z.B. über ein Gebäude fliegt, das 40 m hoch ist. Mit dem Eintritt in den Windschatten des Gebäudes wird das Rohr durch den Wind nicht mehr beschleunigt und erreicht somit schneller den Boden.

Abbildung 44: Einfluss des Windschattens auf die Flugweite eines Projektils

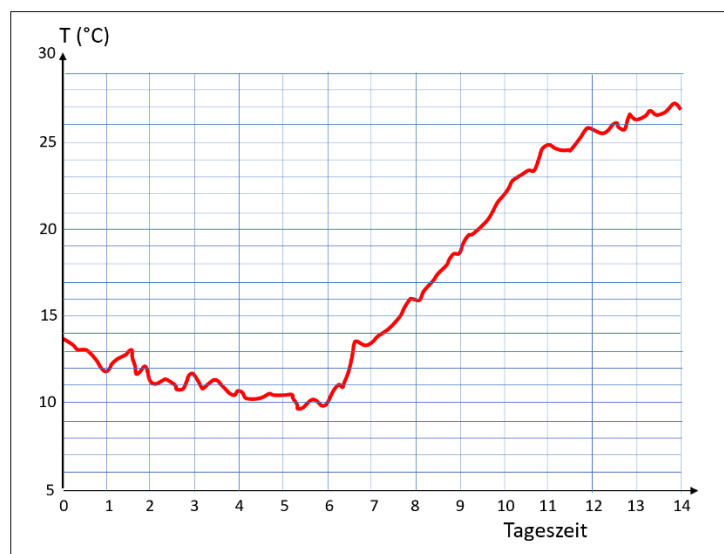


5.4 Risikoanalyse für Chemikalienbehälter bei Hitzewellen und Sonneneinstrahlung mit Hilfe eines excelbasierten Softwaretools

In Kapitel 4.2 wurde erläutert, dass in Zukunft neben der mittleren Jahrestemperatur auch die Zahl heißer Tage (Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 30\text{ °C}$) ansteigen wird. Noch nicht genau abschätzbar ist zurzeit die Zahl heißer Tage, die direkt aufeinander folgen können. Unabhängig davon stellt sich die Frage, in welcher Weise sich Tankinhalte von Anlagen mit gefährlichen Stoffen unter Sonneneinstrahlung im Verlauf mehrerer heißer Tage erwärmen können. Auf diese Weise ließe sich abschätzen, ob sich z.B. thermisch instabile Stoffe zersetzen, wie z.B. bei organischen Peroxiden, oder ob sich chemische Reaktionen bei bestimmten Stoffen einstellen können. Auch können derartige Abschätzungen einen Beitrag zur Auslegung von Kühlanlagen für Chemikaliertanks liefern.

Am 12.6.2022 ereignete sich um 14:10 Uhr ein Brand in einem betriebseigenen Rückhaltebecken für Löschwasser und Abwasser, das nicht den Einleitungsbedingungen entspricht. In dem betroffenen Betrieb werden flüssige Peroxide hergestellt. Im Becken befanden sich Flüssigkeiten mit lokal hohen Peroxid-Konzentrationen. Ausgelöst wurde der Brand wahrscheinlich durch zu hohe Sonneneinstrahlung, wodurch sich u.a. Didecanoylperoxid und Dilauroylperoxid im Becken zersetzte und eine Schicht Fettsäure am Rand des Beckens entzündete. Details sind der ZEMA-Datenbank des Umweltbundesamtes zu entnehmen. Die Temperaturentwicklung an diesem Tag zeigt die **Abbildung 45**.

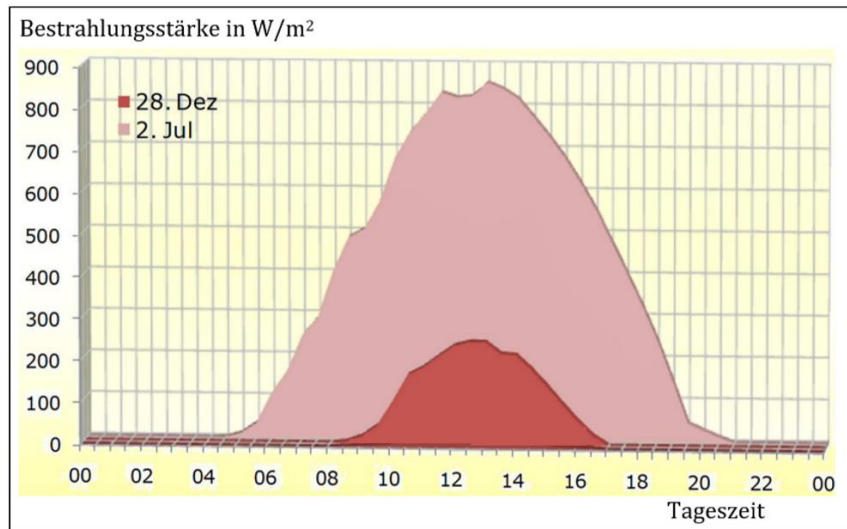
Abbildung 45: Verlauf der Tagestemperatur am 12.Juni 2022 am Standort des betroffenen Unternehmens



Quelle: persönliche Mitteilung

Die Tageshöchsttemperatur wurde an diesem Tag um 13:50 Uhr mit 27 °C erreicht, also kurz vor dem Brand in dem betroffenen Becken. Die Angabe der Lufttemperatur bezieht meteorologisch auf die Temperatur in Bodennähe (Höhe 2 Meter), die nicht von der Sonnenstrahlung oder Bodenwärme beeinflusst wird. Der Energiestrom der Sonnenstrahlung wurde für diesen Tag am Standort des Unternehmens nicht ermittelt. Zur Abschätzung der Intensität der Strahlung zeigt **Abbildung 46** Einzelmessungen zu verschiedenen Jahreszeiten in Karlsruhe. Karlsruhe liegt nicht allzu weit vom betroffenen Unternehmensstandort entfernt.

Abbildung 46: Tagesgänge der Strahlungsintensität in Karlsruhe an den Tagen 2.7, 22.12 und 28.12.1991



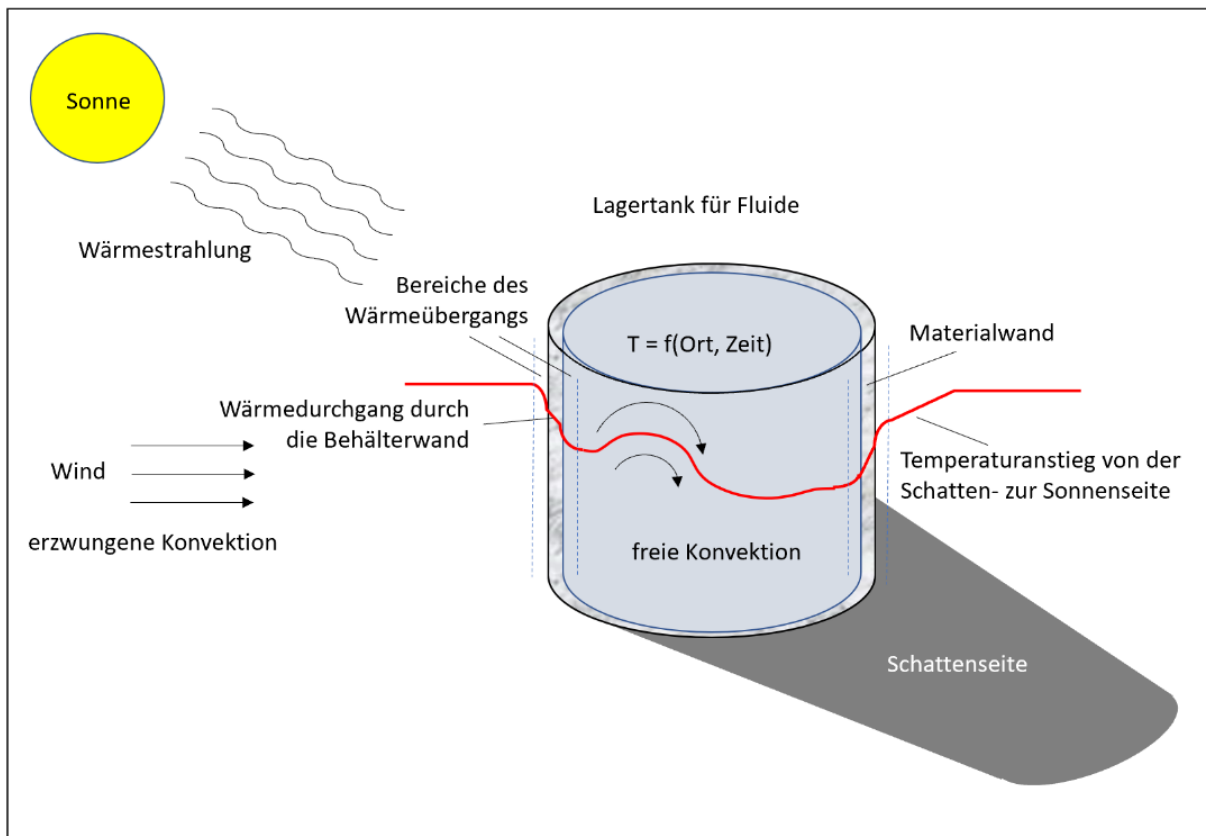
Quelle: K.-E. Köpke in Anlehnung an Quaschnig, 2021

Abbildung 46 zeigt die deutlichen jahreszeitlichen Unterschiede der Strahlungsintensität bei wolkenfreiem Himmel. Im Juli ist die Strahlungsintensität mit 850 W/m^2 am höchsten. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine ähnliche Strahlungsintensität auch am Unternehmensstandort am 12.6.2022 aufgetreten ist.

Für organische Peroxide wurde der Sicherheitskennwert SADT (Self Accelerating Decomposition Temperature) eingeführt, der für die Temperatur der selbstbeschleunigten Zersetzung steht. Aus diesem Kennwert wird eine Notfalltemperatur abgeleitet. Sie ist eine Grenztemperatur, ab der Notfallmaßnahmen ergriffen werden müssen. Diese liegt in der Regel 5 bis 10°C unter dem SADT-Kennwert. Bei einer Überschreitung dieser Temperatur gilt es, das Gebiet zu räumen (BG RCI, 2020). Didecanoylperoxid hat eine SADT von 40°C , allerdings, so wird vermutet, ist im betroffenen Becken des Unternehmens erst bei rund 60°C mit einer signifikanten Zersetzung zu rechnen. Dilauroylperoxid mit einer SADT von 50°C ist im Vergleich zum Didecanoylperoxid thermisch stabiler. Es ist durchaus denkbar, dass die Sonneneinstrahlung sowie die Konvektion der Luft zumindest an der Flüssigkeitsoberfläche eine entsprechende Temperatur bewirkt hat, so dass sich die Peroxide zersetzt haben. Um die Wirkung von längerer Sonneneinstrahlung zu ermitteln, wird im Folgenden ein Modell vorgestellt, mit dessen Hilfe Temperaturveränderungen durch Sonneneinstrahlung und Konvektion warmer Luft berechnet werden können.

In **Abbildung 47** ist die Aufgabenstellung für die Risikoanalyse grafisch dargestellt. Die Erwärmung des Behälters erfolgt durch Konvektion der warmen Luft an den Behälter sowie an wolkenfreien Tagen durch die Wärmestrahlung der Sonne, die allerdings nur auf die sonnenbeschienene Fläche des Behälters wirkt. So entsteht an der Behälteroberfläche ein Temperaturgradient zwischen Sonnen- und Schattenseite. Der Wärmetransport durch Konvektion ist vor allem von der Windgeschwindigkeit abhängig.

Abbildung 47: Temperaturprofil in und um einen mit einer Flüssigkeit gefüllten Behälter

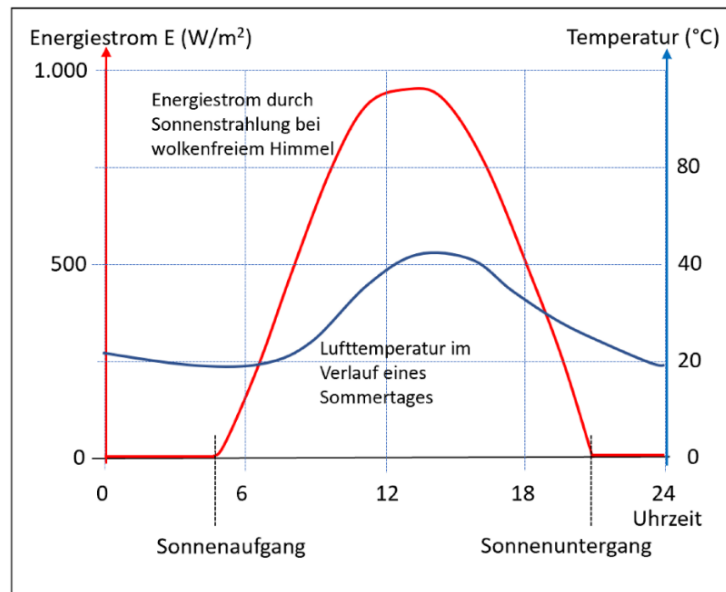


Quelle: K.-E. Köpke

In Abbildung 47 ist ein möglicher Temperaturverlauf von außen nach innen dargestellt. Die von außen an den Behälter herangeführte Wärme muss an der Behälteraußenwand zunächst den Wärmeübergangswiderstand und anschließend den Wärmedurchgang durch den Behälter überwinden. An der Innenwand ist erneut ein Wärmeübergangswiderstand zu überwinden. Die Verteilung der Wärme im Fluid, das im Behälter gespeichert wird, erfolgt durch freie Konvektion, die durch lokale Temperatur- und Dichteunterschiede hervorgerufen wird. Dabei kann der Behälter mit einer Flüssigkeit oder einem Gas befüllt sein.

Die Temperaturerhöhung im Behälter als Folge des Wärmestroms der Luft sowie der Wärmestrahlung der Sonne ist eine Funktion der Zeit. Darüber hinaus wird die Temperatur durch die freie Konvektion im Innern des Behälters bestimmt und ist damit auch ortsabhängig ($T = f(x, t)$). Die mathematische Beschreibung der Temperaturänderung im Behälter ist somit eine partielle Differentialgleichung mit mindestens zwei unabhängigen Variablen. Weil die Lösung einer Differenzialgleichung jedoch sehr anspruchsvoll ist und numerische Methoden erfordert, werden oftmals einfache Näherungslösungen herangezogen. Auch in diesem Fall sind plausible Annahmen zu treffen, mit denen ein praktikabler Lösungsansatz mit hinreichender Genauigkeit des Temperaturverlaufs formuliert werden kann. Erschwerend kommt hinzu, dass sich die Eingangsgrößen für den Wärmetransport durch die Luftströmung sowie die Strahlungswärme im Verlauf eines Tages ändern, wie die **Abbildung 48** verdeutlicht.

Abbildung 48: Exemplarische Tagesganglinien des Energiestroms der Sonnenstrahlung bei wolkenlosem Himmel im Sommer sowie der Lufttemperatur



Quelle: K.-E. Köpke in Anlehnung an Häckel, 2008

Der flächenbezogene Energiestrom der Wärmestrahlung ist nur zwischen Sonnenauf- und -untergang wirksam. Er erreicht sein Maximum um die Mittagszeit und kann dabei bis zu 1.000 W/m^2 erreichen. Abbildung 48 zeigt darüber hinaus beispielhaft den Temperaturverlauf zwischen heißen Tagesstunden ($T > 30 \text{ }^\circ\text{C}$) und tropischen Nachtstunden ($T > 20 \text{ }^\circ\text{C}$ zwischen 18:00 und 6:00 Uhr). Als Folge wird ein Behälter während der Tagesstunden erwärmt und in den Nachtstunden wieder abgekühlt.

5.4.1 Temperaturverlauf des durchmischten Behälters

Wie zuvor erläutert wurde, müssen für eine praxisnahe Abschätzung der Temperaturerhöhung durch Wärmekonvektion und Wärmestrahlung vereinfachende Annahmen getroffen werden. Die mathematische Beschreibung der freien Konvektion einer Flüssigkeit im Innern des Behälters kann dann vernachlässigt werden, wenn der Behälterinhalt gerührt wird. Dies gilt auch für den Wärmeübergang im Innern des Behälters. Damit ist die Berechnung der Temperaturentwicklung im Behälter nur noch von der Zeit und nicht mehr vom Ort abhängig.

Weil es sich zudem um einen langsamen Prozess handelt und die Behälterwand oftmals aus Stahl ist, der eine vergleichsweise hohe Wärmeleitfähigkeit besitzt und darüber hinaus nur wenige Millimeter dick ist, kann davon ausgegangen werden, dass der Temperaturgradient zwischen Innen- und Außenwand klein ist. Deshalb kann der Wärmedurchgangswiderstand durch die Behälterwand unter dieser Voraussetzung ebenfalls vernachlässigt werden.

Um die Temperaturentwicklung eines Körpers (hier: Stahlbehälter) durch Wärmetausch mit der Luftströmung zu berechnen, kann mit den zuvor getroffenen Annahmen die sogenannte Blockkapazitätsmethode angewandt werden. Ihr Anwendungsbereich beschränkt sich auf Körper mit einer homogenen Temperaturverteilung (Polifke und Kopitz, 2009). Diese Voraussetzung ist bei einem durchmischten Behälter gegeben. Darüber hinaus kann bei der Berechnung der Temperaturveränderung auch eine Wärmequelle oder -senke in dem

betrachteten Körper berücksichtigt werden. Für den in Abbildung 47 beschriebenen Fall, befindet sich die Wärmequelle nicht im, sondern außerhalb des Körpers (Wärmestrahlung der Sonne).

Mit den genannten Annahmen kann die Energiebilanz wie folgt formuliert werden:

$$\frac{dU}{dt} = \dot{Q} + \dot{w} V$$

$\frac{dU}{dt}$ = Änderung der inneren Energie nach der Zeit

\dot{Q} = Wärmestrom durch Konvektion [W]

\dot{w} = volumetrischer Energieeintrag durch die Sonne [W/m³]

V = Volumen der Flüssigkeit im Behälter [m³]

Der Term $\frac{dU}{dt}$ kann wie folgt umformuliert werden:

$$\frac{dU}{dt} = m \frac{du}{dt} = V \rho \frac{du}{dt}$$

m = Masse der Flüssigkeit [kg]

ρ = Dichte der Flüssigkeit [kg/m³]

Die Änderung der spezifischen inneren Energie du eines Körpers durch Wärmezufuhr- oder -abfuhr wird auch wie folgt beschrieben:

$$du = c_v dT$$

c_v = spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit bei konstantem Volumen [J/(kg·K)]

Für inkompressible Medien gilt $c_v = c_p = c$. Somit ergibt sich:

$$\frac{dU}{dt} = V \cdot \rho \cdot c \frac{dT}{dt}$$

Für den Term \dot{Q} kann mit dem Newton's Gesetz für die Konvektion wie folgt beschrieben werden:

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot (T_L - T)$$

A = Fläche [m²]

α = Wärmeübergangskoeffizient an der Oberfläche des Behälters [W/(m²·K)]

T_L = Temperatur der Luft [K]

T = Temperatur an der Oberfläche des Behälters [K]

Für $T_L > T$ wird der Behälter erwärmt (positives Vorzeichen)

$T_L < T$ wird der Behälter gekühlt (negatives Vorzeichen)

Zusammengefasst ergibt sich nunmehr:

$$V \rho c \frac{dT}{dt} = A \alpha (T_L - T) + \dot{w} V$$

bzw. umgeformt:

$$\frac{dT}{dt} + \frac{A \alpha}{c \cdot \rho \cdot V} (T - T_L) - \frac{\dot{w}}{c \cdot \rho} = 0$$

Nach Integration dieser Gleichung und Ermittlung der Integrationskonstanten ergibt sich nach (Benim, 2020):

$$T = T_L + \underbrace{(T_0 - T_L) \cdot \exp\left(-\frac{\alpha}{c \cdot \rho} \cdot \frac{A}{V} \cdot t\right)}_{\text{Temperaturveränderung durch Konvektion}} + \underbrace{\frac{\dot{w}}{\alpha} \cdot \frac{V}{A} \cdot [1 - \exp\left(-\frac{\alpha}{c \cdot \rho} \cdot \frac{A}{V} \cdot t\right)]}_{\text{Temperaturveränderung durch Wärmestrahlung}}$$

mit

T = Temperaturänderung [K]

T_L = Temperatur der Umgebungsluft [K]

T_0 = Anfangstemperatur der Behälterfüllung [K]

α = Wärmeübergangskoeffizient [W/(m²·K)]

c = spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]

ρ = Dichte [kg/m³]

A = Oberfläche [m²]

\dot{w} = volumetrische Wärmequelle [W/m³]

t = Bestrahlungsdauer [h]

T_0 = Temperatur an der Oberfläche des Behälters zum Zeitpunkt $t = 0$ [K]

Mit zunehmender Temperatur verändert sich die spezifische Wärmekapazität c , die Dichte ρ und der Wärmeübergangskoeffizient α , weshalb die Werte nach jedem Schritt aktualisiert werden müssen, was eine iterative Berechnung erforderlich macht.

Wie in der Gleichung deutlich wird, wird zwischen der Temperaturveränderung durch Konvektion und Wärmestrahlung unterschieden. Die Einflussgrößen werden im Folgenden näher erläutert, um den unbekanntem Wärmeübergangskoeffizienten α zu ermitteln.

In der Technik ist es üblich, α bzw. die daraus abgeleitete dimensionslose Kennzahl Nu (Nusselt-Kennzahl) als Funktion der Reynolds- und Prandtl-Zahlen darzustellen. Sie sind für unterschiedliche Randbedingungen der Fachliteratur, z.B. dem VDI-Wärmeatlas (2013), zu entnehmen.

5.4.2 Temperaturveränderung durch Konvektion

Beim konvektiven Wärmetransport ist zwischen freier Konvektion und erzwungener Konvektion zu unterscheiden. Freie Konvektion liegt dann vor, wenn Temperatur- oder Dichteunterschiede eine Ausgleichsbewegung im Fluid auslösen. In dem hier betrachteten Fall ist freie Konvektion nur dann gegeben, wenn Windstille um den Behälter herrscht. Die

erzwungene Konvektion liegt bei Luftbewegungen vor und ist neben der Lufttemperatur auch von der Windgeschwindigkeit abhängig.

Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten α erfolgt mit Hilfe der Nusselt-Zahl Nu :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad \text{bzw.} \quad \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D}$$

D = Durchmesser des Behälters [m]

λ = Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]

Für die Bestimmung der Nusselt-Zahl muss die zuvor beschriebene Fallunterscheidung zwischen freier und erzwungener Konvektion berücksichtigt werden.

5.4.2.1 Bestimmung der Nusselt-Zahl für freie Konvektion um einen Behälter

Für die Berechnung der Nusselt-Zahl muss zuerst die Rayleigh-Zahl Ra ermittelt werden. "Dabei handelt es sich um eine dimensionslose Kennzahl, die den Charakter der Wärmeübertragung innerhalb eines Fluids beschreibt. Sollte die Rayleigh-Zahl einen kritischen Wert überschreiten, ist die Wärmeübertragung primär durch Konvektion gegeben" (Wikipedia, Rayleigh-Zahl). Unterhalb des kritischen Werts ist die Wärmeübertragung primär durch Wärmeleitung gegeben. Wenn $Ra < 10^9$ gilt, handelt es sich um einen laminaren Fall. Bei $Ra > 10^9$ wird die Gleichung für einen turbulenten Fall verwendet.

Die Rayleigh-Zahl Ra berechnet sich aus der Prandtl-Zahl Pr und der Grashof-Zahl Gr wie folgt (Çengel, 2008):

$$Ra = Pr \cdot Gr$$

mit

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda}$$

η = dynamische Viskosität des Fluids (hier Luft) [kg/(m·s)]

c_p = spezifische Wärmekapazität der Luft [J/(kg·K)]

$$Gr = \frac{g \cdot \beta (T_W - T_L) L^3}{\nu^2}$$

g = Erdbeschleunigung [m/s²]

β = Wärmeausdehnungskoeffizient [1/K]

T_W = Wandtemperatur [K]

T_L = Umgebungstemperatur [K]

L = Höhe des Behälters [m]

ν = kinematische Viskosität [kg/(m·s)]

Mit der Berechnung der Rayleigh-Zahl lässt sich nunmehr die Nusselt-Zahl für den laminaren bzw. turbulenten Fall wie folgt berechnen (Benim, 2020):

$$Ra < 10^9 \quad Nu_{lam} = Nu_0 + 0,668 K_F + f(Pr) \cdot Ra^{1/4}$$

$$Ra > 10^9 \quad Nu_{tub} = 0,15 [f(Pr)]^{4/3} \cdot Ra^{1/3}$$

$f(Pr)$ = Faktor zur Bestimmung der Nusselt-Zahl in freier Konvektion. Er wird wie folgt errechnet (Benim, 2020):

$$f(Pr) = \left[1 + (2Pr)^{-\frac{9}{16}} \right]^{-\frac{4}{9}} \quad (\text{wenn } 0,002 < Pr < 8.000)$$

Die Werte für die Variablen K_F und Nu_0 können der **Tabelle 9** entnommen werden.

Tabelle 9: Angaben zu den Faktoren K_F und Nu_0

Form	Charakteristische Länge	Nu_0	K_F
Vertikale Platte oder vertikaler Zylinder	H	0,68	1,0
Horizontaler Zylinder	D	0,36	0,8
Kugel	D	2	0,9

5.4.2.2 Bestimmung der Nusselt-Zahl für erzwungene Konvektion um einen Behälter

Für den Fall der erzwungenen Konvektion gilt: $Nu = f(Re, Pr)$. In die Reynolds-Zahl Re geht u.a. die Windgeschwindigkeit ein:

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu}$$

u = Strömungsgeschwindigkeit des Fluids (Luft) [m/s]

D = charakteristische Länge des Körpers (hier Durchmesser des Zylinders) [m]

ν = kinematische Viskosität [kg/(m·s)]

Die Nusselt-Zahl berechnet sich für Strömungen um einen Zylinder in Abhängigkeit von der Größe der Reynolds-Zahl wie folgt (Benim, 2020):

$$\text{für } 1 < Re < 10^3: \quad Nu = \left(0,43 + 0,5 Re^{\frac{1}{2}} \right) Pr^{0,38} \cdot K_{Pr}$$

$$\text{für } 10^3 < Re < 2 \cdot 10^5: \quad Nu = 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38} \cdot K_{Pr}$$

$$\text{für } 2 \cdot 10^5 < Re < 10^7: \quad Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \cdot K_{Pr}$$

K_{PR} = Korrekturfaktor (für Luftströmungen ≈ 1)

5.4.3 Temperaturveränderung durch Wärmestrahlung

Wie die Abbildung 48 zeigt, kann die Sonne in Deutschland einen Energiestrom E bis zu ca. 1.000 W/m^2 einstrahlen. Die Auswirkung dieses Energiestroms als Wärmequelle hängt von der Größe der sonnenbeschienenen Oberfläche des Behälters sowie vom Absorptionskoeffizienten a_S der Strahlung ab. In **Tabelle 10** sind verschiedene Absorptionskoeffizienten für verschiedene Farben und Materialien zusammengestellt (Baehr, 2013):

Tabelle 10: Absorptionskoeffizienten verschiedener Farben und Materialien für die Sonnenstrahlung

Material / Farbe	Absorptionskoeffizient aS
Schwarz	0,9
Weiss	0,22
Aluminium, poliert	0,2
Dachpappe, schwarz	0,82
Eisen, verzinkt	0,38
Eisen, rau	0,75
Kupfer, poliert	0,18
Kupfer, oxidiert	0,7
Schiefer	0,88
Ziegel, rot	0,75
Stahl, Walzhaut*	0,87

* ergänzende Angabe der Universität Duisburg Essen, Bauphysik-Interaktiv
https://www.uni-due.de/ibpm/Bauphysik-Interaktiv/absorption_emission_4.htm

Berechnung der volumetrischen Wärmequelle \dot{w} erfolgt wie folgt:

$$\dot{w} = \frac{E \cdot aS \cdot A}{V}$$

\dot{w} = volumetrische Wärmequelle [W/m³]

E = Energiestrom [W/m²]

V = Volumen des Behälters [m³]

A = sonnenbeschienene Oberfläche des Behälters [m²]

aS = Absorptionskoeffizient [-]

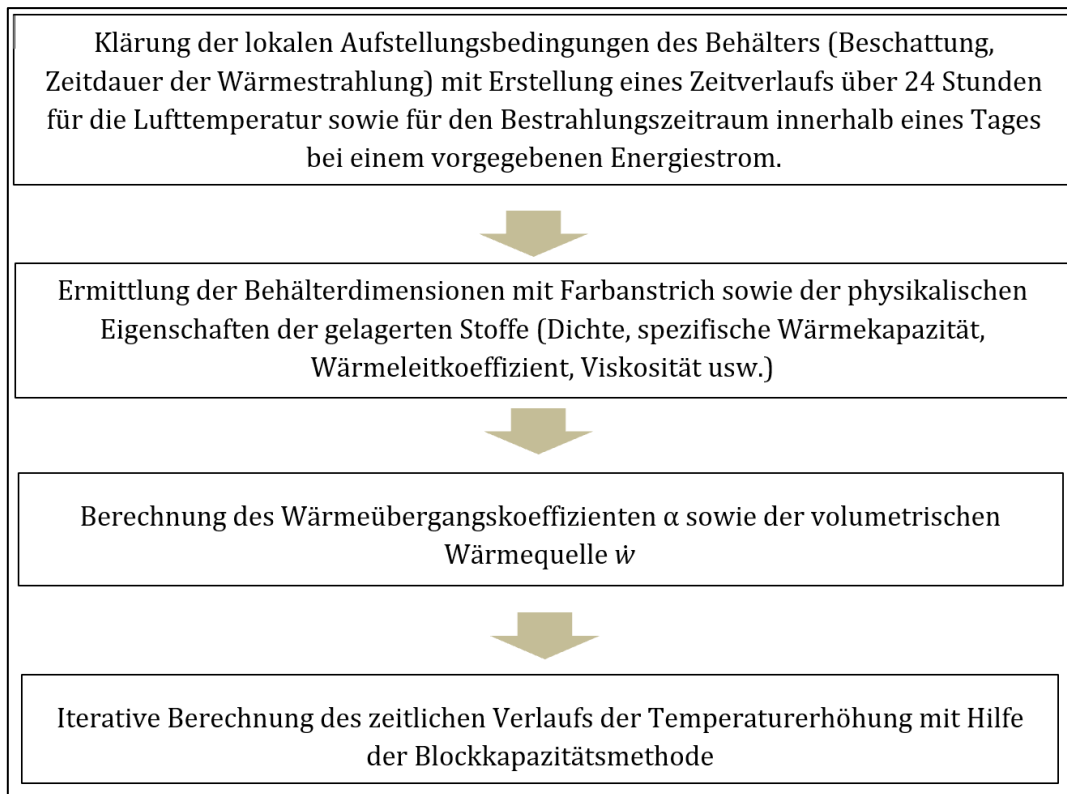
Die sonnenbeschienene Oberfläche für einen freistehenden Behälters beträgt ca. ein Viertel seiner Gesamtoberfläche.

Mit der Vorstellung der mathematischen Grundlagen wird schnell einsehbar, dass die iterative Berechnung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturerhöhung komplex ist und daher nur mit einem Softwaretool praktikabel ist. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde daher ein entsprechendes excelbasiertes Tool entwickelt.

5.4.4 Methodische Vorgehensweise für die Blockkapazitätsmethode

Nach der Vorstellung der theoretischen und mathematischen Grundlagen wird zusammenfassend mit Hilfe der **Abbildung 49** das methodische Vorgehen zur Berechnung der Temperaturerhöhung im Innern eines gerührten Chemikalienbehälters zusammengefasst.

Abbildung 49: Methodische Vorgehensweise zur Berechnung der Temperaturerhöhung in einem gerührten Chemikalienbehälter durch Wärmekonvektion und Wärmestrahlung



5.4.5 Berechnung der Temperaturentwicklung an einem Beispiel

Für die Beispielberechnung wird ein Behälter betrachtet, der nicht im Schatten eines Gebäudes steht und folgende Dimensionen bzw. Eigenschaften hat:

Tabelle 11: Dimensionen und Eigenschaften des gewählten Stahltanks

Tankdimensionen	
Durchmesser	3 m
Höhe	8 m
Fläche	89,54 m ²
Volumen	56,55 m ³
sonnenbestrahlte Fläche	22,38 m ²
Adsorptionskoeffizient (Stahl)	0,8
Füllstand	Vollfüllung (gerührt)

Ist der Behälter nur zum Teil gefüllt, müssen die geometrischen Daten des Behälters entsprechend dem Füllstand angepasst werden. Weil der Wärmetransport im Innern des Behälters von der Gasphase in die Flüssigkeit sehr klein ist, kann dieser Wärmetransport vernachlässigt werden.

Für die Bestrahlungsdauer durch die Sonne (Energiestrom) wird die Tagesganglinie gewählt, wie sie in Abbildung 48 dargestellt ist. Dies gilt ebenso für die Temperaturganglinie, wobei von einer Maximaltemperatur 45°C um die Mittagszeit und einer Nachttemperatur von 20°C ausgegangen wurde. Die Berechnung der Temperaturentwicklung erfolgte mit einem Intervall von 5 m/s zwischen Windgeschwindigkeiten von 0 m/s bis 30 m/s. Als Tankfüllungen wurden Wasser und Benzol gewählt, weil sich die spezifischen Wärmekapazitäten erheblich unterscheiden (Wasser: 4,18 kJ/(kg·K); Benzol: 1,738 kJ/(kg·K)) und damit ein breites Spektrum abgebildet wird (**Abbildungen 50** und **51**).

Abbildung 50: Temperaturentwicklung in einem gerührten Wassertank im Verlauf mehrerer Tage

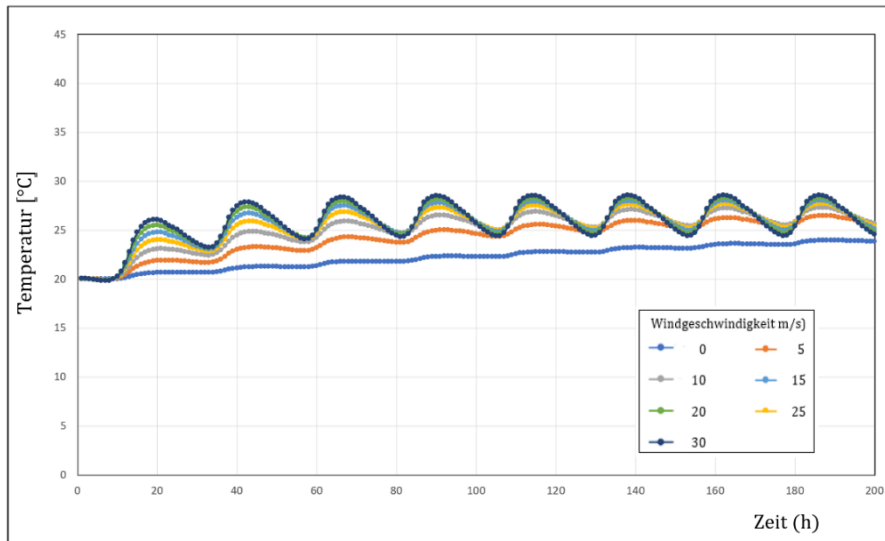
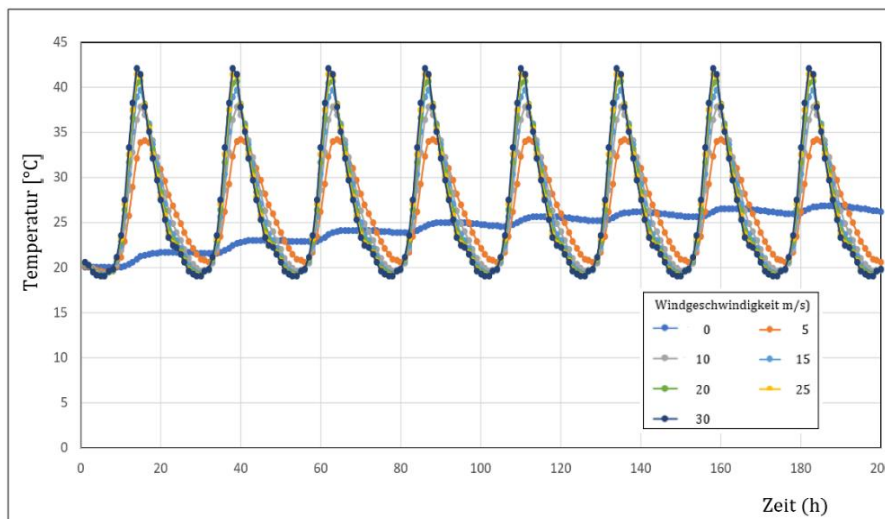


Abbildung 51: Temperaturentwicklung in einem gerührten Benzoltank im Verlauf mehrerer Tage



Quelle: K.-E. Köppke (beide Abbildungen)

In beiden Abbildungen ist zu erkennen, wie die Temperatur in der Flüssigkeit im Innern des Behälters im Verlauf der Tagesstunden ansteigt und in der Nacht wieder abfällt. Der Beginn der Berechnung wurde auf 0 Uhr in der Nacht gelegt. Aufgrund der höheren spezifischen Wärmekapazität von Wasser sind die Wellenbewegungen weniger stark ausgeprägt als bei Benzol. Auch erfolgt der Anstieg der Temperatur bei Wasser über einen längeren Zeitraum als bei Benzol. Die maximale Temperatur wird bei Wasser erst nach ca. 90 Stunden erreicht,

während dies bei Benzol schon nach ca. 12 Stunden der Fall ist. Darüber hinaus liegt innerhalb des betrachteten Zeitraums bei identischen Wetterbedingungen das maximale Temperaturniveau bei Benzol deutlich höher als bei Wasser.

Die blauen Linien zeigen den Temperaturanstieg, wenn kein Wind weht (freie Konvektion). Der dem Behälter zugeführte Wärmestrom wird in diesem Fall im Wesentlichen von der Wärmestrahlung verursacht. Sobald die Windgeschwindigkeit zunimmt, wird der Wärmeeintrag von der erzwungenen Konvektion dominiert.

Bei Teilfüllung des Behälters müssen für die Berechnung der Temperaturveränderung nur das Flüssigkeitsvolumen und entsprechend die Wärmeaustauschfläche verringert werden. Der Wärmestrom von der Gasphase in die Flüssigkeit im Innern des Behälters kann, obwohl die Temperatur tendenziell höher ist als in der Flüssigphase, als sehr klein angenommen werden, weil in der Gasphase freie Konvektion vorliegt.

5.4.6 Temperaturanstieg des nicht-durchmischten Behälters

Die Blockkapazitätsmethode ist zur Berechnung des Temperaturverlaufs im Innern eines nicht-durchmischten Behälters nicht anwendbar, weil aufgrund der dann vorliegenden freien Konvektion Temperaturgradienten im Fluid vorliegen. Hierbei kann es sich um eine Flüssigkeit oder auch ein Gas handeln. Um dennoch sicherheitsrelevante Informationen über die Temperaturänderung zu erhalten, wird von der Annahme ausgegangen, dass die höchste Temperatur in der Flüssigkeit an der Innenwand des Behälters auftritt. Sofern eine Zersetzungsreaktion bzw. exotherme Reaktion zu befürchten ist, wird davon ausgegangen, dass sie an der Stelle beginnen wird, wo die Aktivierungsenergie am ehesten erreicht bzw. überschritten wird. Es wird weiter angenommen, dass die Temperatur der Behälterwand näherungsweise gleich der des Inhaltsstoffes ist, der sich unmittelbar an der Behälterwand befindet.

