

TEXTE

100/2023

Berücksichtigung des Klimawandels in technischen Regeln für Anlagensicherheit

Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 310 und 320

- fortgeschriebene Fassungen nach Überprüfung -

von:

Prof. Dr. Karl-Erich Köppke

Ingenieurbüro Prof. Dr. Köppke GmbH, Bad Oeynhausen

Herausgeber:

Umweltbundesamt

Umwelt 
Bundesamt

TEXTE 100/2023

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

Forschungskennzahl 3718 48 325 0

FB001027

Berücksichtigung des Klimawandels in technischen Regeln für Anlagensicherheit

Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 310 und 320
- fortgeschriebene Fassungen nach Überprüfung -

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

/umweltbundesamt.de

/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.

Vorbemerkung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels weist die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) darauf hin, dass in Betriebsbereichen, in denen gefährliche Stoffe in höheren Mengen vorhanden sind, durch naturbedingte Extremereignisse ein Störfall ausgelöst werden kann. Deshalb sind die bisherigen Sicherheitsanforderungen und das Sicherheitsmanagement entsprechend dem wissenschaftlichen Erkenntnisfortschritt und den Betreiberpflichten gemäß Störfall-Verordnung (StörfallV) zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen.

Zur Konkretisierung dieser Anforderungen und zur Anpassung des Standes der Sicherheitstechnik an die Folgen des Klimawandels wurden in den vergangenen Jahren 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.

Zu beiden technischen Regeln wurden Hinweise und Erläuterungen erarbeitet und veröffentlicht (Köppke et al., 2013; Krätzig et al., 2016).

Die Technischen Regeln für Anlagensicherheit sind gemäß § 51a Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) mindestens alle fünf Jahre zu überprüfen, um sie dem Stand der Sicherheitstechnik anzupassen.). Dies ist für die TRAS 310 und der TRAS 320 mit erneuter Veröffentlichung im Bundesanzeiger erfolgt. Im Zuge der Novellierung beider technischen Regeln wurden auch die jeweiligen, zugehörigen Hinweise und Erläuterungen überarbeitet, wobei einzelne Passagen unverändert geblieben sind und somit wortgleich übernommen werden konnten. Letzteres betrifft insbesondere Texte und Grafiken aus Krätzig et al., 2016 und Köppke et al., 2013 in Kapitel 2.3 (zu Kapitel 2) bis Kapitel 2.8 (zu Kapitel 7), Kapitel 2.16 (zu Kapitel 15) bis Kapitel 2.18 (zu Kapitel 17) und Kapitel 3.4 (zu Kapitel 3) bis Kapitel 3.12 (zu Kapitel 8.1).

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	9
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis.....	11
1 Einordnung der Technischen Regeln für Anlagensicherheit.....	13
2 Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 310	14
2.1 Vorbemerkung	14
2.2 Zu Kapitel 1 Präambel.....	14
2.3 Zu Kapitel 2: Grundlagen	14
2.4 Zu Kapitel 3 Anwendungsbereich	17
2.5 Zu Kapitel 4: Begriffsbestimmungen	17
2.6 Zu Kapitel 5: Systematisierung und Aufbau der TRAS.....	19
2.6.1 Zu Kapitel 5.1 Teil A: Gefahrenquelle Überflutung	19
2.6.2 Zu Kapitel 5.1 Teil B: Gefahrenquelle Grundwasseranstieg	21
2.7 Zu Kapitel 6 Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse.....	21
2.8 Zu Kapitel 7 Detaillierte Gefahrenquellenanalyse	22
2.8.1 Zu Kapitel 7.1 Teil A: Überflutung	23
2.8.2 Zu Kapitel 7.2 Teil B: Grundwasseranstieg	27
2.8.3 Zu Kapitel 7.3 Berücksichtigung des Klimawandels.....	29
2.9 Zu Kapitel 8 Ermittlung der gefährdeten, sicherheitsrelevanten Teile des Betriebsbereichs und der Anlagen.....	29
2.10 Zu Kapitel 9 Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen	30
2.11 Zu Kapitel 10 Festlegung von Szenarien und Schutzzielen in Verbindung mit § 3 Absatz 1 und § 4 Störfall-Verordnung	30
2.12 Zu Kapitel 11 Erarbeitung von Schutzkonzepten für die Szenarien	31
2.13 Zu Kapitel 12 Prüfung der Schutzkonzepte.....	32
2.14 Zu Kapitel 13 Ermittlung von Szenarien gemäß § 3 Absatz 3 (Dennoch-Störfälle) und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung gemäß § 10 Störfall-Verordnung	33
2.15 Zu Kapitel 14 Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen ..	34
2.16 Zu Kapitel 15 Planung für Notfälle, Ergänzungen von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Übermittlung von Informationen für die externen Alarm- und Gefahrenabwehrplanung.....	34
2.17 Zu Kapitel 16 Dokumentation	34

2.18	Zu Kapitel 17 Erfüllung weiteren Pflichten der Störfall-Verordnung	35
2.18.1	Zu Kapitel 17.1 Anforderungen an die Instandhaltung von Vorkehrungen (§6 Abs. 1 Nr. 1, 2 StörfallV).....	35
2.18.2	Zu Kapitel 17.2 Informationen und Schulungen der Beschäftigten (§ 6 Abs. 1 Nr. 4 StörfallV).....	36
2.18.3	Zu Kapitel 17.3 Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall (§5 Abs. 2 StörfallV).....	39
Anhänge zu den Hinweisen und Erläuterungen zur TRAS 310		
Anhang 1	Erkenntnisse über die Folgen des Klimawandels.....	41
Anhang 2	Begriffe	61
Anhang 3	Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN)	68
Anhang 4	Hinweise zur Entwicklung eines Schutzkonzeptes gegen Überflutung	74
Anhang 5	Beispiel einer Gefahrenquellenanalyse für Flusshochwasser	83
Anhang 6	Beispiel einer Niederschlags-/Abflussberechnung für Starkniederschlagsereignisse.....	91
3	Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 320	98
3.1	Vorbemerkung	98
3.2	Zu Kapitel 1 Präambel.....	100
3.3	Zu Kapitel 2: Grundlagen	100
3.4	Zu Kapitel 3 Anwendungsbereich	102
3.5	Zu Kapitel 4: Begriffe	102
3.6	Zu Kapitel 4.2 Umgebungsbedingte Gefahrenquellen	103
3.7	Zu Kapitel 4.10: Schutzkonzept	103
3.8	Zu Kapitel 5 Systematisierung und Aufbau der TRAS	103
3.9	Zu Kapitel 6 Beschreibung der Gefahrenquellen	104
3.9.1	Zu Kapitel 6.1 Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten.....	104
3.9.2	Zu Kapitel 6.1.1 Gefahrenquellen durch Windlasten	104
3.9.3	Zu Kapitel 6.1.2 Gefahrenquellen durch Schwingungen	105
3.9.4	Zu Kapitel 6.1.3 Gefahrenquellen durch Schnee und Eislasten	107
3.9.5	Zu Kapitel 6.2 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile sowie Luftdruckänderungen.....	109
3.9.5.1	Zu Kapitel 6.2.1 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile.....	109
3.9.5.2	Zu Kapitel 6.2.2 Gefahrenquellen durch Staub und Sand.....	109
3.9.5.3	Zu Kapitel 6.2.3 Gefahrenquellen durch Druckänderungen.....	110
3.10	Zu Kapitel 7 Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse.....	110

3.11	Zu Kapitel 8 Detaillierte Gefahrenquellenanalyse	111
3.12	Zu Kapitel 8.1 Statische und dynamische Lasten	112
3.12.1	Zu Kapitel 8.2: Berücksichtigung des Klimawandels	121
3.12.2	Zu Kapitel 8.3: Windbedingte Projektile.....	121
3.13	Zu Kapitel 9 Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile des Betriebsbereichs und der Anlagen.....	123
3.13.1	Zu Kapitel 9.1: Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten.....	124
3.13.2	Zu Kapitel 9.1.1: Windlasten.....	124
3.13.3	Zu Kapitel 9.1.2: Schnee- und Eislasten.....	127
3.13.4	Zu Kapitel 9.2: Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile: Ermittlung der gefährdeten Anlagen und Anlagenteile	131
3.14	Zu Kapitel 10 Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen	132
3.15	Zu Kapitel 11: Schutzziele und Grundlagen für das Schutzkonzept	133
3.16	Zu Kapitel 12 Erarbeitung von Schutzkonzepten	135
3.17	Zu Kapitel 13 Prüfung der Schutzkonzepte.....	139
3.18	Zu Kapitel 14 Ermittlung von Szenarien gemäß § 3 Absatz 3 StörfallV (Dennoch-Störfälle) und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung	140
3.19	Zu Kapitel 15 Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen	141
3.20	Zu Kapitel 16 Planung für Notfälle, Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung.....	143
3.21	Zu Kapitel 17 Dokumentation	147
3.22	Zu Kapitel 18 Erfüllung von weiteren Pflichten der StörfallV	148
3.22.1	Zu Kapitel 18.1: Anforderungen an die Instandhaltung (§ 6 Absatz 1 Nr. 1, 2 StörfallV).....	148
3.22.2	Zu Kapitel 18.2: Informationen und Schulungen der Beschäftigten (§ 6 Absatz 1 Nummer 4 StörfallV)	150
3.22.3	Zu Kapitel 18.3: Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall	151
4	Quellenverzeichnis.....	153

Abbildungsverzeichnis

TRAS 310

Abbildung 1:	Gegenüberstellung der beobachtete Niederschlagshöhen in Deutschland mit den 100-jährlichen Niederschlagshöhen nach KOSTRA-DWD-2010R	25
Abbildung 2:	Ableitung von Niederschlagshöhen aus real gemessenen Starkniederschlagsereignissen für die Gefahrenquellenanalyse	27
Abbildung 3:	Veränderungen von Grundwasserspiegeln bei Porenwasser- und Kluftwasserleitern	28

TRAS 320

Abbildung 1:	Zusammenhang von Einwirkung, Tragwerkwiderstand und Teilsicherheitsbeiwerte	99
Abbildung 2:	Windzonenkarte der DIN EN 1991-1-4	112
Abbildung 3:	Darstellung der atmosphärischen Grenzschicht	113
Abbildung 4:	Windgeschwindigkeitsprofile in Abhängigkeit von der Bodenrauigkeit	113
Abbildung 5:	Sturmkarte des DWD: Windspitzen für eine Jährlichkeit von 100 Jahren	116
Abbildung 6:	Für den Nachweis von baulichen Anlagen zu berücksichtigende Einwirkungen infolge der Gefahrenquelle Wind.....	117
Abbildung 7:	Schneelast-Maßstab	118
Abbildung 8:	Verdeutlichung der Höhe der Schneelast in Abhängigkeit von der Schneedichte.....	119
Abbildung 9:	Typische Lastbilder der Eisbildung: Glatteisbildung (oben), Raueisbildung (unten)	120
Abbildung 10:	Eiszonenkarte.....	120
Abbildung 11:	Darstellung möglicher Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile.....	122
Abbildung 12:	Festlegungen des Geschwindigkeitsdruckes in deutschen Normen für Geländekategorie II in Abhängigkeit der Windzonen	126
Abbildung 13:	Schneezonenkarte für Deutschland	130
Abbildung 14:	Einwirkungen, Störfalleintrittsvoraussetzungen und Folgen durch die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eis	133
Abbildung 15:	Aerodynamische Maßnahmen gegen wirbelerregte Querschwingungen	138

Tabellenverzeichnis

TRAS 310

Tabelle 1:	Vorschlag von Niederschlagshöhen aus real gemessenen Starkniederschlagsereignissen.....	22
Tabelle 2:	Beispiel eines Inspektions- und Wartungsplans.....	32
Tabelle 3:	Melderaster zur Kategorisierung und Abgrenzung der Ereignisse.....	34

TRAS 320

Tabelle 1:	Merkmale der Schadensfolgenklassen.....	100
Tabelle 2:	Dichte von Schnee in kg/m^3 (Angaben nach DWD).....	108
Tabelle 3:	Kriterien zum Ausschluss von Gefahrenquellen	111
Tabelle 4:	Aerodynamische Rauigkeitslängen	113
Tabelle 5:	Böengeschwindigkeiten nach DIN EN 1991-1-4 mit NA	114
Tabelle 6:	Vereisungsklassen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland nach DIN EN 1991-1-3/NA.....	121
Tabelle 7:	Potentiell durch Wind, Schnee- oder Eislasten gefährdete Anlagenteile	124
Tabelle 8:	Abminderungsfaktoren der TGL 32274/07, Ausgabe Dez. 1976.....	126
Tabelle 9:	Verfahrensschritte zur Berechnung der Windlast nach EN 1991-1-4	127
Tabelle 10:	Regelschneelast s_0 in kN/m^2 (kp/m^2) gemäß Tabelle 2 der DIN 1055 Teil 5	128
Tabelle 11:	Mindestschneelasten mit deren Gültigkeit	130
Tabelle 12:	Berechnungsformeln zur Berechnung der Schneelast am Boden über Gültigkeit der angegebenen Höhen in Tabelle 11.....	131
Tabelle 13:	Formbeiwerte der Schneelast für flache und geneigte Dächer	131
Tabelle 14:	Konstruktive Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Widerstandes gegenüber Windeinwirkungen	136
Tabelle 15:	Weitere Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Widerstandes gegenüber Windeinwirkungen	137
Tabelle 16:	Beispiel eines Begehungs- und Kontrollplans für die Gefahrenquelle Wind, Schnee- und Eislasten.....	149

Abkürzungsverzeichnis

AGAP	Alarm- und Gefahrenabwehrplan
AR	Assessment Report
AwSV	Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CC 3	Klasse für Schadensfolgen (eines Tragwerksversagens) nach DIN EN 1990 Anhang B mit dem Merkmal: Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DIN EN	Auf einer Europäischen Norm basierende DIN-Norm
DIN EN /NA	Nationaler Anhang zu einer DIN EN Norm
DSL 2	Überwachungsmaßnahmen bei der Planung (von Tragwerken) nach DIN EN 1990/NA Verstärkte Überwachung: Prüfung durch eine von der Planungsstelle organisatorisch unabhängige Prüfstelle, durch einen Prüfsachverständigen oder einen Prüfsachverständigen für Bautechnik (Fremdüberwachung)
DWD	Deutscher Wetterdienst
GZM	Größte zusammenhängende Menge
HQ100	Hochwasserabfluss, der statistisch einmal in 100 Jahren erreicht oder überschritten wird
HHQ	Höchster jemals gemessener Hochwasserabfluss
IL 2	Überwachungsstufen für die Herstellung und Nutzung nach DIN EN 1990/NA Verstärkte Überwachung: Überwachung der Herstellung durch unabhängige Drittstelle, durch einen Prüfsachverständigen oder einen Prüfsachverständigen für Bautechnik (Fremdüberwachung)
IKSR	Internationale Kommission zum Schutz des Rheins
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 3	Zuverlässigkeitsklasse für Tragwerke nach DIN EN 1990 Anhang B entsprechend der Schadensfolgeklasse CC 3

SFK	Störfallkommission
SRA	Sicherheitsrelevante Anlagenteile
SRB	Sicherheitsrelevanten Teile eines Betriebsbereichs
StörfallV	Störfall-Verordnung (12. BImSchV)
TRAS	Technische Regel für Anlagensicherheit
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
WHG	Wasserhaushaltsgesetz

1 Einordnung der Technischen Regeln für Anlagensicherheit

Die technischen Regeln für Anlagensicherheit (TRAS) werden von der Kommission für Anlagensicherheit (KAS) erarbeitet und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz vorgeschlagen. Dieses kann die TRAS – nach einer inhaltlichen Prüfung und Billigung - im Bundesanzeiger veröffentlichen. Rechtliche Grundlage ist § 51a Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG):

„(2) Die Kommission für Anlagensicherheit soll gutachtlich in regelmäßigen Zeitabständen sowie aus besonderem Anlass Möglichkeiten zur Verbesserung der Anlagensicherheit aufzeigen. Sie schlägt darüber hinaus dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechende Regeln (sicherheitstechnische Regeln) unter Berücksichtigung der für andere Schutzziele vorhandenen Regeln vor. Nach Anhörung der für die Anlagensicherheit zuständigen obersten Landesbehörden kann das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit diese Regeln im Bundesanzeiger veröffentlichen.“

Die Technischen Regeln für Anlagensicherheit konkretisieren damit den Stand der Sicherheitstechnik. Auf der Grundlage der Technischen Regeln für Anlagensicherheit kann überprüft werden, ob der Betreiber eines Betriebsbereiches die Anforderungen zur Einhaltung des Standes der Sicherheitstechnik erfüllt oder nicht. Die Einhaltung des Standes der Sicherheitstechnik ist eine der drei dynamischen Grundpflichten gemäß § 3 StörfallV. Ein Betreiber eines Betriebsbereichs hat danach

1. die Pflicht, Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen (§ 3 Absatz 1 StörfallV) zu treffen,
2. die Pflicht, Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen für „Dennoch-Störfälle“ (§ 3 Absatz 3 StörfallV) vorzusehen sowie
3. die Pflicht, dass Beschaffenheit und Betrieb der Anlagen des Betriebsbereichs dem Stand der Sicherheitstechnik (§ 3 Absatz 4 StörfallV) entsprechen.

Diese Pflichten gelten für Errichtung und Betrieb, d.h. sowohl für zu errichtende als auch bestehende Anlagen von Betriebsbereichen (sogenannte dynamische Grundpflichten). Zum Nachweis des Standes der Sicherheitstechnik kann sich der Betreiber auf die TRAS berufen. Die TRAS können als Sachverständigenäußerungen einer gesetzlich mandatierten Kommission quasi als „staatliche“ Technische Regeln bezeichnet werden. Sie sind zwar nicht unmittelbar rechtsverbindlich, erhalten aber durch die Veröffentlichung im Bundesanzeiger und der damit verbundenen Billigung der Bundesregierung einen faktisch hohen Stellenwert. Ihnen kommt damit eine höhere Aussagekraft zu als anderen Sachverständigenäußerungen in Bezug auf den Stand der Sicherheitstechnik. Andere Rechtsnormen können die TRAS in Bezug nehmen. Behörden können die sicherheitstechnischen Regeln im Rahmen von Genehmigungen als Nebenbestimmungen oder mittels nachträglicher Anordnungen umsetzen. Über diesen Weg können sie rechtliche Verbindlichkeit erlangen. Gerichte können sie zur Auslegung heranziehen. Da es sich um Technische Regeln handelt, sind von den Anforderungen der TRAS abweichende Vorkehrungen und Maßnahmen zulässig; dies jedoch nur, wenn der Betreiber die sicherheitstechnische Gleichwertigkeit der von ihm gewünschten abweichenden Vorkehrungen und Maßnahmen nachweisen kann (Darlegungslast beim Betreiber).

Die nachfolgenden Hinweise und Erläuterungen erläutern die TRAS 310 und TRAS 320, sind jedoch selbst keine technische Regel.

2 Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 310

2.1 Vorbemerkung

Erstmals wurde die TRAS 310 „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser“ am 24.2.2012 im Bundesanzeiger veröffentlicht. Nach § 51a BImSchG sind die Technischen Regel für Anlagensicherheit innerhalb angemessener Zeitabstände, spätestens nach jeweils fünf Jahren, von der Kommission für Anlagensicherheit (KAS) daraufhin zu überprüfen, ob die veröffentlichten sicherheitstechnischen Regeln weiterhin dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen. Unabhängig von der gesetzlich festgelegten turnusmäßigen Überprüfung erforderte das Ereignis an Ahr und Erft im Juli 2021 eine intensive Nachbetrachtung sowie eine Neubewertung der Anforderungen für Starkniederschlagsereignisse.

Auch Neuregelungen in anderen Rechtsbereichen mussten im Rahmen der Überarbeitung der TRAS 310 geprüft und berücksichtigt werden. Im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) wurden mit Einführung der §§ 78 bis 78c im Jahr 2017 wichtige Anforderungen neu eingeführt, die die möglichen Auswirkungen von Hochwasser in Überschwemmungsgebieten und insbesondere in Risikogebieten vermindern sollen. Risikogebiete sind Gebiete, die durch Überspülung von Deichen oder durch Deichversagen überschwemmt werden können. Es wird klargestellt, dass für neu errichtete oder wesentlich erweiterte bauliche Anlagen außerhalb von Baugebieten eine risikoangepasste Bauweise erforderlich ist. Damit wird auch der Bauherr mit in die Verantwortung zum Hochwasserschutz genommen und kann sich nicht auf die Verantwortung der Behörden zurückziehen (vgl. auch § 5 Abs. 2 WHG).

Mit der Überarbeitung der Technischen Regel 310 wurde auch eine Neufassung der Hinweise und Erläuterungen erforderlich, die wichtige Informationen zur Umsetzung des Standes der Sicherheitstechnik gegenüber den Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser enthält.

In den Anhängen zur TRAS 310 befinden sich weitergehende Informationen einschließlich neuer wissenschaftlicher Ergebnisse zur Durchführung der Gefahrenquellenanalyse.

2.2 Zu Kapitel 1 Präambel

Üblicherweise enthalten Rechtsvorschriften Präambeln, in denen Sinn und Zweck der nachfolgenden Regelungen umrissen werden. Dieser Praxis folgt auch die Präambel der TRAS 310 Niederschläge und Hochwasser. Das Anliegen der TRAS und ihr Zustandekommen werden kurz beschrieben. Ausdrücklich wird darauf hingewiesen, dass Abweichungen von den Anforderungen der TRAS möglich sind, sofern die Gleichwertigkeit durch Sachverständige nach § 29b BImSchG festgestellt wird und die zuständige Behörde diesem Ergebnis zustimmt.

2.1 Zu Kapitel 2: Grundlagen

Die Ausführungen im Kapitel Grundlagen zielen darauf ab, die rechtliche Zuordnung der TRAS 310 zu verdeutlichen. Die Pflichten der Betreiber von Betriebsbereichen leiten sich aus § 3 der StörfallV ab:

1. Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen (§ 3 Abs. 1 StörfallV)
2. Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen – „Dennoch“-Störfälle (§ 3 Abs. 3 StörfallV)
3. Die Pflicht zur Einhaltung des Standes der Sicherheitstechnik (§ 3 Abs. 4 StörfallV)

Gemäß Absatz 2 sind bei der Erfüllung dieser Betreiberpflichten umgebungsbedingte Gefahrenquellen zu berücksichtigen, wobei Hochwasser und Erdbeben expressis verbis genannt werden.

Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen sind vom Betreiber zu treffen, wenn die Gefahrenquellen vernünftigerweise nicht ausgeschlossen werden können. Zur Auslegung des Begriffs „vernünftigerweise“ wird auf die vom damaligen BMU (heute BMUV) veröffentlichte Vollzugshilfe zur StörfallV hingewiesen (BMU, 2004). Ob und wie die hier relevanten Gefahrenquellen vernünftigerweise ausgeschlossen werden können, wird im Zusammenhang mit den Erläuterungen zur vereinfachten Gefahrenquellenanalyse in Kapitel 2.5 diskutiert.

Eine wichtige Erkenntnisquelle bzgl. der durch Niederschläge (und damit Hochwasser und sonstige Überflutungen) ausgelösten Gefahrenquellen sind die Ergebnisse der von zahlreichen Instituten und Forschungseinrichtungen durchgeführten Untersuchungen über den Klimawandel. Eine zusammenfassende Darstellung ist in **Anhang 1** „Erkenntnisse über die Bedeutung des Klimawandels“ beigefügt. Nach den vorliegenden Ergebnissen der verschiedenen Projektionen werden zukünftige Niederschläge und Hochwasser bzgl. ihrer Häufigkeit und Intensität vom Klimawandel beeinflusst. Hierzu tragen folgende Faktoren bei:

1. Anstieg des Meeresspiegels
2. Veränderung von Häufigkeit und Intensität von Sturmfluten
3. Veränderung der Anteile der verschiedenen Großwetterlagen in Westeuropa
4. Verlagerung der Hauptniederschlagsperioden im Jahresgang
5. Veränderung der maximalen Schneehöhen in den einzelnen Flusseinzugsgebieten
6. Veränderung der Zeiten und Intensitäten der Schneeschmelze in den einzelnen Flusseinzugsgebieten
7. Veränderungen der voraussichtlich abflussrelevanten Niederschlagsmengen in den einzelnen Flusseinzugsgebieten und deren Teile
8. Veränderung von Häufigkeiten, Intensitäten und Abflussrelevanz von Starkniederschlagsereignissen und extremen Wetterlagen (z. B. V_b-Ereignisse)

Aufgrund dieser Erkenntnisse fordert die Deutsche Anpassungsstrategie der Bundesregierung an den Klimawandel eine Überprüfung und ggf. Anpassung der bisherigen Sicherheitsanforderungen und des Sicherheitsmanagements.

Beschaffenheit und Betrieb der Anlagen in Betriebsbereichen müssen dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen, was damit auch für die erforderlichen Vorkehrungen und Maßnahmen gegenüber umgebungsbedingten Gefahrenquellen gilt. Von daher ergibt sich für die Betreiber von Anlagen im Geltungsbereich der StörfallV eine besondere Verantwortung zur Gewährleistung der Anlagensicherheit gegenüber Gefahrenquellen, wie Hochwasser und Starkniederschlägen.

Betreiber von Betriebsbereichen der oberen Klasse haben nach § 9 StörfallV ihren Sicherheitsbericht sowie ihr Konzept zur Verhinderung von Störfällen und ihr Sicherheitsmanagement zu jedem Zeitpunkt fortzuschreiben, wenn neue Umstände dies erfordern oder um aktuelle Erkenntnisse zur Beurteilung der Gefahren zu berücksichtigen. Dies schließt Erkenntnisse zu umgebungsbedingten Gefahrenquellen und den Einfluss des Klimawandels auf diese ein.

Wichtige Schritte zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels erfolgten mit der Ausweisung von Überschwemmungs- und Risikogebieten (§ 74 WHG). Hierzu wurden in den vergangenen Jahren Gefahrenkarten von den Ländern erarbeitet, die im Internet abgerufen werden können. Die Gefahrenkarten sind im Rahmen der allgemeinen Betreiberpflichten bei der Ermittlung der Gefährdungen zu beachten, was durch einen Bezug zu den §§ 73 und 74 WHG in der der TRAS 310 herausgestellt wird.

Weitere Ergänzungen zum Hochwasserschutz wurden durch die §§ 78 bis 78c WHG eingeführt, auf die in der Vorbemerkung der TRAS 310 schon kurz eingegangen wurde. Seit Einführung des § 78b WHG im Jahr 2017 werden auch Anforderungen an bauliche Anlagen in Risikogebieten gestellt, 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). Für diese Gebiete wird eine hochwasserangepasste Bauweise für neu errichtete oder wesentlich erweiterte bauliche Anlagen außerhalb von Baugebieten verlangt. Damit wird auch der Bauherr eindeutig mit in die Verantwortung zum Hochwasserschutz genommen und kann sich nicht auf die Verantwortung der Behörden zurückziehen (vgl. § 5 Abs. 2 WHG).

Konkrete Anforderungen werden in § 78c Abs. 3 WHG an Heizölverbraucheranlagen gestellt, sofern sie seit dem 5. Januar 2018 in Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten vorhanden sind. Sie müssen bis zum 5. Januar 2033 nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik hochwassersicher nachgerüstet werden, soweit dies wirtschaftlich vertretbar ist.

Vor dem Hintergrund der Ereignisse an Ahr und Erft im Juli 2021 wird in der TRAS 310 auf das Gefahrenpotential von Starkniederschlagsereignissen verstärkt hingewiesen. Die Klimaprojektionen zeigen, dass Starkniederschlagsereignisse bezüglich ihrer Intensität und Häufigkeit zunehmen werden. Eine regionale Eingrenzung ist nicht möglich, weil Starkniederschlagsereignisse überall in Deutschland auftreten können, das heißt auch außerhalb von ausgewiesenen Risikogebieten. Aufgrund des steigenden Gefahrenpotentials werden von den Städten und Landkreisen zunehmend Starkregen- und Sturzflutgefahrenkarten erstellt, auf die Anlagenbetreiber im Rahmen ihrer Pflicht zur Informationsbeschaffung zurückzugreifen haben, um eine Risikoanalyse für ihren Betriebsbereich durchzuführen. Die Pflicht zur Informationsbeschaffung gilt auch, wenn keine Starkregen- oder Sturzflutgefahrenkarten zur Verfügung stehen. In diesem Fall sind Niederschlags-/ Abflussberechnungen für den Betriebsbereich zu erstellen. Sofern die erforderlichen Daten über Geländeprofile und Niederschlagshöhen zur Verfügung stehen, können rechnergestützte Simulationsmodelle eingesetzt werden.

In Kapitel 1 der TRAS 310 wird schon auf die Berücksichtigung eines Klimaanpassungsfaktors von 1,2 bzw. eines Faktors, der vom jeweiligen Land festgelegt wird, verwiesen. Dieser ist bis zum Jahr 2050 für die Auslegung von Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen durch Hochwasser und Starkniederschlagsereignisse sowie für Maßnahmen zur Begrenzung der

Störfallauswirkungen anzusetzen, um die Folgen des Klimawandels von 2010 bis 2050 abzubilden. Dies gilt jedoch nur, wenn in den (Hochwasser-)Gefahrenkarten und Risikokarten sowie den Starkregen- und Sturzflutgefahrenkarten von den zuständigen Behörden keine Anpassung an den zukünftigen Klimawandel berücksichtigt wurde.

Ergänzend zur TRAS 310 wird in diesem Zusammenhang ausdrücklich darauf hingewiesen, dass im 6. Assessment Report (AR) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) festgestellt wird, dass sich der Klimawandel beschleunigt hat (IPCC, 2021). 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 (vgl. Anhang 1).

Es wird daher empfohlen, den in der TRAS 310 eingeführten Klimaanpassungsfaktor oder den länderspezifischen Faktor sehr viel früher zu berücksichtigen, als dies in der TRAS 310 gefordert wird. Ergänzend wird in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass nach § 78c Heizölverbraucheranlagen, sofern sie seit dem 5. Januar 2018 in Risikogebieten außerhalb von Überschwemmungsgebieten vorhanden sind, bis zum 5. Januar 2033 nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik hochwassersicher nachgerüstet werden müssen, soweit dies wirtschaftlich vertretbar ist (§ 78c Abs. 3 WHG).

2.2 Zu Kapitel 3 Anwendungsbereich

Die TRAS 310 gilt für Betriebsbereiche mit gefährlichen Stoffen im Anwendungsbereich der StörfallV. Ihre Anwendung wird aber auch für andere immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen empfohlen, bei denen die Gefahr der Freisetzung von gefährlichen Stoffen besteht.

Die TRAS richtet sich an die Betreiber und kann von Behörden und Sachverständigen im Rahmen von Genehmigungsverfahren, Überwachung und Inspektionen herangezogen werden. Im Rahmen der Festlegung des Anwendungsbereichs gibt die TRAS auch eine Auflistung der zu betrachtenden Gefahrenquellen.

2.3 Zu Kapitel 4: Begriffsbestimmungen

In der TRAS 310 werden folgende Begriffe erläutert, die für das Verständnis der Zusammenhänge von Bedeutung sind:

1. Überflutung (einschließlich Überschwemmung)
2. Gefahrenquelle
3. Umgebungsbedingte Gefahrenquellen
4. Gefahrenquellenanalyse
5. Analyse der Gefahren und Gefährdungen
6. Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs bei Überflutungen
7. Schutzkonzept
8. Schutzziele
9. Störfalleintrittsvoraussetzung
10. Sturzflut

Einige Begriffe erscheinen im allgemeinen Sprachgebrauch zunächst synonym, wie z.B. Überschwemmung und Überflutung. Tatsächlich sind sie jedoch in unterschiedlichen Bereichen eingeführt worden und somit unterschiedlich belegt, so dass für diese TRAS 310 eine Begriffsklärung erforderlich ist.

Der Begriff „umgebungsbedingte Gefahrenquellen“ wird in der StörfallV eingeführt. Als Beispiele werden Erdbeben und Hochwasser genannt. In der Vollzugshilfe des BMU wird der Begriff umfassender definiert. Hier werden darüber hinaus noch Ereignisse genannt, die von benachbarten Anlagen verursacht werden oder von Verkehrsanlagen ausgehen können. Die im Rahmen der TRAS 310 betrachteten naturbedingten Gefahrenquellen werden ausschließlich durch Niederschläge unmittelbar oder mittelbar (Hochwasser/sonstige Überflutungen) verursacht.

Analog zu dem für betriebliche Gefahrenquellen einschlägigen Begriff „Sicherheitskonzept“ und dem für Eingriffe Unbefugter einschlägigen Begriff „Sicherungskonzept“ wird in Zusammenhang mit umgebungsbedingten Gefahrenquellen der Begriff „Schutzkonzept“ verwandt. Dies soll eine gemeinsame Berücksichtigung der Arten von Gefahrenquellen innerhalb des Sicherheitskonzepts nicht ausschließen.

Eine ganze Reihe weiterer Begriffe werden in der vorgelegten TRAS zwar genutzt, jedoch nicht in die Definitionen der TRAS aufgenommen. Folgende Begriffe werden im **Anhang 2** erläutert:

1. Abflussbeiwert
2. Bemessungshochwasser
3. Bemessungsregen
4. Bestimmungsgemäßer Betrieb
5. Dauerniederschlag
6. Einstau
7. Eintrittswahrscheinlichkeit / Jährlichkeit
8. Ernste Gefahr
9. Hochwasser
10. Hochwassergefahrenkarten
11. Hochwasserrisikogebiete
12. Hochwasserrisikomanagementpläne
13. KOSTRA-DWD
14. Regenabfluss
15. Rückstauenebene
16. Rückstaulinie
17. Starkniederschlag
18. Sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA)
19. Sicherheitsrelevante Teile des Betriebsbereiches (SRB)
20. Stand der Sicherheitstechnik
21. Störfall
22. Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs
23. Sturzflutereignis
24. Überlastung
25. Überschwemmungsgebiete

- 26. Überstau
- 27. Vorfluter
- 28. Wellenauflauf

2.4 Zu Kapitel 5: Systematisierung und Aufbau der TRAS

Die Erfüllung der Betreiberpflichten im Sinne der StörfallV hinsichtlich der umgebungsbedingten Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser kann mit einer methodischen Vorgehensweise erreicht werden, die als Grafik in der TRAS 310 (Abbildung 1) illustriert wird. Kernstücke der vorgestellten Methodik sind die vereinfachte und detaillierte Gefahrenquellenanalyse. Alle anderen Teilschritte sind eingeführte Vorgehensweisen und schon in den verschiedenen Publikationen beschrieben (SFK, 1995; Arbeitskreis des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, 2002; SFK, 2004). Sie wurden für die zu betrachtenden umgebungsbedingten Gefahrenquellen Hochwasser und Niederschläge nur inhaltlich angepasst.

Auf den ersten Blick erscheint zweifelhaft, dass die Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“ ausgelöst durch äußere Gefahrenquellen tatsächlich zu einem Sicherheitsgewinn führen wird. Es ist jedoch zu bedenken,

- a) dass die Ausbreitung von gefährlichen Stoffen im Falle von Hochwasser / Überflutungen auch auf dem Wasserpfad erfolgen kann, während in den Sicherheitsberichten meist nur die Ausbreitung über den Luftweg betrachtet wird,
- b) dass Überflutungen auf mehr als nur einen Anlagenteil oder eine Anlage wirken können und es dadurch zur Freisetzung von mehr als der Menge an gefährlichen Stoffen aus einem sicherheitsrelevanten Anlagenteil kommen kann.

Daher ist die Betrachtung der „Dennoch-Störfälle“ in der systematischen Vorgehensweise ebenfalls von Bedeutung.

Um das Verständnis der Vielzahl niederschlagsbedingter Ereignisse zu erleichtern wird unterschieden zwischen:

1. auslösenden Ereignissen, wie Starkniederschläge, wozu auch Hagel- und Eisschlag sowie Schnee zu zählen sind. Letztere werden in der TRAS 310 jedoch nicht weiter betrachtet.
2. möglichen Folgeereignissen, wie z.B. Überflutungen und Anstieg des Grundwassers. Auch Erdbeben, Steinschlag und Einsturz von Anlagen oder Gebäuden infolge zu hoher Schneelasten stellen Folgeereignisse dar, die jedoch ebenfalls in der TRAS 310 nicht näher betrachtet werden.

Die auslösenden Ereignisse können von Menschen nicht beeinflusst werden. Eingriffsmöglichkeiten bestehen jedoch bei den Folgeereignissen. Durch geeignete Maßnahmen können diese verhindert oder in ihrer Wirkung vermindert werden.

2.4.1 Zu Kapitel 5.1 Teil A: Gefahrenquelle Überflutung

Eine Überflutung ist dann zu erwarten, wenn an einem bestimmten Ort die lokalen Zuflüsse höher sind als die Abflüsse. Hieraus folgt, dass die Beschreibung der möglichen Gefährdung durch Überflutung entlang der potentiellen Zu- und Abflusswege durchgeführt werden sollte. Der Betrachtungsraum beschränkt sich in der Regel auf die Anlage mit ihrer näheren Umgebung.

Die begriffliche Unterscheidung von Überflutung und Überschwemmung ist in der TRAS 310 in Kapitel 4.1 erläutert.

Überschwemmung durch Hochwasser

Diese Art der Gefährdung entsteht, wenn Flüsse über ihre Ufer treten und z.B. Deiche überspült werden. Welche Gebiete überschwemmt werden können, ist in Abhängigkeit von der Intensität des Hochwassers (ausgedrückt als Jährlichkeit) in den amtlichen Gefahrenkarten verzeichnet. Hierbei handelt sich allgemein um Überschwemmungsgebiete, die in der Regel vor einem Deich liegen, und um Risikogebiete, die durch Deichüberspülung oder Deichbruch potentiell gefährdet sind (vgl. § 78b WHG). Das flächenmäßige Ausmaß der möglichen Überschwemmungen sowie die sich hieraus ergebenden Wassertiefen können den Gefahrenkarten entnommen werden.

Im Sinne der Deutschen Anpassungsstrategie sind mögliche zukünftige Ereignisse zu berücksichtigen, deren Häufigkeit und Intensität durch den Klimawandel beeinflusst werden. Daher werden für die Bemessung von Flussdeichen in einigen Bundesländern Klimaänderungsfaktoren berücksichtigt. Konkret bedeutet dies für die bauliche Umsetzung, dass Flussdeiche breiter gebaut werden, um damit die statischen Voraussetzungen für eine spätere Erhöhung der Deichkrone zu schaffen. Dieses Vorgehen erfolgt u.a. vor dem Hintergrund der Haushaltslage der Länder.

Wegen des Meeresspiegelanstiegs in Kombination mit Sturmfluten planen die Küstenländer in Deutschland langfristig eine Erhöhung der Deiche. Im Zuge der künftigen Küstenschutzstrategie soll der derzeitige Sicherheitsaufschlag von 50 Zentimetern auf einen Meter erhöht werden.

Unabhängig von den Aufgaben der zuständigen Wasserbehörden sind für die Betreiber von Betriebsbereichen, die der StörfallV unterliegen, in § 3 der StörfallV die allgemeinen Pflichten geregelt. Danach muss der Anlagenbetreiber nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren erforderliche Vorkehrungen treffen, um Störfälle zu verhindern. Dies gilt insbesondere auch für die Gefahrenquelle Hochwasser/Überflutung.

Überflutungen durch Starkniederschlag und Sturzfluten

Starkniederschlag und Sturzfluten sind kleinräumige Ereignisse, die große Schäden anrichten können, wie u.a. das Ereignis an Ahr und Erft im Juli 2021 gezeigt hat. Nach den Erfahrungen von Experten entsteht das höchste durch Starkniederschlag ausgelöste Gefahrenpotential bis maximal 6 Stunden. Die Abflussmengen kleiner Bäche steigen in dieser Zeit deutlich an. Sie können durch Starkniederschlag je nach Orographie zu reißenden Gewässern (Sturzfluten) mit hohem Gefahrenpotential werden. Die Einzugsgebiete liegen meist < 10 km² in seltenen Einzelfällen bis 20 km².

Längere Niederschlagsandauern (ab ca. 6 Stunden) werden als Dauerniederschläge bezeichnet, deren Niederschlagshöhen pro Stunde in der Regel geringer sind als diejenigen der Starkniederschlagsereignisse. Deshalb verursachen sie meist geringere Abflüsse in kleineren Bächen. Aufgrund der größeren Einzugsgebiete (ab ca. 20 km²) können sie jedoch Hochwasser an größeren Fließgewässern auslösen.

Im Gegensatz zu Flüssen sind für kleine Bäche meist keine Aufzeichnungen über Pegelstände verfügbar, sodass deren Hochwasserstände nicht in Jährlichkeiten angegeben werden können.

Im Gegensatz zu Flüssen, deren Pegelstände schon über mehrere Jahrzehnte gemessen werden, konnten für diese kleinen Gewässer folglich auch meist keine Gefahrenkarten erarbeitet werden.

Zahlreiche Städte und Landkreise haben für ihr Gebiet Starkregen Gefahrenkarten erarbeitet, an denen sich Anlagenbetreiber orientieren können. In Baden-Württemberg wird für ein extremes Niederschlagsereignis eine Niederschlagshöhe 128 mm/m² als Grundlage für die Erstellung einer solchen Gefahrenkarte herangezogen (LUBW, 2016). In Nordrhein-Westfalen werden 90 mm/m² empfohlen (MULNV NRW, 2018). Liegen derartige Gefahrenkarten nicht vor, bleibt dem Anlagenbetreiber nur die Durchführung einer Niederschlags-/Abflussberechnung für seine Umgebung, um die Gefährdung seines Betriebsbereichs durch Starkniederschlag und Sturzflut einschätzen zu können. Die Gefahrenquelle Überflutung durch Starkniederschläge ist daher vom Betreiber i.d.R. selbstständig zu analysieren. Welche Niederschlagshöhen hierfür anzusetzen sind, wird in **Kapitel 2.6.1** näher dargestellt.

Bei Starkniederschlagsereignissen kann mit Blick auf die Vorgaben zur Kanalnetz bemessung nahezu flächendeckend davon ausgegangen werden, dass bei einem Regenereignis, das statistisch nur alle 200 Jahre einmal auftritt, der Kanal kein Wasser mehr aufnimmt, sondern je nach Höhenlage des Betriebsbereichs sogar mit einem Zulauf von Wasser aus dem Kanalsystem zu rechnen ist. Kanalsysteme sind für Starkniederschlag je nach topografischen Gegebenheiten nicht als Sicherheitsvorkehrung, sondern eher als Gefährdung zu betrachten.

2.4.2 Zu Kapitel 5.1 Teil B: Gefahrenquelle Grundwasseranstieg

Der Anstieg des Grundwassers ist eine schleichende nicht sichtbare Folge von langanhaltenden Niederschlägen. Andererseits kann der Grundwasserspiegel bei längeren Trockenperioden auch stark absinken, was in den letzten Jahren in trockenen Sommermonaten deutlich zu beobachten war. Es ist zu erwarten, dass infolge des Klimawandels beide Ereignisse in Zukunft verstärkt auftreten. Auch der Anstieg des Meeresspiegels wird dazu beitragen, dass das Grundwasser in ausgedehnten Küstenregionen ansteigen wird. Auch Vertiefungen von Fahrrinnen für die Schifffahrt führen zu einem Grundwasseranstieg. Eine weitere mögliche Ursache des Grundwasseranstiegs sind abnehmende Entnahmen zur Wassergewinnung. Grundwasseranstieg kann durch die damit verbundene Auftriebskraft zu einer Gefährdung unterirdischer Tanks oder Rohrleitungen, in denen gefährliche Stoffe vorhanden sind, führen.

2.5 Zu Kapitel 6 Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse

Die vereinfachte Gefahrenquellenanalyse hat die Aufgabe, diejenigen Gefahrenquellen zu bestimmen, die auf einen Betrieb bzw. Betriebsbereich einwirken können.

Zunächst sind die Gefahrenquellen zu ermitteln, die dem Bereich des „exzeptionellen Störfalles“ zuzuordnen sind. Gefahrenquellen, die außerhalb des wissenschaftlichen Erkenntnisvermögens und jeglicher Berechenbarkeit liegen, können vorab ausgeschlossen werden (vgl. „keine weitere Betrachtung“ in der Abbildung 1 der TRAS 310). Zum Beispiel muss eine Sturmflut nicht betrachtet werden, wenn die geografischen Voraussetzungen (Binnenlage) nicht gegeben sind.

Danach ist zu prüfen, welche Gefahrenquellen vernünftigerweise ausgeschlossen werden können, so dass keine Vorkehrungen und Maßnahmen nach § 3 Abs. 1 und 4 zur Verhinderung von Störfällen erforderlich werden. Die dabei vernünftigerweise ausgeschlossenen Gefahrenquellen sind jedoch später im Rahmen der Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“

wieder zu berücksichtigen (vgl. Abzweig nach „Identifizierung gefährdeter sicherheitsrelevanter Anlagenteile in Abbildung 1 der TRAS 310).

Die Vollzugshilfe zur StörfallV des damaligen BMU (heute BMUV) geht in Kapitel 3 davon aus, dass bei der Auswahl möglicher Gefahrenquellen vorzugsweise im Sinne einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung zwischen vernünftigerweise auszuschließenden und vernünftigerweise nicht auszuschließenden Gefahrenquellen zu unterscheiden ist. Für die betrachteten umgebungsbedingten Gefahrenquellen werden in Tabelle 1 der TRAS 310 zunächst einfache Kriterien vorgestellt, auf deren Basis Ausschlüsse geprüft werden können. Dies ist möglich für folgende Gefahrenquellen:

1. Fluss- oder Küstenhochwasser in Verbindung mit Strömung, Treibgut und Eisgang
2. Grundwasseranstieg

Liegt ein Betrieb z.B. außerhalb der amtlichen Gefahrenkarten für Fluss- oder Küstenhochwasser, kann diese Gefahrenquelle in der Regel vernünftigerweise ausgeschlossen werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, auf welche Eintrittswahrscheinlichkeiten diese Karten abstellen, ob sie die aktuellen Abflussverhältnisse wiedergeben und ob sie bereits mögliche Änderungen durch den Klimawandel berücksichtigen.

Der Anstieg von Grundwasser ist nur dann zu betrachten, wenn Rohre, Tanks oder Behälter mit gefährlichen Stoffen im Erdreich verlegt sind.

Anders ist jedoch die Gefahrenquelle Überflutung ausgelöst durch Starkniederschläge oder Sturzfluten zu bewerten. Wie schon betont wurde, können Starkniederschläge grundsätzlich überall in Deutschland auftreten. Eine einfache Gefahrenquellenanalyse ist dann möglich, wenn Gefahrenkarten für Starkniederschläge und Sturzfluten vorliegen, die mittlerweile von zahlreichen Städten und Landkreisen zur Verfügung gestellt werden. Wenn diese jedoch nicht oder noch nicht erarbeitet wurden, ist eine deterministische Entscheidung bzgl. eines Ausschlusses von der weiteren Betrachtung meist nicht möglich. Daher ist für diesen Fall eine probabilistische Betrachtung durchzuführen. Hierzu gibt die TRAS 310 zahlreiche Hinweise, welche Informationen dazu beitragen können, die Wahrscheinlichkeit einer Überflutung durch Niederschläge abschätzen zu können. Die Betrachtung erfolgt am sinnvollsten, wie zuvor schon betont wurde, entlang der potentiellen Zu- und Abflusswege von Oberflächenwasser ausgelöst durch Starkniederschläge. Eine höhere Wahrscheinlichkeit für den Eintritt einer Überflutung durch Niederschläge liegt vor allem dann vor, wenn z.B. der Betrieb oder Teile davon in einer Mulde oder Senke liegen.

2.6 Zu Kapitel 7 Detaillierte Gefahrenquellenanalyse

Die detaillierte Gefahrenquellenanalyse dient einer eingehenderen Untersuchung von möglichen Intensitäten von Gefahrenquellen. Die Ergebnisse sollen dazu dienen

- a) im nachfolgenden Schritt prüfen zu können, ob eine Gefährdung sicherheitsrelevanter Anlagenteile vernünftigerweise ausgeschlossen werden kann,
- b) Gefährdungen durch die Gefahrenquellen für die nachfolgende Untersuchung von „Dennoch-Störfällen“ zu beschreiben (Szenarienbildung).

2.6.1 Zu Kapitel 7.1 Teil A: Überflutung

Bzgl. der Gefahrenquelle Überflutung ist die Gefährdung eines Betriebs oder Anlage durch Ermittlung folgender Angaben zu quantifizieren:

1. potentiellen Zuflusswege mit Strömungsrichtung
2. mögliche Wasserstandshöhen
3. Strömungsgeschwindigkeit
4. Gefährdung durch Treibgut oder Eisgang

Für jeden dieser vier Punkte werden detaillierte Empfehlungen zur Vorgehensweise und zur Bewertung der Gefahrenquelle unterbreitet. Die Informationsbeschaffung in dieser Phase ist umfangreicher, weil neben qualitativen auch zunehmend quantitative Informationen einbezogen werden. Die wichtigsten Hilfsmittel zur Durchführung der detaillierten Gefahrenquellenanalyse sind Gefahrenkarten, denen bestimmte Intensitäten für die auslösenden Ereignisse zugrunde gelegt werden.

Überschwemmungen durch Hochwasser

Im Fall von Flusshochwasser liegen z.B. Gefahrenkarten für ein 100-jährliches Ereignis flächendeckend für ganz Deutschland vor. Bei Gewässern zweiter oder dritter Ordnung ist zu prüfen, ob das jeweilige Gewässer bereits bearbeitet und in den Gefahrenkarten berücksichtigt wurde.

Für Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit oder bei Extremereignissen ist nach § 74 WHG von einer Jährlichkeit von mindestens 200 Jahren auszugehen. Allerdings wird diese Vorgabe in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich umgesetzt. So gibt es z.B. Gefahrenkarten für ein 200-jährliches Hochwasser oder auch für ein 500-jährliches Hochwasser.

Für die Gefahrenquellenanalyse für Flusshochwasser ist mindestens von einem 100-jährlichen Ereignis auszugehen. Sollten die öffentlichen Hochwasserschutzanlagen für höhere Jährlichkeiten bemessen sein, sind diese entsprechend für die Gefahrenquellenanalyse anzusetzen. Hierdurch soll verhindert werden, dass „Deichlücken“ entstehen und bei Hochwasser das Wasser durch den Betriebsbereich in das Hinterland strömt. Damit wird zugleich auch die Voraussetzung zur Abstimmung der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung des Betreibers mit der öffentlichen Notfallplanung geschaffen.

Für Extremereignisse (wie in § 74 Abs. 2 WHG genannt), die im Rahmen der Untersuchung von „Dennoch-Störfällen zu berücksichtigen sind, sind geringere Wahrscheinlichkeiten (höhere Jährlichkeiten) anzusetzen. In Gefahren- und Risikokarten wird von den Behörden hinsichtlich Extremereignissen auf z.B. 500-jährliche Ereignisse abgestellt.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Jährlichkeiten von Hochwasserereignissen mit Hilfe statistischer Auswertungsmethoden vergangener Ereignisse berechnet werden. Es handelt sich somit um „geglättete“ Werte einer Zeitreihe, die im Fall von Hochwasser viele Jahrzehnte umfasst. Verschiedene Einzelereignisse können deshalb eine höhere Intensität haben als die statistisch ermittelten Intensitäten. Die statistischen Daten bilden die Grundlage für die Erstellung der Hochwassergefahrenkarten. Sie berücksichtigen allenfalls den bis heute eingetretenen Klimawandel, meist jedoch nicht den zukünftigen Klimawandel. Deshalb ist bis zum Jahr 2050 ein Klimaanpassungsfaktor von 1,2 oder ein länderspezifischer Faktor zu

berücksichtigen, sofern die zuständigen Behörden in den Gefahrenkarten die Auswirkungen des zukünftigen Klimawandels (noch) nicht eingearbeitet haben (vgl. Anhang I der TRAS 310).

Überflutung durch Starkniederschläge

Die Erstellung von Gefahrenkarten für Starkniederschläge und Sturzfluten basiert in der Regel nicht auf der statistischen Auswertung langjähriger Datenreihen, sondern auf der Vorgabe von Niederschlagshöhe und Dauer des anzusetzenden Niederschlagsereignisses. Dies ist deshalb erforderlich, weil die kleinräumigen Starkniederschlagsereignisse im Vergleich zu ihrem tatsächlichen Auftreten messtechnisch sehr viel seltener erfasst werden. Die Messstationen des DWD stehen meist 15 bis 20 km auseinander. Auch Radarmessungen können dieses Defizit derzeit noch nicht beheben, weil die derzeit zur Verfügung stehenden Datenreihen noch nicht für eine statistische Auswertung ausreichen.

Wie unter Kapitel 2.4.1 schon erwähnt wurde, haben die Länder Baden-Württemberg und Bayern konkrete Niederschlagshöhen zur Erstellung von Gefahrenkarten für ein extremes Niederschlagsereignis vorgeschlagen. Darüber hinaus wurde die Niederschlagsdauer auf 1 Stunde festgelegt, weil in dieser Zeit das höchste Risikopotential für die Entstehung von Sturzfluten auftritt.

Schwieriger wird die Durchführung der detaillierten Gefahrenquellenanalyse immer dann, wenn keine Starkregengefahrenkarten vorliegen. Dies gilt vor allem für Bäche und kleine Flussläufe, obwohl gerade diese bei Starkniederschlagsereignissen je nach Gefälle eine starke Zerstörungskraft entwickeln können. Darüber hinaus können Abflusswege entstehen, die im Normalfall gar keine Regenwasserabläufe sind.

