

TEXTE 2016

Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3711 68 331
UBA-FB-00

Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten

Technische Regel für Anlagensicherheit 320 (TRAS 320)

von

Prof. Dr.-Ing. Wilfried B. Krätzig, Bochum

Dr.-Ing. Matthias Andres, Bochum

Krätzig und Partner, Bochum

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Niemann, Bochum

Prof. Dr. rer. nat. Karl-Erich Köppke, Bad Oeynhausen

unter Mitwirkung von

Prof. Dr. rer. nat. Manfred Stock, Potsdam

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Abschlussdatum Mai 2016

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1

06844 Dessau-Roßlau

Tel: +49 340-2103-0

Fax: +49 340-2103-2285

info@umweltbundesamt.de

Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Krätzig & Partner

Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH

Buscheyplatz 9

D-44801 Bochum

Abschlussdatum:

Mai 2016

Redaktion:

Fachgebiet III 2.3 Anlagensicherheit

Roland Fendler

Publikationen als pdf: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN

Dessau-Roßlau, Dezember 2016

Das diesem Bericht zu Grunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter der Forschungskennzahl 3711 68 331 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Betreiber von Anlagen in Betriebsbereichen (Anlagen, die der Störfall-Verordnung unterliegen) haben die erforderlichen Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen und zusätzlich vorbeugend Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen zu treffen. Hierbei sind umgebungsbedingte Gefahrenquellen zu berücksichtigen. Die Technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS) 320 konkretisiert diese Betreiberpflichten in Bezug auf die umgebungsbedingten Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten. Aufgabe des Forschungsvorhabens war die Unterstützung der Erarbeitung dieser TRAS. Der erste Teil dieses Berichts ist die vom BMUB bekannt gemachte TRAS 320. Im zweiten Teil des Berichts werden zu dieser TRAS Hinweise und Erläuterungen gegeben. Der dritte Teil enthält einen Forschungsbericht mit den wissenschaftlichen Grundlagen.

Abstract

Operators of installations that are subject to the Major Accidents Ordinance, have to take the necessary measures to prevent major accidents and preventively additional measures to limit effects of such accidents. Environment-related hazards have to be regarded in that context. The Technical Rules for Plant Safety (TRAS) 320 concretizes this operator's obligations with respect to the environment-related sources of hazards wind, snow loads and ice loads. Task of the research project was to support the preparation of this TRAS. The first part of this report is the TRAS 320 as publicized by BMUB. The second part of the report gives notes and explanations to the TRAS. The third part contains a research report with the scientific basis.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	15
Tabellenverzeichnis	23
Abkürzungsverzeichnis	27
Zusammenfassung	30
Summary.....	31
I. Technische Regel für Anlagensicherheit: Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten (TRAS 320)	33
Präambel.....	36
1 Grundlagen – Anforderungen der Störfall-Verordnung (StörfallIV)	36
2 Anwendungsbereich.....	38
3 Begriffe	39
3.1 Gefahrenquelle	39
3.2 Umgebungsbedingte Gefahrenquellen	39
3.3 Gefahrenquellenanalyse	39
3.4 Analyse der Gefahren und Gefährdungen	39
3.5 Wind.....	39
3.5.1 Extremwind	40
3.5.2 Windgeschwindigkeit	40
3.5.3 Bö	40
3.5.4 Windspitze	40
3.5.5 Tornado	41
3.6 Schneelast	42
3.6.1 Außergewöhnliche Schneelast	42
3.6.2 Extreme Schneelast	42
3.7 Eislast	42
3.8 Windbedingte Projektile	42
3.9 Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs durch Wind sowie Schnee- und Eislasten	43
3.10 Schutzkonzept	43
3.11 Anlagenbezogene Schutzziele	43
3.12 Störfalleintrittsvoraussetzung.....	43
4 Systematisierung und Aufbau der TRAS	44
5 Beschreibung der Gefahrenquellen	46
5.1 Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten	46

5.1.1	Gefahrenquellen durch Windlasten	46
5.1.2	Gefahrenquellen durch Schwingungen	47
5.1.3	Gefahrenquellen durch Schnee- und Eislasten	47
5.2	Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile sowie Luftdruckänderungen und Druckschwankungen	48
5.2.1	5.2.1 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile	48
5.2.2	Gefahrenquellen durch Luftdruckänderungen und Druckschwankungen.....	48
6	Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse	49
7	Detaillierte Gefahrenquellenanalyse	49
7.1	Statische und dynamische Lasten	49
7.1.1	Bezug zu Normen und Zuverlässigkeitsklassen.....	49
7.1.2	Windlasten.....	50
7.1.3	Schnee- und Eislasten.....	50
7.2	Berücksichtigung des Klimawandels	50
7.3	Windbedingte Projektile	50
7.3.1	Verlust von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen	51
7.3.2	Beschädigung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen	51
8	Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile des Betriebs und der Anlagen.....	51
8.1	Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten	51
8.1.1	Windlasten.....	51
8.1.2	Schnee- und Eislasten.....	52
8.2	Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile: Ermittlung der gefährdeten Anlagen und Anlagenteile.....	52
9	Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen.....	53
10	Festlegung von anlagenbezogenen Schutzziele.....	54
11	Erarbeitung von Schutzkonzepten	56
12	Prüfung der Schutzkonzepte.....	57
13	Ermittlung von Szenarien entsprechend § 3 Absatz 3 StörfallV („Dennoch-Störfälle“) und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung.....	57
14	Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen.....	58
15	Planung für Notfälle, Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung.....	59
15.1	Planung für Notfälle	59
15.2	Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen	59

15.3	Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung	60
16	Dokumentation	61
17	Erfüllung von weiteren Pflichten der StörfallV	61
17.1	Anforderungen an die Instandhaltung	61
17.2	Information und Schulung der Beschäftigten	61
17.3	Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall	61
II	Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 320	63
	Zur Präambel	63
	Zu Kapitel 1 Grundlagen	63
	Zu Kapitel 2 Anwendungsbereich	64
	Zu Kapitel 3 Begriffe	64
	Zu TRAS 320 Abschnitt 3.2 Umgebungsbedingte Gefahrenquellen	65
	Zu TRAS 320, Abschnitt 3.10: Schutzkonzept	65
	Zu Kapitel 4 Systematisierung und Aufbau der TRAS 320	65
	Zu Kapitel 5 Beschreibung der Gefahrenquellen	65
	Zu Abschnitt 5.1 Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten	66
	Zu Abschnitt 5.1.1 Gefahrenquellen durch Windlasten	66
	Zu Abschnitt 5.1.2 Gefahrenquellen durch Schwingungen	66
	Zu Abschnitt 5.1.3 Gefahrenquellen durch Schnee und Eislasten	68
	Zu Abschnitt 5.2 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile sowie Luftdruckänderungen und -schwankungen	70
	Zu Abschnitt 5.2.1 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile	70
	Zu Abschnitt 5.2.2 Gefahrenquellen durch Luftdruckänderungen und Druckschwankungen	70
	Zu Kapitel 6 Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse	70
	Zu Kapitel 7 Detaillierte Gefahrenquellenanalyse	71
	Zu Abschnitt 7.1 Statische und dynamische Lasten	72
	Zu Abschnitt 7.1.1 Bezug zu Normen und Zuverlässigkeitsklassen	72
	Zu Abschnitt 7.1.2 Windlasten	78
	Zu Abschnitt 7.1.3 Schnee- und Eislasten	86
	Zu Abschnitt 7.2 Berücksichtigung des Klimawandels	90
	Zu Abschnitt 7.3 Windbedingte Projektile	90
	Zu Kapitel 8 Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile des Betriebsbereichs und der Anlagen	92
	Zu Abschnitt 8.1 Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten	92