Mit diesen Annahmen lässt sich ein Energiegleichgewicht aufstellen, um die maximale Wandtemperatur zu berechnen. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Berechnung unabhängig vom Inhalt des Behälters, also von den Stoffeigenschaften, erfolgt. Nachteilig ist jedoch, dass nur die maximale Wandtemperatur im Gleichgewichtszustand berechnet wird, nicht jedoch die Zeitdauer, die bis zum Erreichen des Gleichgewichts erforderlich ist. Das heißt, dass die zeitabhängige Temperaturentwicklung nicht wie bei der Blockkapazitätsmethode ermittelt werden kann. Grundlage für die Betrachtung des Energiegleichgewichts bilden folgende flächenbezogene Energieströme:

Konvektion:
$$\dot{q}_{Konvektion} = \alpha \cdot (T_W - T_L)$$

$\dot{q}_{Konvektion}$ = Wärmestromdichte durch Konvektion [W/m²]

α = Wärmeübergangskoeffizient [W/m² · K]

T_L = Temperatur der Umgebungsluft [K]

T_W = Temperatur der Wand [K]

Strahlung:
$$\dot{q}_{Strahlung} = E_{Sonne} \cdot aS$$

$\dot{q}_{Strahlung}$ = Wärmestromdichte durch Strahlung [W/m²]

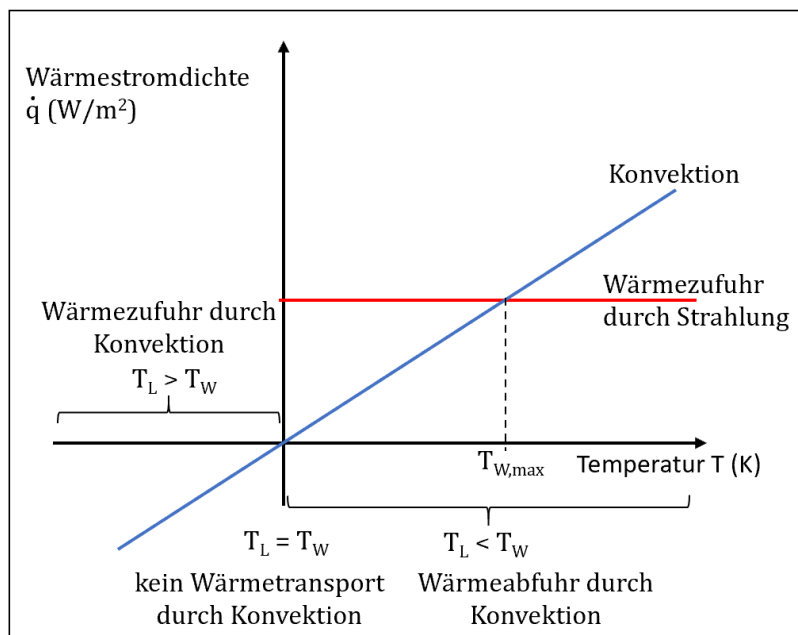
E_{Sonne} = Bestrahlungsstärke [W/m²]

aS = Adsorptionskoeffizient [-]

Je größer die Temperaturdifferenz zwischen Wand- und Lufttemperatur ist ($T_L > T_W$), desto größer ist die konvektive Wärmetransport, wobei dieser auch von der Windgeschwindigkeit abhängt, die bei der Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten α zu berücksichtigen ist. Bei identischer Wand- und Lufttemperatur ($T_L = T_W$) kommt die Wärmezufuhr durch Konvektion zum Erliegen. Die weitere Temperaturerhöhung erfolgt dann ausschließlich durch Wärmestrahlung. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass bei einer Wandtemperatur, die dann höher ist als die Lufttemperatur ($T_L < T_W$), die Konvektion umgekehrt wird und eine Wärmeabfuhr verursacht. Diese wird größer je höher die Wandtemperatur durch die Strahlungswärme wird. Wenn die Wärmezufuhr durch Strahlung so groß ist wie die Wärmeabfuhr durch Konvektion, ist der Gleichgewichtszustand erreicht.

Für die Betrachtung des Energiegleichgewichts wird die Wärmestrahlung der Sonne als konstant angenommen. In **Abbildung 52** ist der Wärmestrom der Konvektion als blaue Gerade und die Strahlungswärme als rote Gerade gekennzeichnet. Am Schnittpunkt beider Linien ist der Gleichgewichtszustand erreicht, so dass die maximale Wandtemperatur auf der x-Achse direkt abgelesen werden kann.

Abbildung 52: Energiegleichgewichtsbetrachtung an der Wand eines nicht-gerührten Behälters



Quelle: K.-E. Köppke

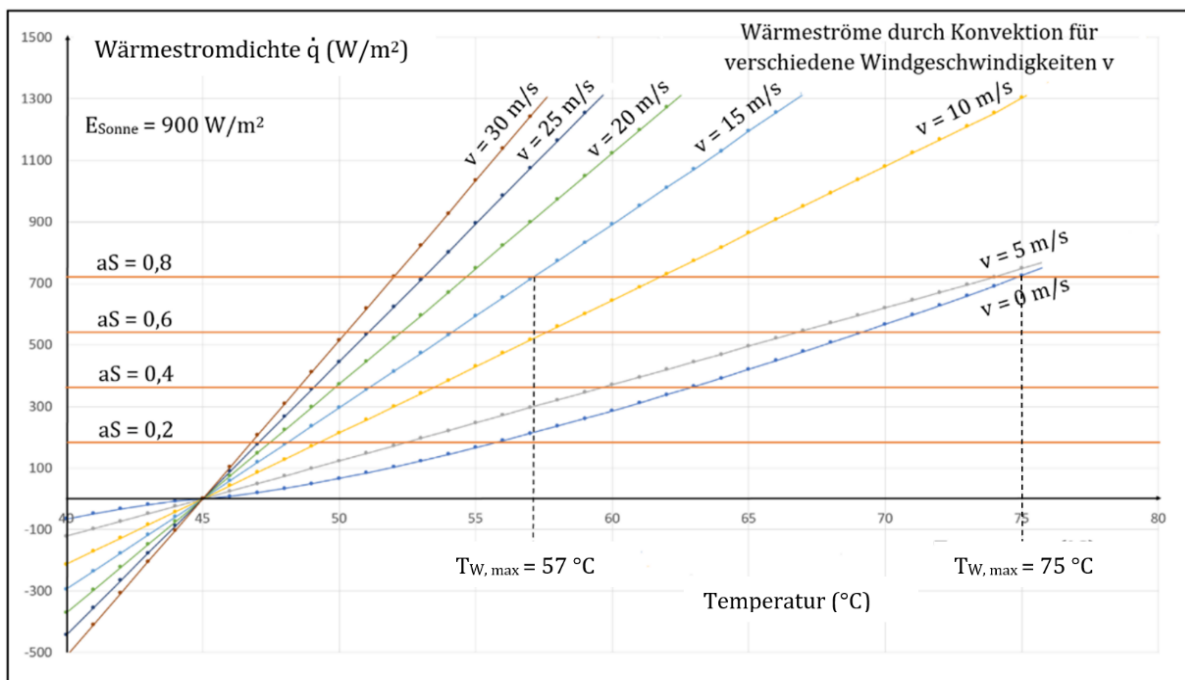
5.4.7 Berechnung der maximalen Wandtemperatur eines nicht-durchmischten Behälters

Wie zuvor schon erläutert wurde, erfolgt die Ermittlung der maximalen Wandtemperatur auf der Grundlage des Energiegleichgewichts von Konvektion und Wärmestrahlung. Daher ist diese Betrachtung unabhängig von den Stoffeigenschaften der gespeicherten Flüssigkeit und hat somit allgemeingültigen Charakter. In **Abbildung 53** sind die Wärmeströme für die Sonnenstrahlung auf der Grundlage der Bestrahlungsstärke der Sonne von 900 W/m^2 sowie für Adsorptionskoeffizienten von 0,2 bis 0,8 als rote waagerechte Linien dargestellt. Der konvektive Wärmestrom wurde mit einer Lufttemperatur von $45 \text{ }^\circ\text{C}$, die aufgrund der Klimawandels zukünftig mehrmals im Jahr zu erwarten ist, berechnet. Hierbei wurde die Windgeschwindigkeit von $0 - 30 \text{ m/s}$ variiert. Für einen Adsorptionskoeffizienten von 0,8 und einer Windgeschwindigkeit von 15 m/s ergibt sich z.B. eine maximale Wandtemperatur von $57 \text{ }^\circ\text{C}$.

Bei Windstille steigt die Wandtemperatur im Extremfall sogar auf 75 °C, weil keine Wärmeabfuhr durch den Wind erfolgt. Sie liegt damit deutlich höher als bei Behältern mit gerührtem Inhalt. Dies liegt insbesondere daran, weil der Wärmetransport von der Behälterwand in die Flüssigkeit aufgrund der freien Konvektion ein langsamer Prozess ist und die Wärmeabgabe auf der Schattenseite nicht miteingerechnet ist.

Wie ein Vergleich mit den Ergebnissen eines durchmischten Behälters mit identischen Dimensionen und Randbedingungen zeigt, kann bzgl. der Zeitdauer zum Erreichen der berechneten Wandtemperatur im Energiegleichgewicht davon ausgegangen werden, dass sich die maximale Wandtemperatur insbesondere bei Stoffen mit niedriger spezifischer Wärmekapazität in wenigen Stunden oder Tagen einstellt. Es ist daher nicht relevant, ob eine Hitzewelle 5 oder 10 Tage andauert.

Abbildung 53: Beispiel einer Energiegleichgewichtsbetrachtung an der Wand eines nicht-gerührten Behälters



Quelle: K.-E. Köppke

Weil die maximale Temperatur der Behälterwand berechnet wird, gelten die Ergebnisse in Abbildung 53 unabhängig vom gelagerten Stoff und vom Füllstand der Flüssigkeit im Innern des Behälters.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass für ungerührte Tanks die maximale Wandtemperatur direkt aus Abbildung 53 für verschiedene Windgeschwindigkeiten und Adsorptionskoeffizienten abgelesen werden kann. Dies ist möglich unabhängig von der Behältergeometrie, der gespeicherten Flüssigkeit sowie dem Füllvolumen des Behälters.

Als Randbedingungen wurde eine Bestrahlungsstärke E_{Sonne} von 900 W angesetzt, wie sie sich in Deutschland bei wolkenfreiem Himmel im Sommer einstellt. Die Lufttemperatur wurde vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung mit 45°C angesetzt. Zum Vergleich wurde in Deutschland die höchste Temperatur mit 41,2°C am 25.7.2019 in Duisburg-Baerl gemessen (DWD, 2020b).

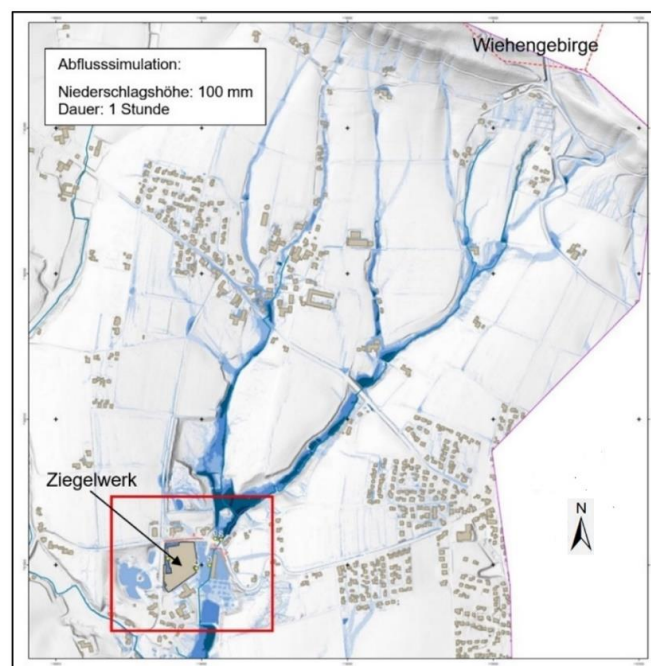
Die Abbildung 53 kann somit genutzt werden, um z.B. Kühlsysteme für temperaturempfindliche Stoffe auszulegen. Weil die Reaktions- bzw. Zersetzungstemperaturen für die jeweils gelagerten Chemikalien in der Regel bekannt sind, ist es darüber hinaus mit Kenntnisnahme der Wetterprognosen möglich, frühzeitig mögliche Risiken zu erkennen und die sicherheitstechnischen Einrichtungen zu überprüfen und ggfs. geeignete Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zu ergreifen.

5.5 Niederschlags-/Abflussberechnungen für Starkniederschläge

Für die Durchführung einer Gefahrenquellenanalyse an größeren Flüssen liegen für mehrere Jahrzehnte z.B. Pegelmessungen vor, die statistisch ausgewertet und z.B. zur Erstellung von Gefahrenkarten genutzt werden. Diese Informationen liegen für kleinere Bäche i.d.R. nicht vor, so dass sich Betreiber von Betriebsbereichen auch nicht an Gefahrenkarten für Sturzflutereignisse orientieren können. Um dennoch verwertbare Aussagen für eine Risikoanalyse zu erhalten, bleibt dem Anlagenbetreiber nur die Durchführung einer Niederschlags-/Abflusssimulation durch externe Experten.

Am Beispiel eines Unternehmens zur Herstellung von Dachziegeln, das sich am südlichen Hang des nordrhein-westfälischen Wiehengebirges befindet, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Niederschlags-/Abflussberechnungen von der geomer GmbH aus Heidelberg durchgeführt. Die **Abbildung 54** verdeutlicht die örtliche Lage des Betriebs, wobei in dieser Darstellung schon eine Abflusssimulation für ein Starkregenereignis mit 100 mm Niederschlagshöhe und einer Regendauer von 1 Stunde gezeigt wird. Das im Folgenden näher zu betrachtende Gebiet ist rot umrahmt.

Abbildung 54: Lage des untersuchten Betriebs unterhalb des Wiehengebirges



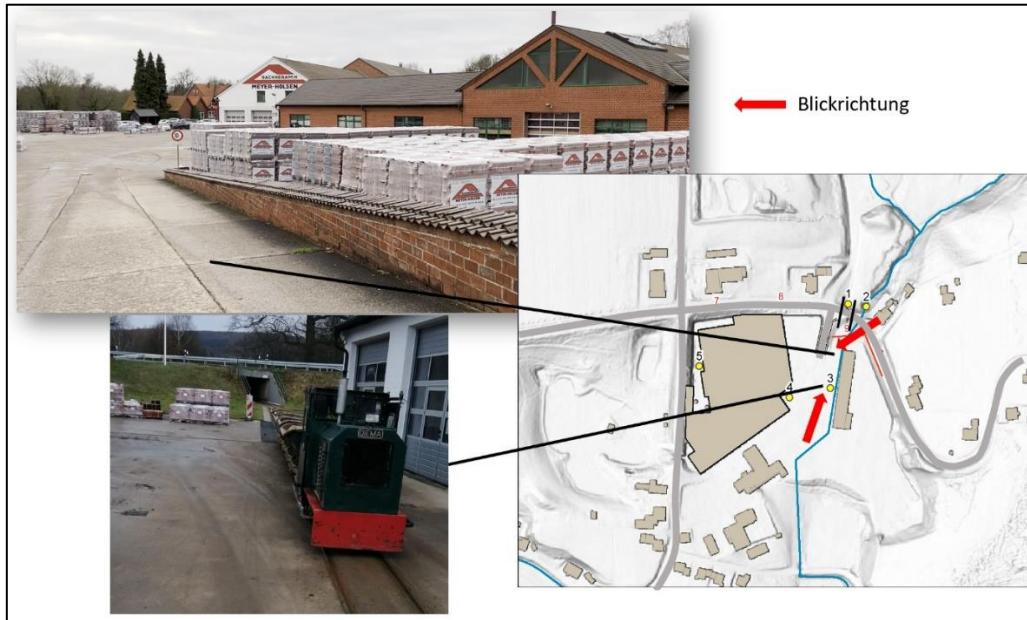
Quelle: A. Assmann

Die Umgebung ist charakterisiert durch Bereiche mit flächigem Abfluss sowie zahlreichen kleinen Bachläufen. Wald, Landwirtschaft und kleinere Siedlungsflächen wechseln einander ab. Mehrere Verkehrswege queren die Fließwege der Wasserabläufe.

Der Betrieb ist an der Nord- und Westseite von Straßen umgeben, die höher liegen als das in **Abbildung 55** dargestellt Betriebsgelände. Die Materialien wie Ton und Lehm werden auf der

Nordseite der den Betrieb umgebenden Straße auf Loren verladen und unter der Straße (Bild unten links) direkt zur Produktion gefahren. Darüber hinaus wird auch ein kleiner Bach unter der Straße und dem Betriebsgelände geführt. Erst am Ende des Betriebsgeländes fließt der Bach wieder in seinem natürlichen Bett.

Abbildung 55: Ausschnitt des Betriebsgeländes



Die Höhendifferenz zwischen den Straßen auf der Nord- und Ostseite zum Betriebsgelände wird besonders auf der linken Bildhälfte in **Abbildung 56** deutlich. Neben der Straßenunterführung (Bild oben Mitte) zeigt die Abbildung 56 auch den Beginn der Verdolung des kleinen Baches (rechtes Bild).

Abbildung 56: Verschiedene Blicke auf das Betriebsgelände sowie auf die Randbedingungen des umgebenden Geländes



5.5.1 Datengrundlagen und Vorgehen

Für Niederschlagsabflussberechnungen werden im Wesentlichen folgende Datensätze benötigt:

1. Digitales Geländemodell
2. Landnutzung und Gebäudedaten
3. Gewässernetz
4. Bodendaten

Alle erforderlichen Daten wurden zu Beginn in ein einheitliches Datenformat überführt und für eine Vorsimulation aufbereitet. Hierbei wurden aus Landnutzung, Bodendaten und Reliefdaten für jedes Niederschlagszenario Abflussbeiwerte generiert und im zweiten Schritt die Inputdaten für die hydraulische Modellierung vorbereitet. Nach einer ersten Modellrechnung wurden hydraulisch relevante Strukturen, wie z.B. Verdolungen, Unterführungen oder Mauern vor Ort kartiert und im Modell ergänzt. Dabei werden auch fragliche Situationen plausibilisiert. Die eigentlichen Abflussberechnungen erfolgten mit Softwareprodukten, die die Hydrologie sowie die Hydraulik im Untersuchungsgebiet in extrem hoher Auflösung hydrodynamisch modellieren. Für die Untersuchungen wurde eine Auflösung von 1 m^2 gewählt sowie Ausgabezeitschritte von 1 Minute festgelegt.

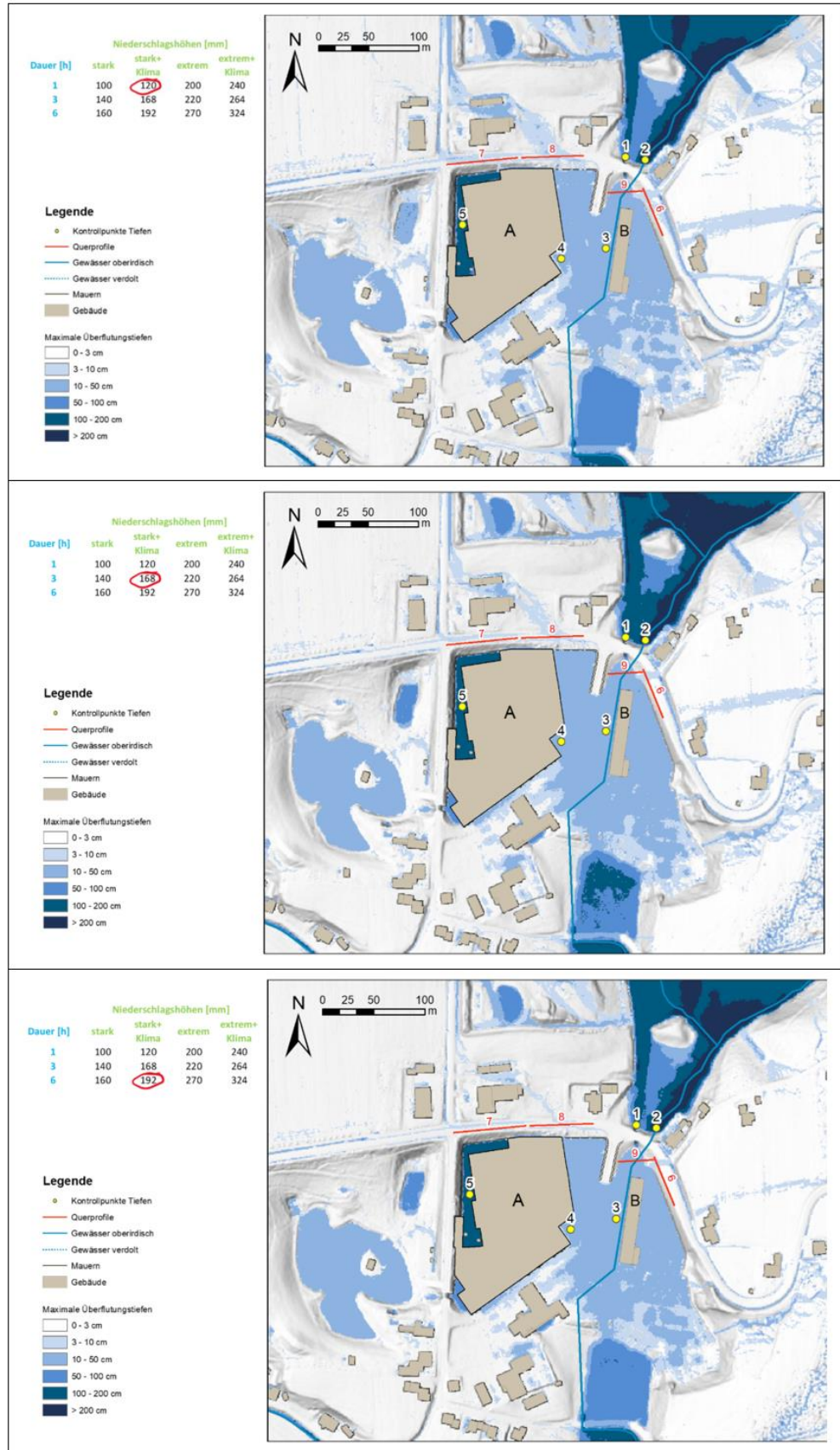
5.5.2 Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Simulationsläufe exemplarisch dargestellt. In **Abbildung 57** sind die potentiellen Überflutungsflächen und -tiefen für den Betrieb dargestellt. Im oberen linken Teil der Abbildungen können die jeweiligen Niederschlagshöhen (rot eingekreist) sowie die Andauer entnommen werden. Wie die Abbildungen zeigen, wird das Betriebsgelände schon nach einer Stunde überflutet. Nach Ablauf von 3 Stunden sind keine größeren Überflutungsflächen hinzugekommen, jedoch hat sich in einigen Bereichen der Wasserstand erhöht. Bei einer Niederschlagsdauer von 6 Stunden sinken die Wasserstände wieder. Dies bedeutet, dass sich der weitere Zulauf durch das Regenereignis verringert und damit der Abfluss größer wird als der Zulauf.

Die hohen Wassertiefen vor der Verdolung (Punkte 1 und 2) ergeben sich aus dem Einstau des Wassers. Dies zeigt, welche Bedeutung künstliche Strukturen und deren Stabilität bei Starkregenereignissen haben.

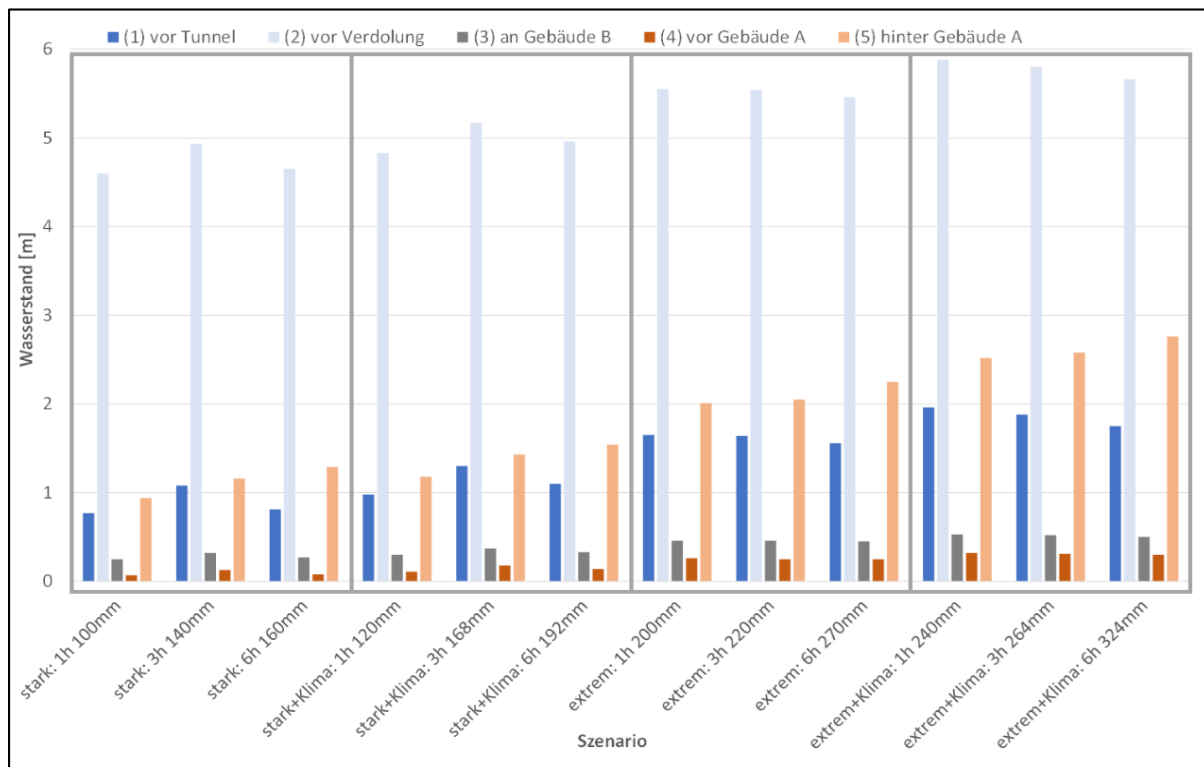
Die Wasserstandshöhen am Punkt 5 entsprechen wahrscheinlich nicht den im Ereignisfall eintretenden Verhältnissen. Es muss davon ausgegangen werden, dass ab einer bestimmten Wasserstandshöhe die Rolltore durch den Staudruck eingedrückt werden (vgl. Abbildung 56, linkes Foto), so dass das Wasser in das Gebäude A eindringen kann.

Abbildung 57: Überflutungsflächen und -tiefen bei einer Niederschlagshöhe von 120 mm bei Zeitintervallen von 1, 3 und 6 Stunden



Der Vergleich der Wasserstände an ausgewählten Beobachtungspunkten zeigt einige grundsätzliche Zusammenhänge auf (**Abbildung 58**).

Abbildung 58: Vergleich der Simulationsrechnungen für ausgewählte Punkte

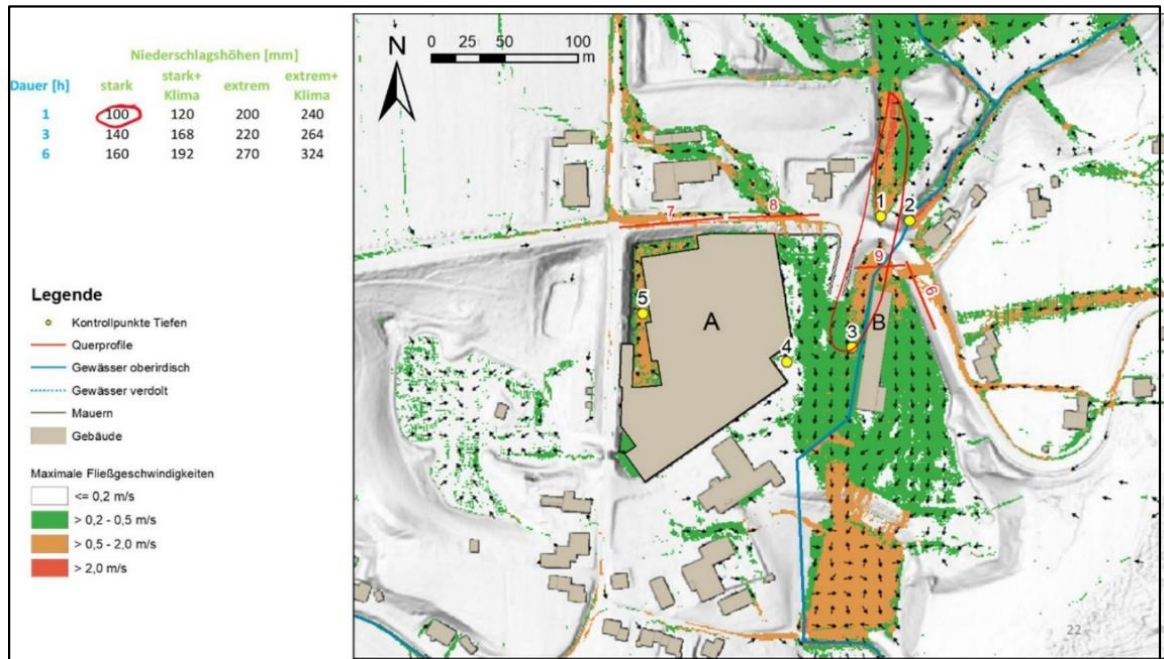


Quelle: A. Assmann, K.-E. Köpke

Die hohen Wassertiefen vor der Verdolung ergeben sich aus dem Einstau des Wassers. Dies zeigt, welche Bedeutung künstliche Strukturen und deren Stabilität bei Starkregenereignissen haben. Bei den intensiven Szenarien sind die Maxima vor dem Tunnel bei 3 Stunden. Im Gegensatz dazu sind bei den 1 h-Ereignissen noch gewisse Retentionseffekte spürbar. Nur an Senkpunkten (hinter Gebäude A, Punkt 5) kommt es zu einer kontinuierlichen Füllung, wobei real das Wasser in das Gebäude ablaufen würde, da hier die Wanddichtung anders als im Model versagen würde.

Neben den Überflutungsflächen und Wassertiefen wurden auch die Strömungsgeschwindigkeiten exemplarisch ermittelt und lokal zugeordnet (**Abbildung 59**). Schon bei einer Niederschlagshöhe von 100 mm in einer Stunde können für den hier betrachteten Fall Strömungsgeschwindigkeiten von 2 m/s erreicht werden (orange Bereiche). Dies wird vor allem dann kritisch, wenn sich an den Punkten 1 und 2 Treibgut ansammelt und die Straßenunterführung und die Verdolung des Baches verschließen. In diesem Fall erhöht sich die Staudruck auf die Straße und gefährdet deren Stabilität.

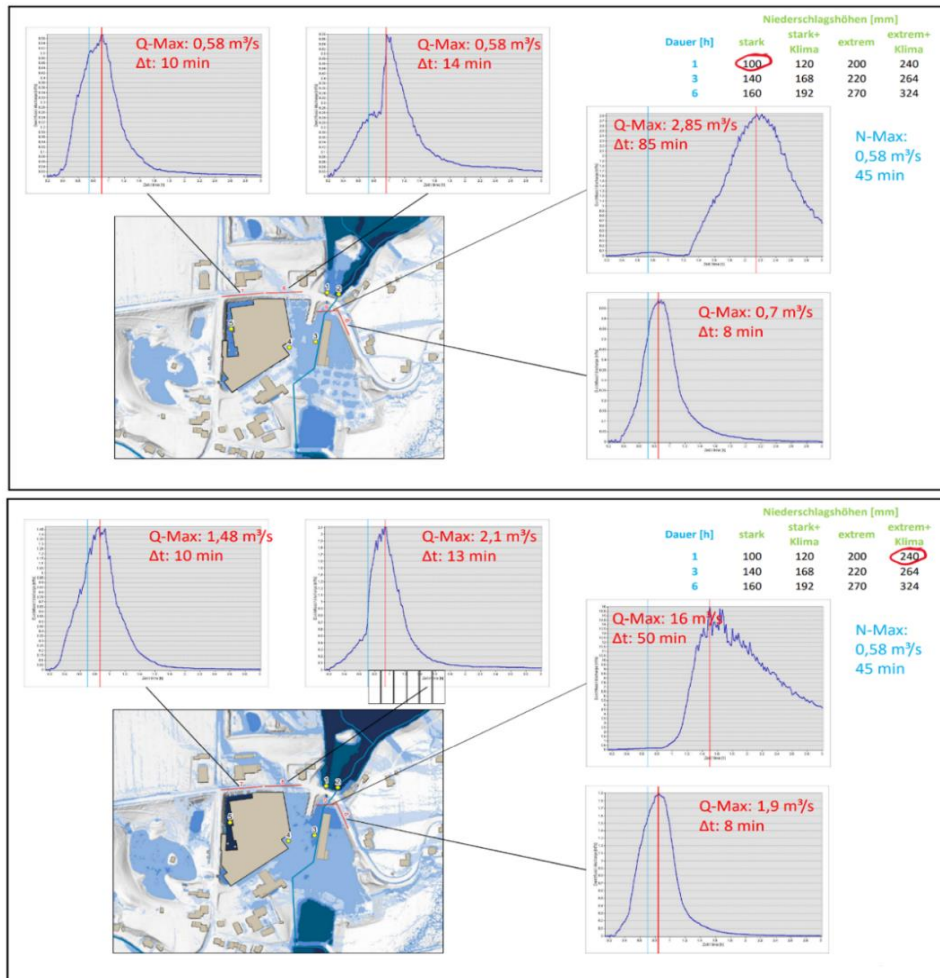
Abbildung 59: Örtliche Strömungsgeschwindigkeiten für ein Regenereignis mit 100 mm Niederschlagshöhe und der Dauer von 1 Stunde



Quelle: A. Assmann

Welche maximalen Volumenströme sich an bestimmten Stellen des Betriebsgeländes einstellen können, zeigt die **Abbildung 60**, wobei der Vergleich mit Niederschlagshöhen von 100 und 240 mm bei einer Dauer von einer Stunde durchgeführt wurde. Von besonderer Bedeutung für den Betrieb ist die Zeit vom Auftreten der maximalen Niederschlagsmenge bis zum Eintreffen der maximalen Abflussmenge am Betriebsgelände. Hier vergehen je nach Niederschlagshöhe nur wenige Minuten, so dass im realen Fall fast keine Reaktionszeit bleibt. Vor der Straßenunterführung auf der Nordseite der Straße (Punkte 1 und 2) bildet sich ein Wasserrückhalt, der dazu führt, dass nur in diesem Bereich eine längere Verzögerung eintritt.

Abbildung 60: Maximale Volumenströme und Verzugszeiten zwischen Eintritt der maximalen Niederschlagsmenge und dem Eintreffen der maximalen Abflussmenge an verschiedenen Orten des Betriebsgeländes.



Quelle: A. Assmann

5.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Niederschlags-/Abflusssimulationen

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Untersuchungen können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die größten Überflutungen treten bei Dauerstufen zwischen 1 und 3 Stunden auf.
2. Die höchsten Wassertiefen werden erst beim 3 Stunden-Szenario erreicht, was durch Retentionseffekte im Einzugsgebiet bedingt ist.
3. Die Verzögerung gegenüber dem Niederschlag beträgt meist weniger als 15 Minuten.
4. Es existiert eine relevante Starkregengefährdung für den Betrieb.
5. Es gibt deutliche Auswirkungen durch die oberhalb liegende Verkehrsinfrastruktur. Daraus resultiert ein verändertes Abflussverhalten (teils Rückhaltewirkung aber auch eine zusätzliche Gefährdung bei einem möglichen Versagen).

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die ermittelten Überflutungstiefen und die damit verbundenen Auswirkungen auf den Betrieb im Bereich beobachteter Ereignisse liegen. Die Niederschlagshöhen scheinen somit realistisch gewählt.

6 Prüfung der Möglichkeiten und Notwendigkeit des Einbezugs weiterer Gefahrenquellen

6.1 Hagel

In der TRAS 310 wird Hagel als weitere umgebungsbedingte Gefahrenquelle genannt, die in direktem oder indirektem Zusammenhang mit Niederschlägen und Hochwasser steht. Allerdings wird in Kapitel 3 der TRAS 310 festgestellt: „Für diese Gefahrenquellen standen für eine Bewertung im Rahmen der Ausarbeitung dieser TRAS noch keine belastbaren Informationen zur Verfügung. Die Betreiber müssen gemäß § 3 Absatz 3 StörfallV auch diese Gefahrenquellen grundsätzlich berücksichtigen.“ Insbesondere wegen des Fehlens einer belastbaren Gefahrenkarte wurden konkrete Sicherheitsanforderungen bzgl. der Gefahrenquelle Hagel in der TRAS 310 nicht gestellt.

Vor diesem Hintergrund wird in den folgenden Abschnitten überprüft, ob neue wissenschaftliche oder behördliche Erkenntnisse vorliegen, die als Grundlage für konkrete Anforderungen herangezogen werden können.

Hagelkörner sind feste Niederschlagsteilchen aus Eispartikeln, die ausschließlich in Gewittersystemen entstehen. Nach der World Meteorological Organization (WMO, 1975) werden Eispartikel ab einer Größe von 5 mm als Hagel definiert. Kleinere Körner werden im Allgemeinen als Graupel bezeichnet. Für die Entstehung von Hagel wird ein schnelles Wachstum der Eispartikel benötigt. Die besten Bedingungen finden sich hierfür üblicherweise in den Aufwindbereichen starker konvektiver Niederschlagsgebiete, die in Deutschland vorwiegend in den Sommermonaten von durchziehenden Kaltfronten hervorgerufen werden.

Hagel entsteht in Gewitterwolken, wobei die sich bildenden Eiskristalle durch Aufwinde länger in der Atmosphäre bleiben und langsam wachsen. Werden diese zu schwer, fallen sie mit hoher Geschwindigkeit zu Boden. Hagelschlag ist ein kleinräumiges Ereignis. Etwa 52 % der Zugbahnen von Niederschlagsgebieten mit Hagel haben eine Länge von 20 – 40 km (Faust u. Rädler, 2018). Die Wirkung von Hagel hängt neben der Anzahl der Hagelkörner entscheidend von der Größe bzw. Masse sowie von der Fallgeschwindigkeit ab. Hieraus kann auch die Energie beim Aufprall berechnet werden. **Tabelle 12** fasst in Anlehnung an eine Skalierung von Kaschuba (2008) die relevanten Korngrößenbereiche zusammen.