Wenn keine Starkniederschlagsgefahrenkarten vorliegen, ist es gemäß der TRAS 310 Pflicht, Niederschlags-/Abflussberechnung durchzuführen, um die notwendigen Informationen für die Gefahrenquellenanalyse zu erhalten. Der Einsatz von Simulationsmodellen setzt allerdings voraus, dass die Topographie des betreffenden Gebietes als digitaler Datensatz verfügbar ist. Niederschlag-/Abflussmodelle dienen zur quantitativen Erfassung einzelner Abflussprozesse in einem geografisch abgegrenzten Gebiet. Ausgehend vom Niederschlag über die Abflussbildung auf natürlichen oder versiegelten Oberflächen bis hin zum Abfluss in ein größeres Gewässer werden verschiedenste Teilprozesse betrachtet, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der Abflussprozesse zu erzielen. In **Anhang 6** wird das Ergebnis einer Niederschlags-/Abflussberechnung am Beispiel eines Betriebes vorgestellt.

Ausgangspunkt für eine solche Simulation ist u.a. die Festlegung eines Modellregens mit einer bestimmten Niederschlagshöhe. Im Gegensatz zu den Empfehlungen der Länder Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen wird in der TRAS 310 keine einheitliche Niederschlagshöhe empfohlen, sondern es soll für die Durchführung einer detaillierten Gefahrenquellenanalyse von einem regionalisierten 200-jährlichen Ereignis für Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen gemäß §3 Absatz 1 StörfallV ausgegangen werden. Für Maßnahmen zur Verminderung der Störfallauswirkungen (§ 3 Absatz 3 StörfallV) und für die Gefahrenabwehr (§ 10 StörfallV) ist ein 500-jährliches Starkniederschlagsereignis zugrunde zu legen. Die zu betrachtende Niederschlagsdauer soll eine sowie drei Stunden betragen.

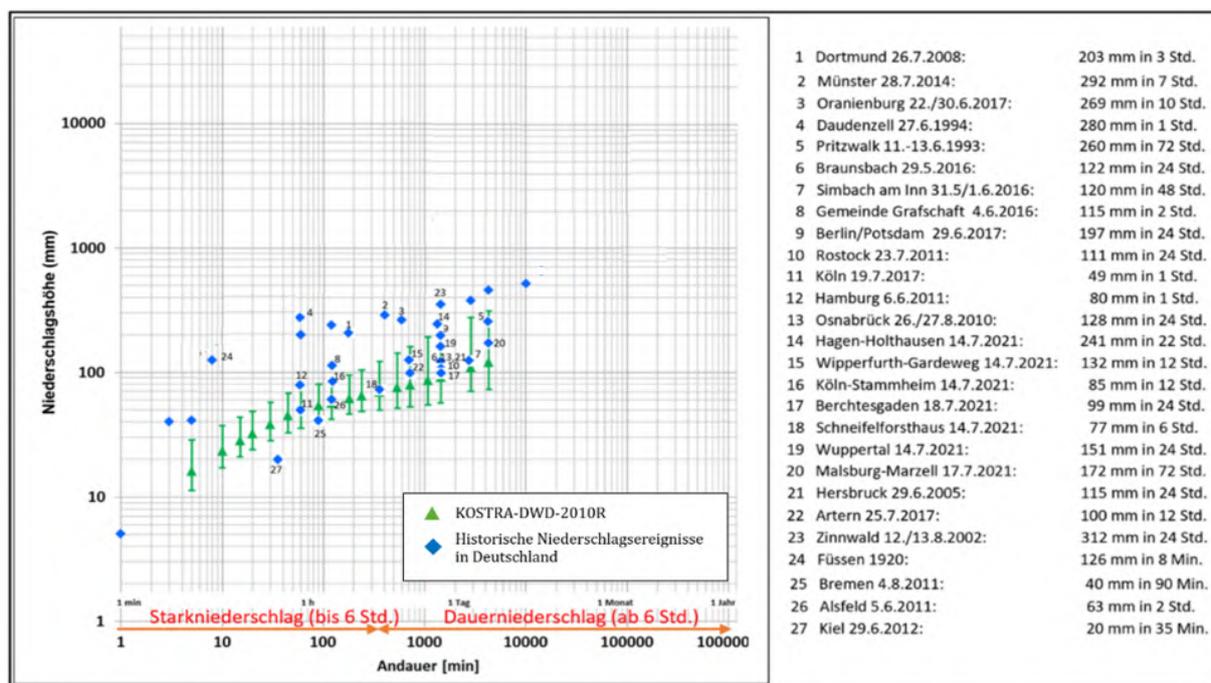
Um für den betreffenden Standort die zugehörige Niederschlagshöhe in Abhängigkeit von der Jährlichkeit und Dauer des Ereignisses zu ermitteln, wird üblicherweise auf die regionalisierten

Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zurückgegriffen, die im KOSTRA-DWD-Atlas für Deutschland zusammengestellt sind. Die KOSTRA-Daten beinhalten aus den zuvor genannten Gründen jedoch nur Niederschlagshöhen bis zu einer Jährlichkeit von 100 Jahren. Deshalb muss auf die sogenannten **Praxisrelevanten Extremwerte des Niederschlags (PEN)** zurückgegriffen werden. Hierbei handelt es sich Niederschlagshöhen, die durch Extrapolation aus den KOSTRA-Daten ermittelt werden. Weil die PEN-Werte auf den KOSTRA-Daten basieren, ist mit diesen Extremwerten ebenfalls eine regionalisierte Betrachtung möglich. Die Berechnungsmethode zur Ermittlung der PEN-Werte aus den KOSTRA-Daten ist in **Anhang 3** dargestellt.

Es wird darauf hingewiesen, dass die KOSTRA-DWD-Daten und somit die PEN-Werte von Zeit zu Zeit überprüft und aktualisiert werden. Daher sind die Daten in der jeweils gültigen Fassung zu verwenden.

Kritisch anzumerken ist jedoch, dass die KOSTRA-Daten mit statistischen Methoden aufbereitet wurden und somit nicht den Einzelereignissen mit ihren tatsächlich eingetretenen Starkniederschlagshöhen entsprechen. Beispielsweise lagen die Starkniederschlagshöhen in der Region Erft und Ahr (DWD, 2021) sowie die von zahlreichen weiteren historischen Starkniederschlagsereignissen z.T. deutlich über den statistisch ausgewerteten KOSTRA-Werten für 100-jährliche Niederschlagsereignisse, wie die **Abbildung 1** verdeutlicht.

Abbildung 1: Gegenüberstellung der beobachtete Niederschlagshöhen in Deutschland mit den 100-jährlichen Niederschlagshöhen nach KOSTRA-DWD-2010R



Quelle: Köpke (2022) in Anlehnung an KLIWA (2019)

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 Anforderungen zur Verhinderung von Störfällen sowie für die Maßnahmen zur Störfallauswirkungsbegrenzung sind jedoch die Intensitäten der Einzelereignisse (vgl. Tabelle in Abbildung 1) von besonderer Bedeutung. Daher sind darüber hinaus als blaue Rauten die höchsten jemals beobachteten Niederschlagshöhen in Deutschland in die Abbildung 1 eingetragen. Niederschlagsereignisse werden entsprechend der Definition des DWD in Starkniederschläge (<6 Stunden) und Dauerniederschläge (>6 Stunden) eingeteilt (Pfeile in Abbildung 1).

Aus dieser Gegenüberstellung wird erkennbar, dass die als Ergebnis statistischer Analysen errechneten Niederschlagshöhen (grüne Dreiecke) nicht mit den gemessenen bzw. registrierten Niederschlagshöhen (blaue Rauten) 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 bildeten, liegen deutlich unter den gemessenen maximalen Starkniederschlägen.

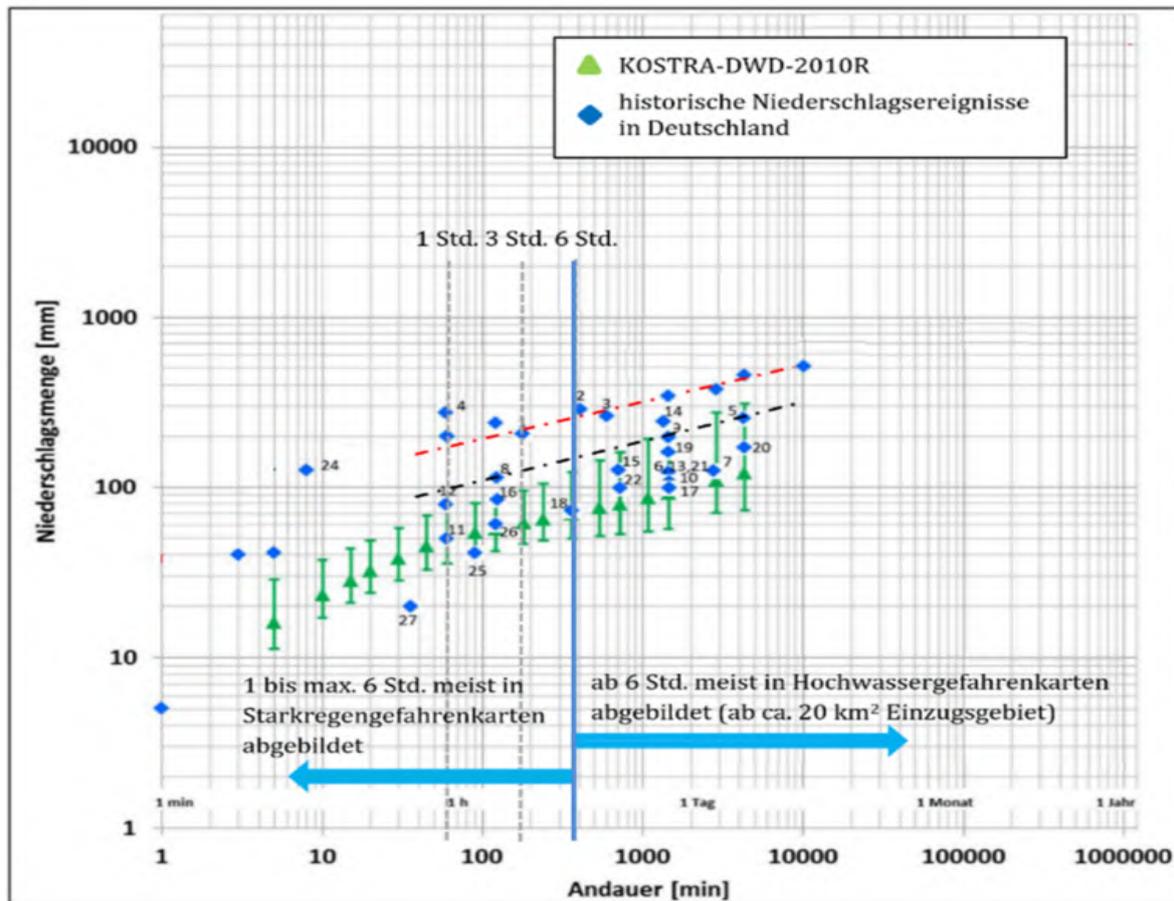
Sofern sich im Einzelfall auch die PEN-Werte für ein 200 bzw. 500-jährliches Starkniederschlagsereignis nicht deutlich an die tatsächlichen Niederschlagshöhen annähern, wird für die Gefahrenquellenanalyse empfohlen, folgende Niederschlagshöhen für die Niederschlags-/ Abflussberechnungen anzusetzen:

Tabelle 1: Vorschlag von Niederschlagshöhen aus real gemessenen Starkniederschlagsereignissen

		Dauer- stufe	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
Rote Linie	Inputdaten zur Festlegung von Maßnahmen zur Störfallauswirkungsbegrenzung	1 h	200	240
		3 h	220	264

Diese Empfehlungen ergeben sich aus den Schnittpunkten der schwarz und rot gestrichelten Linien mit den Andauern für eine und drei Stunden in **Abbildung 2** (Köppke, 2022).

Abbildung 2: Ableitung von Niederschlagshöhen aus real gemessenen Starkniederschlagsereignissen für die Gefahrenquellenanalyse



Quelle: Köppke (2022)

Für die Gefahrenquellenanalyse zur Verhinderung von Störfällen gemäß § 3 Absatz 3 StörfallV entsprechen die vorgeschlagenen Niederschlagshöhen in Tabelle 1 mit und ohne Klimaanpassungsfaktor näherungsweise den Vorgaben von Baden-Württemberg (128 mm) und Nordrhein-Westfalen (90 mm) für eine Andauer von jeweils 1 Stunde. Sie sind im Gegensatz zu den regionalisierten KOSTRA- und PEN-Werten pauschale und räumlich unabhängige Niederschlagshöhen, die im Sinne von Mindestniederschlagshöhen vom Betreiber einer Anlage angesetzt werden sollten. Weil die Niederschlags-/Abflussmodellierung meist rechnergestützt durchgeführt werden, ist der Mehraufwand für die vorgeschlagenen Niederschlagshöhen gegenüber den Berechnungen mit dem PEN-Wert für eine Jährlichkeit von 200 bzw. 500 Jahren gering. Der Informationsmehrwert kann dagegen entscheidend sein.

Es muss darüber hinaus betont werden, dass die PEN-Werte kritisch zu bewerten sind, weil sie eine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen. Daher empfiehlt es sich analog zur flächendeckenden Festlegung der PEN-Werte entweder eine um 20 bis 30 mm höhere Niederschlagshöhe anzusetzen (Verworn und Kummer, 2003) als errechnet oder gleich die Starkniederschlagshöhen der Tabelle 1 für die detaillierte Gefahrenquellenanalyse zu nutzen. Die Berücksichtigung dieser Empfehlungen liegt im Ermessen des Anlagenbetreibers und sollte ggfs. mit den zuständigen Behörden abgesprochen werden. Darüber hinaus ist zu prüfen, ob entsprechend den Anforderungen der TRAS 310 der Klimaanpassungsfaktor bis zum Jahr 2050 zu berücksichtigen ist.

Ergänzend ist zu untersuchen, wie vernünftigerweise nicht auszuschließendes Treibgut auf den Verlauf von Überflutungen Einfluss nehmen kann.

Weitere Informationen

Neben der Informationsauswertung, die entlang der potentiellen Zu- und Abflusswege erfolgt, sind weitere Informationen zu ermitteln, die für das zu entwickelnde Schutzkonzept bzw. die Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“ unabdingbar sind.

Hierzu zählen:

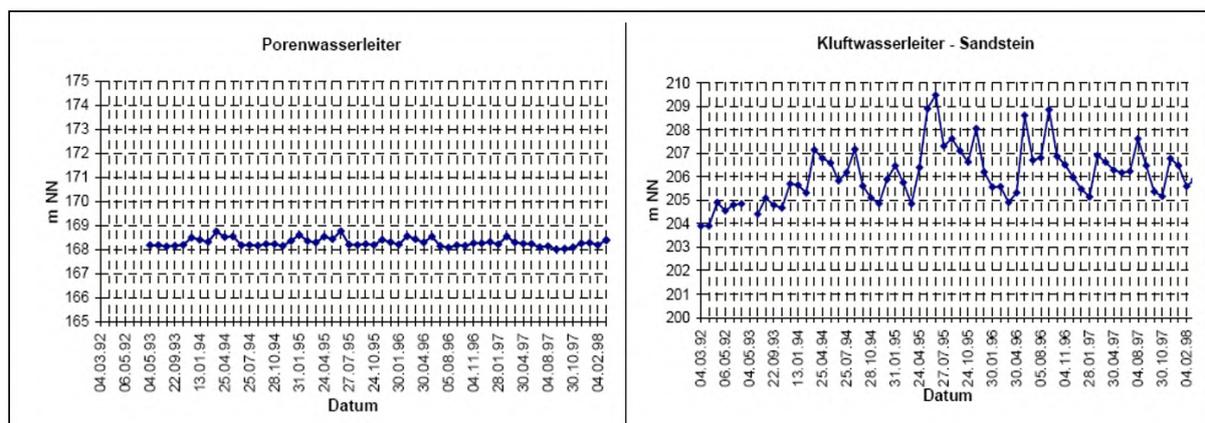
1. die Geschwindigkeit des Eintritts eines Ereignisses,
2. die Dauer des Ereignisses sowie
3. die abrufbaren Vorwarnungen, wie z.B. Unwetterwarnungen, Pegelstandsvorhersagen und Niederschlagsintensitäten.

Mit diesen zusätzlichen Informationen sind vom Betreiber für seinen Betriebsbereich im Alarm- und Gefahrenabwehrplan realistische Reaktionszeiten zu entwickeln. Auch hierzu wird auf das Beispiel in **Anhang 6** verwiesen.

2.6.2 Zu Kapitel 7.2 Teil B: Grundwasseranstieg

Für zahlreiche Regionen liegen Karten vor, in denen die Grundwassergleichen dargestellt sind. Dies sind Karten, in denen die Höhen mit gleichem Grundwasserspiegel angegeben sind. Darüber hinaus sind für die Gefahrenquellenanalyse aber auch die Schwankungsbreiten der Grundwasserspiegel von Bedeutung. Diese sind neben den wetterbedingten Einflüssen vor allem von der Bodenmatrix abhängig. Die folgende **Abbildung 3** zeigt die geringe Schwankungsbreite für einen Pegel in einem Porenwasserleiter über mehrere Jahre. Anders sieht das Bild für einen Pegel in einem Kluftwasserleiter aus. Die Schwankungsbreite beträgt in diesem Fall nahezu 6 m.

Abbildung 3: Veränderungen von Grundwasserspiegeln bei Porenwasser- und Kluftwasserleitern



Derartige Aufzeichnungen liegen für zahlreiche Messstellen vor und können bei den zuständigen Wasserwirtschaftsämtern abgefragt werden. Z.T. liegen den zuständigen Behörden auch Modelle vor, mit denen die voraussichtliche Entwicklung der Grundwasserstände berechnet wird. Mit diesen Informationen und unter Berücksichtigung eines Klimafaktors kann die Gefährdung von erdverlegten Anlagen und Anlagenteilen geprüft werden.

2.6.3 Zu Kapitel 7.3 Berücksichtigung des Klimawandels

Um die Auswirkungen des Klimawandels zu berücksichtigen, soll entsprechend den Vorgaben der TRAS 310 bei Bemessungshochwasserabfluss sowie Niederschlagshöhe ein Sicherheitszuschlag von 20 % oder ein länderspezifischer Faktor für die vernünftigerweise nicht auszuschließende Gefährdung und gemäß § 3 Abs.1 StörfallV erforderlichen Vorkehrungen berücksichtigt werden (vgl. Anhang der TRAS), sofern in den Gefahrenkarten die Folgen des zukünftigen Klimawandels noch nicht berücksichtigt sind.

Hierfür ist zunächst zu prüfen, ob eine Anlage bis 2050 oder darüber hinaus betrieben werden soll. Ist dies nicht der Fall, müssen die Vorkehrungen gemäß § 3 Abs.1 StörfallV nicht gegen Gefährdungen unter Berücksichtigung des Klimafaktors ausgelegt werden (TRAS Anhang I Nr. 2 und 3).

Danach ist für die Gefahrenquelle Hochwasser zu prüfen, ob für das Gewässer, von dem diese Gefährdung ausgehen kann, von den zuständigen Behörden bereits ein Klimafaktor festgestellt und beim öffentlichen technischen Hochwasserschutz berücksichtigt wird. Ist dies der Fall, so ist dieser Klimafaktor (der ggf. 1 betragen kann, d.h. es sind keine weitergehenden Auslegungen aufgrund des Klimawandels erforderlich) anzuwenden (TRAS Anhang I Nr. 5). Hiermit wird in der TRAS 310 die Kompetenz der Wasserbehörden der Länder respektiert.

Zur Umsetzung der Anforderungen der TRAS 310 bis zum Jahr 2050 ist kritisch anzumerken, dass im 6. Assessment Report des sogenannten Weltklimarates (Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021)) festgestellt wird, dass sich der weltweite Temperaturanstieg beschleunigt hat. Hieraus ergibt sich, dass die Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel und damit auch für die Anlagensicherheit sehr viel früher umgesetzt werden sollten.

2.7 Zu Kapitel 8 Ermittlung der gefährdeten sicherheitsrelevanten, Teile des Betriebsbereichs und der Anlagen

Sicherheitsrelevante Teile des Betriebsbereichs und Anlagenteile sind jene

1. mit besonderem Stoffinhalt
2. mit besonderer Funktion

zu bestimmen.

Bei bestehenden Betriebsbereichen und Anlagen sind die sicherheitsrelevanten Teile grundsätzlich bekannt. Ob alle Teile tatsächlich durch die jeweilige naturbedingte Gefahrenquelle betroffen sind, muss im Einzelfall untersucht werden. Beispielsweise sind alle Anlagenteile im Falle einer Überflutung betroffen, die sich unterhalb oder mindestens auf der Höhe des Wasserspiegels befinden. Dies gilt auch für hohe Grundwasserstände.

Bei der Gefährdung durch Überflutung oder hohen Grundwasserstand kommt der Freisetzung von gefährlichen Stoffen in Gewässer besondere Bedeutung zu. Die z.T. pragmatisch definierten Schwellen des Anhang I der Seveso-III-Richtlinie und damit die daraus abgeleiteten Schwellen (vgl. KAS-1) tragen diesbezüglich der Wassergefährdung und Freisetzung über den Wasserpfad z.T. nicht ausreichend Rechnung. Es ist zu empfehlen, die vorgeschlagenen Schwellen (z.B. die über 1.000 Kg) z.B. auf der Basis von Wassergefährdungsklassen zu überprüfen und weiter zu differenzieren. Bei der Überprüfung der Schwellen sollten auch die Nutzungen des gefährdeten Gewässers (z.B. zur Trinkwassergewinnung oder als Badegewässer) mit einbezogen werden.

Ergibt die Untersuchung aller sicherheitsrelevanten Anlagenteile, dass sie durch vernünftigerweise nicht auszuschließende Gefahrenquellen nicht gefährdet werden können, so kann mit der Untersuchung von „Dennoch-Störfällen“ fortgefahren werden (vgl. Abzweig in Abbildung 1 der TRAS 310).

2.8 Zu Kapitel 9 Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen

Bei der Gefahrenquelle Überflutung (inkl. Grundwasseranstieg) ist ein Wasserstand in einem Betrieb eine notwendige Voraussetzung für einen möglichen Störfall, jedoch noch keine hinreichende Bedingung. Erst wenn z.B. ein Tank aus der Verankerung gerissen oder die Stromversorgung durch die Überflutung unterbrochen wird, sind die Voraussetzungen für einen Störfall gegeben. Daher ist es erforderlich, z.B. unter dem Gesichtspunkt eines bestimmten Wasserstandes zu prüfen, welche Anlagen betroffen sind und welche Szenarien sich hieraus ergeben. Ein Beispiel für die Vorgehensweise zur Ermittlung des Wasserstandes im Fall einer Überschwemmung durch Flusshochwasser ist in **Anhang 5** beigefügt.

Kernstück dieses Abschnitts der TRAS ist die Tabelle 5 in der TRAS 310 mit Beispielen von Szenarien zur Ermittlung der Voraussetzungen von Störfällen, in der verschiedene auslösende Ereignisse den möglichen Auswirkungen auf sicherheitsrelevante Anlagen und Anlagenteile sowie Bereiche gegenübergestellt werden. Damit kann der Anwender die für seine Anlage zutreffende Situation beschreiben und bewerten, ob im Falle der unterstellten Art und Intensität des Wirksam-werdens der jeweiligen Gefahrenquelle tatsächlich ein Störfall eintreten kann oder ob nur eine Störung des Betriebes vorliegt.

Hierbei sollten nicht nur gefährdete Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt oder besonderen Funktionen berücksichtigt werden, sondern auch sonstige gefährdete Anlagenteile innerhalb und außerhalb des Betriebs, die für die Anlagensicherheit von Bedeutung sind. Dies kann z.B. Trafostationen und Kommunikationseinrichtungen betreffen, die abseits vom eigentlichen Betriebsgelände gelegen sein können. Darüber hinaus sind auch die Wechselwirkungen verschiedener Anlagenteile zu betrachten. Was bedeutet beispielsweise die Unterbrechung einer Versorgungsleitung für andere Anlagenteile? Für Betriebsbereiche der oberen Klasse, für die ein Sicherheitsbericht erstellt wurde, liegen meist Untersuchungen über die Wechselwirkungen von Anlagenteilen vor. Diese sind dann zu überprüfen und ggf. zu ergänzen.

2.9 Zu Kapitel 10 Festlegung von Szenarien und Schutzzielen in Verbindung mit § 3 Absatz 1 und § 4 Störfall-Verordnung

Um die Anforderungen des § 9 Abs. 1 Nr. 2 in Verbindung mit Anhang II Nr. IV der StörfallV zu erfüllen, sind die möglichen Ereignisabläufe (Störfallablaufszenarien) zu untersuchen und darzustellen. Zur späteren Prüfung der Einhaltung der übergeordneten Schutzziele des BImSchG (§ 5) und der StörfallV (§ 3) sind diese in Bezug auf die möglichen Gefährdungen und zugehörige Szenarien zu konkretisieren.

Grundsätzlich können die Schutzziele auf unterschiedliche Weisen konkretisiert werden. Da die Entscheidung über die Methodik bei den Betreibern und zuständigen Behörden bleiben soll, ist der methodische Ansatz gemäß Abbildung 1 der TRAS 310 nur als Vorschlag zu interpretieren.

Auf der Grundlage der in der detaillierten Gefahrenquellenanalyse ermittelten Intensitäten der jeweiligen umgebungsbedingten Gefahrenquelle lassen sich konkrete quantitative Angaben, wie z.B. den Wasserstand im Falle einer Überflutung, ableiten. Mit diesen Ergebnissen kann dann das Schutzkonzept für die Anlage oder bestimmte Anlagenteile konzipiert und die jeweiligen technischen Vorkehrungen bemessen werden (z.B. Hochwasserschutzwand). Darüber hinaus oder alternativ können auch organisatorischen Maßnahmen festgelegt werden. Die Vorkehrungen und Maßnahmen müssen für den gesamten Betriebsbereich oder alle sicherheitsrelevanten Anlagenteile und Anlagen wirksam sein.

Für Flusshochwasser wird vorgeschlagen, eine Eintrittswahrscheinlichkeit von höchstens $10^{-2}/a$ entsprechend einer Jährlichkeit von mindestens 1 mal in 100 zugrunde zu legen (siehe unter detaillierte Gefahrenquellenanalyse). Im Einzelfall, z.B. bei Anlagen mit hohem Risikopotenzial bzw. Risiken für Menschen oder Umwelt, sollten geringere Wahrscheinlichkeiten d.h. höhere Jährlichkeiten angesetzt werden. Dieser Vorschlag steht in Einklang mit den Vorgaben des § 74 WHG.

Die Festlegung der Schutzziele kann insbesondere für Fluss- und Küstenhochwasser nicht losgelöst von der Bemessung öffentlicher Hochwasserschutzanlagen (insbesondere Deiche) erfolgen. In der Regel werden öffentliche Deiche für ein Hochwasser ausgelegt, dass statistisch einmal in 100 Jahren auftritt (HQ_{100}). Für einzelne Flussabschnitte haben die Behörden jedoch ein höhere Jährlichkeiten festgelegt, wie z.B. am Niederrhein, wo die Deiche für ein HQ_{500} bemessen wurden. Vor diesem Hintergrund muss sich die Festlegung der betriebsbereichsbezogenen Auslegung auch an den Auslegungszielen für die Bemessung öffentlicher Hochwasserschutzbauwerke orientieren (Warm und Köppke, 2007).

Anders als bei Fluss- und Küstenhochwasser soll für Starkniederschlagsereignisse von einem 200-jährlichen Ereignis für die Bemessungen von Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen ausgegangen werden. Für Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen ist mindestens ein 500-jährliches Niederschlagsereignis zugrunde zu legen. Aufgrund des geringen Mehraufwandes sowie des weitergehenden Erkenntnisgewinns wird über die Anforderungen des TRAS 310 hinaus empfohlen, auch die Betrachtung der Niederschlagshöhen, die in Tabelle 1 zusammengestellt sind, durchzuführen. In diesem Zusammenhang wird noch einmal betont, dass die Jährlichkeiten für Flusshochwasser nicht mit den Jährlichkeiten für Starkniederschlagsereignisse wegen der beschränkten messtechnischen Erfassung derartiger Ereignisse vergleichbar sind.

2.10 Zu Kapitel 11 Erarbeitung von Schutzkonzepten für die Szenarien

Bei sicherheitstechnischen Fragestellungen wird in der Regel davon ausgegangen, dass aufgrund einer Fehlfunktion oder Fehlbedienung ein Störfall ausgelöst werden kann. Daher setzen technische Maßnahmen unmittelbar an der Anlage an, um eine Freisetzung von gefährlichen Stoffen zu verhindern. Bei „Dennoch-Störfällen“ wird darüber hinaus auf die Begrenzung der Auswirkungen auf die Umwelt abgestellt. Die sicherheitstechnische Betrachtung erfolgt meist von innen nach außen, also von der Anlage selbst hin zu Maßnahmen, die um die Anlage eingesetzt werden, um mögliche Auswirkungen im Falle eines Störfalls zu begrenzen.

Im Zusammenhang mit umgebungsbedingten Gefahrenquellen erfolgt die sicherheitstechnische Betrachtung dagegen von außen nach innen. Äußere Gefahrenquellen, wie z.B. Hochwasser, sind von der Anlage oder dem Betrieb fernzuhalten. Daher kann ein Schutzkonzept auf mehreren

Barriersystemen bzw. Verteidigungslinien aufgebaut werden. Für die Gefahrenquelle Überflutung können als äußerste Verteidigungslinie Maßnahmen zur trockenen Vorsorge des gesamten Betriebsbereichs sein. Ein Beispiel hierfür ist die Eindeichung, wie dies vielfach von Unternehmen realisiert wurde. Eine zweite Verteidigungslinie könnte die trockene Vorsorge einzelner sicherheitsrelevanter Anlagen oder Anlagenteile sein, wie z.B. der Energieverteilung. Sollten diese Verteidigungslinien versagen, könnten auch Maßnahmen der nassen Vorsorge eine Freisetzung von Stoffen verhindern (z.B. Auftriebssicherheit von Behältern). Die in der Abbildung 5 der TRAS 310 dargestellte letzte Verteidigungslinie sind prozessbezogene Maßnahmen, die unmittelbar an der Anlage ansetzen. Dies können zum Beispiel Schutzsysteme sein, die jedoch unabhängig vom auslösenden Ereignis eingesetzt werden.

Neben technischen können aber auch organisatorische Maßnahmen sinnvoll sein. Denkbare wäre in diesem Zusammenhang die Auslagerung von gefährlichen Stoffen, sofern eine ausreichende Reaktionszeit für eine solche Maßnahme gegeben ist. Dies ist z.B. am Niederrhein, der Unterelbe oder der Unterweser der Fall. Die dort auftretenden Flutwellen können Stunden oder Tage vorherberechnet werden. Anders sind jedoch Gebiete zu bewerten, die im Einzugsgebiet von Gebirgen liegen, wo die Reaktionszeiten bei Sturzfluten aufgrund der Gefällstrecken oftmals sehr kurz sind.

Die verschiedenen Maßnahmen der trockenen und nassen Vorsorge gegenüber Überflutung werden in **Anhang 4** „Hinweise zur Entwicklung eines Schutzkonzeptes gegen Überflutung“ dargestellt. Die TRAS 310 selbst gibt an dieser Stelle nur eine Übersicht über die möglichen Maßnahmen. Wichtig ist, dass mit dem Schutzkonzept alle vernünftigerweise nicht auszuschließenden Gefährdungen und Szenarien abgedeckt werden.

2.11 Zu Kapitel 12 Prüfung der Schutzkonzepte

Die Verifizierung des Schutzkonzeptes erfolgt im Wege einer Gefahrenanalyse. Dabei kommen zum Beispiel folgende Methoden zum Einsatz:

1. intuitive Methoden (Brainstorming)
2. induktive Methoden (Ereignisablaufanalyse, (DIN 25419, 1995))
3. deduktive Methoden (z.B. Fehlerbaumanalyse, (DIN 25424, 1981; Böhnert,1992))
4. Bow-Tie Methode (Kombination aus Fehler- und die Ereignisbaumanalyse, (Köppke 2022))
5. PAAG-Verfahren (**P**rognose, **A**uffinden der Ursachen, **A**bschätzen der Auswirkungen, **G**egenmaßnahmen) mit intuitiven, induktiven und deduktiven Elementen (Selbmann, 2000)

Hierfür stehen zahlreiche Anleitungen, Checklisten und Erfahrungsberichte zur Verfügung, so dass darauf in der TRAS nicht weiter eingegangen werden muss. Zu prüfen ist, ob die gewählten Vorkehrungen und Maßnahmen die Risiken für das Auslösen eines Störfalls auf ein akzeptiertes Maß reduzieren.

2.12 Zu Kapitel 13 Ermittlung von Szenarien gemäß § 3 Absatz 3 (Dennoch-Störfälle) und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung gemäß § 10 Störfall-Verordnung

Die TRAS unterscheidet bei der Ermittlung von Störfallablaufszenarien gemäß § 3 Abs. 3 StörfallV zwischen vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen, die dann zu „Dennoch-Störfällen“ führen können, wenn

- a) die störfallverhindernden Vorkehrungen technisch versagen oder
- b) Hochwasser bzw. Niederschläge oberhalb der aufgrund einer probabilistischen Analyse vernünftigerweise angenommenen Jährlichkeit eintreten.

Darüber hinaus wurden Gefahrenquellen auf der Grundlage einer vereinfachten Gefahrenquellenanalyse deterministisch als „Exzeptionelle Gefährdungen“ ausgeschlossen. Solche Gefahrenquellen sind so unwahrscheinlich, dass sie auch im Rahmen der Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“ ausgeschlossen bleiben.

Als Störfallszenarium gemäß § 3 Abs. 3 StörfallV ist gemäß der TRAS 310 grundsätzlich das Eindringen von Wasser in den Betriebsbereich zu unterstellen. Für die Ermittlung des sich einstellenden Wasserstands ist eine Einzelfallbetrachtung erforderlich. Dabei kann sich der Betreiber an folgenden Ereignissen oder Informationen orientieren:

1. Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit oder Extremereignissen (§ 74 WHG)
2. Historische Ereignisse (z. B. HHQ)
3. Hochwassermelde- und -alarmstufen
4. Maximale Niederschläge

zu 1: Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit oder Extremereignissen (§ 74 WHG)

Als Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit oder Extremereignis (§ 74 WHG) wird in Gefahren- und Risikokarten ein 500- oder 1.000-jähriges Hochwasser unterstellt. Wird bei den Szenarien für Hochwasser auf diese Jährlichkeiten abgestellt, so können diese Karten genutzt werden (z.B. Rhein-Atlas der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR)).

Zu 2: Historische Ereignisse (z. B. HHQ)

Die Auswertung eines historischen Ereignisses wird in **Anhang 5** dargestellt.

Zu 3: Hochwassermelde- und -alarmstufen

Angaben zu Hochwassermelde- und -alarmstufen sind erhältlich unter:
www.hochwasserzentrale.de

Zu 4: maximalen Niederschlägen (vgl. Anhang 3)

Für die Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“ ist eine Jährlichkeit von 500 Jahren für Starkniederschläge mit Dauerstufen von einer bzw. drei Stunden anzusetzen. Dies kann durch Extrapolation der KOSTRA-Werte ermittelt werden. Die Vorgehensweise ist in **Anhang 3** beschrieben.

2.13 Zu Kapitel 14 Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen

Im Falle des Versagens aller Schutzeinrichtungen können sich auch aufgrund der Gefahrenquellen

1. Überschwemmung durch Fluss- und Küstenhochwasser,
2. Überflutung durch Starkniederschläge und Sturzfluten sowie
3. Grundwasseranstieg

Schadstoffe in der Luft, in Gewässern oder im Boden ausbreiten. Der Betreiber hat Vorkehrungen zu treffen, um die Ausbreitung dieser Stoffe zu vermeiden oder zu vermindern oder zumindest die Auswirkungen einer Schadstoffausbreitung zu begrenzen. Hierfür gibt die TRAS 310 differenziert für die o. g. Gefahrenquellen Hinweise über mögliche technische und organisatorische Maßnahmen.

2.14 Zu Kapitel 15 Planung für Notfälle, Ergänzungen von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Übermittlung von Informationen für die externen Alarm- und Gefahrenabwehrplanung

Dieser Abschnitt der TRAS 310 widmet sich der Ausarbeitung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen und dem Katastrophenschutz. Eine Unterscheidung nach Gefahrenquellen erfolgt dabei nicht.

Bei Betriebsbereichen der unteren Klasse sind die Ergebnisse der obenstehenden Schritte im Rahmen der Fortschreibung von Konzepten zur Verhinderung von Störfällen und der Fortentwicklung des Sicherheitsmanagements aufgrund § 8 Abs. 3 StörfallV innerhalb der Planung für Notfälle gemäß Anhang III e zu berücksichtigen.

Bei Betriebsbereichen der oberen Klasse sind, wenn die Ergebnisse der obenstehenden Schritte neue Erkenntnisse zur Beurteilung von Gefahren zu liefern, die Konzepte zur Verhinderung von Störfällen und Sicherheitsberichte fortzuschreiben sowie das Sicherheitsmanagement fortzuentwickeln. Da dann auch die Angaben gemäß Anhang III Teil V fortgeschrieben werden müssen, wird i.d.R. auch das Erfordernis einer Fortschreibung der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne gemäß § 10 vorliegen.

Nach § 10 Abs. 1 Nr. 2 StörfallV sind Betreiber von Betriebsbereichen der oberen Klasse verpflichtet, den zuständigen Behörden die für die Erstellung externer Alarm- und Gefahrenabwehrpläne erforderlichen Informationen zu übermitteln. Zahlreiche Informationen sind vom Betreiber ohnehin für die Erstellung des Sicherheitsberichts zu erarbeiten.

2.15 Zu Kapitel 16 Dokumentation

Hier wird lediglich auf die in der StörfallV verankerten Dokumentationspflichten verwiesen.

2.16 Zu Kapitel 17 Erfüllung weiteren Pflichten der Störfall-Verordnung

Hierzu zählen

1. Anforderungen an die Instandhaltung von Vorkehrungen (§ 6 Abs. 1 Nr. 1, 2 StörfallV)
2. Informationen und Schulungen der Beschäftigten (§ 6 Abs. 1 Nr. 4 StörfallV)
3. Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall (§ 5 Abs.2 StörfallV)

2.16.1 Zu Kapitel 17.1 Anforderungen an die Instandhaltung von Vorkehrungen (§ 6 Abs. 1 Nr. 1, 2 StörfallV)

Die Grundlage für Inhalt und Aufbau von Instandhaltungsanleitungen bildet die DIN 31052. Nach DIN 31051 beinhaltet der Begriff der Instandhaltung folgende Einzelmaßnahmen:

1. Inspektion,
2. Wartung,
3. Instandsetzen,
4. Verbesserung.

In der Praxis hat sich die Entwicklung eines betrieblichen Instandhaltungsmanagements bewährt, das im Einzelnen folgende grundsätzliche Arten von Instandhaltungsvorgaben enthalten sollte:

Vorbeugende Instandhaltung	Die Durchführung der Maßnahmen erfolgt nach einem festen Zeitraster. Es handelt sich hierbei um eine zeitabhängige präventive Maßnahmendurchführung zur Sicherstellung einer maximalen Zuverlässigkeit.
Zustandsabhängige Instandhaltung	Die Durchführung der Maßnahmen erfolgt nach Zustand und Verschleiß.
Wiederkehrende Prüfung	Die ordnungsgemäße Funktion von technischen Maßnahmen ist nach einem festen Zeitraster zu überprüfen. Dies ist vor allem dann erforderlich, wenn z.B. Hochwasserpumpen oder mobile Hochwasserschutzmaßnahmen in der Regel außer Betrieb sind.
Verbesserung	Erfassung und Auswertung von Defiziten, Ableitung und Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen (ausgenommen Änderungen).

Ausgeführte Maßnahmen zur Instandhaltung sind zu dokumentieren.

Der Instandhaltungsplan orientiert sich an den Hochwasser- bzw. Überflutungsschutzmaßnahmen sowie baulichen Einrichtungen zu deren Schutz. Im Einzelnen können beispielhaft folgende Maßnahmen zur Instandhaltung erforderlich sein:

Tabelle 2: Beispiel eines Inspektions- und Wartungsplans

Schutzeinrichtung	Inspektion/Wartung	Intervall
stationäre Hochwasser-schutzeinrichtungen	Prüfung von Deichen:	1 x /Monat
	- Vorhandensein von Tierbauten	
	- Schädigender Bewuchs	
	- Erosionserscheinungen (Anrisse, Abbrüche, Spalten)	
	- Verformungen an Böschungen oder Krone durch Sackungen oder Mulden	
	- Kontrolle von Bauten in / durch den Damm	1 x /Jahr
	- Anschwemmen von Treibgut	1 x /Jahr
	Überprüfung und Instandhaltung von Hochwasserschutzwänden und -toren	1 x /Jahr
	Instandhaltung der technischen Maßnahmen zum Schutz vor Treibgut	1 x /Jahr
	Überprüfung von Kanalverschlüssen	1 x /Jahr
Mobile Hochwasser-schutzeinrichtungen	Überprüfung der Funktionalität und Integrität von mobilen Hochwasserschutzanlagen (z.B. Dammbalkensysteme) durch Aufbau im Rahmen von jährlichen Übungen Überprüfen von Zuordnung und Vollständigkeit von mobilen Systemen	1 x /Jahr
Halterungen	Überprüfung der Halterungen für Hochwasserschotts	2 x /Jahr
Sicherungssysteme	Prüfung von baulichen Sicherungsmaßnahmen zum Schutz von Hochwasserschutzanlagen, wie z.B. Poller zum Schutz von Halterungen von Hochwasserschotts bei Fahrzeugverkehr	2 x /Jahr
Pumpen	Regelmäßige Überprüfung von Hochwasserpumpen, incl. Funktionstest.	2 x /Jahr
Auftriebssicherungen	Prüfung von Verankerungen von Tankanlagen oder anderen auftriebsgefährdeten Apparaten oder Rohrleitungen mit gefährlichen Stoffen	2 x /Jahr
Kommunikationsmittel	Überprüfung der Funktion von mobilen Kommunikationsmitteln	2 x /Jahr

2.16.2 Zu Kapitel 17.2 Informationen und Schulungen der Beschäftigten (§ 6 Abs. 1 Nr. 4 StörfallV)

Die Schulung des Personals (einschließlich des relevanten Personals von Subunternehmen) umfasst im Einzelnen:

1. Förderung des Bewusstseins über die Existenz der Gefahrenquellen
 - a) Aufzeigen der Gefahrenquellen, wenn möglich mit historischen Aufnahmen inkl. sekundärer Gefahrenquellen, wie Strömung, Treibgut, Versagen von Schutzeinrichtungen
 - b) Darstellung der gefährdeten Teile des Betriebsbereiches
 - c) Erläuterungen zu den Hochwasser- bzw. Überflutungsschutzanlagen

- d) Erläuterung der Organisationsstruktur im Fall des Wirksamwerdens der Gefahrenquelle
 - e) Erläuterung der Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen
2. Maßnahmen zur Instandhaltung von Vorkehrungen zum Hochwasser- bzw. Überflutungsschutz
- a) Durchführung von jährlichen Übungen, z.B. Aufbau von mobilen Hochwasserschutzeinrichtungen
 - b) Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen entsprechend dem betrieblichen Inspektions- und Wartungsplan
 - c) Prüfung der Funktionstüchtigkeit von Sicherheitssystemen (z.B. Pumpwerke, mobile Hochwasser- bzw. Überflutungsschutzsysteme)
3. Verhalten vor Wirksamwerden der Gefahrenquelle (ggf. gemäß Alarm- und Gefahrenabwehrplan)
- a) Beobachtung der Pegelstände
 - b) Einholung von Informationen (Wasserbehörden, Hochwasserinformationssysteme, Unwetterzentralen usw.)
 - c) Durchführung der betrieblichen Sicherheitsmaßnahmen entsprechend dem Schutzkonzept, wie z.B.
 - Sicherung auftriebsgefährdeter Behälter oder Apparate
 - Verschließen der Kanalsysteme
 - Aufbau mobiler Hochwasserschutzsysteme
 - Vorbereitung der Hochwasserpumpen
 - Auslagerung von gefährlichen Stoffen
 - Abfahren der Produktionsanlagen
 - Räumung von gelagerten Ersatz- oder Ausbauteilenteilen (Vermeidung von betriebsinternem Treibgut)
 - d) Informationen an die Katastrophenschutzbehörden (z.B. zum Auslagern von Stoffen)
4. Verhalten während des Wirksamwerdens der Gefahrenquelle (ggf. gemäß Alarm- und Gefahrenabwehrplan)
- a) Beobachtung der betrieblichen Situation mit Lagebeurteilung
 - b) Informationsbeschaffung von Behörden und Internetportalen über die Entwicklung der Wetter- bzw. Hochwassersituation
 - c) Laufende Inspektion der Hochwasserschutzeinrichtungen
 - d) Durchführung von Notfallmaßnahmen, wie z.B. Ausbesserungen zur Deichverteidigung

- e) Kommunikation mit den zuständigen Katastrophenschutzbehörden
- f) Entscheidung für weitergehenden Maßnahmen (z.B. Flutung von Kellerräumen)
- g) Verhalten bei Freisetzung von gefährlichen Stoffen
- h) Durchführung von innerbetrieblichen Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen
- i) Rückzugslinien und Evakuierung

Für den Fall des Austretens gefährlicher Stoffe werden an dieser Stelle noch Erläuterungen über das Absetzen von Informationen oder Warnungen gegeben.

Bei Störfällen, die von Hochwasser und Starkniederschläge ausgehen, sind insbesondere Gefahren für Dritte durch Gefahrstoffe im Wasser zu beachten. Die höchste Gefahr infolge einer Freisetzung gefährlicher Stoffe besteht durch direkten Kontakt, z.B. bei der Deichverteidigung, sowie für die Trinkwassergewinnung - und damit für Leben und Gesundheit einer großen Zahl von Menschen. Erhebliche Gefahren können aber auch für die Kühl- und Brauchwassergewinnung, die Landwirtschaft (Bewässerung, Viehtränke) und für Flora und Fauna der betroffenen Gewässer entstehen. Können die freigesetzten Schadstoffe in die Schmutz- oder Mischwasserkanalisation eindringen, ist die Beeinträchtigung des Betriebs von Kläranlagen zu besorgen, was wiederum erhebliche Folgeschäden nach sich ziehen kann. Eine unverzügliche, sachgerechte und umfassende Information oder Warnung der zuständigen Behörden ist daher dringend geboten.

Für störfallbezogene Ereignisse gelten vier Meldestufen. Gemäß Vollzugshilfe zur StörfallV vom März 2004 werden diese wie folgt unterschieden.

Tabelle 3: Melderaster zur Kategorisierung und Abgrenzung der Ereignisse

Meldestufe	Charakterisierung der Ereignisse	Maßnahmen
D1	Keine Auswirkungen außerhalb der Werksgrenzen und keine Belastungen des Grundwassers zu besorgen. Dazu gehören auch Ereignisse, bei denen eine Gefahr außerhalb objektiv nicht besteht, die aber von der Nachbarschaft wahrzunehmen sind und für gefährlich gehalten werden können (z.B. starke Geräusche; Abfackeln von Gasen; schwache, begrenzte Geruchseinwirkung).	Gegenseitige Information von Anlagenbetreiber, Polizei und Feuerwehr. Keine Maßnahmen der Behörden zur Gefahrenabwehr erforderlich.
D2	Auswirkungen und Belastungen außerhalb der Werksgrenzen nicht auszuschließen . Dazu gehören auch Ereignisse, bei denen eine großflächige oder anhaltende Geruchseinwirkung festzustellen ist, eine Gefährdung der Gesundheit aber nicht besteht.	Feststellende Maßnahmen durch Polizei und Feuerwehr. Gegebenenfalls abgestimmte Information an die betroffene Bevölkerung durch die Behörden. Begrenzte Maßnahmen der Behörden. Behördeninformation nach Plan.

Meldestufe	Charakterisierung der Ereignisse	Maßnahmen
D3	Gefährdung außerhalb der Werkgrenzen wahrscheinlich oder bereits gegeben .	Maßnahmen wie D2. Warnung der betroffenen Bevölkerung durch die Behörden. Einsatz von Polizei, Feuerwehr und Rettungsdienst.
D4	Schwerer D3-Fall oder Katastrophenfall .	Maßnahmen wie D3. Gegebenenfalls Maßnahmen nach Katastrophenschutzplan.

Eine Entscheidung über die Einstufung, Information oder Warnung und Entwarnung ist Aufgabe der zuständigen Behörden. Insbesondere haben im Falle einer unmittelbaren Bedrohung der menschlichen Gesundheit oder der Umwelt die informationspflichtigen Stellen (Behörden) sämtliche Informationen, über die sie verfügen und die es der eventuell betroffenen Öffentlichkeit ermöglichen könnten, Maßnahmen zur Abwendung oder Begrenzung von Schäden infolge dieser Bedrohung zu ergreifen, unmittelbar und unverzüglich zu verbreiten; dies gilt unabhängig davon, ob diese Folge menschlicher Tätigkeit oder einer natürlichen Ursache ist. (§ 10 Abs. 5 Umweltinformationsgesetz / Art. 7 Abs. 4 Umweltinformationsrichtlinie (2003/4/EG). Soweit Warnsysteme und Empfehlungen der Flussgebietskommissionen existieren, sollten diese ab D2 genutzt werden.

5. Verhalten nach Abklingen der Gefahrenquelle

- a) Inspektion des Betriebsbereichs auf Schäden und Stofffreisetzungen
- b) Sicherung und Beseitigung/Entsorgung von gefährlichen Stoffen im Betriebsbereich (z.B. auf Betriebsflächen oder in Kellerräumen)
- c) Instandsetzung der Hochwasser- bzw. Überflutungsschutzsysteme
- d) Schwachstellenanalyse bzgl. der technischen und organisatorischen Maßnahmen

2.16.3 Zu Kapitel 17.3 Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall (§ 5 Abs. 2 StörfallV)

Der Betreiber hat dafür zu sorgen, dass in einem Störfall die für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden und die Einsatzkräfte unverzüglich, umfassend und sachkundig mit dem Ziel der Minderung von Störfallauswirkungen beraten werden. Neben den in der TRAS 310 zusammengestellten eher allgemeinen Hinweise, werden diese hier noch weiter konkretisiert:

- a) Informationen zum Schadensfall, wie z.B.:
 - i) Freisetzung von Flüssigkeit aus einem Behälter oder Rohrleitung
 - ii) Freisetzung von gasförmigen Stoffen oder festen Stoffen
 - iii) Fortreißen von Behältern oder Gebinden mit der Strömung
- b) Informationen über Art, Gefährlichkeit und Menge der freigesetzten Stoffe
- c) Informationen zum Emissionsweg (Kanal, Gewässer, Atmosphäre)
- d) Informationen zum Verhalten der Stoffe in der Umwelt (z.B. Durchmischung mit Wasser, Aufschwimmen auf der Wasseroberfläche, Absinken auf den Grund)

- e) Abschätzung der Schadstoffkonzentrationen durch Verdünnung mit Wasser
- f) Bewertung der Gefährlichkeit der ausgetretenen Stoffe auf Grundlage der abgeschätzten Schadstoffkonzentrationen
- g) Beratung der Behörden über die einzuleitenden Maßnahmen im Falle des Austretens von gefährlichen Stoffen, wie z.B. beim Einsatz von Schadstoffbekämpfungsmitteln (z.B. Binde- oder Lösungsmittel)
- h) Beratung bei der Beseitigung von Schäden (z.B. bei Bodenkontaminationen)

Dies muss insbesondere alle Informationen umfassen, die die Behörden benötigen, um Informationen zu verbreiten, die es der eventuell betroffenen Öffentlichkeit ermöglichen könnten, Maßnahmen zur Abwendung oder Begrenzung von Schäden zu ergreifen (§ 10 Abs. 5 Umweltinformationsgesetz).

Anhang 1 Erkenntnisse über die Folgen des Klimawandels

Die nachfolgenden Ausführungen sind dem Forschungsbericht des Umweltbundesamtes „Berücksichtigung des Klimawandels in technischen Regeln für Anlagensicherheit“ (Köppke, 2022) entnommen.

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. Im Folgenden wird der Kenntnisstand bzgl. der aufgezählten umgebungsbedingten Gefahrenquellen dargestellt. Dabei wird jeweils zwischen

- a) den Entwicklungen vergangener Jahrzehnte und
- b) den Projektionen, die auf der Grundlage von Klimamodellen erstellt werden,

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**.