Zu Abschnitt 8.1.1	Windlasten	92
Zu Abschnitt 8.1.2	Schnee- und Eislasten	95
Zu Abschnitt 8.2	Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile: Ermittlung der gefährdeten Anlagen und Anlagenteile	97
Zu Kapitel 9	Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen	98
Zu Kapitel 10	Festlegung von anlagenbezogenen Schutzziele.....	99
Schutzziele wegen Staudruck bei Böen und Windspitzen	99	
Schutzziele wegen Schwingungen bei Böen und Windspitzen	100	
Schutzziele wegen Verlust und Aufprall durch windbedingte Projektile	100	
Schutzziele wegen Schnee und Eisbelastung	100	
Zu Kapitel 11	Erarbeitung von Schutzkonzepten	100
Vor dem Wirksamwerden der Gefahrenquelle	101	
Während des Wirksamwerdens der Gefahrenquelle	104	
Nach dem Wirksamwerden der Gefahrenquelle	104	
Zu Kapitel 12	Prüfung der Schutzkonzepte	104
Zu Kapitel 13	Ermittlung von Szenarien gemäß § 3 Absatz 3 StörfallV (Dennoch-Störfälle) und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung.....	105
Zu Kapitel 14	Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfall-auswirkungen.....	106
Zu Kapitel 15	Planung für Notfälle, Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung.....	107
Informationssammlung	108	
Informationsermittlung.....	108	
Informationsauswertung und Auslösen von Maßnahmen zur Gefahrenabwehr – Zusammenfassung des Standes der Technik	109	
Informationspflichten für die zuständigen Behörden	110	
Zu Kapitel 16	Dokumentation	111
Zu Kapitel 17	Erfüllung von weiteren Pflichten der StörfallV	111
Zu Abschnitt 17.1	Anforderungen an die Instandhaltung (§ 6 Absatz 1 Nummer 1, 2 StörfallV)	111
Zu Abschnitt 17.2	Information und Schulung der Beschäftigten (§ 6 Absatz 1 Nummer 4 StörfallV)	113
Zu Abschnitt 17.3	Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall (Beratungspflicht gemäß § 5 Absatz 2 StörfallV).....	114
III	Forschungsbericht: Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten	117
1	Die umgebungsbedingten Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten	117
1.1	Wind als umweltbedingte Gefahrenquelle	117

1.1.1	Vorbemerkungen: Entstehung und Eigenschaften von Luftbewegungen in der Atmosphäre.....	117
1.1.2	Qualitative Analyse des natürlichen Windes.....	119
1.1.2.1	Erscheinungsformen und ihre Entstehungsmechanismen	119
1.1.2.2	Tiefdruckstürme – Windverhältnisse in der atmosphärischen Grenzschicht.....	123
1.1.2.3	Gewitterstürme	130
1.1.2.4	Tornados	135
1.1.2.5	Einflüsse aus Orographie und Topographie	140
1.1.2.6	Auswirkungen der Gefahrenquelle Wind	146
1.1.3	Quantitative Analyse.....	153
1.1.3.1	Wind- und Sturmstatistik.....	153
1.1.3.2	Entwicklung von Gefährdungskarten für betriebliche Anlagen auf dem Bundesgebiet.....	158
1.1.3.3	Tornados: Häufigkeit und Lokalität	168
1.2	Schneelasten als umgebungsbedingte Gefahrenquelle	174
1.2.1	Qualitative Analyse	174
1.2.1.1	Beschreibung der Niederschlagsform Schnee	174
1.2.1.2	Beschreibung des Phänomens der witterungsbedingten Eisbildung.....	175
1.2.1.3	Lasterhöhende und –mindernde Einflüsse von Baukörperform und -anordnung	175
1.2.1.4	Auswirkungen durch die Gefahrenquellen Schnee und Eis	176
1.2.1.5	Ergebnisse.....	178
1.2.2	Quantitative Analyse.....	178
1.2.2.1	Ein Schneelastmaßstab für den praktischen Gebrauch	178
1.2.3	Aktuelle DIN EN-Norm und letzter Stand der DIN-Norm	179
1.2.3.1	07/2005: DIN 1055-5 – Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 5: Schnee- und Eislast.....	179
1.2.3.2	12/2010: DIN EN 1991-1-3 – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten	183
1.2.4	Zonierung der Schneelasten in Europa	185
1.2.5	Ergebnisse.....	188
1.2.6	Auswirkungen des Klimawandels auf die Schnee- und Eisbelastung	189
1.3	Eislast als umgebungsbedingte Gefahrenquelle	190
1.3.1	Qualitative Analyse.....	190
1.3.2	Aktuelle DIN EN-Norm und letzter Stand der DIN-Norm	191
1.3.2.1	07/2005: DIN 1055-5 – Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 5: Schnee- und Eislast.....	191
1.4	Windbedingte Projektile als Umgebungsbedingte Gefahrenquelle.....	194

1.4.1	Mathematische Beschreibung der Flugbahnen von Modellprojektilen bei Orkanen	196
1.4.2	Projektilflug bei Tornados	203
2	Erkenntnisse über die Bedeutung des Klimawandels	206
2.1	Szenarien des Klimawandels.....	206
2.2	Methoden der Analyse regionaler Klimaänderungen und Extremereignisse	207
2.3	Beobachtete und erwartete Veränderungen bei außertropischen Stürmen	208
2.4	Auswirkungen des Klimawandels auf Sturm- und Hagelschäden in Deutschland.....	210
2.5	Risikobeeinflussende Faktoren für Schneelasten im Klimawandel	216
2.5.1	Fallbeispiel 1: Analyse von Halleneinstürzen im Januar/Februar 2006	216
2.5.2	Fallbeispiel 2: Die Lawinenkatastrophen in den Alpen im Februar 1999.....	217
2.5.3	Schlussfolgerungen zur möglichen Entwicklung von Schneelasten im Klimawandel.....	218
3	Berücksichtigung des Klimawandels durch „Klimaanpassungsfaktoren“ in der TRAS 320.....	221
3.1	Inhalt.....	221
3.2	Veranlassung.....	221
3.3	Fachliche Bewertung einer Anpassung von Windlasten an den Klimawandel	221
3.3.1	Mögliche Veränderungen der Windspitzen bei Winterstürmen.....	221
3.3.2	Mögliche Veränderungen bei konvektiven Ereignissen	222
3.3.3	Mögliche regionale quantitative Veränderungen	222
3.4	Fachliche Bewertung eines Klimaanpassungsfaktors für Schneelasten	223
3.4.1	Relevante meteorologischen Faktoren für extreme Schneelasten	223
3.4.2	Regionale Unterschiede und frühere Änderungen	224
3.4.3	Auswirkungen klimatischer Veränderungen	227
3.4.4	Evaluierung neuer Erkenntnisse zu extremen Schneelasten	228
3.4.5	Empfehlung	229
4	Bauliche Gefahrenabwehr und Anforderungen der StörfallIV	229
4.1	Grundlagen	229
4.1.1	Rechtliche Regelungen von Tragwerkssicherheit und -zuverlässigkeit.....	229
4.1.2	Vorgehensweisen zum Nachweis der Tragwerkszuverlässigkeit	230
4.1.3	Das Dilemma der Kombinationsrisiken nach StörfallIV	231
4.1.4	Über Grenzzustände und Sicherheiten bei Tragkonstruktionen	232
4.1.5	Zu den Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse	233
4.2	Sicherheitsnachweise mittels Teilsicherheitsbeiwerten	234