Das größte jemals in Deutschland registrierte Hagelkorn maß einen Durchmesser von 14,1 cm und hatte eine maximale Geschwindigkeit von 186 km/h (6. August 2013; Ortsteil Udingen der Gemeinde Sonnenbühl).

Tabelle 12: Vereinfachte Skala für Hagelschlagwirkungen in Anlehnung an M. Kaschuba (2008)

Durchmesser mm	Geschwindigkeit Km/h	Energie J	Vergleichsgröße	Schadenspotential
40 - 50	98 -110	11,4 – 28,1	Tischtennisball, Hühnerei	Großer Hagel: Dellen und Lackschäden an Fahrzeugen, Durchschlagen von Glasflächen (Gewächshäuser), Zerschlagung von Kunststoffteilen
55 - 70	115- 130	40,8 – 107,5	Billardkugel, Tennisball	Starkhagel: Beschädigung von Autoscheiben, Dachfenstern und Dachziegeln, Zerschlagung von Kunststoffteilen, Verletzungsgefahr für Menschen
75 - 100	134 - 155	140,5 – 445,5	Baseball, Apfel, Faust, Gänseei	sehr großer Hagel: katastrophale Auswirkungen, Durchschlagen von Fenstern und Welldächer, Abschlagen großer Äste, hohe Verletzungsgefahr für Menschen
> 105	159 – > 200	542,7 – > 3000	Schwanenei, Kokosnuss	Riesenhagel: Schäden wie Tornado, Zerstörung ganzer Dächer

6.1.1 Tendenzen der Entwicklung des Hagelschlags

Hagelereignisse, die meist in Begleitung von Gewitterstürmen vorkommen und oft große Schäden anrichten, haben in Deutschland und Europa nach Untersuchungen der Versicherungswirtschaft in den letzten 30 Jahren deutlich zugenommen. Infolgedessen geht die Versicherungswirtschaft davon aus, dass Hagelereignisse aufgrund des Klimawandels wahrscheinlich auch in Zukunft häufiger auftreten werden (Weller et al., 2012).

Für das Jahr 2019 betragen die versicherten Sturm- und Hagelschäden in Deutschland für Gebäude, kaskoversicherte Fahrzeuge und für die Landwirtschaft rund 1,8 Mrd. € (GDV, 2020).

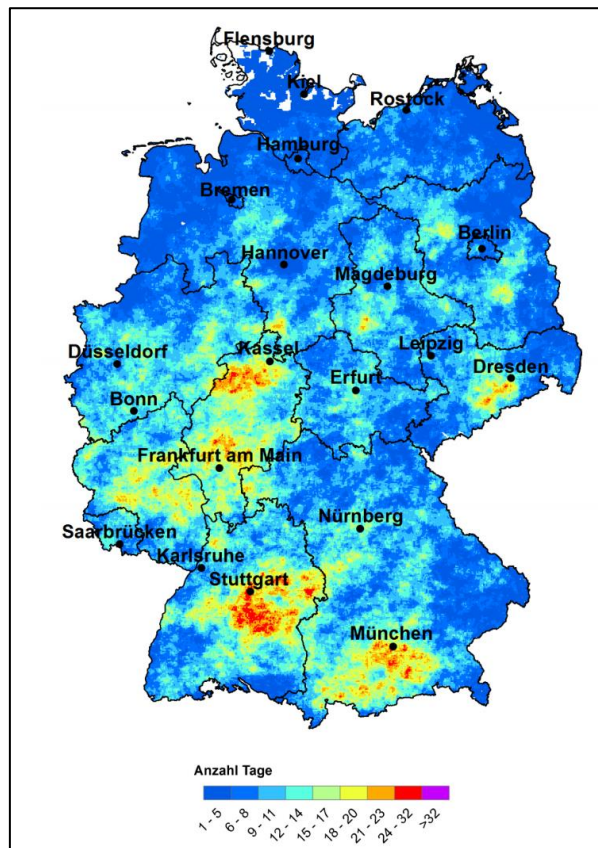
Aufgrund der hohen Gefährdung durch Hagel wurden in der Schweiz Gefahrenkarten für Hagel für verschiedene Wiederkehrperioden entwickelt (50 Jahre, 100 Jahre). Hierbei wurden die Gebiete abgegrenzt, in denen Hagelkörner mit unterschiedlichen Durchmessern zu erwarten sind. So sind für eine Wiederkehrperiode von 100 Jahren - grob gesagt - auf der Alpensüdseite Korngrößen von 1 – 3 cm zu erwarten, während auf der Alpennordseite die Korngrößen eher zwischen 3 und 4 cm liegen, wobei auf beiden Seiten des Alpenkamms eine weitere Unterteilung nach Hagelgrößen vorgenommen wurde. Eine vergleichbare und belastbare Hagel-Gefahrenkarte wurde für Deutschland bislang nicht entwickelt.

Hagelschlag zeichnet sich durch eine geringe horizontale Ausdehnung aus. Die Erfassung von Hagel ist daher aufgrund der begrenzten Beobachtungssysteme am Boden nur sehr eingeschränkt möglich. Weil Hagelschlag meist mit Gewitterstürmen auftreten, ist jedoch eine Detektion mit Hilfe von Niederschlagsradaren möglich. Allerdings ist eine unmittelbare Ableitung der Hagelintensität mit Hilfe der Radarreflexionssignale aufgrund der zahlreichen Einflussparameter bislang erfolglos geblieben.

Deshalb wurden im Rahmen des Projektes HARIS-CC (Hail Risk and Climate Change) am Karlsruher Institut für Technologie die Daten der Radarmessungen des DWD mit den Schadendaten der Versicherer kombiniert, um daraus die Hagelzüge der vergangenen Jahre zu

ermitteln. Weil Hagel nur mit einer großen Vertikalausdehnung entstehen kann, werden für die Untersuchungen nur die Daten der Radarmessungen mit hoher Radarreflektivität verwendet. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in **Abbildung 61** dargestellt (Puskeiler, 2013). Wie zu erkennen ist, nimmt die Anzahl der Tage, bei denen Hagelschlag aufgetreten ist, tendenziell von Nordosten nach Südwesten zu. Daneben sind jedoch auch ausgeprägte Maxima in verschiedenen Regionen zu erkennen.

Abbildung 61: Anzahl der Tage, an denen Hagelsignale aus Radardaten des DWD zwischen 2005 und 2011 detektiert wurden



Quelle: M. Puskeiler (2013)

Eine weitere Gefahrenkarte wurde von einer Versicherungsgesellschaft erstellt, die die Häufigkeit von Hagelschlag mit den resultierenden Schadenpotentialen berücksichtigt. Danach wurden Hagelzonen mit den Risikomerkmale gering, mäßig, erhöht und hoch eingeführt. Auch diese Gefahrenkarte wurde u.a. auf der Grundlage von Schadenhöhen entwickelt. Ernteeinbußen in der Landwirtschaft, Gebäude-, Infrastruktur- und Fahrzeugschäden waren die Grundlagen für die Erstellung der Hagelgefahrenkarten der Versicherer.

Auch der DWD arbeitet derzeit an einer Darstellung der räumlichen Verteilungen von Hagelereignissen für Deutschland. Dabei kommen sowohl Radar- und Beobachtungsdaten als auch Schadendaten der Versicherungswirtschaft zum Einsatz. Eine ausschließlich auf meteorologischen Daten entwickelte Gefahrenkarte kann offenbar bislang nicht erstellt werden.

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass in Deutschland bis heute keine einheitliche und verbindliche Gefahrenkarte für Hagel erarbeitet werden konnte (BBSR, 2015). Die bislang vorliegenden Karten sind unter Berücksichtigung der als Grundlagen herangezogenen Schäden (Landwirtschaft, Fahrzeug-, Infrastruktur und Gebäudeschäden) für eine Anwendung auf Anlagen, die der StörfallV unterliegen, kritisch zu bewerten.

6.1.2 Projektionen des Hagelschlags

Derzeit wird versucht, die durch Hagel verursachten Schäden mit den verschiedenen Klimasimulationen zu verknüpfen, um Aussagen über Veränderungen künftiger Ereignisse zu erhalten. Darüber hinaus sollen die Untersuchungen in der Zukunft noch auf Nordamerika ausgeweitet werden. Anlass ist eine Studie, in der Schadendaten und meteorologischen Daten statistisch ausgewertet wurden, wobei die Jahresschäden verursacht durch Schwergewitter auf das Niveau heutiger zerstörbarer Werte normalisiert wurden. Die Untersuchungen ergaben, dass die Zunahme der Jahresschäden, vor allem durch klimatische Veränderungen verursacht wurde (Sander et al., 2013).

Die Simulation von Hagelereignissen mit regionale Klimamodelle ist aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren komplex, so dass Aussagen über zukünftige Trends der Hagelhäufigkeit bislang nur indirekt möglich sind. Derzeit liegen nur wenige Studien über die Entwicklung des Hagelrisikos vor. Sie deuten auf eine leichte Zunahme des Hagelpotentials für die Periode 2021 bis 2050 hin, wobei die Änderungen nur im Nordwesten und Süden Deutschlands statistisch signifikant sind (Mohr et al., 2015). Dabei projizieren die einzelnen Modelle/ Szenarien eine Zunahme zwischen 4 und 41%.

Ob Hagelschlag zu einer sicherheitsbedeutsamen Störung von Anlagen in Betriebsbereichen führen kann, ist nicht bekannt. Potentiell gefährdet erscheinen Glasapparaturen, die wiederum in Gebäuden mit großen Fensterflächen untergebracht sind. Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR)-Messeinrichtungen, die ungeschützt an Anlagen installiert sind, können ebenso betroffen sein. Auch Biogasanlagen mit Membranabdeckungen gehören zu den potentiell gefährdeten Anlagen.

6.2 Hitzeperioden (Heiße Tage und Tropennächte)

6.2.1 Tendenzen der bisherigen Entwicklung von Hitzeperioden

Hitzeperioden sind definiert als Aufeinanderfolge von mindestens drei Tagen mit einer Tageshöchsttemperatur $> 30\text{ °C}$ und einer Tagestiefsttemperatur $> 20\text{ °C}$ (BMVI, 2020).

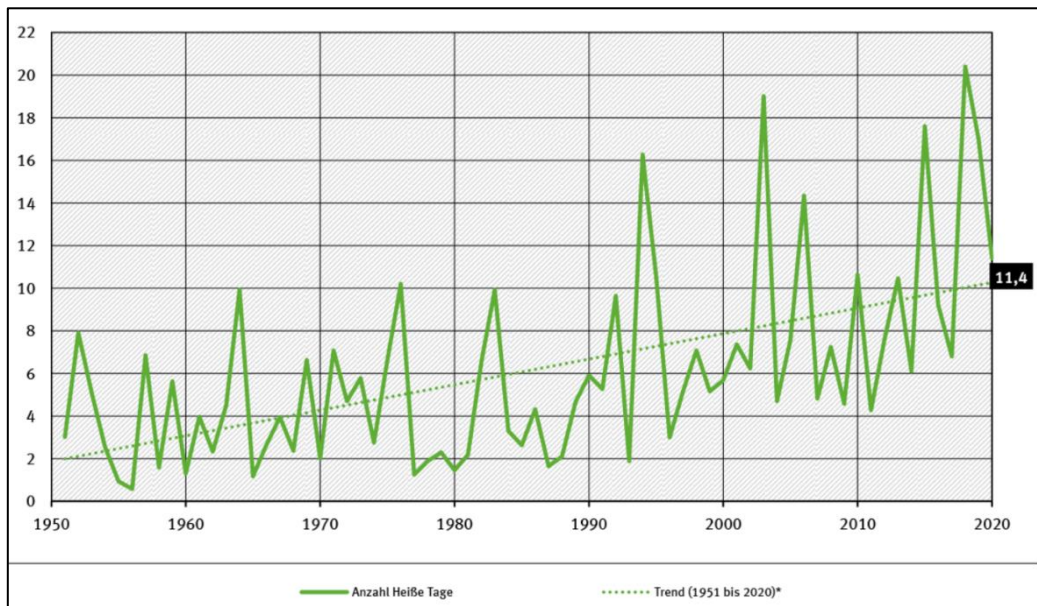
Nach Untersuchungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD ist, wie die **Abbildung 62** zeigt, die Anzahl heißer Tage (Tagesmaximum der Lufttemperatur $\geq 30\text{ °C}$) gemittelt über das ganze Bundesgebiet seit den 1950er-Jahren von etwa drei Tagen im Jahr auf derzeit durchschnittlich 11,4 Tage im Jahr angestiegen (DWD, 2020a. Im Jahr 2003 wurde erstmals ein Spitzenwert von 19 Tagen erreicht, der allerdings schon im Jahr 2018 mit 20 Tagen übertroffen wurde.

In einem vorläufigen Rückblick auf den Sommer 2018 schreibt der DWD am 3.8.2018 (Imbery et al., 2018):

„Charakteristisch waren bis zur ersten Julihälfte viele Tage mit hohen, aber nicht sehr hohen Temperaturen in ganz Deutschland, besonders im Norden und Osten. Erst in der zweiten Julihälfte erlebte Deutschland eine erste Hitzewelle mit anhaltend flächendeckenden Tagesmaxima über 30 °C , ab der letzten Juliwoche auch großräumig über 35 °C .“

Festzuhalten bleibt somit, dass die Hochttemperaturperiode mit Temperaturen über 35 °C mindestens 2 Wochen angehalten hat.

Abbildung 62: Anzahl der Tage mit einer maximalen Lufttemperatur über 30°C (DWD, 2020a)

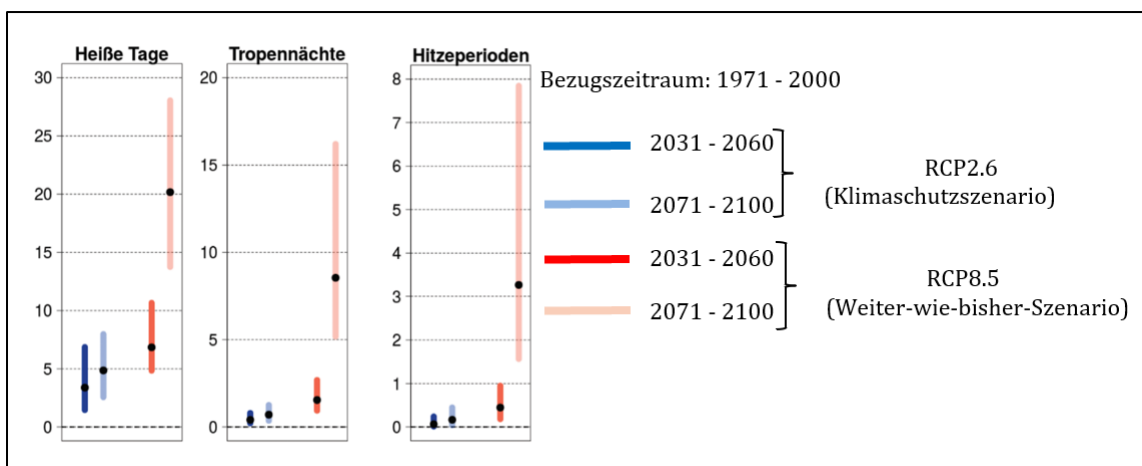


Quelle: DWD (2020a)

6.2.2 Projektionen von zukünftigen Hitzeperioden

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur wurde untersucht, wie sich die Zahl der heißen Tage, der Tropennächte sowie die Zahl der Hitzeperioden in der nahen (2031 - 2060) und fernen Zukunft (2071 - 2100) bezogen auf die Referenzperiode 1971 - 2000 verändern (BMVI, 2020). Wie in **Abbildung 63** zu erkennen ist, wird je nach Klimaszenario die Zahl der heißen Tage und Tropennächte sowohl für die nahe als auch für die fernere Zukunft ansteigen. Allerdings wurde schon 2018 mit 21 heißen Tagen eine Zahl erreicht, die erst für die ferne Zukunft für das Weiter-wie-bisher-Szenario erwartet wurde.

Abbildung 63: Projizierte Klimaänderungen für die Zahl heißer Tage, Tropennächte und Hitzeperioden (Auszug aus: BMVI, 2020)



Quelle: BMVI (2020)

In Folge des Anstiegs heißer Tage und Tropennächte ist davon auszugehen, dass auch die Häufigkeit von mindestens drei Tage andauernden Hitzeperioden ansteigt. Bei unverändertem

Ausstoß von Klimagasen (Weiter-wie-bisher-Szenario) ist schon für die nahe Zukunft alle 5 – 21 Jahre mit Hitzeperioden zu rechnen. In der fernen Zukunft kann ein solches Ereignis fast jedes Jahr eintreten. Keine Aussagen liefern diese Erkenntnisse jedoch über die Veränderung der Dauer einer Hitzeperiode. Die Definition der Hitzeperiode beschränkt sich nur auf die Aussage, dass diese mindestens 3 Tage anhält. Wie zuvor schon erläutert wurde, hielt die Hitzeperiode mit Temperaturen über 35 °C im Jahr 2018 mindestens 2 Wochen an.

6.2.3 Zwischenergebnis bzgl. der Einbeziehung weiterer Gefahrenquellen

Obwohl die Gefahrenquelle Hagel in der TRAS 310 als zu beachtende Gefahrenquelle genannt wird, lagen zum Zeitpunkt der Verabschiedung der TRAS 310 im Jahr 2011 keine belastbaren Informationen vor. Dies bezieht sich vor allem auf das Fehlen einer Gefahrenkarte. Wie sich im Rahmen der Überprüfung der TRAS 310 ergab, ist die Erstellung einer Gefahrenkarte aufgrund der Kleinräumigkeit eines Hagelereignisses mit Hilfe der begrenzten Zahl von Beobachtungssystemen am Boden derzeit kaum möglich.

Auch die direkte Messung der Hagelintensität mit Niederschlagsradarsystem blieb bislang erfolglos. Vor diesem Hintergrund konnten von der Versicherungswirtschaft bislang nur Gefahrenkarten entwickelt werden, die einerseits auf Messungen und andererseits auf den entstandenen Schäden (Landwirtschaft, Fahrzeug-, Infrastruktur und Gebäudeschäden) basieren. Auch der DWD nutzt Radar- und Beobachtungsdaten in Verbindung mit Schadendaten der Versicherungswirtschaft zur Erstellung einer Gefahrenkarte. Eine ausschließlich auf meteorologischen Daten entwickelte Gefahrenkarte kann offenbar bislang nicht erstellt werden. Vor diesem Hintergrund können Anforderungen, die an eine Gefahrenkarte angepasst sind, derzeit nicht gestellt werden.

Wie die bisherige Entwicklung der Anzahl heißer Tage sowie die entsprechenden Projektionen gezeigt haben, werden auch in Zukunft Hitzeperioden zunehmen. Ob Hochtemperaturperioden in Deutschland Auswirkungen auf die Sicherheit von Anlagen, in denen gefährliche Stoffe (z.B. thermisch instabile Stoffe) vorhanden sind, haben können, ist bislang nicht systematisch untersucht worden. Dennoch gibt es einzelne Berichte, die dies nahelegen (ZEMA, 2021).

Nach einem Bericht des US Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB) entstand in einer Fabrik in St. Louis in einer Propylen-Stahlflasche ein Überdruck durch eine hohe Umgebungstemperatur (36°C) in Verbindung mit hoher Sonneneinstrahlung, wodurch ein Überdruckventil öffnete, was zu einer Freisetzung des Propylens führte. Es wird vermutet, dass sich durch eine statische Entladung das Gas entzündete, was zu einer Überhitzung weiterer Gasflaschen führte und die gesamte Lagerhalle in Brand setzte (CSB, 2006).

In Kapitel 5.4 wurde ein erster Vorschlag zur Berechnung der Temperaturentwicklung in Behältern und Tanks zur Lagerung von flüssigen Chemikalien unter dem Einfluss heißer Tage und tropischer Nächte vorgestellt.

Es wird empfohlen, die Veränderungen der Maximaltemperaturen aufgrund des Klimawandels im Rahmen der Umsetzung nach § 3 StörfallV zu berücksichtigen. Eine eigene Technische Regel erscheint derzeit nicht erforderlich.

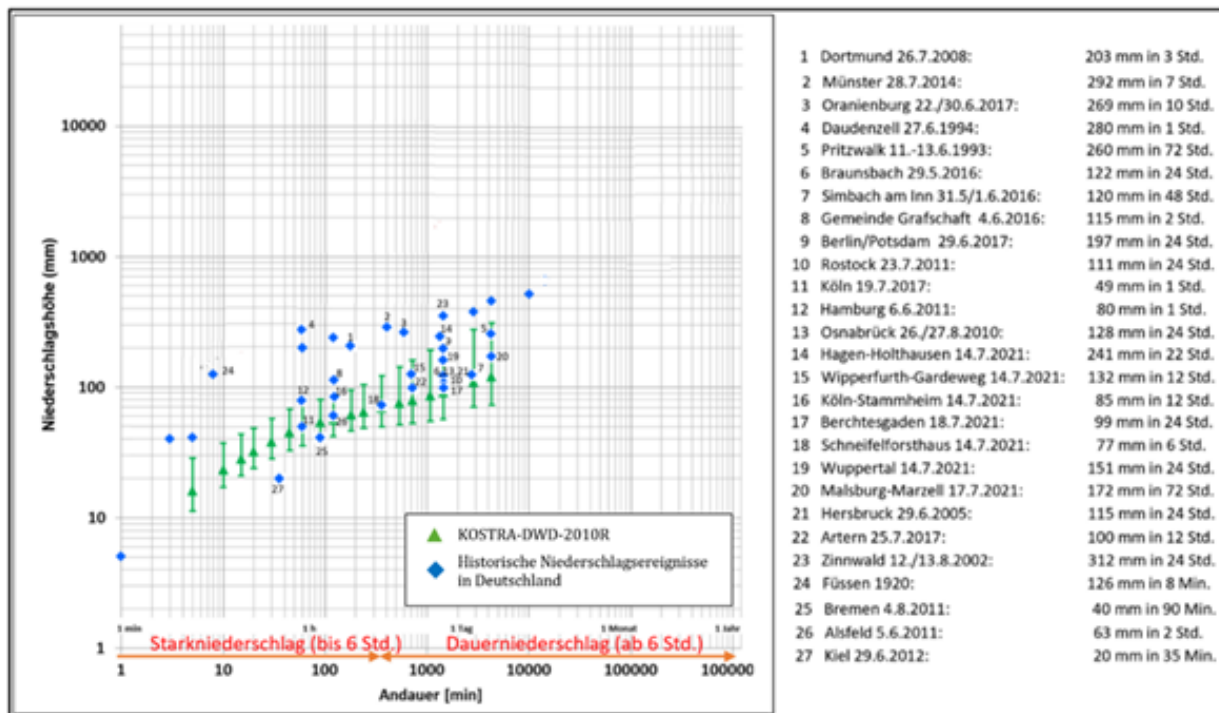
7 Empfehlungen zur Fortschreibung der TRAS 310

Im Verlauf der Überarbeitung der Technischen Regeln für Anlagensicherheit wurden zahlreiche Erkenntnisse und Empfehlungen in den zuständigen Arbeitskreis der Kommission für Anlagensicherheit eingebracht. Dies betraf vor allem die Festlegung von Niederschlagshöhen als Grundlage für die Risikoanalyse gegenüber Starkniederschlagsereignissen. Ausgelöst durch die Ereignisse an Erft und Ahr im Juli 2021 wurde kritisch hinterfragt, ob die im KOSTRA-DWD-2010R angegebenen Niederschlagshöhen für verschiedene Jährlichkeiten und Andauern noch als Grundlage für die Gefahrenquellenanalyse herangezogen werden können (vgl. Abbildung 6). Bislang war in der TRAS 310 in der Fassung vom 15. Dezember 2011 festgelegt, die Niederschlagshöhen für ein 100-jährliches Ereignis, wie sie im KOSTRA-DWD-2010R ausgewiesen sind, als Grundlage für die Risikoanalyse für Anlagen, die der StörfallV unterliegen, heranzuziehen. Offen blieb die Niederschlagsdauer für die Risikoanalyse. Damit stellten sich im Rahmen der Überarbeitung der TRAS 310 u.a. folgende Fragen:

1. Da die Werte im KOSTRA-DWD-2010R deutlich unter den real eingetretenen Niederschlagshöhen liegen, welche Niederschlagshöhen sind dann alternativ für die Risikoanalyse anzusetzen?
2. Welche Niederschlagsdauer hat erfahrungsgemäß die höchsten Folgewirkungen?
3. Ist eine regionalisierte Ermittlung der Niederschlagshöhen sinnvoll und stehen solche Informationen überhaupt zur Verfügung?

Zur Verdeutlichung der Problematik wurde die Darstellung in Abbildung 6 zunächst um zahlreiche weitere Niederschlagsereignisse erweitert, für die gilt: größer als 15 mm in 1 Stunde oder größer als 20 mm in 6 Stunden. In der **Abbildung 64** wurden u.a. auch die Starkniederschläge vom Juli 2021 an der Ahr und der Erft sowie in Hagen berücksichtigt. Auch diese Ereignisse liegen deutlich über den 100-jährlichen Starkniederschlagshöhen (DWD, 2021).

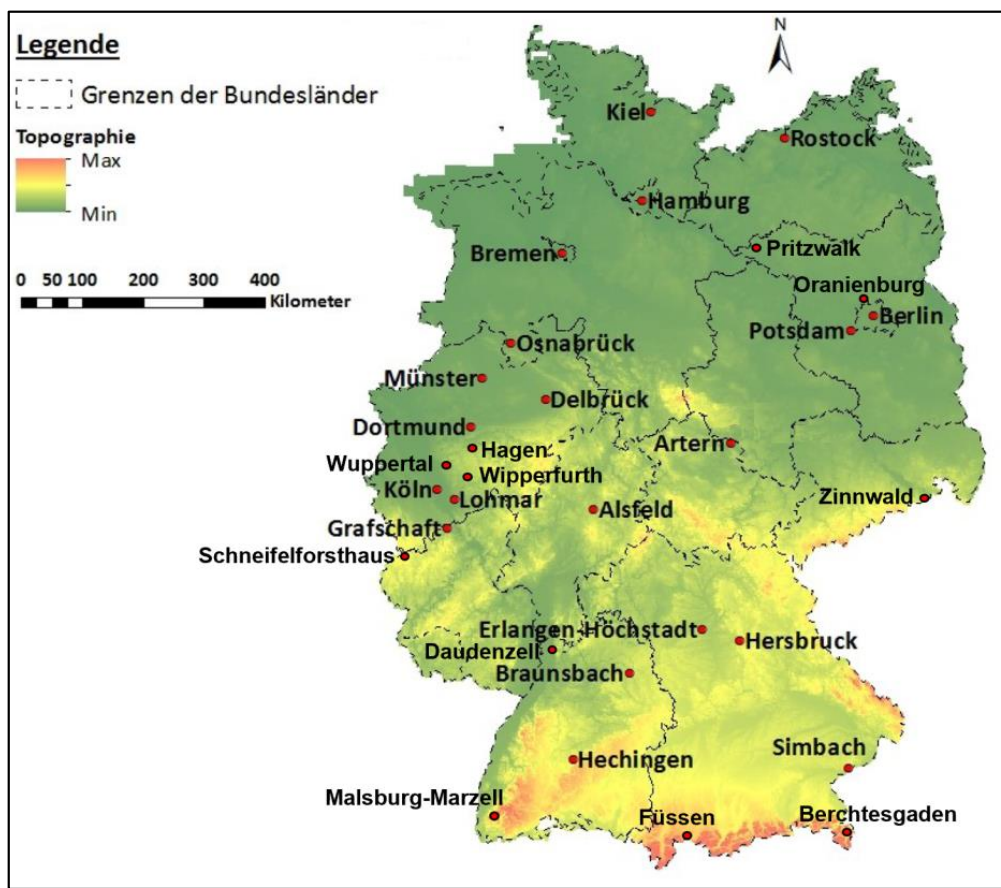
Abbildung 64: Gegenüberstellung der beobachtete Niederschlagshöhen in Deutschland und der Welt (Erweiterung der Abbildung 6 dieses Forschungsberichtes) mit den 100-jährlichen Niederschlagshöhen nach KOSTRA-DWD-2010R



Quelle: K.-E. Köppke in Anlehnung an KLIWA (2019)

Darüber hinaus sind die Andauer entsprechend der Definition des DWD als Starkniederschläge (bis 6 Stunden) und Dauerniederschläge (ab 6 Stunden) gekennzeichnet. Abbildung 64 verdeutlicht, dass nicht nur die je beobachteten Niederschlagshöhen, sondern auch die Niederschlagshöhen zahlreicher weiterer Starkregenereignisse über den Mittelwerten der 100-jährlichen Niederschlagshöhen im KOSTRA-DWD-2010R liegen. Die regionale Zuordnung der aufgelisteten Niederschlagsereignisse zeigt die **Abbildung 65**. Es wird deutlich, dass Starkniederschlagsereignisse überall in Deutschland auftreten können. Nach Erkenntnissen des DWD gilt: Je kürzer die Dauerstufe < 12h, desto gleichmäßiger ist die Verteilung der Starkniederschlagsereignisse. Erst bei Dauerstufen > 12h spielt die Orographie eine größere Rolle. Hier sind die Mittelgebirgsregionen sowie das Alpenvorland am stärksten gefährdet (Becker, 2019).

Abbildung 65: Regionale Zuordnung der ausgewählten Starkregenereignisse

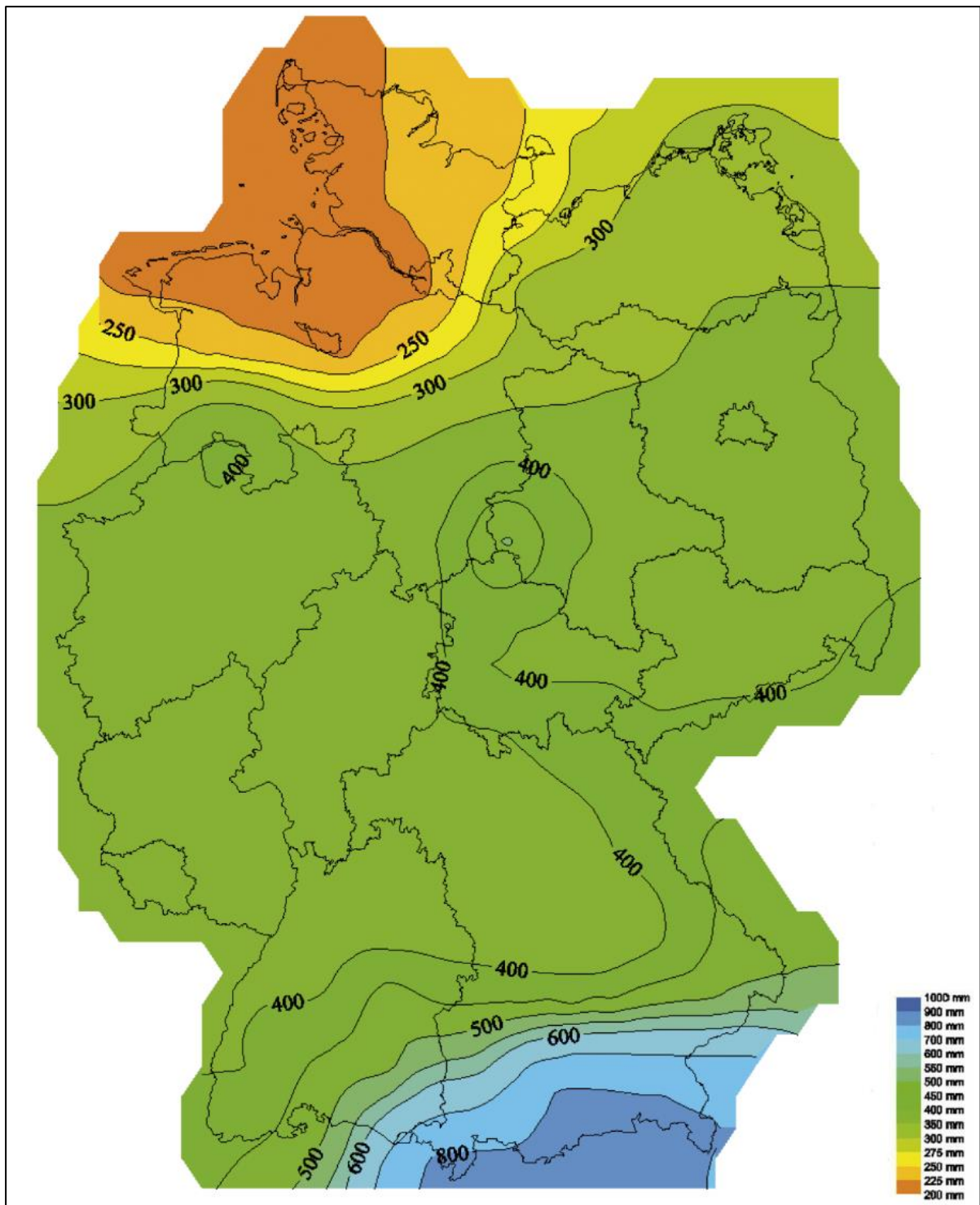


Quelle: K.-E. Köpke in Anlehnung an Kind et al. (2019)

Neben KOSTRA-DWD-2010R hat der DWD im Rahmen eines Projektes bezüglich Starkniederschläge im urbanen Raum eine physikalisch begründete Abschätzung der maximalen Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland vorgenommen. Hierbei ist für die Maximierung der Niederschlagshöhe die Maximierung des Wassergehalts in der Atmosphäre von zentraler Bedeutung. Die maximierten Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland (MGN) sind somit nicht Ergebnis einer statistischen Analyse von Starkniederschlagsereignissen, sondern sind Abschätzungen der vermutlich größten Gebietsniederschlagshöhe auf Grundlage physikalisch-klimatologischer Einflussfaktoren unter der Annahme stationärer Klimaverhältnisse. Für die Untersuchungen des DWD wurden zahlreiche vieljährigen Reihen der Niederschlagshöhe und lange Reihen der stündlichen Taupunkttemperatur herangezogen. Eingesetzt wurde darüber hinaus eine von der World Meteorological Organization (WMO) empfohlenen wissenschaftlichen Methode (WMO, 1986). Angaben zur Auftretenswahrscheinlichkeit der maximierten Gebietsniederschlagshöhe sind nicht möglich. Die ermittelten Niederschlagshöhen sind abhängig von der Größe und Lage des Gebietes sowie von der Niederschlagsdauer (Malitz und Rudolf, 2008).

Abbildung 66 zeigt, dass über weite Gebiete Deutschlands Niederschlagshöhen von bis zu 400 l/m² innerhalb von 24 Stunden möglich sind. Weitaus höhere Niederschlagsmengen können im Voralpenraum und in den Alpen niederkommen.

Abbildung 66: Regionalisierte maximierte Gebietsniederschlagshöhen der Dauerstufe 24h für Gebiete von höchstens 25 km² Größe



Quelle: Malitz und Rudolf, DWD (2008)

Eine aufschlussreiche Gegenüberstellung zweier Niederschlagsereignisse zeigt **Tabelle 13**. Jeweils für ein Starkregen- und ein Dauerregenereignis sind die tatsächlich gemessenen Niederschlagshöhen, der nach extremwertstatistischer Analyse errechneten KOSTRA-Werten für ein 100-jährliches Ereignis sowie den Niederschlagshöhen nach physikalisch begründeter Abschätzung zusammengefasst (Malitz, 1999).

Tabelle 13: Gegenüberstellung von gemessenen Werten, KOSTRA-Wert und MGN-Wert an zwei Beispielen

Aus Niederschlagsmessungen	Aus extremwertstatistischer Analyse Für Jährlichkeit 100 a	aus physikalisch begründeter Abschätzung
Kleines konvektives Ereignis 1 Stunde 25 km ² 180 mm Daudenzell (Neckar-Odenwald, 27.6.194)	D= 1 h punktuell 54 mm ± 20%	D = 1 h 25 km ² 250 mm
Dauerregen 72 Stunden 100 km ² 260 mm Pritzwalk (Prignitz) 11.-13.6.1993	D = 72 h punktuell 120 mm ± 20%	D = 72 h 100 km ² 340 mm* (*Wert aus einer früheren Darstellung der maximalen Gebietsniederschläge (Malitz, 1999))
Messwert	KOSTRA-Wert	MGN-Wert

Der exemplarische Vergleich verdeutlicht noch einmal die grundsätzliche Problematik der öffentlich zugänglichen Informationen bzgl. der Niederschlagsintensität. Die Werte des KOSTRA-DWD-2010R sind gegenüber den tatsächlichen Niederschlagshöhen zu niedrig und die MGN-Werte zu hoch.

Zur Schließung die Lücke wurden die folgenden zwei Ansätze betrachtet:

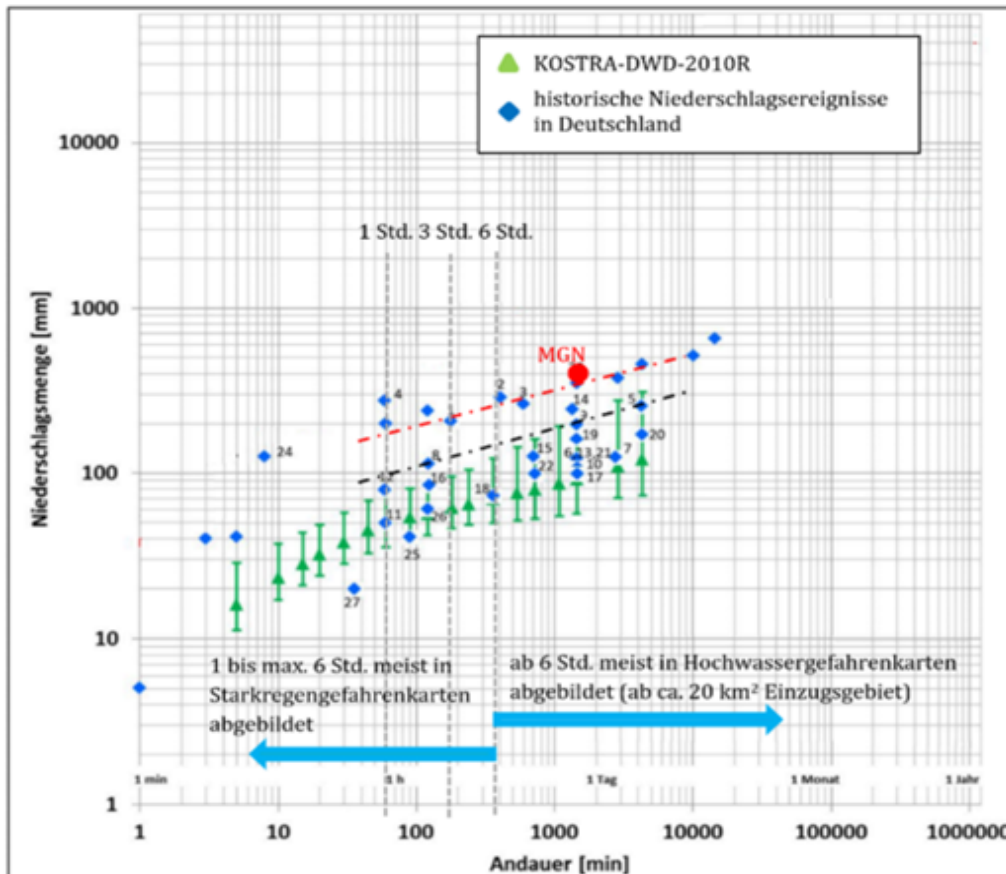
1. Ableitung von Niederschlagshöhen für bestimmte Zeitintervalle aus realen Ereignissen
2. Heranziehung von PEN-Werten

7.1 Ableitung von Niederschlagshöhen aus realen Ereignissen

Wie die Erfahrungen von Experten zeigen, entsteht das höchste durch Starkregen ausgelöste Gefahrenpotential bis maximal 6 Stunden. Die Abflussmengen kleiner Bäche steigen in dieser Zeit deutlich an. Die Einzugsgebiete liegen meist < 10 km² in Einzelfällen bis 20 km². Längere Niederschlagsandauern (ab ca. 6 Stunden) verursachen meist geringere Abflüsse in kleineren Bächen. Aufgrund der größeren Einzugsgebiete (ab ca. 20 km²) lösen Dauerniederschläge jedoch Hochwasser an größeren Fließgewässern aus. Für die Durchführung einer Gefahrenquellenanalyse an größeren Flüssen liegen für mehrere Jahrzehnte z.B. Pegelmessungen vor, die statistisch ausgewertet und z.B. zur Erstellung von Gefahrenkarten genutzt werden. All diese Informationen liegen für kleinere Bäche i.d.R. nicht vor, so dass sich Betreiber von Betriebsbereichen auch nicht an Gefahrenkarten für Sturzflutereignisse orientieren können. Um dennoch verwertbare Aussagen für eine Risikoanalyse zu erhalten, bleibt dem Anlagenbetreiber nur die Durchführung einer Niederschlags-/Abflusssimulation durch externe Experten. Dazu sind als Eingangsgrößen für die Starkregenmodellierung u.a. die anzusetzenden Niederschlagshöhen sowie die Dauer des Niederschlagsereignisses festzulegen.