Anhang 1 Tabelle 1: Kenndaten der RCP-Szenarien

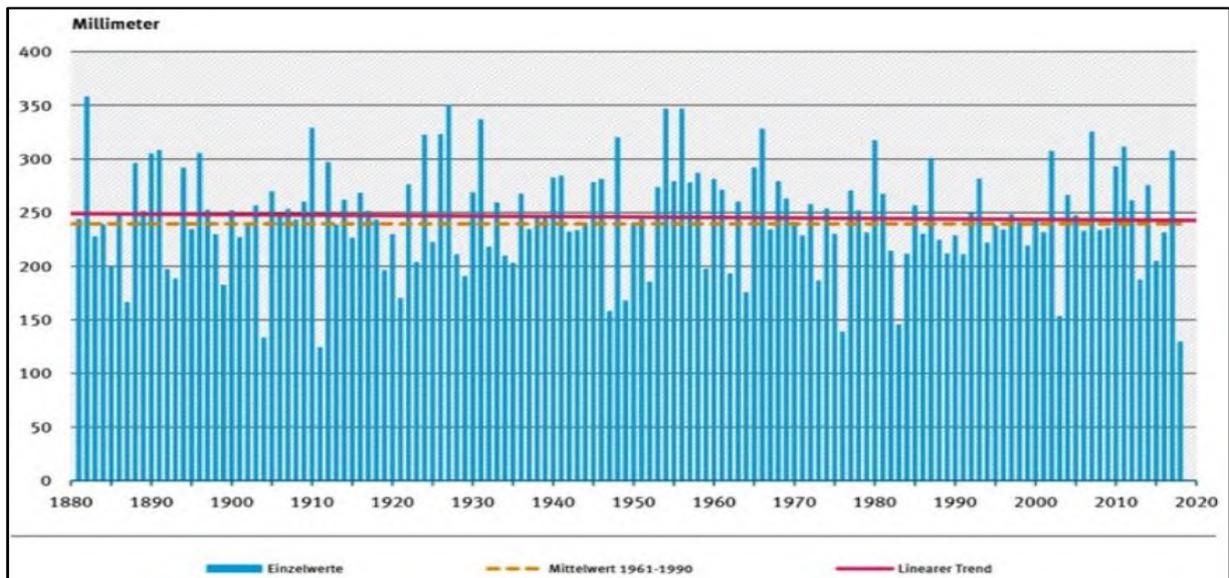
RCP-Szenarien				
Bezeichnung	RCP8.5	RCP6.0	RCP4.5	RCP2.6
Treibhausgaskonzentration im Jahre 2100	1.370 ppm CO ₂ -äq	850 ppm CO ₂ -äq	650 ppm CO ₂ -äq	400 ppm CO ₂ -äq
Strahlungsantrieb 1850 – 2100	8,5 W/m ²	6,0 W/m ²	4,5 W/m ²	2,6 W/m ²
Einstufung	sehr hoch	Hoch	mittel	sehr niedrig

Tendenzen der Niederschlagsentwicklung

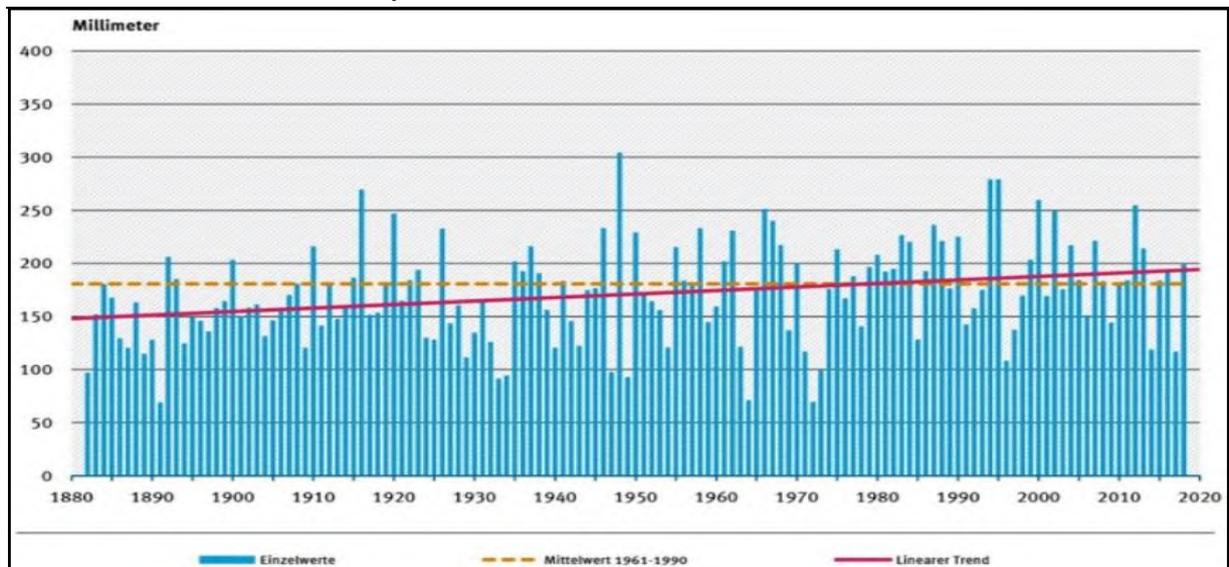
Niederschlagsentwicklung in den vergangenen Jahrzehnten

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 2**).

Anhang 1 Abbildung 1: Mittlere Niederschlagshöhe im Sommer in Deutschland von 1881 bis 2018



Anhang 1 Abbildung 2: Mittlere Niederschlagshöhe im Winter in Deutschland von 1881/1882 bis 2017/2018

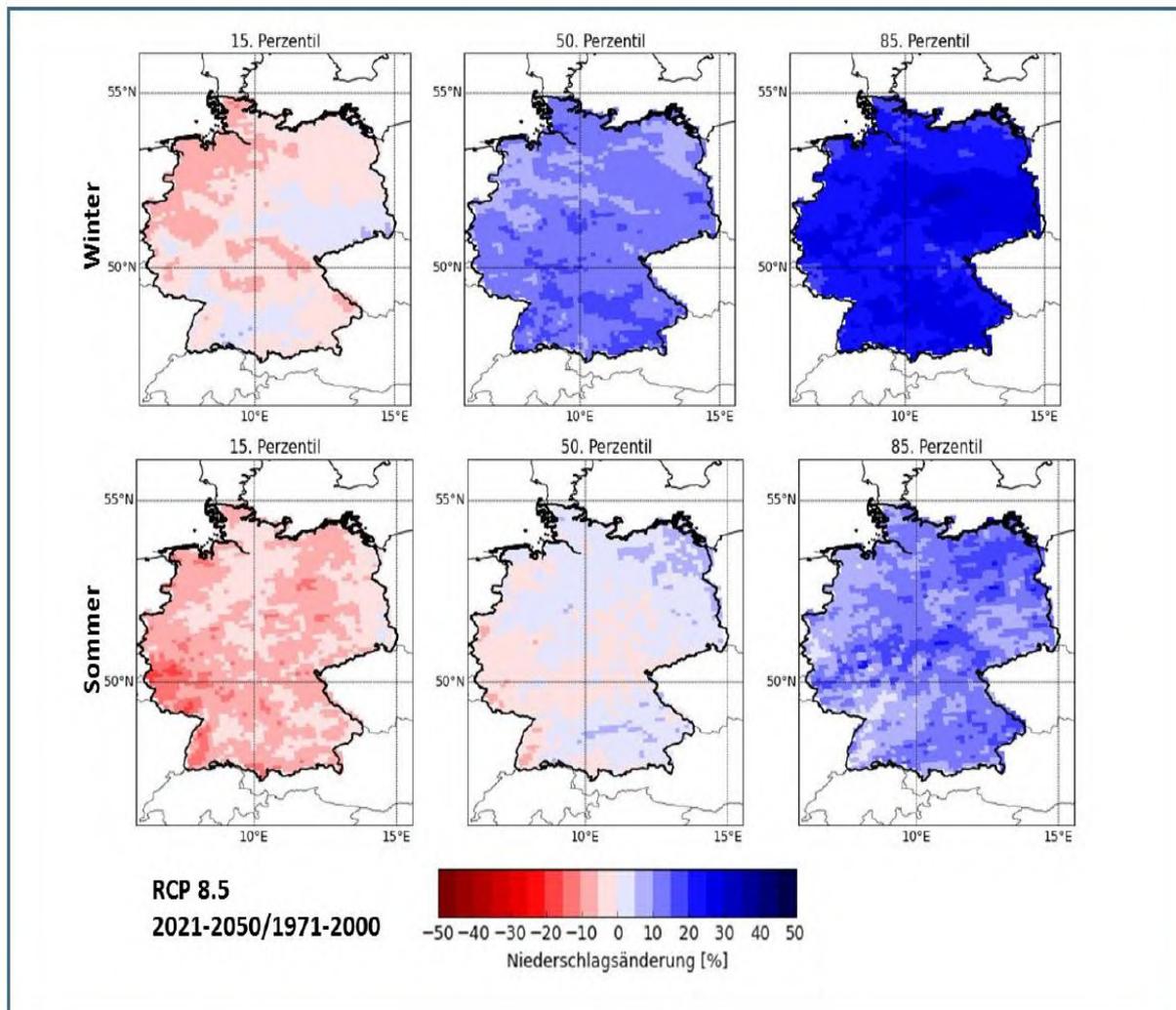


Quelle: beide Umweltbundesamt (2019)

Projektionen der Niederschlagsentwicklung

In **Abbildung 3** 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.

Anhang 1 Abbildung 3: Räumliche Projektion der Niederschlagsänderungen im Winter und Sommer in Deutschland für das Szenario RCP8.5



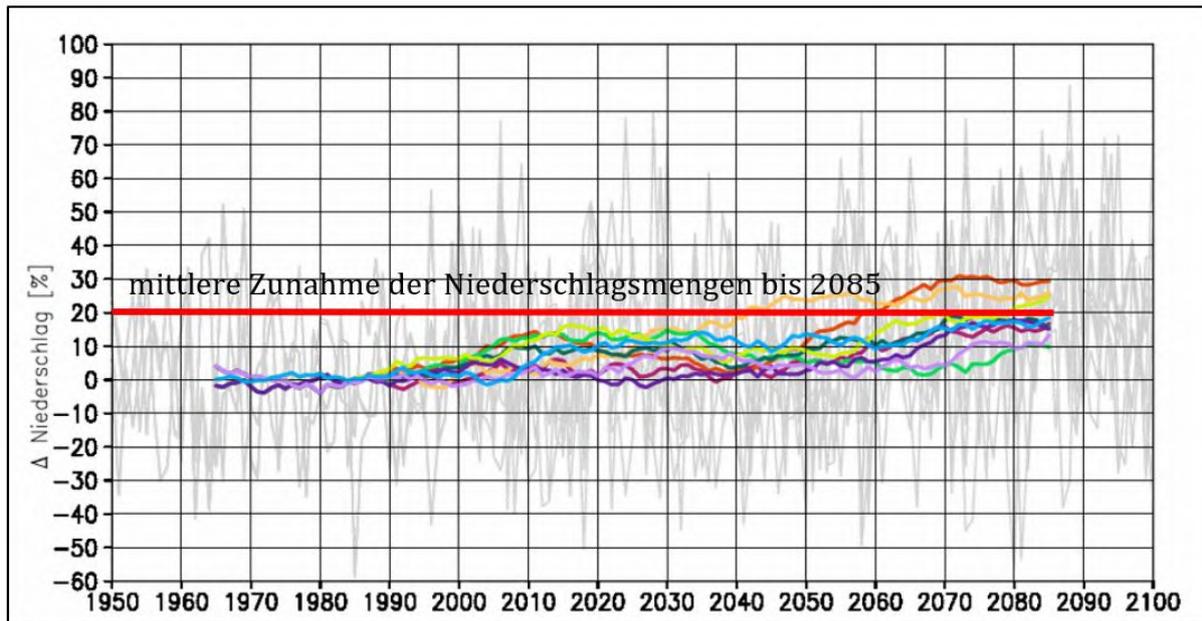
Quelle: DWD zitiert von der LAWA (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder

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.

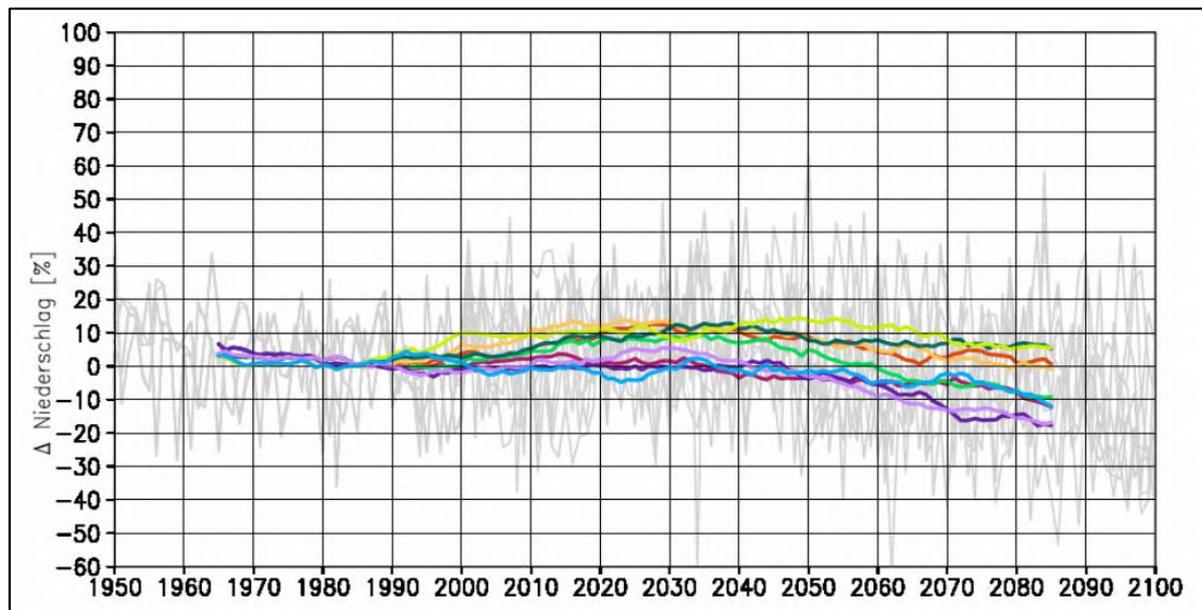
Es ist für das Szenario RCP8.5 zu erkennen, dass bei Betrachtung des 50. Perzentilwertes eine Tendenz zur Zunahme der mittleren Niederschlagsmenge in den Wintermonaten um 5 – 20 % für die nahe Zukunft (2021- 2050) zu erwarten ist. Für den Sommer sind die Entwicklungen in der nahen Zukunft nicht eindeutig.

Die zeitliche Entwicklung der Niederschlagsänderungen ist in den **Abbildungen 4** (Winter) und **5** (Sommer) dargestellt.

Anhang 1 Abbildung 4: Projizierte Änderungen des Niederschlags (%) für die Wintermonate für Deutschland relativ zu 1971 – 2000



Anhang 1 Abbildung 5: Projizierte Änderungen des Niederschlags (%) für die Sommermonate für Deutschland relativ zu 1971 – 2000



Quelle beider Abbildungen: CSC 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 %.

Entwicklungstendenzen von Starkniederschlägen

Vor dem Hintergrund der Anlagensicherheit sind jedoch weniger die mittleren Niederschlagshöhen interessant, sondern vielmehr die Entwicklung von Starkniederschlägen.

Der Deutsche Wetterdienst definiert die Warnstufen für Starkniederschläge und Dauerregen wie folgt:

Anhang 1 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

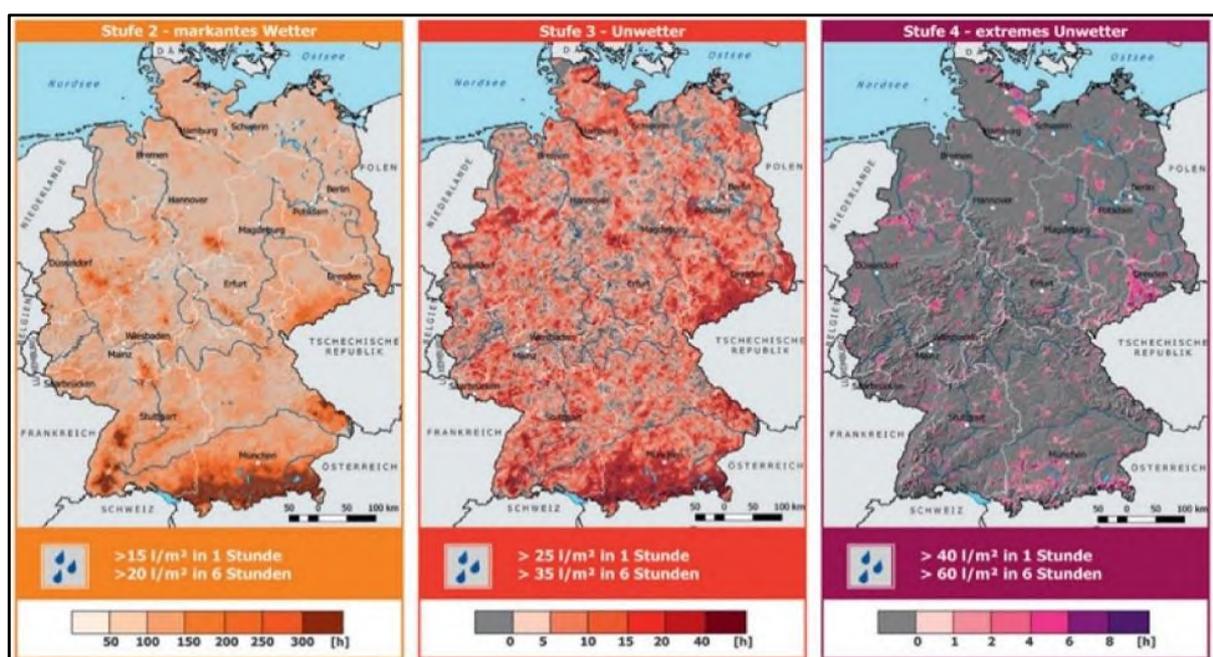
Die Gefahr von Starkniederschlägen wird stark durch die Lufttemperatur und damit durch deren Aufnahmefähigkeit von Wasserdampf beeinflusst. Ein Grad Temperaturanstieg erhöht die Niederschlagsmenge weltweit um 2 % (Kreienkamp et al. 2016).

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).

Starkniederschläge in den vergangenen Jahrzehnten

Basierend auf den Messdaten des DWD zeigt **Abbildung 6** die regionale Verteilung von Starkniederschlägen der Warnstufen 2 bis 4 vergangener Ereignisse (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2018). Es ist zu erkennen, dass vor allem der Alpenraum und Voralpenraum sowie der Erzgebirgsraum von Starkniederschlagsereignissen betroffen sind, die auch länger anhalten und damit zu Hochwasser führen können.

Anhang 1 Abbildung 6: Gesamtzahl der Niederschlagsstunden im Zeitraum 2001 – 2016 mit Überschreitung der Warnschwellen

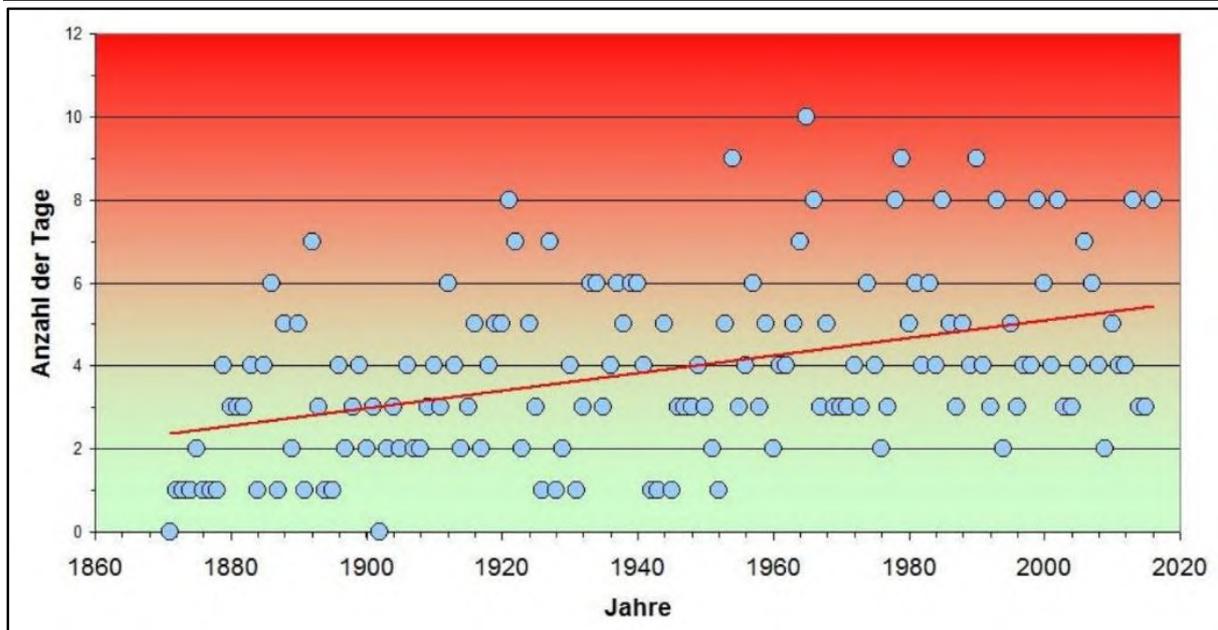


Quelle: BBSR (2018)

Wie insbesondere die Karten für die Warnstufen 3 und 4 aber auch verdeutlichen, treten Starkregeneignisse in ganz Deutschland auf.

Wie sich die Zahl der Tage mit Starkniederschlägen von 1871 bis 2016 verändert hat, zeigt die **Abbildung 7**. Der Trend zeigt einen stetigen Anstieg der Tage mit Niederschlägen > 30 mm.

Anhang 1 **Abbildung 7:** Zahl der Tage pro Jahr mit mehr als 30 mm Niederschlag von 1871 bis 2016



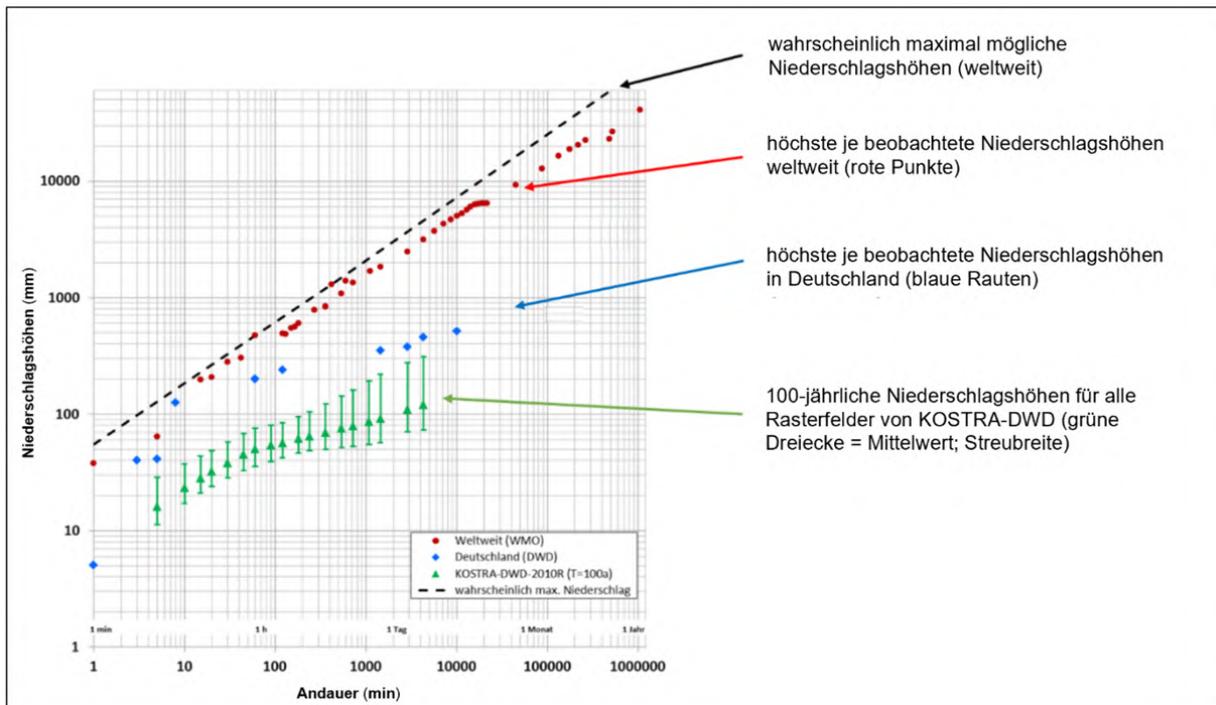
Quelle: DWD zitiert bei Dallmeier (2017)

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

In der **Abbildung 8** 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 8 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.

Anhang 1 Abbildung 8: Höchste jemals beobachtete Niederschlagshöhen in Deutschland und der Welt



Quelle: KLIWA (2019)

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 Starkniederschlagsereignisse 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):

Anhang 1 Tabelle 3: Trends von Starkniederschlagsereignissen bis zum Jahr 2100

Jahreszeit	Trends von Starkniederschlagsereignissen 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

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 9**).

Anhang 1 Abbildung 9: Entstehung der V_b-Wetterlage



Quelle: Köppke (2022)

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.

Anhang 1 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):

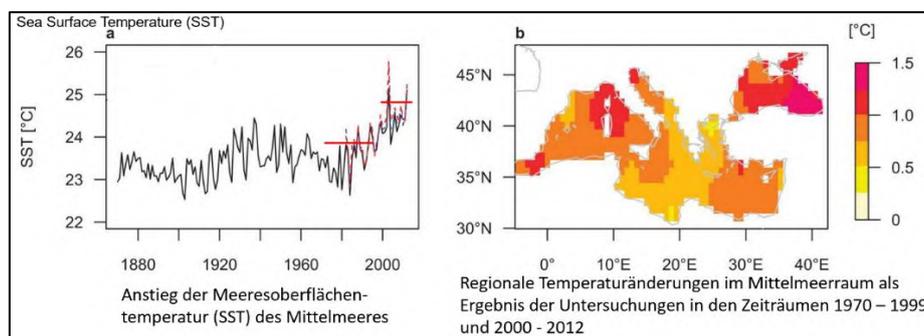
1. Abnahme der Niederschlagsmengen extremer Ereignisse im Sommer (-10% bis -30%)
2. Zunahme der Mengen im Winter/Frühling (+5% bis 15%)

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 10** 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.

Anhang 1 **Abbildung 10: 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."

Entwicklungstendenzen von Hochwasser

Hochwasserentwicklung in den 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.“

Anhang 1 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

Projektionen der Hochwasserentwicklung (Rhein und 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.

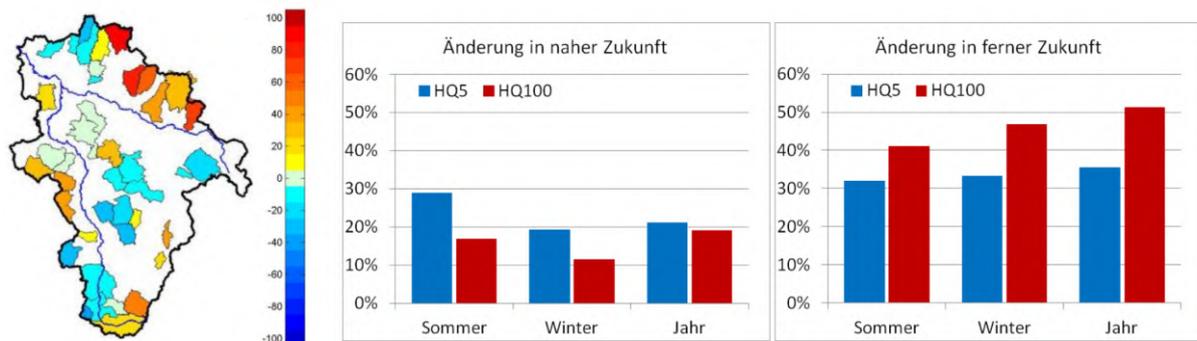
In **Tabelle 6** sind die Veränderungen der mittleren und extremen Hochwasser für den Rhein mit seinen Nebenflüssen Main und Mosel zusammengefasst (IKSR, 2011). Die Angaben in Fettdruck weisen auf eine Zunahme der Hochwassermengen hin (> 5 %).

Anhang 1 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 11** 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 fernereren 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).

Anhang 1 Abbildung 11: Veränderungen der Hochwasserentwicklung im Aller-Leine-Gebiet



Quelle: KLIFF (2013)

Sturzfluten in den vergangenen Jahrzehnten

Sturzfluten werden von kleinräumigen, konvektiven Starkniederschlagsereignissen ausgelöst, wobei die Verweildauer sowie die Orographie am Ort des Ereignisses 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 Starkniederschlagsereignisse 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):

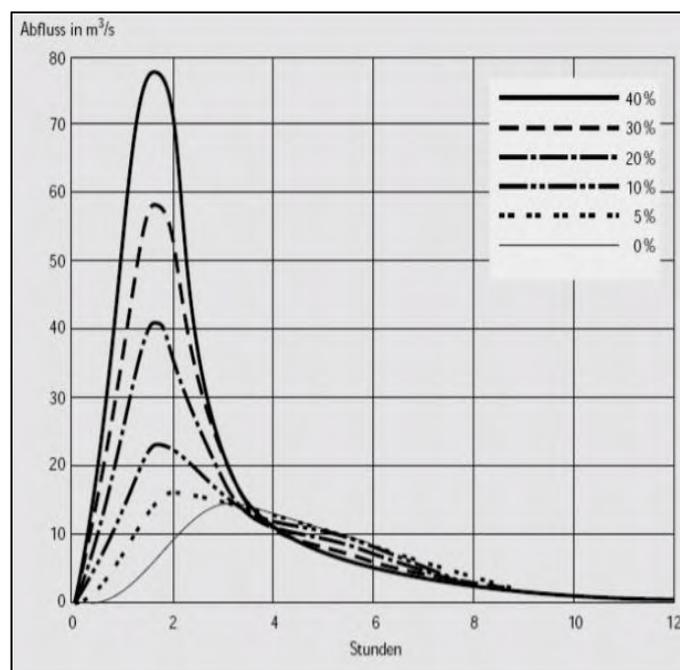
1. begrenztes räumliches und zeitliches Ausmaß
2. intensive meteorologische und hydrologische Prozesse
3. mögliche örtliche Unabhängigkeit von Fließgewässern

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 Niederschlages 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 12** 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.

Anhang 1 Abbildung 12: 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 Starkniederschlagsereignisse 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 Starkniederschlagsereignisse 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.

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 Starkniederschlagsereignisse 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).

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.

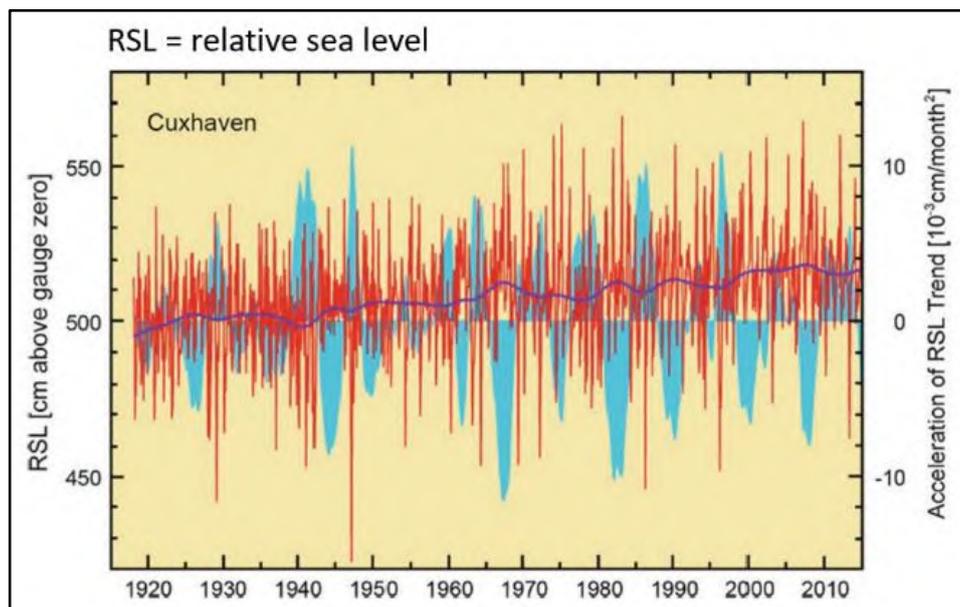
Der Meeresspiegelanstieg erfolgt jedoch weltweit nicht gleichmäßig. Beispielsweise sinkt, außer in der südwestlichen Ostsee, in allen anderen Küstenregionen der Ostsee der relative Meeresspiegel aufgrund der noch stattfindenden nacheiszeitlichen Landhebung (DWD, 2017).

Während der weltweite Anstieg des Meeresspiegels in der Wissenschaft unstrittig ist, zeigt die Sichtung der Literatur, dass sich die Projektionen für den Anstieg des Meerwasserspiegels 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 die 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/a² 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.

Entwicklung des Meeresspiegelanstiegs vergangener Jahrzehnte am Pegel Cuxhaven

In **Abbildung 13** 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.

Anhang 1 **Abbildung 13: Veränderungen des Meeresspiegels sowie Beschleunigung des Meeresspiegelanstiegs an der Messstelle Cuxhaven**

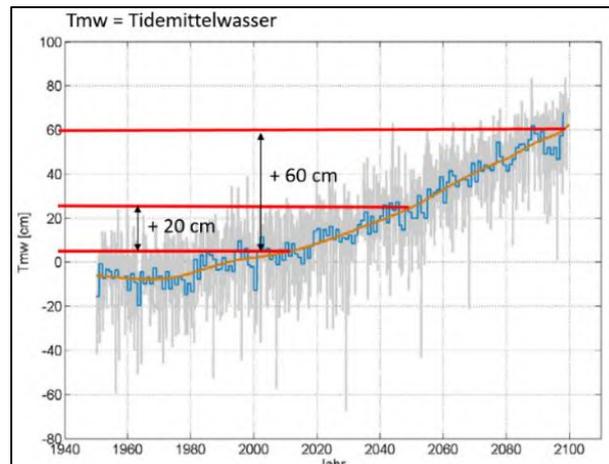


Quelle: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie

Projektionen des Meeresspiegelanstiegs

In der **Abbildung 14** 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.

Anhang 1 Abbildung 14: 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. Auch die Maßnahmen zur Sicherung der Tanklager in den Überseehäfen müssen für zukünftige Sturmflutereignisse an den gestiegenen Meeresspiegel angepasst werden.

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.

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.

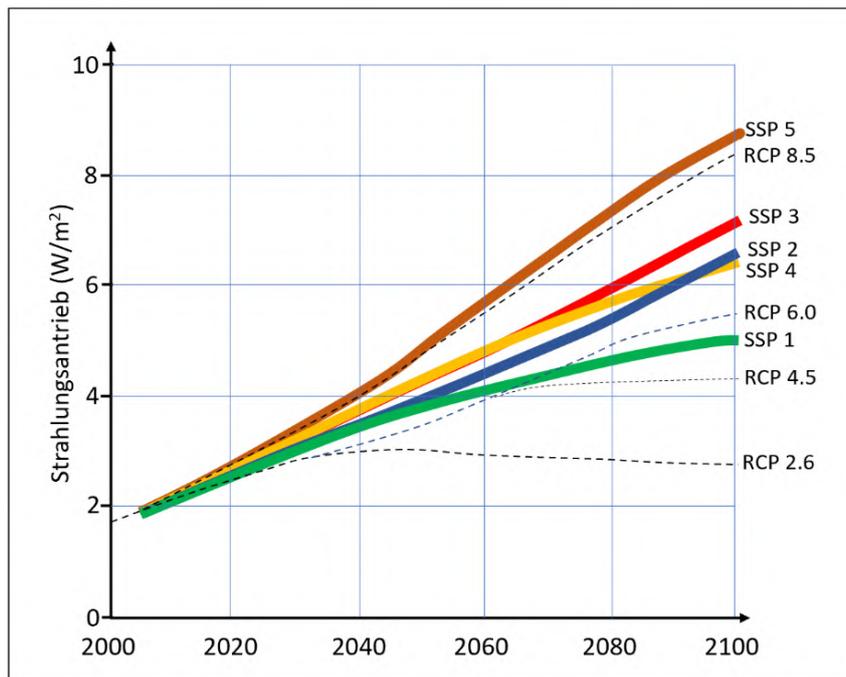
Fünf sozioökonomischen Entwicklungspfad (SSP1 bis SSP5) bilden die folgenden Basis-Szenarien, die die wichtigsten sozioökonomischen, demographischen, technologischen,

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*

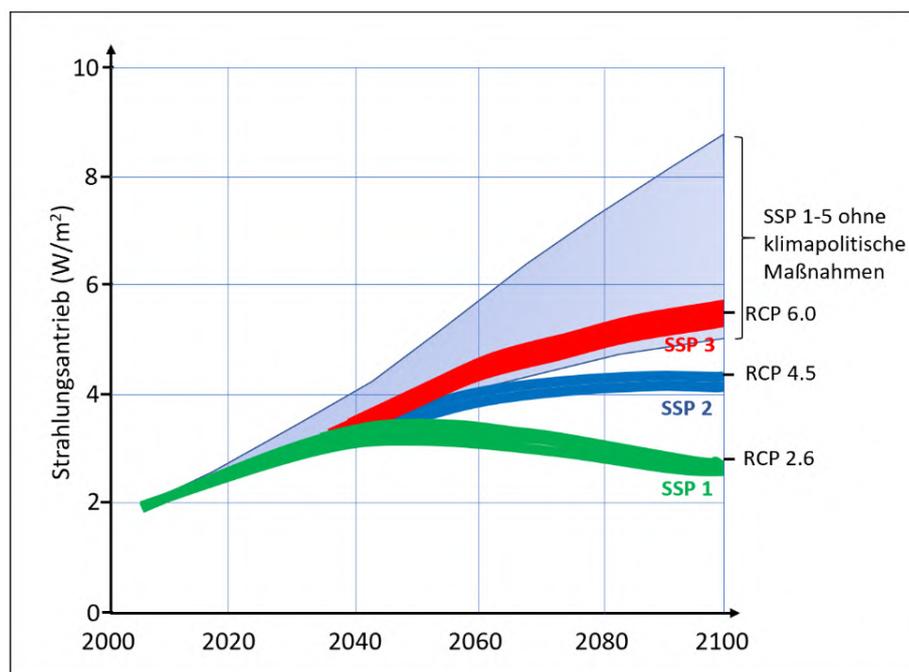
Für eine Vergleichbarkeit mit den RCP-Szenarien ist in **Abbildung 15** der zukünftige Strahlungsantrieb entsprechend den SSP1-5-Szenarien ohne klimapolitische Maßnahmen dargestellt.

Anhang 1 Abbildung 15: Strahlungsantrieb 2005 bis 2100 nach verschiedenen SSP-Basiszenarien ohne klimapolitische Maßnahmen im Vergleich zu RCP-Szenarien.



Demgegenüber werden in **Abbildung 16** 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.

Anhang 1 Abbildung 16: Strahlungsantrieb 2005 bis 2100 nach verschiedenen SSP-Szenarien mit klima-politischen Maßnahmen im Vergleich zu RCP-Szenarien.



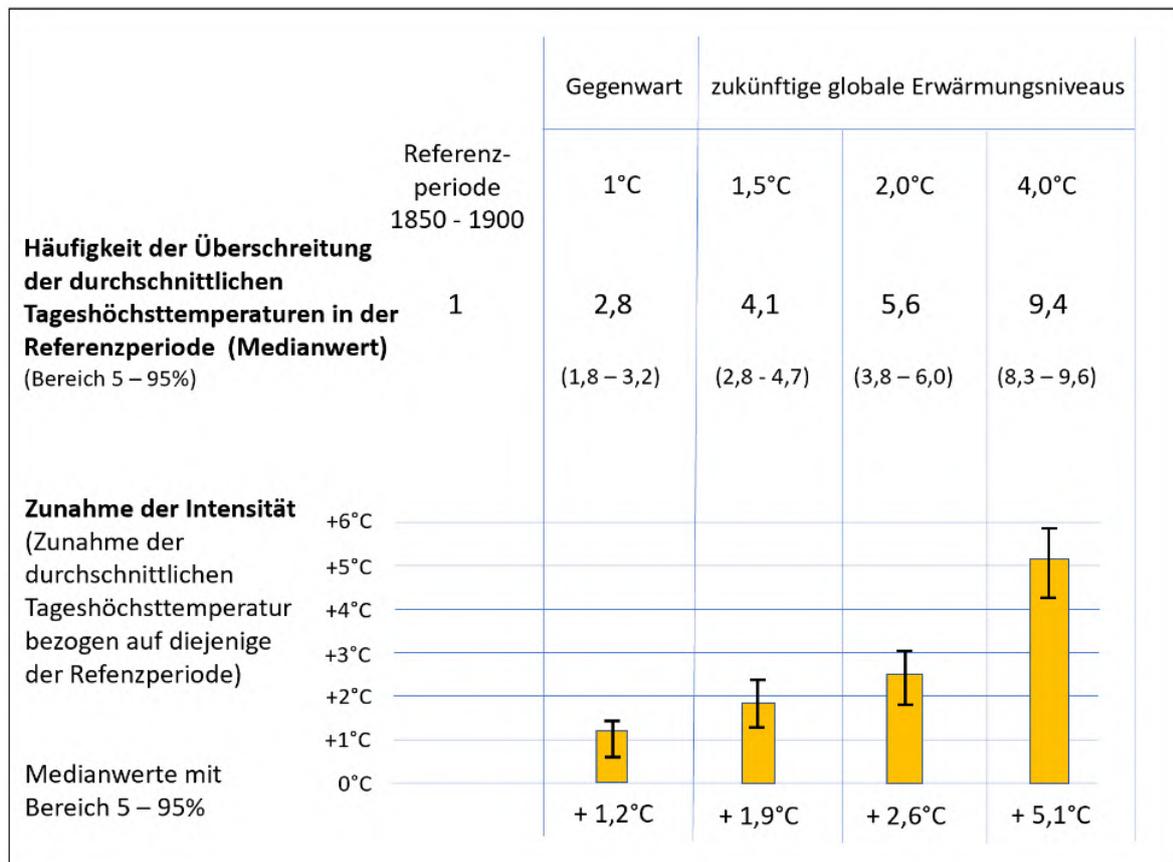
Quelle: Abbildungen 15 und 16 in Anlehnung an:
<https://wiki/bildungsserver.de/klimawandel/index.php/SSP-Szenarie11>

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 17**). Die Intensität liegt dabei um 1,9 °C höher als die Tageshöchsttemperatur der Referenzperiode.

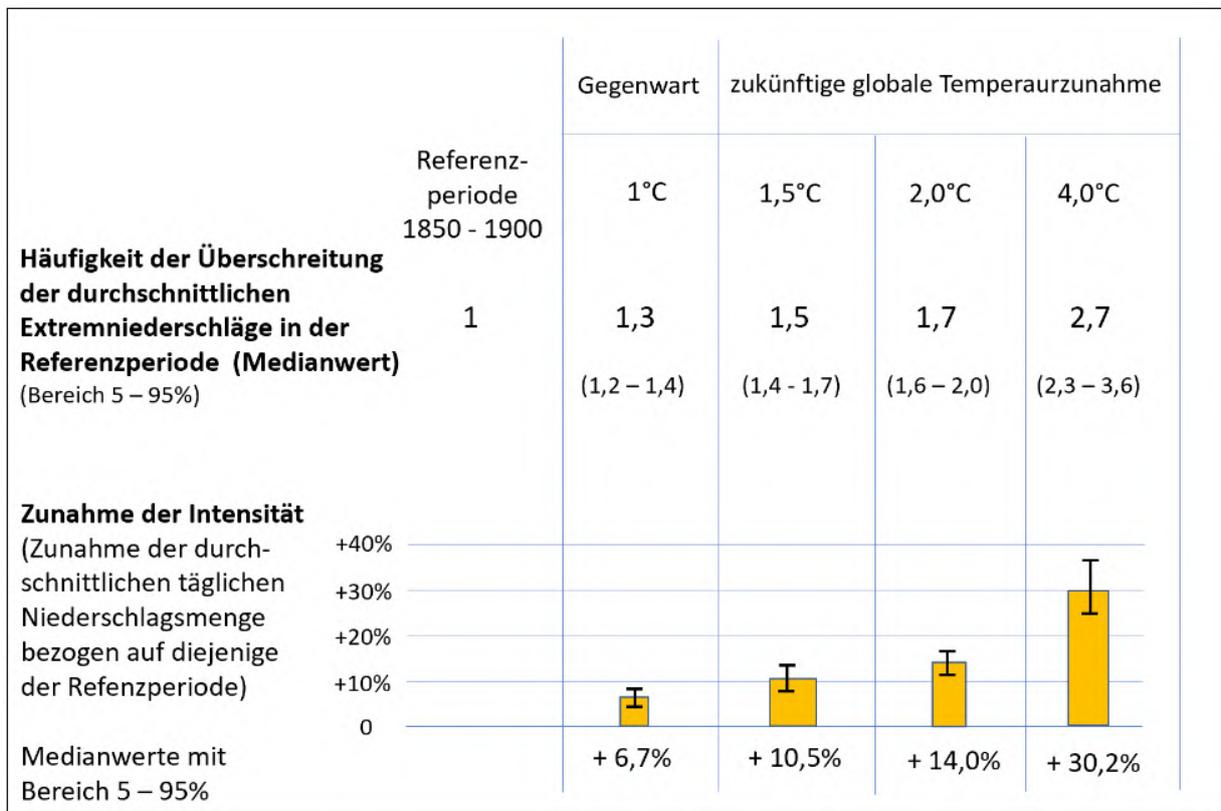
Anhang 1 Abbildung 17: Häufigkeit und Intensitätszunahme extremer Temperaturereignisse, die in einem Klima ohne menschlichen Einfluss durchschnittlich einmal in 10 Jahren auftraten



Quelle: In Anlehnung an: IPCC, 6. AR (2021)

Extremniederschlagsereignisse sind definiert als die tägliche Niederschlagsmenge über Land, die während des Referenzzeitraums 1850–1900 durchschnittlich einmal in einem Jahrzehnt überschritten wurde. In **Abbildung 18** sind analog zu Abbildung 22 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.

Anhang 1 Abbildung 18: Häufigkeit und Intensitätszunahme extremer Niederschläge, die in einem Klima ohne menschlichen Einfluss durchschnittlich einmal in 10 Jahren auftraten



Quelle: in Anlehnung an: IPCC, 6. AR (2021)

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.

Anhang 2 Begriffe

Abflussbeiwert

„Vom Einzugsgebiet abhängiger Faktor, mit dem die Regenmenge je Zeiteinheit multipliziert wird, um den zu erwartenden Regenabfluss zu erhalten, der in das Entwässerungssystem eingeleitet werden soll“ (DIN EN 752). Der Abflussbeiwert (Symbol ψ) liegt zwischen 0 und 1. Ein Abflussbeiwert von 1 (obere Grenze) bedeutet, dass der gesamte Niederschlag zum Abfluss kommt (also nichts versickert oder verdunstet), ein Abflussbeiwert von 0 hingegen bedeutet, dass vom auftreffenden Niederschlag nichts abfließt.

Bemessungshochwasser

In Anlehnung an DIN 4049-3 wird als Bemessungshochwasser jener Zustand in einem oberirdischen Gewässer verstanden, bei dem der Wasserstand oder der Durchfluss den der Bemessung zugrunde gelegten Wert erreicht oder überschritten hat.

Bemessungsregen

Annahme zur Regenwassermenge als Ausgangspunkt für die Bemessung von Regenwasser- oder anderen Abwasserableitungs- oder -versickerungssystemen. Dargestellt wird der Bemessungsregen üblicherweise in der Form $r(D;T)$. Bei einem Regenereignis mit einer Häufigkeit von 5 Jahren T und einer Dauer D von 5 Minuten ergibt sich folgende Darstellung: $r(5;5)$. Die Einheit des Bemessungsregens ist Liter pro Sekunde und Hektar. Der Mittelwert für Deutschland beträgt $311 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{ha})$. Bemessungsregen können KOSTRA-DWD 2000 entnommen werden.

Dauerniederschlag

Lang andauerndes Niederschlagsereignis (> 6 Stunden) mit geringer, sich meist wenig ändernder Niederschlagsintensität und ausgedehntem Niederschlagsfeld.

Bestimmungsgemäßer Betrieb

Bestimmungsgemäßer Betrieb ist entsprechend der Vollzugshilfe des BMU der zulässige Betrieb, für den eine Anlage nach ihrem technischen Zweck bestimmt, ausgelegt, geeignet und zugelassen ist. Der bestimmungsgemäße Betrieb umfasst:

1. den Normalbetrieb, einschließlich betriebsnotwendiger Eingriffe (wie z.B. Probenahme oder Lagerung mit Füll-, Umfüll- und Abfüllbetrieb),
2. den Probetrieb
3. die Inbetriebnahme und den An- und Abfahrbetrieb
4. Instandhaltungsvorgänge wie Reinigungsarbeiten
5. den Zustand bei vorübergehender Außerbetriebnahme

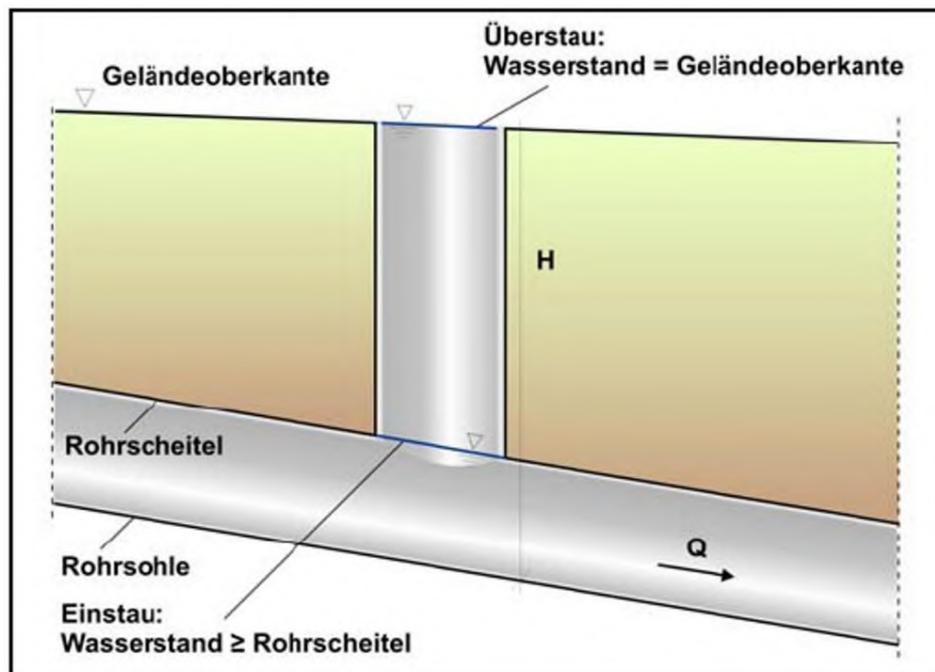
Soweit eine Zulassungspflicht vorliegt, wird der bestimmungsgemäße Betrieb auch durch die Zulassung und ergangene Anordnungen eingegrenzt.

Einstau

Einstau einer Kanalstrecke liegt vor, wenn der Wasserstand über dem Rohrscheitel, aber noch unterhalb der Einstaubene liegt. Der Abfluss erfolgt somit unter Druck.

Zum besseren Verständnis der Begriffe Einstau, Überflutung, Überlastung und Überstau nachfolgend eine Skizze.

Anhang 2 Abbildung 1: Skizze zur Erläuterung der Begriffe Einstau, Überflutung, Überlastung und Überstau



Quelle: Engel (2007)

Eintrittswahrscheinlichkeit

Nach DIN 4049-3 bezeichnet die Eintrittswahrscheinlichkeit oder das hydrologische Risiko jene Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert mit einer bestimmten Jährlichkeit innerhalb einer Zeitspanne von n Jahren erreicht oder überschritten wird.

Ernste Gefahr

Eine ernste Gefahr ist gem. StörfallV § 2 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.

Hochwasser

Hochwasser ist die zeitlich begrenzte Überschwemmung von normalerweise nicht mit Wasser bedecktem Land durch oberirdische Gewässer oder durch in Küstengebiete eindringendes Meerwasser (§ 72 WHG).

Aus hydrologischer Sicht ist Hochwasser die zeitlich begrenzte Zunahme des Abflusses eines Gewässers über dem Basisabfluss, die eine für jeden Abflussquerschnitt aus der Statistik oder den örtlichen Gegebenheiten zu bestimmende Grenze überschreitet, als Folgeerscheinung des Ablaufes meteorologischer (z.B. Frühjahrshochwasser infolge Tauwetter in den Kammlagen) oder künstlich hervorgerufener Ereignisse (z.B. Ablassen einer Talsperre).

Zur Kennzeichnung der Hochwasserereignisse als Bestandteil der hydrologischen Hauptzahlen eines Gewässers an der jeweiligen Messstelle werden häufig verwendet (vgl. DIN 4049):

- a) HW bzw. HQ: höchster Wasserstand (W) bzw. Abfluss (Q) innerhalb eines bestimmten Betrachtungszeitraums (z.B. eines Hochwasserereignisses)
- b) HHW bzw. HHQ: höchster bekannter Wasserstand (W) bzw. Abfluss (Q)
- c) MHW bzw. MHQ: mittlerer Hochwasserstand (W) bzw. -abfluss (Q)

Hochwassergefahrenkarten

Mit Novellierung des Wasserhaushaltsgesetzes 19.6.2020 erfassen Hochwassergefahrenkarten nach § 74 WHG Gebiete, die bei folgenden Hochwasserereignissen überflutet werden könnten:

1. Hochwasser mit niedriger Wahrscheinlichkeit (voraussichtliches Wiederkehrintervall mindestens 200 Jahre) oder Szenarien für Extremereignisse;
2. Hochwasser mit mittlerer Wahrscheinlichkeit (voraussichtliches Wiederkehrintervall mindestens 100 Jahre);
3. gegebenenfalls Hochwasser mit hoher Wahrscheinlichkeit.