4.2.1	Grenzzustandsfunktion und Zuverlässigkeitsindex β	234
4.2.2	Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β	236
4.2.3	Theoretische Herleitung von Teilsicherheitsfaktoren.....	237
4.2.4	Unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen.....	240
4.2.5	Die Nachweisformate in den neuen DIN- und DIN EN-Normen	240
4.2.6	Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsfaktoren in den neuen DIN EN Normen	242
4.2.6.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit:	242
4.2.6.2	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:	243
4.2.6.3	Andere Risikoklassen und modifizierte Tragwerks-Lebensdauern.....	244
4.2.7	Technische Interpretation der Teilsicherheitsbeiwerte	245
4.3	Einbettung in Normen und technische Regeln	246
4.3.1	Kurzfassung des Sicherheitskonzeptes nach EC	246
4.3.2	Besonderheiten im Sicherheitskonzept hinsichtlich der Schneelasten.....	248
4.4	Grundlagen und Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC3	249
5	Nachrüstungsmaßnahmen.....	260
5.1	Normen und Technische Regeln seit 1936.....	260
5.1.1	Windlastniveau in Normen und Technischen Regeln seit 1949	260
5.1.2	Historischer Rückblick in der Schneelast-Normenentwicklung des DIN.....	261
5.1.2.1	12/1936: DIN 1055, Blatt 5 - Schneebelastung	262
5.1.2.2	12/1956: DIN 1055, Blatt 5 - Schneebelastung	262
5.1.2.3	06/1975: DIN 1055, Teil 5 - Lastannahmen für Bauten, Verkehrslasten – Schneelast und Eislast	262
5.1.2.4	04/1994: DIN 1055, Teil 5 A1 - Lastannahmen für Bauten, Verkehrslasten – Schneelast und Eislast	263
5.1.3	Historischer Rückblick in der Schneelast-Normenentwicklung: Die TGL	265
5.1.3.1	11/1963: TGL 20 167-1 – Lastannahmen für Bauten, Grenzlastfaktoren, Normlasten für Verkehrs-, Schnee- und Windbelastung.....	265
5.1.3.2	12/1976: TGL 32274/05 – Lastannahmen für Bauwerke: Schneelasten.....	265
5.1.4	Einstufung bestehender Betriebsbereiche hinsichtlich Schneelast	266
5.2	Der Zeiteinfluss: Deteriorationen und Degradationen.....	267
5.3	Nachrüstungsmöglichkeiten.....	269
5.3.1	Nachrüstungs- und Vorsorgemaßnahmen vor dem Wirksamwerden der Gefahrenquelle.....	269
5.3.2	Nachrüstungs- und Vorsorgemaßnahmen nach dem Wirksamwerden der Gefahrenquelle.....	273
5.4	Nachrüstungspflichten	273

6	Abschätzung der finanziellen Auswirkungen Wirkungen der Regelungen und Vorgaben des TRAS-Entwurfs	275
6.1	Einleitung	275
6.2	Anforderungen und Erfahrungen im weltweiten Anlagenbau	275
6.3	Gewichtung von Wind-, Schnee und Eislasten im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren auf die Standsicherheit von Anlagen.....	276
6.4	Kostenanteile von Fundamenten und Verankerungen im Vergleich zu den Gesamtkosten einer Anlage bei Neubauten	277
6.5	Einzelbetrachtung von Kolonnen im Chemieanlagenbau (Neubauten) bei extremen Windlasten	278
6.5.1	Mehrkosten durch größere Windlasten bei Kolonnen.....	279
6.5.1.1	Trennkolonne.....	279
6.5.1.2	Fundamente/Verankerungen.....	281
6.5.2	Mehrkosten durch größere Windlasten bei Tanks	281
6.5.3	Mehrkosten durch größere Windlasten bei Rohrleitungsbrücken.....	281
6.5.4	Mehrkosten durch größere Schnee- und Eislasten bei Kolonnen	282
6.5.5	Mehrkosten durch größere Schnee- und Eislasten bei Tanks.....	282
6.5.6	Mehrkosten durch größere Schnee- und Eislasten bei Rohrleitungen	283
6.6	Nachrüstung von Anlagen	283
6.6.1	Grundsätzliches.....	283
6.6.2	Nachrüstung der Anlagenteile und die daraus entstehenden Mehrkosten	284
6.6.2.1	Allgemein.....	284
6.6.2.2	Nachrüstung von Fundamenten	285
6.6.2.3	Nachrüstung von Verankerungen.....	285
6.6.2.4	Nachrüstung von Wandungen von Kolonnen und Tanks	285
6.6.2.5	Nachrüstung von Dachtragwerken	285
7	Anlage 1: Anwendungsbeispiel der TRAS 320 für die Gefahrenquelle Wind und Projektilflug am Standort Raffinerie Heide	286
7.1	Standortbeschreibung der Raffinerie Heide GmbH	286
7.2	Angesetzte Windeinwirkung für den Nachweis der Xylokolonnen in der Bestandsstatik	289
7.3	Standortgutachten zur Beurteilung des Windklimas vor Ort	291
7.4	Anzusetzende Windeinwirkungen für den Nachweis der Xylokolonnen nach TRAS	297
7.5	Windkräfte und Biegemomente gemäß TRAS im Vergleich mit der Bestandsstatik	298
7.5.1	Wanddickennachweis.....	298
7.5.2	Fundament	300