Auf der Grundlage von Abbildung 64 lassen sich plausible Niederschlagshöhen und Andauern für Starkregenereignisse wie folgt ableiten (**Abbildung 67**).

Abbildung 67: Ableitung von plausiblen Niederschlagshöhen und Andauern für Starkregenereignisse



Quelle: K.-E. Köpcke auf Grundlage KLIWA (2019)

Plausible Niederschlagshöhen und Andauern für Starkregenereignisse lassen sich aus Abbildung 67 ableiten. In Abhängigkeit von der Dauer der Niederschlagsereignisse (x-Achse) sind als grüne Dreiecke die Mittelwerte der statistisch ausgewerteten Niederschlagshöhen (y-Achse) gemäß KOSTRA-DWD-2010R für 100-jährliche Niederschlagsereignisse eingetragen. Die grünen Balken repräsentieren die Spannbreiten der 100-jährlichen Niederschlagsereignisse, die sich durch regionale Unterschiede innerhalb Deutschlands ergeben.

Für die Gefahrenquellenanalyse sind jedoch die Intensitäten der Einzelereignisse von besonderer Bedeutung. Daher sind erneut als blaue Rauten die höchsten jemals beobachteten Niederschlagshöhen in Deutschland in die Abbildung 67 eingetragen. Die Niederschlagsereignisse sind entsprechend der Definition des DWD in Starkniederschläge (<6 Stunden) und Dauerniederschläge (>6 Stunden) eingeteilt (Pfeile in Abbildung 67).

Ergänzend ist noch ein roter Punkt in die Grafik eingetragen, der die MGN von 400 mm für 24 Stunden repräsentiert (vgl. Abbildung 66).

Zur Ableitung plausibler Niederschlagshöhen sowie Andauern für die Starkregenmodellierung sind zwei Linien (rot und schwarz gestrichelt) in die Grafik eingezeichnet. Die rot gestrichelte Linie liegt näherungsweise im Bereich der maximal gemessenen Niederschlagshöhen. Die schwarz gestrichelte liegt zwischen dem Mittelwert des 100-jährlichen Ereignisses nach KOSTRA-DWD-2010R und den maximal gemessenen Werten, also knapp oberhalb der

Schwankungsbreite der KOSTRA-Werte. Aufgrund der Erfahrungen bzgl. des höchsten Gefährdungspotentials wurden die Dauerstufen 1, 3 und 6 Stunden festgelegt (senkrechte graue Linien). Aus den Schnittpunkten der senkrechten Linien mit der schwarz gestrichelten Linie lassen sich Niederschlagshöhen für die Gefahrenquellenanalyse und zur Bemessung von Vorkehrungen zur Störfallverhinderung ableiten. Die Schnittpunkte mit der rot gestrichelten Linie legen die Niederschlagsintensitäten zur Festlegung von Maßnahmen zur Störfallauswirkungsbegrenzung fest. Die somit erhaltenen Niederschlagshöhen ohne und mit Klimaanpassungsfaktor sind für die Dauerstufen 1, 3 und 6 Stunden in **Tabelle 14** zusammengefasst.

Tabelle 14: Vorschlag von Niederschlagshöhen aus real gemessenen Starkregenereignissen

		Dauerstufe	Niederschlagshöhe (mm)	Niederschlagshöhe mit Klimaanpassungsfaktor (mm)
Schwarze Linie	Inputdaten für Gefahrenquellenanalyse und zur Bemessung von Vorkehrungen zur Störfallverhinderung	1 h	100	120
		3 h	140	168
		6 h	160	192
Rote Linie	Inputdaten zur Festlegung von Maßnahmen zur Störfallauswirkungsbegrenzung	1 h	200	240
		3 h	220	264
		6 h	270	324

Der Vorschlag kann wie folgt begründet werden:

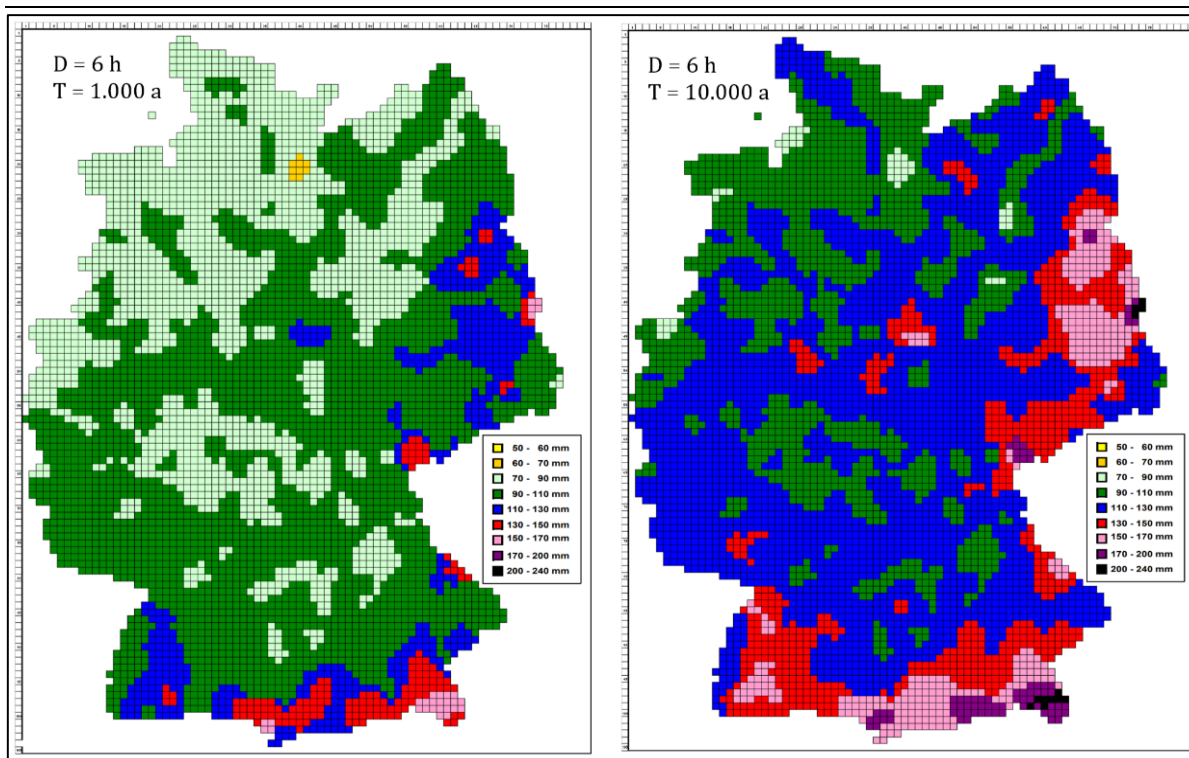
1. Die vorgeschlagenen Niederschlagshöhen lassen sich aus historischen Ereignissen ableiten.
2. Die vorgeschlagenen Niederschlagshöhen liegen oberhalb der Mittelwerte des KOSTRA-DWD und noch unterhalb der MGN.
3. Die vorgeschlagenen Niederschlagshöhen für die Dauerstufen 1, 3 und 6 Std. können für das gesamte Bundesgebiet angesetzt werden, weil nach Erkenntnissen des DWD diese Ereignisse nahezu unabhängig von der Topografie sind.
4. In den Leitfäden bzw. Hinweisen zur Erstellung von urbanen Starkniederschlagskarten wird in NRW für die Dauerstufe 1 Std. eine Niederschlagshöhe von 90 mm vorgeschlagen. In Baden-Württemberg wird für ein Extremereignis von der Dauerstufe 1 Std. mit 128 mm Niederschlag ausgegangen. Die für die TRAS 310 vorgeschlagene Niederschlagshöhe von 100 mm für 1 Std. (schwarze Linie in Abbildung 67) liegt somit näherungsweise im gleichen Bereich.

Die Wirkungen der vorgeschlagenen Niederschlagshöhen mit und ohne Klimaanpassungsfaktor wurden für die die Dauerstufen 1, 3 und 6 Stunden an einem Beispiel durch Niederschlags-/Abflussberechnungen näher untersucht. Die Ergebnisse wurden schon in Kapitel 5.5 dargestellt. Es konnte hierdurch nachgewiesen werden, dass mit den vorgeschlagenen Niederschlagshöhen mit Hilfe von Niederschlags-/Abflussberechnungen realistische Ergebnisse erzielt und wichtige Erkenntnisse aus den Wirkungen von Starkniederschlägen für die Störfallverhinderung abgeleitet werden können.

7.2 Praxisrelevanten Extremwerten des Niederschlags (PEN)

Am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover wurden mit Unterstützung des DWD PEN-Werte auf der Grundlage der KOSTRA-Messreihen entwickelt (Verworn und Kummer, 2003). Ziel war es, Niederschlagshöhen mit geringerer Eintrittswahrscheinlichkeit als 1% für die Bemessung von z.B. Talsperren zu gewinnen. Berechnet wurden die Niederschlagshöhen für Jährlichkeiten von 1.000 und 10.000 Jahren bei verschiedenen Dauerstufen zwischen 15 Minuten und 72 Stunden. Die Ergebnisse wurden für die genannten Jährlichkeiten und Dauerstufen in Karten aufbereitet, so dass eine regionalisierte Betrachtung möglich ist **Abbildung 68**).

Abbildung 68: PEN-Niederschlagshöhen für eine Dauer (D) von 6 Stunden und Jährlichkeiten von 1.000 und 10.000 Jahren



Quelle: H.-J. Verworn und U. Kummer (2003)

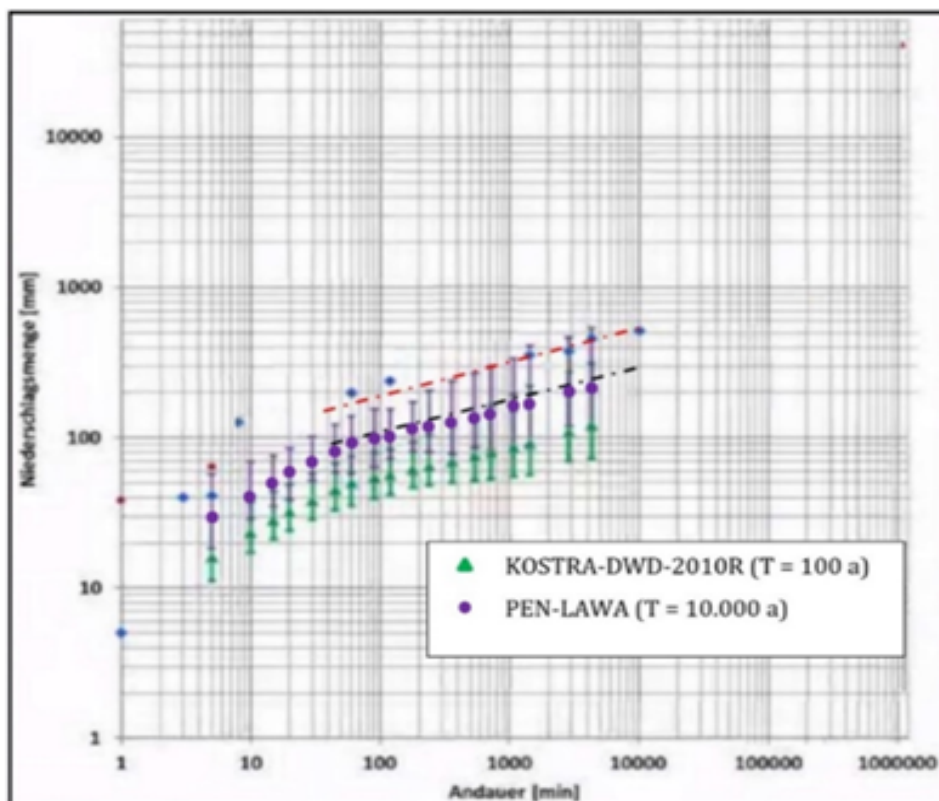
Die errechneten Werte sind gekennzeichnet durch eine Unsicherheitsbandbreite von + 20% und mehr (Junghänel, 2022). Die berechneten Niederschlagshöhen für den jeweiligen Standort sind u.a. über eine kostenpflichtige Software ermittelbar.

Um die PEN-Werte für eine Jährlichkeit von 10.000 Jahren einordnen zu können, werden sie in **Abbildung 69** mit den KOSTRA-Niederschlagshöhen in Abhängigkeit von der Dauer der Starkniederschläge verglichen. Darüber hinaus sind auch die rote und die schwarze Linie aus **Abbildung 69** eingezeichnet, mit deren Hilfe die Niederschlagshöhen für 1, 3 und 6 Stunden (vgl. **Tabelle 14**) abgeleitet wurden.

Bevor auf die **Abbildung 69** näher eingegangen wird, verwundert es zunächst, dass von einer Jährlichkeit von 10.000 Jahren ausgegangen wird, wenn im Vergleich zu Flusshochwasser von einem HQ_{100} oder HQ_{500} gesprochen wird. Weil die große Differenz bei den Jährlichkeiten leicht zu Irritationen führt, muss man sich zunächst verdeutlichen, dass der Kern eines Starknieder-

schlagsgebietes nicht immer von einer Messstation erfasst wird, weil die Abstände mit durchschnittlich 15 km zwischen den Messstationen groß sind. Dies führt dazu, dass die kleinräumigen Starkregenereignisse im Vergleich zu ihrem tatsächlichen Auftreten sehr viel seltener erfasst werden. Auch Radarmessungen können dieses Defizit derzeit noch nicht beheben (Junghänel, 2022). Vor diesem Hintergrund ist der Vergleich der Jährlichkeiten nicht zielführend, was auch im Rahmen eines Fachgesprächs am 23.2.2022 von Experten bestätigt wurde. Sinnvoller ist der Vergleich der Niederschlagshöhen in Abhängigkeit von der Dauer der Niederschlagsereignisse.

Abbildung 69: Vergleich der PEN-Werte mit KOSTRA sowie den vorgeschlagenen anzusetzenden Niederschlagshöhen



Quelle: K.-E. Köppke auf Grundlage von Junghänel (2022)

Wie die Abbildung 69 verdeutlicht, liegen die mittleren PEN-Werte (lila Punkte) für 10.000-jährliche Ereignisse an der oberen Grenze des Schwankungsbereichs der KOSTRA-Werte (grüne Dreiecke) und näherungsweise im Bereich der schwarzen Linie, mit deren Hilfe die Niederschlagshöhen zur Verhinderung von Störfällen abgeleitet wurde. Die rote Linie, die der Ermittlung von Niederschlagshöhen zur Störfallauswirkungsbegrenzung diente, entspricht wiederum ungefähr dem oberen Schwankungsbereich der PEN-Werte ($T = 10.000$ Jahren).

Mit Blick auf die Abbildung 69 wird somit schnell klar, dass zur Verhinderung von Störfällen die Niederschlagshöhe für ein 200-jährliches Ereignis als Grundlage für Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen einer Risikoanalyse mit real eingetretene Starkniederschlagshöhen nicht annähernd gerecht werden können. Dies gilt ebenso für ein 500-jährliches Niederschlagsereignis als Grundlage für Maßnahmen zur Auswirkungsbegrenzung. Dies wird bestätigt durch den Vergleich der KOSTRA-Werte ($T = 100$ a) mit den PEN-Werten ($T = 200$ a und $T = 500$ a) für die Region, in der der untersuchte Betrieb am Wiehengebirge liegt (vgl. Kapitel 5.5). In **Tabelle**

15 sind die jeweiligen Niederschlagshöhe für die Niederschlagsdauer von 1 Stunde zusammengestellt:

Tabelle 15: Niederschlagshöhen nach KOSTRA und PEN für den untersuchten Standort

Jährlichkeit	Angaben nach	Niederschlagshöhe (mm)	Niederschlagshöhe mit Klimaanpassungsfaktor (mm)
100	KOSTRA	50,1	60,1
200	PEN	61	73,2
500	PEN	69	82,8

Wie die Tabelle 15 zeigt, liegen erwartungsgemäß die PEN-Werte über den Niederschlagshöhen von KOSTRA-DWD-2010R, aber deutlich unter den vorgeschlagenen Niederschlagshöhen von 100 bzw. 200 mm für eine Niederschlagsdauer von 1 Stunde. Für den konkreten Fall des Betriebs am Wiehengebirge wurden daraufhin noch einmal Abflusssimulationen mit den PEN-Werten unter Berücksichtigung des Klimaanpassungsfaktors durchgeführt (letzte Spalte in Tabelle 15). Zum Vergleich wurden die Ergebnisse der Abflussberechnungen für die Niederschlagshöhen für 1 Stunde aus Tabelle 15 (120 mm und 240 mm jeweils mit Klimaanpassungsfaktor) den Ergebnissen der Simulationen mit den PEN-Werten (73,2 mm und 82,8 mm) gegenübergestellt (**Abbildung 70** und **71**).

Abbildung 70: Überflutungsflächen und -tiefen bei einer Niederschlagshöhe von 73,2 mm (PEN-Wert) und 120 mm (Vorschlag nach Tabelle 14) bei einer Dauer von 1 Stunde

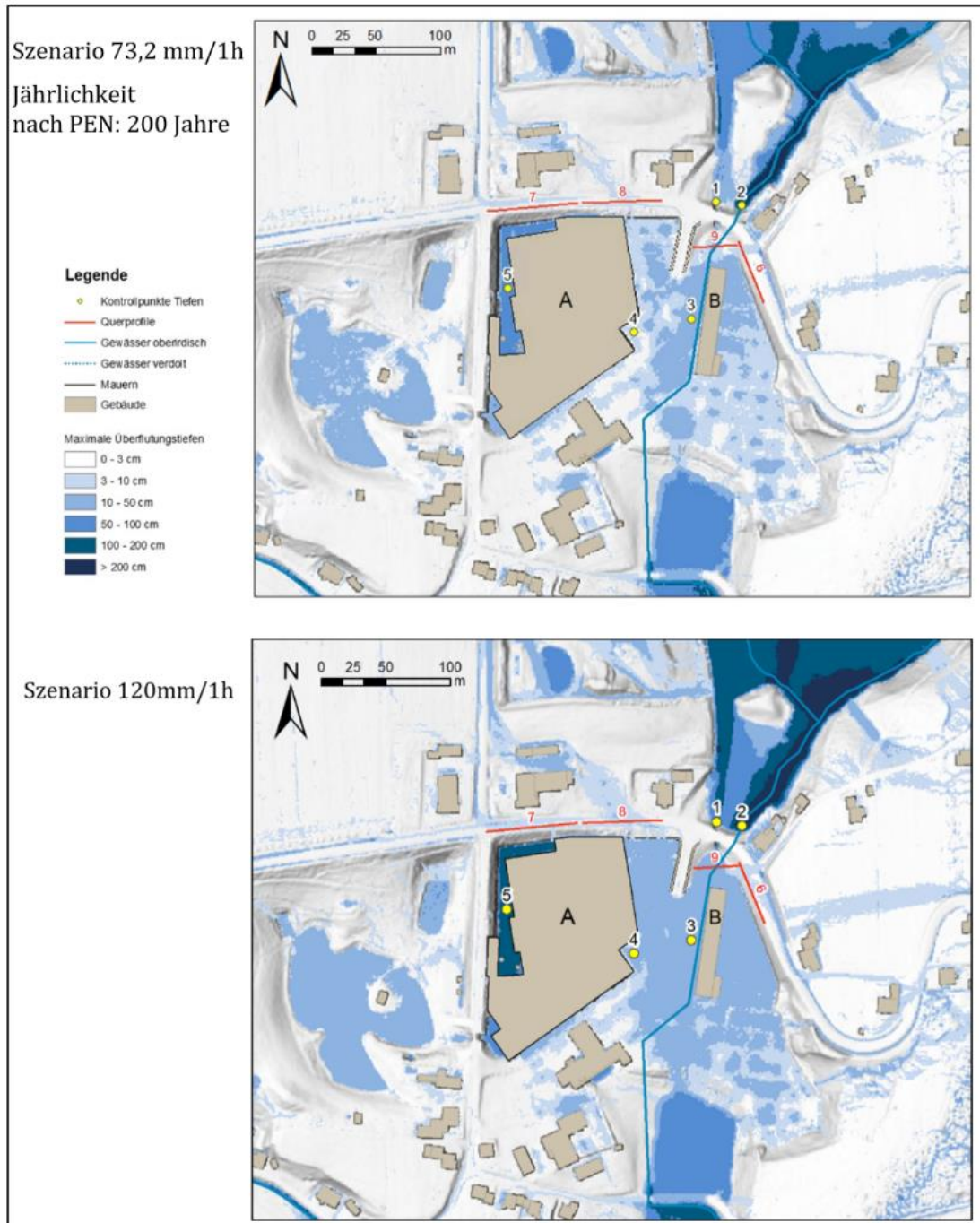
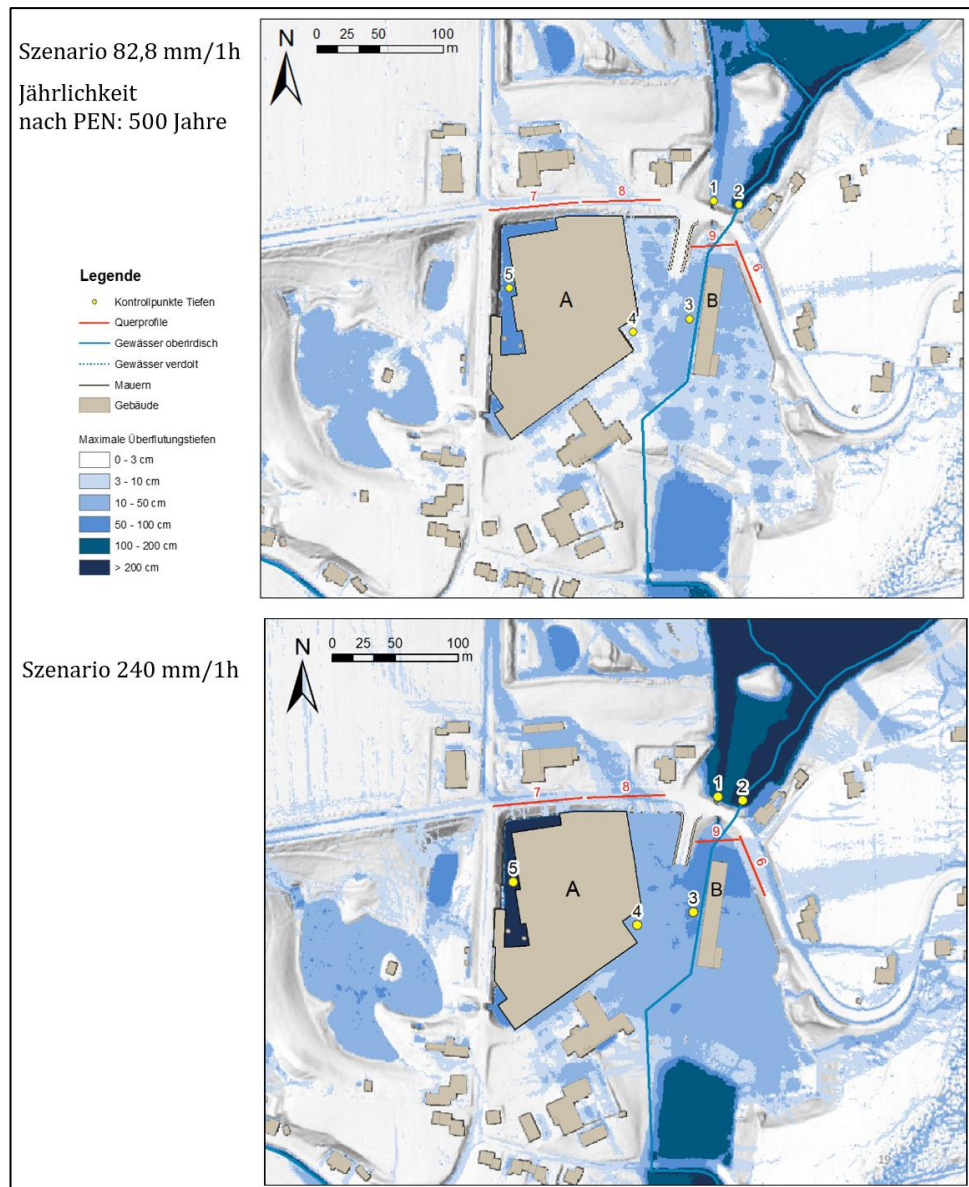


Abbildung 71: Überflutungsflächen und -tiefen bei einer Niederschlagshöhe von 82,8 mm (PEN-Wert) und 240 mm (Vorschlag nach Tabelle 14) bei einer Dauer von 1 Stunde



Quelle: A. Assmann

Wie schon im Zusammenhang mit Tabelle 15 erläutert wurde, liegen die PEN-Werte für die Jährlichkeiten von 200 und 500 Jahren über denen der KOSTRA-Werte, jedoch deutlich unter den real beobachteten Niederschlagshöhen. Dies drückt sich auch in den Gegenüberstellungen der Überflutungsflächen am Beispiel des untersuchten Betriebes in den Abbildungen 70 und 71 aus. Besonders augenscheinlich wird dies an der Straße nördlich des Gebäudes A (Stellen 7 und 8). Die Gefahr einer Überspülung der Straße ist bei einer Niederschlagsmenge 73,2 mm entsprechend einer Jährlichkeit von 200 nach PEN praktisch nicht gegeben. Die Gefahr steigt jedoch mit zunehmender Niederschlagshöhe. An den Stellen 1 und 2 nehmen die Überflutungstiefen insbesondere für die Niederschlagshöhe 240 mm deutlich zu. Hierbei ist zu beachten, dass Straßen nicht gegen seitlichen Wasserdruck ausgelegt werden und somit über- bzw. unterspült werden können, was eine zusätzliche Gefahr durch Treibgut für den Betrieb bedeuten kann. Der Wasserdruck an den Stellen 1 und 2 wird vor allem dann besonders hoch, wenn Treibgut aus der Umgebung vor dem Tunnel bzw. der Verdolung des Baches angeschwemmt wird.

7.3 Schlussfolgerungen

Auf der Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnisse und der am Beispiel eines Betriebes durchgeführten Niederschlags-/Abflussberechnungen können für die Novellierung der TRAS 310 folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

1. Es wurde nachgewiesen, dass die KOSTRA-DWD-2010R-Werte nicht die Niederschlagshöhen abbilden, die für eine Risikoanalyse für Starkniederschlägen erforderlich sind.
2. Auf der Grundlage historischer Ereignisse wurden Niederschlagshöhen abgeleitet, die für Gefahrenquellenanalyse sowie für die Festlegung von Vorkehrungen zur Störfallverhinderung nach § 3 geeignet sind. Darüber hinaus wurden Niederschlagshöhen für die Maßnahmen zur Begrenzung der Störfallauswirkungen nach § 3 und für die Gefahrenabwehr nach § 10 StörfallV vorgeschlagen.
3. Die vorgeschlagenen Starkniederschlagshöhen beziehen sich jeweils auf Niederschlagsdauern von 1, 3 und 6 Stunden, weil in diesem Zeitbereich die größten Folgewirkungen von Starkniederschlägen zu erwarten sind.
4. Es konnte an einem Beispiel nachgewiesen werden, dass mit den vorgeschlagenen Niederschlagshöhen mit Hilfe der Niederschlags-/Abflussberechnungen realistische Ergebnisse erzielt werden.
5. PEN-Werte sind als Alternative oder Ergänzung zu den vorgeschlagenen Starkniederschlagshöhen nur dann sinnvoll, wenn sie gemessen an historischen Ereignissen realistische Niederschlagshöhen liefern. Sie bieten den Vorteil regionalisierter Starkniederschlagshöhen. Die Orientierung an Jährlichkeiten ist aufgrund der begrenzten Zahl von Messstellen zur Erfassung von Starkniederschlägen nicht sinnvoll, weil hierdurch der falsche Eindruck entsteht, dass Starkniederschläge extrem seltene Ereignisse sind. Nach Expertenmeinung sind nur die Niederschlagshöhen und die Zeitdauer der Starkniederschläge entscheidend.
6. Mit der Einzelfallbetrachtung konnte nachgewiesen werden, dass durch zu niedrig angesetzte Niederschlagshöhen wichtige sicherheitsrelevante Informationen, wie z.B. die Erhöhung des seitlichen Wasserdrucks auf die Tragschichten einer Straße, verloren gehen können. Ein potentieller Erdbeben mit der Auslösung von Treibgut wäre nicht erkannt worden. PEN-Werte von 200 Jahren für die Verhinderung von Störfällen und von 500 Jahren für die Begrenzung von Störfallauswirkungen haben sich, wie die Untersuchungen gezeigt haben, als zu niedrig herausgestellt.
7. Weil PEN-Werte mit den Jährlichkeiten von 200 und 500 Jahren meist deutlich unterhalb von real eingetretenen Niederschlagshöhen liegen, erscheint es notwendig, neben diesen PEN-Werten auch Mindestniederschlagshöhen für die Niederschlags-/Abflussberechnung zu berücksichtigen. Diese sollten sich an den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens abgeleiteten Niederschlagshöhen für die Dauer von einer Stunde orientieren (**Tabelle 16**) und können bundesweit angesetzt werden.
8. Die vorgeschlagenen Mindestniederschlagshöhen korrespondieren näherungsweise mit Vorgaben in Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen für die Erstellung von urbanen Gefahrenkarten für Starkniederschläge. Für jeweils 1 Stunde wurde in Baden-Württemberg 128 mm (LUBW, 2016) und in Nordrhein-Westfalen 90 mm (MULNV NRW, 2018) für Extremereignisse empfohlen. Auf eine Vorgabe ausgedrückt als Jährlichkeit wurde für extreme Ereignisse wegen der fehlenden statistischen Daten verzichtet.

Tabelle 16: Empfehlungen für Niederschlagshöhen und Dauerstufen zur Novellierung der TRAS 310

Gefahrenquelle	Ab 2010 anzusetzende Intensität	Für ab 2050 zur Berücksichtigung des Klimawandels anzusetzende Intensität
Starkniederschläge Niederschlagshöhen für Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen nach § 3 Abs. 1 StörfallV	Starkniederschlagshöhe für 1:200 a sowie 1 h und 3 h, mindestens jedoch 100 mm für 1 h	1,2 · Starkniederschlagshöhe für 1:200 a sowie 1 h und 3 h, mindestens jedoch 120 mm für 1 h
Starkniederschläge Niederschlagshöhen für die Erfüllung von Pflichten nach § 3 Abs. 3 und § 10 StörfallV	Starkniederschlagshöhe für 1:500 a sowie 1 h und 3 h, mindestens jedoch 200 mm für 1 h	1,2 · Starkniederschlagshöhe für 1:500 a sowie 1 h und 3 h, mindestens jedoch 240 mm für 1 h

7.4 Nachrüstungsfrist für Vorkehrungen und Maßnahmen zur Verhinderung von Störfällen durch Hochwasser und Niederschläge sowie zur Begrenzung der Störfallauswirkungen

Wie in Kapitel 5.1.3 dargelegt wurde, legt das Wasserhaushaltsgesetz in § 78c einen restriktiven Maßstab an die Errichtung von Heizölverbraucheranlagen in Risikogebieten fest. Danach sind Heizölverbraucheranlagen, die am 5. Januar 2018 in Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten vorhanden sind, bis zum 5. Januar 2033 nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik hochwassersicher nachzurüsten, sofern dies wirtschaftlich vertretbar ist.

Vor dem Hintergrund des beschleunigten Klimawandels ist die Berücksichtigung des Klimaanpassungsfaktors in der TRAS 310 für das Jahr 2050 wahrscheinlich zu spät. Aus den Erkenntnissen des 6. Assessment Reports des IPCC ergibt sich, dass die Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und damit auch für die Anlagensicherheit sehr viel früher umgesetzt werden müssen. Daher wird auch mit Blick auf § 78c WHG empfohlen, die Berücksichtigung des Klimaanpassungsfaktors deutlich vorzuziehen.

8 Empfehlungen zur Fortschreibung der TRAS 320

Die Auslegung von Tragwerken gegenüber Wind, Schnee und Eislasten erfolgt auf der Grundlage des Baurechts bzw. der relevanten Baunormen in der jeweils gültigen Fassung:

1. DIN EN 1990 Grundlagen der Tragwerksplanung
2. DIN EN 1991-1-3 Einwirkungen auf Tragwerke: Schneelasten (neu: Eislasten)
3. DIN EN 1991-1-4 Einwirkungen auf Tragwerke: Windlasten
4. VDI 6200 Standsicherheit von Bauwerken – Regelmäßige Überprüfung

Die genannten Baunormen unterliegen einer stetigen Weiterentwicklung, um die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse zu berücksichtigen. Die historische Entwicklung der Baunormen ist vor allem deshalb von Bedeutung, weil sich in den letzten Jahrzehnten grundlegende Änderungen bei der Tragwerksauslegung ergeben haben.

Bei der Ermittlung der sicherheitsrelevanten Anlagen bzw. Anlagenteile (SRA) eines Betriebsbereichs ist das Baujahr der Anlage bzw. des Anlagenteils sowie das Erscheinungsjahr des zur Auslegung verwandten Technischen Regelwerks zur Tragwerksberechnung zu beachten.

Die DIN 1055-4 regelte die Windeinwirkungen auf Tragwerke. Nach Kriegsende galt in der Bundesrepublik Deutschland zunächst die Fassung der Ausgabe Juni 1938 weiter. Die Ausgabe August 1986 ersetzte sie ab Januar 1987 in den Ländern der Bundesrepublik Deutschland. In der DDR war bereits im Dezember 1976 der DDR-Standard Technische Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (TGL) 32274/07: Lastannahmen für Bauwerke/ Windlasten eingeführt worden. Die Ausgabe DIN 1055 Blatt 4 (August 1986) galt seit dem Beitritt der DDR zur Bundesrepublik Deutschland im Oktober 1990 auch in den neuen Bundesländern.

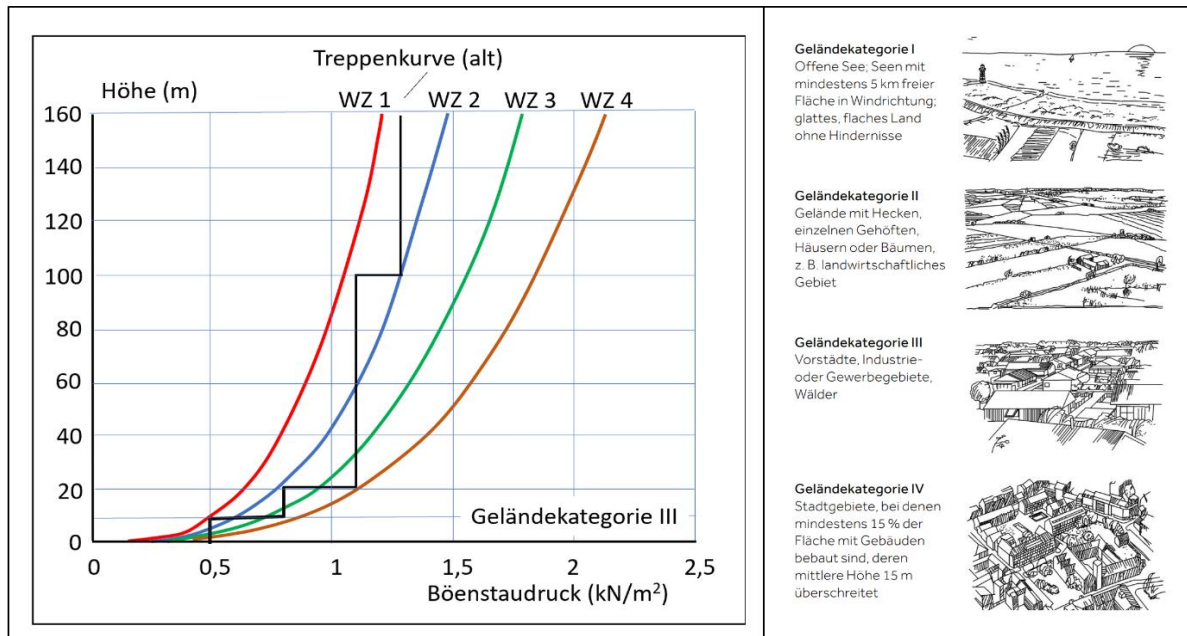
Im März 2005 erschien die grundsätzliche Neufassung DIN 1055-4 (März 2005), die erstmals regionale Unterschiede bei den Windgeschwindigkeiten durch Ausweisung von vier Windzonen berücksichtigte. Sie galt nach ihrer bauaufsichtlichen Einführung bis zur Einführung der entsprechenden, seit Dezember 2010 veröffentlichten DIN EN 1991-1. Mittlerweile wurde die DIN EN 1991-1 am 1. Juli 2012 bauaufsichtlich eingeführt. Sie löste somit die DIN 1055-4 in der Liste der technischen Baubestimmungen ab.

Die Festlegungen zum Geschwindigkeitsdruck in der Fassung August 1986 stammten aus der Ausgabe vom Juni 1938. Der Geschwindigkeitsdruck war dort in Form einer Treppenkurve angegeben (**Abbildung 72**). Die Treppenkurve galt einheitlich für alle Klimazonen Deutschlands; der Einfluss der Bodenrauigkeit wurde nicht erfasst. Die Neufassung der DIN 1055-4 (März 2005) ersetzte die Treppenkurven durch realistische, stetige Windprofile, deren Verlauf von der Bodenrauigkeit bestimmt ist. Darüber hinaus wurden Windzonen eingeführt, um die geografisch unterschiedliche Sturmintensität zu erfassen. Diese Änderungen entsprachen dem Eurocode 1991-1-4, der im Dezember 2010 als DIN EN 1991-1-4 veröffentlicht wurde.