Für jedes dieser Szenarien ist anzugeben:

1. Ausmaß der Überflutung;
2. Wassertiefe bzw. gegebenenfalls Wasserstand;
3. gegebenenfalls Fließgeschwindigkeit oder relevanter Wasserabfluss.

Zusammen mit Hochwasserrisikokarten und Hochwasserrisikomanagementplänen dienen Hochwassergefahrenkarten als Grundlage für die Festlegung von Prioritäten sowie für technische, finanzielle und politische Entscheidungen im Bereich des Hochwasserrisikomanagements.

In die Hochwassergefahrenkarten fließen sowohl das vorhandene Wissen über Hochwasserereignisse der Vergangenheit als auch Erkenntnisse über mögliche, zukünftige Ereignisse ein.

Hochwasserrisikogebiete

Risikogebiete 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 Einführung von Risikogebieten nach § 78b WHG 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.

Für die Risikogebiete werden keine Verbote wie bei den festgesetzten Überschwemmungsgebieten ausgesprochen, sondern es werden risikoangepasste Vorsorgemaßnahmen gefordert.

Hochwasserrisikomanagementpläne

In der EU wird die einheitliche Anwendung des Hochwasserrisikomanagements seit dem Jahr 2007 durch die EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) gewährleistet. Die in der Richtlinie gemachten Vorgaben werden durch umfassende Regelungen zum Hochwasserschutz und Hochwasserrisikomanagement im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) in nationales Recht umgesetzt.

Die Hochwasserrisikomanagementpläne erfassen alle Aspekte des Hochwasserrisikomanagements, wobei der Schwerpunkt auf Vermeidung, Schutz und Vorsorge, einschließlich Hochwasservorhersagen und Frühwarnsystemen, liegt. Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten sind Bestandteile der Hochwasserrisikomanagementpläne. Darüber hinaus sollen u.a. eine Übersichtskarte des Flussgebiets, eine Beschreibung der Ziele des Hochwasserrisikomanagements (z.B. Verringerung möglicher nachteiliger Hochwasserfolgen für die Schutzgüter) und die Maßnahmen zur vorbeugenden Hochwasserabwehr (einschließlich deren Rangfolge) in die Hochwasserrisikomanagementpläne aufgenommen werden.

Hochwasserrisikomanagementpläne umfassen vor allem auch Maßnahmen zur Verringerung potentieller hochwasserbedingter nachteiliger Folgen für die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und wirtschaftliche Tätigkeiten und beinhalten die in Teil A des Anhangs der EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, 2007 beschriebenen Bestandteile. Die Hochwasserrisikomanagementpläne berücksichtigen relevante Aspekte, wie etwa Kosten und Nutzen, Ausdehnung der Überschwemmung und Hochwasserabflusswege und Gebiete mit dem Potenzial zur Retention von Hochwasser, wie z. B. natürliche Überschwemmungsgebiete, die umweltbezogenen Ziele des Artikels 4 der Wasserrahmenrichtlinie der EU, 2000, Bodennutzung und Wasserwirtschaft, Raumordnung, Flächennutzung, Naturschutz, Schifffahrt und Hafeninfrastruktur.

Jährlichkeit

Nach DIN 4049-1 wird als Jährlichkeit oder Wiederholungszeitspanne (auch: Wiederkehrintervall) die mittlere Zeitspanne bezeichnet, in der ein Ereignis einen Wert entweder einmal erreicht oder überschreitet bzw. einmal erreicht oder unterschreitet.

KOSTRA-DWD

KOSTRA-DWD ist eine vom Deutschen Wetterdienst autorisierte digitale Datenbank mit Niederschlagshöhen für Deutschland in Abhängigkeit von Dauerstufe und Wiederkehrzeit. KOSTRA steht für **Ko**ordinierte **St**arkniederschlags**r**egionalisierung und **A**uswertung des DWD.

Regenabfluss

„Niederschlagswasser, das auf einer Oberfläche in ein Entwässerungssystem oder einen Vorfluter abfließt“ (DIN EN 752, 2008)

Rückstauenebene

Die Rückstauenebene markiert den höchstmöglichen Stand des Abwassers an einer bestimmten Stelle in einem Kanalsystem. Soweit nichts anderes festgelegt ist, gilt an der Anschlussstelle des Grundstücksentwässerungskanal die Straßenoberkante (genauer: Geländehöhe der Schachtabdeckung) als maßgebende Rückstauenebene (vgl. auch Rückstaulinie).

Rückstaulinie

Berechneter oder tatsächlich auftretender Wasserstand des Abwassers in einem Entwässerungssystem infolge der hydraulischen Bedingungen stromabwärts (DIN EN 752, 2008, vgl. auch Rückstauenebene).

Starkniederschlag

Von Starkniederschlag spricht man bei großen Niederschlagsmengen je Zeiteinheit, der meist als lokales Ereignisauftritt (Niederschlagsfeld < 10 km²). Starkniederschlag kann überall auftreten und zu schnell ansteigenden Wasserständen und (bzw. oder) zu Überschwemmungen führen.

Sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA)

Als sicherheitsrelevante Anlagenteile sind alle Apparate, Maschinen, Systeme, Ausrüstungsteile oder Einrichtungen anzusehen, von deren Auslegung, Beschaffenheit und Funktionsweise in besonderer Weise die Sicherheit der Anlage und die Begrenzung von Störfallauswirkungen abhängen. Sicherheitsrelevante Anlagenteile sind

1. Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt sowie
2. Anlagenteile mit besonderer Funktion.

Sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) mit besonderem Stoffinhalt sind Anlagenteile, in denen ein Stoff, der von Anhang I der StörfallV erfasst ist, in sicherheitstechnisch relevanter Menge vorhanden sein kann.

Hinweise zur Ermittlung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt gibt der Bericht „Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) und sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches (SRB)“ (KAS-1, 2006).

Sicherheitsrelevante Teile des Betriebsbereiches (SRB)

Sicherheitsrelevante Teile des Betriebsbereiches (SRB), wie in § 4 Nr. 4 und Anhang II Nr. III.1 StörfallV genannt, sind die Anlagen, in denen Stoffe nach Anhang I StörfallV in relevanten Mengen vorhanden sind, und die Anlagen, deren Betrieb zur Verhinderung von Störfällen oder zur Begrenzung von „Dennoch-Störfällen“ erforderlich sind. Sie sollen damit von den

„konventionellen“ Bereichen auf dem Betriebsgelände abgegrenzt werden, in denen gefährlichen Stoffe nicht in relevanten Mengen vorhanden sind und die nicht unmittelbar für den sicheren Betrieb erforderlich sind, wie Verwaltungsgebäude, Werkstattgebäude etc.

Stand der Sicherheitstechnik

Gem. StörfallV § 2 wird als Stand der Sicherheitstechnik jener Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen bezeichnet, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Verhinderung von Störfällen oder zur Begrenzung ihrer Auswirkungen gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Sicherheitstechnik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind.

Dies gilt auch für die technischen Vorkehrungen und organisatorischen Maßnahmen, die zur Verhinderung von Störfällen oder zur vorbeugenden Begrenzung von Störfallauswirkungen aufgrund der aus den auslösenden Ereignissen folgenden Gefahrenquellen erforderlich sind.

Störfall

Ein Störfall ist gem. StörfallV § 2 ein Ereignis, wie z. B. eine Emission, ein Brand oder eine Explosion größeren Ausmaßes, das sich aus einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs in einem unter die StörfallV fallenden Betriebsbereich oder in einer unter die StörfallV fallenden Anlage ergibt, das unmittelbar oder später innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs oder der Anlage zu einer ernststen Gefahr oder zu Sachschäden (gemäß StörfallV Anhang VI Teil 1 Ziffer I Nr. 4) führt und bei dem ein oder mehrere gefährliche Stoffe beteiligt sind.

Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs

Eine Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs bzw. Betriebsstörung eine sicherheitstechnisch bedeutsame Abweichung vom bestimmungsgemäßen Betrieb. So liegt bei Anlagen mit EMSR-Einrichtungen (Elektro-, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik) eine Betriebsstörung z.B. dann vor, wenn eine sicherheitsrelevante Prozessgröße unter Berücksichtigung der Toleranzen des Messsystems den Grenzwert in Richtung des unzulässigen Bereichs der Überwachungseinrichtung verlässt.

Sturzflutereignisse

Insbesondere durch konvektive Starkniederschlagsereignisse ausgelöstes, schnell (i.d.R. in Minuten bis Stunden Vervielfachung des Abflusses) eintretende Überflutung oder eintretendes Hochwasser, häufig verbunden mit starker Strömung und Treibgut. Weitere relevante Ursachen von Sturzflutereignissen sind Gletscherseeausbrüche oder das Versagen von Talsperren.

Überlastung

„Zustand, bei dem Schmutzwasser und/oder Niederschlagswasser in einem Freispiegelsystem oder in einer Kanalisation unter Druck abfließen, aber nicht an die Oberfläche gelangen und so keine Überflutung verursachen (DIN EN 752, 2008).

Überlastung einer Kanalstrecke besteht z.B. dann, wenn der Wasserstand höher liegt als der Rohrscheitel. Dann geht die Art des Abflusses vom Freispiegelabfluss über in Abfluss unter Druck (vgl. Anhang 2, Abb 1).

Überschwemmungsgebiete

Überschwemmungsgebiete sind nach dem Wasserhaushaltsgesetz Gebiete zwischen oberirdischen Gewässern und Deichen oder Hochufern und sonstige Gebiete, die bei Hochwasser überschwemmt oder durchflossen oder die für Hochwasserentlastung oder Rückhaltung beansprucht werden. Die EG-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie, 2007 hebt die Bedeutung der Überschwemmungsgebiete als natürliche Retentionsflächen hervor. Überschwemmungsgebiete werden durch die Landesregierungen auf der Grundlage eines HQ₁₀₀ festgesetzt.

Überstau

Ein Überstau liegt vor, wenn der Wasserstand einen vorgegebenen Kontrollquerschnitt überschreitet. Das Bezugsniveau kann die der Anlage sind dies: 1. Maßnahmen (GOK), aber auch ein darunter liegendes Niveau sein (vgl. Abbildung 1).

Vorfluter

„Jedes Gewässer, in das Wasser oder Abwasser eingeleitet wird“ (DIN EN 752, 2008)

Wellenauflauf

Als Wellenauflauf wird der vertikale Abstand zwischen dem Ruhewasserspiegel und der Höhe der auf der Böschung des Deiches auslaufenden Welle verstanden.

Der Wellenauflauf wird u. a. beeinflusst von

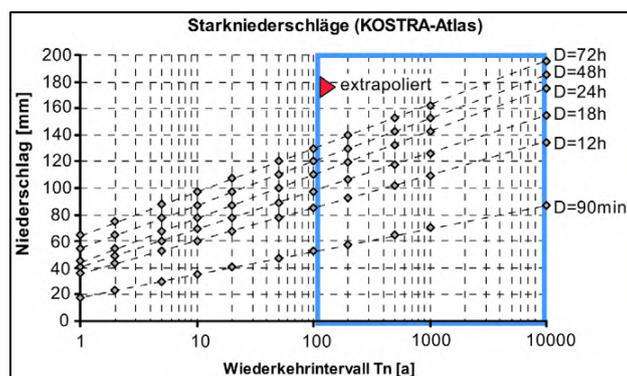
1. Struktur des Deiches (u. a. seeseitige Neigung, Vorstrandgeometrie, Oberflächenrauheit),
2. Wellenparameter (Wellenhöhe, Wellenperiode, Wellenrichtung, Wellenspektrum),
3. Windparameter (Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Winddauer).

Kurze, steile Böschungen erzeugen deutlich größere Wellenaufläufe, als Böschungen, die über eine größere Strecke flach ansteigen.

Anhang 3 Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN)

Auf der Grundlage der KOSTRA-Messreihen, die für Jährlichkeiten von 1 bis 100 Jahren ausgewertet wurden, konnten durch Extrapolation praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN) für Jährlichkeiten bis 10.000 Jahren bei verschiedenen Dauerstufen zwischen 15 Minuten und 72 Stunden gewonnen werden. Durch halblogarithmische Auftragung der Jährlichkeiten und Niederschlagshöhen ergibt sich ein linearer Zusammenhang (Verworn und Kummer, 2003).

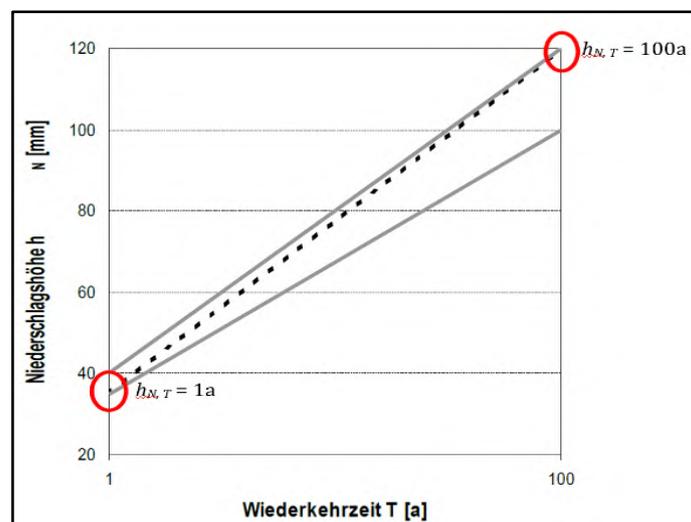
Anhang 3 Abbildung 1: Beispiel zur Extrapolation der Niederschläge für ein Rasterfeld aus dem KOSTRA-Atlas (MUNLAV, 2004)



Die im Rahmen der TRAS 310 zu ermittelnden Niederschlagshöhen für die anzusetzenden Jährlichkeiten von 200 bzw. 500 Jahren können wie folgt berechnet werden:

Zur Berechnung der PEN-Werte werden die Niederschlagshöhen für Jährlichkeiten von einem und hundert Jahren für die jeweilige Niederschlagsdauer benötigt. Weil die Niederschlagshöhen jeweils als Bereiche angegeben sind, wird für die Jährlichkeit von einem Jahr die untere Bereichsgrenze und für hundert Jahre die obere Bereichsgrenze gewählt (**Abbildung 2**).

Anhang 3 Abbildung 2: Bereichsgrenzen der KOSTRA-Funktion



Für die Extrapolation wird der Achsenabschnitt u und die Steigung der Geraden w benötigt.

$$\text{Achsenabschnitt } u: \quad u = h_{N,T=1a}$$

$$\text{Steigung } w: \quad w = \frac{h_{N,T=100a} - u}{\ln 100}$$

Durch Einsetzen der Werte für u und w kann die Niederschlagshöhe für die vorgegebene Jährlichkeit wie folgt errechnet werden:

$$h_{N,T} = u + w * \ln T$$

mit $T = 200$ Jahre oder 500 Jahre

Beispiel:

Für einen Betrieb soll eine Niederschlags-/Abflussberechnung durchgeführt werden. Für die Dauerstufe 1 Stunde sollen hierfür die PEN-Werte für Jährlichkeiten von 200 und 500 Jahren ermittelt werden.

KOSTRA gibt folgende Werte an:

$$h_{N,T=1a} = 15 \text{ mm}$$

$$h_{N,T=100a} = 55 \text{ mm}$$

Hieraus ergibt sich:

$$u = 15$$

$$w = (55 - 15) / \ln 100 = 8,68$$

$$h_{N,T=200} = 15 + 8,68 * \ln 200 = 61 \text{ mm}$$

$$h_{N,T=500} = 15 + 8,68 * \ln 500 = 69 \text{ mm}$$

Die Ergebnisse sind jedoch kritisch zu bewerten, weil sie eine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen. Daher empfiehlt es sich grundsätzlich eine um 20 bis 30 mm höhere Niederschlagshöhe anzusetzen als errechnet. Dies leitet sich aus den Bereichsangaben für eine flächendeckende Festlegung der Starkniederschläge ab (Verworn und Kummer, 2003). Darüber hinaus ist zu prüfen, ob entsprechend den Anforderungen der TRAS 310 der Klimaanpassungsfaktor zu berücksichtigen ist.

Anhang 4 Hinweise zur Entwicklung eines Schutzkonzeptes gegen Überflutung

Zur Auswahl geeigneter Maßnahmen und Einrichtungen zum Hochwasserschutz bzw. zum Schutz vor Überflutungen ist die Kenntnis der Rahmenbedingungen eines Ereignisses von entscheidender Bedeutung. Hierzu zählen im Einzelnen:

Wasserstand

Für einen wirksamen Schutz ist die Kenntnis möglicher Wasserstände erforderlich. Hierzu ist eine enge Abstimmung mit den Behörden erforderlich.

Strömungsgeschwindigkeit

Je nach Lage des Betriebes müssen auch die möglichen Strömungsgeschwindigkeiten berücksichtigt werden, weil hierdurch erhebliche Kräfte auf Anlagen ausgeübt werden können. Dies gilt insbesondere für Anlagen an Gebirgsbächen sowie für Anlagen unmittelbar hinter Deichen, die durch einen Deichbruch gefährdet werden könnten. Die Strömungsgeschwindigkeit ist auch bei der Auswahl von mobilen Schutzwänden zu berücksichtigen.

Treibgut

Die Gefahren durch Treibgut sind vor allem bei Gewässern mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten zu beachten.

Eisgang

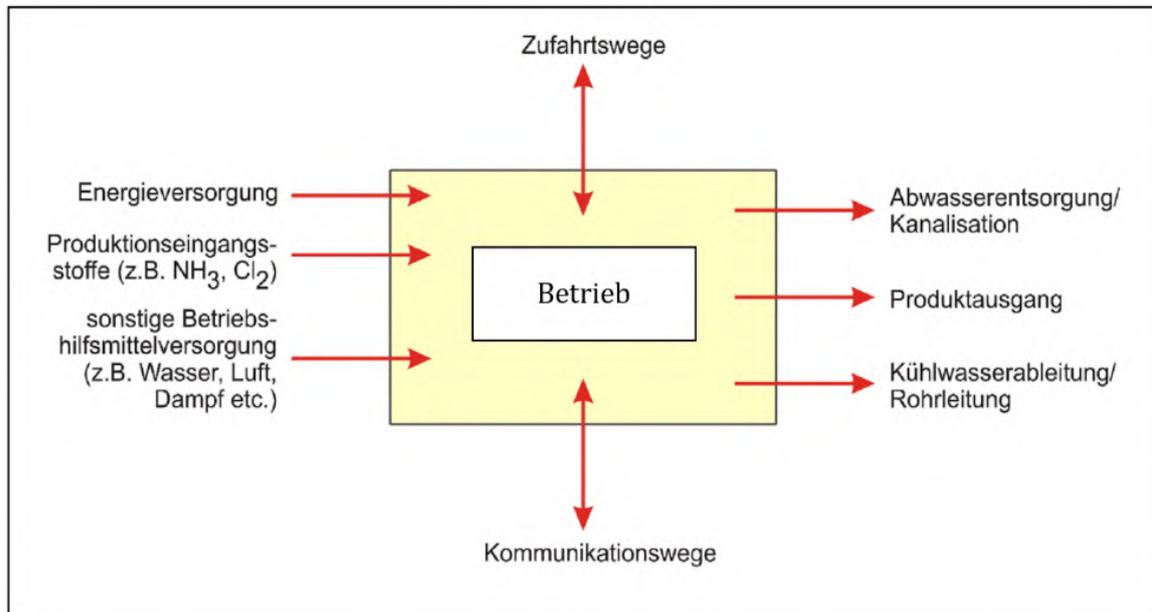
Auch durch Eisgang können Beschädigungen an Anlagen hervorgerufen werden. Daher sollte auch der Eisgang bei betrieblichen Maßnahmen nicht unbeachtet bleiben.

In den folgenden Abschnitten werden die in der Praxis realisierten technischen Vorkehrungen und organisatorischen Maßnahmen beschrieben, die den gegenwärtigen Stand der Technik zum betrieblichen Hochwasserschutz repräsentieren. Dabei wird zwischen trockener und nasser Vorsorge unterschieden.

Stand der Technik zur trockenen Vorsorge

Die trockene Vorsorge kann entweder am Gebäude selbst oder um das Gebäude bzw. den Betriebsbereich herum erfolgen. In der Regel wird bei der trockenen Vorsorge primär versucht, den gesamten Betriebsbereich bzw. das ganze Betriebsgelände vor Hochwasser zu schützen. Hierzu ist es erforderlich, alle potentiellen Schnittstellen zwischen äußerem und innerem Bereich zu ermitteln (**Abbildung 1**). Die trockene Vorsorge kann durch stationäre und instationäre Maßnahmen sicher gestellt werden.

Anhang 4 Abbildung 1: Schnittstellen bei der trockenen Vorsorge



Quelle: Warm et al. (2007)

Stationäre Maßnahmen

Der Stand der Technik stationärer Maßnahmen kann wie folgt zusammengefasst werden:

1. Anheben des Geländeniveaus

Ein Chemieunternehmen ließ vor dem Bau neuer Produktionsanlagen wegen der festgestellten Hochwassergefährdung ihr Betriebsgelände anheben. Somit wurde eine Überschwemmung im August 2002 verhindert. Das Anheben des Geländeniveaus ist ein sicherer Weg, Betriebe zu schützen, jedoch in der Regel nur bei Neuanlagen realisierbar. Ob bei älteren Betriebsbereichen eine Anhebung des Geländes möglich ist, muss im Einzelfall betrachtet werden. Denkbar ist auch eine lokale Anhebung einzelner Anlagen. Auf diese Weise wird auch ein höherer Schutzgrad vor Treibgut erreicht.

2. Eindeichung

Größere Betriebsbereiche werden oftmals durch Deiche geschützt, wie z.B. Tanklager in Raffinerien. Das mit diesen Maßnahmen erreichbare Schutzniveau ist jedoch nicht dem bei einer ausreichenden Höhenlage gleichzusetzen, weil das Risiko z.B. eines Deichversagens oder der Beschädigung durch Treibgut oder Eis je nach Anlagenstandort bestehen bleibt. Zur Erreichung eines hohen Schutzniveaus hat die Errichtung von Flussdeichen nach dem Stand der Technik zu erfolgen, der in DIN 19712 dargelegt ist.

3. Schutzwände

Feste Schutzwände werden z. B. zur Sicherung zahlreicher chemischer Betriebe am Rhein eingesetzt. Grundlage zur Bemessung der Höhe der Schutzwände ist das in den Gefahrenkarten ausgewiesene Wasserstand über dem Betriebsgelände bei einem Extremhochwasser.

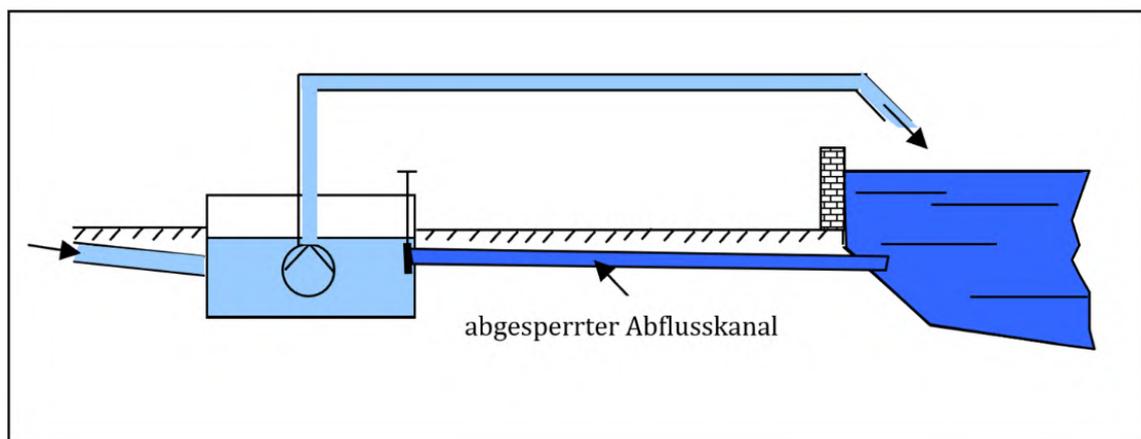
4. Kanalverschlüsse

Sichere Verschlussysteme für Abwasserkanäle oder Kühlwasserableitungen sind Rückschlagklappen, die den Wasserdruck des Gewässers nutzen, um den Wassereintritt in das betriebliche Kanalsystem zu verhindern. Nachteilig bei derartigen Systemen ist, dass mit einem solchen Verschluss auch kein Wasser mehr abgeleitet werden kann.

Verschlussysteme sind auch für private Heizöltanks von großer Bedeutung und sollten standardmäßig für Anlagen in überschwemmungsgefährdeten Gebieten eingebaut werden. Produktionsbetriebe, die weder Abwasser noch Kühlwasser abgeben können, müssen u. U. die Produktion herunterfahren.

Um den Produktionsbetrieb möglichst lange aufrechterhalten zu können, kann die Abgabe von Kühlwasser und Oberflächenwasser über eine Druckrohrleitung erfolgen, die über die Hochwasserschutzwand führt, wobei der normale Kanal abgeschiebert wird. Das in Abbildung 2 dargestellte Ableitungssystem wird in der Regel auch in Kläranlagen eingesetzt, die wie am Niederrhein durch Deiche geschützt sind.

Anhang 4 Abbildung 2: Oberflächen- und Kühlwasserableitung



Quelle: Warm et al., 2007

Inwieweit die Entnahme von Kühlwasser durch Hochwasser gefährdet wird, muss im Einzelfall geprüft werden. Zahlreiche Unternehmen beziehen ihr Kühlwasser direkt aus dem Gewässer und/oder aus Brunnen als Uferfiltrat. Mit Einstellung der Kühlwasserversorgung muss durch Verschlussysteme (z. B. Schieber) sichergestellt sein, so dass kein Wasser über die Kühlwasserversorgungsleitungen auf das Betriebsgelände gelangen kann.

5. Speicherbehälter für Abwasser

Die Ableitung von Abwasser ist immer dann eingeschränkt, wenn die nachgeschaltete Kläranlage vom Hochwasser bedroht ist und gegebenenfalls abgeschaltet werden muss. Dies kann nicht nur direkt einleitende, sondern auch indirekt einleitende Betriebe betreffen. In diesen Fällen kann es für die Aufrechterhaltung der Produktion bedeutsam sein, wenn eine Zwischenspeicherung des Abwassers möglich ist. So kann das Abwasser z.B. in einem Speicher gesammelt werden, der für mehrere Tage die Produktionsabwässer der verschiedenen Betriebe aufnehmen kann.

6. Energieversorgung

Die Energieversorgung muss, solange Produktionsanlagen in Betrieb sind, zu jedem Zeitpunkt gewährleistet sein. Dies bedeutet, dass eine doppelte unabhängige Einspeisung über 2 Schienen vorhanden sein muss. Dies stellen zahlreiche Betriebsbereiche z.B. über eine Notstromversorgung (meist Notstromgenerator mit Dieselaggregat) sicher, damit ein ordnungsgemäßes Abfahren der Anlage gewährleistet ist (Betriebsbereiche müssen über eine Notstromversorgung zumindest mit Batteriepufferung verfügen). Für die relevanten MSR/ PLT-Systeme zum sicheren Abfahren oder so genannten Stillstands-HOLD können auch Batterien eingesetzt werden.

Für den Fall eines sogenannten Stand-By-Betriebes im Hochwasserfall muss die Kraftstoffreserve für das Notstromdieselaggregat auf die voraussichtliche Hochwasserdauer bemessen sein. Kann eine sichere Stromversorgung nicht sichergestellt werden, sollten die gefährdeten Anlagen vorsorglich heruntergefahren werden.

7. Betriebshilfsmittelversorgung

Die Versorgungsleitungen für die verschiedenen Betriebshilfsmittel befinden sich bei größeren Industrieparks u. U. außerhalb von z. B. eingedeichten Flächen. Es muss für den jeweiligen Standort sichergestellt werden, dass eine Beschädigung der Versorgungsleitungen nicht zu befürchten ist. Da es sich oftmals um Rohrbrücken handelt, ist insbesondere die Gefahr von Treibgut zu beachten. Im Einzelnen sind folgende Maßnahmen zur Sicherung der Betriebsmittelversorgung bei Hochwasser zu nennen:

1. Druckluftversorgung durch Not-Kompressor mit Dieselaggregat
2. Stickstoffversorgung durch ausreichende Speicherung
3. Not-Kompressor mit Dieselaggregat
4. Reinwasserversorgung
5. Kühlwasserversorgung durch ausreichende Kühlwasserspeicherung in Tanks oder Ponds
6. ständige Druckhaltung durch Jockeypumpensysteme mit Umlaufregelung
7. Kühlwasserentnahmeanschluss an Gewässer
8. Notkühlwasserpumpen mit Dieselantrieb
9. ausreichende Lagermengen von Dieselkraftstoff

Die Kalkulation der Lagermenge von Dieselkraftstoff oder der Rückhaltekapazität für Abwasser hängt, wie zuvor schon erläutert wurde, von der voraussichtlichen Dauer der Hochwasserwelle ab.

8. Kommunikationswege

Entscheidend für alle organisatorischen Maßnahmen ist die Kommunikation mit den Katastrophenschutzämtern. Wie die Ereignisse im August 2002 gezeigt haben, waren wegen der schweren Regenfälle die Funkmasten der Handy-Netze in den betroffenen Regionen

teilweise zerstört oder deren Energieversorgung beendet. Daher ist es erforderlich, unterbrechungsfreie Standleitungen mit einer Eigenstromversorgung über Festnetz zu den Behörden zu installieren. Darüber hinaus dürfen nicht alle Rufnummern der Öffentlichkeit bekannt sein, weil sonst die Leitungen überlastet werden.

Instationäre Maßnahmen

Ist ein ausreichender stationärer Hochwasserschutz aufgrund komplexer Anlagenstrukturen aus Gründen der Logistikverbindungen, wie z. B. Straßen- oder Wasserstraßenanbindung oder aus Gründen der Geländestruktur nicht möglich, dann müssen entsprechende Maßnahmen und Einrichtungen des mobilen Hochwasserschutzes Anlagen und Betriebsbereiche schützen. Dieses sind mobile Sperren mit gleichzeitigen Entwässerungssystemen der gefährdeten Bereiche.

Vom Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (BWK, 2005) wurde ein Merkblatt zum mobilen Hochwasserschutz mit folgenden Zielen vorgelegt:

1. Darstellung der Grundlage für den sicheren und gezielten Einsatz von planbaren, mobilen Hochwasserschutzsystemen
2. Entwicklung von Kriterien für Konstruktion, Statik, Gründung und Logistik
3. Formulierung von Mindestanforderungen der Standsicherheit, Betriebssicherheit und funktionalen Sicherheit
4. Erarbeitung von Auswahlkriterien verschiedener Systeme und Konstruktionen unter Abwägung des Risikos
5. Entwicklung von Prüfkriterien für die Eignung planbarer, mobiler Hochwasserschutzsysteme in Form genereller Kriterien ohne Berücksichtigung spezieller Standortgegebenheiten

Das BWK-Merkblatt bietet eine Grundlage für den sicheren und gezielten Einsatz von planbaren, mobilen Hochwasserschutzsystemen. Allen instationären Maßnahmen ist gemeinsam, dass die Zeit bis zum Eintreten eines Hochwassers länger sein muss als die Zeit, die zum Aufbau derartiger Systeme erforderlich ist. Wichtigste Voraussetzung für die Wahl solcher Systeme sind somit die rechtzeitigen Warnmeldungen der zuständigen Behörden oder Dienstleister. Diese Voraussetzung ist für die meisten größeren Flüsse in Deutschlands gegeben. Problematischer sind dagegen Sturzflutereignisse, die in sehr kurzer Zeit nach Beginn eines Starkniederschlagsereignisses auftreten können und den rechtzeitigen Aufbau instationären Schutzsysteme nicht mehr zulassen (vgl. Anhang 6).

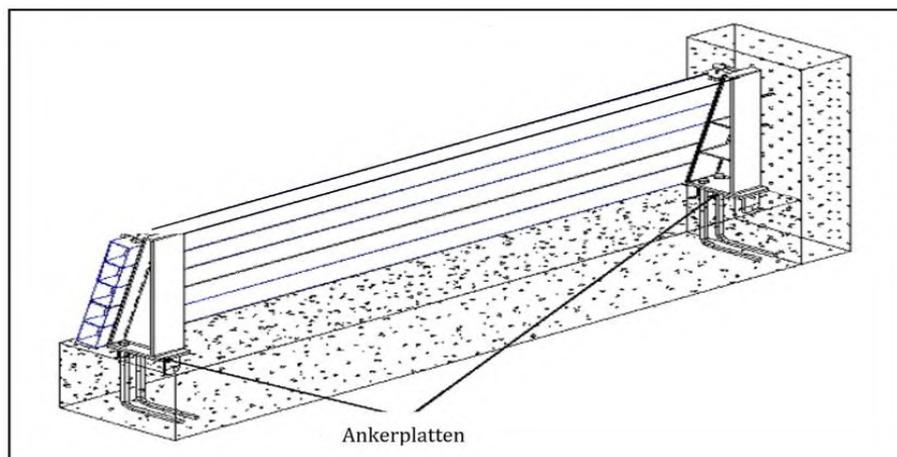
"Mobile Hochwasserschutzsysteme können unterschieden werden in Systeme *mit* und *ohne* permanente Vorkehrungen. Systeme mit permanenten Vorkehrungen kommen grundsätzlich geplant zum Einsatz. Dagegen können Systeme ohne permanente Vorkehrungen sowohl geplant als auch notfallmäßig zum Einsatz kommen. Beim notfallmäßigen Einsatz sind keinerlei Randbedingungen zum Einsatzort und der zu beherrschenden Gefahr bekannt. Daher sind die Unsicherheiten beim geplanten Einsatz wesentlich geringer als bei einem notfallmäßigen Einsatz" (Warm et al., 2007).

Im BKW-Merkblatt wird zwar das gesamte Spektrum der derzeit verfügbaren Systeme des mobilen Hochwasserschutzes beschrieben, jedoch wird ausdrücklich festgestellt, dass die statischen, geotechnischen und logistischen Bemessungskriterien sich auf solche Systeme beschränken, bei denen ein gesicherter Kraftschluss mit dem Untergrund gewährleistet werden kann. Nur unter diesen Bedingungen lassen sich bestimmte Sicherheitsanforderungen nachweisen. Für den Schutz von Betriebsbereichen, betrieblichen AwSV-Anlagen und Flüssiggastankanlagen ergibt sich somit der Stand der Technik durch den gesicherten Kraftschluss mit dem Untergrund und dem damit verbundenen sicherheitstechnischen Nachweis. Darüber hinaus ist die Festigkeit des Systems gegen Treibgut ein weiteres Kriterium.

1. Systeme mit permanenten Vorkehrungen

Beispiele für häufig eingesetzte Systeme mit permanenten Vorkehrungen für die Sicherung von SRA und SRB sind Dammbalkensysteme und Torsysteme, die in Hochwasserschutzmauern integriert sind. In **Abbildung 3** ist das Beispiel eines Dammbalkensystems dargestellt.

Anhang 4 **Abbildung 3:** Sicherung und Aufbau eines Dammbalkensystems



Quelle: Warm et al. (2007)

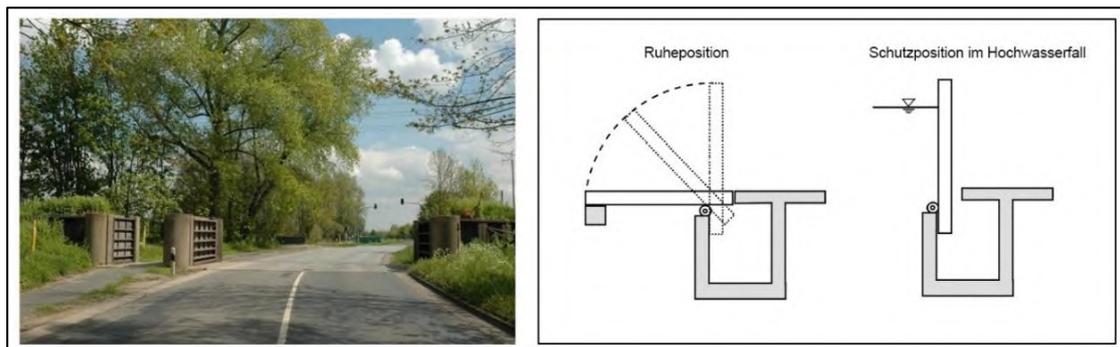
Um die jeweiligen Staudrücke aufnehmen zu können, müssen mobile Schutzwände fest im Boden verankert werden. Grundlage einer Berechnung muss der hydrostatische Wasserdruck aus Höhe und Anströmgeschwindigkeit, das Eigengewicht nach DIN 1055 sowie ein zu bemessender Zuschlag zur Aufnahme von Kräften durch Treibgut sein. (Berechnungsgrundlage in Anlehnung an DIN 19704 und nach DIN 19569). Das bislang am häufigsten ausgeführte Dammbalkensystem besteht aus einzeln übereinander gestapelten Balken mit seitlichen Befestigungen in Mauernischen sowie an demontierbaren oder fest eingebauten Stützen. Als Dammbalken werden beispielsweise verzahnte, untereinander abgedichtete Profile aus Aluminium oder Edelstahl eingesetzt, die sich bei steigendem Pegelstand mit Wasser füllen und somit die Stabilität der Wand erhöhen. Für die Stabilität einer Wand ist der Achsabstand der Stützen in Abhängigkeit von der Stauhöhe entscheidend.

Mit den verschiedenen Dammbalkensystemen lassen sich Schutzhöhen von 4 m und mehr realisieren. Die Schutzwandlänge ist unbegrenzt und kann individuell der lokalen Situation

angepasst werden. Sowohl die Stützen als auch die Balken müssen von geschulten Kräften montiert werden.

Je nach örtlichen Randbedingungen sind Hochwasserschutz Tore in die stationären Sicherungsmaßnahmen zu integrieren. Das Beispiel eines Drehtores ist in **Abbildung 4** dargestellt.

Anhang 4 Abbildung 4: Beispiel für ein Torsystem mit permanenten Vorkehrungen



Quelle: Warm et al. (2007)

Sicherheitsnachweise für Systeme mit permanenten Vorkehrungen

Für die vorgestellten Systeme mit permanenten Vorkehrungen sind Sicherheitsnachweise auf der Basis bestimmter Lastannahmen zu erbringen, die die technischen Grundlagen für Genehmigungen oder nachträgliche Anordnungen bilden. Im Einzelnen sind folgende Einwirkungen zu betrachten:

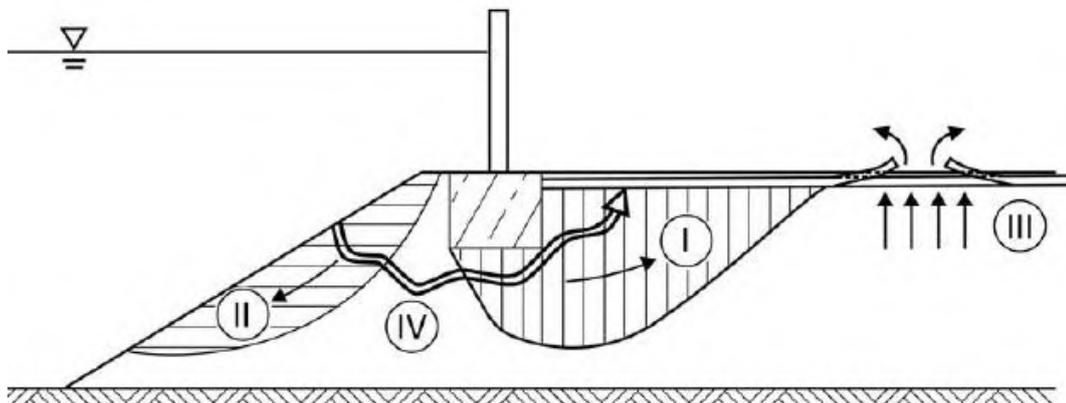
1. Hydrostatischer Druck
2. Strömungsdruck in Abhängigkeit vom Anströmwinkel
3. Wasserspiegellage am Flussaußenbogen aufgrund der Überhöhung im Vergleich zum mittleren Wasserspiegel
4. Wellendruck
5. Anprall von Treibgut und Eisstoß
6. Windlast
7. Personenlasten
8. Fahrzeuganprall
9. Polderseitiger Wasserdruck für Standorte mit relativ langsamen Abfluss polderseitigen Wassers

Die Belastung durch das Überströmen eines mobilen Hochwasserschutzsystems bietet im Normalfall keinen planmäßigen Schutz. Dies bedeutet, dass eine sofortige Evakuierung der betroffenen Gebiete einzuleiten ist, falls ein Überströmen der Hochwasserschutzwand droht. Eine Bemessung von Hochwasserschutzsystemen für eine Belastung infolge Überströmens kann allenfalls mit Ergebnissen aus Modellversuchen vorgenommen werden. In diesem Fall ist zu beachten, dass die Versuchsergebnisse lediglich für das untersuchte System verwendet werden – eine Übertragbarkeit auf abweichende Systemkonfigurationen ist meist nicht gegeben.

Durch die im BWK-Merkblatt vorgenommenen Lastannahmen, die auch Grundlage einer Genehmigung oder nachträglichen Anordnung sein sollte, selektieren die am Markt insgesamt angebotenen Systeme, so dass nur noch eine verhältnismäßig kleine Anzahl von Systemen bleibt, die die Lastannahmen sicher erfüllen können und somit den Stand der Technik repräsentieren. Diese Systeme sind in diesem Bericht dargestellt worden.

Weil im Merkblatt 6 des BWK für die genannten Einwirkungen Lastannahmen und Berechnungsformeln im Einzelnen angegeben sind, wird an dieser Stelle auf eine weitergehende Darstellung verzichtet. Neben den genannten Sicherheitsnachweisen sind auch geotechnische Nachweise zu erbringen. **Abbildung 5** zeigt schematisch die Probleme der geotechnischen Standsicherheit.

Anhang 4 Abbildung 5: Problembereiche der geotechnischen Standsicherheit



- I Die Belastungen an der Schutzwand sind sicher in den Untergrund zu leiten. Die betreffenden erdstatischen Nachweise bestehen damit aus

- Grundbruchnachweis
- Nachweis bzgl. Kippen und
- Nachweis der Standsicherheit gegen Abschieben (Gleiten)

Grundlage ist die DIN 1054.

- II Für die Standsicherheit von eventuell vorhandenen Böschungen in der Nähe der mobilen Schutzelemente sind Nachweise zur Böschungssicherheit zu führen. Grundlage ist die DIN 1054, Abschnitt 12 in Verbindung mit DIN 1084-100.
- III Für den Gründungsbereich der mobilen Schutzelemente ist die Auftriebssicherheit bzw. hydraulische Grundbruchsicherheit zu betrachten. Grundlage ist die DIN 1054, Abschnitt 11 bzw. DIN 19712, Abschnitt 9.5.
- IV Es ist darüber hinaus der Nachweis der Erosionssicherheit des Untergrundes zu führen. Hinweise hierzu gibt z.B. das Merkblatt „Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen“ der Bundesanstalt für Wasserbau.

Schließlich dürfen auch sonstige Bauwerke im Untergrund die geotechnische Standsicherheit der mobilen Schutzwände nicht gefährden. Hierzu zählen z.B. Rohrleitungen, Kanäle und Gebäude.

Das Merkblatt 6 des BWK gibt zahlreiche Hinweise zur Sicherstellung der geotechnischen Standsicherheit, die wegen des Umfangs im Rahmen dieses Forschungsvorhabens im Einzelnen nicht dargestellt werden können.

2. Systeme ohne permanente Vorkehrungen als zusätzliche Maßnahme

Systeme ohne permanente Vorkehrungen sind z.B. Sandsacksysteme, Behältersysteme, Stellwandsysteme sowie Behelfssysteme, die als zusätzliche Maßnahme zum Schutz von Betriebsbereichen im Rahmen der planbaren Gefahrenabwehr sowie als Notfallmaßnahme eingesetzt werden können. Für Starkniederschlagsereignisse mit der Gefahr von Sturzfluten sind diese Systeme meist ungeeignet. Weil zudem keine feste Bodenverankerungen vorgesehen sind, sind diese Systeme stark gegenüber Treibgut und hohen Strömungsgeschwindigkeiten gefährdet.

Gleichwohl kann der Einsatz von z.B. Sandsäcken für den Einsatz einzelner SRA für den Notfall sinnvoll sein. So konnte im Jahr 2002 während des Hochwassers an der Mulde, das Gebäude der Stromverteilung im Gemeinschaftsklärwerk Bitterfeld/Wolfen erfolgreich gesichert werden. Die Zahl erforderlicher Sandsäcke war für dieses Gebäude überschaubar, so dass die Sicherung schnell durchgeführt werden konnte. Eine großflächige Sicherung von Betriebsbereichen mit Sandsäcken erscheint wegen des Material- und Personalbedarfs problematisch. Demgegenüber lassen sich Schlauch- und Stellwandsysteme schneller aufbauen.

Stand der Technik zur nassen Vorsorge

Die nasse Vorsorge unterscheidet sich von der trockenen dadurch, dass eine Überflutung des Betriebsgeländes zugelassen wird. In diesem Fall müssen die Anlagen im Inneren des Betriebsgeländes gesichert sein. Hierzu gibt es für AwSV- und Flüssiggasanlagen Technische Regeln, die zu beachten sind.

1. AwSV-Anlagen

Viele Betriebe beinhalten Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Maßgebend für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen sind auch die Anforderungen nach § 62 WHG sowie die Empfehlungen der IKSE „Anforderungen an technische Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen in Hochwassergebieten oder einstaugefährdeten Bereichen“.

Die technischen Vorkehrungen gegen Hochwasser können wie folgt zusammengefasst werden:

Oberirdische Anlagen in Gebäuden:

1. Auftriebssicherheit durch Verankerung der Tanks in einer festen Bodenplatte oder an den Seitenwänden durch Schraubverbindungen oder Stahlgurte oder durch Abstützung mit Stahlstreben an der Decke
2. Einsatz von für Hochwasser zugelassenen Tanks zur Vermeidung von Verformungen und Beschädigungen durch den äußeren Wasserdruck
3. Anordnung der Entlüftungsrohre oberhalb der Wasserlinie
4. Abdichtung von überflutungsgefährdeten Befüllanschlüssen; Entfernung der Dichtung nur beim Befüllvorgang
5. Befestigung der Rohrleitungen auf der gesamten Länge
6. Wasserdichte Ausführung von Öffnungen, die unterhalb der Wasserlinie liegen
7. Verzicht auf Untergeschossnutzung
8. Anordnung von Hauptschaltern und Verteilungseinrichtungen oberhalb der Wasserspiegellinie
9. Installation von Verschlussventilen direkt am Tank zur Verhinderung eines Nachströmens aus dem Tank bei Beschädigung einer Rohrleitung

Unterirdische Anlagen im Freien

1. Aufbringen einer Erdüberdeckung von ≥ 1 m für Druckbehälter (TRB 600)
2. Einsatz von für Hochwasser zugelassene Tanks zur Vermeidung von Verformungen und Beschädigungen durch den äußeren Wasserdruck
3. Anordnung der Entlüftungsrohre oberhalb der Wasserlinie
4. Abdichtung von überflutungsgefährdeten Befüllanschlüssen; Entfernung der Dichtung nur beim Befüllvorgang

Oberirdische Anlagen im Freien

1. Auftriebssicherheit durch Verankerung der Tanks in einer festen Bodenplatte durch Schraubverbindungen oder Stahlgurte (1,3-fache Auftriebssicherheit mit leerem Behälter bezogen auf den höchsten zu erwartenden Wasserstand (TRbF 20, TRbF 40, TRD 452 – Anlagen 1 und 2)
2. Einsatz von für Hochwasser zugelassene Tanks zur Vermeidung von Verformungen und Beschädigungen durch den äußeren Wasserdruck
3. Befestigung der Rohrleitungen auf der gesamten Länge
4. Installation von Verschlussventilen direkt am Tank zur Verhinderung eines Nachströmens aus dem Tank bei Beschädigung einer Rohrleitung
5. Sicherung vor Treibgut und Eisgang durch z.B. Leitbleche
6. Sicherung der Rohrleitungen gegen Treibgut

2. Betriebsbereiche

Bei Betriebsbereichen wird in der Regel davon ausgegangen, dass Wasser nicht auf das Betriebsgelände eindringen darf. Entsprechend wird an den einzelnen Standorten eine trockene Vorsorge betrieben. Dennoch gibt es Betriebe, die aufgrund ihrer Lage an Gewässern und aufgrund der Gewässercharakteristik keine trockene, sondern eine nasse Vorsorge betreiben müssen. Dennoch stellt die nasse Vorsorge eher den Ausnahmefall dar.

Bei der nassen Vorsorge sind die folgenden Aspekte für Anlagen, die der StörfallV unterliegen, näher zu betrachten:

Auftriebssicherheit

Die Auftriebssicherheit von Behältern kann durch eine Verankerung/Verschraubung der Sättel oder Fuß- bzw. Zargenringe eines Behälters oder Tanks im/am Fundament bzw. der Fundamentbewehrung oder einer Bodenplatte erreicht werden. Die Sättel müssen hierbei mit dem Behälter eine ausreichende Verbindung haben. Eine weitere Möglichkeit ist das Aufbringen von Gewichten sowie die Sicherung durch Stahlbänder, die im Fundament oder einer Bodenplatte verankert werden. Das Fundament muss in der Lage sein, die Zugkraft des Auftriebs aufzunehmen. Ziel dieser Maßnahmen ist es, entsprechend den Vorgaben der IKSE die 1,3-fache Auftriebssicherheit zu erreichen. Eine Vorhaltung von mobilen Einrichtungen, z.B. zur Anbringung von Gewichten oder einer Seilverankerung, ist insbesondere bei kurzen Vorwarnzeiten nicht sinnvoll.

Schutz vor Treibgut

Es lassen sich folgende Konzepte je nach Anlagenaufstellung und -konfiguration in Erwägung ziehen:

1. Abwehrschutz in Form von Leitplanken aus Stahl
2. Abwehrschutz als Betonmauern mit Durchlässen (z.B. Schlitzfen) zur Wasserableitung
 pfeilförmige Brecherkonstruktionen mit Steigung zum Objekt hin, um Treibgut abzuwehren.
3. sichere Umschließung der Stoffe

Wesentlich ist der sichere Einschluss von gefährlichen Medien. Dies gilt zum einen für die Konstruktion eines Behälters oder Tanks selbst und zum anderen für das System, mit denen diese Behältnisse in einer Anlage eingebunden sind. Hierzu zählen vornehmlich Verbindungseinrichtungen, wie Rohrleitungen, Hook Ups (Installation von MSR-Einrichtungen mit Messstellen, Transmittern, Leitungen etc. vor Ort) der MSR oder Anschlüsse von Sicherheitsarmaturen (PSVs).

"Sofern es sich hierbei um geschlossene Behälter und Tanks handelt, wie z.B. Druckbehälter und -systeme, ist von einem sicheren Einschluss der Stoffe auch im Falle von Hochwasser auszugehen, wenn diese dem möglichen äußeren Wasserdruck standhalten. Bei offenen Behältern muss in jedem Einzelfall geprüft werden, ob Verschlussysteme (z.B. anschraubbare Deckel) angebracht werden können. Hierbei ist auch die Entlüftungsleitung zu beachten, die entsprechend hoch geführt werden muss.

Verzicht auf Untergeschossnutzung

Im Rahmen der nassen Vorsorge sollten Untergeschosse in Gebäuden zur Lagerung von Chemikaliengebunden oder zum Aufstellen von Anlagen mit gefährlichen oder wassergefährdenden Stoffen nicht genutzt werden. Darüber hinaus sollten im Untergeschoss auch keine wichtigen Energieversorgungs-, Steuer- und Messeinrichtungen untergebracht werden. Gerade diese Einrichtungen waren während des Augusthochwassers 2002 z. B. auf der Kläranlage Bitterfeld/Wolfen stark gefährdet. Ein Chemieunternehmen hat beim Bau ihrer Produktionsanlagen vorsorglich ganz auf Keller verzichtet.

Hochlagerung auf Gerüsten

Die Behälter zur Chemikalienbevorratung bei einem Betriebsbereich waren alle auf Stahlgerüsten installiert, so dass eine direkte Gefährdung durch Hochwasser nicht bestand. Bei derartigen Gerüsten ist jedoch darauf zu achten, dass diese nicht durch Treibgut oder Eisgang gefährdet werden. Auch sind die Fundamente so zu konzipieren, dass eine Kolkbildung die Stützen nicht gefährdet.

Analog den stationären Maßnahmen zur trockenen Vorsorge sind Chemikalienlager und relevante Prozessanlagen grundsätzlich in einem ausreichenden Niveau oberhalb eines maximal zu erwartenden Hochwasserstandes vorzusehen.