7.5.3	Schlussfolgerung	301
7.6	Überschlägiger Nachweis der maßgeblichen Haupttragelemente für die nach TRAS anzusetzenden Lasten	301
7.6.1	Allgemeines	301
7.6.2	Behälterwand.....	303
7.6.3	Fußpunktanschluss	304
7.6.4	Gründung.....	306
7.6.5	Zusammenfassung	306
7.7	Nachbesserungsbedarf.....	308
7.8	Nachbesserungsaufwand	308
7.9	Gefahrenquelle windbedingte Projektile	309
7.9.1	Umgebung der Destillationskolonne.....	309
7.9.2	Prüfung der Sicherung von Anlagenteilen durch Ortsbegehung	314
7.9.3	Auswahl von Modellkörpern	315
7.9.4	Untersuchungsergebnisse	320
8	Anlage 2: Anwendungsbeispiel der TRAS 320 für die Gefahrenquellen Schnee und Eis am Standort Ölhafen Rostock	328
8.1	Standortbeschreibung der Großtanklager Ölhafen Rostock GmbH	328
8.2	Angesetzte Schnee- und Eislast im Bestandsnachweis	330
8.2.1	Schneelasten	330
8.2.2	Eislasten	331
8.3	Anzusetzende Schnee- und Eislasten nach den aktuellen allgemein anerkannten Regeln der Technik.....	331
8.3.1	Schneelast.....	331
8.3.2	Eislast	333
8.4	Standortgutachten zur Beurteilung des Schneeklimas vor Ort	334
8.5	Anzusetzende Lasten aus Schnee und Eis nach TRAS	336
8.5.1	Schneelasten.....	336
8.5.2	Eislasten	337
8.6	Vergleich der Lasten aus Schnee und Eis gemäß TRAS mit den Bestandslasten	337
8.6.1	Schneelasten	337
8.6.2	Weitere Lasten für die Dachkonstruktion.....	338
8.6.3	Winddruck auf Dachhaut	338
8.6.4	Verkehrslasten.....	339
8.6.5	Temperaturbeanspruchung	339

8.6.6	Beanspruchung aus Innendruck	339
8.6.7	Maßgebende Einwirkungskombinationen	339
8.6.8	Lastvergleich für die Gefahrenquelle Schnee	339
8.6.9	Lastvergleich für die Gefahrenquelle Eis	341
8.7	Überschlägiger Nachweis der maßgeblichen Haupttragelemente für die nach DIN EN 1991-1-3/NA und TRAS anzusetzenden Lasten	343
8.7.1	Allgemeines	343
8.7.2	Dachhaut	344
8.7.3	Radialsparren	345
8.7.4	Tangentialträger	346
8.7.5	Zugring	346
8.7.6	Druckring	347
8.7.7	Verbindungen	347
8.7.8	Zusammenfassung	347
8.8	Nachbesserungsbedarf	349
8.9	Nachbesserungsaufwand	350
8.9.1	Verstärkung der Radialsparren:	350
8.9.2	Verstärkung Zugring:	350
9	Anlage 3: Berücksichtigung von Tornados nach Abschnitt 13 der TRAS 320	351
9.1	Vorbemerkungen	351
9.2	Anforderungen der TRAS 320	352
9.3	Beobachtete Tornados im Umkreis der Anlage	354
9.4	Ermittlung der vom Anlagenteil aufnehmbaren Tornadostärke	355
9.5	Ermittlung der Schädigung des betrachteten Anlagenteils in einem Tornado bis zu einer Stärke F4	357
9.6	Ermittlung des Gefährdungspotenzials durch Projektilflug	357
10	Auflistung einiger relevanter Normen	361
11	Literaturquellen	364
11.1	Quellenverzeichnis zu „I. Technische Regel für Anlagensicherheit: Vor- kehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten“	364
11.2	Quellenverzeichnis zu „II. Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 320“	364
11.3	Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 1, Umgebungsbedingte Gefahrenquellen“	364
11.4	Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 2, Erkenntnisse über die Bedeutung des Klimawandels“	367

11.5	Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 3, Berücksichtigung des Klimawandels“	371
11.6	Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 4, Bauliche Gefahrenabwehr“	374
11.7	Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 5, Nachrüstungsmaßnahmen“	376
11.8	Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 6, Abschätzung der finanziellen Auswirkungen“	377
11.9	Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 7, Anlage 1, Anwendungsbeispiel Heide“	377
11.10	Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 8, Anlage 2, Anwendungsbeispiel Rostock“	377
11.11	Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 9, Anlage 3, Berücksichtigung Tornado“	378

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Ablaufschema zur Optimierung des Schutzkonzeptes.....	45
Abbildung 2:	Systematisierung der von Wind, Schnee- und Eislasten ausgelösten Gefahrenquellen.....	46
Abbildung 3:	Potenzielle Gefährdungen durch Windlasten.....	47
Abbildung 4:	Potenzielle Gefährdungen durch Objektablösung, windbedingte Projektile und Unterdruck infolge Sogwirkung	48
Abbildung 5:	Überblick über Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse.....	73
Abbildung 6:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Sicherheitszone Z	74
Abbildung 7:	Wahrscheinlichkeitsverteilung $F(v)$ der Extremwerte der mittleren Windgeschwindigkeit.....	76
Abbildung 8:	Darstellung der atmosphärischen Grenzschicht	79
Abbildung 9:	Windgeschwindigkeitsprofile der mittleren Windgeschwindigkeit und der Böengeschwindigkeit für Geländekategorie II (Referenzgelände).....	81
Abbildung 10:	Windgeschwindigkeitsprofile in Abhängigkeit von der Bodenrauigkeit	81
Abbildung 11:	Windzonenkarte der DIN EN 1991-1-4	82
Abbildung 12:	Sturmkarte des DWD: Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 100 Jahren	83
Abbildung 13:	Für den Nachweis von baulichen Anlagen zu berücksichtigende Einwirkungen infolge der Gefahrenquelle Wind	85
Abbildung 14:	Schneelastzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2010, Nationaler Anhang DIN EN 1991-1-3.....	86
Abbildung 15:	Verdeutlichung der Höhe der Schneelast in Abhängigkeit von der Schneedichte	87
Abbildung 16:	Mögliche Anpassung der Schneelast auf dem Boden gemäß DIN EN 1991-1-3 (2010), Anhang D in Abhängigkeit von der Wiederholungswahrscheinlichkeit B.....	88
Abbildung 17:	Typische Lastbilder der Eisbildung	89
Abbildung 18:	Eiszonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2005	90
Abbildung 19:	Darstellung möglicher Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile	91
Abbildung 20:	Festlegungen des Geschwindigkeitsdruckes in deutschen Normen.....	94
Abbildung 21:	Einwirkungen, Störfalleintrittsvoraussetzungen und Folgen durch die Gefahrenquellen Wind, Schnee und Eis	99
Abbildung 22:	Aerodynamische Maßnahmen gegen wirbelerregte Querschwingungen	103
Abbildung 23:	Schema der Hoch- und Tiefdruckgebiete und den Windverhältnissen in der freien Atmosphäre.....	117
Abbildung 24:	Vertikalstruktur der Atmosphäre und Eigenschaften der planetarischen Grenzschicht.....	118