Zusammenfassend ergibt sich, dass es mit Einführung der DIN 1055-4 (März 2005) mit einer Windzonenkarte in Küstengebieten und in Teilen des Binnenlandes der Bundesrepublik Deutschland zu Windlasterhöhungen gekommen ist, die zwischen 22% und 47% liegen. In Ausnahmefällen, z. B. an der Nordseeküste, erreichen sie bis zu 75%. Auf dem Gebiet der ehemaligen DDR ist vor allem der Bereich der Ostseeküste von Erhöhungen gegenüber der TGL betroffen.

Umgekehrt ist festzustellen, dass insbesondere für die Windzone I je nach Höhe des Bauwerks geringere Böengeschwindigkeitsdrücke anzusetzen sind. Dies ergibt sich aus dem Vergleich der Treppenkurve (schwarze Linie) mit der roten Exponentialkurve für die Windzone 1 und der hier gewählten Geländekategorie III, so dass sich hieraus zusätzliche Lastreserven für die vor 2005 genehmigten Bauwerke ergeben.

Abbildung 72: Festlegung des Böenstaudrucks in deutschen Normen; hier für Geländekategorie III



Quelle: K.-E. Köppke in Anlehnung an H.-J. Niemann (Krätzig et al., 2016)

Die Anforderungen an Betriebsbereiche, die der Störfall IV unterliegen, basieren auf den bestehenden zuvor genannten Baunormen. Seit dem Jahr 2005 wird die Tragwerksplanung europaweit mit dem Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte durchgeführt, das im Folgenden bzgl. seines Berechnungsansatzes kurz erläutert wird.

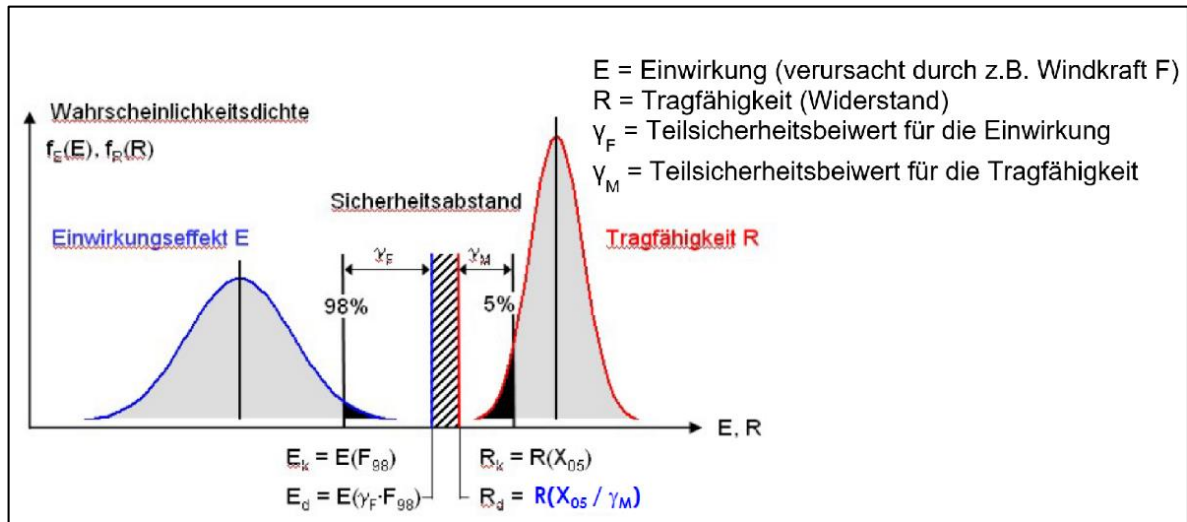
"Auf ein Bauteil wirkt eine Beanspruchung (Einwirkung), deren Größe statistisch verteilt ist, zum Beispiel mit einer Normalverteilung oder einer anderen statistischen Verteilung. Die Beanspruchung hat einen Mittelwert oder einen anderen charakteristischen Wert und streut mit einer Standardabweichung um diesen. Der Widerstand des Bauteils hat dieser Beanspruchung zu widerstehen und ist ebenfalls statistisch verteilt. Er hat auch einen Mittelwert und eine Standardabweichung (**Abbildung 73**).

Wenn sich beide Verteilungen mit einer kleinen Schnittmenge überschneiden, würde das Bauteil im Bereich dieser Schnittmenge versagen. Im Bauwesen ist in der Regel eine sehr kleine Versagenswahrscheinlichkeit von etwa $1 \cdot 10^{-6}$ akzeptabel, das heißt, dass von 1 Million gleichartigen und gleichartig belasteten Bauteilen eines versagt. Deshalb müssen die Mittelwerte von Beanspruchung und Widerstand so weit auseinanderliegen, dass die Schnittmenge so klein ist, dass sie dieser gewünschten geringen Versagenswahrscheinlichkeit entspricht. In diesem Fall hätte man die Sicherheit 1, weil gerade der Grenzfall der Mindestsicherheit erreicht ist.

Zusätzlich wird eine noch höhere Sicherheit benötigt. Diese wird erreicht, indem man die Einwirkungen oder die Beanspruchungen mit Teilsicherheitsbeiwerten multipliziert (und damit erhöht) oder die Widerstände mit anderen Teilsicherheiten dividiert (und damit vermindert).

Jede Einwirkung und jeder Widerstand hat einen eigenen Sicherheitsbeiwert. Mit diesen Teilsicherheiten muss nun die Versagenswahrscheinlichkeit immer noch geringer als $1 \cdot 10^{-6}$ sein, und darin besteht der Nachweis. Die Teilsicherheiten muss man für jede Einflussgröße entsprechend ihrer statistischen Streuung und entsprechend der möglichen Genauigkeit ihrer Ermittlung festlegen" (Wikipedia, Teilsicherheitskonzept).

Abbildung 73: Zusammenhang von Einwirkung, Tragwerkwiderstand und Teilsicherheitsbeiwerte



Quelle: H.-J. Niemann (Krätzig et al., 2016)

Die Bemessung von Tragwerken erfolgt nach DIN EN 1990 für die Einwirkung durch die Windkraft F auf folgender Gleichung:

$$F = K_{FI} \cdot \gamma_F \cdot F_k$$

F_k = charakteristische Wert der Windlast (zu entnehmen aus der Windzonenkarte)

γ_F = Teilsicherheitsbeiwert für die Windlast

K_{FI} = Bedeutungsfaktor für das Tragwerk (Einfamilienhaus versus Stadion)

Bei der Auslegung eines Tragwerks wird die Einwirkung von Lasten auf Bauwerke, die im Versagensfall bestimmte Folgen für Menschenleben oder auch für die Umwelt haben können, durch den Bedeutungsfaktor für Bauwerke (K_{FI} -Wert) angepasst. Auch wirtschaftliche und soziale Folgen werden durch den K_{FI} -Wert berücksichtigt. Praktisch erfolgt die Ermittlung des K_{FI} -Werts durch die Einstufung der Tragwerke in

- Zuverlässigkeitsklassen RC 1 bis RC 3 sowie in
- Schadensfolgenklassen CC 1 bis CC 3.

Beide Klassen können miteinander verknüpft werden. Mit den Schadensfolgenklassen werden die Auswirkungen des Versagens oder die Funktionsbeeinträchtigung eines Tragwerks betrachtet. In der **Tabelle 17** sind die Schadensfolgenklassen mit ihren Merkmalen, den Zuverlässigkeitsklassen, der Versagenswahrscheinlichkeit sowie dem K_{FI} -Wert zusammengefasst.

Tabelle 17: Merkmale der Schadensfolgenklassen

Schadens- folgeklasse	Merkmale	Zuverlässig- keitsklasse	Versagenswahr- scheinlichkeit P_f bei Bezugszeit 1 Jahr	Faktor K_{Fi} zur Anpassung der Lasthöhe
CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	RC 3	$1,0 \cdot 10^{-7}$	1,1
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	RC 2	$1,3 \cdot 10^{-6}$	1,0
CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	RC 1	$1,3 \cdot 10^{-5}$	0,9

Die TRAS 320 vom 15.6.2015 sah eine generelle Einstufung von sicherheitsrelevanten Anlagen von bisher CC 2 auf CC 3 sowie von RC 2 auf RC 3 vor. Wie an dem Bedeutungsfaktor K_{Fi} zu erkennen ist, entspricht dies einer Erhöhung von 10 % für die einwirkende Windlast.

Wie die Befragung von Sachverständigen, Industrie- und Behördenvertretern ergab, stellte die Nachrechnung der Tragwerke bestehender Anlagen ein großes Problem dar. Begründet wurde dies mit folgenden drei Problembereichen:

1. Statiken für ältere Anlagen liegen meist nicht vor
2. Grundlegende Änderung in den Grundlagen der Tragwerksplanung im Jahr 2005
3. Begrenzte Verfügbarkeit von geeigneten Tragwerksplanern

Darüber hinaus wurde angemerkt, dass in den einschlägigen Regelwerken neben technischen Maßnahmen üblicherweise auch organisatorische Maßnahmen vorgesehen werden. Sollten im konkreten Fall einer bestehenden Anlage die Lastreserven nicht ausreichend sein, müsste eine Nachrüstung erfolgen, was im Einzelfall erhebliche Probleme aufwerfen könnte.

Organisatorische Maßnahmen, wie z.B. die regelmäßige Überwachung, sah die TRAS 320 vom 16.07.2015 für Windlasten nicht vor.

Darüber hinaus wurde auch darauf verwiesen, dass in der Norm DIN EN 1990:2010-12 keine Störfallanlagen genannt werden. Daher wurden bislang diese Anlagen in Deutschland auf der Grundlage der Schadenfolgenklasse CC 2 dimensioniert. Eine weitergehende Einstufung von Hochbauten und sonstigen Ingenieurbauwerken erfolgte demgegenüber in Österreich. In Anlehnung an die NORM EN 1990 wurde in der NORM B 1990-1 in Anhang B die Einstufung in die Schadenfolgen- und Zuverlässigkeitsklassen im Bauwesen zusammenfassend geregelt (2013). Danach werden Bauwerke, die unter die SEVESO-II-Richtlinie fallen, eindeutig der Schadenfolgenklasse CC 3 sowie der Zuverlässigkeitsklasse RC 3 zugeordnet (**Abbildung 74**).

Abbildung 74: Einstufung von Seveso-II-Anlagen in CC 3 nach ÖNORM B 1990-1 in Anhang B

Schadens- folgeklasse	Merkmale	Beispiele im Hochbau oder bei sonstigen Ingenieurbauwerken
CC3 (= RC3)	hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	<ul style="list-style-type: none"> – Bauwerke (oder eigenständige Bauwerkstellen) mit einem widmungsgemäßen Fassungsvermögen für mehr als 1000 Personen (wie z. B. Krankenanstalten, Einkaufszentren, Stadien, Bildungseinrichtungen) – Bauwerke, die eine Energie- und Versorgungsfunktion erfüllen – Bauwerke und Einrichtungen, die für den Katastrophenschutz dienen – <u>Bauwerke, die unter die SEVESO-II-Richtlinie fallen</u> – Bauwerke, die mehr als 16 oberirdische Geschosse besitzen
CC2 (= RC2)	mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	<ul style="list-style-type: none"> – Bauwerke, die nicht der Schadensklasse CC1 oder CC3 zuzuordnen sind
CC1 (= RC1)	niedrige Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	<ul style="list-style-type: none"> – Gebäude mit nicht mehr als drei oberirdischen Geschossen und mit einem Fluchtniveau von nicht mehr als 7 m, bestehend aus höchstens fünf Wohnungen bzw. Betriebseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m² Brutto-Grundfläche der oberirdischen Geschosse – Reihenhäuser mit nicht mehr als drei oberirdischen Geschossen und mit einem Fluchtniveau von nicht mehr als 7 m, bestehend aus Wohnungen bzw. Betriebseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m² Brutto-Grundfläche der oberirdischen Geschosse – landwirtschaftlich genutzte Bauwerke mit niedriger Personenfrequenz

Quelle: ÖNORM B 1990-1, Anhang B

In der Diskussion über die Einstufung von Störfallanlagen in die Schadensfolgenklasse CC 3 und die Zuverlässigkeitsklasse RC 3 sollten auch die folgenden kritischen Anmerkungen einfließen. Mit Einführung der Windlastzonen in der DIN 1055-4 „Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten“ im Jahr 2005 wurde die Schutzauslegung gegen Windlasten in den Windzonen 1 und 2 zurückgesetzt, ohne auf den erwartbaren Effekt des anthropogenen Klimawandels abzustellen. Unter dem Obertitel „Die Normungsinstitutionen verweigern die Wahrnehmung des Klimawandels“ stellt H.-J. Luhmann (2018) fest, dass die Einwirkung der Windlast bei der Bemessung von Bauwerken einer Häufigkeitsverteilung folgt und diese sich naturgemäß auf Messungen in der Vergangenheit stützt. Diese empirische Häufigkeitsverteilung wird dann als Wahrscheinlichkeitsverteilung interpretiert. Weiter stellt er fest, dass dieses Vorgehen auch angemessen gewesen war, solange es „keine systematische Veränderung der Umweltbedingungen gab.“ Mit dem anthropogenen Klimawandel sei diese Voraussetzung nicht mehr gegeben. Luhmann fährt fort: „Eine Fortschreibung des bisherigen Verfahrens der Auslegung lässt eine Unterauslegung des Schutzes von Bauwerken gegenüber dem stochastischen Auftreten von wetterbedingten Extremereignissen befürchten.“

Durch die in der TRAS 320 (Fassung vom 15.5.2015) vorgenommene Einstufung von Anlagen, die unter die StörfallV fallen, in die Schadensfolgenklasse CC 3 sowie in die Zuverlässigkeitsklasse RC 3, was einer Erhöhung der Windlast um 10 % gleichkommt, wird die von Luhmann beschriebene Problematik in den Windzonen 1 und 2 zum Teil wieder korrigiert. Dies bedeutet, dass bestehende Störfallanlagen in den Windzonen 1 und 2 in der Regel nicht von der Einstufung in die Schadensfolgenklasse CC 3 betroffen sind, was auch in der Abbildung 72 deutlich wird.

Eine erhebliche Anhebung der anzusetzenden Windlast ist jedoch mit Einführung der Windzonen für die Windzonen 3 und 4 im Jahr 2005 eingetreten. Wie die Überprüfung der Statik für eine 76 m hohe Destillationskolonne an der deutschen Nordseeküste ergab, wurde die Kolonne im Jahr 1962 entsprechend der damals gültigen Norm für einen Böengeschwindigkeitsdruck von 1,1 kN/m² ausgelegt (Krätzig et al.,2016).

Mit Einführung der Windzonenkarte (2005) hätte die Kolonne für einen Druck von $1,57 \text{ kN/m}^2$ (+ 42,7 %) dimensioniert werden müssen. Folglich war nach den neuen Berechnungsgrundlagen der DIN EN 1991-1-4/NA die Anlage schon zu diesem Zeitpunkt in Teilen für zu geringe Windlasten ausgelegt. Weil das Baurecht jedoch einen Bestandsschutz einschließt, ergab sich bis zur Überprüfung der Statik kein Handlungsbedarf für den Anlagenbetreiber. Mit der Einstufung von Betriebsbereichen in die Schadensfolgenklasse CC 3 in der TRAS 320 im Jahr 2015 wurde die Windlast um weitere 10 % angehoben. Diese Erhöhung, die im Vergleich zur Anhebung im Jahr 2005 als gering einzustufen ist, erfolgte nicht nach Baurecht, sondern nach Störfallrecht. Dieser Rechtsbereich verlangt den Stand der Sicherheitstechnik, der einen dynamischen Charakter hat und somit keinen Bestandsschutz vorsieht. Die nicht ausreichende Dimensionierung der Anlage, die durch Nachrechnung der Statik unter Berücksichtigung der Windzonen sichtbar wurde, bestand also schon vor der Einführung der TRAS 320 im Jahr 2015. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die hier vorgestellte Anlage kein Einzelfall ist. Vor diesem Hintergrund ist auch die Frage von einigen Anlagenbetreibern und Behördenvertretern zu verstehen, welchen Rechtscharakter bzw. Verbindlichkeit die TRAS 320 überhaupt hat.

Insgesamt ist festzustellen, dass vermutlich nur wenige Betriebsbereiche in den Windzonen 3 und 4 bzgl. ihrer statischen Auslegung gegenüber Windlasten nicht ausreichend dimensioniert sind bzw. über keine ausreichenden Lastreserven verfügen. Mit einer Rückeinstufung in CC 2 in der TRAS 320 würden diese potentiellen Defizite nicht behoben, sondern nur überdeckt. Die Beibehaltung der Einstufung in CC 3 bietet den Immissionsschutzbehörden unter dem Gesichtspunkt der Einhaltung des Standes der Sicherheitstechnik die Möglichkeit, die kritischen Betriebsbereiche herauszufinden und ggfs. technische Nachrüstungsmaßnahmen zu fordern.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass definitionsgemäß von Betriebsbereichen aufgrund von Art und Menge der darin vorhandenen gefährlichen Stoffe Störfälle ausgehen können. Ein Störfall ist ein Ereignis ... größeren Ausmaßes, das sich aus einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs in einem unter die StörfallIV fallenden Betriebsbereich oder ... Anlage ergibt, das unmittelbar oder später innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs oder der Anlage zu einer ernstesten Gefahr oder zu Sachschäden nach Anhang VI Teil 1 Ziffer I Nummer 4 StörfallIV führt und bei dem ein oder mehrere gefährliche Stoffe beteiligt sind. Eine ernste Gefahr ist eine Gefahr, bei der

- a) das Leben von Menschen bedroht wird oder schwerwiegende Gesundheitsbeeinträchtigungen von Menschen zu befürchten sind,
- b) die Gesundheit einer großen Zahl von Menschen beeinträchtigt werden kann oder
- c) die Umwelt, insbesondere Tiere und Pflanzen, der Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- oder sonstige Sachgüter geschädigt werden können, falls durch eine Veränderung ihres Bestandes oder ihrer Nutzbarkeit das Gemeinwohl beeinträchtigt würde.

Die Kriterien für „ernste Gefahr“ entsprechen denen, die in der DIN EN 1990 bei „hohe Folgen“ genannt werden. Auch deshalb wird empfohlen, eine Einstufung der sicherheitsrelevanten Anlagen in Betriebsbereichen in die Klassen CC 3 bzw. RC 3 vorzunehmen.

Wird im Rahmen einer Überprüfung der Lastannahmen für das Bau- bzw. Tragwerk festgestellt, dass die Anlage nicht über ausreichende Lastreserven verfügt, wird eine Nachrüstung unter dem Gesichtspunkt der Verhältnismäßigkeit (§ 17 (2) BImSchG) sowie der technischen

Durchführbarkeit zu prüfen und von der zuständigen Behörde zu bewerten sein (Neuser, 2000). Für den Fall, dass keine technischen Maßnahmen möglich oder unverhältnismäßig sind, sollten organisatorische Maßnahmen den zuständigen Behörden vom Betreiber zur Entscheidung vorgelegt werden.

9 Anhang 1: Durchführung der Evaluation bei Betreibern, Genehmigungsbehörden und Sachverständigen

Die Durchführung der Evaluation begann 2017 und wurde im Frühjahr 2018 abgeschlossen. Die Problematik der Starkregenereignisse gewann erst durch die Ereignisse an Erft und Ahr im Jahr 2021 eine herausragende Bedeutung.

9.1 Vorbereitung und Durchführung der Anwenderbefragung

Um ein möglichst umfassendes und differenziertes Bild über die Anwendung der beiden technischen Regeln TRAS 310 und 320 zu erhalten, wurden umfangreiche Fragebögen an folgende Zielgruppen versendet:

1. Betreiber von Anlagen, die der TRAS 310 und 320 unterliegen
2. Genehmigungs- und Überwachungsbehörden (Immissionsschutzbehörden)
3. bekannt gegebene Sachverständige gemäß § 29a BImSchG, mit dem Prüfbereich 8 „umgebungsbedingten Gefahrenquellen“ gemäß Anlage 2 der 41.BImSchV.

Der Fragebogen wurde in einigen Fragestellungen leicht an die jeweilige Zielgruppe angepasst und gliederten sich in folgende Teilbereiche:

a) Einleitende Fragen

Mit diesem Fragenkomplex sollte ermittelt werden, ob sich die Vertreter*innen der jeweiligen Zielgruppen schon eingehender mit den beiden technischen Regeln befasst haben und wo es möglicherweise Verständnisprobleme gab.

b) Grundlegende Fragen

Die Fragen dieses Teils betrafen u.a. den Anwendungsbereich, die methodische Vorgehensweise, die Dokumentation, die Abstimmung der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne (AGAP) zwischen Unternehmen und Behörden sowie die Informationsquellen.

c) Fragen zur TRAS 310 (Hochwasser und Starkniederschläge)

Dieser Fragekomplex befasste sich ausschließlich mit der TRAS 310. Die Fragen bezogen sich im Wesentlichen auf die Gefahrenquellenanalyse, auf die Szenarien, die einen Störfall auslösen können, die Festlegung der Schutzziele, die Informationsbeschaffung sowie die möglichen Probleme, die bei der Anwendung der TRAS 310 in der Praxis auftraten.

d) Fragen zur TRAS 320 (Wind, Schnee- und Eislasten)

Die Fragen zur TRAS 320 waren ähnlich aufgebaut und entsprachen auch inhaltlich den Fragestellungen bzgl. der TRAS 310.

Die Fragebögen wurden im Wesentlichen Vertretern*innen

1. der Chemischen Industrie,
2. der Mineralölwirtschaft,
3. der metallver- und bearbeitenden Industrie sowie
4. der Biogasbranche

zugesandt. Insbesondere die Chemische Industrie sowie die Mineralölwirtschaft kündigten an, eigene Stellungnahmen zur Umsetzung der TRAS 310 und 320 über ihre jeweiligen Verbände

(Verband der Chemischen Industrie (VCI) und Mineralölwirtschaftsverband (MWV)) zu erarbeiten. Vor diesem Hintergrund waren zahlreiche Unternehmen dieser Branchen nicht bereit, die Fragebögen zu beantworten. Gleichwohl gelang es, für den Bereich der Chemischen Industrie einige ausgefüllte Fragebögen mit Hinweisen und Kommentaren zu erhalten. Darüber hinaus waren einige Vertreter*innen der Chemischen Industrie sowie der Mineralölindustrie bereit, in persönlichen Gesprächen ihre Erfahrungen mit der Umsetzung der TRAS 310 und 320 darzustellen und zu diskutieren.

Während ein Unternehmen der Metallindustrie den Fragebogen beantwortet hat, scheinen den Betreibern von Biogasanlagen die TRAS 310 und 320 wenig vertraut zu sein. Dies wurde in zwei persönlichen Gesprächen mit Betreibern deutlich.

Darüber hinaus wurden alle Umweltministerien mit der Bitte angeschrieben, die Anwenderbefragung an die zuständigen Immissionsschutzbehörden weiterzuleiten. Bis Ende Mai 2019 wurden 15 Befragungsbögen aus den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Schleswig-Holstein, Rheinland-Pfalz, Niedersachsen, Brandenburg und Baden-Württemberg bearbeitet und zurückgeschickt. Dazu wurden zu den einzelnen Antworten oftmals erläuternde Hinweise und Kommentare gegeben.

Darüber hinaus wurden zahlreiche Sachverständige gemäß 29a BImSchG angeschrieben, wovon 4 den Fragebogen bearbeitet und ebenfalls erläuternde Hinweise gegeben haben.

Die untenstehende Reihenfolge der Darstellung der Ergebnisse erfolgt entsprechend dem Informationsumfang der von jeder Gruppe erhaltenen Antworten.

9.2 Ergebnisse der Anwenderbefragung - Immissionsschutzbehörden

Den Behördenvertretern*innen wurden insgesamt 48 Fragen gestellt. Diese konnten nur von wenigen vollständig beantwortet werden. Dies lag oftmals daran, dass in dem jeweiligen Zuständigkeitsgebiet nur wenige Betriebsbereiche liegen, die von der TRAS 310 bzw. 320 betroffen sind. Je nach Region wurde zudem deutlich, dass die Schwerpunkte der Anwendung der technischen Regeln sehr unterschiedlich liegen. Während die Betriebsbereiche im norddeutschen Raum stark von der TRAS 320 betroffen sind und daher die Behörden deren Anwendung intensiv diskutieren, werden die Fragen hierzu in den süddeutschen Bundesländern als wenig relevant angesehen und wurden daher nicht beantwortet. Der Schwerpunkt liegt in den süddeutschen Bundesländern eindeutig auf der TRAS 310. Leider haben Immissionsschutzbehörden aus einigen Bundesländern, die in den letzten Jahren massiv von Hochwasserereignissen und Starkniederschlägen betroffen waren, auf die Fragebögen gar nicht geantwortet.

Die nachfolgenden Ausführungen zur Auswertung der Fragebögen konzentrieren sich wegen des Umfangs der Fragebögen auf die Problembereiche im Vollzug beider technischen Regeln. Einen besonderen Raum nehmen die begleitenden Kommentare ein, die zusätzliche wichtige Hinweise und Erläuterungen zu der Beantwortung einzelner Fragen geben.

9.2.1 Einleitende Fragen

Über Naturgefahren haben die meisten Behördenvertreter*innen im Zusammenhang mit der TRAS 310 und der TRAS 320 mit den Betreibern gesprochen (Frage 1). Dabei mussten in 6 von 12 Fällen die Betreiber auf die beiden technischen Regeln aufmerksam gemacht werden (Frage 2). Darüber hinaus gab es in 6 Fällen mehr oder weniger große Verständnisprobleme, die von den Behördenvertretern*innen ergänzend erläutert wurden (Frage 3). Im Einzelnen wurden folgende grundsätzliche Problemfelder genannt:

1. Methodisches Vorgehen

In der TRAS 310 wird auf Zu- und Ablaufströme von Wasser zu/von Betriebsbereichen verwiesen und gegebenenfalls eine Zu- und Abflussbilanz eingefordert. Diese Forderung sei zu komplex und sei nur dort erforderlich, wo keine Hochwassergefahrenkarten zur Verfügung stehen.

2. Unterschiedliche Bewertungsmaßstäbe und Zuständigkeiten

Von mehreren Behördenvertretern*innen wird bezüglich der TRAS 320 auf die unterschiedlichen Zuständigkeiten und Bewertungen der Statik von Anlagen verwiesen. Es gibt deshalb auch unterschiedliche Sichtweisen bei der zuständigen Baubehörde und der zuständigen Immissionsschutzbehörde. Dies betrifft vor allem den Bestandsschutz nach Baurecht, der dem dynamischen Begriff des Standes der Sicherheitstechnik gegenübersteht.

3. Verhältnismäßigkeit

Angeführt wird auch das Problem der Verhältnismäßigkeit, weil in verschiedenen Fällen zahlreiche Betriebsbereiche von einer Neuberechnung oder Neuerstellung der Statik betroffen sind, was enorme Kosten verursachen würde, ohne dass damit der Stand der Sicherheitstechnik verbessert wird.

Hierbei ist für die Überprüfung von Standsicherheitsnachweisen folgende Differenzierung vorzunehmen:

- a) Standsicherheitsnachweis und Dokumentation der Ausführung liegen vor und entsprechen den Anforderungen nach DIN 1055 ab 2005 (d.h. Windzonen sind berücksichtigt). Es ist nur noch der Nachweis der Einhaltung der weitergehenden Anforderungen der TRAS 320 erforderlich.
- b) Standsicherheitsnachweis und Dokumentation der Ausführung liegen vor und entsprechen nicht den Anforderungen nach DIN 1055 ab 2005 (d.h. Windzonen sind nicht berücksichtigt). Es ist der Nachweis der Einhaltung der Anforderungen der DIN EN 1991 und TRAS erforderlich.
- c) Standsicherheitsnachweis und Dokumentation der Ausführung liegen nicht vor. Es ist eine Neuerstellung und der Nachweis der Einhaltung der Anforderungen nach DIN EN 1991 und der TRAS erforderlich.

Davon zu unterscheiden sind die Kosten für Nachrüstungsmaßnahmen.

4. Rechtsstatus der TRAS (Verbindlichkeit)

Mehrere Behördenvertreter*innen verweisen auf den unklaren Rechtsstatus bzw. die aus ihrer Sicht unklare Verbindlichkeit einer TRAS. Dabei stellt sich die Frage, ob der Stand der Sicherheitstechnik in der TRAS abschließend definiert wird.

5. Alternative Lösungsansätze zur Einhaltung des Standes der Sicherheitstechnik

Im Vergleich zu den Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) fehlt in den TRAS 310 und 320 der Hinweis, wonach auch andere Lösungsansätze denkbar sind, sofern die gleiche Sicherheit erreicht wird. Dieser Hinweis bezieht sich auf die möglicherweise erforderliche Nachrüstung von Bestandsanlagen durch die Zugrundelegung einer Windlast, die statistisch einmal in 100 Jahren vorkommt.

6. Umfang der TRAS sowie der Hinweise und Erläuterungen

Die TRAS sowie die Hinweise und Erläuterungen dazu wurden in einem Fall als zu umfangreich empfunden. Hilfreicher wären sinnvolle Beispiele von Störfällen, die naturbedingt stattgefunden haben.

Darüber hinaus werden einige Problembereiche bei den nachfolgenden Antworten immer wieder aufgegriffen. Dies betrifft vor allem die Frage der Gewährleistung der Standsicherheit von Bestandsanlagen gegenüber Wind.

Im Gegensatz zu diesen Kritikpunkten ist festzuhalten, dass 5 von 12 Behördenvertreter*innen die TRAS 310 und 320 als klar gliedert und verständlich ansehen.

Die aufgeführten Problemfelder machen deutlich, dass eine Einordnung der verschiedenen Kritikpunkte hinsichtlich der Ursachen und der möglichen Abhilfemaßnahmen erforderlich ist. So liegt die Ursache einiger Kritikpunkte nicht in den Regelungen der TRAS 310 oder 320, wie z.B. die Frage nach der Verbindlichkeit einer TRAS. Daher werden solche Punkte nicht durch Änderungen in der TRAS zu lösen sein.

9.2.2 Grundlegende Fragen

9.2.3 Anwendung, Methodik und fehlende Gefahrenquellen (Frage 4 bis 8)

Mit einer Ausnahme wird die Anwendung der TRAS 310 allgemein anerkannt (Frage 4). Dies gilt auch für bestehenden Anlagen.

Differenzierter sieht das Bild allerdings bei der TRAS 320 aus (Frage 5). Im Zusammenhang mit der Anwendung wurde von ungefähr der Hälfte der Behördenvertreter*innen auf die Schwierigkeiten im Vollzug der TRAS 320 bei Bestandsanlagen hingewiesen. Begründet wurde dies vor allem mit dem Aufwand für Nachberechnungen zum Nachweis der Standsicherheit von Bestandsanlagen, die meist zwischen 1970 – 1990 gebaut wurden. Darüber hinaus wird auf die Aussagen im Klimabericht Niedersachsen und Schleswig-Holstein verwiesen, in denen dargestellt wird, dass die Ergebnisse von Klimaprojektionen keinen eindeutigen Trend hinsichtlich der Veränderung der Windverhältnisse erkennen lassen.

Während die methodische Vorgehensweise der TRAS 320 nicht in Frage gestellt wurde, wurde im Zusammenhang mit Frage 6 auf die Schwierigkeiten im Vollzug verwiesen, weil sich die Berechnungsgrundlagen für Standsicherheitsnachweise seit 2005 erheblich verändert haben. Darüber hinaus wird darauf aufmerksam gemacht, dass nur wenige Tragwerksplaner mit ausreichender Arbeitskapazität derzeit zur Verfügung stehen.

Grundsätzlich ablehnend zu beiden TRAS äußerte sich nur ein Behördenvertreter, der die umgebungsbedingten Gefahrenquellen als Bestandteil der regelmäßigen Überwachung von Betriebsbereichen ansieht. Eine KAS-Empfehlung, in der die beiden Themen abgearbeitet werden, würde aus seiner Sicht ausreichen.

Bezüglich der praktischen Umsetzung der methodischen Vorgehensweise (Frage 6) in der TRAS 310 wird nochmals darauf hingewiesen, dass die Zu- und Ablaufbilanzen zu komplex und praxisfremd sind.

Auf ein grundsätzliches Problem weist ein Vertreter bzgl. der Untersuchungstiefe bei der detaillierten Gefahrenquellenanalyse hin (Frage 7). Es wird angemerkt, dass teilweise in den Betrieben stark von der methodischen Vorgehensweise der TRAS 310/320 abgewichen wird und bis-

weilen nur sehr vereinfachte überschlägige Gefahrenquellenanalysen durchgeführt werden. Gleichwohl stellen einige Behördenvertreter fest, dass auch detaillierte Gefahrenquellenanalysen durchgeführt werden (Frage 8).

Weitgehend Übereinstimmung herrscht in der Ablehnung, neue Gefahrenquellen hinzuzunehmen. Nur ein Behördenvertreter verwies auf die Gefahr von Waldbränden in Trockenzeiten.

9.2.3.1 Sicherheitskonzept (gemäß TRAS), Sicherheitsbericht, Konzept zur Verhinderung von Störfällen (Frage 9 bis 11)

Das Sicherheitskonzept gemäß TRAS wurde nach Aussagen der Behörden in keinem Fall als separates Dokument erstellt (Frage 9). Auch wurde dies nach Kenntnis der Behördenvertreter*innen niemals von Versicherungen verlangt.

Weitgehende Übereinstimmung herrscht bei den Behördenvertreter*innen in der Beobachtung, dass der Sicherheitsbericht für Betriebsbereiche der oberen Klasse entsprechend den Anforderungen der TRAS 310 in den meisten Fällen schon angepasst wurde (Frage 10). Ähnliches ist für die Konzepte zur Verhinderung von Störfällen für Betriebsbereiche der unteren Klasse feststellbar. (Frage 11).

Anders sieht dies jedoch für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten aus. Nur wenige Behördenvertreter*innen sehen die TRAS 320 als umgesetzt an. In diesem Zusammenhang wird auf die Problembereiche verwiesen, die unter Kapitel 2.2.1 schon aufgeführt sind.

9.2.3.2 Unterweisungen, Gefahrenabwehrplanung, Hinweise zur TRAS, Zusammenarbeit (Frage 12 bis 16)

Fast alle Behördenvertreter*innen bestätigen, dass die Unterweisungen der Beschäftigten Hinweise zum Verhalten bei Einwirkung natürlicher Gefahrenquellen enthalten (Frage 12). Ein Behördenvertreter gab zu, hierzu keine Kenntnis zu haben. Jedoch ist beabsichtigt, dies im Rahmen kommender Störfallinspektionen zu thematisieren.

Ein uneinheitliches Bild ergab sich bei der Auswertung der Frage bzgl. der Abstimmung der Alarm- und Gefahrenabwehrplanungen zwischen Unternehmen und Behörden (Frage 13). Hier scheint bisweilen ein Defizit vorzuliegen, das von einigen Behördenvertretern beobachtet wird (Frage 13). Ein Behördenvertreter weist daraufhin, dass in seinem Bundesland die Unteren Katastrophenschutzbehörden hierfür zuständig sind.

Interessant sind auch die Hinweise zur Zusammenarbeit zwischen Betreibern, Behörden und Sachverständigen bzgl. der Umsetzung der TRAS 310 und TRAS 320 (Frage 16). Dazu wurden folgende Anmerkungen gemacht:

1. Die Kommunikation zwischen Betreibern, Behörden und Sachverständigen seien ein normales Geschäft in der Anlagensicherheit.
2. Vorteilhaft sei die Abstimmung mit den Behörden vor allem bei Planungen.

Wichtige Gesprächspunkte waren hierbei:

1. Vorgehensweise bei der Umsetzung der TRAS 320, wenn sicherheitsrelevante Änderungen in Altanlagen vorgenommen werden sollen.
2. Aufwand bei der Gefahrenquellenanalyse und der Erarbeitung eines Schutzkonzeptes entsprechend den Anforderungen der TRAS 320 (Verhältnismäßigkeit).

9.2.4 Fragen zur TRAS 310

9.2.4.1 Gefahrenquellenanalyse (Frage 17 bis 23)

Wie die Beantwortung der Fragen 17 und 18 ergab, ist die Beschaffung von Informationsmaterial für die Gefahrenquellenanalyse und deren Auswertung in der Regel problemlos. Je nach Lage des Betriebsbereichs werden überwiegend Flusshochwasser und Starkniederschlag betrachtet (Frage 19 und 20). Auch Treibgut, Küstenhochwasser und der Grundwasseranstieg werden im Zusammenhang mit der Gefahrenquellenanalyse untersucht. In einem Fall wurde auch ein möglicher Erdbeben, in einem anderen Erdbeben als Gefahrenquelle betrachtet.

Ein differenziertes Bild ergab die Auswertung der Frage 21 bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf die Gefahrenquellen. Etwas mehr als die Hälfte der Behördenvertreter verneinte die Berücksichtigung des Klimawandels bei der Gefahrenquellenanalyse. In einem Fall wird der Klimawandel nur für Betriebsbereiche der oberen Klasse berücksichtigt.

Im Zusammenhang mit der Gefahrenquellenanalyse werden in etwa der Hälfte der Fälle die Zu- und Ablaufwege des Wassers berücksichtigt (Frage 22). In diesem Zusammenhang konnten in drei Fällen sicherheitsrelevante Anlagenteile als potenziell gefährdet identifiziert werden. Hierbei handelt es sich um Lagerbereiche sowie produktionstechnische Anlagen. Mehrere Behördenvertreter beobachten, dass die Betreiber von Betriebsbereichen bei der Ermittlung des Staudrucks aufgrund der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Last beim Aufprall aufgrund der Kombination Strömungsgeschwindigkeit und Treibgut teilweise überfordert sind (Frage 23).

9.2.4.2 Szenarien, Schutzziele, Maßnahmen (Fragen 24 bis 31)

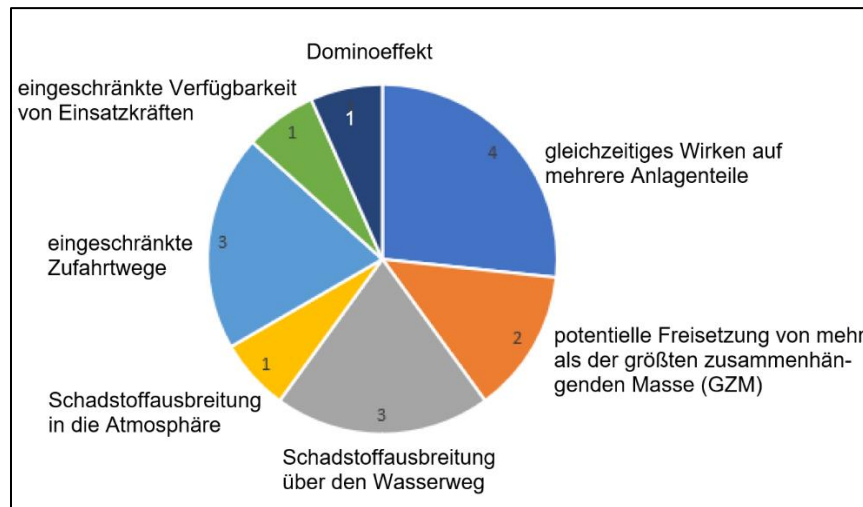
Als Auslöser von Störfallszenarien werden nahezu alle vorgeschlagenen Ursachen berücksichtigt, jedoch nicht in jedem Fall. In 8 von 12 Fällen wird das HQ₁₀₀ als Grundlage für das Schutzziel definiert, in 4 Fällen ein Hochwasserereignis das seltener auftritt (Frage 25 und 26).