Anlagenkonzeption Einblocksystem

Für den Fall, dass bei einer Anlage eine durch Leitungsabriss aufgrund eines Aufschwimmens oder durch Treibgut verursachte Leckage eintritt, sollen die Anlagen oder Komponenten mit ferngesteuerten Schnellschlussarmaturen ausgestattet sein, die ein Einblocken kleinerer Anlageneinheiten ermöglichen, um eine Leckage der größten zusammenhängenden Menge (GZM) verhindern zu können" Warm u. Köppke, 2007). Bei solchen Einblocksystemen kann dann jeweils nur die Menge des eingeblockten Systems, in welchem sich das Leck befindet, austreten.

Anlagenabfahren, Anlagenstillstand, Anlagentleerung, Mess- und Regelungstechnik (MSR), Prozessleittechnik (PLT)

Anlagen mit gefährlichen Stoffen müssen auch im Falle einer Überflutung sicher und zielgerichtet stillgesetzt, d.h. abgefahren werden können. Dies erfolgt sowohl mit einem sogenannten schnellen Abfahren (NOT-AUS / SHUT DOWN) als auch mit einem langsamen Abfahren über ein MSR-/PLT-System und ein sogenanntes Faile Safe System. Da ein Herunterfahren aus verfahrenstechnischen Gründen häufig nur über einen längeren Zeitraum, z.T. von mehreren Stunden möglich ist, sind besondere Anforderungen an die Qualität von sicherheitsgerichteten MSR-/PLT-Einrichtungen als auch an deren sichere Stromversorgung zu stellen. Zur Verhinderung von aus Hochwassersituationen resultierenden Gefahren sind ggf. entsprechende MSR-/PLT-Schutzeinrichtungen in Betriebsbereichen vorzusehen.

Sicherheitsmaßnahmen mit Mitteln der MSR/PLT gelten hierbei nicht nur dem Abfahren, sondern auch der Anlagensicherheit im Betriebsstillstand mit eingeschlossenen Stoffen als auch dem Entleeren von Behältern und Tanks von gefährdeten in ungefährdete Bereiche, sowie dem Einblocken leckgeschlagener Einheiten oder Komponenten.

Möglichkeiten der Nachrüstung

Nachrüstungen sind dann erforderlich, wenn bestehende Anlagen vor den Gefahren durch Hochwasser zu schützen sind.

1. Nachrüsten durch Maßnahmen zur trockenen Vorsorge

Für bestehende Anlagen sind die Möglichkeiten der Nachrüstung zur Sicherung vor Hochwasser grundsätzlich individuell zu prüfen. Hierbei sind zunächst die Maßnahmen zur trockenen Vorsorge zu prüfen. Unabhängig von der Art der zu schützenden Anlage kann je nach örtlichen Gegebenheiten eine trockene Vorsorge durch stationäre oder mobile Schutzwände erreicht werden. Hierbei sind insbesondere die bei mobilen Systemen zu berücksichtigenden Kriterien der Standsicherheit sowie der geotechnischen Bedingungen zu berücksichtigen.

Die Anhebung von Tankanlagen im gewerblichen oder industriellen Bereich durch Aufschüttung oder Lagerung auf Stahlgerüsten ist als Nachrüstungsmaßnahme für den jeweiligen Einzelfall zu prüfen. Diese Maßnahmen sind vor allem dann interessant, wenn hierdurch zugleich auch ein Schutz vor Treibgut erreicht wird. Derartige Maßnahmen sind jedoch meist nur für Anlagen realisierbar, die im Freien aufgestellt sind. Darüber hinaus ist eine Erhöhung der Aufstellung von vorhandenen Behältern nur dann als Möglichkeit in Betracht zu ziehen, wenn sie mit einem Kran in einem Stück gehoben werden können. Für Tankanlagen, die in Segmentbauweise erstellt wurden, ist das Anheben des Aufstellungsniveaus unverhältnismäßig.

Eine der wichtigsten Nachrüstungsmaßnahmen für die trockene Vorsorge ist die Bereithaltung von Pumpen, wenn Wasser diffus, z.B. durch nicht zugängliche Drainageleitungen in den zu schützenden Bereich eintritt.

2. Nachrüsten durch Maßnahmen zur nassen Vorsorge

Sollte eine trockene Vorsorge nicht möglich sein, sind alle Maßnahmen zur nassen Vorsorge zu prüfen. Die meisten der zuvor aufgezählten Maßnahmen der nassen Vorsorge sind auch als Nachrüstungsmaßnahme für Betriebsbereiche, AwSV-Anlagen, Flüssiggaslagerbehälter anwendbar. Hierzu zählen

- a) die Sicherung von Behältern in Gebäuden oder oberirdischen Anlagen im Freien gegen Auftrieb durch Gurtsysteme, Verschraubungen usw.,
- b) die Verbesserung der Auftriebssicherheit von unterirdischen Behältern durch Erhöhung der Erdüberdeckung oder durch Aufbringen einer Betonplatte,
- c) die Sicherung der Anlagen vor Wassereintritt oder Austritt von Stoffen (Installation von Ventilen, Verlängerung von Einfüllstutzen und Entlüftungsleitungen oberhalb der Wasserlinie usw.) und
- d) der Schutz vor Treibgut und Eisgang (z.B. durch Leitbleche).

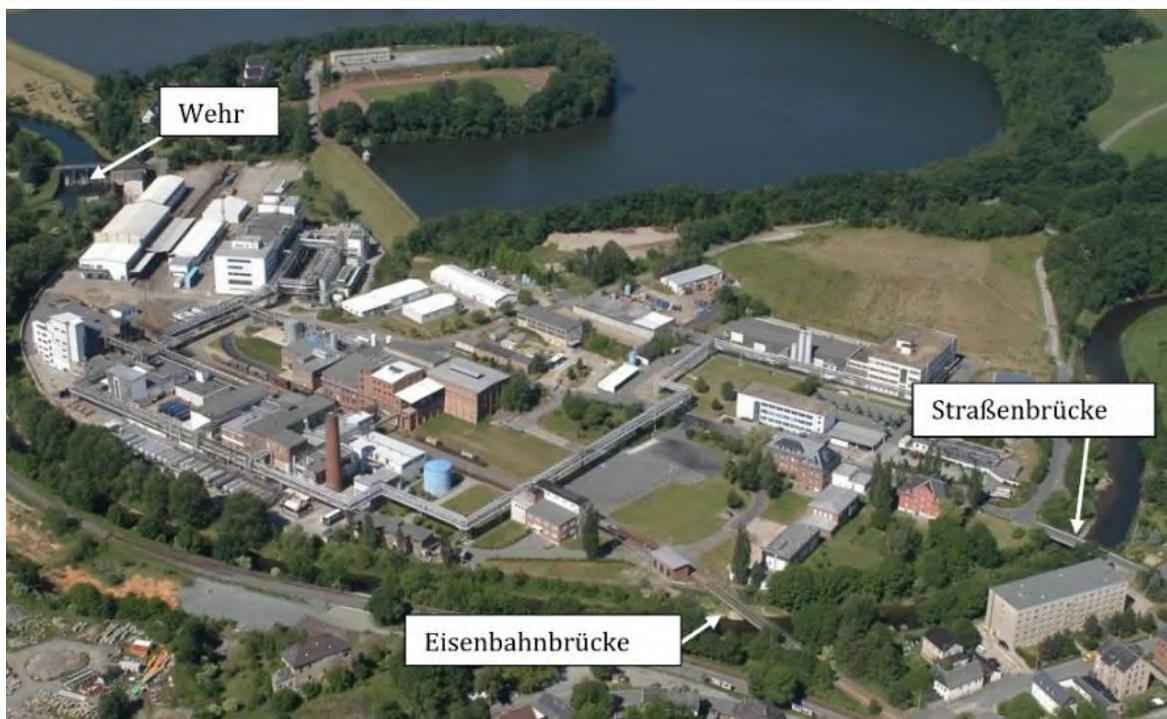
Anhang 5 Beispiel einer Gefahrenquellenanalyse für Flusshochwasser

Die Durchführung der einer Gefahrenquellenanalyse wird in Anhang 5 an einem praktischen Beispiel veranschaulicht.

Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse

Das Werk befindet sich mit seinen Produktionsanlagen in Tallage (Höhe über NN: 266 bis 270 m in einer Flussschleife. Im Norden und im Süden wird das Werk vom Fluss begrenzt. Im Osten und im Süden liegt jenseits des Flusslaufes der Bahnkörper der DB AG. Am Stausee (Dammhöhe ca. 277 m über NN und im Westen steigt das Gelände an bis auf eine Höhe von ca. 400 m über NN (**Abbildungen 1 und 2**).

Anhang 5 Abbildung 1: Luftbild des Unternehmens

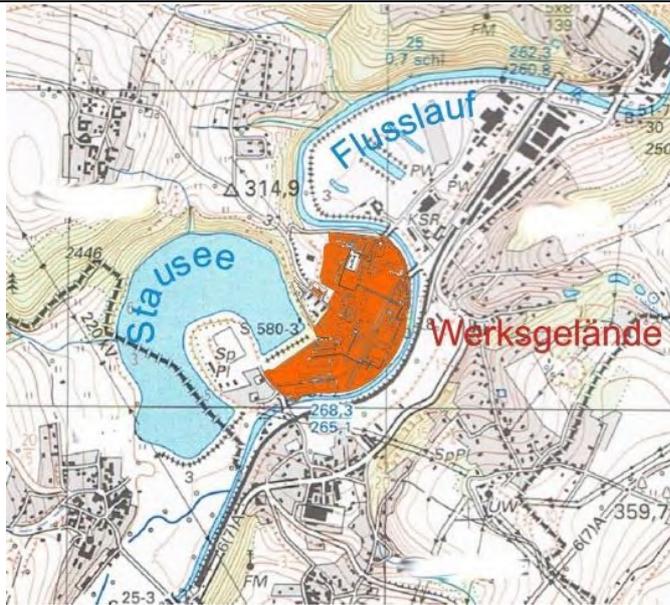


Quelle: Köpke et al. (2011)

Die Zufahrt zum Werk erfolgt via Straßenbrücke über den Fluss. Das Werk verfügt über eine Eisenbahnanbindung. In Havarie- oder Katastrophenfällen kann auch der LKW-Verkehr über die Bahnbrücke geleitet werden.

Der Stausee befindet sich auf dem Gelände einer ehemaligen Mänderschleife des Flusses. Er wurde in den Jahren 1949 - 1954 errichtet und diente bis 1989 der Trinkwassergewinnung. Bei einer Wasserfläche von ca. 28 ha hat der Stausee ein Fassungsvermögen von ca. 800.000 m³. Er wird mit Flusswasser über eine 400 Meter lange unterirdische Leitung mit einem Querschnitt von 1.000 mm gespeist. Der Volumenstrom dieser Leitung wird mit 0,7 m³/s angegeben. Der Stausee kann über eine Leitung (ebenfalls Querschnitt 1.000 mm), die das Betriebsgelände des Werks kreuzt, unterhalb des Wehrs (in Abbildung 1 oben links zu erkennen) entlastet werden.

Anhang 5 Abbildung 2: Lageplan des Werkes auf der topografischen Karte (Ausschnitt)



Hochwasser 1954

Anfang Juli 1954 wurde das damalige Chemiewerk vom bis dato höchsten Hochwasser des Flusses erfasst. Nach den Angaben in der wasserrechtlichen Zustimmung zum Bau der Uferschutzmauer wurde dabei auf dem Werksgelände ein Höchstwasserstand von 267,56 m über NN erreicht. Diese Angabe zum Wasserstand stimmt recht gut überein mit der Höhe, die sich ergibt, wenn der Wasserstand an einem noch heute vorhandenen Gebäude aus Fotografien der damaligen Überschwemmung abgeschätzt und zu den bekannten Höhenkoten des umliegenden Geländes addiert wird.

Anhang 5 Abbildung 3: Wasserstand am damaligen Hauptkontor (Juli 1954)



Quelle: persönliche Mitteilung

Damit ist festzuhalten, dass eine Gefährdung des Industriestandorts durch Hochwasser als eine umgebungsbedingte Gefahrenquelle im Sinne von § 3 Abs. 2 StörfallV vernünftigerweise nicht ausgeschlossen werden kann.

Detaillierte Gefahrenquellenanalyse durch Ermittlung der potentielle Zutrittswege

1. Kanalisation

Das Werk ist Direktleiter. Neben der Einleitung von Kühl- und Niederschlagswasser werden auch die in der werkseigenen Kläranlage gereinigten Abwässer direkt in den Vorfluter abgegeben. Folgende 4 Einleitungsstellen stellen potentielle Zutrittswege dar:

Anhang 5 Tabelle 1: Abwassereinleitstellen des Werkes

Einleitstelle	Abwasserart
K 1	Niederschlagswasser aus dem südlichen Betriebsteil (Containerplatz, Vorland Stauseedamm), Überlauf Stausee
K 2	Kühl- und Niederschlagswasser aus den Produktionsbereichen
K 3	Niederschlagswasser aus dem Bereich Verwaltung/Wohnhäuser
K 4	Ablauf der werkseigenen Abwasserbehandlungsanlage, Niederschlagswasser aus restlichen Teilen im nördlichen Werksbereich

Bei Hochwasser können alle vier Einleitungsstellen gegen Rückstau gesichert (verschlossen) werden. Entsprechende Anweisungen sind im Hochwassergefahrenabwehrplan verankert. Anstelle der Freispiegelentwässerung wird dann auf Druckentwässerung mittels Pumpe und Feuerwehrschauch über die Hochwasserschutzmauer bzw. den Deich umgestellt. Die Lage der Einleitungsstellen geht aus dem Abwasserplan (**Abbildung 3**) hervor (Quelle: persönliche Mitteilung).

Anhang 5 Abbildung 3: Abwasserplan mit Einleitstellen

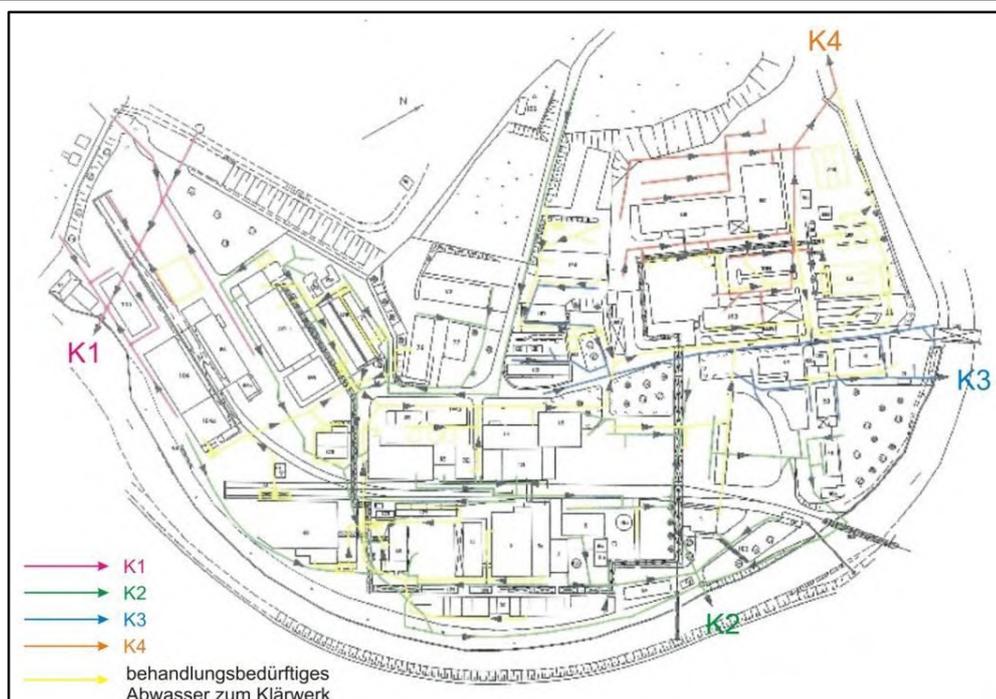


Abbildung 4 zeigt den Sammelschacht vor der Einleitungsstelle K2 mit Schieber, der aus der Messwarte des Unternehmens fernbedient werden kann. K1 und K3 müssen manuell betätigt werden, für K4 erfolgt der Verschluss mittels Blase.

Anhang 5 Abbildung 4: Sammelschacht vor der Einleitungsstelle K2 mit fernbedienbarer Verschlusseinrichtung und Messsonden für pH-Wert und Temperatur



Quelle: Köppke (2011)

2. Flusshochwasser

1972 wurde entlang der Süd- und Ostflanke des Unternehmens zum Fluss hin eine Ufermauer errichtet. Die Höhe der Ufermauer wurde für den „worst case“ des höchsten Hochwassers HHQ zuzüglich 50 cm Freibord ausgerichtet (**Abbildung 5**). Für den Deich, der sich in Fließrichtung an die Ufermauer anschließt, wurde als Schutzziel HQ₁₀₀ gewählt. Nach den Berechnungen der zuständigen Wasserbehörden kann dieser Teil des Werksgeländes überschwemmt werden.

Anhang 5 Abbildung 5: Ufermauer - mit Anschlussleitung zum Überpumpen durch die Werksfeuerwehr und Handrad zum Bedienen des Verschlusses von K1 (im Hintergrund rechts das Wehr mit Kraftwerk)



Quelle: Köppke (2011)

Ein weitergehender Hochwasserschutz wird durch Deicherhöhung mit Sandsäcken erfolgen. Als weitere mobile Einrichtungen, werden folgende Maßnahmen vorgehalten:

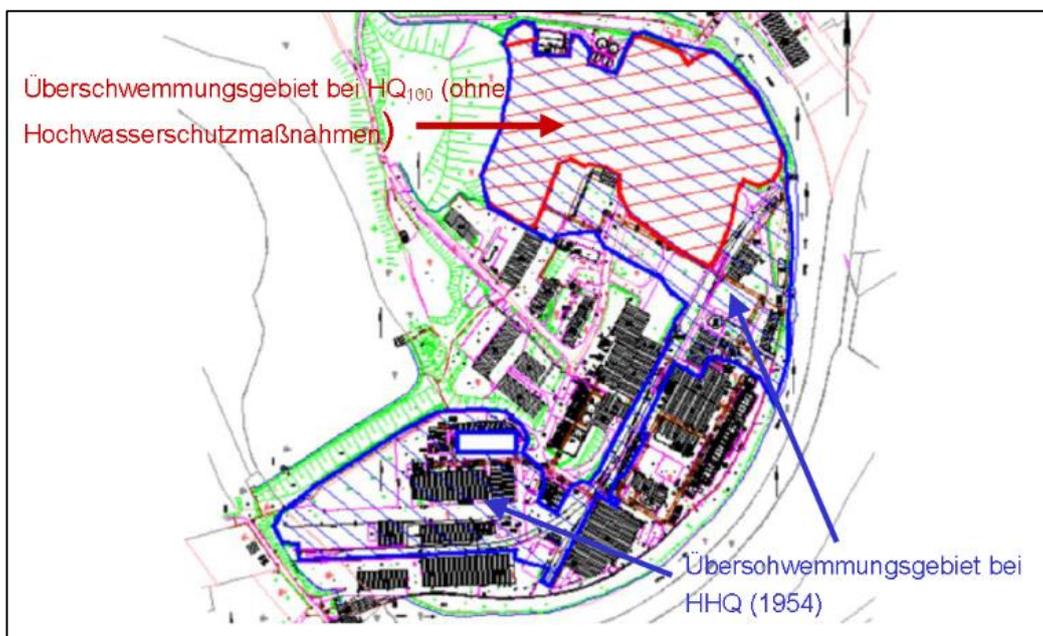
1. Dammbalkenverschluss des Tors zum Vorland des Flusses
2. Abpumpen des auf dem Werksgelände anfallenden Oberflächenwassers oder eingedrungener Wassermassen über die Ufermauer in den Fluss (Anschluss von Feuerwehrschräuchen an den hierfür vorgesehenen Überpumpstellen)
3. Schließen von Lücken im Hochwasserabwehrsystem durch Sandsackverbau (z. B. an der Zufahrtsbrücke über den Fluss)

Neben diesen bautechnischen Vorkehrungen existieren konkrete Maßnahmepläne und Anweisungen, die im Falle eines Hochwasserereignisses zu befolgen sind. Dabei handelt es sich u. a. um

1. Hochwassergefahrenabwehrplan
2. Aufgaben des Messwartenfahrers bei Hochwasser
3. Plan zur Abschieberung und Aufstellung der Pumpen bei Hochwasser
4. Beobachtung der Entwicklung der Pegelstände

Im Rahmen der Gefahrenquellenanalyse wurde das Überschwemmungsgebiet für das Extremhochwasser von 1954 in die topografische Karte eingezeichnet. Hieraus wird deutlich, dass für das HQ₁₀₀ die Schutzmaßnahmen am Deich ausreichend sind, während im Fall des Extremhochwassers von 1954 große Teile des Werksgeländes überschwemmt werden, sofern die Erhöhung mit Sandsäcken nicht rechtzeitig erfolgt (**Abbildung 6**).

Anhang 5 Abbildung 6: Überschwemmungsgebiete im Werk für ein HQ₁₀₀ sowie für das Extremhochwasser (HHQ) von 1954



Quelle: Köppke (2011)

3. Potentieller Zulauf durch Überspülung des Stauseedeiches durch Starkniederschlag

Wie aus der Lagebeschreibung hervorgeht, liegt die Dammkrone des Stausees unmittelbar am Werkszaun. Von daher muss bei der Gefahrenquellenanalyse auch eine Überflutung des

Werksgeländes infolge Überlaufs des Stausees in Betracht gezogen werden. Ein derartiges Szenario ist denkbar aufgrund von Starkniederschlägen im Einzugsgebiet des Stausees.

Zur Überprüfung dieser Gefährdung wurden die nachfolgenden überschlägigen Berechnungen unter Verwendung der für die Gemarkung zutreffenden Angaben in KOSTRA-DWD angestellt.

Einzugsgebietsfläche (geschätzt mit topografischer Karte):	225 ha
Abflussbeiwert ψ_m (gewählt nach DWA-M 153, Tabelle 2)	0,4
Jährlichkeit	100
Niederschlagsspende bei Dauer des Ereignisses = 72 h	5 l/(s*ha)
Niederschlagshöhe bei Dauer des Ereignisses = 72 h	130 mm
Klimafaktor	1,2

Als maximaler Zufluss zum See innerhalb von 72 h ergibt sich daraus:

$$225 \text{ ha} * 0,4 * 5 \frac{\text{l}}{\text{s} * \text{ha}} * 1,2 * 72 \text{ h} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 139.968 \text{ m}^3$$

Der weiteren Berechnung werden **140.000 m³** zugrunde gelegt.

Der Stausee selbst wird natürlich auch vom Niederschlag erreicht ($\psi = 1$):

$$28 \text{ ha} * 5 \frac{\text{l}}{\text{s} * \text{ha}} * 1,2 * 72 \text{ h} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 43.546 \text{ m}^3$$

Der weiteren Berechnung werden **43.600 m³** zugrunde gelegt. Als Summe ergibt sich damit eine Wassermenge von ca. **183.800 m³**.

Entwässert wird der See über eine Rohrleitung, die zum Übergabepunkt K1 verlegt ist. Über diese Rohrleitung können ca. 300 m³/h zum Fluss abgelassen werden. Darüber hinaus können über einen Feuerwehrschauch, der im Bedarfsfall verlegt wird, zusätzlich 150 m³/h in den Fluss gepumpt werden. Innerhalb von 72 h können somit **32.400 m³** maximal abgeleitet werden:

Somit bleibt ein aufzunehmendes Volumen von

$$183.800 \text{ m}^3 - 32.400 \text{ m}^3 = 151.400 \text{ m}^3$$

Bei der o. g. Fläche des Sees führt das zu einer maximalen Aufhöhung von

$$\frac{151.400 \text{ m}^3}{280.000 \text{ m}^2} = 0,54 \text{ m}$$

Diese Erhöhung des Seewasserspiegels ist unkritisch, weil sie deutlich unterhalb des vorhandenen Freibords von etwa 1,50 m liegt. Selbst ein Katastrophenniederschlag von 200 mm, wie am 26.07.2008 im Stadtgebiet von Dortmund aufgetreten, kann ohne Überlauf des Staudamms aufgenommen werden (Erhöhung des Seewasserspiegels dann um ca. **73 cm**).

Genauere Berechnungen können mit Niederschlags-/Abflussberechnungen durchgeführt werden.

4. Potentieller Zulauf am Wehr durch Treibgut

Abbildung 7 zeigt den Zulauf zum Wehr oberhalb des Werksgeländes. Es ist erkennbar, dass insgesamt 4 Pfeiler die Brücke tragen und somit potentiell zum Aufstau von Treibgut beitragen können. Damit würde der Wasserspiegel ansteigen und im schlimmsten Fall über die Ufer treten. Das Werksgelände selbst liegt an dieser Stelle deutlich niedriger.

Anhang 5 **Abbildung 7: Wehr oberhalb des Werksgeländes (Blick in Fließrichtung des Wassers)**



Zur Bewertung dieser Gefahrenquelle kann eine historische Aufnahme von 1954 herangezogen werden. **Abbildung 8** zeigt, dass sich aufgrund der Wassermassen in Verbindung mit der Strömungsgeschwindigkeit kein Treibgut an den Brückenpfeilern aufgestaut hat. Diese Aufnahme beweist, dass der Abflussquerschnitt des Wehrs so groß bemessen ist, dass selbst das HHQ von 1954 ohne nennenswerten Aufstau passieren konnte. Allerdings sollte das Werk bei Hochwasser dafür sorgen, dass das Wehr rund um die Uhr von Treibgut freigehalten wird.

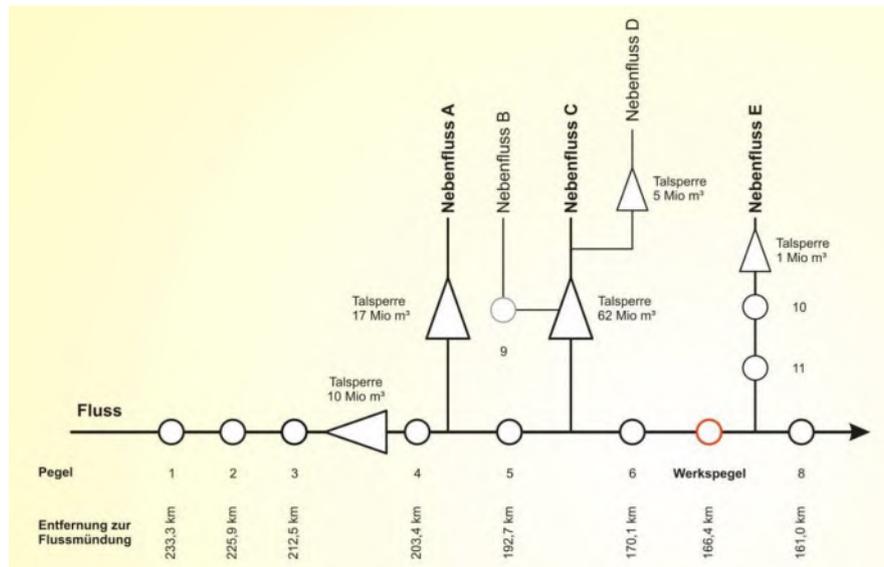
Anhang 5 **Abbildung 7: Blick auf das Wehr während des Hochwassers von 1954 (Blick entgegen Fließrichtung)**



5. Maßnahmen zum Hochwasserschutz im Oberlauf des Flusses

Die Lage des Standorts innerhalb des Flusseinzugsgebiets und die für die Hochwasser-vorhersage und -gefahrenabwehr maßgeblichen Gewässerpegel sind in **Abbildung 9** dargestellt.

Anhang 5 **Abbildung 9: Hochwasserschutz- und -meldeanlagen im Flusseinzugsgebiet**



Quelle: Information des zuständigen Wasserwirtschaftsamts

Der flussaufwärts nächstgelegene Pegel im System der Hochwasservorhersage ist Pegel Nr. 6. Der nächstgelegene Pegel unterhalb des Standorts ist Pegel Nr. 8.

Das Zwischeneinzugsgebiet unterhalb Pegel 6 bis zum Werk ist vergleichsweise klein und es gibt keine nennenswerten Zuflüsse. Von daher eignet sich dieser Pegel gut als Warnpegel. Allerdings beträgt die Fließzeit von diesem Pegel bis zum Werk bei Hochwasser nur ca. 20 Minuten, das ist als Vorwarnzeit für viele Hochwasserschutzmaßnahmen zu gering. Somit ist es sinnvoll, im Falle eines möglichen Hochwassers auch die Wasserstände der weiter oberhalb gelegenen Pegel zu verfolgen.

Das Werk betreibt eine eigene Online-Messung des Wasserstands mittels Ultraschall (Pegelstandort: Bahnbrücke).

Wie aus der hydrologischen Statistik des Flusses hervorgeht, ist seit dem verheerenden Hochwasser vom Jahr 1954 kein annähernd vergleichbar schweres Ereignis mehr eingetreten. Grund hierfür sind vor allem die zwischenzeitlich getroffenen Hochwasserschutzmaßnahmen im Einzugsgebiet, d. h. der Bau von Talsperren.

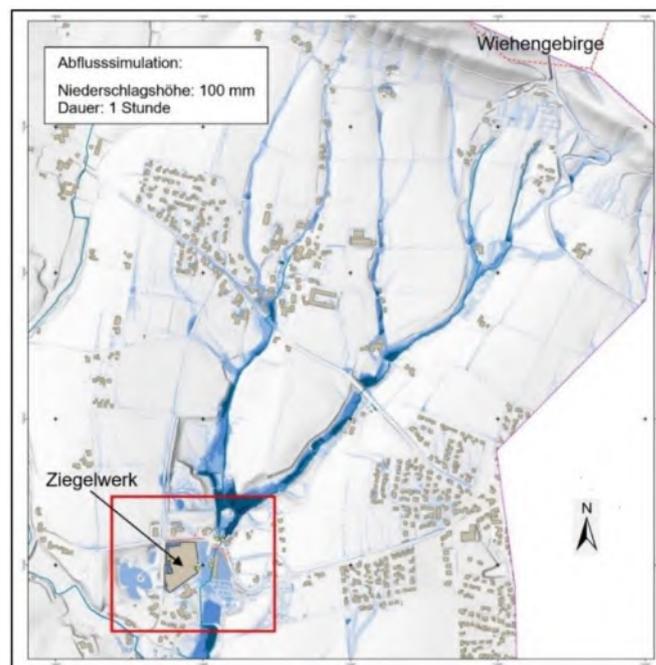
1954, zum Zeitpunkt des Extremhochwassers, betrug der für den Hochwasserschutz verfügbare Stauraum im Flussgebiet oberhalb des Werksgeländes nur ca. 10 Mio. m³. Danach wurden Talsperren für den Hochwasserschutz an den Nebenflüssen A und C errichtet (vgl. Abbildung 9). Damit hat sich der verfügbare Hochwasserschutzraum im Einzugsgebiet um mehr als Faktor 5 erhöht. Daraus darf geschlossen werden, dass ein vergleichbar verheerendes Hochwasser wie das HHQ im Jahre 1954 nicht mehr zu erwarten ist.

Anhang 6 Beispiel einer Niederschlags-/Abflussberechnung für Starkniederschlagsereignisse

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 durchgeführt. Die **Abbildung 1** verdeutlicht die örtliche Lage des Betriebs, wobei in dieser Darstellung schon eine Abflusssimulation für ein Starkniederschlagsereignis mit 100 mm Niederschlagshöhe und einer Regendauer von 1 Stunde gezeigt wird. Das im Folgenden näher zu betrachtende Gebiet ist rot umrahmt.

Anhang 6 Abbildung 1: Lage des untersuchten Betriebs unterhalb des Wiehengebirges

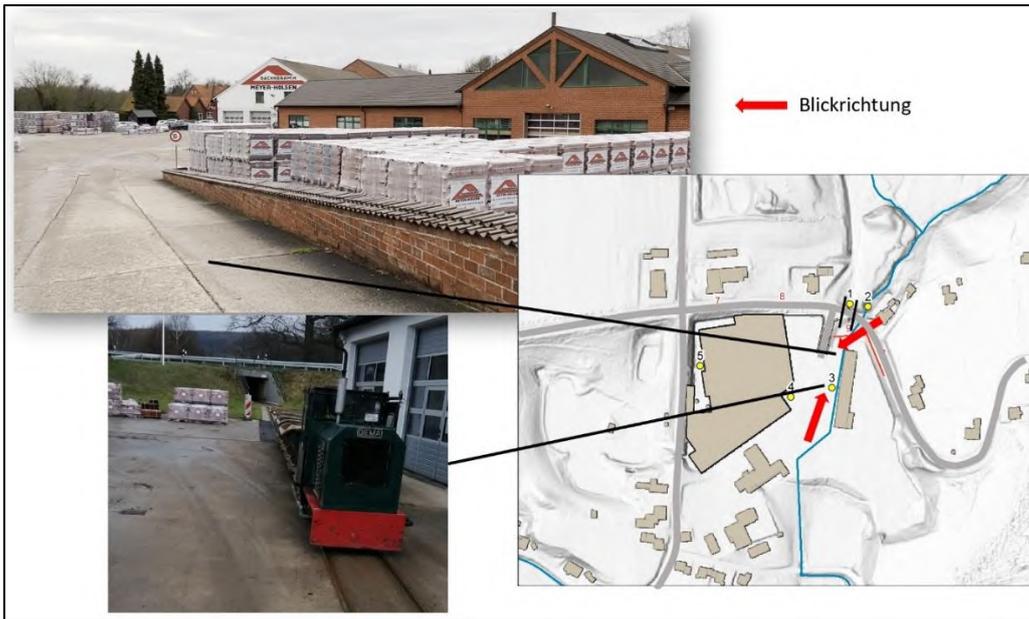


Quelle: A. Assmann (Köppke, 2022)

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 2** dargestellte 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.

Anhang 6 Abbildung 2: Ausschnitt des Betriebsgeländes



Quelle: A. Assmann (Köppke, 2022)

Die Höhendifferenz zwischen den Straßen auf der Nord- und Ostseite zum Betriebsgelände wird besonders auf der linken Bildhälfte in **Abbildung 3** deutlich. Neben der Straßenunterführung (Bild oben Mitte) zeigt die Abbildung 3 auch den Beginn der Verdolung des kleinen Baches (rechtes Bild).

Anhang 6 Abbildung 3: Verschiedene Ansichten auf das Betriebsgelände sowie auf die Randbedingungen des umgebenden Geländes



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 Relieffdaten 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.

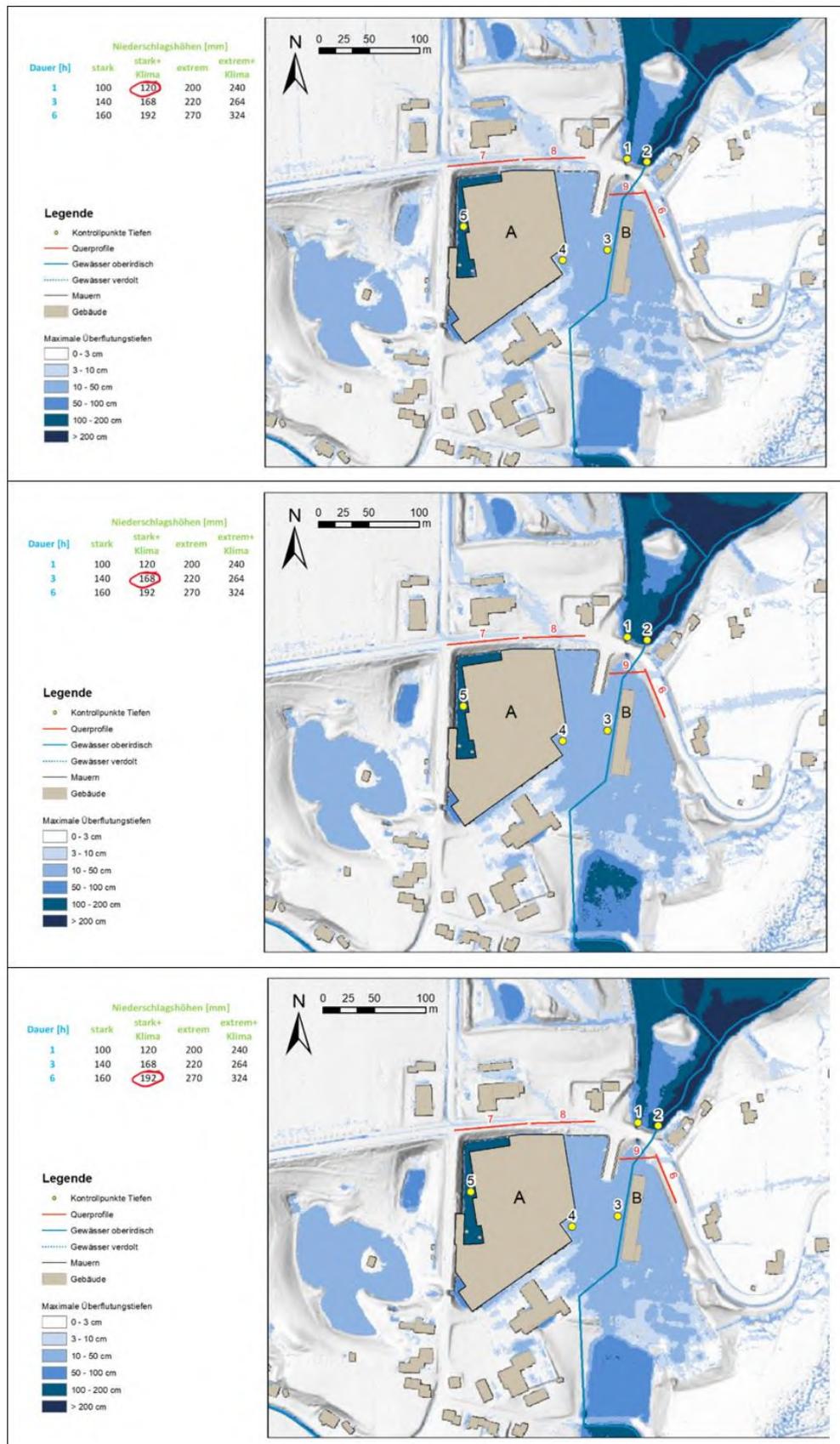
Untersuchungsergebnisse

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Simulationsläufe exemplarisch dargestellt. In **Abbildung 4** 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.

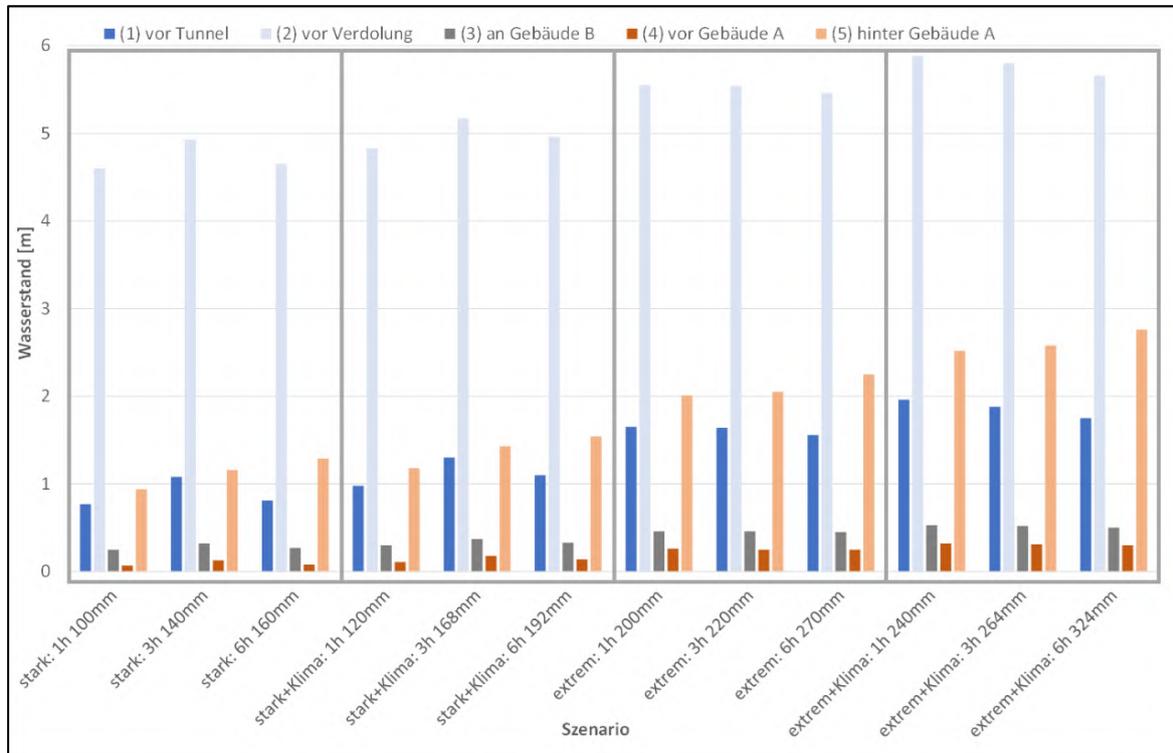
Die Wasserstandshöhen am Punkt 5 entsprechen wahrscheinlich nicht den im Ereignisfall eintretenden Verhältnissen. Es muss davon ausgegangen werden, dass ab einer bestimmten Wasserstandshöhe die Rolll Tore durch den Staudruck eingedrückt werden (vgl. Abbildung 3, linkes Foto, so dass das Wasser in das Gebäude A eindringen kann.

Anhang 6 Abbildung 4: 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 5**).

Anhang 6 Abbildung 5: Vergleich der Simulationsrechnungen für ausgewählte Punkte



Quelle: A. Assmann (Köppke, 2022)

Die hohen Wassertiefen vor der Verdolung ergeben sich aus dem Einstau des Wassers. Dies zeigt, welche Bedeutung künstliche Strukturen und deren Stabilität bei Starkniederschlagsereignissen 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 6**). 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.

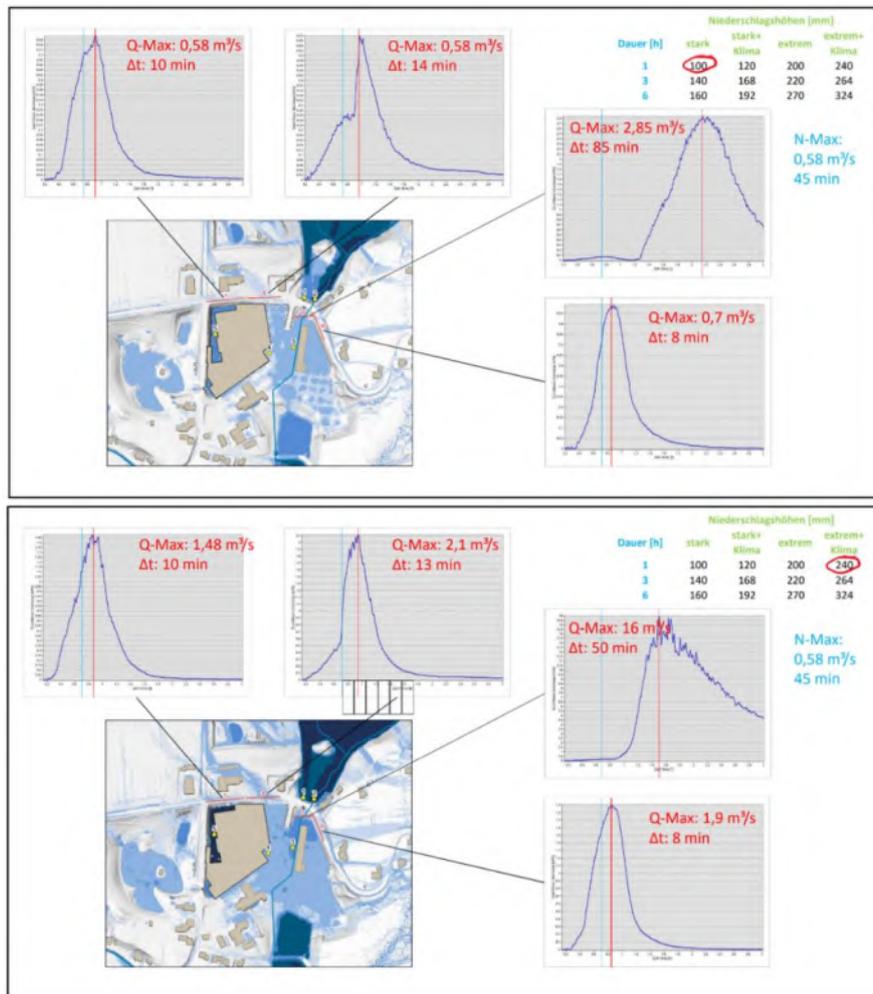
Anhang 6 Abbildung 6: Örtliche Strömungsgeschwindigkeiten für ein Regenereignis mit 100 mm Niederschlagshöhe und der Dauer von 1 Stunde



Quelle: A. Assmann (Köppke, 2022)

Welche maximalen Volumenströme sich an bestimmten Stellen des Betriebsgeländes einstellen können, zeigt die **Abbildung 7**, 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.

Anhang 6 Abbildung 7: Maximale Volumenströme und Verzugszeiten zwischen Eintritt der maximalen Niederschlagsmenge und dem Eintreffen der maximalen Abflussmenge an verschiedenen Orten des Betriebsgeländes.



Quelle: A. Assmann (Köppke, 2022)

Zusammenfassung der Ergebnisse der Niederschlags-/Abflussberechnungen

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 Starkniederschlagsgefährdung 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.

3 Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 320

3.1 Vorbemerkung

Mit der TRAS 320 soll vor dem Hintergrund des Klimawandels bezogen auf die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten der Stand der Sicherheitstechnik konkretisiert werden. Hierzu sind die schon eingetretenen und zukünftigen Veränderungen der genannten Naturgefahren bzgl. ihrer Intensitäten und Häufigkeiten zu betrachten, um hieraus ggfs. Anforderungen an Vorkehrungen zur Störfallverhinderungen und Maßnahmen zur Störfallauswirkungsbegrenzung abzuleiten. Die Bemessung hierfür erfolgt in den relevanten Baunormen u.a. durch die Einstufung des Bauwerks in eine Schadensfolgenklasse bzw. Zuverlässigkeitsklasse (vgl. Kapitel 11 der TRAS 320). Die nachfolgenden Hinweise und Erläuterungen dienen dem besseren Verständnis der Regeln und Anforderungen in der TRAS. Sie orientieren sich an dem Aufbau der TRAS 320.

Zum besseren Verständnis der TRAS 320 sowie der nachfolgenden Hinweise und Erläuterungen wird zu Beginn das prinzipielle Vorgehen zur statischen Auslegung von Bauwerken vereinfachend vorgestellt.

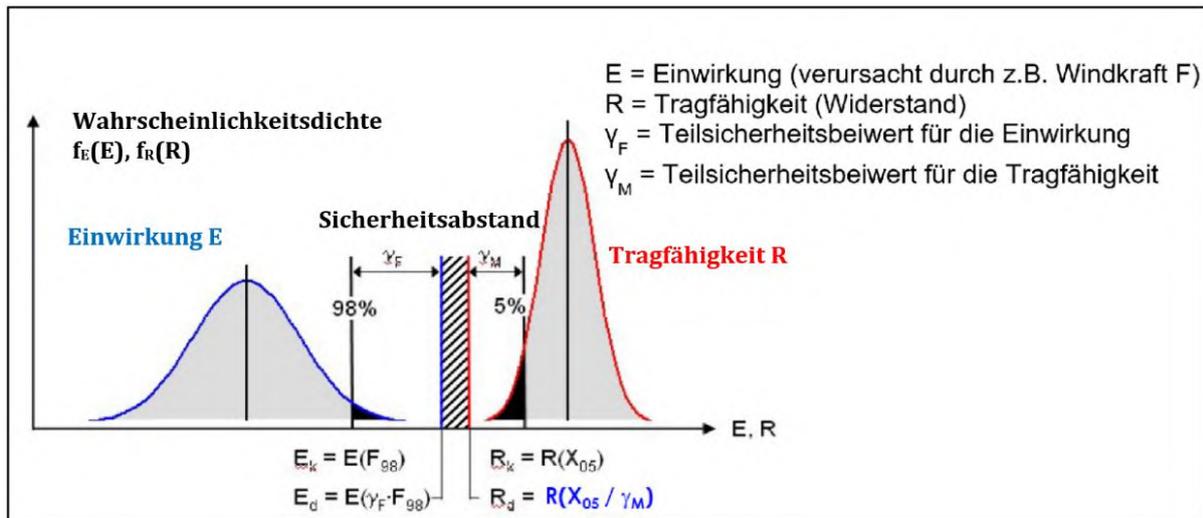
Die Anforderungen an Anlagen, die der StörfallV unterliegen, basieren auf den bestehenden Baunormen. Seit dem Jahr 2005 wird die Tragwerksplanung europaweit mit dem Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte durchgeführt, das im Folgenden bzgl. seines Berechnungsansatzes kurz erläutert wird:

"Auf ein Bauteil wirkt eine Beanspruchung (Einwirkung). Deren Größe ist statistisch verteilt und kann durch eine Verteilungsfunktion beschrieben werden kann. Die Beanspruchung hat einen Mittelwert oder einen anderen charakteristischen Wert und streut mit einer Standardabweichung um diesen. Der Widerstand des Bauteils (Tragfähigkeit) hat dieser Beanspruchung zu widerstehen und ist ebenfalls statistisch verteilt. Er hat auch einen Mittelwert und eine Standardabweichung (**Abbildung 1**).

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 die Einwirkungen oder die Beanspruchungen mit Teilsicherheitsbeiwerten multipliziert und damit erhöht oder die Widerstände mit anderen Teilsicherheiten dividiert und damit vermindert wird. 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. Die Teilsicherheiten muss man für jede Einflussgröße entsprechend ihrer statistischen Streuung und entsprechend der möglichen Genauigkeit ihrer Ermittlung festlegen" (Wikipedia, Teilsicherheitskonzept).

Abbildung 1: Zusammenhang von Einwirkung, Tragwerkwiderstand und Teilsicherheitsbeiwerte



Quelle: Krätzig et al. (2016)

Die Bemessung von Tragwerken erfolgt nach DIN EN 1990 z.B. für die Einwirkung durch die Windkraft F auf Grundlage 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 Festlegung des K_{FI} -Werts durch die Einstufung der Tragwerke in

1. Zuverlässigkeitsklassen RC 1 bis RC 3 sowie in
2. 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. Mit der Einstufung in die jeweilige Schadensfolgeklasse ist eine Versagenswahrscheinlichkeit P_f verbunden. Durch die höheren Anforderungen an die Auslegung von Bau- und Tragwerken ist die Versagenswahrscheinlichkeit der Klasse CC 3 geringer als die der Klasse CC 2. In der **Tabelle 1** sind die Merkmale der Schadensfolgenklassen, die sich hieraus ergebenden Versagenswahrscheinlichkeiten sowie die Bedeutungsfaktoren K_{FI} zur Anpassung der anzusetzenden Last zusammengestellt. Wie an dem Bedeutungsfaktor K_{FI} zu erkennen ist, entspricht die Einstufung eines Bauwerks von CC 2 /RC 2 in CC 3 /RC 3 einer Erhöhung für die einwirkende Last um 10%. Diese Einstufung in Schadensfolgenklassen gilt sowohl für die Nachweise gegen Wind- als auch gegen Schnee- und Eiseinwirkungen.

Tabelle 1: Merkmale der Schadensfolgenklassen

Schadens- folgeklasse	Merkmale	Zuverlässig- keitsklasse	Versagenswah- rscheinlichkeit 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

3.2 Zu Kapitel 1 Präambel

Üblicherweise enthalten Rechtsvorschriften Präambeln, in denen Sinn und Zweck der nachfolgenden Regelungen umrissen werden. Dieser Praxis folgt auch die Präambel der TRAS Wind-, Schnee- und Eislasten. Das verfolgte Anliegen der TRAS und ihr Zustandekommen werden kurz beschrieben. Ausdrücklich wird darauf hingewiesen, dass Abweichungen von den Anforderungen der TRAS möglich sind, sofern die Gleichwertigkeit durch Sachverständige nach § 29b BImSchG festgestellt wird und die zuständige Behörde diesem Ergebnis zustimmt.

3.3 Zu Kapitel 2: Grundlagen

Die Ausführungen in Abschnitt 2 stellen zunächst fest, dass bauliche Anlagen gegen Wind sowie Schnee- und Eislasten auf der Grundlage der folgenden einschlägigen Baunormen auszulegen sind.

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

In der TRAS 320 wird festgestellt, dass Anlagen, die der StörfallV unterliegen, nicht in den oben aufgelisteten Baunormen genannt und keiner Schadensfolgenklasse zugeordnet werden. Gleichwohl müssen sie aufgrund ihres erhöhten Gefahrenpotenzials gegenüber statischen und dynamischen Lasten so dimensioniert sein, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Tragwerksversagen nicht eintritt. Darüber hinaus sind besondere Betrachtungen, Vorkehrungen und Maßnahmen zur Gewährleistung der Anlagensicherheit erforderlich.

Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen sind dann vom Betreiber zu treffen, wenn die Gefahrenquellen vernünftigerweise nicht ausgeschlossen werden können. Sie bemessen sich an Art und Intensität der umgebungsbedingten Gefahren.

Zur Auslegung des Begriffs „vernünftigerweise“ wird auf die vom BMU veröffentlichte Vollzugshilfe zur StörfallV hingewiesen (BMU, 2004). Ob und wie die hier relevanten

Gefahrenquellen vernünftigerweise ausgeschlossen werden können, wird im Zusammenhang mit den Erläuterungen zur vereinfachten Gefahrenquellenanalyse diskutiert. Allerdings wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen zu sogenannten „Dennoch-Störfällen“ führen können, für die Maßnahmen zur Begrenzung der Störfallauswirkungen auf Menschen, Umwelt und Sachgüter zu treffen sind.