Abbildung 25:	Entstehung eines tropischen Wirbelsturms	120
Abbildung 26:	Weltweite Verbreitungsgebiete von Tornados	121
Abbildung 27:	Azorenhoch und Islandtief als typische Auslöser europäischer Tiefdruckstürme	122
Abbildung 28:	Zugbahn des Orkanes „Lothar“ am 26.Dez.1999.....	124
Abbildung 29:	Orkane über Europa.....	125
Abbildung 30:	Karten zur Sturmgefährdung.....	126
Abbildung 31:	Entwicklung der mittleren Windgeschwindigkeit v_m und der zugehörigen Windrichtung zum Orkantief Lothar gemessen an der DWD-Station in Stötten.....	126
Abbildung 32:	Spektraldichteverteilung der mittleren Windgeschwindigkeit zum makro- und mikrometeorologischen Bereich.....	127
Abbildung 33:	Zeitlicher Ablauf eines Windprofils	128
Abbildung 34:	Geländekategorien der DIN EN 1991-1-4:2010-12 und DIN 1055-4:2005-03	129
Abbildung 35:	Windprofile für unterschiedlich raues Gelände	130
Abbildung 36:	Aufbau eines Gewittersturms über die Höhe während des Reifestadiums.....	131
Abbildung 37:	Gewitterböenfront in Form eines Ringwirbels (Squall).....	131
Abbildung 38:	Abfluss kalter Luftmassen aus einer Cumulonimbus Wolke mit bodennaher Umlenkung der Flugbahn.....	132
Abbildung 39:	Aufzeichnung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Gewittersturm über der Andrews Air Force Base am 1. August 1983.....	133
Abbildung 40:	Illustration eines stationären Windereignisses und eines instationären Gewittersturms	134
Abbildung 41:	Entstehung eines Tornados aus einer Superzelle	135
Abbildung 42:	Aufnahme einer Superzelle.....	136
Abbildung 43:	Entstehung eines Tornados aus einer Gewitterwolke	137
Abbildung 44:	Wasserhosen über dem Mittelmeer	138
Abbildung 45:	Schema des gekoppelten Hang- und Berg-Tal-Windsystems	141
Abbildung 46:	Windkanalmodell der Reststoffdeponie Hagen Sudfeldstraße.....	142
Abbildung 47:	Geschwindigkeitsüberhöhung an einer Reststoffdeponie	143
Abbildung 48:	Strömungsverhältnisse an einer Böschung.....	144
Abbildung 49:	Digitales Geländemodell in der weiteren Umgebung des Standortes.....	145
Abbildung 50:	Windrichtung und –geschwindigkeit in m/s in ca. 10m über Grund bei einem Höhenwind von 32m/s aus Süd-West	146
Abbildung 51:	Windschäden an einzelnen Bauteilen sowie am Gesamttragwerk	147
Abbildung 52:	Wirbelstraße an einem kantigen Profil	148

Abbildung 53:	Tragwerksversagen des Fernsehturms „Hoher Bogen“ infolge Ermüdung aus wirbelerregten Querschwingungen.....	149
Abbildung 54:	Ermüdungsriss nach Regen-Wind induzierten Schwingungen	150
Abbildung 55:	Sturmschäden durch Flatterschwingungen	151
Abbildung 56:	Übergeschwindigkeitsfaktoren zwischen den Anlagenbauten eines Steinkohlekraftwerkes	152
Abbildung 57:	Wahrscheinlichkeitsverteilung $F(v)$ der Extremwerte der mittleren Windgeschwindigkeit für Nordseeküste und Süddeutschland	154
Abbildung 58:	Verhältnis von $v(R) / v_b$ für unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsniveaus bei einem Formparameter der Gumbel-Verteilung von $K = 1/8, 1/10$ bzw. $1/13$	155
Abbildung 59:	Weibull-Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten zum Standort Travemünde	156
Abbildung 60:	Verteilung der 10-Min-Intervalle am Standort Düsseldorf-Flughafen auf die 30°-Sektoren und Geschwindigkeitsklassen der Breite 1m/s in der planmäßigen Lebensdauer von 50 Jahren	157
Abbildung 61:	Stärkewindrose für den 50-Jahreswind am Frankfurter Flughafen	160
Abbildung 62:	Jahreszeitliche Veränderlichkeit der monatlichen Extremwerte der mittleren Windgeschwindigkeit.....	161
Abbildung 63:	Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren	164
Abbildung 64:	Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen	168
Abbildung 65:	Tornado-Intensitätsverteilung.....	169
Abbildung 66:	Tornadomeldungen in den Jahren 855 – 2005	170
Abbildung 67:	Auftreten von Tornados in Deutschland.....	172
Abbildung 68:	Überschreitung der Tornadointensität F1 in Anzahl pro Jahr und km ² : Kartenwert $\cdot 10^{-5}$	173
Abbildung 69:	Fotos von Schneeflocken nach W. A. Bentley, USA.....	174
Abbildung 70:	Bodenwetterkarte Deutschlands am 31.12.1978 um 12:00 Uhr	177
Abbildung 71:	Verdeutlichung der Höhe der Schneelast in Abhängigkeit von der Schneedichte	179
Abbildung 72:	Charakteristische Bodenwerte der Schneelast s_k nach DIN 1055-5:2005-07	181
Abbildung 73:	Schneelastzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2005.....	182
Abbildung 74:	Europäische Klimaregionen nach DIN EN 1991-1-3: 2012-12.....	183
Abbildung 75:	Schneelastzonenkarte von Europa, Alpine Region 2010.....	184
Abbildung 76:	Schneelastzonenkarte von Europa, Region Zentral Ost 2010	184
Abbildung 77:	Schneelastzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2010, Nationaler Anhang EC1	186
Abbildung 78:	Typische Lastbilder der Eisbildung	190

Abbildung 79:	Anzahl der Beobachtungsstationen für Eisbildung in der BRD	191
Abbildung 80:	Eiszonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2005	193
Abbildung 81:	Projektilbildung während des Orkans Lothar.	194
Abbildung 82:	Darstellung möglicher Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile	195
Abbildung 83:	Auswahl eines Modellkörpers zur Ermittlung des Gefahrenpotenzials windbedingter Projektile	196
Abbildung 84:	Fass als bodennahes Projektil	197
Abbildung 85:	Darstellung des waagerechten Wurfs	197
Abbildung 86:	Verminderung der Anströmfläche eines Rohres (Draufsicht).....	199
Abbildung 87:	c_w -Wertermittlung in Anhängigkeit von der Reynolds-Zahl für eine Kugel und einen Zylinder	201
Abbildung 88:	Berechnete Reichweiten unterschiedlicher Modellkörper	201
Abbildung 89:	Methodische Vorgehensweise einer Gefahrenquellenanalyse für windbedingte Projektile	203
Abbildung 90:	Globale Erwärmung an der Erdoberfläche in °C (relativ zu 1980 - 1999) für die Szenarien A2, A1B und B1.	206
Abbildung 91:	Sturmindex für die Britischen Inseln, die Nordsee und die norwegische Küste von 1881 bis 2004	209
Abbildung 92:	Änderung der Starkwindereignisse in Prozent für Wintermaxima im Szenario A2 zum Ende des 21ten Jahrhunderts (Änderungen von 2071---2100 gegenüber 1961---1990).....	210
Abbildung 93:	Methode zur Abschätzung der zukünftigen Häufigkeit von Schadensereignissen im Klimawandel.....	211
Abbildung 94:	Modellvalidierung des dynamischen Sturmschadenmodells der FU Berlin durch Vergleich beobachteter und simulierter Schäden einzelner Sturmereignisse mit hoher Übereinstimmung der Schadenhöhen (Schadensatz ‰ des GDV).....	212
Abbildung 95:	Modellvalidierung des dynamischen Sturmschadenmodells der FU Berlin durch Vergleich der räumlichen Verteilung beobachteter und simulierter mittlerer jährlicher Schadensätze im Winterhalbjahr, Zeitraum 1997-2007.....	212
Abbildung 96:	Relative Änderungen der Schäden durch Winterstürme im A1B- Szenario 2071-2100 gegenüber den mit dem Modell der FU Berlin simulierten Schadensätzen im Zeitraum 1961-2000.	213
Abbildung 97:	Räumliche Verteilung der Schadensätze in Deutschland und deren Änderungen im A1B-Szenario in näherer und fernerer Zukunft gegen- über 1984-2008,	214
Abbildung 98:	Verkürzung der Wiederkehrperioden versicherter Jahresschäden durch Winterstürme der Referenzperiode 1971- 2000 in der Zukunft bis 2100 unter dem A1B-Szenario.	215