Organisatorische Maßnahmen als Alternative zu technischen Maßnahmen werden nach Aussage der Genehmigungsbehörden häufig angewandt (5 von 10 Antworten). Die organisatorischen Maßnahmen werden in Abhängigkeit von Pegelständen von den Betreibern durchgeführt (Frage 28). Hierbei werden verschiedene Internetplattformen als Informationsquellen herangezogen. Voraussetzung für organisatorische Maßnahmen sind ausreichende Vorwarnzeiten. Allerdings werden in den Betrieben weitere Restriktionen diskutiert. Hierzu zählen ausreichende Transportkapazitäten, unzureichend große Lagerbereiche in hochwassersicheren Gebieten, eingeschränkte Personalkapazitäten sowie die Kosten für den Transport und die Betriebsunterbrechung (Frage 30).

9.2.4.3 Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 32 bis 34)

Abbildung 75 zeigt die Beantwortung der Frage 32 zu den Bedingungen für Szenarien der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (AGAP). Die vorhandenen Pläne wurden bzgl. der umgebungsbedingten Gefahrenquellen ergänzt (Frage 34).

Abbildung 75: Bedingungen für Szenarien der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung gegenüber Hochwasser und Starkregen



9.2.5 Fragen zur TRAS 320

9.2.5.1 Unterlagen, Gefahrenquellen, Standsicherheitsnachweise (Frage 35 bis 41)

Wie schon zuvor herausgestellt wurde, reduzierte sich die Zahl der auswertbaren Fragebögen bezüglich der TRAS 320 von 12 auf 9.

In den Antworten wurde immer wieder deutlich, dass die Überprüfung der Bestandsanlagen ein wesentliches Problem bei der Umsetzung der TRAS 320 darstellt. Dies wird besonders an der Tatsache deutlich, dass nach Aussage der Behördenvertreter*innen die Unterlagen über die Auslegung von bestehenden Anlagen in Betriebsbereichen in den meisten Fällen nicht vollständig vorliegen (Frage 35). Wenn überhaupt sind bisweilen nur Baugenehmigungen für die zum Betriebsbereich gehörenden Gebäude zu finden. In einem Fall wird darauf hingewiesen, dass es sich um baurechtliche Unterlagen handelt, die den Immissionsschutzbehörden in der Regel nicht vorliegen. In einem anderen Fall wird die Einhaltung der Baunormen in den entsprechenden Genehmigungsverfahren regelmäßig geprüft.

Berücksichtigung finden bei der statischen Auslegung die Windlasten sowie die Schnee- und Eislasten gleichermaßen. Bisweilen werden auch Schwingungen betrachtet. In zwei Fällen wurden hierbei sogar die Auswirkungen des Klimawandels auf Veränderungen der Gefahrenquelle betrachtet (Frage 37). In vier von sechs Antworten wird die Frage mit Ja beantwortet, ob die Umstellung der statischen Berechnungen auf ein 100-jährliches Ereignis größere Schwierigkeiten in den Unternehmen verursacht (Frage 38). Nicht bekannt ist den meisten Behörden, ob die ursprünglich angesetzten Lastreserven noch nutzbar sind (Frage 39). Auf die grundsätzlichen Probleme mit der Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 insbesondere bei bestehenden Anlagen wurde in Kapitel 2.2.2 schon eingegangen. Daher ist den Behörden auch nicht bekannt, ob diese Einstufung bislang Berücksichtigung gefunden hat (Frage 41).

9.2.5.2 Organisatorische Maßnahmen (Frage 42 bis 45)

In der Diskussion um mögliche organisatorische Maßnahmen als Alternative zu technischen Maßnahmen wurde das Abfahren von Anlagen sowie die Verlagerung von gefährlichen Stoffen in sichere Bereiche genannt. Wie die Auswertung der Fragebögen ergab, wird eine solche Alternative meist nicht angewandt. In einem Fragebogen wird dazu angemerkt, dass derzeit diese Maß-

nahmen diskutiert werden, jedoch schwer zu realisieren sind, weil prozesstechnische Anlagen für Umlagerungsprozesse zum Teil nicht ausgelegt sind (Frage 42). In diesem Zusammenhang wird in einem Fragebogen kritisch angemerkt, dass bezüglich der Umlagerung erhebliche Unsicherheit darüber besteht, ob leer gefahrene Anlagenteile eine bessere oder schlechtere Stabilität aufweisen als im gefüllten Betriebszustand (Fragen 44 und 45).

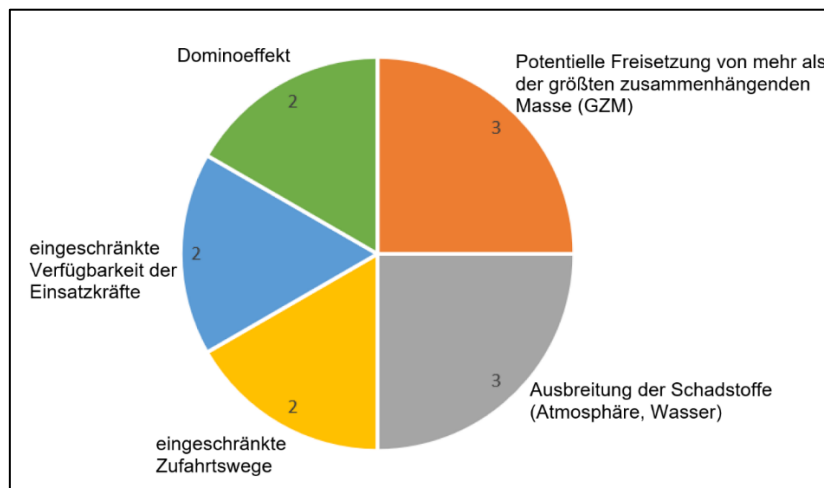
9.2.5.3 Windbedingte Projektile, Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 46 bis 48)

Windbedingte Projektile sind offenbar einigen Behörden bekannt, jedoch führten sie bislang in keinem Fall zu einem Störfall (Frage 46).

Abbildung 76 zeigt das Ergebnis der Befragung bzgl. der Bedingungen für Szenarien in der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung bzgl. der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten (Frage 47). Hier zeigt sich, dass die verschiedenen Ausbreitungswege und Restriktionen in den Alarm- und Gefahrenabwehrplänen berücksichtigt werden. Ein Behördenvertreter weist darauf hin, dass die Szenarien z.T. auf der Basis anderer Gefahrenquellen genutzt werden (Frage 47). Beispielsweise wird nicht ein Projektil oder das Versagen eines Bauwerks durch z.B. Wind angenommen, sondern eine andere Gefahrenquelle, die zum Versagen des Bauteils und somit zur Freisetzung von Stoffen führt.

Ein anderer erläutert, dass die betroffenen Unternehmen von Betriebsbereichen in der Regel die Sicherung der Anlagen im Vorfeld eines Ereignisses durch Abfahren der Anlagen vorsehen. Betriebliche Notfallstäbe entscheiden über die Vorgehensweise. Außerdem würden Havariebecken zur Verfügung stehen.

Abbildung 76: Bedingungen für Szenarien der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung gegenüber Wind, Schnee- und Eislasten



9.3 Ergebnisse der Anwenderbefragung - Sachverständige

Den Sachverständigen wurden insgesamt 54 Fragen gestellt, wobei die Gliederung der Fragen analog zu den anderen Fragebögen aufgebaut war. Einige der angefragten Sachverständigen meldeten sich schriftlich oder auch telefonisch, um mitzuteilen, dass ihre Erfahrungen noch nicht ausreichen, um die Fragen sachgerecht zu beantworten. Andere beantworteten die Fragen zwar nicht, sendeten jedoch grundsätzliche Hinweise und Kommentare, die als Ergänzung zur Auswertung der Fragebögen in den folgenden Abschnitten mitberücksichtigt werden. So konn-

ten die Erfahrungen von insgesamt 7 Sachverständigen für die Auswertung berücksichtigt werden.

9.3.1 Einleitende Fragen

Veranlasst durch die Behörden werden umgebungsbedingten Gefahrenquellen in allen Fällen im Zusammenhang mit den technischen Regeln TRAS 310 und 320 diskutiert, wobei nicht zwingend in jedem Fall konkretere Untersuchungen angestellt werden (Fragen 1, 2 und 3). Probleme ergeben sich für einen Sachverständigen mit dem Erkennen der Anforderungen an die Betriebsbereiche.

9.3.2 Grundlegende Fragen

Bezüglich der Anwendung der technischen Regeln sowie der Methodik wird meist zwischen der TRAS 310 und 320 differenziert. Während die Anwendung und die Methodik der TRAS 310 in den meisten Antworten als angemessen bzw. anwendbar eingeschätzt wird, wird dies bei der TRAS 320 verneint (Fragen 4, 5, 6 und 7). Begründet wird diese Einschätzung mit den fehlenden Statiken für Bestandsanlagen. Darüber hinaus bemerkt ein Sachverständiger, dass Fristsetzungen in einer technischen Regel sehr ungewöhnlich seien. Damit würde nach seiner Auffassung in die Befugnisse der Vollzugsbehörden eingegriffen.

Ein anderer Sachverständiger beklagt die uneinheitliche Vorgehensweise von Unternehmen und Behörden. Insgesamt wird mit der Thematik „umgebungsbedingte Gefahrenquellen“ noch recht „vorsichtig“ umgegangen. Gleichwohl gibt es offenbar in neueren Genehmigungsbescheiden in den Nebenbestimmungen den Hinweis, dass ein Nachweis der Umsetzung der Anforderungen der TRAS 320 zu erfolgen hat und zu dokumentieren ist.

Ein Sachverständiger geht bzgl. der TRAS 310 sogar noch einen Schritt weiter. Er stellt zunächst fest, dass sich in BImSchG-Genehmigungen für Neubauvorhaben unter den Nebenbestimmungen zur Anlagensicherheit kein Hinweis auf eine Hochwassergefährdung bzw. keine Vorgabe zur Berücksichtigung der TRAS 310 befindet. „Der Hinweis auf eine Hochwassergefährdung findet sich i.d.R. erst nach der Begründung im Abschnitt *Hinweise*.“ Der Sachverständige kommt daher zu folgendem Schluss: „So wird unbewusst verhindert, dass dieses Thema auf dem Schirm steht“.

Die Durchführung einer detaillierten Gefahrenquellenanalyse wurde in den meisten Fällen von den Sachverständigen nur für die TRAS 310 durchgeführt (Frage 8). Die Berücksichtigung weiterer Gefahrenquellen wurde von allen abgelehnt (Frage 9)

Die Erstellung eines Schutzkonzepts nach TRAS als eigenständiges Dokument erfolgte nur dann, wenn es durch einen Sachverständigen ausgearbeitet wird (Frage 10). Die betroffenen Unternehmen verfassen meist kein eigenständiges Dokument. Darüber hinaus werden Schutzkonzepte meist nur für Hochwasser und Starkniederschläge für die Betriebsbereiche der oberen Klasse erstellt (Frage 11). Schutzkonzepte für Wind, Schnee- und Eislasten konnten bislang aufgrund der fehlenden Unterlagen für Bestandsanlagen noch nicht entwickelt werden. Für die Betriebsbereiche der unteren Klasse werden meist weder für Hochwasser und Starkniederschläge noch für Wind, Schnee- und Eislasten Schutzkonzepte erarbeitet (Frage 12). Es wird bei der Entwicklung von Schutzkonzepten offenbar zwischen Betriebsbereichen der oberen und unteren Klasse unterschieden.

Mehrheitlich wird die Frage 13 nach der Unterweisung der Beschäftigten gegenüber natürlichen Gefahrenquellen sowie der Abstimmung der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne mit den Behör-

den (Frage 14) mit Ja beantwortet. Allerdings merkt ein Sachverständiger kritisch an, dass Betreiber in Industrieparks oftmals keine klare Kenntnis von einer gegebenen Hochwassergefährdung haben und ihnen auch nicht bewusst ist, dass sich diese mit der Zeit durch den Klimawandel ändern kann. Die Nutzung der technischen Regeln sowie der Hinweise und Erläuterungen erfolgt vor diesem Hintergrund meist nicht (Fragen 15 und 16).

Bzgl. der Erfahrungen bei der Zusammenarbeit zwischen Betreibern, Behörden und Sachverständigen (Frage 17) wird von einem Sachverständigen kritisch berichtet, dass eine große Unsicherheit darin besteht, ob und wie die technischen Regeln, insbesondere die TRAS 320, vollzogen werden soll. „Behörden fordern bis jetzt nicht die explizite Darstellung des Nachweises zur Einhaltung der Anforderungen nach der TRAS 320 in Genehmigungsunterlagen und auch nicht in Genehmigungsbescheiden und Nebenbestimmungen.“ Ergänzend zur Bewertung dieser Aussage ist anzumerken, dass dieser Sachverständige in den mittleren Regionen Deutschlands ansässig ist. Er bestätigt das, was bei der Auswertung der Antworten von Behördenvertretern auch aufgefallen ist, dass es ein Nord/Südgefälle bei der Anwendung der TRAS 320 gibt.

9.3.3 Fragen zur TRAS 310

9.3.3.1 Gefahrenquellenanalyse (Frage 18 bis 24)

In der Regel gibt es keine Schwierigkeiten bei der Beschaffung von öffentlich zugänglichen Informationen. Betriebliche Dokumentationen vergangener Ereignisse existieren meist nicht (Frage 18 und 19). Je nach Lage der Betriebsbereiche werden die Gefahrenquellen Flusshochwasser, Küstenhochwasser, Grundwasseranstieg und Starkniederschläge betrachtet, in Einzelfällen auch Treibgut und Erdbeben (Frage 20). Weitere Gefahrenquellen wurden als nicht relevant oder zu komplex eingestuft (Frage 21). Der Klimawandel wurde bei der Bewertung der Naturgefahren meist nicht berücksichtigt (Frage 22).

Die Betrachtung der Zu- und Ablaufwege von Wasser aufgrund von Starkniederschlägen (Frage 23) wurde meist durchgeführt und führte in einigen Fällen zur Identifikation von potentiell gefährdeten Anlagenteilen. Genannt werden in diesem Zusammenhang Schaltschränke und Elektroverteilungen in Kellergeschossen sowie Lagertanks. Quantitative Aussagen im Sinne einer Zu- und Ablaufbilanzierung waren kaum möglich. Dies bezieht sich auch auf die Ermittlung des Staudrucks sowie der Last beim Aufprall von Treibgut (Frage 24).

9.3.3.2 Szenarien, Schutzziele, Maßnahmen (Fragen 25 bis 33)

Als auslösende Szenarien für Störfälle werden alle in der Frage 25 genannten Fälle angegeben. Als Schutzziel wird meist ein Ereignis definiert, das einmal in 100 Jahren auftritt (Frage 26). Andere Schutzziele werden verneint (Frage 27). Die Möglichkeit der nassen Vorsorge durch organisatorische Maßnahmen wurde nicht in allen Fällen von den Behörden akzeptiert (Frage 28). Gleichwohl gehören in einigen Fällen organisatorische Maßnahmen zum Schutzkonzept von Betrieben (Frage 29). Die hierfür erforderlichen Zeitangaben der Sachverständigen zur Durchführung der verschiedenen Maßnahmen sind in Tabelle 18 zusammengestellt (Frage 30):

Tabelle 18: Zeitbedarfe für organisatorische Maßnahmen gegen Hochwasser – Sachverständigenbefragung

Anlagentyp/Anlagenteil	Maßnahme	Zeit für die Durchführung der Maßnahme
Gefahrstofflager (Hochregal)	Umschichten der Gebinde von der unteren in höhere Regalebenen	0,5 Tag
Lagertanks	- teilentleerte Tanks füllen - leere Tanks ggf. mit Wasser füllen	1 – 5 Tage Je nach Tankgröße und Verfügbarkeit des Füllgutes
Produktionsanlagen	Abfahren	0 – 2 Tage

Für die Durchführung solcher Maßnahmen werden von Seiten der Behörden meist keine Bedenken erhoben (Frage 32). Die Grenzen von organisatorischen Maßnahmen liegen bei nicht ausreichenden Transportkapazitäten, nicht zur Verfügung stehende Lagerflächen in sicheren Bereichen, beschränkten Personalkapazitäten sowie Kosten für die Maßnahmen (Frage 31).

Zur Durchführung von organisatorischen Maßnahmen sind rechtzeitige Vorwarnungen erforderlich. Hierzu nutzen die Unternehmen nach Aussage der Sachverständigen Informationsplattformen im Internet, Wetterdienste, tägliche online-Pegelstandsabfragen sowie die Meldungen der Gefahrenabwehrzentrale in Chemieparcs (Frage 30).

Für die trockene Vorsorge wurden vor allem in Hochwasserschutzsysteme für Kelleröffnungen, Kellertüren und -schächten investiert. Darüber hinaus wurden auch Schutzsysteme für außen aufgestellte Trafostationen angeschafft (Frage 33). Die jeweiligen Investitionen sind den Sachverständigen nicht bekannt.

9.3.3.3 Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 34 bis 34)

Für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung wird in allen Fällen das gleichzeitige Wirken von Hochwasser/Überflutung auf mehrere Anlagenteile berücksichtigt. Darüber hinaus wird auch die Ausbreitung der Schadstoffe über den Wasserweg sowie in die Atmosphäre betrachtet. Auch der Dominoeffekt wird vereinzelt berücksichtigt (Frage 34). Hierzu sind die Szenarien in der TRAS 310 bisweilen hilfreich (Frage 35).

9.3.4 Fragen zur TRAS 320

9.3.4.1 Unterlagen, Gefahrenquellen, Standsicherheitsnachweise (Frage 37 bis 43)

Als größtes Problem für die Anwendung der TRAS 320 stellte sich meist das Fehlen der statischen Berechnungen von Bestandsanlagen heraus. Nur in einem Fall waren diese Unterlagen nach Aussage eines Sachverständigen vorhanden (Frage 39). Betrachtet werden meist Windlasten, in einzelnen Fällen auch Schwingungen und Eislasten (Frage 38). Hierbei werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gefahrenquelle in der Regel nicht betrachtet (Frage 39).

Ausnahmslos wird die Schwierigkeit der nachträglichen Berechnung der Standsicherheit von bestehenden Anlagen und Gebäuden hervorgehoben (Frage 40). Neben der unzureichenden Dokumentation von Anlagen und Gebäuden werden auch Rohrleitungsbrücken genannt, die gegenüber der Ursprungsplanung mit zusätzlichen Rohrleitungen belastet werden. Eine Erstprüfung nach DIN 6200 oder einem gleichwertigen Verfahren für Bestandsanlagen ist ebenfalls auf große Schwierigkeiten gestoßen. Auch hier wird auf die unzureichende Bestandsdokumentation ver-

wiesen (Frage 41). Darüber hinaus erscheint die Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 bei der nachträglichen Berechnung der Standsicherheit problematisch (Frage 42). Zum Teil liegen jedoch auch noch keine Erfahrungen vor. Den Sachverständigen ist meist nicht bekannt, ob die Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 umfassend angewandt wird (Frage 43).

9.3.4.2 Organisatorische Maßnahmen (Frage 44 bis 47)

Bei Starkwinden werden in zahlreichen Fällen organisatorische Maßnahmen, wie zum Beispiel das Abfahren von Anlagen, durchgeführt. Dies gilt insbesondere für hoch gelegene exponierte Teile von Freianlagen, die innerhalb von 0,5-2 Tagen heruntergefahren werden können (Frage 44). Die Informationen bezüglich der Vorwarnungen werden in der Regel aus unterschiedlichen Wetterdiensten bezogen (Frage 45). Ähnlich wie bei der Beantwortung der Fragen bezüglich der TRAS 310 werden auch hier die im Fragebogen genannten Grenzen von organisatorischen Maßnahmen bestätigt (Frage 46).

9.3.4.3 Windbedingte Projektile, Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 48 bis 54)

Einigen Sachverständigen ist durchaus bekannt, dass bei vergangenen Sturmereignissen Gegenstände in die Betriebsbereiche hineingeweht wurden, jedoch der bestimmungsgemäße Betrieb der Anlagen nicht bedroht war (Frage 48). In den Alarm- und Gefahrenabwehrplänen werden die Ausbreitungen von Schadstoffen sowohl über den Wasserweg als auch in die Atmosphäre berücksichtigt. Darüber hinaus werden auch Dominoeffekte betrachtet (Frage 50).

Die Sicherheitsberichte sind nach Aussage der Sachverständigen bislang aufgrund der zuvor genannten Probleme eher selten überarbeitet worden. Dies gilt für Betreiber von Betriebsbereichen der oberen Klasse (Fragen 52 und 53). Eigenständige Dokumente für das Schutzkonzept liegen bislang nicht vor (Frage 54).

9.4 Ergebnisse der Anwenderbefragung – Betriebsbereiche

Die Auswertung der Fragebögen umfasste Betriebe der Chemischen Industrie, der Metallindustrie sowie Biogasanlagen. Während die Chemische Industrie sich intensiv mit der TRAS 310 und in Norddeutschland auch mit der TRAS 320 auseinandersetzen, sind beide TRAS den Betreibern von Biogasanlagen, sofern sie unter die StörfallV fallen, noch weitgehend unbekannt. Gleichwohl haben sich auch die befragten Betreiber durchaus mit Naturgefahren schon einmal befasst. Dies gilt je nach örtlicher Lage der Anlage sowohl für die Hochwassergefahr als auch für Blitzschlag.

9.4.1 Einleitende Fragen

Alle Verantwortlichen für Betriebsbereiche bestätigten, dass sie sich schon einmal mit Naturgefahren auseinandergesetzt haben (Frage 1). Während die befragten Betreiber von Biogasanlagen bislang nicht von den Behörden auf die beiden technischen Regeln aufmerksam gemacht wurden, sind diese jedoch Gesprächsgegenstand in der Chemischen Industrie sowie der Metallindustrie (Frage 2). Unterschiedlich beantworteten die Unternehmen die Frage nach Verständnisschwierigkeiten. Probleme gibt es teilweise mit dem Erkennen von Anforderungen für Betriebsbereiche (Frage 3). Auch wird schon hier teilweise auf die Probleme mit der Nachrüstpflicht für Bestandsanlagen hingewiesen. Dies gilt für alle drei Branchen.

9.4.2 Grundlegende Fragen

9.4.2.1 Anwendung, Methodik und fehlende Gefahrenquellen (Frage 4 bis 8)

Die Frage nach der Angemessenheit der Anwendung der TRAS 310 wird von allen befragten Betriebsvertretern*innen meist als angemessen beurteilt.

Die Anwendung der TRAS 320 auf Bestandsanlagen wird dagegen von den Unternehmen der Chemischen Industrie sowie den Betreibern von Biogasanlagen, deren Gärbehälter- und Gasspeicherabdeckungen aus Membranen bestehen, wegen der möglichen Nachrüstung von Bestandsanlagen (Frage 5), als unangemessen beurteilt. Daher wird auch die praktische Umsetzbarkeit der TRAS 320 mit dem Hinweis auf den Aufwand und die Kosten verneint (Frage 6). Unproblematisch sehen dagegen die Vertreter der Metallbranche die praktische Umsetzbarkeit der Technischen Regeln.

Eine Gefahrenquellenanalyse wurde von den antwortenden Betreibern von Betriebsbereichen für Hochwasser und Starkregen durchgeführt, teilweise auch für Wind, Schnee- und Eislasten (Frage 7).

Ein Betreiber sah die Notwendigkeit zur Ergänzung der technischen Regeln. Lange Trockenperioden führen zu einer erhöhten Brandgefahr sowie zu Niedrigwasserständen in Oberflächengewässern. Auch der Grundwasserspiegel sinkt bei langen Trockenperioden (Frage 8). Dies kann zu einer Verminderung der zur Verfügung stehenden Löschwassermenge führen. Auch die Kühlung von Anlagen kann hierdurch erschwert werden.

9.4.2.2 Sicherheitskonzept (gemäß TRAS), Sicherheitsbericht, Konzept zur Verhinderung von Störfällen (Frage 9 bis 11)

Die Erstellung eines Sicherheitskonzeptes gemäß TRAS wird von den befragten Unternehmen durchgängig nicht als eigenständiges Dokument durchgeführt (Frage 9). Bei Unternehmen der Metallindustrie wurden vielmehr die Konzepte zur Verhinderung von Störfällen gemäß § 7 StörfallV und Sicherheitsberichte nach § 9 StörfallV unter Berücksichtigung der TRAS 310 und 320 aktualisiert. Die Unternehmen der Chemischen Industrie haben ihre Konzepte zur Verhinderung von Störfällen gemäß § 7 StörfallV und Sicherheitsberichte nach § 9 StörfallV an die TRAS 310 und je nach Alter des Betriebsbereichs und den damit zur Verfügung stehenden Unterlagen in wenigen Fällen auch an die TRAS 320 angepasst. Aufgrund des Fehlens von Unterlagen und des Aufwandes für die Nachrechnung von Bestandsanlagen ist die Anpassung des Sicherheitskonzeptes an die Anforderungen der TRAS 320 jedoch in den meisten Fällen bislang unterblieben (Frage 10).

9.4.2.3 Unterweisungen, Gefahrenabwehrplanung, Hinweise zur TRAS, Zusammenarbeit (Frage 12 bis 16)

Die Unterweisung von Mitarbeitern bzgl. umgebungsbedingter Gefahrenquellen wird in der Regel durchgeführt (Frage 12). Ein Betrieb hat hier offenbar noch Nachholungsbedarf.

Die Abstimmung der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne erfolgte jeweils mit den zuständigen Behörden. Hierbei werden von den Betreibern die Hinweise und Erläuterungen in den TRAS als nützlich bewertet (Frage 14), weniger die Forschungsberichte (Frage 15).

9.4.3 Fragen zur TRAS 310

9.4.3.1 Gefahrenquellenanalyse (Frage 17 bis 23)

Wie die Antworten in den Fragebögen zeigen, gibt es bei der Informationsbeschaffung und Auswertung keine Schwierigkeiten (Fragen 17 und 18). Mit Ausnahme von Küstenhochwasser werden von den Unternehmen nahezu alle in den Fragebögen aufgeführten Gefahrenquellen bewertet, sofern sie für den Betriebsbereich relevant sind (Frage 19). Allerdings werden die Folgen des Klimawandels nicht in allen Fällen berücksichtigt (Frage 21). Die Betrachtung der Zu- und Ablaufwege führt zwar nicht in jedem Fall zu quantitativen Aussagen über die Intensität der Gefahrenquelle, jedoch konnten in den Betriebsbereichen der Chemischen Industrie durchaus sicherheitsrelevante Anlagenteile als potentiell gefährdet identifiziert werden (Frage 22). Angeführt wurden folgende Anlagenteile:

1. Lagertanks
2. Rohrleitungen
3. Füllstandsmesssonden
4. Destillationskolonnen

Es wird bisweilen jedoch darauf hingewiesen, dass die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen sind.

9.4.3.2 Szenarien, Schutzziele, Maßnahmen (Fragen 24 bis 31)

Bei der Analyse der Gefahrenquelle Hochwasser wird in der Regel nur der Hochwasserstand betrachtet, nicht jedoch die Fließgeschwindigkeit oder die Last beim Aufprall von Treibgut (Frage 23). Als Szenarien werden überwiegend die in den Fragebogen aufgelisteten Ereignisse untersucht (Ausnahme: Zerstörung von Behälterwandungen durch Treibgut). Auch hier sind die Untersuchungen zum Teil noch nicht abgeschlossen (Frage 24).

Die Antworten bzgl. der Schutzzieldefinition fallen recht unterschiedlich aus. Ein Betrieb nimmt ein Hochwasserereignis, das seltener auftritt als ein HQ_{100} . Der andere Betrieb wählt genau ein HQ_{100} . Einem Fall ist auch der Schutz vor Treibgut als Schutzziel festgelegt. In den meisten Fällen wird eine trockene Vorsorge betrieben (Frage 27).

Das Abfahren von Betriebsbereichen als organisatorische Maßnahme und Bestandteil des Schutzkonzeptes wird in der Chemischen Industrie in der Regel vorgesehen (Frage 28). Folgende Zeitangaben werden für einzelne Anlagen/Anlagenteile angegeben (Tabelle 19):

Tabelle 19: Zeitbedarfe für organisatorische Maßnahmen gegen Hochwasser – Befragung von Betreibern von Betriebsbereichen

Anlagentyp/Anlagenteil	Maßnahme	Zeit für die Durchführung der Maßnahme
Destillationsanlagen	Herunterfahren	1 – 2 Tage
Verfahrenstechnische Anlagen	Entleerung von Anlagen Anlagen energielos machen	1 – 2 Tage
Gefahrstofflager mit mobilen Behältern	Umschichten der Behälter in höhere Gebäudebereiche	1 – 2 Tage
Gerüste	Gerüste sichern und Planen entfernen	1 – 2 Tage

Im Bereich der Metallindustrie ist ein Abfahren von Anlagen je nach Produktionsbedingungen offenbar nicht so einfach möglich. Beispielsweise können Anlagen, in denen hohe Temperaturen herrschen, nicht kurzfristig abgefahren werden, weil sonst die Innenverkleidung (z.B. Feuerfestbeton) Risse bekommen kann. Angaben für Zeitbedarfe von organisatorischen Maßnahmen für Biogasanlagen liegen nicht vor.

Als Grenzen für die organisatorischen Maßnahmen wurden darüber hinaus alle in der Frage 30 genannten Einschränkungen angekreuzt (nicht ausreichende Transportkapazitäten, sichere Lagerbereiche stehen nicht ausreichend zur Verfügung, beschränkte Personalkapazitäten sowie Kosten von Betriebsunterbrechungen).

Das Abrufen von Warnungen stellt keine Probleme für alle Unternehmen dar (Frage 29). Als Informationsquellen werden der DWD und andere Internetplattformen genannt.

9.4.3.3 Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 32 bis 34)

Weil die Bewertung der Gefährdungen von Betriebsbereichen in manchen Unternehmen noch nicht abgeschlossen ist, liegen nur wenige Antworten bzgl. der Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung vor (Frage 33). Diese nennen die Ausbreitung von Schadstoffen über den Wasserweg und in die Atmosphäre sowie den Dominoeffekt. Darüber hinaus werden auch die eingeschränkte Verfügbarkeit von Einsatzkräften sowie die eingeschränkten Zufahrtswege berücksichtigt.

Die praktische Umsetzbarkeit von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen wird von den Betrieben nur teilweise als möglich angesehen (Frage 34). In einigen Betrieben laufen die Untersuchungen noch. In keinem Fall wird ein eigenständiges Dokument für das Schutzkonzept nach TRAS erstellt (Frage 35).

9.4.4 Fragen zur TRAS 320

9.4.4.1 Unterlagen, Gefahrenquellen, Standsicherheitsnachweise (Frage 36 bis 42)

In allen Antworten der Chemischen Industrie wird die Frage nach dem vollständigen Vorliegen von Unterlagen (insbesondere Statiken) für Bestandsanlagen verneint (Frage 36). Bekannt ist jedoch, dass die Betriebsbereiche der Chemischen Industrie für Wind, Schwingungen und Schneelasten ausgelegt wurden. Vereinzelt gilt dies auch für Eislasten. Die befragten Betreiber von Biogasanlagen gaben an, dass sie über alle Unterlagen verfügen, jedoch bislang keine Untersuchungen im Sinne der TRAS 320 bzgl. Wind, Schnee und Eislasten durchgeführt haben. Daher müssen in der Auswertung der Fragebögen bzgl. der TRAS 320 Biogasanlagen unberücksichtigt bleiben. Folglich umfassen die nachfolgenden Ausführungen nur noch Betriebe der Chemischen Industrie sowie der Metallindustrie.

Über die Auswirkungen des Klimawandels wurde in den Betrieben der Chemischen Industrie offenbar in allen Fällen diskutiert. In einem Fall wurde sogar ein Anpassungsfaktor bei der Tragwerksplanung einer Neuanlage berücksichtigt, obwohl dieser in der TRAS 320 nicht vorgesehen ist. Dies erfolgte auf freiwilliger Basis.

Der Nachweis der Standsicherheit für ein 100jähriges Ereignis führt in allen Betrieben zu Problemen, weil die erforderlichen Unterlagen der Bestandsanlagen fehlen und eine Nachrechnung aufgrund der DIN EN 1990 (2005) mit großem Aufwand verbunden ist (Fragen 39 und 40).

Entsprechend kritisch wird auch die Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 gesehen. Begründet wird dies mit den Schwierigkeiten der Nachrüstung für Anlagen und Gebäude (Frage 41 und 42).

9.4.4.2 Organisatorische Maßnahmen (Frage 43 bis 46)

Als Alternative zu technischen Maßnahmen werden folgende organisatorische Maßnahmen mit ihren Zeitbedarfen genannt (Frage 43):

Tabelle 20: Zeitbedarfe für organisatorische Maßnahmen gegen Wind, Schnee- und Eislasten – Befragung von Betreibern von Betriebsbereichen

Anlagentyp/Anlagenteil	Maßnahme	Zeit für die Durchführung der Maßnahme
Anlagen/Dächer	Freiräumen der Dächer von Schnee	Beim Schneien
Verfahrenstechnische Anlagen	Entleerung von Anlagen Anlagen energielos machen	1 – 2 Tage
Gefahrstofflager mit mobilen Behältern	Umschichten der Behälter in Gebäude	1 – 2 Tage
Gerüste	Gerüste sichern und Planen entfernen	1 – 2 Tage

Als Grenzen für organisatorische Maßnahmen werden die gleichen wie für Hochwasser und Starkniederschläge angegeben (Frage 45).

9.4.4.3 Windbedingte Projektile, Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (Frage 47 bis 50)

Windbedingte Projektile gab es bei Orkanen vereinzelt in den Betrieben, jedoch wurde der bestimmungsgemäße Betrieb hierdurch nicht gestört (Frage 47). Leere IBC-Behälter werden in einem Fall als Beispiel angegeben.

In einem Antwortbogen wird auf die Kosten für nachträgliche Nachweise und Nachrüstungen eingegangen. Danach liegen die Kosten für die (erneute) Tragwerksberechnung bei 40.000 € pro Anlage (Gebäude). Zur Verstärkung der Fundamente werden rund 100.000 € pro Anlage/ Gebäude veranschlagt (Frage 48).

Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung werden bislang nur in einem Fall genannt. Hierzu zählt die potentielle Freisetzung von mehr als die größte zusammenhängende Masse (GZM), die Ausbreitung von Schadstoffen über die Atmosphäre bzw. über den Wasserweg, eingeschränkte Zufahrtswege sowie die Gefährdung durch den Dominoeffekt (Frage 49). Im gleichen Antwortbogen wird die praktische Umsetzbarkeit von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen auf der Grundlage der in Kapitel 13 der TRAS 320 beispielhaft aufgeführten Szenarien mit Ja beantwortet.

9.5 Auswertung der Evaluation des Verbandes der Chemischen Industrie e.V.

Vom VCI wurden keine Informationen bzgl. einer eigenen Anwenderbefragung zur Evaluation der Anwendung der TRAS zur Verfügung gestellt. Stattdessen ging beim BMU am 29. Mai 2019 lediglich eine kurze Stellungnahme ein.

9.6 Durchführung von Beispieluntersuchungen

9.6.1 Unternehmen der Stahlbranche

Auf dem Gelände eines Unternehmens der Metallindustrie wurde eine neue kontinuierlich betriebene Feuerverzinkerei für Bandstahl errichtet. Ausgangsmaterial ist ungeglühtes kaltgewalztes Stahlband, das zu einem Coil (Bund) aufgewickelt ist. Im Einlaufteil der Verzinkerei wird das Stahlband vom Coil abgewickelt. Der Behandlungsteil besteht u.a. aus den folgenden Anlagenteilen:

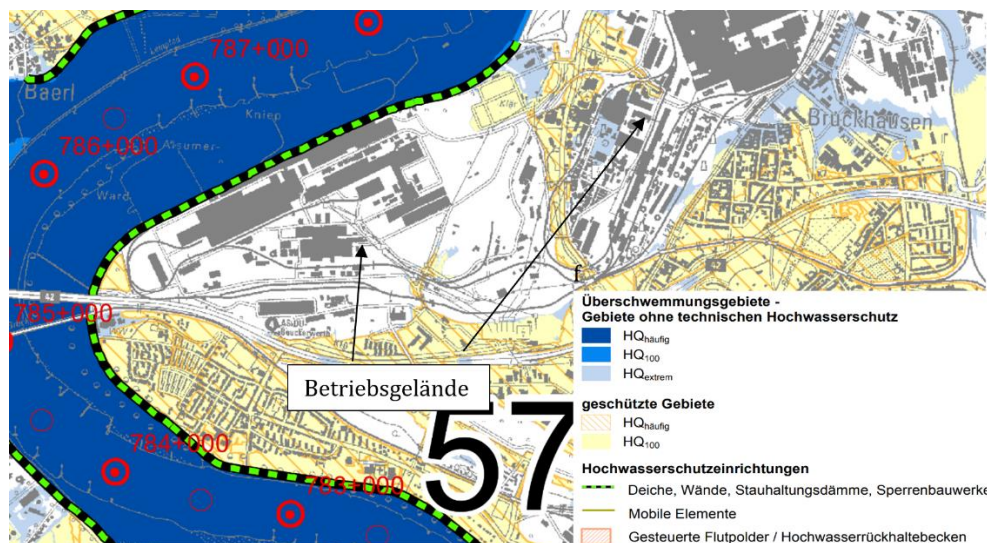
1. Durchlaufofen
2. Schmelzbad
3. Vorrichtung zur Einstellung der Zinkauflage
4. Kühlung

"Der Durchlaufofen ist unterteilt in eine direkt beheizte Vorwärmzone, in der das Band auf ca. 450 - 650°C erwärmt wird. Hier erfolgt eine oxidative Reinigung des Bandes, beispielsweise durch Abbrennen von Emulsionsrückständen aus dem Kaltwalzen" (Wikipedia, Feuerverzinken). Anschließend durchläuft das Band die Reduktionszone, in der eine Temperatur von ca. 800°C herrscht. Um die Bildung einer Oxidschicht auf der Stahloberfläche zu vermeiden bzw. schon gebildete Eisenoxide zu reduzieren, werden reduzierende Bedingungen durch Zugabe einer Mischung aus Stickstoff und Wasserstoff (Schutzgasatmosphäre) geschaffen. Je nach gewünschter Qualität wird eine H₂-Konzentration von 25 – 28 % eingestellt. Bei höherwertig verzinkten Stählen werden hohe Wasserstoffmengen benötigt. Nur bei diesen hochwertigen Stählen wird die Mengenschwelle gemäß Anhang I der StörfallV von 5.000 kg für Wasserstoff überschritten.