Solche Gefahrenquellen können z. B. sein:

1. Versagen von Vorkehrungen nach § 3 Absatz 1 StörfallV
2. Wind sowie Schnee- und Eislasten oberhalb einer vernünftigerweise zu unterstellenden Intensität (oftmals angegeben als Jährlichkeit)

Sind jedoch die auszuschließenden Gefahrenquellen so unwahrscheinlich, dass sie jenseits der Erfahrung und Berechenbarkeit liegen, sind keine anlagenbezogenen Vorkehrungen zu treffen.

Im Rahmen der Erarbeitung der TRAS wurde geprüft, inwieweit der wissenschaftliche Kenntnisstand Aussagen über eine zukünftige Veränderung der in der TRAS betrachteten Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten aufgrund des Klimawandels zulässt und konkrete Anforderungen zur Anpassung aufgestellt werden können. Im Gegensatz zur Entwicklung der oberflächennahen Temperatur mit der damit in Zusammenhang stehenden höheren Aufnahme von Luftfeuchtigkeit lassen die verschiedenen Projektionen für die Entwicklung der Wind- und Böengeschwindigkeiten keinen eindeutigen Trend erkennen. Daher wurde auf die Einführung eines Klimaanpassungsfaktor (analog zur TRAS 310) für Windlasten verzichtet.

Obwohl sich die Zahl der Schnee- und Eistage durch die steigenden Lufttemperaturen verringern wird, muss auch in Zukunft mit starken Frostperioden und hohen Schneemengen gerechnet werden. Dass dies keineswegs im Widerspruch zum Klimawandel steht, kann insbesondere mit einer Schwächung des Jetstreams 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 und zuletzt am 11. März 2013 in Schleswig-Holstein auftrat. Hierbei strich arktische Kaltluft aus Nordosten über die relativ warme Ostsee, nahm große Wasserdampfmenge auf und verursachte anschließend erhebliche Neuschneemengen auf dem Festland, der sich vielerorts zu großen Schneeverwehungen auftürmte.

Als Fazit lässt sich somit feststellen, dass trotz der eher seltenen Extremereignisse durch Erwärmung der Lufttemperatur aufgrund des Klimawandels nach wie vor mit hohen Schnee- und Eislasten gerechnet werden muss, die lokal auch über den Bemessungswerten der Baunorm DIN EN 1991-1-3 Einwirkungen auf Tragwerke: Schneelasten liegen können.

Allerdings lassen die Projektionen derzeit keine Quantifizierung der zukünftigen Schnee- und Eislasten zu, so dass im Gegensatz zur TRAS 310 für Schnee- und Eislasten auf einen Klimaanpassungsfaktor verzichtet wurde. Auch ist nicht erkennbar, ob sich die regionale Verteilung aufgrund des Klimawandels ändert. Gleichwohl müssen diese Gefahrenquellen in die Gefahrenquellenanalyse einbezogen werden.

Werden entsprechende Veränderungen bei Intensitäten oder Häufigkeiten von Wind, Schnee- oder Eislastereignissen aufgrund des Klimawandels festgestellt, so sind diese bei der Überprüfung und ggf. Anpassung der bisherigen Sicherheitsanforderungen und –managementsysteme zu berücksichtigen, auch wenn die TRAS 320 hinsichtlich des Anpassungsbedarfs keine quantitativen Vorgaben macht. Betriebseigene wissenschaftliche Studien werden hierzu nicht verlangt, jedoch die Auswertung allgemein öffentlich oder behördlich bekannter Informationen.

Betreiber mit „erweiterten“ Pflichten haben nach § 9 StörfallV ihren Sicherheitsbericht sowie ihr Konzept zur Verhinderung von Störfällen und ihr Sicherheitsmanagementsystem zu jedem Zeitpunkt, wenn neue Umstände dies erfordern, oder um aktuelle Erkenntnisse zur Beurteilung der Gefahren zu berücksichtigen, fortzuschreiben. Dies schließt Erkenntnisse zu umgebungsbedingten Gefahrenquellen und den Einfluss des Klimawandels auf diese ein.

Durch den Klimawandel verursachte Veränderungen der umgebungsbedingten Gefahrenquellen werden auch bei der alle 5 Jahre vorgeschriebenen Überarbeitung der TRAS beachtet.

3.4 Zu Kapitel 3 Anwendungsbereich

Die TRAS 320 gilt für Betriebsbereiche im Anwendungsbereich der StörfallV. Ihre Anwendung wird aber auch für andere immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen empfohlen, bei denen Gefahren durch gefährliche Stoffe bestehen.

Die TRAS richtet sich an die Betreiber und kann von Behörden und Sachverständigen im Rahmen von Genehmigungsverfahren, Überwachung, Inspektionen und Prüfungen herangezogen werden. Im Rahmen der Festlegung des Anwendungsbereichs erfolgt in der TRAS auch die Auflistung der Gefahrenquellen, die diese TRAS berücksichtigt.

In § 3 Absatz 2 StörfallV genannte, umgebungsbedingte Gefahrenquellen können naturbedingt und technisch bedingt sein (d.h. auch durch Anlagen außerhalb des Betriebsbereichs). Diese TRAS ist auf Gefahrenquellen, die durch Wind, Schnee- und Eislasten hervorgerufen werden, begrenzt. Die methodische Vorgehensweise ist jedoch so konzipiert, dass sie grundsätzlich auch für die Berücksichtigung weiterer natürlicher oder technischer umgebungsbedingter Gefahrenquellen geeignet ist.

3.5 Zu Kapitel 4: Begriffe

In der TRAS werden nur jene Begriffe erläutert, die für das Verständnis der Zusammenhänge unverzichtbar sind. Im Einzelnen werden folgende Begriffe definiert:

TRAS, Kapitel 4.1:	Gefahrenquelle
TRAS, Kapitel 4.2:	Umgebungsbedingte Gefahrenquellen
TRAS, Kapitel 4.3:	Gefahrenquellenanalyse
TRAS, Kapitel 4.4:	Analyse der Gefahren und Gefährdungen
TRAS, Kapitel 4.5:	Wind
TRAS, Kapitel 4.5.1:	Extremwind (Orkan)
TRAS, Kapitel 4.5.2:	Windgeschwindigkeit
TRAS, Kapitel 4.5.3:	Bö
TRAS, Kapitel 4.5.4:	Windspitze
TRAS, Kapitel 4.5.5:	Tornado

TRAS, Kapitel 4.6:	Schneelast
TRAS, Kapitel 4.6.1:	außergewöhnliche Schneelast
TRAS, Kapitel 4.6.2:	extreme Schneelast
TRAS, Kapitel 4.7:	Eislast
TRAS, Kapitel 4.8:	Windbedingte Projektile
TRAS, Kapitel 4.9:	Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs durch Wind sowie Schnee- und Eislasten
TRAS, Kapitel 4.10:	Schutzkonzept
TRAS, Kapitel 4.11:	Schutzziele
TRAS, Kapitel 4.12:	Störfalleintrittsvoraussetzung

Folgende Hinweise ergänzen die Begriffsdefinitionen:

3.6 Zu Kapitel 4.2 Umgebungsbedingte Gefahrenquellen

Der Begriff „umgebungsbedingte Gefahrenquellen“ wird in der StörfallV eingeführt. Als Beispiele werden Erdbeben und Hochwasser genannt. Gegenstand der TRAS 320 sind die auslösenden Gefahrenquellen Wind, Luftdruckänderungen, Schneefall und Eisbildung. Als Folge können statische und dynamische Lasten, wie Winddruck, winderregte Schwingungen, Schnee- und Eislasten, sowie windbedingte Projektile, Staub und Druckschwankungen, als Gefahrenquellen auf Anlagen oder Anlagenteile wirken (Abbildung 2 der TRAS). Während die auslösenden Gefahrenquellen nicht beeinflusst werden können, ist dies bei ihren Folgen und der zweiten Gruppe möglich.

In der Vollzugshilfe des BMU wird der Begriff umfassender definiert. Hier werden darüber hinaus noch umgebungsbedingte technische Gefahrenquellen genannt, die von benachbarten Anlagen verursacht werden oder von Verkehrsanlagen ausgehen können. Die im Rahmen der TRAS betrachteten naturbedingten Gefahrenquellen werden ausschließlich durch Wind, Schnee- und Eislasten unmittelbar oder mittelbar, wie z.B. durch windbedingte Projektile, verursacht.

3.7 Zu Kapitel 4.10: Schutzkonzept

Analog zu dem für betriebliche Gefahrenquellen einschlägigen Begriff „Sicherheitskonzept“ und dem für Eingriffe Unbefugter einschlägigen Begriff „Sicherungskonzept“ wird in Zusammenhang mit umgebungsbedingten Gefahrenquellen der Begriff „Schutzkonzept“ verwandt. Dies soll eine gemeinsame Berücksichtigung der Arten von Gefahrenquellen innerhalb des Sicherheitskonzepts nicht ausschließen.

3.8 Zu Kapitel 5 Systematisierung und Aufbau der TRAS

Die Erfüllung der Betreiberpflichten im Sinne der StörfallV hinsichtlich der umgebungsbedingten Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten kann mit einer methodischen Vorgehensweise erreicht werden, die in Abbildung 1 in der TRAS illustriert wird. Kernstücke der vorgestellten Methodik sind die vereinfachte und detaillierte Gefahrenquellenanalyse, die auch schon in der TRAS 310 für die Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser eingeführt wurden. Alle anderen Teilschritte sind übliche Vorgehensweisen und schon in den verschiedenen Publikationen beschrieben (SFK, 1995; Arbeitskreis des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, 2002; SFK, 2004). Sie wurden für die zu betrachtenden umgebungsbedingten Gefahrenquellen nur inhaltlich angepasst.

3.9 Zu Kapitel 6 Beschreibung der Gefahrenquellen

Um das Verständnis der Vielzahl der Gefahrenquellen zu erleichtern wird in der Abbildung 2 der TRAS unterschieden zwischen:

- a) auslösenden Gefahrenquellen, wie Wind (Tiefdruckstürme oder Tornados), Schnee und Eis.
- b) möglichen daraus folgenden Gefahrenquellen, wie z.B. Schwingungen oder windbedingte Projektile.

Die auslösenden Gefahrenquellen können von Menschen nicht beeinflusst werden. Eingriffsmöglichkeiten bestehen jedoch bei den daraus folgenden Gefahrenquellen und Folgen. Durch geeignete Vorkehrungen und Maßnahmen können diese verhindert oder in ihrer Wirkung vermindert werden.

3.9.1 Zu Kapitel 6.1 Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten

Die TRAS 320 definiert zunächst die Naturphänomene Wind, Schnee und Eisbildung, gegenüber deren Einwirkungen Anlagen und Betriebe auszulegen sind. Eine Charakterisierung der unterschiedlichen, als Gefahrenquelle relevanten Erscheinungsformen der Phänomene Wind, Schnee- und Eislasten findet sich in Kapitel 4: Begriffsbestimmungen. Die durch den natürliche Wind verursachten statischen und dynamischen Lasten, die auf eine Anlage wirken können, werden in den folgenden Abschnitten erläutert (DIN EN 1991-1-4, 2012).

3.9.2 Zu Kapitel 6.1.1 Gefahrenquellen durch Windlasten

Einem dem natürlichen Wind ausgesetzten Bauwerk oder Bauteil werden Lasten aufgeprägt, die in Abhängigkeit von der Zeit stochastisch um einen mittleren Wert schwanken. Der mittlere Lastwert resultiert dabei aus der zeitlich über 10 min gemittelten Grundgeschwindigkeit des Windes. Dem Mittelwind sind in Zeit und Raum schwankende Böenstöße überlagert, die eine Erhöhung bzw. Verringerung der Windgeschwindigkeit bewirken. Diese böeninduzierten Schwankungen der Geschwindigkeit führen am Bauwerk oder Bauteil zu entsprechenden Lastschwankungen. Ihr überwiegender Anteil erfolgt mit niedrigen Frequenzen und führt nicht zu Schwingungen. Daher benutzt die Windlastnorm in vereinfachter Weise den Böengeschwindigkeitsdruck, um diesen Teil der Böenwirkung abzudecken. (Weiteres dazu siehe „zu Kapitel 6.1.2“.)

Die Windlastnormen erfassen die Windlast auf Einhausungen und vergleichbare, räumlich ausgedehnte Anlagenteile - wie in Abbildung 3 der TRAS 320 dargestellt - in Form von Strömungsdrücken und ihrer Verteilung in der Oberfläche. Die Windlast auf Gerüste, Fachwerke, Rohre und ähnliche stabartige Anlagenteile erfasst man dagegen in Form von Strömungskräften. In beiden Fällen berechnet man die Windeinwirkungen mithilfe von aerodynamischen Beiwerten, die sich aus Form und Größe des Baukörpers ergeben. Das technische Regelwerk enthält eine umfangreiche Sammlung von aerodynamischen Druckbeiwerten für Winddrücke auf die Oberfläche von Bauwerken und von aerodynamischen Kraftbeiwerten für die Windkräfte an Stäben unterschiedlicher Querschnitte.

Anlagen bestehen häufig aus einem Stützgerüst, das eine kompakte Anordnung von Rohren und Kolonnen umfasst. Ohne Einhausung sind die Anlagenteile dem Wind direkt ausgesetzt. Die erforderlichen Kraftbeiwerte sind für die Windkräfte auf Einzelstäbe angegeben. Liegen die

Anlagenteile in engem Abstand hintereinander, so entsteht eine Abschirmwirkung, für die zurzeit keine umfassende Regelung vorliegt. Eine Abschätzung auf sicherer Seite besteht darin, auf die Abschirmwirkung zu verzichten und für jeden Stab die volle Windkraft anzunehmen. Im Einzelfall kann es für die Auslegung und Überprüfung von Anlagen und Betriebsbereichen sinnvoll sein, genauere Untersuchungen anstellen zu lassen.

Die TRAS 320 verweist an dieser Stelle auf Windlasten, die von Tornados ausgelöst werden, als eine weitere Gefahrenquelle, die allerdings mit den aerodynamischen Beiwerten des aktuellen technischen Regelwerks nicht erfasst ist.

3.9.3 Zu Kapitel 6.1.2 Gefahrenquellen durch Schwingungen

Durch die höherfrequenten Anteile der Windböigkeit können Tragwerke zu mehr oder weniger ausgeprägten Resonanzschwingungen angeregt werden. Diese überlagern sich den niederfrequenten Böenwirkungen und können in extremen Tiefdruckstürmen zu Schäden an einzelnen Bauteilen und in seltenen Fällen zum Versagen des Gesamtbauwerkes führen.

Schlanke, lang gestreckte Tragstrukturen können infolge der Windströmung zudem zu Schwingungen angeregt werden, deren Bewegungen quer zur Anströmrichtung erfolgen (Niemann und Peil, 2003). Den Querschwingungen liegt ein Anregungsmechanismus zugrunde, bei dem zyklisch und alternierend Strömungswirbel an den Flanken des Baukörpers ablösen. Hierbei bilden sich sogenannte Wirbelstraßen aus. Hierdurch werden periodische Quertriebskräfte induziert, deren Erregerfrequenz mit den Eigenfrequenzen der Tragwerksstruktur in Resonanz geraten kann. Insbesondere bei schwach gedämpften Tragwerken und Tragwerksteilen stellen sich große resonante Überhöhungen ein, so dass auch kleine Erregerkräfte große Verformungen und Spannungen hervorrufen können. Die Beanspruchung resultiert dabei im Wesentlichen aus den Massenträgheitskräften des in Resonanz geratenen Systems. Die aus Wirbelresonanz hervorgerufenen Beanspruchungen sind meist deutlich geringer als die im jeweiligen Tragwerk vorliegenden Beanspruchbarkeiten. Ein Tragwerksversagen infolge Gewaltbruchs kann daher i. d. R. ausgeschlossen werden. Gleichwohl können langandauernde Querschwingungen häufige Lastwechsel auslösen, die zu signifikanten Ermüdungsschäden des Tragwerks führen.

Neben möglichen böen- sowie wirbelinduzierten Schwingungen können Anlagen oder Anlagenteile unter Windeinwirkungen zu selbsterregten Schwingungen angeregt werden. Diese Schwingungserscheinungen haben ihre Ursache in einer Störung, die zunächst eine Bewegung des Tragwerks hervorruft. Hierdurch entwickeln sich im Weiteren Schwingbewegungen, die ihre Antriebsenergie dem umströmenden Medium entnehmen. Sie gehen im Allgemeinen mit sehr großen Amplituden einher und können gegebenenfalls zur Zerstörung des Tragwerks führen. Man spricht von aeroelastischen Effekten. Sie werden wie folgt zusammengefasst (Niemann und Peil, 2003):

Formanregung (Galloping)

Formanregung tritt bei Stäben mit kantigen Querschnitten auf. Sie führt zu einer Schwingung mit anwachsenden Amplituden, dem Galloping. Dieser Zustand tritt ein, sobald eine kritische Geschwindigkeit überschritten ist. Man spricht von einer aeroelastischen Instabilität. Geringe Strukturdämpfung und kleine Eigenfrequenz ergeben eine kleine kritische Geschwindigkeit, so dass Anlagenteile mit diesen Eigenschaften

besonders gefährdet sind. Auch Bauteile mit Kreisquerschnitt können betroffen sein, sobald durch Eisansatz eine ungünstige Querschnittsform entsteht.

Regen-Wind induzierte Schwingungen

Grundvoraussetzung für diese Schwingungserscheinung ist das gleichzeitige Auftreten von Wind und Niederschlag. Bei gegen die Vertikale geneigten Seilen oder Rundstäben bilden sich aus dem Niederschlag Wasserrinnale auf der Oberfläche aus, die zu einer Veränderung des angeströmten Querschnitts führen. Ähnlich wie beim Galloping gehen hiermit Änderungen in der Umströmung und den dabei hervorgerufenen Luftkräften einher, die das System zu besonders starken Schwingungen quer und ggfs. auch längs zur Windströmung anregen. Infolge der großen Schwingamplituden erfahren entsprechend angeregte Seil- und Stabstrukturen maßgebliche Betriebsbeanspruchungen, die Ermüdungsprobleme verursachen können.

Flattern

So genannte Flatterschwingungen entstehen als Überlagerung einer Biege- und Torsionsschwingung. Zur Schwingungsanfachung müssen die beiden Schwingungsformen in ihrer Phase derart aufeinander abgestellt sein, dass die am Tragwerk ausgelösten Luftkräfte überwiegend in Bewegungsrichtung zur Wirkung kommen und innerhalb einer Schwingungsperiode eine positive Arbeitsbilanz bewirken. Anfällig gegenüber dieser Schwingungserscheinung sind biege- und torsionsweiche Konstruktionen wie z.B. Hauptträger von Hängebrücken.

Divergenz

Unter Divergenz fasst man statische aeroelastische Instabilitäten, die aus einem Anwachsen der aerodynamischen Belastung des Tragwerkes über die elastischen Rückstellkräfte des Systems resultieren. Sie sind zunächst statischer Natur und gehen entsprechend ohne Schwingbewegungen einher. Infolge einer zunehmenden Verringerung der Torsionssteifigkeit bei anwachsenden Windgeschwindigkeiten können Flatterschwingungen ausgelöst werden.

Interferenzeffekte

Bei dichter Anordnung schlanker Bauteile in Reihe oder als Gruppe können etwaige aeroelastische Effekte durch Strömungsinterferenz begünstigt werden. In diesem Zusammenhang sind folgende Schwingungserscheinungen zu unterscheiden:

1. Interferenzgalloping

Das Interferenzgalloping ist eine selbsterregte Schwingung, die bei in dichter Anordnung stehenden Zylindern auftreten kann. Der Anregungsmechanismus beruht auf einem plötzlichen Strömungsumschlag, der bei einem kritischen Anströmwinkels einsetzen kann. Die Windströmung wird dabei durch den Zwischenraum der Zylinder geführt und ruft auf dem rückwärtigen Zylinder große einseitige Quersoglasten hervor. Durch die nichtsymmetrische Druckverteilung wird

er in Richtung des Druckgefälles ausgelenkt, was letztlich die selbsterregten Schwingungen auslöst.

2. wirbelerregte Querschwingungen
3. Galloping

Die zuvor beschriebenen selbsterregten Schwingungsphänomene gehen i. A. mit großen und lang andauernden Amplituden einher, so dass in den meisten Fällen der Nachweis gegenüber Anlagenteilerermüdung nicht mit Erfolg geführt werden kann.

Neben einer Begünstigung möglicher aeroelastischer Effekte kann eine sehr enge Bauwerks- oder Anlagenanordnung eine grundsätzliche Veränderung der einfallenden Windströmung in der Weise bewirken, dass in bestimmten Bereichen die zugehörige Geschwindigkeit gegenüber der ungestörten Anströmung signifikant erhöht ist. Diese Übergeschwindigkeiten sind in der Regel auf wenige Windrichtungen beschränkt und haben die folgenden zwei Effekte zur Ursache:

1. Im Zwischenraum zwischen großen Einzelgebäuden können durch eine Kanalisierung der Windströmung Übergeschwindigkeiten im Vergleich zur äußeren Anströmung auf die Industrieanlage auftreten. Diese wirken sich ungünstig auf kleinere Baukörper wie z.B. Rohrleitungen aus, die sich in diesem Zwischenraum befinden.
2. Das Strömungsfeld, das von einem der großen Bauwerke ausgeht, kann an einem zweiten Gebäude ähnlicher Größe, das sich stromab befindet, zusätzliche Windlasten ausüben. Das gilt insbesondere für den dynamischen Lastanteil, der durch die erhöhte Ablöseturbulenz im Nachlauf vergrößert wird. Man spricht von Interferenzwirkungen bei der Böenlast.

3.9.4 Zu Kapitel 6.1.3 Gefahrenquellen durch Schnee und Eislasten

Bei dem Naturphänomen Schnee handelt es sich um Eiskristalle, welche je nach Druck- und Temperaturverhältnissen in unterschiedlicher Form und Struktur zusammenhängen und einzelne Schneeflocken bilden. Diese entstehen durch kleinste Staubteilchen (Kondensationskerne), an denen sich in den Wolken unterkühltes Wasser anlagert, welches dann gefriert. Die sich so bildenden Eiskristalle wachsen auf dem Weg in die tieferen Luftschichten kontinuierlich an und werden zu Schneeflocken unterschiedlichster Ausprägung. Ist die einzelne Schneeflocke auf ein Hindernis gefallen, so hängt es von der Temperatur des Hindernisses und der Umgebung sowie deren Luftfeuchtigkeit ab, wie sie sich im Weiteren verhalten wird. Im besten Fall ist die Temperatur des Hindernisses so hoch, dass die Schneeflocke sich unmittelbar wieder in die Aggregatform Wasser verwandelt und abschmilzt.

Taut der Schnee nicht unmittelbar wieder ab, so baut sich sukzessive eine Schneeschicht auf dem Hindernis auf. Dieser Schnee verändert sich infolge der Temperatur-, Feuchtigkeits- und Druckverhältnisse der Umgebung mit jedem Tag, an dem er auf dem Hindernis liegt. Beispielsweise wird eine Schneeschicht unter erhöhtem Druck – somit also auch die tieferliegenden Schneeschichten infolge der Auflast des frischeren Schnees – komprimiert. Das bedeutet, dass der Abstand der einzelnen Schneekristalle untereinander verringert wird, das eingeschlossene Luftvolumen sinkt und somit dichter und schwerer Altschnee entsteht. Würde der Druck über längere Zeit anhalten und ansteigen, so bildet sich dann immer dichter Schnee bis hin zu einer sehr dichten Eisschicht. Die Temperaturveränderung der Umgebung nach dem Schneefall ist ebenfalls ein die Dichtheit der Schneeschicht verändernder Faktor. Hier

führt beispielsweise ein Ansteigen der Temperaturen zu einem Abschmelzen einzelner Schichten. Dabei gibt es eine Vielzahl von möglichen Verläufen, die zu ganz unterschiedlichen Veränderungen in den Schneeschichten führen können. Eine starke Sonneneinstrahlung in Kombination mit tiefen Temperaturen kann beispielsweise dazu führen, dass ausschließlich die obere Schneedecke antaut, das Wasser dann aber in tieferen Schichten einsickert und wieder gefriert und somit die Schneeschichten immer dichter werden.

Die somit über eine gewisse Periode entstandenen Schneeschichten können als Lastkomponenten daher auch nicht mittels einfacher Schneehöhenmessung beurteilt werden. Vielmehr müssen andere Methoden zur Lastbestimmung verwendet werden. Nachfolgende **Tabelle 2** gibt eine erste Einschätzung die Größenordnung der unterschiedlichen Schneemassen (Schneelasten).

Tabelle 2: Dichte von Schnee in kg/m³ (Angaben nach DWD)

Masse	Bezeichnung Schneeart
50 - 150 kg/m ³	Neuschnee
100 - 200 kg/m ³	Pulverschnee
150 - 450 kg/m ³	körniger Schnee
350 - 600 kg/m ³	gelagerter Schnee
500 - 850 kg/m ³	Firnschnee
700 - 900 kg/m ³	Gletscherschnee / Gletschereis

Die Größe der Schneebelastung wird in erster Linie vom Standort der Anlage bestimmt. Daneben spielen die geometrischen Formen der Gebäude oder Anlagenteile, auf die der Schnee einwirkt, sowie ihre gegenseitige Anordnung eine erhebliche Rolle. Diese Abhängigkeit entsteht vornehmlich durch die Wechselwirkung von Schneefall und Wind, wie aus den winterlichen Verwehungen in den Schneefallgebieten Deutschlands bekannt ist. Wind kann gefallenen Schnee in großem Maße versetzen, woraus sich schnell gefährliche Lasten entwickeln können.

Anders als der Schneefall kann eine Eisbildung unterschiedliche auslösende Ursachen haben. Im Folgenden wird ausschließlich die Eisbildung infolge Niederschlag betrachtet. Andere betriebsbedingte Ursachen für Eisbildung, beispielsweise Leckagen, Abgase, Wasserdampfaustritt, Kühlturmschwaden etc. bei Frost führen mitunter zu ähnlichen Phänomenen, sollen aber nicht Bestandteil der folgenden Untersuchungen sein.

Bei Niederschlag in einer Niedrigtemperaturumgebung oder bei Temperaturwechseln von warm zu kalt kann es zu Eisbildung an exponierten Baukörpern, Abspannseilen und Rohrleitungen kommen. Fast in jedem Winter berichten die Medien von Bauwerksschäden oder (Teil)Einstürzen infolge Vereisung. Diese Eisbildung wird an den der Witterung frei zugänglichen Teilen eines Bau- oder Anlagenteils durch Windeinwirkung stark begünstigt. Die durch den Wind transportierten, meist unterkühlten Regentropfen treffen luvseitig auf das Bauteil. An diesem können dadurch bei ungünstigen Konstellationen zum Teil lange Eisfahnen,

Eiskörper oder Eiswalzen aufgebaut werden, die das Tragwerk bzw. Teile des Tragwerks in ihrer Standsicherheit durchaus gefährden können. Eis entsteht bei niedrigen Temperaturen infolge sich absetzendem Reif, Nebel oder Regen in verschiedenen Schichtstärken auf den Bauteilen. Es kann sich bei anhaltend ähnlichen Bedingungen weiter aufbauen und stärkere Schichten bilden.

Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, dass sich aus abtauendem Schnee an exponierten Stellen des Bauteils Eiskörper bilden und dort zu lokalen Belastungen führt. Zu Kapitel 6.2 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile sowie Luftdruckänderungen.

3.9.5 Zu Kapitel 6.2 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile sowie Luftdruckänderungen

3.9.5.1 Zu Kapitel 6.2.1 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile

Bei der Betrachtung von Gefahrenquellen ist es sinnvoll bezüglich windbedingter Projektile verschiedene Arten, Ursachen und möglichen Folgen zu unterscheiden:

- a) Projektile können aus natürlichen Materialien (wie z.B. Äste) oder künstlichen Materialien (wie Anlagenteile) induziert werden.
- b) Sie können außerhalb oder innerhalb von Betriebsbereichen entstehen.
- c) Schäden und Gefahren können sowohl durch Projektilbildung (z.B. Verlust einer MSR-Einrichtung oder einer Kabelverbindung) und/oder durch Projektilaufprall (z.B. Beschädigung von Behältern für Chemikalien) auftreten.
- d) Projektile können sich vom Boden aus oder an höheren Teilen von Anlagen (Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe) bilden. In diesem Fall überlagern sich vertikale und horizontale Bewegungen, so dass Projektile über größere Distanzen fortgetragen werden können.

Eine besondere Form der Projektilbildung stellen Gegenstände dar, die durch den Wind getrieben bodennah fortgetragen werden können, wie z.B. ein rollendes Fass. Die Betrachtung derartiger Gegenstände gleicht der Gefahrenquellenanalyse durch Aufprall von Transportfahrzeugen auf sicherheitsrelevante Anlagenteile.

Der Begriff „Trümmerflug“ wird im Rahmen dieser Betrachtung nicht benutzt, weil der Trümmerflug i.d.R. durch Explosionsereignis verursacht wird und im Rahmen der Analyse von „Dennoch-Störfällen“ im Zusammenhang mit potentiellen Domino-Effekten zu betrachten ist.

3.9.5.2 Zu Kapitel 6.2.2 Gefahrenquellen durch Staub und Sand

Bei einem Staub- oder Sandsturm werden Staub- oder Sandteilchen durch einen starken und turbulenten Wind kräftig in große Höhen getragen. Sandstürme gibt es fast nur in der Wüste, für Deutschland wird eher von einem Staubsturm oder von Staubaufwirbelungen gesprochen. Je nachdem, wie stark der Wind ist und wie lang er anhält, können solche Aufwirbelungen Minuten oder auch Stunden dauern. Sie treten dort auf, wo es große Flächen mit einem trockenen Oberboden und weit und breit keine Windbremsen, wie beispielsweise Hecken, gibt. Betroffen ist vor allem der Norden und Osten Deutschlands. Staub oder Sand kann mechanisch bewerte Anlagenteile, wie z.B. Ventile, beschädigen oder sogar blockieren.

3.9.5.3 Zu Kapitel 6.2.3 Gefahrenquellen durch Druckänderungen und Druckschwankungen

Tiefdruckstürme sind, wie die Bezeichnung schon andeutet, mit einem Absinken des Luftdrucks verbunden. Die Änderung des atmosphärischen Luftdrucks liegt maximal in einer Größenordnung von 30 hPa. Sie findet in einem vergleichsweise langen Zeitraum statt, so dass die Druckunterschiede in baulichen und sonstigen Anlagenteilen sich an die Änderungen des atmosphärischen Luftdrucks angleichen können. Gefahren können eintreten, wenn die Luftdruckänderung schneller erfolgt oder wenn ein Druckausgleich nicht möglich ist und eine flexible Wandung Gas umschließt, wie z.B. die Membransysteme zur Biogasspeicherung.

Starke Windströmungen können an Kaminen von Abgassystemen Druckänderungen herbeiführen, die Größe und Richtungen von Strömungen im Abgassystem beeinflussen können. Es ist zu prüfen, ob derartige Druckänderungen sicherheitsrelevant werden können.

3.10 Zu Kapitel 7 Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse

Die vereinfachte Gefahrenquellenanalyse hat die Aufgabe, diejenigen Gefahrenquellen zu bestimmen, die auf einen Betriebsbereich und seine Anlagen einwirken können. Die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten können grundsätzlich im ganzen Bundesgebiet auftreten und können nur auf der Grundlage klar definierter Kriterien ausgeschlossen werden.

Zunächst sind die Gefahrenquellen zu ermitteln, die dem Bereich des „Exzeptionellen Störfalles“ zuzuordnen sind. Gefahrenquellen, die außerhalb des wissenschaftlichen Erkenntnisvermögens und jeglicher Berechenbarkeit liegen, können vorab ausgeschlossen werden (vgl. „keine weitere Betrachtung“ in der Abbildung 1 der TRAS).

Danach ist zu prüfen, welche Gefahrenquellen vernünftigerweise ausgeschlossen werden können, so dass keine Vorkehrungen nach § 3 Absatz 1 zur Verhinderung von Störfällen erforderlich werden. Die dabei vernünftigerweise ausgeschlossenen Gefahrenquellen sind jedoch später im Rahmen der Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“ und bei der Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Ereignissen gemäß § 3 Absatz 3 StörfallV und der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung (§ 10 StörfallV) wieder zu berücksichtigen (vgl. Abzweig nach „Identifizierung gefährdeter sicherheitsrelevanter Anlagenteile“ in der Abbildung 1 der TRAS).

Für eine Entscheidung, ob eine Gefahrenquelle vernünftigerweise ausgeschlossen werden kann, sind möglichst einfache und leicht nachvollziehbare Kriterien heranzuziehen. Solche Kriterien sind in **Tabelle 3** zusammengefasst.

Tabelle 3: Kriterien zum Ausschluss von Gefahrenquellen

Gefahrenquelle	Kriterium	Beispiele
Wind (Ausnahme Tornados)	eingehauste Anlagen, sofern die Gebäude gemäß DIN EN 1991 mit Einstufung RC 3 gegen Wind bemessen sind	Produktionsanlagen, Aufbereitungsanlagen
Wind (einschließlich Tornados)	unter Erdgleiche befindliche Anlagenteile	Rohrleitungen, Tanks
Schnee und Eis	Anlagen in Betriebsbereichen, die mit hoher Oberflächentemperatur betrieben werden. ¹⁾	Reaktoren, Rohrleitungen, Destillationskolonnen, Lagertanks für Stoffe mit hoher Kristallisations-temperatur, Lagertanks für viskose Medien
	eingehauste Betriebsbereiche, sofern Gebäude ausreichend gegen Schnee- und Eislasten bemessen sind	Produktionsanlagen, Aufbereitungsanlagen
	unterirdisch und frostsicher verlegte Anlagenteile	Rohrleitungen, Tanks
	Anlagenteile mit Begleitheizung	Rohrleitungen
Windbedingte Projektile		
Gefährdung durch Losreißen von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen	eingehauste Anlagenteile	
Gefährdung durch Aufschlagen von Projektilen	keine Bebauung, Anlagen oder Bäume in der Nähe, die als Projektilquelle zu betrachten wären	

1.) Der Ausschluss von Anlagenteilen setzt voraus, dass bei Ausfall oder Abschalten der Wärmequellen z.B. für die Instandhaltung, die Temperatur der Anlagenteile über den Zeitraum der Abschaltung nicht so weit absinkt, dass eine Gefährdung durch Schnee- oder Eislasten eintreten kann. Anderenfalls sind die Behälter oder Rohrleitungen zu entleeren.

3.11 Zu Kapitel 8 Detaillierte Gefahrenquellenanalyse

Die detaillierte Gefahrenquellenanalyse dient einer eingehenderen Untersuchung von möglichen Eintrittswahrscheinlichkeiten und möglichen Intensitäten von Gefahrenquellen. Die Ergebnisse sollen dazu dienen

1. im nachfolgenden Schritt prüfen zu können, ob eine Gefährdung sicherheitsrelevanter Anlagenteile vernünftigerweise ausgeschlossen werden kann,
2. Gefährdungen durch die Gefahrenquellen für die nachfolgende Untersuchung von „Dennoch-Störfällen“ und für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung zu beschreiben (Szenarienbildung).

Im Rahmen der detaillierten Gefahrenquellenanalyse sind daher weitergehende Informationen über die Bedingungen einzuholen, die die Gefährdung des Betriebsbereichs oder seiner Anlagen beeinflussen können.

3.12 Zu Kapitel 8.1 Statische und dynamische Lasten

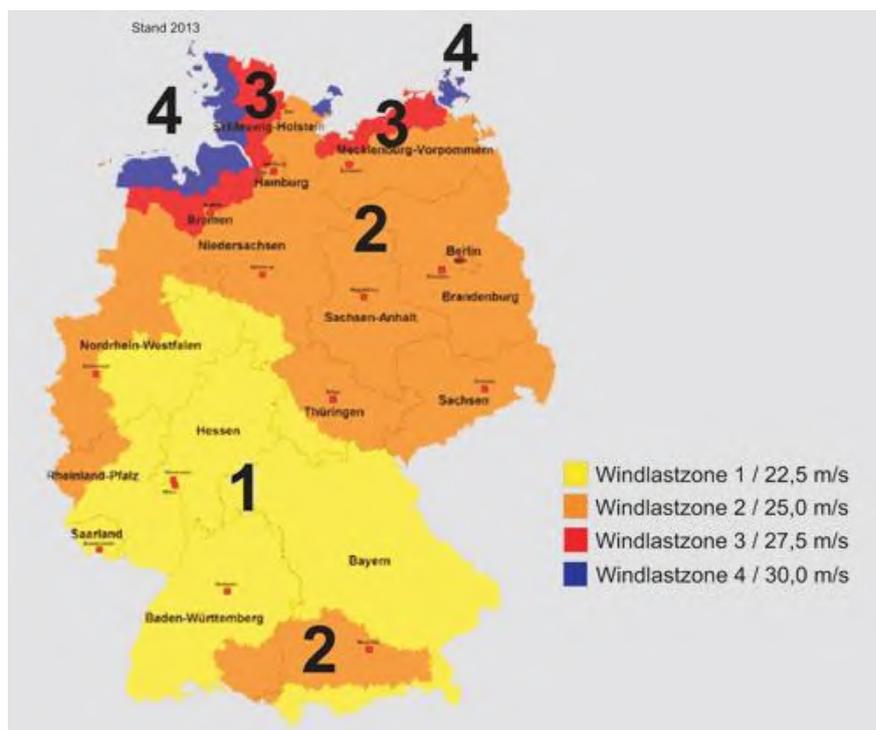
Gefahrenquellenanalyse gegenüber Wind

Die Wind- bzw. Böengeschwindigkeiten sind u.a. von folgenden Faktoren abhängig.

1. Örtliche Lage des Bauwerks
2. Höhe des Bauwerks
3. Geländekategorie

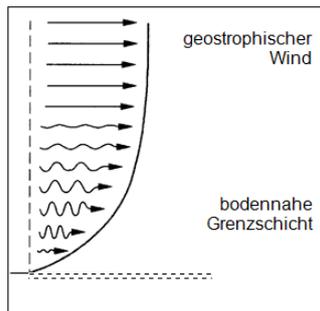
Deutschland ist in DIN EN 1991-1-4/NA in 4 Windzonen eingeteilt, zu denen Basiswindgeschwindigkeit angegeben sind (**Abbildung 2**). Die Werte gelten für 10 m Höhe über Grund in ebenem, offenem Gelände. Sie sind beschränkt auf Gebäudestandorte bis in einer Meereshöhe von 800 m über NN. Sie gelten nicht für Kamm- und Gipfellagen der Mittelgebirge. Der genaue Verlauf der Zonengrenzen kann beim Deutschen Institut für Bautechnik abgefragt werden. Die Regelung obliegt jedoch den obersten Baubehörden der Bundesländer und kann im Detail von der Liste des DIBt abweichen.

Abbildung 2: Windzonenkarte der DIN EN 1991-1-4



Die Basiswindgeschwindigkeit bildet am Anlagenstandort die Grundlage zur Ermittlung der Böengeschwindigkeit. Neben der Windzone, in der die Anlage liegt, hängt sie von der Geländekategorie ab, weil sich zwischen dem Boden und der Luftströmung der freien Atmosphäre eine turbulente Strömungsgrenzschicht (atmosphärische Grenzschicht) ausbildet (**Abbildung 3**).

Abbildung 3: Darstellung der atmosphärischen Grenzschicht



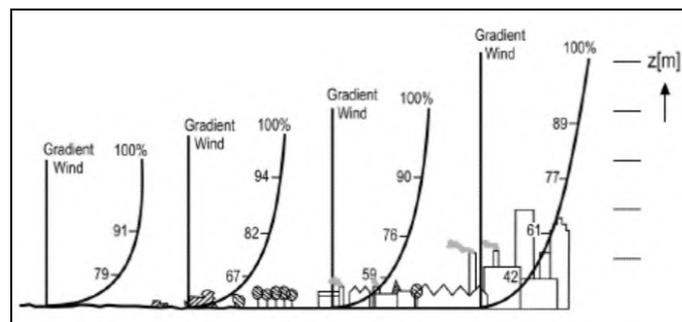
Durch Bewuchs und Bebauung entsteht eine Bodenrauigkeit, die die Windströmung beeinflusst. Abhängig von der Art der Bodenrauigkeit entstehen unterschiedliche Geschwindigkeitsprofile des Mittelwindes. Die mittlere Geschwindigkeit nimmt mit wachsender Bodenrauigkeit ab, während die Turbulenz zunimmt. In **Tabelle 4** sind die Eigenschaften der Geländekategorien 1 bis 3 zusammengefasst.

Tabelle 4: Aerodynamische Rauigkeitslängen

Geländekategorie	
Geländekategorie I	Offene See; Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung; glattes, flaches Land ohne Hindernisse
Geländekategorie II	Gelände mit Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen, z.B. landwirtschaftliches Gebiet
Geländekategorie III	Vorstädte, Industrie- oder Gewerbegebiete; Wälder
Geländekategorie IV	Stadtgebiete, bei denen mindestens 15% der Fläche mit Gebäuden bebaut ist, deren mittlere Höhe 15m überschreitet

Den Einfluss der Geländekategorie auf die mittlere Windgeschwindigkeit illustriert schließlich die **Abbildung 4**.

Abbildung 4: Windgeschwindigkeitsprofile in Abhängigkeit von der Bodenrauigkeit



Der Anstieg der Böengeschwindigkeit mit wachsender Höhe z über Grund hängt von der Geländekategorie ab. Er beträgt

in Geländekategorie I $v_p(z) = v_p(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,095}$

in Geländekategorie II $v_p(z) = v_p(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,120}$

in Geländekategorie III $v_p(z) = v_p(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,155}$

wobei der Wert $v_p(10)$ für die betreffende Geländekategorie und die angesetzte Jährlichkeit der **Tabelle 5** zu entnehmen ist.

Tabelle 5: 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 = 1.000a
	Erhöhungsfaktor für die Jährlichkeit	1,000	1,050	1,166	1,216
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

Maßgebend für die Gefahrenquelleanalyse ist die Windlast, die sich bei hohem Gefahrenpotential oder Gefährdungen durch Einstufung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen in die Schadensfolgenklasse CC 3 sowie in die Zuverlässigkeitsklasse RC 3 um 10% erhöht wird (vgl. Kapitel 11).

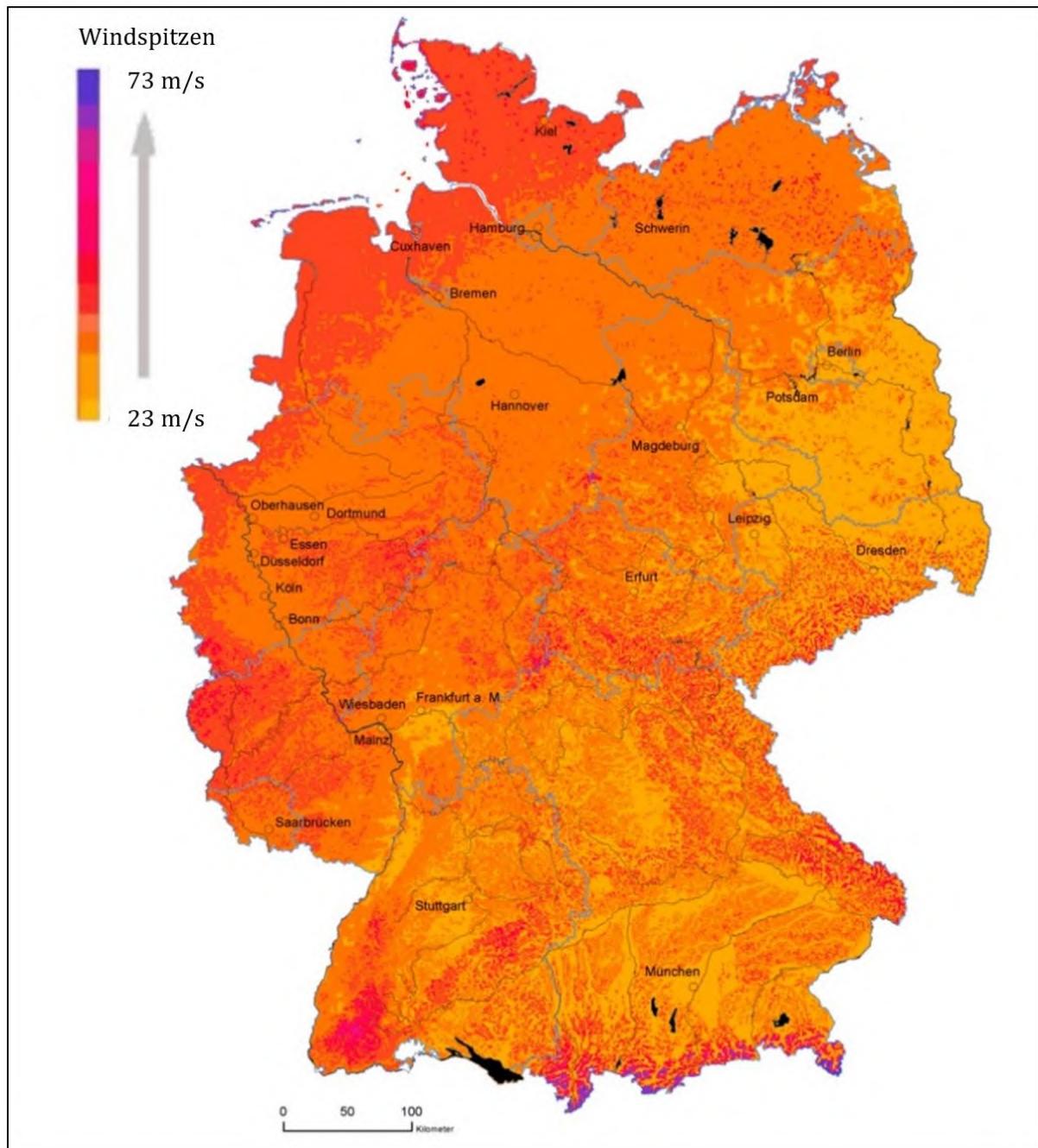
Mit Hilfe der Böengeschwindigkeit lässt sich der Böengeschwindigkeitsdruck ermitteln. Hierzu wird auf die DIN EN 1991-1-4/NA verwiesen, in der 3 verschiedene Methoden beschrieben werden.

Der Deutsche Wetterdienst hat auf Veranlassung des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenvorsorge (BBK) eine flächendeckende Karte zur Einschätzung der Sturmgefahren in Deutschland erarbeitet. Basisgröße ist dabei die Böengeschwindigkeit als 3-Sekunden-

mittelwert. Sie ist in Form von Sturmkarten für Windböen für das gesamte Bundesgebiet angegeben, deren Auftreten im statistischen Mittel z.B. einmal in 50, 100 und 500 Jahren zu erwarten ist. **Abbildung 5** zeigt exemplarisch die Verteilung der 100-Jahres Windspitzen. Für diese Böengeschwindigkeit findet sich deutschlandweit eine Bandbreite von etwa 30 m/s als Kleinst- und ca. 68 m/s als Größtwert. Alle kartierten Angaben stehen darüber hinaus auch als diskrete Rasterdaten mit einem Gitterpunktabstand von 1 km zur Verfügung. Sie überdecken eine Fläche mit den Gauß-Krüger Koordinaten zum 3 ten Meridianstreifen (Datenaufbau entsprechend ArcInfo-GRIDASCII Daten) von Rechtswert: 3280000 bis 3929000 bzw. Hochwert: 5230000 bis 6109000, so dass ohne weiteres ein Raumbezug zum Anlagenkataster von Betriebsbereichen nach StörfallV geschaffen werden kann. Die Genauigkeit der Einzelwerte wird zudem statistisch bewertet: der Konfidenzbereich, in dem jeder Rasterwert mit 95%-iger Wahrscheinlichkeit liegt, hat die Untergrenze -3,0 m/s und die Obergrenze +5,0 m/s um den jeweiligen Kartenwert. Die Karte der Windspitzen gibt die tatsächlichen Verhältnisse in Bodennähe in 10 m Höhe über Grund wieder. Für die Windlastermittlung an Bauwerken und Anlagen wird die Höhenzunahme der mittleren und der Böengeschwindigkeit benötigt. Dazu enthält die Karte keine Angaben. Mit Hilfe der Böengeschwindigkeit lässt sich der Böengeschwindigkeitsdruck ermitteln.

Beim Vergleich der Böengeschwindigkeit der Windlastnorm mit denen der Sturmkarte **Abbildung 5** ist zu beachten, dass die Normen Mittel- und Böengeschwindigkeit zunächst für einheitliche, standardisierte Bedingungen der Bodenrauigkeit, nämlich Geländekategorie II, und der Topographie, nämlich ebenes Gelände, angeben. Die Normen behandeln die Auswirkungen von Geländekategorie und Topographie für den individuellen Bauwerksstandort gesondert. Die für die Windlastermittlung erforderliche Höhenentwicklung von Mittel- und Böengeschwindigkeit kann auf diese Weise je nach Lage des Standortes und seiner Exponiertheit zuverlässig bestimmt werden. Die Sturmkarte in **Abbildung 5** enthält keine Angabe über die Entwicklung des Böenprofils.

Abbildung 5: Sturmkarte des DWD: Windspitzen für eine Jährlichkeit von 100 Jahren



Quelle: Augter und Ross (2011)

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass Tiefdruckstürme in Deutschland im Wesentlichen die Gefahrenquelle Wind bestimmen. Derartige Stürme erfassen große Gebiete und treten mehrfach pro Jahr auf. Für den Zusammenhang zwischen Häufigkeit und Intensität gibt es umfangreiche statistische Daten, die regional differenziert vorliegen. Aus den meteorologischen Daten wurde eine Windzonenkarte entwickelt, die Grundlage für die sturmsichere Konstruktion von Bauwerken aller Art ist. Gewitterstürme können im Binnenland regional die Stärke von Tiefdruckstürmen übertreffen. Die Werte der Windzonenkarte decken Gewitterstürme ab.

Abbildung 6 zeigt zusammenfassend den Ablauf einer Windlastermittlung für ein Anlagenteil. Die Wahl einer Risikoklasse ist der erste Schritt. Er führt auf Windlastfaktoren.

Im zweiten Schritt werden die Windlasten bestimmt. Das Vorgehen folgt der technischen Regel DIN EN 1991-1-4: Einwirkungen auf Tragwerke – Windlasten. Strömungsinterferenz kann für Anlagen nach StörfallV ein wesentlicher Einflussparameter sein, der zu Windlasterhöhungen führt.

Die Windlasten berechnet man mithilfe von aerodynamischen Beiwerten, die sich aus Form und Größe des Baukörpers ergeben. Zwar enthält das technische Regelwerk eine umfangreiche Sammlung solcher Beiwerte, jedoch kann es für chemische Anlagen im Einzelfall erforderlich sein, sie zu ergänzen.

Schließlich ist die Gefährdung eines Anlagenteils durch vom Wind erregte Schwingungen zu prüfen. Dazu gehört zunächst Resonanz mit der Windböigkeit, die die mechanischen Beanspruchungen im Anlagenteil erhöht. Es ist nachzuweisen, dass die erhöhten Beanspruchungen ohne Schädigung ertragen werden können. DIN EN 1991-1-4 enthält ein erprobtes Verfahren, das im Allgemeinen auch bei Anlagen nach StörfallV geeignet ist. Mögliche Einschränkungen sind der Norm zu entnehmen.

Abbildung 6: Für den Nachweis von baulichen Anlagen zu berücksichtigende Einwirkungen infolge der Gefahrenquelle Wind



Weitere Gefährdungen gehen von wirbelerregten Schwingungen aus. Sie können auf dem Wege der Materialermüdung zum Tragwerksversagen führen. Zur Berechnung der Schwingamplituden und der von ihnen ausgelösten Spannungen stehen im Anhang E.1 der Windlastnorm DIN EN 1991-1-4 zwei Verfahren zur Verfügung. Das erste Berechnungsverfahren in Anhang E.1.5.2 der Norm (das sogenannte Wirklängenverfahren) ist für das Windklima der mittleren Breiten geeignet und wird für eine Verwendung in der TRAS 320 empfohlen. Das zweite Berechnungsverfahren in Anhang E.1.5.3 der Norm (Spektralmethode) gilt für den Grenzfall turbulenzfreier Windströmung, wie sie in den Küstenregionen Nordeuropas auftritt. Das Verfahren nach Anhang E.1.5.3 liefert in der Regel Berechnungsergebnisse, die deutlich auf

sicherer Seite liegen. Es kann bei hohem Schadenspotential eines Anlagenteils zur Anwendung kommen.