Abbildung 99:	Verkürzung der Wiederkehrperioden versicherter Jahresschäden der Referenzperiode 1971-2000 in der Zukunft bis 2070 unter dem A1B-Szenario.	215
Abbildung 100:	Aufzeichnung der Schneehöhe und der meteorologischen Parameter Temperatur, Niederschlag als Regen, als Schnee und als Graupel von November 2005 bis Februar 2006 an der Wetterstation Bad Reichenhall des DWD.	216
Abbildung 101:	Die Großwetterlage im Februar 1999. Eine ausgeprägte Nordwestlage über Europa führt in kurzen Abständen mehrere aktive Niederschlagsgebiete gegen die Alpen.....	217
Abbildung 102:	Simulationsergebnisse mit REMO zur erwarteten Änderung der mittleren Temperatur (links) und des mittleren Niederschlag (rechts) im Winter (DJF) im A1B Szenario im Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Referenzperiode 1961-1990.	219
Abbildung 103:	Simulationsergebnisse mit REMO zur erwarteten Änderung der mittleren Schneehöhe im Januar (links) für das A1B Szenario.	220
Abbildung 104:	Wetterkarte vom 31.12.78, 24 Uhr (Jahreswechsel).....	226
Abbildung 105:	Temperaturänderung im Zeitraum 24.12.1978 bis 01.01.1979.....	227
Abbildung 106:	Das Zuverlässigkeitskonzept in der baulichen Gefahrenabwehr	231
Abbildung 107:	Überblick über Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse.....	233
Abbildung 108:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Sicherheitszone Z	235
Abbildung 109:	Zuverlässigkeitsindex β und operative Versagenswahrscheinlichkeit P_f	236
Abbildung 110:	Verbund-Wahrscheinlichkeitsdichte von Einwirkung E und Widerstand R.....	238
Abbildung 111:	Anpassung der Schneelast auf dem Boden gemäß DIN EN 1991-1-3:2010, Anhang D in Übereinstimmung mit der Wiederkehrperiode.....	248
Abbildung 112:	Überblick über Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse.....	252
Abbildung 113:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Sicherheitszone Z	253
Abbildung 114:	Wahrscheinlichkeitsverteilung $F(v)$ der Extremwerte der mittleren Windgeschwindigkeit.....	256
Abbildung 115:	Festlegungen des Geschwindigkeitsdruckes in deutschen Normen.....	261
Abbildung 116:	Schneelastzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 1994.....	264
Abbildung 117:	Zeitabhängige Grenzzustandsfunktionen und Tragwerksschädigung	267
Abbildung 118:	Zu Reparatur- und Rehabilitationsstrategien von Tragwerken.....	268
Abbildung 119:	Aerodynamische Maßnahmen gegen wirbelerregte Querschwingungen	272
Abbildung 120:	Kostenanteile im Chemieanlagenbau	278
Abbildung 121:	Eingerüsteter Reaktor einer Ammoniaksyntheseanlage	279
Abbildung 122:	Freistehende Kolonnen in einer Raffinerie.....	280

Abbildung 123:	Zu betrachtende Bereiche bei erhöhten Windlasten am Beispiel einer freistehenden Kolonne	280
Abbildung 124:	Ausschnitt einer Rohrleitungsbrücke.....	282
Abbildung 125:	Zu betrachtende Bereiche von Tankanlagen mit großen Spannweiten aufgrund von Schnee- und Eislasten	283
Abbildung 126:	Lage der Raffinerie Heide GmbH.....	286
Abbildung 127:	Gesamtansicht des Betriebsstandortes mit der Xylol-Destillation.....	287
Abbildung 128:	Gesamtansicht der Xylol-Destillation	288
Abbildung 129:	Xylolkolonnen.....	289
Abbildung 130:	Höhenabhängiger Staudruck $q(z)$ nach DIN 1055-4, 1938	290
Abbildung 131:	Windzonenkarte Deutschland mit Bauwerksstandort Raffinerie Heide (links), anzusetzende Referenzgeschwindigkeit und –geschwindigkeitsdruck (rechts).....	292
Abbildung 132:	Extremwertverteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten (10-Min Mittelwerte) der Windmessstation Büsum im Untersuchungsgebiet der Raffinerie.....	294
Abbildung 133:	Flächennutzungskarte für den Standort Raffinerie Heide	296
Abbildung 134:	Windrichtungsscharfe Windprofile an der Raffinerie Heide.....	296
Abbildung 135:	Stärkewindrose zu den Extremwindgeschwindigkeiten an der Raffinerie Heide	297
Abbildung 136:	Vergleich des Böengeschwindigkeitsdrucks (links) und der sich daraus ergebenden Momente	300
Abbildung 137:	Vergleich des Böengeschwindigkeitsdrucks und die sich daraus ergebenden Fußeinspannmomente	301
Abbildung 138:	Statische Systeme für den Nachweis der Behälterwand	304
Abbildung 139:	Statische Systeme für den Nachweis der Fußpunktverankerung	305
Abbildung 140:	Aromatenextraktion.....	310
Abbildung 141:	Aromatentanklager unterhalb der Destillationskolonne.....	311
Abbildung 142:	Temperaturmessung an der benachbarten Extraktionskolonne	312
Abbildung 143:	Gastrennung (Vordergrund) mit Platformer (Hintergrund) g	313
Abbildung 144:	Ausschnitt aus dem Lageplan	314
Abbildung 145:	Sicherung von Gitterrosten	315
Abbildung 146:	Beleuchtungen in der Destillation.....	315
Abbildung 147:	Eingangsdaten der Flugweitenberechnung des Modellrohrs I	316
Abbildung 148:	Maximale Flugweite des Modellrohrs I.....	317
Abbildung 149:	Lage der ausgewählten Tanks	318
Abbildung 150:	Ansicht des Tanks Nr. 263	319