"Die nachfolgende Kühlzone, in die ebenfalls Schutzgas zugegeben wird, ist durch eine Schleuse mit dem Schmelzbad verbunden. In der Kühlzone wird das Band auf eine Temperatur nahe der Schmelzbadtemperatur abgekühlt. Das Band taucht schräg nach unten in das Schmelzbad (Badtemperatur bei Zink etwa 460 °C) ein, wird durch eine Rolle im Bad nach oben umgelenkt und verlässt das Schmelzbad wieder. Die nachfolgende Behandlung dient der Einstellung der Überzugsdicke sowie der weiteren Kühlung" (Wikipedia, Feuerverzinken).

Für diese Anlagen wurde eine vereinfachte Gefahrenquellenanalyse gegenüber Hochwasser durchgeführt. Wie in **Abbildung 77** zu erkennen ist, befindet sich das gesamte Betriebsgelände außerhalb der gekennzeichneten überschwemmungsgefährdeten Gebiete. Das Betriebsgelände wurde schon frühzeitig aufgeschüttet, so dass selbst bei einem Extremhochwasser die Anlage nicht gefährdet ist. Darüber hinaus werden angrenzende Wohngebiete sowie das Betriebsgelände durch einen Deich geschützt. Vor diesem Hintergrund erschien eine detaillierte Gefahrenquellenanalyse bzgl. Hochwasser im Sinne der TRAS 310 nicht erforderlich.

Abbildung 77: Hochwassergefahrenkarte für das Betriebsgelände des Unternehmens der Metallindustrie



Quelle: Hochwassergefahrenkarten NRW

Problematischer stellen sich jedoch die Anforderungen gegenüber Windlasten dar. Die Gefahrenquellenanalyse ergab, dass das Gebäude, in dem die Verzinkerei untergebracht ist, aufgrund der Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC 3 nach DIN EN 1990 nicht den statischen Anforderungen gemäß TRAS 320 entsprach. Eine Neuplanung oder Nachrüstung des Gebäudes stellte sich als problematisch und kostenintensiv heraus.

Überlegungen bzgl. des Abfahrens der Anlage im Falle eines Orkans stellten sich als nicht praktikabel heraus, weil die Abkühlphase des Ofens länger ist als die Vorwarnzeit für Sturmereignisse. Daher kamen die Betreiber mit der zuständigen Bezirksregierung überein, dass folgende organisatorische Maßnahmen anzuwenden sind:

1. Das Unternehmen informiert sich regelmäßig über mögliche Starkwindereignisse (Orkane).
2. Ab einer bestimmten prognostizierten Orkanstärke (Windstärke 10) wird die Wasserstoffmenge im Ofen vermindert, um die Mengenschwelle von 5.000 kg zu unterschreiten. Bei diesen Produktionsbedingungen unterliegt die Anlage nicht mehr der StörfallV.
Obwohl für diese Zeit verzinkter Stahl mit geringerer Qualität erzeugt wird, ist er dennoch für bestimmte Anwendungen verkaufsfähig.
3. Nach dem Sturmereignis wird die Anlage überprüft. Wenn keine Schäden eingetreten sind oder nachdem diese beseitigt sind, kann wieder mehr Wasserstoff zugegeben werden, um verzinkten Bandstahl mit höherer Qualität zu erzeugen.

9.6.2 Unternehmen zur Lagerung und Umfüllung brennbarer Gase und Kältemittel

Das Unternehmen beabsichtigt die Erweiterung des Flüssiggas-Tanklagers. Dazu sollen mehrere neue Behälter zur Lagerung von Kältemitteln installiert werden. Die neuen Kältemittel werden zwischengelagert und dann in Druckgasbehälter (Flaschen und Fässer) abgefüllt. Weil die geplanten Anlagen der 12. BImSchV (StörfallV) unterliegen, musste im Zuge des Genehmigungsverfahrens nach § 16 BImSchG der Sicherheitsbericht sowie der Alarm- und Gefahrenabwehrplan angepasst werden. Nach § 3 StörfallV müssen im Rahmen der

„allgemeinen Betreiberpflichten“ auch die umgebungsbedingten Gefahrenquellen beachtet werden. Weil sich das Betriebsgelände direkt an einem großen Fluss befindet, musste vor allem die Hochwassergefahr gemäß TRAS 310 näher betrachtet werden.

Zur Durchführung der erforderlichen Sicherheitsanalysen orientierte sich das Unternehmen an dem methodischen Vorgehen gemäß TRAS 310.

Gefahrenquellenanalyse

Die Hochwassergefahrenkarte zeigte, dass sich das Gelände im Überschwemmungsgebiet befindet (**Abbildung 78**). Darüber hinaus fällt das Betriebsgelände hinter dem Deich ab. Wie stark der Betrieb durch Hochwasser gefährdet ist, zeigen die Hochwassermarken für ein HQ₁₀₀ sowie ein HQ₃₀₀ (Extremhochwasser) im Bereich des Betriebseingangs (**Abbildung 79**).

Abbildung 78 Hochwassergefahrenkarte für das Betriebsgelände des Unternehmens zur Lagerung und Umfüllung brennbarer Gase und Kältemittel



Quelle: K.-E. Köppke, nicht veröffentlichtes Gutachten

Abbildung 79: Hochwassermarken für ein HQ₁₀₀ und ein HQ₃₀₀ im Eingangsbereich zum Betriebsgelände



Quelle: K.-E. Köppke, nicht veröffentlichtes Gutachten

Analyse der Gefahren und Gefährdungen

Aufgrund der Lage des Betriebes ist eine trockene Vorsorge nicht möglich. Daher musste davon ausgegangen werden, dass das Betriebsgelände bei Hochwasser überflutet werden kann. Aufgrund der Wasserspiegellagen für ein HQ₁₀₀ sowie ein HQ₃₀₀ konnten im Einzelnen die sicherheitsrelevanten Anlagenteile, die der StörfallV unterliegen, identifiziert werden.

Hierzu zählen Anlagen mit besonderem Stoffinhalt, wie z.B. Lagerbehälter für verflüssigte brennbare Gase (Flüssiggase und brennbare Kältemittel). Darüber hinaus wurden auch Anlagen mit besonderen Funktionen, wie z.B. Pumpen und Kompressoren für brennbare Gase, sowie Teile der MSR-Technik und der Trafostation identifiziert. Auch Treibgut wurde im Sicherheitsbericht betrachtet.

Erarbeitung des Schutzkonzeptes

Vor dem Hintergrund einer weitgehenden Überflutung des Betriebsgeländes wurden technische und organisatorische Maßnahmen zur Verhinderung eines Störfalls entwickelt.

Technische Maßnahmen: Alle Behälter, die Stoffe gemäß StörfallV enthalten und fest installiert sind, wurden mit der 1,3fachen Auftriebsicherheit gesichert. Alle größeren Behälter, die sonstige Stoffe enthalten, jedoch potentiell zu Treibgut werden können, sind so gesichert, dass ein Auftreiben der Behälter ausgeschlossen werden kann (Auslegung ebenfalls für einen 1,3fachen Auftrieb).

Organisatorische Maßnahmen: Neben den zuvor dargestellten technischen Maßnahmen wurden die folgenden organisatorischen Maßnahmen für eine nasse Vorsorge festgelegt:

1. Beobachtung des Wasserstandes des nahegelegenen Flusses sowie Informationsbeschaffung bei den zuständigen Behörden über die Entwicklung des Pegelstandes sowie des Hochwasserabflusses.
2. Auslagerung aller beweglichen Behälter, wie Stahlflaschen, Fässer und Tanks, in Bereiche außerhalb des Überschwemmungsgebietes.
3. Sicherung ortbeweglicher Behälter durch Niederzurren innerhalb der überschwemmungsgefährdeten Gebiete als Alternative zu Punkt 2
4. Abfahren der Anlage, um eine ordnungsgemäße Verriegelung aller stationären Behälter und Tankanlagen sicherzustellen.

Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen (Dennoch-Störfällen)

Bei der Störfallauswirkungsbetrachtung wird in der Regel von folgenden drei möglichen Szenarien ausgegangen:

1. Freisetzung von Stoffen
2. Brand
3. Explosion

Im Falle einer Überflutung musste im Rahmen der Störfallauswirkungsbetrachtung von einem Leitungsabriss oder einer Leckage an einem Behälter ausgegangen werden. Da gleichzeitig auch alle Pumpen und Kompressoren überflutet werden, wurde die Gefahr von Bränden oder Explosionen ausgelöst durch die genannten Zündquellen als sehr gering eingeschätzt. Als denkbare Szenarien eines Störfalls ausgelöst durch eine Überflutung des Betriebsgeländes wurde somit nur die Freisetzung von Stoffen zu betrachten.

Flüssiggas wird ausschließlich an die Atmosphäre abgegeben. Bei den Kältemitteln handelt es sich ebenfalls um leichtflüchtige Komponenten, die überwiegend an die Atmosphäre abgegeben werden. Diese Szenarien wurden im Sicherheitsbericht eingehend betrachtet. Ein geringer Teil kann jedoch auch über den Wasserweg fortgetragen werden.

Obwohl im Hochwasserfall eine starke Verdünnung eintritt und eine ernste Gefahr für die Bevölkerung am Unterlauf des Flusses nicht zu befürchten ist, werden die Katastrophenschutzbehörden sofort nach Auftreten der Leckage informiert.

Innerbetriebliche Maßnahmen zur Auswirkungsbegrenzung sind praktisch nicht möglich, weil auch die Trafostation überflutet wird und somit keine Stromversorgung zur Verfügung steht.

9.6.3 Unternehmen zur Herstellung von Chemieprodukten

Das Unternehmen gehört der Chemiebranche an und stellt verschiedene Bindemittel und Leimer her. Hierzu werden in der Produktion und in der Forschung eine Reihe von Ausgangsstoffen verwendet, die aufgrund der Art und der verwendeten Menge Teile des Standorts unter die StörfallV fallen lassen. Aus diesem Grund ist eine Betrachtung der Betriebsbereiche gemäß TRAS 320 erforderlich, um die Gefahren der umgebungsbedingten Gefahrenquellen Wind und Schnee zu ermitteln und entsprechende Gegenmaßnahmen zu veranlassen.

Im Rahmen einer Begehung wurden die im Vorfeld von den Betriebsverantwortlichen identifizierten kritischen Bereiche in Augenschein genommen. Es konnte festgestellt werden, dass die Gebäudesubstanz in den verschiedenen Betriebsbereichen dem Alter entsprechend in einem guten Zustand war, so dass hier auf den ersten Blick keine größeren Schäden an der Tragstruktur erkennbar waren. Die zu untersuchenden Gefahrenquellen gemäß TRAS 320 sind:

1. Winddruck bzw. Windsog
2. winderregte Schwingungen
3. Schneebelastung
4. Eislast
5. Projektile
6. Staub
7. Druckänderungen

Aufgrund der standortspezifischen Randbedingungen konnten für alle Gebäudeteile mehrere Gefahrenquellen vernünftigerweise ausgeschlossen werden. Es sind weder schwingungsanfällige Bauwerke in dem unmittelbaren Nahbereich der betroffenen Betriebsbereiche noch

eine Quelle für durch Wind aufgewirbelten Staub vorhanden. Die Gefahrenquelle „Drucknderung“ wird durch stark umschlagendes Wetter im Gewitterereignis oder Starkwinde verursacht. Es betrifft in erster Linie maschinentechnische Anlagenteile, wie z.B. Ventile.

Der Betreiber muss sicherstellen, dass seine Systeme ausreichend geschützt sind, um eine Vereisung von sicherheitsrelevanten Ventilen im Außenbereich zu vermeiden. Die in den Gebäuden befindlichen Bereiche nach StörfallV sind durch die massiven Gebäude in der Regel ausreichend gegen die Gefahrenquellen Wind, Schnee und Eis geschützt.

Die Gebäudesubstanz ist aufgrund des über die Jahre gewachsenen Standorts inhomogen. Es mischen sich reine Massivbauten mit massiven Stahlbauten. Generell kann festgestellt werden, dass die Gebäude keine großen Fensterflächen und Lichtbänder enthalten. Eine Gefahr durch Projektilflug konnte somit für die eingehausten Anlagenteile vernünftigerweise ausgeschlossen werden. Als kritisch haben sich jedoch Vordächer herausgestellt, die näher zu untersuchen waren. Zur Durchführung der erforderlichen Sicherheitsanalysen orientierte sich das Unternehmen an dem methodischen Vorgehen gemäß TRAS 320.

Gefahrenquellenanalyse

Die Eingruppierung des Standorts hinsichtlich der umgebungsbedingten Gefahrenquellen konnte für den Standort ohne standortbezogenen Untersuchungen nach den gültigen Normen des Bauwesens mit folgenden Grundlagen durchgeführt werden:

1. Windzone gemäß DIN EN 1991-1-4: Windzone 2
2. Schneelastzone gemäß DIN EN 1991-1-3: Schneelastzone 1

Analyse der Gefahren und Gefährdungen

Aus verschiedenen Erdtanks führen Rohrleitungen über eine Rohrbrücke zum einem Betriebsgebäude. Im weiteren Verlauf sind die Rohrleitungen am Gebäude entlang unterhalb von massiven Stahlbetonbalkonen (Laubengänge) verlegt. Eine Besonderheit liegt hier in dem ausladenden Vordach oberhalb der Rohrquerung zum Gebäude. Dieses Vordach ist am Gebäude abgespannt befestigt (**Abbildung 80**). Es wurde im Zuge der Analyse der Gefahren und Gefährdungen auf seine Belastbarkeit und Reserven hin überprüft, da die darunter angeordnete Rohrleitung direkt betroffen ist. Aufgrund der besonderen Anordnung des Vordachs mit Höhenversatz zum angeschlossenen Gebäudeteil ist im Besonderen auf eine mögliche Schneesackbildung zu achten.

Als Vorschriften wurden herangezogen:

1. TRAS 320 Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten - Fassung 06/2015
2. DIN EN 1991 Einwirkungen auf Tragwerke
3. DIN EN 1992 Stahlbeton- und Spannbetontragwerke
4. DIN EN 1993 Stahlbauten
5. Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen DIBt, Stand: 27. September 2018
6. Zuordnung der Schneelastzonen nach Verwaltungsgrenzen DIBt, Stand 20. Juli 2018
7. Sicherheitsbericht des Unternehmens

Abbildung 80: Rohrüberführung mit Vordach



Quelle: M. Andres

Die Überprüfung der Statik ergab, dass aufgrund der geringeren Schneebelastung in Schneezone 1 gegenüber dem früheren Bemessungsansatz in diesem Fall trotz des leicht erhöhten Winddrucks die anzusetzende Belastung durch den seinerzeit gewählten Ansatz abgedeckt ist. Hinzu kommt, dass die in der Originalstatik vorhandene Berechnung von einer maximalen Ausnutzung der Spannungen und Anschlusspunkte des Dachs von ca. 60% - 80% ausgeht. Vor diesem Hintergrund wurde vom Tragwerksplaner für das Vordach sowohl für die Wind- als auch für die Schneebelastung eine ausreichende Standsicherheit mit den Lastannahmen der TRAS 320 attestiert.

Erarbeitung des Schutzkonzeptes

Unabhängig von den Ergebnissen der Tragwerksnachrechnung gemäß TRAS 320 wurden organisatorische Maßnahmen vom Betreiber vorgesehen. Im Einzelnen handelt es sich hierbei um folgende Maßnahmen:

1. Einholen von Unwetterwarnung durch meteorologischen Dienstleister
2. Bei drohendem Unwetter bzw. während einer Extremwetterperiode (starker wiederholter Schneefall, etc.):
 - a) verstärkte Wetterbeobachtung
 - b) Ermittlung der aktuellen Schneelast
 - c) Erstellung einer Prognose der zu erwartenden Schneelast (bestehende Schneelast plus Schneelast durch vorhergesagten Niederschlag)
 - d) bei zu erwartender Überschreitung der zulässigen Dachlast: Vorbereitung der Schutzmaßnahmen
 - e) Beobachtung der Lastsituation
 - f) Schutzmaßnahme 1: ab 60 % der zulässigen Dachlast: Schneeräumung des Daches, sofern dies wetterbedingt möglich ist.
 - g) Schutzmaßnahme 2: ab 90% der zulässigen Dachlast: Abfahren der Produktionsanlage und Auslagerung von gefährlichen Stoffen in ungefährdete Bereiche

3. Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen entsprechend dem betrieblichen Instandhaltungsmanagement
4. Sicherung (Befestigung oder Räumung) von Anlagenteilen und Gebinden sowie Sicherung von temporären Einrichtungen wie Gerüste oder Baustellen
5. Vorbereitung von Auffangräumen, Verschließen der Kanalsysteme
6. Vorhaltung einer für die Schneeräumung des Vordachs geeigneten Erreichbarkeit.
7. Vermeidung von Aufenthalt im Freien

Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen (Dennoch-Störfällen)

Dennoch-Störfälle sind gemäß § 3 der StörfallV zu beschreiben und die möglichen Konsequenzen daraus abzuleiten. Für die im Zusammenhang mit der TRAS 320 zu betrachtenden Gefahrenquellen werden folgende Szenarien genannt:

1. Die Beschädigung oder Einsturz eines Bauwerkes aufgrund zu hoher Wind-, Schnee- oder Eislasten mit anschließender Stofffreisetzung, Brand oder Explosion aufgrund der Zerstörung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen.
2. Beschädigung oder Einsturz eines sonstigen Anlagenteils im Freien aufgrund zu hoher Wind-, Schnee- oder Eislasten mit anschließender Stofffreisetzung, Brand oder Explosion aufgrund des Stoffinhalts darin.
3. Beschädigung oder Einsturz eines Gebäudes oder sonstigen Anlagenteils aufgrund zu hoher Wind-, Schnee- oder Eislasten unter Einwirkung auf ein anderes sicherheitsrelevantes Anlagenteil mit anschließender Stofffreisetzung, Brand oder Explosion.

Die bisherigen Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen wurden für die hier beschriebenen Szenarien im Wesentlichen übernommen.

9.6.4 Unternehmen zur Herstellung von pharmazeutischen Wirkstoffen

In dem Unternehmen werden pharmazeutische Wirkstoffe hergestellt. Die Synthesenanlagen unterliegen der StörfallV, so dass die zuständigen Behörden eine Sicherheitsbetrachtung gegenüber umgebungsbedingten Gefahrenquellen fordern. Die Anlagen befinden sich in Gebäuden, die außerhalb von überschwemmungsgefährdeten Gebieten liegen. Die Betriebsbereiche befinden sich in den oberen Stockwerken, so dass auch im Fall von Starkniederschlägen keine Gefährdung der Betriebsbereiche vorliegt.

Anders ist jedoch die Gefahr von Sturmereignissen zu bewerten. Ausgangspunkt für eine Sicherheitsanalyse gegenüber dieser Gefahrenquelle war die Tatsache, dass die Herstellung der Wirkstoffe überwiegend in Glasapparaturen aufgrund der Aggressivität gegenüber metallischen Werkstoffen durchgeführt wird.

Im Rahmen einer Besichtigung der Anlagen wurde darüber hinaus festgestellt, dass einige Produktionsräume über große Fensterfronten verfügen, die bei Starkwinden in Verbindung mit Projektilen, wie z.B. losgerissenen Fassadenteile oder Dachziegel, beschädigt werden können. Damit wären auch die Glasapparate der Produktionsanlagen unmittelbar gefährdet.

Daher wurde mit den Verantwortlichen des Betriebs über die Installation von Schutzgittern vor den Fenstern diskutiert. Auch wurde der Bau von Schutzwänden im Innern der Gebäude betrachtet. Derzeit ist die Prüfung der technischen Maßnahmen zum Schutz der Anlagen gegenüber Wind und Trümmerfug noch nicht abgeschlossen.

9.6.5 Unternehmen an der Westküste

Am 5.4.2019 fand mit Vertretern von 4 namhaften Unternehmen der Chemischen Industrie sowie der Mineralölindustrie eine Besprechung über die Erfahrungen zur Anwendung der TRAS 320 statt. Zu Beginn der Besprechung wurde erläutert, dass die anwesenden Vertreter der 4 Unternehmen noch weitere 9 weitere Firmen mitvertreten. Hierbei handelt es sich u.a. um Logistikunternehmen, Abfallentsorger sowie Betreiber von Gaslagern.

Die Ergebnisse der Besprechung können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die statische Auslegung von Anlagen erfolgt entsprechend DIN EN 1991-1-4; (2005), wobei die Einstufung der Schadenfolgenklasse entsprechend der TRAS 320 von CC2 auf CC3 nach DIN EN 1990 von den Betreibern nicht nachvollzogen wird. In diesem Zusammenhang wurde auf andere europäische Staaten, wie z. B. die Niederlande, verwiesen, die die Einstufung auf CC2 beibehalten haben. Auch diese Anlagen liegen in exponierten Stellen an der Nordsee. Dies gilt auch für die Festlegung der anlagenbezogenen Schutzziele durch die Einstufung der Zuverlässigkeitsklasse von RC 2 auf RC3 nach DIN EN 1990.
2. Die größten Probleme ergeben sich für bestehende Anlagen. In diesem Zusammenhang wurde auf die statische Prüfung der Xylol-Destillation der Raffinerie in Heide verwiesen (vgl. Abbildung 39). Der überschlägige Vergleich der ursprünglichen statischen Auslegung der Kolonnen im Jahr 1962 mit den Vorgaben der DIN 1991-1-4/NA seit dem Jahr 2005 sowie den Anforderungen der TRAS 320 ergab folgendes Ergebnis: Die Nachrechnungen der Wandstärken sowie der Verankerung in der Bodenplatte auf der Grundlage der DIN 1991-1-4/NA ergaben nur geringe Defizite, die bei genauerer Berechnung u.U. noch als akzeptabel bewertet werden könnten. Im Gegensatz dazu wurden erhebliche Defizite bei dem Nachweis der Verschraubung festgestellt. Diese waren schon ohne die zusätzliche Erhöhung gemäß TRAS 320 erkennbar und erfordern eine Nachbesserung.
 Durch die zusätzlichen Lastannahmen gemäß TRAS 320 vergrößern sich die erkannten Defizite. Dies betraf die Wandstärke insbesondere im unteren Bereich der Kolonne sowie den Bereich der Verankerung. Ob bei detaillierter Berechnung der Nachweis der Standsicherheit gelingt, wurde aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse in Frage gestellt, so dass zusätzlich eine Verstärkung der beiden Bauteile erfolgen müsste.
 Aufgrund der in der Ursprungsauslegung angesetzten Lastannahme für die Fundamentierung waren hier ausreichend Reserven enthalten, so dass der Fundamentkörper als ausreichend dimensioniert angesehen werden kann.
 Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse wurde von den Betreibern angenommen, dass der Nachweis der Standsicherheit anderer bestehender Anlagen zu ähnlichen Ergebnissen führen könnte. In diesem Zusammenhang wurde von den Betreibern darauf hingewiesen, dass die Tragwerksberechnungen vor 2005 bis zu einem Faktor 2,75 von den heutigen Normanforderungen abweichen können.
3. Von den Betreibern wurde des Weiteren darauf hingewiesen, dass von bestehenden Anlagen oftmals die statischen Berechnungen nicht mehr zur Verfügung stehen oder unbrauchbar sind. Gemäß TRAS 320 wird eine Erstprüfung des Bauwerksbestandes bis zum Jahr 2020 gefordert, um festzustellen, ob Lastreserven noch vorhanden bzw. nutzbar sind. Eine ggf. erforderliche Sanierung soll nach TRAS 320 bis Juli 2025 abgeschlossen sein. Andernfalls könnte die Stilllegung von Anlagen folgen. Dies sei nicht

hinnehmbar, weil, so wurde argumentiert, sich bislang kein Störfall aufgrund von Wind, Schnee- und Eislasten ergeben hat. Dies gilt vor allem deshalb, weil die Küstenregion in der Vergangenheit schon schwere Orkane erlebt hat und die Vorwarnzeiten immer ausgereicht haben, um organisatorische Maßnahmen, wie z.B. Abfahren von Anlagen, rechtzeitig durchführen zu können.

4. In technischen Regelwerken ist es oftmals möglich, dass der Stand der Sicherheitstechnik auch durch andere Maßnahmen, wie z.B. organisatorische Maßnahmen erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang wurde u.a. auch auf die TRAS 310 verwiesen. Die Vertreter der genannten Unternehmen beklagten, dass eine derartige Alternative in der TRAS 320 nicht vorgesehen ist.
5. Eindringlich wurde auf die Unverhältnismäßigkeit von Aufwand (Kosten) und Nutzen (bei der Nachrüstung von Bestandsanlagen) verwiesen.
6. Darüber hinaus wurde betont, dass ggf. erforderliche Nachrüstungen nicht in jedem Fall möglich sind und als Folge die betroffenen Anlagen stillgelegt werden müssten.
7. Obwohl die rechtlichen Fragestellungen nur am Rande diskutiert wurden, wurde von den Unternehmensvertretern erläutert, dass der Stand der Sicherheitstechnik auch sachgerechte organisatorische Maßnahmen einschließen würde. In diesem Zusammenhang wurde auf die Bundesratsdrucksache 213/91, 60 und auf den Leitfaden SFK-GS-33 verwiesen.

9.6.6 Biogasanlagen

Trotz der Einschaltung des Fachverbandes Biogas e.V. war die Resonanz der Betreiber auf die Fragebögen sehr gering. Dennoch gelang es, zwei Biogasanlagen in die Untersuchungen einzubeziehen.

9.6.6.1 Kurzvorstellung der Anlagen

- Biogasanlage 1 Die Biogasanlage 1 verarbeitet u.a. kommunale Klärschlämme aus Kläranlagen, organisch hoch belastete Abwässer aus der Kompostierung sowie weitere Substrate aus dem landwirtschaftlichen Bereich (17.500 t/a). Die Anlage verfügt über 2 Vorratsspeicher, 2 Fermenter, 1 Hygienisierungsbehälter, 2 Nachfermenter sowie 1 Gärrestebehälter. Darüber hinaus verfügt die Anlage über einen Gasspeicher. Die elektrische Leistung des BHKW beträgt 500 KW.
- Biogasanlage 2 In der zweiten Biogasanlage werden ca. 35.000 t Speisereste verwertet. Die Anlage verfügt neben der mechanischen Aufbereitung und der Hygienisierungsstufe über 1 Hydrolysetank, 2 Fermenter sowie ein Gärrestelager. Die elektrische Leistung des BHKW beträgt ca. 1.300 KW. Der Hydrolysetank sowie die beiden Fermenter verfügen jeweils über feste Dachkonstruktionen. Nur der Gärrestebehälter ist mit einem Membrandach ausgestattet.

Für beide Anlagen zeigte sich, dass sich die Betreiber mit den Anforderungen der TRAS 310 und 320 noch nicht eingehend beschäftigt haben. Gleichwohl haben sich im Fall der Biogasanlage 1 die Betreiber mit Naturgefahren auseinandergesetzt, wenngleich die Motivation hierzu nicht von

den TRAS ausging. So musste sich der Betreiber aufgrund der Anforderungen der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV) mit der Gefahr von Hochwasser auseinandersetzen. Hierzu wurden Gefahrenkarten herangezogen, um zu einer Bewertung der örtlichen Lage zu kommen. Danach konnte die Hochwassergefahr ausgeschlossen werden.

Interessant war in beiden Fällen die Auseinandersetzung mit Blitzschlag. Während für die Biogasanlage 2, die seit 2006 in Betrieb ist, eine Blitzschutzanlage schon im Genehmigungsverfahren berücksichtigt wurde, musste für die Biogasanlage 1, die seit dem Jahr 2004 in Betrieb ist, eine Blitzschutzanlage nachgerüstet werden. Der Antrieb war jedoch nicht eine Auflage der Behörden, sondern eine Forderung durch das Versicherungsunternehmen. Die Überprüfung der Blitzschutzanlage erfolgt durch den Versicherer in diesem Fall alle 3 Jahre.

Darüber hinaus wurde für die Biogasanlage 1 die Gefahr eines Projektils betrachtet. Ausgangspunkt war eine Windkraftanlage in unmittelbarer Nähe der Biogasanlage. Obwohl die Windkraftanlage schon seit ca. 10 Jahren in Betrieb ist, hat sich der Anlagenbetreiber aus Sicherheitsgründen entschlossen, diese Anlage zu demontieren und an einer anderen Stelle neu zu errichten.

Eine Nachrüstung einer Biogasanlage aufgrund der Gefahrenquelle Wind sehen die Betreiber der Biogasanlagen als nicht möglich an, weil die Behälter, die mit Membranen abgedeckt sind, statisch dies nicht zulassen. Für ihren Ersatz durch feste Dächer würde die Tragfähigkeit der Gärbehälter nicht ausreichen.

10 Anhang 2: Recherche nach vergleichbaren Ansätzen zum Natech Risikomanagement in anderen Staaten

In anderen Staaten wurden rechtliche und technische Regeln oder Leitfäden mit vergleichbarer Zielsetzung zum Natech Risikomanagement entwickelt. Für diese Studie wurden Regelungen für Anlagen im Anwendungsbereich der Seveso-Richtlinie (2012/18/EU) im Vereinigten Königreich (COMAH-Anlagen) und Frankreich (Risikoanlagen) ausgewählt.

10.1 Regelungen gegenüber Hochwasser in Großbritannien für COMAH-Anlagen

Im Vereinigten Königreich wurden Anforderungen der Seveso-III-Richtlinie (EU, 2012) mit der COMAH-Regulation von 2015 (The Control of Major Accident Hazards Regulations, 2015; COMAH, 2015) in nationales Recht übertragen. Nur Nordirland hat seine eigenen Vorschriften herausgegeben. Ergänzend zur den COMAH-Regulations veröffentlichte die Health and Safety Executive einen Guidance on Regulations (HSE, 2015). Darin werden zu den einzelnen Anforderungen der COMAH-Regulations Hinweise und Erläuterungen gegeben. Allerdings werden in dem HSE-Leitfaden Naturgefahren nur kurz genannt. Weitaus konkreter ist dagegen der zeitgleich herausgegebene Leitfaden „Preparing for flooding“ der Environment Agency vom Juni 2015. Dort wird konkret auf die Hochwassergefahren für die Anlagensicherheit eingegangen (Environment Agency, 2015).

Ausgangspunkt für die Betrachtung von Naturgefahren sind die Allgemein Pflichten des Anlagenbetreibers nach Artikel 5 der COMAH-Regulation, wie sie gleichlautend aus der Seveso-III-Richtlinie übernommen wurden:

„Jeder Betreiber muss alle erforderlichen Maßnahmen treffen, um schwere Unfälle zu vermeiden und ihre Folgen für die menschliche Gesundheit und die Umwelt begrenzen.“

Die Berücksichtigung von natürlichen Ursachen als Auslöser von Störfällen werden in Satz 4a (iii) des Anhangs II der Seveso-III-Richtlinie gefordert. Dies muss detailliert im Sicherheitsbericht für Anlagen der oberen Klasse erfolgen. Diese Anforderung wurde in Artikel 9 (Teil 3) der COMAH-Regulation für Großbritannien übernommen. Hierfür sind in Anhang 3 der COMAH-Regulation die minimalen Angaben und Informationen genannt, die in einem Sicherheitsbericht enthalten sein müssen. Hierzu zählen unter Punkt 5 (iii)

1. die Identifikation,
2. die Risikoanalyse sowie
3. die Beschreibung der Maßnahmen zur Verhinderung von Störfällen ausgelöst durch Naturgefahren, wie z.B. Erdbeben und Hochwasser.

Im Guidance on Regulation der HSE wird in den Erläuterungen zusätzlich noch Blitzschlag als Gefahrenquelle genannt.

Zur Erstellung von Sicherheitsberichten wird im Leitfaden „Preparing for flooding“ der Environment Agency detailliert dargestellt, welche Schritte Betreiber von Anlagen der oberen Klasse zur Verhinderung von Störfällen durch Hochwasser durchführen müssen.

Um sich auf ein Hochwasser vorzubereiten, rät der Leitfaden den Betreibern, u.a. die folgenden Schritte auszuführen:

1. Ermittlung, ob sich der Standort in einem Hochwasserrisikogebiet befindet durch Nutzung von Gefahrenkarten für Flüsse, Meer und Oberflächenwasser oder Wasserreservoirs.
2. Nutzung von Warnhinweisen der Umweltbehörde sowie des Hochwasserwarndienstes
3. Ermittlung der Standorttopographie des Standortes sowie der Umgebung
4. Ermittlung der erwarteten Hochwasserpegel und der Fließgeschwindigkeit des Wassers mit Unterstützung der lokalen Umweltbehörden zum Vergleich mit den topografischen Verhältnissen am Standort.
5. Einholung ergänzender Informationen über historische Hochwasserereignisse und Hochwasserschutzmaßnahmen sowie über den Einfluss des Klimawandels auf zukünftige Hochwasserrisiken
6. Erstellung eines Hochwasserplans als Teil des Unfall- oder Notfallplans des Standorts zum Schutz des Personals, zur Sicherung gefährlicher Prozesse und umweltschädlicher Stoffe und Vorräte unter Beachtung der oftmals kurzen Zeiträume zwischen einer Hochwasserwarnung und dem tatsächlichen Ereignis.

Im Einzelnen werden für die Erarbeitung eines Hochwasserplans die folgenden Hinweise gegeben:

- a) Darstellung der Auswirkungen von Hochwasser auf Anlagen und Anlagenteile
- b) Analyse der Auswirkungen des kurz- und langfristigen Verlusts von Versorgungseinrichtungen
- c) Prüfung der Auswirkungen bei Verlust von sicherheitstechnischen Ausrüstungen und anderer Schlüsselkomponenten, z.B. speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) und Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)
- d) Prüfung der Möglichkeiten unter Berücksichtigung von Hardware, Betriebsverfahren, Kompetenzen und Schulung des Personals auf manuelle Vorgänge zurückzugreifen
- e) Ermittlung der Zeit, die benötigt wird, um den Betrieb sicher abzuschalten und Personal, Materialien und Vorräte zu verlagern.

Im Fall einer Hochwasserwarnung sollte der Hochwasserplan geeignete Maßnahmen und die dazugehörigen Informationen enthalten. Hierzu zählen folgende Angaben:

- a) Zuweisung von Aufgaben zur Überflutungsbekämpfung an hierfür geschulte Personen
- b) Nennung von Informationsquellen für Hochwasserwarnungen, Wettervorhersagen und Echtzeitwerte für Fluss- und Meeresspiegel
- c) Festlegung von Auslösepunkten - wie Regenfälle, Flusspegel, Hochwasserwarnung - für bestimmte Maßnahmen, wie z. B. Abschalten des Betriebs, Verriegeln der Ausrüstung und Evakuieren des Personals
- d) Angabe von Links zu Vermögensregistern und Gerätestatus
- e) Beschreibung von Details zu Entwurf, Besitz und Betrieb der relevanten Hochwasserschutzanlagen
- f) Nennung von Kontaktdaten und vertragliche Vereinbarungen für die Bereitstellung von Notfallressourcen, z. Pumpen, Stromerzeuger, Reinigungsgeräte

- g) Darstellung von Optionen für die Wiederherstellung / Sanierung außerhalb des Standorts, falls Freisetzungen oder Verschmutzungen auftreten
- h) Beschreibung von Aktivitäten nach dem Hochwasser, einschließlich:
 - i. Beseitigung von Hochwasser
 - ii. Integritätsprüfungen von Anlagen und Ausrüstungen
 - iii. Bestandskontrollen zur Ermittlung von Verlusten an umweltschädlichem, gefährlichem oder radioaktivem Material

7. Durchführung von Übungen zur Erprobung des Hochwasserplans

Zur Verbesserung des Hochwasserschutzes werden eine Reihe von Hinweisen gegeben. Diese betreffen:

1. Maßnahmen zur trockenen Vorsorge, wie z.B. temporäre oder stationäre Hochwasserschutzanlagen, Geländeaufschüttung usw.
2. Hinweise und Maßnahmen zur nassen Vorsorge (z.B. Auftriebssicherheit, Verlagerung von Stoffen oberhalb der Wasserlinie, Festzurren von kleineren Behältern)
3. sicherheitstechnische Kontrollsysteme
4. Versorgungseinrichtungen
5. Behandlungsanlagen zur Ölabtrennung und Abwasserbehandlung
6. Einsatzkräfte für den Notfall
7. Sicherung von sicherheitstechnisch relevanten Informationen vor Hochwasser

In einem weiteren Leitfaden von HSE, Environment Agency et al. (HSE, 2018) wird ein Rahmen für die Überprüfung der Hochwasservorsorge in COMAH-Anlagen festgelegt, in denen Hochwasser als Möglichkeit zur Auslösung schwerer Unfälle identifiziert wurde. Dieser Operational Delivery Guide (DG) wurde als Leitfaden für den behördlichen Inspektionsplan im Jahr 2018 herausgegeben.

Der Inspektionsplan der Behörden baut auf dem Modell der Hauptgefahrenregulierung auf. Dies bedeutet, dass die zuständige Genehmigungsbehörde ihre Aktivitäten auf das größte Risiko auszurichten hat, damit dieses effektiv gemanagt werden kann. Der Delivery Guide gilt für COMAH-Betriebe, die entweder als direkt überflutungsgefährdet eingestuft wurden oder bei denen eine „indirekte Überflutung“ die Hilfeleistung auf einen schweren Unfall vor Ort erschweren kann. In **Tabelle 21** sind die Überflutungsszenarien für die Prioritätensetzung von Inspektionen zusammengefasst.

Tabelle 21: Überflutungsszenarien für die Prioritätensetzung von Inspektionen (HSE, 2018)

Flooding Major Accident Scenario (FMAS)	Typical Site Arrangements vs. flood zones
Flood within the establishment directly causes major accident	COMAH dangerous substances present in flood risk area
Flood within the establishment can indirectly cause or escalate Major Accident	No dangerous substance in flood area but Major Accident hazard relevant equipment / utilities / access routes susceptible to challenge from flooding
Flood outside establishment	Establishment near flood risk areas which could challenge protection layers
National wide area flooding exacerbates Major Accident risk	Flooding in another part of the country but not near establishment

In der ersten Kategorie wird die direkte Wirkung von Überflutungen innerhalb des Betriebsbereichs berücksichtigt, soweit diese einen schweren Unfall auslösen kann.

In der zweiten Kategorie wird die mögliche Wirkung von Überflutungen auf Ursachen und Verlauf eines schweren Unfalls (mit anderen Ursachen) berücksichtigt.

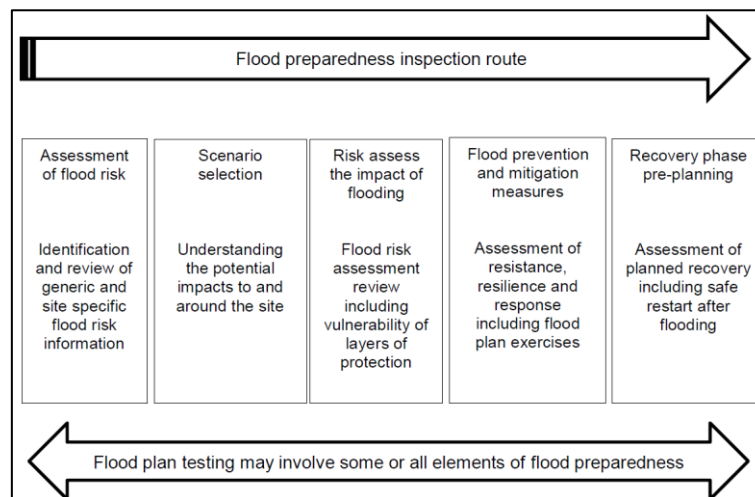
In der dritten Kategorie werden die Wirkungen von Überflutungen auf Gebiete außerhalb des Betriebsbereichs berücksichtigt, wenn dadurch die Funktion von Sicherheitsvorkehrungen oder Maßnahmen eingeschränkt werden kann.