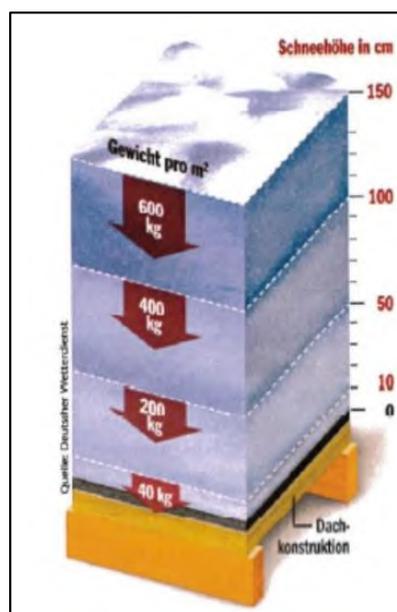
Gefahrenquellenanalyse gegenüber Schneelasten

Die Größe der Schneebelastung eines Baukörpers wird in erster Linie vom Standort des Bauwerks bestimmt. Daneben spielen die geometrischen Formen der Gebäude oder Anlagenteile, auf die der Schnee einwirkt, sowie ihre gegenseitige Anordnung eine erhebliche Rolle. Diese Abhängigkeit entsteht vornehmlich durch die Wechselwirkung von Schneefall und Wind, wie aus den winterlichen Verwehungen in den Schneefallgebieten Deutschlands erkennbar ist. Durch Wind kann gefallener Schnee in großem Maße versetzen, woraus sich schnell erhöhte Lasten entwickeln können.

Die gängigen Normen des Bauwesens berücksichtigen dies mit Hilfe von Formbeiwerten. Diese dienen als Hilfsmittel, um die Schneelast bei geneigten Bauwerksformen gegebenenfalls zu reduzieren und dann folglich in Mulden durch Schneesackbildung zu erhöhen. Für einen einzelnen Standort kann dies zur Folge haben, dass es – obwohl er im Normalfall innerhalb einer einzigen Schneelastzone anzusiedeln ist – zu ganz unterschiedlichen Lastsituationen der einzelnen Gebäude, Anlagen- und Maschinenteile eines Betriebsbereiches kommen kann. Daher ist die Gefahrenquelle Schneelast in komplexen Produktionsanlagen für einzelne Anlagenkomponenten und –teile stets separat zu untersuchen.

Hierbei ist das Verhältnis von Schneehöhen zu Schneelasten zu beachten, was oftmals zu Fehleinschätzungen führen kann. Der in Deutschland am häufigsten auftretende Schnee ist gebundener Neuschnee und feuchtnasser Altschnee. Für dessen Massendichte stellt eine Größe von 400 kg/m^3 einen anschaulichen Mittelwert dar. **Abbildung 7** veranschaulicht diese Massendichte mit Schneehöhenangaben.

Abbildung 7: Schneelast-Maßstab



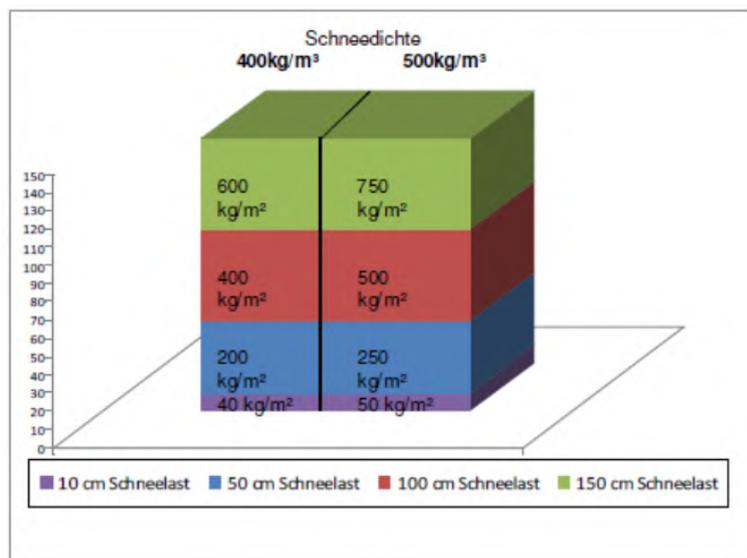
Quelle: DWD

Es wird deutlich, dass Schneehöhen von knapp unter 20 cm auf einer ebenen Fläche bereits eine Last von 75 kg/m^2 haben.

Generell trifft die Aussage zu, dass eine Schneedichte von $>500 \text{ kg/m}^3$ bei einjährigen Schneereignissen nicht erwartet werden kann, da der masseerhöhende Prozess nur durch permanenten Druck auf den Schnee durch neue Schneeschichten erfolgt. Für Anlagen nach StörfallV ist besonderes Augenmerk auf die Schneedichte und somit auf das resultierende Gewicht der Schneedecke auf den Anlagenteilen zu legen. Es lassen sich allerdings aufgrund der Vielzahl von beeinflussenden Faktoren keine Regelwerte für die Schneedichte angeben.

Die **Abbildung 8** zeigt den Zusammenhang zwischen der Schneedichte und der Höhe der Schneelast bei unterschiedlichen Schneehöhen. Es wird deutlich, dass sich der Betreiber bei der Beurteilung seiner Anlagenteile über die Bedeutung der Schneedichte im Klaren sein sollte.

Abbildung 8: Verdeutlichung der Höhe der Schneelast in Abhängigkeit von der Schneedichte



Quelle: Krätzig et al. (2016)

Die in den derzeit gültigen Normen festgelegten Schnee- und Eislasten haben eine Auftretenswahrscheinlichkeit von 50 Jahren. Eine Einstufung von Betriebsbereichen oder Anlagen in die Zuverlässigkeitsklasse RC 3, was eine Lasterhöhung um 10 % bedeutet, ist gleichbedeutend mit einer Auftretenswahrscheinlichkeit von 100 Jahren. Die DIN EN 1991-1-3:2019 bietet im Anhang D die Möglichkeit mittels der Gumbel-Verteilung, nach welcher die Schneelastfestlegung erfolgt, die Auftretenswahrscheinlichkeit der Maximallast zu modifizieren.

Besondere Regelungen gelten für das norddeutsche Tiefland, weil in seltenen Fällen Schneelasten bis zum mehrfachen der rechnerischen Werte gemessen wurden. Die zuständige Behörde kann in den betroffenen Regionen die Rechenwerte festlegen, die dann zusätzlich nach DIN EN 1990:2021-10 Teil 1.5.3.5 als außergewöhnliche Einwirkungen zu berücksichtigen sind. Höhere Werte als in DIN EN 1991-1-3 und DIN EN 1991-1-3/NA angegeben, können sich auch für bestimmte Lagen der Schneelastzone 3 ergeben. Von den zuständigen örtlichen Stellen sind in diesem Fall Informationen über die Schneelast einzuholen.

Gefahrenquellenanalyse gegenüber Eislasten

Grundsätzlich lässt sich das Phänomen der Eisbildung in Raueisbildung und Glatteisbildung unterscheiden. Aufgrund der unterschiedlichen Entstehungsweise sind die anzusetzenden Lastbilder auch unterschiedlicher Ausprägung (**Abbildung 9**).

Diesen Eiszonen sind gemäß DIN EN 1991-1-3/NA hier wiedergegeben als **Tabelle 6**, die Vereisungsklassen zugeordnet. Diese decken normale Verhältnisse ab. In besonders exponierten oder auch abgeschirmten Lagen sollte die maßgebende Vereisungsklasse besser durch ein meteorologisches Gutachten festgelegt werden.

Tabelle 6: Vereisungsklassen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland nach DIN EN 1991-1-3/NA

Eiszone	Region	Vereisungsklasse
1	Küste	G1, R1
2	Binnenland	G2, R2
3	Mittelgebirge $A \leq 400$ m	R2
4	Mittelgebirge $400 \text{ m} < A \leq 600$ m	R3

3.12.1 Zu Kapitel 8.2: Berücksichtigung des Klimawandels

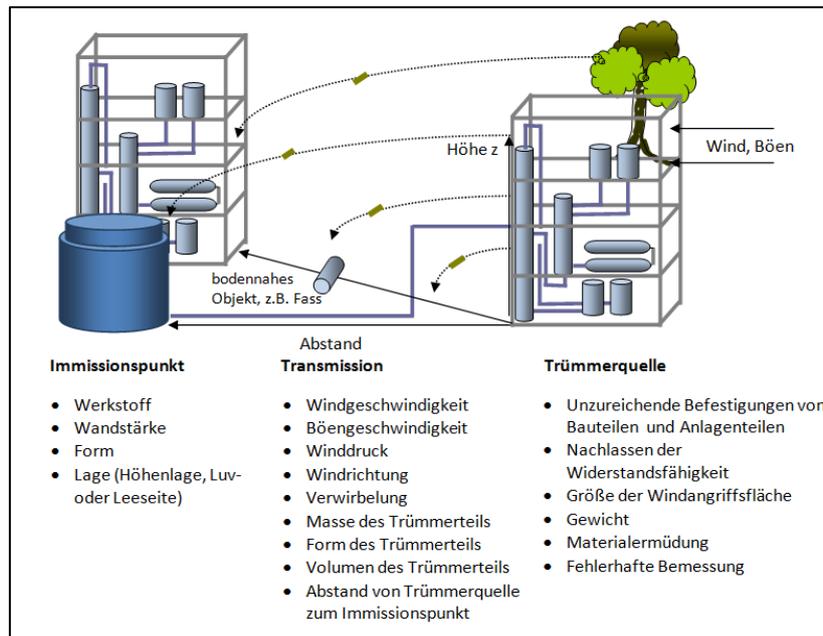
Ein Klimaänderungsfaktor bzgl. der Wind-, Schnee- und Eislasten kann aus den derzeit vorliegenden Untersuchungsergebnissen der Klimaforscher nicht abgeleitet werden. Die Unsicherheiten der Prognosen sind derzeit noch zu groß.

3.12.2 Zu Kapitel 8.3: Windbedingte Projektile

Wind kann auch dadurch zur Gefahrenquelle werden, dass er auf einzelne sicherheitsrelevante Anlagenteile einwirkt. Verliert das sicherheitsrelevante Anlagenteil durch die Einwirkung seine Funktion oder wird es insgesamt von der Anlage abgelöst, so kann dies eine zum Störfall führende Gefahrenquelle auslösen. Kapitel 8.3.1 fordert daher, dass ein möglicher Verlust von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen durch Windeinwirkung berücksichtigt wird.

Weiter können Starkwinde als primäre umgebungsbedingte Gefahrenquelle Objekte mit sich tragen oder Bäume, Masten usw. umstürzen, die dann als sekundäre Gefahrenquellen sicherheitsrelevante Anlagenteile gefährden. In **Abbildung 11** ist der gesamte Bereich zur Gefahrenquellenanalyse windbedingter Projektile mit den verschiedenen Einflussfaktoren grafisch dargestellt.

Abbildung 11: Darstellung möglicher Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile



Dabei wird zwischen Projektilquelle, Transmission und dem Immissionspunkt, an dem die beweglichen Objekte auftreffen, unterschieden. Freisetzungen von gefährlichen Stoffen können sowohl an der Projektilquelle als auch am Immissionspunkt durch Zerstörung von Rohrleitungen oder Behälterwandungen auftreten. Als potentielle Projektilquellen sind u.a. benachbarte Anlagen oder Bauwerke aber auch Bäume, die sich in der Nähe von Anlagen befinden, zu betrachten. Die Faktoren, die zu einem Abriss von Bau- oder Anlagenteilen führen können, sind vielfältig. Dies können z. B. unzureichende Befestigungen, Materialermüdung oder die Größe der Windangriffsfläche sein.

Die Transmission von Objekten kann durch die Luft aber auch am Boden erfolgen. Ein umgestürztes Fass kann durch den Wind beschleunigt und auf sicherheitsrelevante Anlagenteile zu rollen. Andere Objekte werden aus größeren Höhen durch die Luft getragen und können je nach Körper, Gewicht, Höhe und Windgeschwindigkeit einige Meter von der Emissionsquelle entfernt auf z.B. Rohrleitungen, Tanks oder andere sicherheitsrelevante Anlagenteile prallen.

Die Transmission hängt entscheidend von der Art der Windeinwirkung statt. Großflächige Tiefdruckstürme zeichnen sich überwiegend durch eine horizontale Windgeschwindigkeit aus.

Zusammengefasst ist von folgenden Szenarien auszugehen:

1. Durch eine Windspitze wird ein sicherheitsrelevantes Anlagenteil beschädigt oder abgerissen und verliert damit seine Funktion.
2. Ein Extremwind reißt innerhalb oder außerhalb des Betriebs aus einer Anlage oder von einem hoch gelegenen Bauwerksteil, wie z.B. eine Fassade, ein Teil heraus, das anschließend weitere Zerstörungen durch Herabstürzen innerhalb und außerhalb einer Anlage verursachen kann.
3. Ein Gegenstand, wie z.B. ein Baum oder ein Anlagenteil, wird von einer Bö umgestürzt und trifft auf ein Anlagenteil.
4. Durch Extremwind werden auf dem Boden liegende lose Gegenstände, wie z.B. Fässer, bodennah fortgetragen.

Für den Fall 1 ist eine Ermittlung sicherheitsrelevanter Anlagenteile, auf die Wind direkt einwirken kann, und Überprüfung ihrer Befestigung sinnvoll.

Für den Fall 2 ist mit Hilfe vereinfachender Annahmen die Berechnung von Flugbahnen mit sogenannten Modellkörpern (Rohr) möglich. Auch die Eindringtiefe in Stahl oder Beton kann überschlägig berechnet werden (Köppke, 2022).

Im Fall 3 ist eine Betrachtung der Standsicherheit möglicherweise relevanter Objekte und der möglichen Sturzflächen sinnvoll.

Im Fall 4 ist anzuraten zu nächst zu prüfen, inwieweit bei Anlagen ein Aufprallschutz bereits realisiert wurde. Danach kann geprüft werden, inwieweit überhaupt Gegenstände im Betrieb vorhanden sein können, aus denen sich „bodennahe Projektile“ entwickeln können und deshalb der Aufprallschutz zu ergänzen ist.

3.13 Zu Kapitel 9 Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile des Betriebsbereichs und der Anlagen

Sicherheitsrelevante Teile des Betriebsbereichs und Anlagenteile sind jene

1. mit besonderem Stoffinhalt
2. mit besonderer Funktion

zu bestimmen.

Bei bestehenden Betriebsbereichen und Anlagen sind die sicherheitsrelevanten Teile grundsätzlich bekannt. Ob alle Teile tatsächlich durch die jeweilige naturbedingte Gefahrenquelle betroffen sind, muss im Einzelfall untersucht werden.

Die TRAS 320 gibt schon zahlreiche Hinweise zur Ermittlung der potentiell betroffenen sicherheitsrelevanten Anlagenteile. Hierbei ist grundsätzlich wie folgt zu differenzieren:

1. Gebäuden, in denen sicherheitsrelevante Anlagen untergebracht sind,
2. Anlagen, die im Freien aufgestellt sind,
3. unter Erdgleiche verlegte Anlagenteile, wie z.B. Rohrleitungen, sowie erdgedeckte Lagertanks.

Zur Identifizierung sicherheitsrelevanter, gefährdeter Anlagen oder Anlagenteile soll die folgende **Tabelle 7** erste Hinweise geben:

Tabelle 7: Potentiell durch Wind, Schnee- oder Eislasten gefährdete Anlagenteile

	Beschreibung	Gefahrenquelle
Anlagen und Bauwerke mit besonderen Konstruktionen	Hallenkonstruktionen mit Flachdach oder gering geneigten Dachflächen	Wind, Schnee und Eis
	Dachformen mit höher und niedriger gelegenen Bereichen	Schneesackbildung, Eis
	Rohrleitungsbrücken	Wind, Schnee, Eis, Schwingungen
	Freileitungen (Stromversorgung, MSR-Kabelverbindung)	Wind, Eis
	Kühlsysteme / Kühltürme	Eis, Wind
	Sicherheitsventile, Überdrucksicherungen mit Sperrflüssigkeit wie bei Biogasanlagen	Eis
Anlagen und Bauwerke mit besonderen Konstruktionen	Hallenkonstruktionen mit Flachdach oder gering geneigten Dachflächen	Wind, Schnee und Eis
	Tankanlagen	Wind, Eis
	Schwimmdachkonstruktionen	Gefährdung durch hohe und ungleich-mäßig verteilte Schneelasten
Anlagen mit besonderen Auslegungen	Rohrleitungs- und Schlauchentleerungen	Wind, Eis
	Glaskonstruktionen (wg. Beständigkeit gegenüber Korrosion)	Wind, windbedingte Projektile
	emailierte Tanks	Wind, windbedingte Projektile
	leichte Dacheindeckungen aus Glas, Kunststoff oder Folien	Schnee
Besondere Anforderungen an die Instandhaltung	Aggregate mit beweglichen Teilen (v.a. mit Stillstandszeiten), Pumpen, Ventile (ohne Wetterschutzhaube)	Eisbildung
	Ältere Anlagenteile im Bestand ohne Überprüfung nach aktueller Norm	Wind, Schnee- und Eislasten (Gefährdung durch Auslegung nach alter Norm)

3.13.1 Zu Kapitel 9.1: Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten

3.13.2 Zu Kapitel 9.1.1: Windlasten

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wahrscheinlichkeit eines Tragwerksversagens durch Wind, Schnee- und Eislasten bei Gebäuden, die nach DIN EN 1990 mit Einstufung in RC 3 errichtet wurden, sehr gering ist (Ausnahme Tornados). Diese Anforderung wurde mit der TRAS

320 am 16.7.2015 eingeführt. Aus diesem Grund sind vorzugsweise diejenigen Gebäude und Anlagenteile zu betrachten, die nicht dieser Bemessungsgrundlage entsprechen und in denen sicherheitsrelevante Anlagenteile untergebracht oder die selber sicherheitsrelevante Anlagenteile sind. Dies sind vor allem ältere Anlagen, die vor der erstmaligen Einführung der TRAS 320 genehmigt wurden. Darüber hinaus wurden im März 2005 mit Neufassung der DIN 1055-4 die Berechnungsgrundlagen auf das Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte umgestellt, so dass alle Anlagen, die vor 2005 genehmigt wurden, auf einer gänzlich anderen Berechnungsgrundlage dimensioniert wurden.

Die Nachrechnung der Statik bestehender Gebäude bzw. Tragwerke ist oftmals mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, weil insbesondere bei älteren Bauwerken die Unterlagen der Tragwerksplanung nicht mehr vorliegen. In diesen Fällen ist der Tragwerksplaner gezwungen, die bestehende Bausubstanz (Träger, Mauerwerk usw.) bzgl. der eingesetzten Werkstoffe und Abmessungen einzeln aufzunehmen, um den Bestand in die Berechnungen einfließen zu lassen. Darüber hinaus haben sich, wie zuvor schon angesprochen wurde, die Berechnungsmethoden immer wieder verändert. Dies gilt insbesondere für die Einführung auf das Verfahren der Teilsicherheitsbeiwerte im Jahr 2005.

Alternativ können jedoch folgende einfache Methoden durchgeführt werden, die eine Überprüfung der Statik bestehender Bauwerke ermöglichen:

1. Vergleich der Lastannahmen früherer Normen und Vergleich mit den Lastannahmen der heute gültigen Normen
Für diese Vorgehensweise müssen im Wesentlichen nur die Kenntnis des Baujahrs des zu prüfenden Bauwerks, seine Höhe und die örtliche Lage bekannt sein. Sofern die Tragwerke ordnungsgemäß geplant sind und von den Baubehörden genehmigt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die Lastannahmen den Vorgaben der historischen Normen entsprechen und somit mit den Lastannahmen der derzeit gültigen Norm verglichen werden können.
2. Die zweite Methode besteht darin, die Lastannahmen aus den Tragwerksplanungen direkt zu entnehmen und mit den derzeit gültigen Normen und Anforderungen zu vergleichen. Dies ist allerdings nur möglich, wenn die Statiken noch vorliegen.

Die erste Methode ist dann sinnvoll, wenn die Bauunterlagen nur unvollständig vorliegen. Diese Vorgehensweise ersetzt allerdings keine detaillierte Tragwerksplanung. Bei der Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile eines Betriebsbereichs ist die Kenntnis des Baujahrs der Anlage bzw. des Anlagenteils sowie das Erscheinungsjahr des zur Auslegung verwandten technischen Regelwerks zur Tragwerksberechnung erforderlich.

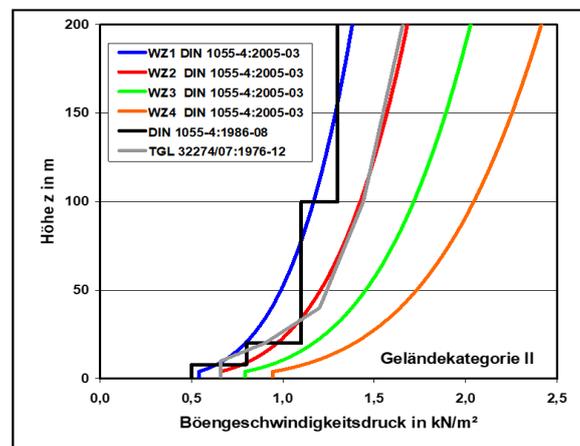
Die DIN 1055-4 regelte lange Zeit die Windeinwirkungen auf Tragwerke. Nach Kriegsende galt in der BRD - und vermutlich ebenfalls in der DDR - zunächst die Fassung der Ausgabe Juni 1938 weiter. Die Ausgabe August 1986 ersetzte sie ab Januar 1987 in den Ländern der BRD. In der DDR war bereits im Dezember 1976 der DDR-Standard TGL 32274/07: Lastannahmen für Bauwerke/ Windlasten eingeführt worden. Die Ausgabe DIN 1055 Blatt 4 (8.86) galt seit dem Beitritt der DDR zur BRD im Oktober 1990 auch in den neuen Bundesländern. Im März 2005 erschien die grundsätzliche Neufassung DIN 1055-4:2005-03, die erstmals regionale Unterschiede bei den Windgeschwindigkeiten durch Ausweisung von vier Windzonen berücksichtigte. Sie galt nach ihrer bauaufsichtlichen Einführung bis zur Einführung des

entsprechenden, seit Dezember 2010 veröffentlichten Eurocodes DIN EN 1991-1. Mittlerweile wurde der Eurocode am 1. Juli 2012 bauaufsichtlich eingeführt. Er löst somit die DIN 1055 in der Liste der technischen Baubestimmungen ab. Allerdings wurde eine weitere bauordnungsrechtliche Übergangsfrist in einigen Ländern der Bundesrepublik Deutschland bis zum 31.12.2013 geschaffen.

Im Juli 2015 wurde mit Einführung der TRAS 320 durch die Einstufung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen in die Schadensfolgenklasse CC 3 sowie in die Zuverlässigkeitsklasse RC 3 eine Lasterhöhung um 10 % für Wind, Schnee- und Eislasten eingeführt.

Die Windlastannahmen der einzelnen Baunormen sind in **Abbildung 12** grafisch dargestellt. Die Festlegungen zum Geschwindigkeitsdruck in der Fassung 8/86 stammten aus der Ausgabe vom Juni 1938. Er war dort in Form der bekannten Treppenkurve angeben.

Abbildung 12: Festlegungen des Geschwindigkeitsdruckes in deutschen Normen: in TGL 32274/07, Ausgabe Dez. 1976, als Polygonzug; in DIN 1055-4, Ausgabe 6.1938, als Treppenkurve, in der Ausgabe 3.2005 als Potenzprofile, hier für Geländekategorie II in Abhängigkeit der Windzonen



Die Treppenkurve galt einheitlich für alle Klimazonen Deutschlands, der Einfluss der Bodenrauigkeit wurde nicht erfasst. Die TGL-Regelung der DDR benutzte einheitlich einen Polygonzug als Annäherung an das Windprofil. Der Geschwindigkeitsdruck ist dort als ein 2-min Mittelwert mit einer Rückkehrperiode von 5 Jahren definiert. Um den Faktor 1,2 vergrößert erhält man die „Rechenlast“. Die TGL erfasste den Fall einer größeren Bodenrauigkeit dadurch, dass sie für geschützte Lagen, z.B. innerhalb einer geschlossenen Bebauung, einen von der Höhe über Grund abhängigen Abminderungsfaktor einführte (**Tabelle 8**):

Tabelle 8: Abminderungsfaktoren der TGL 32274/07, Ausgabe Dez. 1976

Höhe über Grund (m)	bis 10	> 10 bis 20	> 20 bis 40	> 40 bis 100	> 350
Abminderungsfaktor	0,65	0,71	0,77	0,86	1,00

Die Neufassung DIN 1055-4:2005-03 ersetzte die Treppenkurven durch realistische, stetige Windprofile, deren Verlauf von der Bodenrauigkeit bestimmt ist. Darüber hinaus führte man Windzonen ein, um die geografisch unterschiedliche Sturmintensität zu erfassen. Diese Vorgehensweise entsprach dem Eurocode 1991-1-4, der im Dezember 2010 als DIN EN veröffentlicht wurde. Man erkennt in **Abbildung 12**, dass die TGL-Regelung ziemlich genau der Standardgeländekategorie II entspricht und die heutige Windzone 2 erfasst. Das Gebiet der

ehemaligen DDR ist in der Windzonenkarte im Wesentlichen in die Zone 2 eingeordnet. Die Windlast der TGL deckte also abgesehen von küstennahen Bereichen bereits das nach heutiger Norm geforderte Lastniveau ab. Man kann die Treppenkurve der DIN 1055 Blatt 4 durch

$$q = 0,75 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,22}$$

annähern (s. Erläuterungen in DIN 1055 Blatt 4 (1986)). Der Profilexponent der Näherung liegt mit einem Wert von 0,22 zwischen den Geländekategorien I und II, der Geschwindigkeitsdruck zwischen den Windzonen 1 und 2.

Zusammenfassend ergibt sich, dass es mit Einführung der DIN 1055-4:2005-03 mit einer Windzonenkarte in Küstengebieten und in Teilen des Binnenlandes der BRD zu Windlast erhöhungen 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.

Mit der Einstufung von Anlagen, die der StörfallV unterliegen, in die Zuverlässigkeits-klasse RC 3 bzw. Schadensfolgenklasse CC 3 wird, wie schon erwähnt wurde, die einwirkende Windlast um bundesweit 10 % erhöht. In der **Tabelle 9** sind die Verfahrensschritte zur Berechnung der Windlast nach EN 1991-1-4 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 9: Verfahrensschritte zur Berechnung der Windlast nach EN 1991-1-4

Prüfung der Schwingungsanfälligkeit des Tragwerks	
nicht schwingungsanfälliges Tragwerk Verfahren für Winddrücke oder Windkräfte	schwingungsanfälliges Tragwerk Verfahren nur für Windkräfte
Windlast als vorwiegend ruhende, statische Einwirkung mit Größtenfaktor c_s zur Erfassung der Turbulenzstruktur (Ungleichzeitigkeit maximaler lokaler Böengeschwindigkeiten)	statische Ersatzlast für die Windkräfte mit Strukturbeiwert $c_s c_d$ in Abhängigkeit der Turbulenzstruktur und der dynamischen Tragwerkeigenschaften, insbesondere der Dämpfung
Berechnung des Böengeschwindigkeitsdrucks q_p in der Bezugshöhe z_e - Windzone des Anlagenstandorts - Berücksichtigung der Bodenrauigkeit; - Auswirkung einer topographisch exponierten Lage - Einfluss der Windrichtung: Stärkewindrose - Höhe des Standortes ü. NN - Erfassung der Windturbulenz	Berechnung des Böengeschwindigkeitsdrucks q_p in der Bezugshöhe z_s wie bei nicht schwingungsanfälligem Tragwerk Berechnung des Strukturbeiwerts $c_s c_d$ mit den Windparametern in der effektiven Höhe z_s
aerodynamische Druck-, Kraft- oder Reibungsbeiwerte	aerodynamische Kraftbeiwerte

statische Wind-Ersatzlasten

vereinfachte Anordnung von Winddrücken oder Windkräften, deren Auswirkungen äquivalent zu den maximalen Wirkungen des turbulenten Windes sind.

3.13.3 Zu Kapitel 9.1.2: Schnee- und Eislasten

Anlagen, die im Freien aufgestellt sind, sind den Gefahrenquellen Schnee und Eis grundsätzlich ausgesetzt. Eine erste Einschränkung der gefährdeten Anlagen erfolgte schon in der vereinfachten Gefahrenquellenanalyse. Der Kreis der tatsächlich zu betrachtenden Anlagen lässt

sich wiederum auf der Grundlage der historischen Entwicklung der Baunormen sowie der jeweiligen Baujahre der verbleibenden Anlagen weiter einschränken.

12/1936: DIN 1055, Blatt 5 - Schneebelastung

Die erste normative Regelung zu einheitlichen Schneelasten wurde im Dezember 1936 eingeführt. Die Dachbelastung wurde pauschal für das gesamte Rechtsgebiet des damaligen Deutschen Reichs zu $0,75 \text{ kN/m}^2$, also 75 kg/m^2 , festgelegt, bezogen auf die Grundrissfläche des Objektes. Je nach Dachneigung nahm die Last zwischen 20° und 60° von $0,75 \text{ kN/m}^2$ bis auf 0 geradlinig ab. Für Dachflächen mit Neigungen kleiner 20° wird die Schneelast nicht abgemindert.

12/1956: DIN 1055, Blatt 5 - Schneebelastung

Gegenüber der normativen Regelung von 1936 wurde aus den Erfahrungen der harten und schneereichen Winter zu Beginn des Krieges und unmittelbar nach Kriegsende die neue DIN 1055-5 von 1956 in der Weise ergänzt, dass bei einem Schneelastanteil $> 60\%$ bezogen auf die Gesamtbelastung der Schneelastanteil mit einem Faktor bis maximal 1,24 zu erhöhen ist. Damit sollte der Tatsache Rechnung getragen werden, dass bei leichten Dachkonstruktionen die Schneebelastung ein dominierender Lastfall ist und somit das Tragwerk eine erhöhte Sicherheit erfahren sollte. Zusätzlich wird noch auf die Gefahr der Wassersackbildung durch Wasser aus getautem Schnee hingewiesen.

06/1975: DIN 1055, Teil 5 - Lastannahmen für Bauten, Verkehrslasten – Schneelast und Eislast

Die für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik Deutschland einheitlichen Regelungen wurden mit Einführung der DIN 1055 im Jahre 1975 aufgehoben. Statt der einheitlichen Dachlast von 75 kg/m^2 wurden für das gesamte Bundesgebiet vier geographische Schneelastzonen (I bis IV) eingeführt. Die hierfür festgelegte Regelschneelast variiert je nach Geländehöhe des Bauwerksstandortes und der Schneelastzone zwischen Werten von $0,75 \text{ kN/m}^2$ und $5,50 \text{ kN/m}^2$. **Tabelle 10** gibt diese Regelungen der DIN 1055 Teil 4 wieder.

Tabelle 10: Regelschneelast s_0 in kN/m^2 (kp/m^2) gemäß Tabelle 2 der DIN 1055 Teil 5

Geländehöhe des Bauwerksstandortes über NN	Schneelastzone I	Schneelastzone II	Schneelastzone III	Schneelastzone IV
≤ 200	0,75 (75)	0,75 (75)	0,75 (75)	1,00 (100)
300	0,75 (75)	0,75 (75)	0,75 (75)	1,15 (115)
400	0,75 (75)	0,75 (75)	1,00 (100)	1,55 (155)
500	0,75 (75)	0,90 (90)	1,25 (125)	2,10 (210)
600	0,85 (85)	1,15 (115)	1,60 (160)	2,60 (260)
700	1,05 (105)	1,50 (150)	2,00 (200)	3,25 (325)
800	1,25 (125)	1,85 (185)	2,55 (255)	3,90 (390)
900		2,30 (230)	3,10 (310)	4,65 (465)
1000			3,80 (380)	5,50 (550)
1000				Einzelfallregelung

Im gleichen Zuge wurden auch die Grenzen zur Abminderung bei Schrägdächern verändert. Für Dachformen mit Neigungen $< 30^\circ$ muss die Schneelast voll und für Dachformen mit Neigungen $> 70^\circ$ darf sie zu Null angesetzt werden. In dem Bereich dazwischen darf die Schneelast mit einem in der Norm neu definierten Faktor k_s abgemindert werden, der in der dortigen Tabelle 1 numerisch vorgegeben wird. Der dem Sicherheitsnachweis zugrunde zu legende Rechenwert der Schneelast ergibt sich aus dem Abminderungsfaktor k_s multipliziert mit der Regelschneelast.

Erstmals wurden Regelungen zu einer möglichen Eislast in die Norm aufgenommen. Die Normenausgabe von 1975 gibt vor, dass bei allen Tragwerken, an denen eine Belastung aus Eis auftreten kann, eine allseitige 3 cm dicke Eisschichtbildung für Geländehöhen < 400 müNN angesetzt werden muss. Die Eisrohichte ist mit 7 kN/m^3 (700 kp/m^3) einzusetzen. Für Geländehöhen über 400 müNN wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass genauere Untersuchungen erforderlich sind.

04/1994: DIN 1055, Teil 5 A1 - Lastannahmen für Bauten, Verkehrslasten – Schneelast und Eislasten

Alle Regelungen der Norm vom 06/1975 bleiben bestehen. Lediglich die Karte der Schneelastzonen wird auf die wiedervereinigte Bundesrepublik Deutschland einschließlich der neuen Bundesländer erweitert. Diese Karte in **Abbildung 13** wurde aus der Normenfassung 1994 übernommen.

Derzeit gültige Schneelastnormen: Europäische Norm DIN EN 1991-1-3/NA

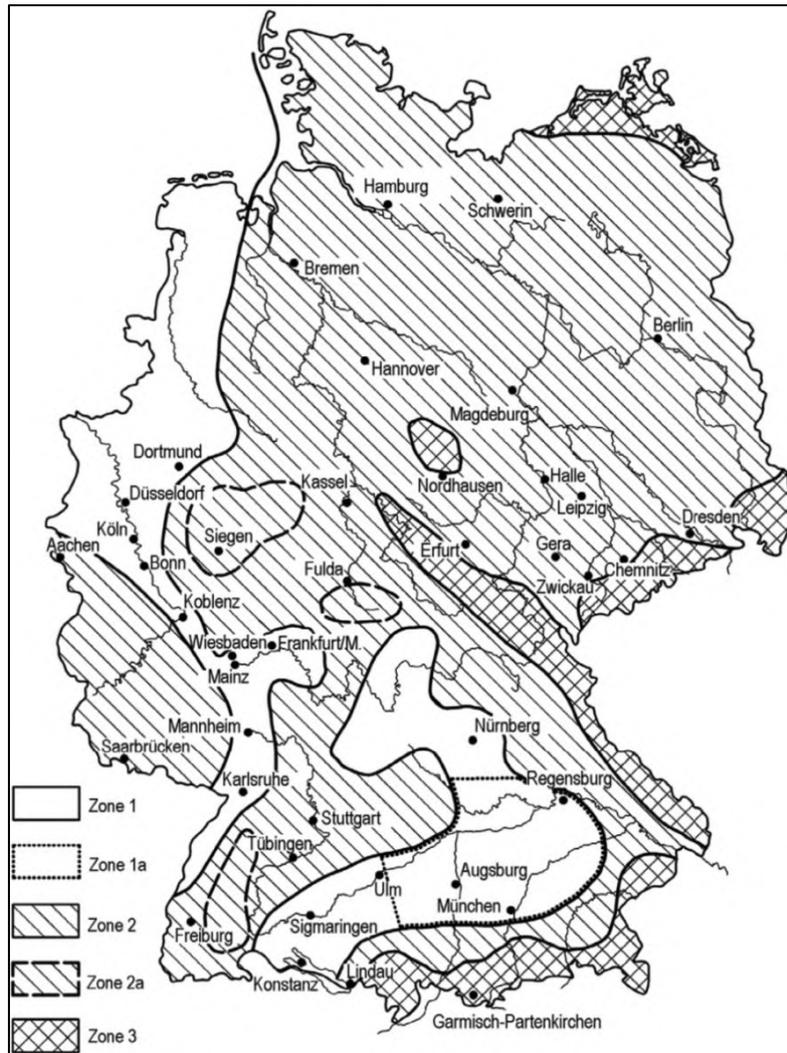
Die Europäische Norm EN 1991-1-3 wurde 2003 herausgegeben. Im Dezember 2010 wurde die Norm mit eingearbeiteten Berichtigungen und dem Nationalen Anhang (NA) novelliert. Im April 2019 erschien eine weitere Überarbeitung. DIN EN 1991-1-3 ist Ersatz für DIN 1055-5 (2005-07).

Die heutige Schneelastnormung basiert auf folgenden 4 Elementen:

1. Schneelastzone
2. Ermittlung der Schneelast am Boden
3. Prüfung örtlicher Besonderheiten bei der Schneelast
4. Berechnung der Schneelast auf dem Dach

Die Grundlage für die Berechnung der potentiellen Schneelast ist die Schneelastzone, in der das Bauwerk liegt. Deutschland ist in fünf Schneelastzonen aufgeteilt: 1, 1a, 2, 2a und 3 (Abbildung 13).

Abbildung 13: Schneezonenkarte für Deutschland



In **Tabelle 11** sind für die einzelnen Schneezonen die charakteristischen Schneelasten (S_k) sowie deren Gültigkeit als Höhe über dem Meeresspiegel zusammengefasst.

Tabelle 11: Mindestschneelasten mit deren Gültigkeit

Zone	Charakteristische Schneelast (S_k) (Sockelbeträge)	Schneelast gültig bis (Höhe ü. d. M.)
1	0,65 kN/m ²	bis 400 m ü.d.M.
1a	0,81 kN/m ²	bis 400 m ü.d.M.
2	0,85 kN/m ²	bis 285 m ü.d.M.
2a	1,06 kN/m ²	bis 285 m ü.d.M.
3	1,10 kN/m ²	bis 255 m ü.d.M.

Für Standorte, die höher liegen als in der **Tabelle 11** angegeben, gibt es jeweils eine Berechnungsformel, die unter Berücksichtigung der Höhe die Schneelast am Boden ausgibt.

Tabelle 12: Berechnungsformeln zur Berechnung der Schneelast am Boden über Gültigkeit der angegebenen Höhen in Tabelle 11

Zone	Berechnungsformel
1	$S_k = 0,19 + 0,91 \cdot ((A + 140)/760)^2$
1a	$S_k = 1,25 \cdot [0,19 + 0,91 \cdot ((A + 140)/760)^2]$
2	$S_k = 0,25 + 1,91 \cdot ((A + 140)/760)^2$
2a	$S_k = 1,25 \cdot [0,25 + 1,91 \cdot ((A + 140)/760)^2]$
3	$S_k = 0,31 + 2,91 \cdot ((A + 140)/760)^2$

Die Werte nach den Tabellen 11 und 12 geben zunächst nur die Schneelast am Boden an. Auf Dachflächen verhält sich die Schneelast je nach Dachform anders. Die Dachbelastung wird durch Multiplikation mit einem Formbeiwert errechnet (**Tabelle 13**).

Tabelle 13: Formbeiwerte der Schneelast für flache und geneigte Dächer

Dachneigung α	$0^\circ < \alpha < 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha > 60^\circ$
Formbeiwert μ_1 für flache Dächer	0,8	$0,8 (60^\circ - \alpha)/30^\circ$	0
Formbeiwert μ_2 für geneigte Dächer	$0,8 + 0,8\alpha/30^\circ$	1,6	1,6

Im Fall der Einstufung von Betriebsbereichen oder deren Anlagen von bisher CC 2 auf CC 3 sowie von RC 2 auf RC 3 wird die anzusetzende Schneelast um 10 % erhöht.

Ordnet man die Baujahre der einzelnen Betriebsbereiche den historischen Baunormen zu und vergleicht anschließend die damaligen Lastannahmen mit den heute anzusetzenden Lasten, können auf einfache Art die potentiell gefährdeten Bau- bzw. Tragwerke herausgefiltert werden.

3.13.4 Zu Kapitel 9.2: Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile: Ermittlung der gefährdeten Anlagen und Anlagenteile

Sicherheitsrelevante Anlagenteile, die keine Gebäude oder Tragwerke sind und der direkten Einwirkung von Wind ausgesetzt sind, sind zu ermitteln und hinsichtlich möglicher Folgen derartiger Einwirkungen zu untersuchen. Besonders zu beachten sind dabei sicherheitsrelevante Mess- und Regeltechnik mit Sensoren, Aktoren oder Kabeln an exponierten Stellen. Entweder ist die Befestigung dieser Anlagenteile zu überprüfen oder sie sind gegen Funktionsverlust sicher auszuführen.

Als relevante Quelle von windbedingten Projektilen kommen vor allem Anlagenteile in Betracht, die höher sind als ein möglicherweise getroffenes Objekt. Daher sind vor allem Anlagenteile, die höher sind als ihre Umgebung hinsichtlich möglicher Ablösung von relevanten Projektilen zu betrachten. Damit eine Ablösung eintritt, muss eine ausreichende Kraft durch Druck oder Sog auf diese Anlagenteile wirken. Von daher sind insbesondere Anlagenteile mit einer hohen Anströmfläche als potentielle Projektilquelle relevant.

Ist die Bildung von Projektilen nicht auszuschließen, müssen die sicherheitsrelevanten Anlagenteile ermittelt werden, die durch windbedingte Projektile getroffen werden können.

Hierzu ist zunächst eine Ortsbegehung erforderlich, bei der alle sicherheitsrelevanten Anlagenteile in unmittelbarer Nähe zum Entstehungsbereich von Projektilen identifiziert werden. Sind z.B. Tanklager unmittelbar unter höheren Tragwerken oder Kolonnen positioniert, sind sie als gefährdet einzustufen. Ähnliches gilt auch für Rohrleitungen bzw. Rohrleitungsbrücken.

Die TRAS fordert primär, die Bildung von Projektilen zu verhindern. Falls dennoch eine Gefährdung sicherheitsrelevanter Anlagenteile durch windbedingte Projektile nicht ausgeschlossen wird, ist zu prüfen, ob durch Bauweise und Material dieser Anlagenteile eine sicherheitsrelevante Schädigung ausgeschlossen werden kann. Wenn dennoch eine Gefährdung nicht ausgeschlossen werden kann, können im Einzelfall Modellrechnungen herangezogen werden, um einen Anhaltspunkt für die mögliche maximale Flugweite von Projektilen zu erhalten (Köppke, 2022). Wie weit Projektile fortgetragen werden können, hängt von der Höhe des Entstehungsortes (Fallhöhe), der Böengeschwindigkeit sowie von der Form und dem Gewicht des Projektils ab. Es ist mit vereinfachenden Annahmen und der Einführung von Modellkörpern möglich, die maximale Flugweite von Projektilen und damit den Kreis der eventuell gefährdeten, sicherheitsrelevanten Anlagenteile zu erhalten.

Ein windbedingtes Projektil kann sich jedoch auch nur am Boden fortbewegen, wie z.B. ein rollendes Fass. Ausgehend von den verschiedenen Lagerflächen auf dem Betriebsgelände sind die potentiellen Rollwege mit ihren Hindernissen zu ermitteln und zu bewerten. Von besonderer Bedeutung sind hierbei Gefällstrecken, die zu einer Erhöhung der Rollgeschwindigkeit beitragen können. Die ermittelten Wege sollten mit den potentiellen Aufprallpunkten, wie z.B. Tankanlagen, verglichen werden, die schon im Rahmen der Analyse Verkehrswege innerhalb des Betriebsgeländes durchgeführt wurden.

3.14 Zu Kapitel 10 Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen

Kernstück dieses Abschnitts der TRAS sind Beispiele von Szenarien der Einwirkung natürlicher, umgebungsbedingter Gefahrenquellen für die geprüft werden muss, ob sie zu Störfällen führen können.

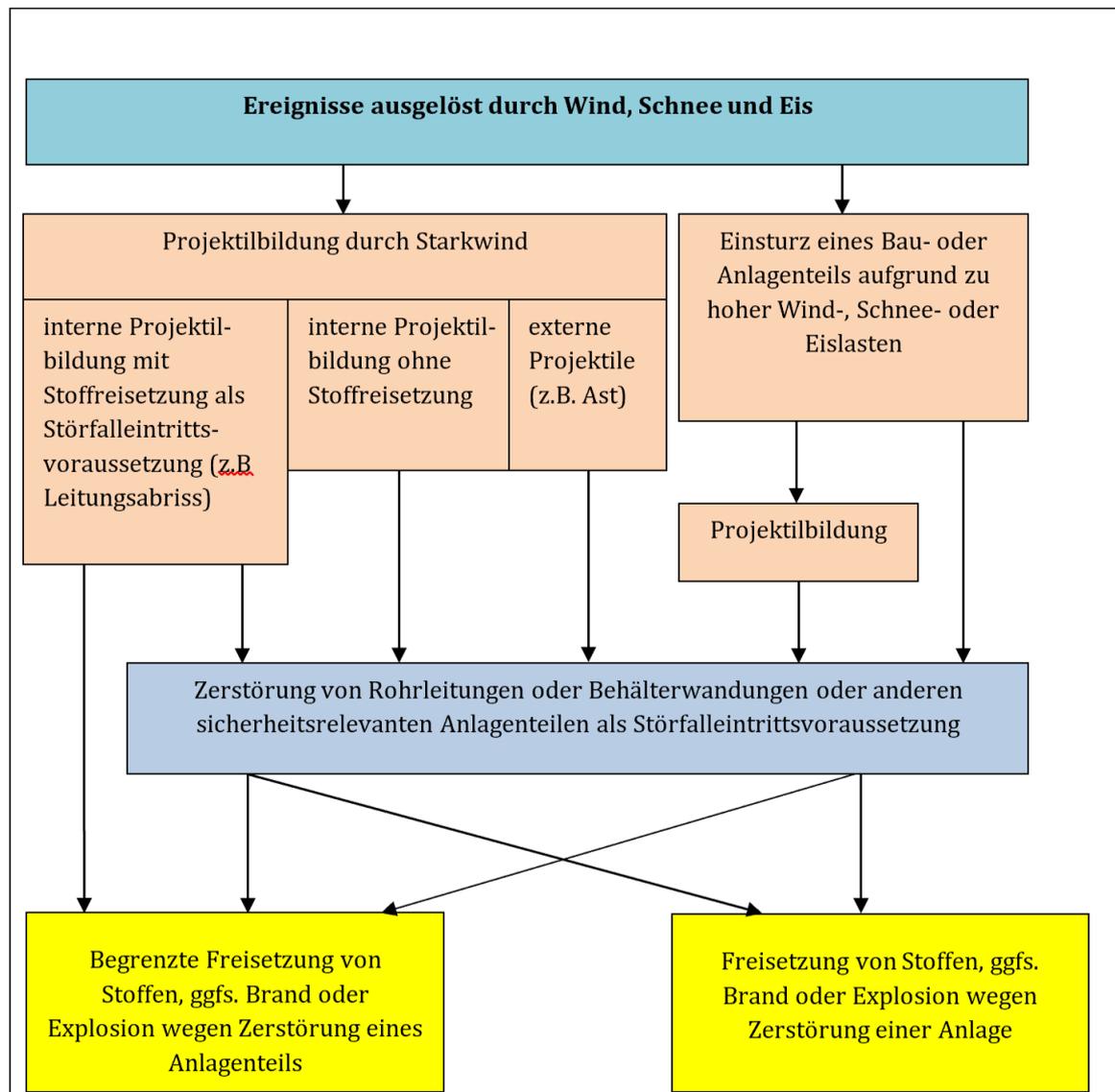
Hierbei sollten nicht nur gefährdete sicherheitsrelevante Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt oder besonderen Funktionen innerhalb des Betriebsbereichs berücksichtigt werden, sondern auch sicherheitsrelevante Anlagenteile außerhalb des Betriebsbereichs. Dies kann z.B. Trafostationen und Kommunikationseinrichtungen betreffen, die abseits vom eigentlichen Betriebsgelände gelegen sein können aber sicherheitsrelevant sind.

Darüber hinaus sind auch die Wechselwirkungen verschiedener Anlagenteile und das gleichzeitige Versagen mehrerer sicherheitsrelevanter Anlagenteile, wenn sie durch das Einwirken einer Gefahrenquelle gleichzeitig gestört werden können, zu betrachten.

Bei den Szenarien ist zu prüfen, ob ein nur Teilversagen oder ein sogar Vollversagen eines Gebäudes, eines Tragwerks oder einer Gefahrstoffumschließung eintreten kann. Nur mit einem Teilversagen ist bei Einwirkung windbedingter Projektile zu rechnen.

Eine denkbare Kausalkette ist in **Abbildung 14** dargestellt.

Abbildung 14: Einwirkungen, Störfalleintrittsvoraussetzungen und Folgen durch die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eis



3.15 Zu Kapitel 11: Schutzziele und Grundlagen für das Schutzkonzept

Zur Festlegung des Schutzziels wird in der TRAS 320 zwischen neuen Betriebsbereichen und neuen sicherheitsrelevanten Anlagenteilen einerseits und bestehenden Betriebsbereichen andererseits differenziert. Stichtag für diese Unterscheidung ist der 16.7.2015 (Tag der Veröffentlichung der ersten TRAS 320). Anders als in der TRAS 320 aus dem Jahr 2015, in der eine Einstufung aller Betriebsbereiche und sicherheitsrelevanten Anlagenteile (SRA) in die Schadensfolgenklasse CC 3 festgeschrieben war, ist in der Neufassung der TRAS nunmehr eine differenzierte Einstufung in CC 2 oder CC 3 möglich, wobei die Schadensfolgenklasse CC 2 eine Mindestanforderung darstellt. Bei hohem Gefahrenpotential oder Gefährdungen sollen gemäß Kapitel 11 Buchstabe A Satz 1b der TRAS 320 SRA und bauliche Anlagen, in denen sich diese befinden, der Schadensfolgenklasse CC 3 entsprechen.

Diese Einstufung soll unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Gefahrenquellenanalyse, der Ermittlung von SRA und SRB sowie der Störfalleintrittsvoraussetzungen erfolgen. Darüber

hinaus wird in Tabelle 3 der TRAS 320 eine Zuordnung der Schadensfolgenklassen gemäß DIN EN 1990:2021-10 zu den Begriffen der StörfallV gegeben. Sowohl in der Baunorm als auch in der StörfallV wird auf die Gefährdung von Menschenleben sowie auf umweltbeeinträchtigende Folgen verwiesen.

Die Einstufung in eine Schadensfolgenklasse orientiert sich somit an

1. der Intensität der umgebungsbedingten Gefahrenquelle,
2. den potentiell gefährdeten SRA und baulichen Anlagen,
3. den Störfalleintrittsvoraussetzungen sowie
4. der Gefährdung von Menschenleben sowie den umweltbeeinträchtigenden Folgen im Fall eines Störfalls aufgrund der Gefährlichkeit der gehandhabten Stoffe.

In der genehmigungsrechtlichen Praxis bedeutet die Einstufung der SRA und der baulichen Anlagen, in denen sich diese befinden, somit eine Entscheidung im Einzelfall. Einschränkend ist jedoch 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 StörfallV fallenden Betriebsbereich oder ... Anlage ergibt, das unmittelbar oder später innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs oder der Anlage zu einer ernststen Gefahr oder zu Sachschäden nach Anhang VI Teil 1 Ziffer I Nummer 4 StörfallV 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 (vgl. Tabelle 1). Es wird deshalb empfohlen, eine Einstufung der sicherheitsrelevanten Anlagen in Betriebsbereichen in die Klasse CC 3 / RC 3 vorzunehmen.

Neben der Einstufung von neuen SRA und Bauwerken, in denen sich SRA befinden, in Schadensfolgenklassen sieht die TRAS 320 auch die Anwendung weitergehender Teilsicherheitsbeiwerte bei besonders hohem Gefahrenpotential oder besonders hoher Gefährdung vor.

Für die Überwachung der Planung, Herstellung und Errichtung von neuen SRA und baulichen Anlagen, in denen sich SRA befinden, legt die TRAS 320 fest, dass entsprechend der Ausführungsklasse EXC 2 (DIN EN 1090-2) die Überwachungsmaßnahmen DSL 2 und die Überwachungsstufe IL 2 nach DIN EN 1990/NA zu berücksichtigen sind. Nur bei besonders hohem Gefahrenpotential ist zu prüfen, ob es der Anwendung von Überwachungsmaßnahmen bzw. -stufen der Kategorien DSL 3 bzw. IL 3 bedarf. Mit Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC 3 hätte eigentlich auch die Einstufung der Überwachungsmaßnahmen bei der Planung in die Klasse die DSL 3 und bei der Herstellung in die Klasse IL 3 festgelegt

werden müssen, was in der Praxis jedoch zu erheblichen Problemen bezüglich der Verfügbarkeit zugelassener Sachverständiger geführt hätte.

Für bestehende Betriebsbereiche, die vor dem 16.7.2015 genehmigt wurden, ist der Nachweis der Tragfähigkeit gegenüber gegen Böen, Windspitzen und Schwingungen entsprechend DIN EN 1991-1-4/NA: 2010-12, Schneelasten entsprechend DIN EN 1991-1-3/NA: 2019-04 und Eislasten entsprechend DIN EN 1991-1-3/NA: 2019-04 unter Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen durch Einstufung in die Schadensfolgenklasse CC 3 durch den Anlagenbetreiber vorzulegen.

Wie schon im Zusammenhang mit den Erläuterungen zur Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile des Betriebsbereichs und der Anlagen dargestellt wurde, kann durch einen Vergleich der Lastannahmen auf der Grundlage der historischen Baunormen mit denen der heute gültigen Baunorm einschließlich der erhöhten Last aufgrund der Einstufung in CC 3/RC 3 die Tragwerkssicherheit überprüft und die Lastreserven ermittelt werden (vgl. Kapitel 3.14). Die Nutzbarkeit von Lastreserven muss gewährleistet sein, andernfalls ist durch organisatorische Maßnahmen die Nutzlast zu begrenzen. Wenn auch dies nicht möglich ist und auch keine technische Sanierung durchführbar oder unverhältnismäßig ist, sind auch weitere organisatorische Maßnahmen denkbar, sofern sie ein gleichwertiges Sicherheitsniveau gewährleisten.