Abbildung 151:	Berechnung der Flugbahnen, der Projektilgeschwindigkeit sowie der Penetrationstiefe für 3 Aufprallpunkte am Beispiel des Tanks Nr. 11	320
Abbildung 152:	Projektilgeschwindigkeit in Anhängigkeit vom Fallweg	322
Abbildung 153:	Windgeschwindigkeitsprofil g	323
Abbildung 154:	Penetrationstiefen in Abhängigkeit von der Projektilgeschwindigkeit	324
Abbildung 155:	Penetrationstiefen in Abhängigkeit von der Projektilgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Rohrstücken g	324
Abbildung 156:	Wandstärkenaufbau von Tank Nr. 263	325
Abbildung 157:	Gegenüberstellung von Wandstärken des Tanks Nr. 263 und den berechneten Penetrationstiefen für das Modellrohr 1 (Gewicht 3,84 kg, Länge 2 m, Durchmesser 0,05 m).....	326
Abbildung 158:	Lage des Großtanklagers-Ölhafen Rostock GmbH	328
Abbildung 159:	Eckdaten "Tank 11".....	329
Abbildung 160:	"Tank 11" in den Bestandsunterlagen	330
Abbildung 161:	Schneelasten gemäß TGL 20167	331
Abbildung 162:	Schneelastzonenkarte gemäß dem NA zu DIN EN 1991-1-3	332
Abbildung 163:	Schneelasten auf Tonnendächer nach DIN EN 1991-1-3/NA.....	333
Abbildung 164:	Schematische Darstellung der Eislasten nach DIN 1055-4	334
Abbildung 165:	Extremwertverteilung der Schneelast am Boden	335
Abbildung 166:	Vergleich der Schneelasten nach TGL 20167 und DIN EN 1991-1-3/NA plus TRAS für SLZ 3	337
Abbildung 167:	Vergleich der Schneelasten nach TGL 20167 und DIN EN 1991-1-3/NA plus TRAS für SLZ 2 plus norddeutsches Tiefland	338
Abbildung 168:	Vergleich der Schneelast auf flachen Dächern in den neuen Bundesländern gemäß TGL 20167 und TRAS Wind-Schnee-Eis.....	341
Abbildung 169:	Haupttragglieder der Dachkonstruktion.....	343
Abbildung 170:	Statische Systeme für den Nachweis von Dachhaut und Radialsparren.....	345
Abbildung 171:	Statische Systeme für den Nachweis der Tangentialträger	346
Abbildung 172:	Statische Systeme für den Nachweis von Zug- und Druckring	347
Abbildung 173:	Schäden von Anlagenteilen eines Chemieunternehmens in den USA nach einem F3 Tornado	352
Abbildung 174:	Beobachtete Tornadoereignisse in einer Untersuchungsfläche von 100 km x 100 km um den Anlagenstandort (seit 1950).....	354
Abbildung 175:	Maximaler Geschwindigkeitsdruck der Tornadoströmung in Abhängigkeit von maximaler Tornadogeschwindigkeit und Fujita-Stärke	356

Abbildung 176: Penetrationstiefen des als Modellkörper ausgewählten Stahlrohrs bei Tornadostärken von F2 bis F4	358
Abbildung 177: Chemieunternehmen in den USA nach einem F3 Tornado und Wiederaufbau	360

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Charakterisierung verschiedener Windphänomene	40
Tabelle 2:	Fujita-Skala mit Einteilung nach typischen Schäden	41
Tabelle 3:	Dichte von Schnee in kg/m ³	69
Tabelle 4:	Kriterien zum Ausschluss von Gefahrenquellen	71
Tabelle 5:	Schadenfolge- und Zuverlässigkeitsklassen nach DIN EN 1990	77
Tabelle 6:	Aerodynamische Rauiglängen (Bilder: © DIN Deutsches Institut für Normung e.V.).....	80
Tabelle 7:	Böengeschwindigkeiten nach DIN EN 1991-1-4	84
Tabelle 8:	Vereisungsklassen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland nach DIN 1055-5.....	89
Tabelle 9:	Verfahrensschritte zur Berechnung der Windlast nach EN 1991-1-4	93
Tabelle 10:	Abminderungsfaktor nach TGL-Richtlinie	94
Tabelle 11:	Liste zur Überprüfung von Anlagen in Betriebsbereichen.....	95
Tabelle 12:	Regelschneelast s_0 in kN/m ² (kg/m ²).....	96
Tabelle 13:	Konstruktive Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Widerstandes gegenüber Wind und Schneelasten	101
Tabelle 14:	Weitere Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Widerstandes gegenüber Wind, Schnee- und Eislasten.....	102
Tabelle 15:	Vorschlag für einen Begehungs- und Kontrollplans für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten der Autoren dieser Hinweise und Erläuterungen.....	112
Tabelle 16:	Extreme Windgeschwindigkeiten weltweiter Sturmphänomene.....	123
Tabelle 17:	Charakteristische Größen eines Tornados mit unterschiedlicher Intensität.....	137
Tabelle 18:	Fujita-Skala mit Auftretenshäufigkeit der Tornadoereignisse je Tornadoklasse.....	138
Tabelle 19:	Richtungsabhängige Weibullparameter für 12 Sektoren und prozentuale Häufigkeit der Windrichtung zur Station Düsseldorf-Flughafen.....	157
Tabelle 20:	Verfahrensschritte zur Berechnung der Windlast nach EN 1991-1-4	158
Tabelle 21:	Böengeschwindigkeitsdruck (Spitzengeschwindigkeitsdruck) in den 4 Windzonen in 10 m Höhe über Grund.....	163
Tabelle 22:	Böenwindgeschwindigkeiten v zu Wiederkehrzeiten R von 50, 100 und 500 Jahren ausgewählter Standorte	165
Tabelle 23:	50-Jahreswindgeschwindigkeiten ausgewählter Standorte	167
Tabelle 24:	Böenwindgeschwindigkeiten v zu Wiederkehrzeiten R von 50, 100, 500 und 1000 Jahren in Abhängigkeit der Windzone und Geländekategorie	168
Tabelle 25:	Extreme Tornados in Deutschland.....	170