In der vierten Kategorie wird die Wirkung von Überflutungen in anderen Gebieten Englands berücksichtigt, wenn dadurch Risiken schwerer Unfälle entstehen können.

Der Delivery Guide soll sicherstellen, dass die Anforderung 25 „Inspections and Investigations“ der COMAH-Regulation von 2015 von den zuständigen Behörden durch die Einführung eines Kontrollsystems für Betriebe sichergestellt wird. Inspektoren sollen diese Leitlinien verwenden, um zu überprüfen, ob COMAH-Betreiber das Hochwasserrisiko für ihre Betriebe identifiziert haben, um geeignete Risikominderungsmaßnahmen zu installieren, soweit dies nach vernünftigem Ermessen möglich ist.

Die Hauptbereiche der Inspektionen sind in **Abbildung 81** dargestellt.

Abbildung 81: Hauptbereiche der Inspektionen



Quelle: Operational Delivery Guide – Inspection of COMAH Operator Flood Preparedness (Großbritannien)

Zu jedem Untersuchungspunkt sind im Anhang 2 des Operational Delivery Guides Kriterien bzw. Fragen aufgelistet, an denen sich die Behörden orientieren können. Durch den Vergleich der wichtigsten Ergebnisse der Inspektion mit den relevanten Erfolgskriterien werden die technischen und organisatorischen Maßnahmen des COMAH-Betreibers bewertet.

10.2 Leitfaden des Chemical and Downstream Oil Industries Forum (CDOIF)

Neben dem von der Environment Agency im Jahre 2015 herausgegebenen Leitfaden „Preparing for flooding“ wurde im Jahr 2017 ein weiterer Leitfaden des CDOIF „Preparing for Flood – Guidance and Best Practice“ veröffentlicht. Er ist ebenso direkt an Betreiber von COMAH-Anlagen gerichtet und umfasst folgende Bereiche:

Section 1: Prepare for flood

Section 2: Flood warnings

Section 3: Response

Section 4: Recovery

Jede Section ist wiederum wie folgt untergliedert:

1. How to do it
2. Guidance and Best Practice
3. Getting help
4. Other information

Im Wesentlichen ist der Leitfaden eine Zusammenstellung von Informationsquellen, die dem Betreiber von COMAH-Anlagen zur Verfügung stehen, um Störfälle, die durch Hochwasser ausgelöst werden können, zu vermeiden. Hierbei handelt es sich z.B. um Veröffentlichungen verschiedener Institutionen sowie um Internetadressen. Darüber hinaus werden am Ende im CDOIF-Leitfaden die Anforderungen der COMAH-Regulations 2015 noch einmal kurz zusammengefasst.

10.3 National Planning Policy Framework

Im Februar 2019 wurde vom Ministry of Housing, Communities and Local Government ein nationaler planungspolitischer Rahmen vorgegeben, der für alle Planungen vorsieht, dass soziale und ökonomische Belange sowie Umweltaspekte zusammengeführt werden müssen, um nachhaltige Entwicklungen sicher zu stellen. Ein Aspekt ist die Verminderung der Vulnerabilität von Vorhaben gegenüber den Wirkungen, die durch den Klimawandel ausgelöst werden (Kapitel 14). Hier sind Anpassungsmaßnahmen zur Risikoverminderung erforderlich.

In diesem Zusammenhang werden auch Grundsätze genannt, die bei Planungen oder Standortentwicklungen für hochwassergefährdete Gebiete zu berücksichtigen sind. Zukünftige Standortentwicklungen - soweit möglich - außerhalb von Hochwasserrisikogebieten erfolgen. Obwohl für diese Strategie COMAH-Anlagen nicht ausdrücklich genannt werden, so kann dennoch vermutet werden, dass diese Anforderung auch für COMAH-Anlagen anzuwenden ist.

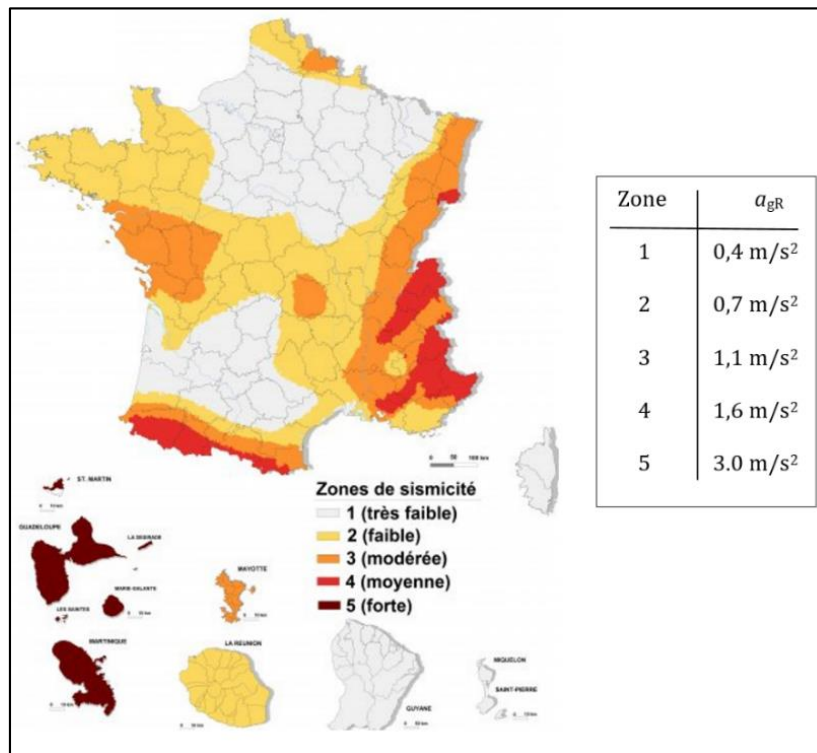
Ziel ist es, die Bebauungen in Gebiete mit dem geringsten Hochwasserrisiko zu lenken. Ausnahmen sollten nur gestattet werden, wenn keine ausreichend verfügbare Standorte mit geringerem Hochwasserrisiko vorhanden sind. Dies wäre im Einzelfall vom Antragsteller unter Berücksichtigung bestimmter Kriterien nachzuweisen. Ein Kriterium ist, dass bei Planungsanträgen die lokalen Behörden sicherstellen sollen, dass das Hochwasserrisiko an keiner anderen Stelle erhöht wird.

10.4 Regelungen gegenüber Erdbeben in Frankreich für Seveso-Anlagen

Obwohl die Naturgefahr „Erdbeben“ eine andere ist als die in der TRAS 320 behandelten Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten, handelt sich dennoch um eine umgebungsbedingte Gefahrenquelle, die auf die Tragwerke von Betriebsbereichen einwirkt. Die französischen Regelwerke für Risikoanlagen gegenüber Erdbeben werden insbesondere bzgl. der methodischen Vorgehensweise im Folgenden kurz erläutert und der Systematik der TRAS 320 gegenübergestellt.

Grundlage ist in Frankreich ebenso wie in Deutschland der Eurocode 8, dessen einzelne Normen (Eurocode EN 1998) sich mit der seismischen Auslegung von Bauwerken befassen. Die Umsetzung in Frankreich erfolgte in den Normen NF EN 1998-1:2005 bzw. NF EN 1998-1/NA:2007. Hierzu wurde im Jahr 2005 eine neue Karte der seismischen Zonen in Frankreich auf probabilistischer Grundlage erstellt. Diesen Zonen sind jeweils Referenzgrundbeschleunigung a_{gR} zugeordnet (vgl. **Abbildung 82**).

Abbildung 82: Erdbebenzonen für Frankreich



Quelle: NF EN 1998-1:2005

Die Bemessungsbeschleunigung a_g errechnet sich wie folgt:

$$a_g = \gamma_I * a_{gR} * S$$

Hierin sind:

- a_{gR} Referenzspitzenbeschleunigung a_{gR} am Boden vom Typ A (Gestein).
- γ_I Sogenannter Bedeutungsbeiwert, der das betreffende Bauwerk in Abhängigkeit seiner Bedeutung für die öffentliche Sicherheit und den Schutz der Bevölkerung unmittelbar nach einem Erdbeben, sowie die sozialen und wirtschaftlichen Folgen eines Tragwerkversagens in eine der vier folgenden Klassen einteilt.

Tabelle 22: Bedeutungsbeiwerte für die jeweiligen Bedeutungskategorien

Bedeutungs-kategorie	Bauwerke	Bedeutungsbeiwert γ_I
I	Bauwerke von geringer Bedeutung für die öffentliche Sicherheit	0,8
II	Gewöhnliche Bauwerke, die nicht unter andere Kategorien fallen	1,0
III	Bauwerke, deren Widerstand wichtig ist im Hinblick auf die mit einem Einsturz verbundenen Folgen	1,2
IV	Bauwerke, deren Unversehrtheit während Erdbeben von höchster Wichtigkeit für den Schutz der Bevölkerung sind	1,4

Nimmt der Bedeutungsfaktor γ_1 einen Wert 1 an, entspricht dies einer Referenz-Wiederkehrperiode von 475 Jahren. Diese Wiederkehrperiode steht im Einklang mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% innerhalb von 50 Jahren (Standard-sicherheitsanforderung für den üblichen Hochbau).

- S Baugrundparameter, der in Abhängigkeit des jeweiligen Baugrundes zwischen 1,00 und 1,40 variiert (gemäß EN 1998-1). Die genaue Beschreibung und Einteilung der Baugrundklassen ist in der EN 1998-1, Tabelle 3.2 nachzulesen.

Ausgehend von diesen allgemein gültigen Grundlagen wurden in Frankreich Regeln für verschiedene Bauwerke, so unter anderem für spezielle „Risikoanlagen“, wie z. B. „Seveso-Anlagen“ (der Seveso-Richtlinie unterliegende Anlagen), entwickelt. Der Anwendungsbereich sowie die Anforderungen an Seveso-Anlagen können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Der Anwendungsbereich

Die Anforderungen betreffen spezielle Risikoanlagen, zu denen Seveso-Anlagen der unteren und oberen Klasse gehören. Darüber hinaus gelten sie sowohl für neue Anlagen und Bestandsanlagen. Neue Anlagen sind solche, für die die behördliche Genehmigung nach dem 1. Januar 2013 erteilt wurde. Alle anderen Einrichtungen gelten als Bestandsanlagen. Betroffen sind nur Risikoanlagen, die zu tödlichen Unfällen außerhalb der Standortgrenzen (Betriebsgrenzen) oder Auswirkungen auf einen Bereich haben, in denen Menschen ständig anwesend sind.

Dies bedeutet, dass sich die entscheidenden Bereiche außerhalb des Standortgeländes befinden. Wenn diese Gebiete nicht besiedelt sind, muss die betreffende Anlage nicht den Anforderungen entsprechen. Zonen mit nicht-permanenten menschlichen Tätigkeiten sind als Bereiche ohne öffentliche Gebäude, Einwohner, permanenten Werkstätten, Straßen mit einem Verkehrsstrom von mehr als 5.000 Fahrzeugen pro Tag definiert.

2. Anforderungen

Durch die Festlegung des Bedeutungsfaktors auf 2,2 bei Neuanlagen verringert sich die Überschreitungswahrscheinlichkeit auf 1% bei 50 Jahren. Bei bestehenden Anlagen wird der Bedeutungsfaktor auf 1,85 festgelegt. Hierdurch wird die Bemessungsbeschleunigung für Risikoanlagen derart erhöht, dass neue Seveso-Anlagen für eine Wiederkehrperiode von 5.000 Jahre und Bestandsanlagen für eine Wiederkehrperiode von 3.000 Jahren ausgelegt sein müssen (Pecker, 2013). **Tabelle 23** verdeutlicht die unterschiedlichen Anforderungen zwischen Neu- und Bestandsanlagen am Beispiel der horizontalen Bodenbeschleunigungen.

Tabelle 23: Referenzwerte für die horizontale Beschleunigung (m/s²) für Risikoanlagen

Erdbebenzone	Neue Anlagen	Bestandsanlagen
1	0,88	0,74
2	1,54	1,30
3	2,42	2,04
4	3,52	2,96
5	6,60	5,55

Im Vergleich zu den pauschalen Ansätzen zur Festlegung des Bedeutungsbeiwertes für Neuanlagen und bestehende Anlagen, wird im Leitfaden des VCI „Der Lastfall von Erdbeben im Anlagenbau“ (VCI, 2012) ein risikoproportionaler Ansatz zur Festlegung des Bedeutungsbeiwertes vorgeschlagen. Er variiert je nach Anlagentyp bzw. Gefährlichkeit des gehandhabten Stoffes zwischen 1,2 und 1,6.

1. Schutzziele

Die Schutzziele für Risikoanlagen sind wie folgt festgelegt:

- a) Vermeidung eines Störfalls oder
- b) Verringerung der Unfallintensität, um zu vermeiden, dass Personen außerhalb der Betriebsgrenzen von tödlichen Auswirkungen betroffen sind.

Es ist nicht erforderlich, dass die betroffene Anlage im Falle eines Erdbebens einsatzbereit bleibt.

2. Durchführung von technischen Maßnahmen zum Erdbebenschutz durch den Betreiber

Zur Umsetzung von technischen Maßnahmen sind folgende Schritte vorgesehen (Pecker, A. 2013):

- a) Ermittlung der relevanten Risikoanlagen entsprechend dem Anwendungsbereich
- b) Erarbeitung eines elastischen Antwortspektrums für die relevanten Risikoanlagen auf der Grundlage der anzusetzenden Bodenbeschleunigung a_g . Wie zuvor schon beschrieben wurde, wird dabei zwischen neuen Anlagen und Bestandsanlagen (vgl. Tabelle 23) unterschieden. Als Stichtag zur Unterscheidung wurde der 1.1.2013 festgelegt.

- c) Ermittlung und Bewertung der technischen Maßnahmen zum Schutz der Risikoanlagen vor Erdbeben

Die neuen Anlagen müssen zum Zeitpunkt der Beantragung der Betriebsgenehmigung den Anforderungen des Zulassungsdokuments entsprechen. Die erforderlichen seismischen Schutzmaßnahmen müssen vor Inbetriebnahme der Anlage durchgeführt werden.

Für bestehende Anlagen muss der Eigentümer bis spätestens zum 31. Dezember 2015 Studien vorlegen, in denen die seismische Zuverlässigkeit der Anlage bewertet und die ggf. erforderlichen Nachrüstungen festgelegt werden, um den behördlichen

Vorschriften zu entsprechen. Der Zeitplan für die Durchführung der erforderlichen Nachrüstungen wird von der Verwaltung vor dem 31. Juli 2016 festgelegt und wird nicht über den 1. Januar 2021 hinausgehen.

3. Anpassung der Anforderungen

Mit Einführung der Normen NF EN 1998-1:2005 bzw. NF EN 1998-1/NA:2007 wurde eine Revisionsklausel eingefügt, die festlegt, dass falls erforderlich Anpassungen der regulatorischen Anforderungen in Bezug auf Referenzszenarien oder Fristen für Bestandsanlagen vorgenommen werden können. Grundlage hierfür sind die Erfahrungen im Vollzug.

10.5 Internationale Regelungen zum Natech-Risikomanagement

Seveso-(III)-Richtlinie

Zur Verhütung schwerer Betriebsunfälle mit gefährlichen Stoffen und zur Begrenzung der Unfallfolgen wurde die Richtlinie 96/82/EG des Rates (Seveso-II-Richtlinie) zur Beherrschung der Gefahren bei schweren Unfällen mit gefährlichen Stoffen am 9.12.1996 eingeführt. Zur Verbesserung der Umsetzung ihrer Anforderungen wurde sie am 4. Juli 2012 durch die Seveso-III-Richtlinie ersetzt. Ziel der Richtlinie ist das Erreichen eines hohen Schutzniveaus gegenüber Unfällen, die betriebliche, externe oder natürliche Ursachen (z.B. Erdbeben oder Überschwemmungen) haben. Den EU-Mitgliedsstaaten obliegt es, die Zielsetzung der EU-Richtlinie im nationalen Recht zu konkretisieren.

Die Betriebe der unteren und oberen Klasse ein Konzept zur Verhinderung schwerer Unfälle erarbeiten. Darüber hinaus muss dargestellt werden, wie das Konzept konkret umgesetzt wird und fortlaufend verbessert werden kann. Die Überprüfung soll spätestens nach 5 Jahren erfolgen. Hierfür ist für die Betriebe der oberen Klasse ein Sicherheitsmanagementsystem einzuführen, das im Sicherheitsbericht neben dem Sicherheitskonzept gemäß Art. 8 der Richtlinie darzustellen ist. Damit soll die Anwendung des Sicherheitskonzepts in der betrieblichen Praxis sichergestellt bzw. verbessert werden. Welche Aspekte das Sicherheitsmanagement berücksichtigen muss, ist in Anhang III der Richtlinie dargestellt. Die Vorgaben lehnen sich hierbei an das europäische Umweltmanagementsystem EMAS (Eco Management Audit Scheme) sowie der weltweiten ISO 14001 (International Standardisation Organisation) an.

Im Anhang II der Richtlinie sind die Mindestdaten und Mindestanforderungen aufgelistet, die im Sicherheitsbericht zu berücksichtigen sind. Unter Punkt 2a wird festgestellt, dass es Aufgabe des Betreibers ist, die geografische Lage zu beschreiben sowie die meteorologischen, geologischen und hydrografischen Daten zu ermitteln. Dies bedeutet, dass er sich auch über die Naturgefahren informieren und die Daten über Häufigkeit und Intensität dieser umgebungsbedingten Gefahrenquellen ermitteln muss. Das Naturgefahren in die Betrachtung eingeschlossen sind, wird unter Punkt 4a des Anhangs II herausgestellt. Zur Beschreibung der Risiken von schweren Unfällen sind auch Naturgefahren wie z.B. Erdbeben und Überschwemmungen einzubeziehen. Insofern schließen die Anforderungen nach Anhang III (Sicherheitsmanagement und Betriebsorganisation) und Anhang IV (Notfallpläne) auch die Betrachtung und Bewertung der Naturgefahren ein.

Neben den Ursachen eines schweren Unfalls müssen nach Anhang II Abs. 2d und Abs. 4b auch die Folgen bzgl. Ausmaß und Schwere eines Unfalls abgeschätzt werden. Dies soll z.B. in Karten, Bildern oder in Beschreibungen erfolgen, aus denen die betroffenen Bereiche ersichtlich werden. Darüber hinaus wird in Abs. 4 c eine Ursachenanalyse für vergangene Unfälle gefordert, um aus diesen Ereignissen Lehren abzuleiten. Umgesetzte Maßnahmen gegenüber den Ursachen eines historischen Unfalls sind zu beschreiben.

In Anhang II der Seveso-III-Richtlinie werden keine konkreten Vorgaben angegeben, welche Intensitäten bzw. Jährlichkeiten für die verschiedenen Naturgefahren für eine Risikoanalyse herangezogen werden sollen. Darüber hinaus gibt es keinen Hinweis zur Berücksichtigung der Folgen des Klimawandels im Zusammenhang mit Naturgefahren. Die technischen Parameter sowie die Ausrüstungen zur Sicherung der Anlage sind ebenso zu beschreiben wie die Schutz- und Notfallmaßnahmen zur Begrenzung der Folgen eines schweren Unfalls.

Convention on the Transboundary Effects of Industrial Accidents

Die „Convention of The Transboundary Effects of Industrial Accidents“, auch UNECE “Unfallkonvention” genannt, ist eine Übereinkunft von Staaten über die Verhaltensweise zur

1. Verhütung
2. Vorbereitung und
3. Reaktion

auf Industrieunfälle, deren Auswirkungen grenzüberschreitend sein können. Naturkatastrophen als Auslöser von Industrieunfällen werden in Artikel 2 Abs. 1 ausdrücklich genannt.

Die einzelnen Bestimmungen der Konvention umfassen Vorkehrungen zur Verhinderung von Unfällen und, falls diese eintreten, Maßnahmen, um ihre Häufigkeit und Schwere zu verringern, damit ihre möglichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt gemildert werden. Um dies sicher zu stellen, müssen die Länder dafür sorgen, dass Anlagenbetreiber die sichere Durchführung ihrer gefährlichen Tätigkeit, die grenzüberschreitende Auswirkungen haben könnten, gewährleisten. Für die Durchsetzung dieser Anforderung, ergreifen die Vertragsparteien geeignete Gesetzgebungs-, Regelungs-, Verwaltungs- und Finanzmaßnahmen.

Darüber hinaus müssen die Vertragsparteien eine angemessene Notfallbereitschaft für Industrieunfälle bereithalten. Bedeutsam ist auch die gegenseitige Informationspflicht der Vertragsparteien über gefährliche Tätigkeiten, die grenzüberschreitende Auswirkungen haben können. Dies schließt auch die gegenseitige Hilfestellung im Fall eines Unfalls ein.

11 Quellenverzeichnis

- Antonov, J.I., S. Levitus, and T.P. Boyer (2005): Thermosteric sea level rise, 1955-2003, *Geophysical Research Letters*, 32(12), L12602, doi:10.1029/2005GL023112
- Augter, G.; Roos, M. (2011): Berechnung von Sturmintensitäten für Deutschland, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* Nr.236, Offenbach
- Baehr, H.D.; Stephan, K. (2013): Wärme- und Stoffübertragung; Auszug Kap. 5.5 Strahlungsaustausch, aus Tab. 5.8, S.633, Springer Verlag, 8. Auflage
- BBSR (2015): Klimaangepasstes Bauen bei Gebäuden. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, ISBN 978-3-87994-737-9 |
- BBSR (2018): Starkregeneinflüsse auf die bauliche Infrastruktur. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn, ISBN 978-3-87994-219-0
- Becker, A. (2019): Starkregen in Deutschland, Vortrag am 25.11.2019 in Berlin
<https://www.gdv.de/resource/blob/52944/278f3d04b7cc6abd0a165deea907dd95/gdv-pressegespraech-starkregen-andreas-becker-data.pdf>
- Benim, A. C. (2020): Hochschule Düsseldorf: Heat Transfer Skript
- BG RCI (2020); Organische Peroxide. Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, M 001, DGUV Information 213-069
- BMBF (2017): ReKliEs-De, Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland. Ergebnisbericht
- BMVI (2015): Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Projektes KLIWAS. Abschlussbericht des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur
- BMVI (2020): Verkehr und Infrastruktur an Klimawandel und extreme Wetterereignisse anpassen. Ergebnisbericht des Themenfeldes 1 im BMVI-Expertennetzwerk für die Forschungsphase 2016 – 2019. www.bmvi.de
- Borga, M.; Stoffel, M.; Marchi, L.; Marra, F.; Jakob, M. (2014): Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems. Flash floods and debris flows. In: *Journal of Hydrology* 518, S. 194–205. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.022.
- Bröker, S. (2017): Mehr Hitze, mehr Starkregen, aber auch längere Trockenperioden. Monitoring bestätigt Klimawandel in Süddeutschland. In: *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 10 (1), S. 13–14.
- Bronstert, A. (2016): Abflussbildung in der Landschaft. In: Nicola Fohrer, Helge Bormann, Markus Casper, Axel Bronstert, Andreas Schumann und Markus Weiler (Hg.): *Hydrologie*. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag AG (utb basics, 4513), S. 143–166.
- Brooks, H. E. (2013): Severe thunderstorms and climate change. *Atmospheric Research*, 123, 129-138.
- Çengel, Y.A. (2008): *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer*, 2/e, ISBN: 0073380172
- Chakraborty, A., Ibrahim, A., Cruz, A.M. (2018): A Study of accident investigation methodologies applied to the Natech events during the 2011 GREAT EAST Japan earthquake. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 51, 208-222
- Climate Service Center (CSC) Report 6: Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland.
- Chemical and Downstream Oil Industries Forum, CDOIF (2017): *Preparing for a Flood: Guidance and Best Practice*
- COMAH (2015): *The Control of Major Accident Hazards Regulations 2015*. Health and Safety. Nr. 483.
<http://www.legislation.gov.uk/id/uksi/2015/483>
- Cozzani, V. (2012): An Approach to the quantitative Assessment of Risk due to Natech Events. *Transactions of the VŠB - Technical university of Ostrava, Safety Engineering Series*, ISSN 1805-3238, Vol. VII, No. 2, p. 12- 19, VERSITA Verlag
- Cozzani, V. (2018): From Assessment to Management: New Needs in the Control of Risks due to Natech Scenarios. *Natech Risk Management Workshop*, 5. – 7. 9.2018, Potsdam
- CSB (2006): US Chemical Safety and Hazard Investigation Board. Dangers of Propylene Cylinders in High Temperatures. *Safety Bulletin*, No. 2005-05-B | June 2006

- Dallmeier, A. (2017): Die Naturgefahr Sturzflut - Eine Analyse des Phänomens und Dokumentation der Ereignisse der Jahre 2012 und 2013 in der URBAS-Datenbank, Bachelorthesis an der TU München
- Dietrich, R. (1976): Structural analysis of aircraft impact on a nuclear powered ship. Nucl. Engin.Design 37, S. 333-346
- Donat, M. G., Leckebusch, G.C.; Wild, S.; Ulbrich, U.; (2011): Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 1351-1370, doi:10.5194/nhess-11-1351-2011.
- DW (2021): Wie der Klimawandel den Wintereinbruch begünstigt. <https://www.dw.com/de/wie-der-klimawandel-den-wintereinbruch-beg%C3%BCnstigt/a-56513595>
- DWD (2016): Starkniederschläge in Deutschland. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main,
- DWD (2017): Nationaler Klimareport. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
- DWD (2018): Klimareport Niedersachsen. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
- DWD (2020a): Mitteilung vom 11.3.2020. <http://www.klimawandel-in-deutschland.de/hitze.html>
- DWD (2020b): Vom DWD annulliert: Lingen verliert deutschen Hitzerekord. NDR-Nachrichten https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/osnabrueck_emsland/Vom-DWD-annulliert-Lingen-verliert-deutschen-Hitzerekord,lingen874.html
- DWD (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark. Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. Bis 19. Juli 2021 https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd_.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- EC (2013): Flash floods in Europe characterised. Science for Environment Policy. ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/40si4_en.pdf
- Environment Agency, EA (2015): Preparing for flooding – A guide for sites regulated under EPR and COMAH, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/439863/LIT_7176.pdf
- EU (2012): Richtlinie 2012/18/EU: Richtlinie zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates.
- Fahlbruch, B.; Meyer, I. (2017): Ausarbeitung von Arbeitshilfen zur methodischen Ereignisanalyse und Ergebnisauswertung zur Fortschreibung des Standes der Technik (FKZ 3713433131). Umweltbundesamt Texte 14/2017
- Fahlbruch, B. (2021): Umfassende systematische Auswertung von Störfällen und sonstigen Ereignissen in industriellen Anlagen, insbesondere mit Auswirkungen auf die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft. Umweltbundesamt, Texte 52/2021, FKZ 3717 59 303 0
- Faust, E.; Rädler, A. (2018): Hagel – eine unterschätzte, zunehmende Gefahr. <https://www.munichre.com/topics-online/de/climate-change-and-natural-disasters/climate-change/hail.html>, 23.10.2018
- FEMA P-361 (2008): Design and Construction Guidance for Community Safe Rooms. Federal Emergency Management Agency, Second Edition / August 2008
- Frank, C.; Grebhan, K.; Kottmeier, C.; Kunz, M.; Lux, R.; Mayer, H.; Mohr, S.; Rauthe, M.; Ruck, B.; Schindler, D.; Schönborn, J. (2010): Strategien zur Reduzierung des Sturmschadensrisikos für Wälder (Verbundprojekt RESTER)
- GDV (2010): Naturgefahrenreport 2020, Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft, Berlin, Deutschland. www.gdv.de/naturgefahrenreport.
- Häckel, H. (2008): Meteorologie (8. Auflage). Verlag: Utb GmbH
- HSE (2015): The Control of Major Accident Hazards Regulation 2015 – Guidance on Regulations. L111 (Third edition). ISBN 978 0 7176 6605 8
- HSE (2018): Operational Delivery Guide – Inspection of COMAH Operator Flood Preparedness. <http://www.hse.gov.uk/comah/guidance/delivery-guide-flood-preparedness.pdf>

- Ibrahim, A., Zhao, B., Minamide, K., Han, S., Gao, Y., (2017): Natech Accident Investigation during the 2011 Great East Japan Earthquake and Recommendations for Disaster Preparedness Based on a Resident Survey. Capstone project report. Kyoto University.
- Imbery, F.; Friedrich, K.; Haeseler, S.; Koppe, C.; Janssen, W.; Bissolli, P. (2028): Vorläufiger Rückblick auf den Sommer 2018 – eine Bilanz extremer Wetterereignisse. DWD Abteilungen für Klimaüberwachung und Agrarmeteorologie
- IKSR (2011): Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Bericht Nr. 188
- Jacobeit, J.; Hofstätter, M. (2015): Veränderungen großräumiger Starkniederschläge im Klimawandel: Synthese. Abschlussveranstaltung am 18.Juni 2015, Wien
- IPCC (2021): Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. 6. Assessmentreport der Arbeitsgruppe I
- IVSS (2012): Gefahrenermittlung und Gefahrenbewertung in der Anlagensicherheit - praxisbewährte Methoden. IVSS Sektion Chemie, Heidelberg.
- Junghänel, T. (2022): Starkregen in Deutschland. Vortrag am 23.2.2022 in der Kommission für Anlagensicherheit.
- Kasper, F.; Friedrich, K; Imbery, F. (2020): 2019 global zweitwärmstes Jahr: Temperaturentwicklung in Deutschland im globalen Kontext. DWD
https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Kind, C.; Kaiser, T.; Riese, M.; Bubeck, P; Müggenburg, E.; Thieken, A.; Schüller, L. Fleischmann, R. (2019): Vorsorge gegen Starkregenereignisse und Maßnahmen zur wassersensiblen Stadtentwicklung – Analyse des Standes der Starkregenvorsorge in Deutschland und Ableitung zukünftigen Handlungsbedarfs. Texte des Umweltbundesamtes 55/2019
- KLIFF (2013) – Klimafolgenforschung in Niedersachsen. Abschlussbericht – Forschungsthema 6 : Binnengewässer
- KLIWA (2019): Starkniederschläge - Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft – Kurzbericht –
- Köppke, K.-E.; Sterger, O.; Stock, M. (2012): Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 310. <https://www.kas-bmu.de/tras-entgueltige-version.html>
- Köppke, K.-E.; Sterger, O.; Stock, M. (2013): Grundlagen für die Technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS) 310: Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser. UBA-Forschungsvorhaben, FKZ 3708 49 300, Texte 17/2013
- Köppke, K.-E. (2018): Model for the Estimation of Debris Flight and the Potential Damage on Steel Tanks by Windborne Missiles. Natech Risk Management Workshop, 5. – 7. 9.2018, Potsdam
- Köppke, K.-E.; Buchholz, G. (2020): UVP-Änderungsrichtlinie 2014/52/EU und Klimawandel. Umweltbundesamt, Climate Change 28/2020
- Konersmann, R. (2012): Risiken infolge naturbedingter Gefahrenquellen. Technische Sicherheit Band 2, Nr. 7/8, S. 44-50
- Krätzig, W.B.; Andres, M.; Niemann H.-J.; Köppke, K.-E.; Stock, M. (2016): Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3711 68 331
- Krausmann, E.; Cruz, A.M.; Salzano, E. (2017): Natech Risk Assesment and Management. Elsevier, ISBN 978-0-12-803807-9
- Kreienkamp, F. et al (2016): Starkniederschläge in Deutschland. Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main, 2016
- Kretschmer, M.; Coumou, D.; Agel, L.; Barlow, M.; Tziperman, E.; Cohen, j. (2017): "More-Persistent Weak Stratospheric Polar Vortex States Linked to Cold Extremes", Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 99, pp. 49-60, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0259.1>
- Kron, W. (2014): Sturmfluten - Sturzfluten - Flusshochwasser. Wie gehen wir mit dem Hochwasserrisiko um? In: Hans Helmut Schetter (Hg.): Hochwasser und Risiko. Vorträge [gehalten am 28. November 2014 in Stuttgart]. Stuttgart: Stiftung Bauwesen (Schriftenreihe der Stiftung Bauwesen zu "Der Bauingenieur und die Gesellschaft", 19), S. 37–66.
- LAWA (2010): Wasserwirtschaftliche Grundlagen. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
<https://www.lawa.de/Publikationen-363-Wasserwirtschaftliche-Grundlagen.html>

- LAWA (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder, LAWA Klimawandel-Bericht 2017
- Lingenhöhl, D. (2014): Der Jetstream schlägt Wellen. Spektrum.de. 14.3.2014
- Lorenz, D. (1996): Simulationsrechnung zum Trümmerflug bei Staubexplosionen. Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten Bereich Prävention, Zentrallabor
https://www.fsa.de/fileadmin/user_upload/pdf/forschung/exschutz_projektliste/F-05-9305_Projektbericht_E2_.pdf
- LUBW (2016): Leitfaden – Kommunales Starkregenrisikomanagement Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- Luhmann, H.-J. (2018): Die Normungsinstitutionen verweigern die Wahrnehmung des Klimawandels. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl, D. Kasang & R. Weisse (Hrsg.). Warnsignal Klima: Extremereignisse. pp. 370-373. Online: www.klimawarnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.extremereignisse.
- Malitz, G. (1999): Starkniederschlag in Deutschland - Messergebnisse, statistische Auswertungen, Schätzungen
https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb1999_pdf/05_1999.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Malitz, G.; Rudolf, B. (2008): Niederschläge im urbanen Raum. Klimastatusbericht 2008 des DWD
https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb2008_pdf/a5_2008.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Meinke, I.; Weiße, R.; von Storch, H. (2011): Nordseesturmfluten im Klimawandel.
https://www.hzg.de/imperia/md/content/klimabuero/publikationen/1509_2009.pdf
- Ministry of Housing, Communities, and Local Government, MHCLG (2019): National Planning Policy Framework
- Mohr, S.; Kunz, M.; Keuler, K. (2015): Development and application of a logistic model to estimate the past and future hail potential in Germany. *Journal of Geophysical Research*, 120, 3939–3956.
- MULNV NRW, (2018): Arbeitshilfe kommunales Starkregenrisikomanagement Hochwasserrisikomanagementplanung in NRW. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Nov. 2018.
https://www.flussgebiete.nrw.de/system/files/atoms/files/arbeitshilfe_kommunales_starkregenrisikomanagement_2018.pdf
- National Weather Service (2021): Flash Flooding Definition <https://www.weather.gov/phi/FlashFloodingDefinition>
- Neuser, U. (2000): Zusammenstellung der rechtlichen Grundlagen für die Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik. Rechtsgutachten für den SFK-Arbeitskreis „Schritte zur Ermittlung des Standes der Sicherheitstechnik“.
- Nerema, R.S.; Beckleyb, B.D.; Fasullo, J.T.; Hamlington, B.D.; Mastersa, D.; Mitchume, G.T. (2018): Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1717312115
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), (2015): Warm Water and Cold Air: The Science Behind Lake-Effect Snow. Archived from the original on January 2, 2015. Retrieved January 2, 2015.
http://www.noaa.gov/features/02_monitoring/lakesnow.html
- Otte, U. (1999): Häufigkeit von Sturmböen in den letzten Jahren. Klimastatusbericht 1999, DWD
https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimastatusbericht/publikationen/ksb1999_pdf/03_1999.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Pecker, A. (2013): Overview of Seismic Regulations for French Industrial Facilities. International Conference on Seismic Design of Industrial Facilities. RWTH Aachen
- Polifke, W.; Kopitz, J. (2008): Wärmeübertragung – Grundlagen, analytische und numerische Methoden. 2. Auflage, Pearson Studium, München
- Puskeiler, M. (2013): Radarbasierte Analyse der Hagelgefährdung in Deutschland. *Wiss. Berichte des Inst. für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*, Nr. 59, KIT Scientific Publishing, 202 S.
- Quaschnig, V. (2021) Regenerative Energiesystem. Carl Hanser Verlag München

Rieger, W. (2015b): Abflussbildung. Hydrologie Grundmodul. Technische Universität. München, 2015, zuletzt geprüft am 18.11.2016.

Ruhnau, T. (2021): Werden schwere Stürme durch den Klimawandel häufiger?
<https://wetterkanal.kachelmannwetter.com/werden-schwere-stuerme-durch-den-klimawandel-haeufiger/>

Sander, J., Eichner, J.F., Faust, E., Steuer, M. (2013): Rising Variability in Thunderstorm-Related U.S. Losses as a Reflection of Changes in Large-Scale Thunderstorm Forcing. *Weather. Clim. Soc.*, 5, 317–331, DOI:10.1175/WCAS-D-12-00023.1.

Sieder, Zeitler Dahme, Knopp (2021): Wasserhaushaltsgesetz. 55. Auflage, Verlag C.H. Beck

Stahl, K. (2016): Hydrologie der Hochgebirge. In: Nicola Fohrer, Helge Bormann, Markus Casper, Axel Bronstert, Andreas Schumann und Markus Weiler (Hg.): *Hydrologie*. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag AG (utb basics, 4513), S. 287–298.

Stock, M. (2009): Hat der Klimawandel Auswirkungen auf die Anlagensicherheit? *Chemie Ingenieur Technik - CIT* 81(1–2):119–126

Umweltbundesamt (2019): Trends der Niederschlagshöhe. Mitteilung des DWD vom 12.6.2019
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>

Verworn, H.-R.; Kummer, U. (2003): Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN). Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Universität Hannover.

VCI (2012): Leitfaden zur DIN EN 1998-1: Der Lastfall Erdbeben im Anlagenbau

VDI-Wärmeatlas (2013), 11. Auflage, Springer Vieweg

Volosciuk, C.; Maraun, D.; Semenov, V.; Tilinina, N.; Gulev, S.; Latif, M. (2016): Rising Mediterranean Sea Surface Temperatures Amplify Extreme Summer Precipitation in Central Europa. *Scientific Reports* 6, Article number 32450

Weller, B.; Naumann, T.; Jakubetz, S. (2012): Gebäude unter den Einwirkungen des Klimawandels. REGKLAM Publikationsreihe, Heft 3. Berlin 2012.

WMO, (1975): *International Cloud Atlas: Manual on the observation of clouds and other meteors.*, Vol. 1. WMO–No. 407. I. World Meteorological Organization (WMO), Genf, Schweiz, S. 155

WMO (1986): *Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation*. World Meteorological Organisation, Operational Hydrology 332, Report No. 1, Second Edition, Geneva

ZEMA (2021): Zentralen Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen
<https://www.infosis.uba.de/index.php/de/site/12981/zema/index/28591.html> ; Temperatur am 08.08.2017 um 16:00 Uhr im Bereich der Anlage 29°C.