Für den Fall, dass ein Nachweis ausreichender Lastreserven nicht geführt werden kann, ist ein Erstprüfung nach VDI 6200 oder einem mindestens gleichwertigen Verfahren durch einen Tragwerksplaner durchzuführen.

3.16 Zu Kapitel 12 Erarbeitung von Schutzkonzepten

Die TRAS gibt an dieser Stelle eine Übersicht über die möglichen Maßnahmen gegen die naturbedingten Gefahrenquellen Wind-, Eis und Schneelasten. Wichtig ist, dass mit dem Schutzkonzept alle vernünftigerweise nicht auszuschließenden Gefährdungen und Szenarien abgedeckt werden.

Grundsätzlich können Vorkehrungen und Maßnahmen wegen einzelner Gefahrenquellen in die zeitliche Abfolge vor, während und nach dem Ereignis unterschieden werden. Auf dieser Basis können in Ergänzung zur TRAS folgende Hinweise gegeben werden.

Vor dem Wirksamwerden der Gefahrenquelle

Durch Überwachung der Wetterlage können Extremschneeereignisse erkannt werden. Bei Eintritt dieser Wetterlagen ist zu Beginn bereits die Alarmbereitschaft für die Schneeräumungsmaßnahmen und die Sicherung der besonders gefährdeten Gebäude, Anlagen und Anlagenteile zu erhöhen. Einsatzpläne sollten aktualisiert und für den Ernstfall bereitgehalten werden. Haben sich in der Vorabanalyse bestimmte Bereiche auf dem Betriebsgelände als besonders gefährdet erwiesen, so ist die Überwachung dieser Bereiche besonders vorzubereiten.

Bezüglich der Gefahrenquelle Schneesackbildung und -verwehungen lassen sich außer baulichen Veränderungen keine besonderen Vorkehrungen zur Verhinderung treffen. Lediglich Schneeverwehungen können auf freiem Gelände durch geeignete Schutzzäune von bestimmten Stellen ferngehalten werden.

Die typische Wetterlage für Eisbildung tritt schnell und ohne besondere Vorwarnzeit ein. Daher ist eine organisatorische Vorabmaßnahme kaum durchführbar. Die besonders gefährdeten Anlagenteile sollten vorsorglich in Bezug auf die Lasteinwirkung Eis wiederkehrend überprüft werden.

Erweist sich anhand der Prüfungsergebnisse, dass Anlagen oder Anlagenteile nicht ausreichend ausgelegt sind, um den erhöhten Anforderungen gegenüber der Gefahrenquellen zu genügen, sind die bestehenden Defizite durch geeignete Nachrüstungen zu beheben. Aufgrund des grundsätzlich unterschiedlichen Wirkungsprinzips kann hierbei zwischen Maßnahmen gegen statische Windlasteffekte, Maßnahmen gegen statische Schnee- und Eislasten, Maßnahmen gegen Projektilflug und Maßnahmen gegen winderregte Schwingungen differenziert werden.

Die Nachrüstungen gegen die statischen Einwirkungen zielen dabei auf eine Erhöhung des Tragwerkswiderstandes ab. Dies gelingt durch Verstärkungen oder Aussteifungen von Anlagen oder Anlagenteilen oder ihrer Verankerungen. Darüber hinaus können in bestimmten Fällen Seilabspannungen zielführend sein. **Tabelle 14** stellt für verschiedene Anlagen und Anlagenteile geeignete Nachrüstungsmöglichkeiten gegen die statischen Einwirkungen beispielhaft zusammen.

Tabelle 14: Konstruktive Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Widerstandes gegenüber Windeinwirkungen

Anlage oder Anlagenteil	Nachrüstungsmaßnahmen
Dächer	<p>Gefahrenquelle Wind</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verstärkung der Verankerung der Dachkonstruktion im Tragwerk mittels Mauerankern, Schrauben oder Metallbändern - Verschraubung flächig ausgebildeter Dacheindeckungen an der Dachkonstruktion - Flexible Befestigung einzelner Dachelemente oder -ziegel <p>Gefahrenquelle Schnee</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verstärkung von leichten Dachkonstruktionen durch zusätzliche Dachbinder bzw. Verstärkung der vorhandenen Dachbinder - Beheizung von durch Schneelasten betroffenen Bereichen zur Verhinderung von Schneelastbildung. Regelmäßige Kontrolle der Dachkonstruktionen im Betrieb und Austausch von schadhafte Dachbauteilen. Instandhaltung der Dachabdichtung zur Vermeidung von Durchfeuchtungen. Ggf. Erneuerung der Dachabdichtungen
Außenwände, Fassaden, Tore	<p>Gefahrenquelle Wind</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verstärkung der Befestigung am Tragwerk - Stabilisierung großer Flächen wie z. B. Einfahrtstoren durch Verstreben bzw. Verstärkungen
Gerüste und Kräne	<p>Gefahrenquelle Wind</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verstärkung der Verankerung im Baugrund oder an Bauwerken - Sicherung durch zusätzliche Seilabspannungen
Behälter, Tanks, Silos	<p>Gefahrenquelle Wind</p> <ul style="list-style-type: none"> - Verstärkung der Befestigung auf der Fundamentplatte - Versteifungen bzw. Abspannungen gegen Formänderungen bei großen Querschnitten

Anlage oder Anlagenteil	Nachrüstungsmaßnahmen
	Gefahrenquelle Schnee <ul style="list-style-type: none"> - Schutz von Schwimmdachabdeckungen gegen Überlastung durch Schneelast mit Hilfe einer zusätzlichen, mobilen schrägen Abdeckung am oberen Behälterrund zur Abhaltung der Schneelast.
Türme, Maste, Schornsteine	Gefahrenquelle Wind <ul style="list-style-type: none"> - Sicherung durch zusätzliche Seilabspannungen

Darüber hinaus gibt es weitere Nachrüstmöglichkeiten, welche besonders gefährdete Anlagenteile schützen soll. **Tabelle 15** stellt für verschiedene Anlagen und Anlagenteile geeignete Nachrüstmöglichkeiten gegen die Gefahrenquellen dar, welche keine direkten baulichen Veränderungen an den bestehenden Anlagen darstellen.

Tabelle 15: Weitere Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Widerstandes gegenüber Windeinwirkungen

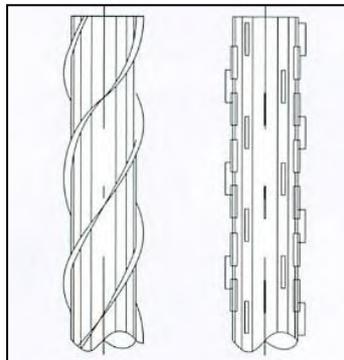
Anlage oder Anlagenteil	Nachrüstungsmaßnahmen
Allgemeine Hinweise	<ul style="list-style-type: none"> - Verlegung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen unter die Erde. - Besonderer Schutz der Notstromaggregate und der dazugehörigen Energiemittel zur Vermeidung des Ausfalls der sekundären Stromversorgung. - Installation von Windsensoren und Messung der Windgeschwindigkeiten an exponierten Stellen der Anlage bei gleichzeitiger Schaffung eines Ablaufplans zur Notabschaltung von Prozessketten bei Überschreitung eines Schwellenwertes. - Installation von Schneesensoren auf den betroffenen Dächern bzw. Anlagenteilen und Schaffung eines Ablaufplans zur etwaigen Räumung dieser Bereiche bei Überschreitung eines Schwellenwertes.
	Gefahrenquelle Tornado <ul style="list-style-type: none"> - Abgedeckte Auffangräume oder Auffangbehälter für besonders gefährliche Stoffe zur Verhinderung der Freisetzung in die Umwelt.
Nachrüstung durch Anpassung des Ablaufs	<ul style="list-style-type: none"> - Schaffung von Einsatzplänen für die Schneeräumung von betroffenen Anlagenbereichen - Schaffung von Einsatzplänen für die Eisentfernung bei betroffenen Kabeltrassen oder Gerüstteilen - Einrichten eines Frühwarnnetzes hinsichtlich aufkommender Extremwetterereignisse, wie bspw. Winterstürme, Tornados oder extremer Schneefälle. Dieses kann durch die Einrichtung von Netzwerken zu den umliegenden regionalen und überregionalen Wetterstationen gelingen. Einschätzung der Gefährdung obliegt dem verantwortlichen Werksleiter. Je nach Gefährdungseinschätzung sind die im jeweiligen Notfallplan vorgesehenen Maßnahmen einzuleiten. - Rechtzeitiges Entleeren von freien Tanklagern, welche aufgrund Kälte zufrieren und infolge Ausdehnung Schaden nehmen könnten.

Maßnahmen gegen winderregte Schwingungen beruhen auf dem Prinzip, die Schwingbewegungen zu verhindern oder zumindest auf ein erträgliches Maß zu reduzieren. Ausgangspunkt für die Entwicklung der Maßnahmen bildet zunächst die Analyse des Schwingungsverhaltens der betroffenen Konstruktion. Aufbauend hierauf können dann speziell

für die Konstruktion ausgelegte Schwingungsdämpfungssysteme konzipiert werden. Bei den Systemen wird dabei zwischen Schwingungsdämpfern (passiv) und Schwingungstilgern (aktiv) unterschieden. Schwingungsdämpfer fungieren als Reibungsbremsen auf der Basis beweglicher Flüssigkeiten oder Reibungskörpern und haben gegenüber Schwingungstilgern den Vorteil, dass sie keine Energiezufuhr von außen benötigen.

Neben Dämpfungssystemen können aerodynamische Störelemente eine Reduzierung der Schwingbewegungen aus Wirbelerregung bewirken. Sie kommen daher typischerweise bei schlanken, turmartigen Konstruktionen zum Einsatz. Ihr Ziel ist es, die Bildung einer durchgehenden Ablöselinie der periodisch ablösenden Wirbel zu verhindern. Als aerodynamische Maßnahmen existieren diverse Möglichkeiten, **Abbildung 15** zeigt mit dem sogenannten Scruton-Wendel sowie Störstreifen stellvertretend zwei Beispiele.

Abbildung 4: Aerodynamische Maßnahmen gegen wirbelerregte Querschwingungen



(a) Scruton-Wendel (b) Störstreifen

Zusammenfassend stehen als nachträglich zu installierende Maßnahmen gegen winderregte Schwingungen damit folgende Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Passive oder aktive Unterdrückung von winderregten Schwingungen durch hydromechanische oder mechanische Dämpfungseinrichtungen,
2. Unterdrückung von Wirbelablösung durch aerodynamische Störelemente,
3. Abspannung von Konstruktionen zur Verhinderung von langperiodischen Schwingungen

Bei Gerüstkonstruktionen kann ein positiver Effekt durch die Erhöhung der Steifigkeit erzielt werden. Hierdurch wird die Eigenfrequenz verringert und die Konstruktion aus dem Resonanzbereich der Erregerfrequenz geführt. Eine solche Art der „Verstimmung“ eines Tragsystems gelingt zumeist nur in Kombination mit begleitenden Messungen des Schwingverhaltens, da die Parameter, welche die Frequenz des Systems beeinflussen, bereits bei einfachen Tragsystemen oft mannigfaltig sind (z.B. Verbindungen, Auflagerpunkte, Öffnungen in Querschnitten, etc.). Ein rechnerischer Nachweis kann daher zwar zur Auslegung der Konstruktion dienen, allerdings ist die nachfolgende Messung und ggf. Verstimmung des Systems mit den heutigen zur Verfügung stehenden Methoden bei schwingungsanfälligen Konstruktionen im Zweifelsfall unabdingbar.

Eine Nachrüstung der sicherheitsrelevanten Anlagen bzw. Anlagenteile gegen möglichen Projektilflug kann durch die folgenden Maßnahmen erfolgen. Als eine erste Konsequenz der

Gefahrenquellenanalyse sollte eine mögliche Projektilbildung (sowohl extern als auch intern) minimiert werden. Sollte sich aus der Gefahrenquellenanalyse ergeben, dass ein Eindringen von nicht zu vermeidenden möglichen Projektilen nicht von der ursprünglichen Tragkonstruktion (Behälterwand etc.) verhindert werden kann, so sind zusätzliche Schutzmaßnahmen erforderlich. Besteht eine mögliche Gefährdung infolge Eindringens in die Außenhülle, so könnte eine Verstärkung der Außenhülle oder aber eine Schutzhülle Abhilfe schaffen. Das Eindringen durch Öffnungen in der Schutzhülle lässt sich durch die Installation von Schutzgittern und/oder hierfür vorgesehene Verglasung realisieren. Gegen bodennahe Projektilen lassen sich beispielsweise Einzäunungen des Anlagenteils realisieren.

Während des Wirksamwerdens der Gefahrenquelle

Während eines Sturmereignisses können an den Anlagenteilen im Regelfall keine entscheidenden Sicherungsmaßnahmen mehr durchgeführt werden. Lediglich in Sturmpausen könnten bereits beschädigte Teile entfernt und somit mögliche Projektilquellen reduziert als auch gelöste Teile provisorisch fixiert werden. Sollte es im schlimmsten Fall zu einer Tornadoeinwirkung auf Anlagenteile handeln, so kann während des Ereignisses keine Maßnahme zur Sicherung mehr durchgeführt werden.

Zeichnet sich während eines extremen Schnee-Ereignisses ab, dass die Belastung voraussichtlich für einige Anlagenteile über das in der Auslegung angesetzte Maß hinausgeht, so sollte bereits während des Ereignisses mit der Räumung der Anlagenteile begonnen werden. Hierbei ist natürlich die Sicherheit des Räumungspersonals zu berücksichtigen.

Nach dem Wirksamwerden der Gefahrenquelle

Nach dem Einwirken der Gefahrenquellen ist im Schadensfall die Beschädigung zu begutachten, zu dokumentieren und die Konstruktion entsprechend wieder zu ertüchtigen. Die Schwachstelle der Konstruktion ist hierbei zu analysieren und sinnvoll zu verstärken damit ein wiederholtes Eintreten der Gefährdung für diesen Fall ausgeschlossen werden kann.

Dachkonstruktionen sind nach dem Abtauen der Schnee- und Eismassen hinsichtlich möglicher Durchfeuchtungen zu überprüfen, da dauerhafte Durchfeuchtungen die Konstruktion schädigen und zu einem späteren Versagen bei Ereignissen auch weit unterhalb der Bemessungslast führen können.

Besonders betroffene Bereiche sind auf dem Lage- und Anlagenplan zu verzeichnen und aus der Erfahrung heraus für das nächste Eintreten der Gefahrenquelle zu untersuchen.

3.17 Zu Kapitel 13 Prüfung der Schutzkonzepte

Die Verifizierung des Schutzkonzepts erfolgt auf der Basis einer Gefahrenanalyse. Dabei kommen zum Beispiel folgende Methoden zum Einsatz:

1. intuitive Methoden (Brainstorming)
2. induktive Methoden (z.B. Ereignisablaufanalyse), (DIN 25419, 1995)
3. deduktive Methoden (z.B. Fehlerbaumanalyse), (DIN 25424, 1981; Böhnert, 1992)
4. Bow-Tie Methode (Kombination aus Fehler- und Ereignisbaumanalyse, (Köppke 2022)
5. PAAG-Verfahren (Prognose, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen) mit intuitiven, induktiven und deduktiven Elementen (Issa, 2020)

Hierfür stehen zahlreiche Anleitungen, Checklisten und Erfahrungsberichte zur Verfügung, so dass darauf nicht weiter eingegangen werden muss. Soweit eine Gefahrenanalyse auf der Basis dieser Methoden bereits vorliegt, muss geprüft werden, ob diese die hier relevanten Gefahrenquellen bereits berücksichtigt oder eine Ergänzung erforderlich ist.

Zu prüfen ist, ob die aufgrund der ggf. ergänzten Gefahrenanalyse gewählten Vorkehrungen und Maßnahmen gegen die betrachteten natürlichen Gefahrenquellen die durch diese und die Betriebsbereiche verursachten Risiken auf ein akzeptiertes Maß reduzieren. Die durch die TRAS vorgegebenen Mindestanforderungen sind erstens im Hinblick auf die konkrete Exposition des Betriebsbereichs gegenüber den Gefahrenquellen, z.B. aufgrund von Lage oder Bauform, zweitens im Hinblick auf die Risiken ggf. verursachter Störfälle und drittens im Hinblick auf die Risikoziele innerhalb der Unternehmenspolitik und Sicherheitskultur zu überprüfen. Aus Letzterem kann auch ein weitergehender Einbezug der möglichen Veränderungen aufgrund des Klimawandels resultieren.

Bei der Risikokommunikation ist zu beachten, dass die Schutzobjekte nicht nur den Risiken aufgrund der Betriebsbereiche ausgesetzt sind, sondern auch den Risiken durch die natürlichen Gefahrenquellen selbst. Eine Abstimmung mit den für die Kontrolle dieser direkten Risiken zuständigen Behörden ist anzuraten.

3.18 Zu Kapitel 14 Ermittlung von Szenarien gemäß § 3 Absatz 3 StörfallV (Dennoch-Störfälle) und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung

Bei der Ermittlung von Störfallablaufszenarien gemäß § 3 Absatz 3 StörfallV, wie für sogenannte „Dennoch-Störfälle“, und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung sind zu berücksichtigen:

1. Das Versagen von störfallverhindernden Vorkehrungen,
2. Wind, Schnee- und Eislasten mit einer Intensität oberhalb der aufgrund einer probabilistischen Analyse vernünftigerweise angenommenen Jährlichkeit und
3. Wind, Schnee- und Eislasten, die in einer Art auftreten, die „vernünftigerweise“ ausgeschlossen wurde.

Darüber hinaus wurden Gefahrenquellen auf der Grundlage einer vereinfachten Gefahrenquellenanalyse deterministisch als „Exzeptionelle Gefährdungen“ ausgeschlossen. Solche Gefahrenquellen sind nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand so unwahrscheinlich, dass sie auch im Rahmen der Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“ ausgeschlossen bleiben, wie z.B. ein Tornado der Stärke F5 in Deutschland.

Für die „Dennoch-Störfall“-szenarien gemäß § 3 Absatz 3 StörfallV und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung können z.B. die Szenarien nach Abbildung 14 dieser Hinweise und Erläuterungen herangezogen werden:

1. Beschädigung oder Einsturz eines Gebäudes aufgrund zu hoher Wind-, Schnee- oder Eislasten mit anschließender Stofffreisetzung, Brand oder Explosion aufgrund der Zerstörung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen darin.

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.
4. Interne Projektilbildung (z.B. Leitungsabriss) mit Stofffreisetzung, Brand oder Explosion am Ort des Abrisses und/oder sonstigem Verlust der sicherheitsrelevanten Funktion.
5. Aufprall eines luftgetragenen Projektils (intern oder extern entstanden) auf ein - sicherheitsrelevantes Anlagenteil mit anschließender Stofffreisetzung, Brand oder Explosion und/oder sonstigem Verlust der sicherheitsrelevanten Funktion.
6. Bodennahes Projektil (z.B. rollendes KFZ) mit Aufprall gegen ein sicherheitsrelevantes Anlagenteil mit anschließender Stofffreisetzung, Brand oder Explosion und/oder sonstigem Verlust der sicherheitsrelevanten Funktion.

Es ist zu prüfen, inwieweit aus derartigen, für natürliche, umgebungsbedingte Gefahrenquellen spezifischen Szenarien abgeleitete Stofffreisetzungen, Brände oder Explosionen schon in den bereits angestellten „Dennoch-Störfall“- Betrachtungen berücksichtigt sind. Bei der Analyse der zuvor beschriebenen Szenarien muss insbesondere bei den Szenarien 1 bis 3 im Einzelfall geprüft werden, ob aufgrund gleichzeitiger schädigender Einwirkung auf mehrere sicherheitsrelevante Anlagenteile mehr als die größte zusammenhängende Menge (GZM) freigesetzt werden kann.

In der TRAS 320 wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass bei den anzunehmenden Szenarien die Verfügbarkeit externer Kräfte und die Zugänglichkeit der Anlagen aufgrund der umgebungsbedingten Gefahrenquellen eingeschränkt sein kann und somit die Verfügbarkeit von auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen nicht gegeben ist.

3.19 Zu Kapitel 15 Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen

In der TRAS 320 wird eine Reihe von Maßnahmen aufgelistet, die im Einzelfall geeignet sein können, die Störfallauswirkungen zu begrenzen. Es ist zunächst zu prüfen, welche bereits entwickelten Schutzkonzepte (im Sicherheitsbericht) ohnehin die Szenarien Freisetzung von Stoffen, Brand und Explosion abdecken und ob die hier ggf. bereits vorgesehenen störfallauswirkungsbegrenzenden Maßnahmen anwendbar sind. Bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen sind folgende Schutzziele zu beachten:

- a) Begrenzung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen aus ihrer Umschließung,
- b) Minderung der Ausbreitung freigesetzter, gefährlicher Stoffe,
- c) Begrenzung der Verdampfung von freigesetzten gefährlichen Stoffen,
- d) Verhinderung der Zündfähigkeit oder Zündung gefährlicher Stoffe,
- e) Verhinderung oder Minderung der Einwirkung auf sicherheitsrelevante Anlagen und Anlagenteile.

In der TRAS 320 sind zahlreiche Maßnahmen aufgelistet, die sich in die folgenden 4 Hauptpunkte gliedern:

1. Bautechnische Maßnahmen
2. Sicherheitstechnische Einrichtungen und Schutzvorkehrungen
3. Organisatorische Schutzvorkehrungen
4. Beratung der Gefahrenabwehrbehörden und Einsatzkräfte bei einem Störfall (§ 5 Absatz 2 StörfallV)

Zu den bereits in der TRAS 320 genannten Punkten werden im Folgenden einige Hinweise ergänzt:

Nach § 5 Satz Absatz 1 Nummer 1 hat der Betreiber Maßnahmen zu treffen, „damit durch die Beschaffenheit der Fundamente und der tragenden Gebäudeteile bei Störfällen keine zusätzlichen Gefahren hervorgerufen werden können, ...“.

Fundamente und tragende Gebäudeteile müssen also so beschaffen sein, dass sie bei Störfällen möglichen Einwirkungen so widerstehen, dass eine Ausweitung des Störfalls unter Verursachung einer Gefahr nicht möglich ist. Grundsätzlich sind hierbei alle drei Erscheinungsformen von Störfällen – Brände, Explosionen und Stofffreisetzungen – zu berücksichtigen. Für den Fall von Bränden wird die Anforderung im Baurecht und Regelwerk dahingehend konkretisiert, dass Brandwände (einschließlich Decken) und –abschlüsse einer zu unterstellenden Branddauer und Brandlast widerstehen können müssen. Im Falle von Explosionen wird die Anforderung für die Lagerung explosionsgefährlicher Stoffe dahingehend konkretisiert, dass eine Explosion in einem Anlagenteil sich nicht in anderen Anlagenteilen fortsetzen oder schädigend auf Schutzobjekte auswirken darf. Dies gilt nach StörfallV jedoch auch für andere gefährliche Stoffe und auch dahingehend, dass keine Ausweitung des Störfalls in Form von Stofffreisetzungen oder Bränden erfolgen darf. Schließlich ist auch die Stofffreisetzung als mögliche, störfallbedingte Einwirkung auf tragende Gebäudeteile zu berücksichtigen. Hier kommt die korrosive Einwirkung von Stoffen - insbesondere in Verbindung mit Bränden – in Betracht.

Insofern ist zu empfehlen, vorrangig zu prüfen, inwieweit störfallbegrenzende Wirkungen aus der bereits erfolgten Umsetzung dieser Anforderung in § 5 Absatz 1 Nummer 1 StörfallV resultieren.

Auswirkungsbegrenzende Maßnahmen werden auch vom Anlagenbezogenen Gewässerschutz (§§ 62f WHG) gefordert. In Abhängigkeit von Wassergefährdung und vorhandener Masse von Stoffen werden anlagenbezogene oder zentrale Auffangräume für flüssige Stoffe gefordert. In dem hier relevanten Zusammenhang ist die Dimensionierung der verschiedenen Maßnahmen zu prüfen. Weil bei den hier betrachteten umgebungsbedingten Gefahrenquellen u. U. mehrere Anlagenteile betroffen sein können, müssen ausreichende Auffangvolumina zur Verfügung stehen, um die freigesetzten Flüssigkeiten möglichst vollständig aufzufangen. Die Bedeutung einer ausreichenden Bemessung der Auffangräume wurde z. B. bei einem Tornado der Stärke F3 deutlich, der die Chemieanlage Complex Chemical Co., Inc. in Louisiana am 24.4.2010 stark beschädigte. Die auslaufenden Flüssigkeiten konnten weitgehend aufgefangen werden.

In Bezug auf die Gefahrenquelle Wind ist zu beachten, dass auch Freisetzungen von festen Stoffen erfolgen können, für deren Begrenzung nur z.T. Anforderungen im Regelwerk enthalten sind.

Die organisatorischen Maßnahmen zur Auswirkungsbegrenzung umfassen alle Maßnahmen, die auch sonst für Störfälle in Anlagen, die der StörfallV unterliegen, anzuwenden sind. Hierzu zählt auch die Beratung der Gefahrenabwehrbehörden bei der Bekämpfung der Auswirkungen von Schadstofffreisetzungen, Bränden und Explosionen.

3.20 Zu Kapitel 16 Planung für Notfälle, Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung

Dieser Abschnitt der TRAS widmet sich der Ausarbeitung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen und dem Katastrophenschutz.

Bei Betriebsbereichen der unteren Klasse sind die Ergebnisse der obenstehenden Schritte im Rahmen der Fortschreibung von Konzepten zur Verhinderung von Störfällen und der Fortentwicklung des Sicherheitsmanagements aufgrund § 8 Absatz 3 StörfallV innerhalb der Planung für Notfälle gemäß Anhang III Nummer 3 e StörfallV zu berücksichtigen.

Bei Betriebsbereichen der oberen Klasse sind, wenn die Ergebnisse der obenstehenden Schritte neue Erkenntnisse zur Beurteilung von Gefahren zu liefern, die Konzepte zur Verhinderung von Störfällen und Sicherheitsberichte fortzuschreiben sowie das Sicherheitsmanagement fortzuentwickeln. Da dann auch die Angaben gemäß Anhang II Teil V StörfallV fortgeschrieben werden müssen, wird i.d.R. auch das Erfordernis einer Fortschreibung der Alarm- und Gefahrenabwehrpläne gemäß § 10 StörfallV vorliegen.

Informationssammlung

In der TRAS 320 wird auf den Informationsfluss zwischen meteorologischen Dienstleistern und Betreiber hingewiesen. In Abschnitt 2 der TRAS 320 sowie in der TRAS 310 wird darauf aufmerksam gemacht, dass hinsichtlich der Beschaffung von Informationen über Gefährdungen durch umgebungsbedingte Gefahrenquellen für die Betreiber von Betriebsbereichen eine *Informationssammlungspflicht* besteht, also eine Pflicht zur Zusammenstellung andernorts oder beim Betreiber bereits vorhandener Informationen (Schulte und Kloos, 2010).

Informationsermittlungspflichten bestehen eingeschränkt im Bereich der „erweiterten“ Pflichten der StörfallV (§§ 9 – 12).

Für die Sammlung von Informationen bzgl. der Gefahren Wind, Schnee- und Eislasten stehen dem Betreiber u.a. folgende Informationsquellen verschiedener Anbieter im Internet zur Verfügung:

<http://www.wettergefahren.de/> (Deutscher Wetterdienst)

Unter www.mobil.dwd.de erhalten die Nutzer die Warnungen und Unwetterwarnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in einer für Ihr Mobiltelefon optimierten Darstellung. Dazu werden die wichtigsten DWD-Warninformationen für das Handy zusammengefasst.

<http://www.deutscher-warndienst.de/>

Der Deutsche Wetterdienst beobachtet mit seinen über 610 Mess- und Beobachtungsstationen 24 Stunden am Tag und 365 Tage im Jahr die aktuelle Wetterlage und deren Entwicklung. Sobald ein Unwetter zu erkennen ist gibt der DWD eine Unwetterwarnung heraus. Durch das enge Mess- und Beobachtungsnetz des DWD ist es möglich, diese Unwetterwarnung für jeden Landkreis einzeln zu bestimmen und zu verteilen.

Bei den Warndiensten kann ausgewählt werden, auf welchem Endgerät (Handy, Fax-Gerät, Computer oder Pager) die Nachricht empfangen werden soll.

Weitere Internetseiten für Unwetterwarnungen werden stehen zur Verfügung, wie z.B.:

<http://www.wetterzentrale.de/uwz/>

Auf dieser Seite werden vor allem stark regionalisierte Karten (einzelne Bundesländer) angeboten.

<http://www.unwetterwarnungen.de/>

In dieser Internetseite werden vor allem Wetterprognosen für Wolken mit Wind, Wolken mit Niederschlag und für die Windstärke in Form von Kurzfilmen präsentiert.

<http://www.wetter24.de/deutschland/unwetter-warnungen.html>

In dieser Internetseite wird alle 15 Minuten eine aktuelle Wetterradarkarte als Kurzfilm angeboten.

https://www.bbk.bund.de/DE/Warnung-Vorsorge/Warn-App-NINA/warn-app-nina_node.html

Die Warn-App NINA (Notfall-Informationen- und Nachrichten-App) warnt deutschlandweit vor Gefahren. Die App wird vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) bereitgestellt.

Einfache lokale „Messsysteme“ können für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten eingerichtet werden. Ein Windmessgerät auf dem Dach eines Betriebsgebäudes oder eines Anlagenteils kann helfen, das Risiko, das durch einen Sturm ausgelöst wird, besser zu beurteilen, wenn zuvor ein Maßnahmenplan entwickelt wurde, der sich an bestimmten Wind- oder Böengeschwindigkeiten orientiert.

Zur Bewertung von Schneelasten und Stauwasser werden verschiedene Sensoren angeboten. Hierbei handelt es sich um Messsysteme, die in die Dachfläche eines Bauteils integriert werden. Auch bestehen Möglichkeiten zur Nachrüstung derartiger Sensoren. Über einstellbare Alarmschwellenwerte kann, z.B. bei 50 - 60% der zulässigen Dachlast ein „Voralarm“ und z.B. bei 90% ein „Evakuierungsalarm“, ausgelöst werden.

Auch Dehnungsmessstreifen können an exponierten Stellen von Anlagen und Gebäuden installiert werden, um Lastveränderungen durch Wind, Schnee- und Eislasten frühzeitig wahrzunehmen und entsprechend Maßnahmen zu ergreifen. Dehnungsmessstreifen werden eingesetzt, um Formänderungen (Dehnungen / Stauchungen) an der Oberfläche von Bauteilen zu erfassen. Sie ermöglichen die Bestimmung von mechanischen Spannungen und damit die

Beanspruchung des Werkstoffs. Sie erfassen vor allem auch Lastkombinationen, die auf unterschiedliche Weise auf ein Tragwerk oder eine Anlage wirken, wie z.B. Wind- und Schneelasten.

Insbesondere wird auf das Projekt "SAFE" (Sensor-Aktor-gestütztes Frühwarnsystem bei Extremwetter) verwiesen, das vom Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST (heute Fraunhofer-Institut für offene Kommunikationssysteme) in Kooperation mit einigen Projektpartnern, wie z.B. der Wacker Chemie AG in Burghausen, entwickelt und vom BMBF gefördert wurde (Klafft, 2008).

Für dieses System wurden spezielle und kostengünstige Unwettersensoren in einem engmaschigen Netz z.B. um einen Betriebsbereich aufgestellt. Gemeinsam mit bereits bestehenden Wetterstationen gewährleisteten sie eine lückenlose Messung aller meteorologischen Entwicklungen in der Region. Die Daten dieses Sensornetzes wurden mit überregionalen Daten, etwa von Satelliten oder Radareinrichtungen, erweitert. Ein neuartiges und auf Unwetter spezialisiertes Prognosemodell nutzt die Daten und generiert daraus orts- und zeitgenaue Vorhersagen.

Zur Interpretation der Vorhersagen wurde im Projekt „SAFE“ eine informationslogistische Plattform entwickelt, die die eingehenden Daten verarbeitet und hieraus angemessene Gefahrenabwehrprozesse einleitet.

Mit diesem System wurde folglich der oftmals schwierige Prozess der Dateninterpretation mit den daraus abzuleitenden Maßnahmen erheblich vereinfacht und beschleunigt. Zwar wurde das Projekt in dieser Form nicht weitergeführt, dennoch wurde aus „Safe“ das Frühwarnsystem „KATWARN“ zur Verbreitung von Warnmeldungen entwickelt. Mittlerweile hat „KATWARN“ mehrere hunderttausend Nutzer und hat sich als deutschlandweit einheitliches Unwetterwarnsystem fürs Mobiltelefon etabliert. Zu den Nutzern zählen auch namhafte Industrieunternehmen.

Eine Kombination von entsprechender Informationssammlung und -ermittlung kann auch unterhalb der Gefahrenschwelle sinnvoll sein, um die Planung von Betriebsabläufen an zu erwartende Witterungsbedingungen anzupassen und z.B. den Beschäftigten gefährliche Aufenthalte im Freien sowie gefährliche Tätigkeiten unter schwierigen Witterungsbedingungen zu ersparen.

Informationsauswertung und Auslösen von Maßnahmen zur Gefahrenabwehr – Zusammenfassung des Standes der Technik

Im Gegensatz zu Hochwassermeldungen gibt es bei den Gefahren Wind, Sturm- und Eislasten keine Alarmstufen, die durch die Behörden festgelegt und ausgelöst werden. Daher liegt die Bewertung der zur Verfügung gestellten Informationen ausschließlich in der Verantwortung der Betreiber.

Mit Ausnahme der Bildung von Tornados liegen die Vorwarnzeiten für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten in der Regel bei mehreren Stunden bis Tagen. In den USA liegen die Vorwarnzeiten für Tornados im Durchschnitt bei 13 Minuten. Das Land verfügt hierzu über 121 geeignete Radarmessstationen. Ein vergleichbares, für die Tornadovorwarnung geeignetes System steht in Deutschland jedoch nicht zur Verfügung.

Während die Angaben über erwartete Wind- oder Böengeschwindigkeiten gesammelt oder durch Messung ermittelt werden können, stehen Angaben über zu erwartende Eis- und Schneelasten nicht direkt zur Verfügung. Hier müssen bereits vorhanden Lasten (z.B. durch Schneelastsensoren) erfasst und aus den vorhergesagten Niederschlagshöhen zu erwartende Lastzunahmen errechnet werden. Besonders zu beachten sind Vorhersagen über Lastkombinationen z.B. hohe Windlasten gleichzeitig mit oder nach dem Eintreten hoher Schnee- oder Eislasten.

Im Folgenden wird ein einfaches Beispiel gegeben, wie in einem Alarm- und Gefahrenabwehrplan ein Entscheidungsschema für die Gefahrenquelle Schneelasten festgelegt werden kann:

1. Unwetterwarnung durch Anbieter von Warnmeldesystemen per SMS
2. Einholen von Wetterprognosen von meteorologischen Dienstleistern
Maßnahmen:
 - a) Verstärkte Wetterbeobachtung
 - b) Ermittlung der aktuellen Schneelast z.B. auf dem Dach einer Produktionsanlage
 - 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 Maßnahmen 3a und 3b.
3. Beobachtung der Lastsituation durch Messung mithilfe eines zuvor installierten Schneelastmesssystems
 - a) Maßnahme 1: ab 60 % der zulässigen Dachlast: Schneeräumung des Daches, sofern dies wetterbedingt möglich ist.
 - b) Maßnahme 2: ab 90 % der zulässigen Dachlast: Abfahren der Produktionsanlage und Verlagerung von gefährlichen Stoffen in ungefährdete Bereiche.

Auf ähnliche Weise lässt sich für die Gefahrenquellen Wind und Eislasten ein Entscheidungsschema zum Auslösen bestimmter Maßnahmen entwickeln.

Bei dem hier dargestellten Beispiel wird die Verlagerung von gefährlichen Stoffen in ungefährdete Bereiche vorgeschlagen. Hierbei ist zu beachten, dass während eines Ereignisses potentielle Transportwege außerhalb von Gebäuden aufgrund von Wind, Schnee oder Eis nicht oder nur eingeschränkt zur Verfügung stehen. Daher ist im Rahmen der Gefahrenabwehrplanung auch die Verkehrssicherung des Betriebsgeländes durch Schneeräumung oder Enteisung zu beachten. Darüber hinaus können interne und externe Hilfskräfte nur eingeschränkt zur Verfügung stehen.

Informationspflichten für die zuständigen Behörden

Nach § 10 Absatz 1 Nummer 2 StörfallV sind Betreiber von Betriebsbereichen der oberen Klasse darüber hinaus verpflichtet, den zuständigen Behörden die für die Erstellung externer Alarm- und Gefahrenabwehrpläne erforderlichen Informationen zu übermitteln. Zahlreiche, entsprechende Informationen sind vom Betreiber ohnehin für die Erstellung des Sicherheitsberichts zu erarbeiten. Für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten ist es meist

sinnvoll, eine getrennte Zusammenstellung der erforderlichen Informationen den Behörden vorzulegen. Folgende Informationen sollten enthalten sein:

1. Örtliche Lage
 - a) Lageplan mit besonderer Kennzeichnung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile, die durch die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten gefährdet sein können.
 - b) Abstände der Anlagen untereinander.
 - c) Infrastruktureinrichtungen, wie z.B. Ver- und Entsorgungssysteme oder Sozialeinrichtungen.
 - d) Darstellung der Zufahrtswege im Lageplan.
2. Angaben über die in den gefährdeten Anlagenteilen gehandhabten Stoffe
 - a) Informationen über Art und Menge der gehandhabten Stoffe.
 - b) Angaben über physikalische und toxikologische Eigenschaften der gehandhabten Stoffe.
3. Angaben über Infrastruktureinrichtungen
 - a) Örtliche Lage von Löscheinrichtungen
 - b) Angaben zu Auffangräumen für Flüssigkeiten und Löschwasserrückhaltebecken (örtliche Lage, Volumen)
 - c) Absperrmöglichkeiten von Kanalsystemen
4. Betriebliche Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen
 - a) Technische Maßnahmen, wie z.B.:
 - i. Absperrsysteme der Kanalisation
 - ii. Rückhaltung von Flüssigkeiten in Auffangräumen
 - iii. Wasserberieselungsanlagen
 - iv. Löschkanonen
 - b) Organisatorische Maßnahmen
 - i. Auslagerung von gefährlichen Stoffen: Angaben über sichere Evakuierungsziele, dorthin führende Verkehrswege, einzuhaltende Anforderungen für den Gefahrguttransport
 - ii. im Falle eines Notfalls einsetzbare Mitarbeiterzahl

3.21 Zu Kapitel 17 Dokumentation

Hier wird auf die in der StörfallV verankerten Dokumentationspflichten verwiesen.

3.22 Zu Kapitel 18 Erfüllung von weiteren Pflichten der StörfallV

Hierzu zählen

1. Anforderungen an die Instandhaltung von Vorkehrungen (§ 6 Absatz 1 Nummer 1, 2 StörfallV)
2. Informationen und Schulungen der Beschäftigten (§ 6 Absatz 1 Nummer 4 StörfallV)
3. Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall (§ 5 Absatz 2 StörfallV)

3.22.1 Zu Kapitel 18.1: Anforderungen an die Instandhaltung (§ 6 Absatz 1 Nr. 1, 2 StörfallV)

Nach DIN 31051 beinhaltet der Begriff der Instandhaltung folgende Einzelmaßnahmen:

1. Inspektion,
2. Wartung,
3. Instandsetzen,
4. Verbesserung.

In der Praxis hat sich die Entwicklung eines betrieblichen Instandhaltungsmanagements bewährt, das im Einzelnen folgende grundsätzliche Arten von Instandhaltungsvorgaben enthalten sollte:

Vorbeugende Instandhaltung	Die Durchführung der Maßnahmen erfolgt nach einem festen Zeitraster. Es handelt sich hierbei um eine zeitabhängige präventive Maßnahmendurchführung zur Sicherstellung einer maximalen Zuverlässigkeit.
Zustandsabhängige Instandhaltung	Die Durchführung der Maßnahmen erfolgt nach Zustand und Verschleiß.
Wiederkehrende Prüfung	Die ordnungsgemäße Funktion von technischen Maßnahmen ist nach einem festen Zeitraster zu überprüfen. Dies ist vor allem dann erforderlich, wenn z.B. - Schneelastsensoren in der Regel außer Betrieb sind.
Verbesserung	Erfassung und Auswertung von Defiziten, Ableitung und Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen (ausgenommen wesentliche Änderungen).

Der Ansatz wird von der VDI-Richtlinie 6200 „Standsicherheit von Bauwerken – Regelmäßige Überprüfung“ für bauliche Anlagenteile konkretisiert.

Ausgeführte Maßnahmen zur Instandhaltung sind zu dokumentieren. Im Einzelnen können beispielhaft folgende Maßnahmen zur Instandhaltung erforderlich sein:

Tabelle 16: Beispiel eines Begehungs- und Kontrollplans für die Gefahrenquelle Wind, Schnee- und Eislasten

	Gemäß VDI Richtlinie 6200	Intervall
Grundsätzlich	Begehung / Sichtkontrolle	1 bis 2 Jahre
	Kontrolle durch fachkundige Person	2 bis 3 Jahre
	Kontrolle durch besonders fachkundige Person	6 bis 9 Jahre
Besondere Anlagenteile	Begehung / Kontrolle	
Tragwerk, tragende Anlagenteile	Sichtkontrolle von tragenden Anlagenteilen auf Verformungen oder Beschädigungen	1 x /Jahr
Kolonnen	Sichtkontrolle von Verankerungen	1 x /Jahr
Rohrleitungsbrücken	Sichtkontrolle von Verankerungen	1 x /Jahr
auf Dächern befestigte Anlagenteile	Sichtkontrolle der Befestigungen von z.B. - Entlüftungsrohren und Abgaskaminen, - Staubfiltern, - Abgaswäschern, - Kühltürmen	2 x /Jahr
Kabeltrassen	Sichtkontrolle der Halterungen	
Abdeckungen	Sichtkontrolle der Befestigung und Verschraubungen von - Wetterschutzhauben - Schwimmdächer - Gebäudefassaden - Gitterrosten sowie weiteren - Abdecksystemen	2 x /Jahr
Sicherheitstechnische Einrichtungen	wie - Sicherheitsventile - Schnellschlussventile - Gaswarnanlagen - Auffangräume - Lösch- und Berieselungseinrichtungen - Beleuchtung - Hinweisschilder insbesondere zugehörige Rohrleitungen und Kabel Kontrolle hinsichtlich Einwirkungen von Wind, Schnee- und Eislasten (unabhängig hiervon Prüfung gemäß Regelwerk)	1 x /Jahr
Begleitheizungen	Funktionskontrolle	1 x /Jahr
Mögliche externe Projektile	Sichtkontrolle von Bäumen, Masten, Antennen	2 x /Jahr
Wettermesssysteme	Prüfung und Kalibrierung der Messsysteme	2 x /Jahr
Kommunikationsmittel	Kontrolle der Funktion von mobilen Kommunikationsmitteln	2 x /Jahr

Von den genannten Intervallen unabhängig, sollte eine Begehung und zumindest Sichtkontrolle auch nach Extremereignissen erfolgen.

3.22.2 Zu Kapitel 18.2: Informationen und Schulungen der Beschäftigten (§ 6 Absatz 1 Nummer 4 StörfallV)

Die Schulung des Personals (einschließlich des relevanten Personals von Subunternehmen) umfasst im Einzelnen:

1. Information über die Entstehung und Wirkung der Gefahrenquellen / Förderung des Bewusstseins über die Existenz der Gefahrenquellen
 - a) Aufzeigen der Entstehung und Wirkung der Gefahrenquellen, wenn möglich mit historischen Aufnahmen zu Wind-, Schnee- und Eisereignissen
 - b) Erläuterung der Vorkehrungen gegen die Gefahrenquellen und ihrer Grenzen
 - c) Darstellung der gefährdeten Teile des Betriebsbereiches
 - d) Erläuterungen zu den Schutzeinrichtungen
 - e) Erläuterungen der Informationsquellen (betriebseigene Sensoren, Unwetterwarndienste usw.)
 - f) Erläuterung der Organisationsstruktur im Fall des Wirksamwerdens der Gefahrenquelle
 - g) Erläuterung der Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen
2. Maßnahmen zur Instandhaltung von Vorkehrungen zum Schutz vor umgebungsbedingten Gefahrenquellen
 - a) Durchführung von jährlichen Übungen
 - b) Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen entsprechend dem betrieblichen Instandhaltungsmanagement
 - c) Prüfung der Funktionstüchtigkeit von Sicherheitssystemen
3. Verhalten vor Wirksamwerden der Gefahrenquelle (ggf. gemäß Alarm- und Gefahrenabwehrplan)
 - a) Beobachtung der Intensitäten der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten
 - b) Einholung von Informationen von meteorologischen Diensten
 - c) Durchführung der betrieblichen Sicherheitsmaßnahmen entsprechend dem Schutzkonzept, wie z.B.
 - i) Sicherung (Befestigung oder Räumung) von Anlagenteilen und Gebinden
 - ii) Vorbereitung von Auffangräumen, Verschließen der Kanalsysteme
 - iii) Vermeidung von Aufenthalt im Freien
 - iv) Abfahren der Produktionsanlagen
 - d) Informationen an die Katastrophenschutzbehörden (z.B. zum Auslagern von Stoffen)

4. Verhalten während des Wirksamwerdens der Gefahrenquelle (ggf. gemäß Alarm- und Gefahrenabwehrplan)
 - a) Beobachtung der betrieblichen Situation mit Lagebeurteilung
 - b) Informationsbeschaffung von Behörden und Internetportalen über die Entwicklung der Wettersituation
 - c) Verhalten entsprechend der Lage
 - d) Durchführung von Notfallmaßnahmen
 - e) Kommunikation mit den zuständigen Katastrophenschutzbehörden
 - f) Entscheidung über weitergehenden Maßnahmen
 - g) Verhalten bei Freisetzung von gefährlichen Stoffen
 - h) Durchführung von innerbetrieblichen Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen
 - i) Rückzugslinien und Evakuierung
5. Verhalten nach Abklingen der Gefahrenquelle
 - a) Vorgehensweise zur Inspektion des Betriebsbereichs auf Schäden und Stofffreisetzungen
 - b) Kriterien für das Hinzuziehen von Experten (Feuerwehr, Statiker)
 - c) Sicherung und Beseitigung/Entsorgung von gefährlichen Stoffen im Betriebsbereich (z.B. auf Betriebsflächen oder in Kellerräumen)
 - d) Einleitung der Instandsetzung sicherheitsrelevanter Anlagenteile
 - e) Schwachstellenanalyse bzgl. der technischen und organisatorischen Maßnahmen

3.22.3 Zu Kapitel 18.3: Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall

Der Betreiber hat dafür zu sorgen, dass in einem Störfall die für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden und die Einsatzkräfte unverzüglich, umfassend und sachkundig beraten werden. Die umfasst insbesondere

- a) Informationen zum Schadensfall, wie z.B.:
 - i) Freisetzung von Flüssigkeit aus einem Behälter oder Rohrleitung
 - ii) Freisetzung von gasförmigen Stoffen oder festen Stoffen
 - iii) Fortreißen von Behältern oder Gebinden mit dem Wind
- b) Informationen über Art, Gefährlichkeit und Menge der ausgetretenen Stoffe
- c) Informationen zum Emissionsweg (Kanal, Gewässer, Atmosphäre)
- d) Informationen zum Verhalten der Stoffe in der Umwelt (z.B. Durchmischung mit Wasser, Ausbreitungsfahne in der Atmosphäre)
- e) Abschätzung der Schadstoffkonzentrationen im Verlauf des Emissionspfades

- f) Bewertung der Gefährlichkeit der ausgetretenen Stoffe auf Grundlage der abgeschätzten Schadstoffkonzentrationen
- g) Beratung der Behörden über die einzuleitenden Maßnahmen im Falle des Austretens von gefährlichen Stoffen, wie z.B. beim Einsatz von Schadstoffbekämpfungsmitteln (z.B. Binde- oder Lösungsmittel)
- h) Beratung bei der Beseitigung von Schäden (z.B. bei Bodenkontaminationen)

Dies muss insbesondere alle Informationen umfassen, die die Behörden benötigen, um Informationen zu verbreiten, die es der eventuell betroffenen Öffentlichkeit ermöglichen könnten, Maßnahmen zur Abwendung oder Begrenzung von Schäden zu ergreifen (§10 Absatz 5 Umweltinformationsgesetz).

4 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

Arbeitskreis des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2002): "Vollzug der §§ 9 und 13 Störfall-Verordnung (12. BImSchV)" (Kap. 3), März 2002

Augter G.; Roos M. (2011): Berechnung von Sturmintensitäten für Deutschland, *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* Nummer 236, Offenbach

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

BMU (2004): Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung vom März 2004
<http://www.bmu.de/anlagensicherheit/doc/6133.php>

BMU (2008) heute BMUV: Die Deutsche Anpassungsstrategie an der Klimawandel (DAS),
www.bundesumweltministerium.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php

BMVI (2015): Fachliche Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Projektes KLIWAS. Abschlussbericht des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur

Böhnert, R.(1992): Bauteil- und Anlagensicherheit. Vogel Verlag Würzburg, ISBN 3-8023-0469-3

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.

BWK (2005) – Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V:
Merkblatt: Mobile Hochwasserschutzsysteme - Grundlagen für Planung und Einsatz, Sindelfingen; ISBN 3-936015-19-8

CSC: Regionale Klimaprojektionen für Europa und Deutschland: Ensemble-Simulationen für die Klimafolgenforschung. Climate Service Center, Report 6

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

DIN 25424 (1981): Fehlerbaumanalyse, Teil 1 und 2, Ausgabe 1981-09, Beuth Verlag Berlin

DIN 25419 (1995): Ereignisablaufanalyse: Verfahren, grafische Symbole und Auswertung, Normenausschuss Kerntechnik,

DIN EN 1991-1-4 (2012): Eurocode Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DWA-M 153 (2007): Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef

DWD (2017): Nationaler Klimareport. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main

EC (2013): Flash floods in Europe characterised. Science for Environment Policy.
ec.europa.eu/environment/integration/research/newsalert/pdf/40si4_en.pdf

Engel, N.: Überstau- und Überflutungssicherheit von Entwässerungssystemen Vortrag auf dem Seminar "Generalentwässerungsplanung" TAH, Würzburg, 12. - 13.06.2007

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
- Issa (Internationale Vereinigung für soziale Sicherheit) (2020): Risikobeurteilung in der Anlagensicherheit. IVSS Sektion Chemie, 5. Ausgabe, Heidelberg
- Klafft, M.; et al.: SAFE: A Sensor-Actuator-based Early-warning System for Extreme Weather Situations, 2008
- KLIFF (2013) – Klimafolgenforschung in Niedersachsen. Abschlussbericht – Forschungsthema 6 : Binnengewässer
- KLIWA (2019): Starkniederschläge - Entwicklungen in Vergangenheit und Zukunft – Kurzbericht –
- Kreienkamp, F. et al. (2016): Starkniederschläge in Deutschland. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
- 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
- Köppke, K.-E. (2022): Berücksichtigung des Klimawandels in technischen Regeln für Anlagensicherheit. UBA- Forschungsbericht, FKZ 3718 48 3250
- 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, Forschungskennzahlen 3711 68 331
- 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 (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft – Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder, LAWA Klimawandel-Bericht 2017
- LUBW (2016): Leitfaden – Kommunales Starkregenrisikomanagement Baden-Württemberg. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- Meinke, I.; Weiße, R.; von Storch, H. (2011): Nordseesturmfluten im Klimawandel. https://www.hzg.de/imperia/md/content/klimabuero/publikationen/1509_2009.pdf
- MUNLV (2004): Ermittlung von Bemessungsabflüssen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Merkblätter Band 46
- MULNV NRW, (2018): Arbeitshilfe kommunales Starkregenrisikomanagement Hochwasserrisikomanagementplanung in NRW. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Nov. 2018.
- 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
- Rieger, W. (2015b): Abflussbildung. Hydrologie Grundmodul. Technische Universität. München, 2015, zuletzt geprüft am 18.11.2016.
- Schulte, M.; Kloos, J.(2010): Abgrenzung der Behördenpflichten gegen Betreiberpflichten gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz und Störfall-Verordnung in Bezug auf umgebungsbedingte Gefahrenquellen. Dresden 2010 (siehe Informationen und Hinweise zu dieser TRAS unter www.kas-bmu.de)
- Selbmann, B. (2000): Das PAAG-Verfahren - Methodik / Anwendung / Beispiele - Risikobegrenzung in der Chemie. Herausgeber: Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie, Kurfürsten Anlage 62, D-69115 Heidelberg, Deutschland
- SFK (1995): Leitfaden Anlagensicherheit. (Kap. 3) SFK-GS-06,
- SFK (2004): Risikomanagement im Rahmen der Störfall-Verordnung. (Kap 4.4)
- 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.
- Umweltbundesamt (2019): Monitoring 2019 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel

Verworn, H.-R.; Kummer, U. (2003): Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags (PEN). Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau

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

Warm, H.-J.; Köppke, K.-E. (2007): Schutz von neuen und bestehenden Anlagen und Betriebsbereichen gegen natürliche, umgebungsbedingte Gefahrenquellen, insbesondere Hochwasser (Untersuchung vor- und nachsorgender Maßnahmen), Forschungsbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ:203 48 362