Tabelle 26:	Dichte von Schnee in kg/m ³	175
Tabelle 27:	Gefahrenquellen infolge Eis- und Schneebildung	178
Tabelle 28:	Sockelbeträge der Schneelast in der Bundesrepublik Deutschland nach DIN 1055-5	180
Tabelle 29:	Ausschnitt aus DIBT 2008: Einteilung der Landkreise und Gemeinden in die Schneelastzonen der DIN-Normung.....	187
Tabelle 30:	Tabellendarstellung der wesentlichen Belastungsfälle	189
Tabelle 31:	Vereisungsklassen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland nach DIN 1055-5.....	192
Tabelle 32:	Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Flugweite	200
Tabelle 33:	Tornados-Charakteristiken (Design-Tornados).....	204
Tabelle 34:	Projektilgeschwindigkeiten eines Kantholzes als Modellkörper nach FEMA 361	204
Tabelle 35:	Projektilgeschwindigkeiten eines Stahlrohrs als Modellkörper (10 kg, Durchmesser 10 cm).....	204
Tabelle 36:	Beziehung zwischen operativer Versagenswahrscheinlichkeit P_f und Zuverlässigkeitsindex β	235
Tabelle 37:	Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β für Baukomponenten mit RC2-Anforderungen	236
Tabelle 38:	Bemessungswerte für weitere Verteilungsfunktionen	240
Tabelle 39:	Mindest-Zuverlässigkeitsindices $\beta(50)$ für Grenzzustände	241
Tabelle 40:	Teilsicherheitsbeiwerte im Grenzzustand des Tragwerksversagens	242
Tabelle 41:	Beiwerte ψ im Hochbau nach DIN 1055-100:2001-03	243
Tabelle 42:	Beispiele für Widerstands-Teilsicherheitsbeiwerte.....	243
Tabelle 43:	Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β	244
Tabelle 44:	K_{FI} -Faktoren für Einwirkungen.....	244
Tabelle 45:	Klassifizierung der Nutzungsdauer	245
Tabelle 46:	Multiplikative Zusammensetzung der Partialsicherheitsfaktoren	246
Tabelle 47:	Teilsicherheitsbeiwerte im Grenzzustand des Tragwerksversagens (Versagen des Gesamttragwerks oder einer Komponente durch Bruch oder übermäßige Verformung)	247
Tabelle 48:	Zahlenwerte für Kombinationsbeiwerte im Hochbau nach DIN EN 1990:2010-12/NA	249
Tabelle 49:	Beiwerte ψ im Hochbau nach DIN EN 1990.....	251
Tabelle 50:	Schadenfolge- und Zuverlässigkeitsklassen nach Eurocode DIN EN 1990	254
Tabelle 51:	Normgemäße Böenwindgeschwindigkeiten für die Zuverlässigkeitsklassen RC 2 (Standard) und RC 3 (hohe Schadensfolgen) sowie zugeordnete Jährlichkeiten R.....	259

Tabelle 52:	Regelschneelast s_0 in kN/m^2 (kp/m^2) gemäß Tabelle 2 der DIN 1055 Teil 5	263
Tabelle 53:	Normschneelast s_0 in kp/m^2 gemäß Tabellen 7 und 8 der TGL 20 167 1	265
Tabelle 54:	Grundwerte der Normschneelast s_0 in kp/m^2 gemäß Tabelle 2 der TGL 32274/5	266
Tabelle 55:	Konstruktive Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Wider- standes gegenüber Wind- und Schneeeinwirkungen.....	270
Tabelle 56:	Weitere Vorkehrungen zur Gefahrenabwehr gegenüber Wind- und Schneeeinwirkungen.....	271
Tabelle 57:	Zusammenstellung der verwendeten Parameter zur Ermittlung der Windeinwirkungen auf die Xylolkolonne in den Bestandsstatiken	291
Tabelle 58:	Lage der ausgewerteten DWD-Wetterstationen	293
Tabelle 59:	Ermittelte Basiswindgeschwindigkeiten an relevanten DWD-Wetter- stationen.....	295
Tabelle 60:	Windprofile zur Erfassung der Windwirkungen an der Raffinerie Heide	297
Tabelle 61:	Zusammenstellung der verwendeten Parameter zur Ermittlung der Windeinwirkungen auf die Xylolkolonne gemäß TRAS	298
Tabelle 62:	Vergleich der verwendeten Parameter der Windeinwirkung nach Bestandsstatik (links) und der TRAS (rechts)	299
Tabelle 63:	Vergleich der verwendeten Parameter der Windeinwirkung nach Bestandsstatik (links) und der TRAS (rechts)	300
Tabelle 64:	Ergebnis der Bauteilnachrechnung und Beurteilung der einzelnen Bauteile	307
Tabelle 65:	Ergebnisse der Untersuchungen mit verschiedenen Modellrohren und unterschiedlichen Geländekategorien.....	321
Tabelle 66:	Lage der ausgewerteten DWD-Wetterstationen	334
Tabelle 67:	Ermittelte charakteristische Werte s_k der Schneelast an den betrach- teten Klimastationen.....	336
Tabelle 68:	Bauteilabhängige Erhöhung der bemessungsrelevanten Beanspruch- ung und Gefahren durch Schneelasten für SLZ 2 und norddeutsches Tiefland	340
Tabelle 69:	Bauteilabhängige Erhöhung der bemessungsrelevanten Beanspruch- ung und Gefahren durch Schneelasten für SLZ 3.....	340
Tabelle 70:	Bauteilabhängige Erhöhung der bemessungsrelevanten Beanspruch- ung und Gefahren durch Eislasten.....	342
Tabelle 71:	Ergebnis der Bauteilnachrechnung und Beurteilung der einzelnen Bauteile für SLZ 3	348
Tabelle 72:	Ergebnis der Bauteilnachrechnung und Beurteilung der einzelnen Bauteile für SLZ 2 plus Regelung für das norddeutsche Tiefland.....	348
Tabelle 73:	Lastansätze für den Nachweis gegenüber Tornadoeinwirkungen	356

Tabelle 74:	Projektilegeschwindigkeiten eines Stahlrohrs als Modellkörper (10 kg, Durchmesser 10 cm).....	357
Tabelle 75:	Projektilegeschwindigkeiten und Penetrationstiefen bei einem Orkan sowie bei Tornados F2 bis F4 für einen Modellkörper	359

Abkürzungsverzeichnis

12. BIm-SchV	Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Störfall-Verordnung
AGAP	Alarm- und Gefahrenabwehrplan (insbesondere gemäß § 10 StörfallV)
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz – Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CC 2	Klasse für Schadensfolgen (eines Tragwerksversagens) nach DIN EN 1990 Anhang B mit dem Merkmal: Mittlere Folgen für Menschenleben, beeinträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen
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
cm	Zentimeter
d. h.	das heißt
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
DDR	Deutsche Demokratische Republik
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
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 Prüffingenieur oder einen Prüfsachverständigen für Bautechnik (Fremdüberwachung)
DSL 3	Überwachungsmaßnahmen bei der Planung (von Tragwerken) nach DIN EN 1990/NA Bauaufsichtliche Überwachung: Prüfung durch die Bauaufsicht oder durch einen Prüffingenieur für Bautechnik als hoheitlich beliehener Unternehmer
DWD	Deutscher Wetterdienst
F0, F1, F2, F3, F4, F5	Stärke eines Tornados gemäß der Fujita-Skala
ggf.	gegebenenfalls
GZM	Größte zusammenhängende Masse (vgl.: Abschlussbericht Schadensbegrenzung bei Dennoch Störfällen – Empfehlungen für Kriterien zur Abgrenzung von Dennoch-Störfällen und für Vorkehrungen zur Begrenzung ihrer Auswirkungen, Störfall-Kommission SFK-GS-26, Bonn 1999)
i. d. R.	In der Regel

IL 2	Überwachungsstufen für die Herstellung und Nutzung nach DIN EN 1990/NA Verstärkte Überwachung: Überwachung der Herstellung durch unabhängige Drittstelle, durch einen Prüfsachverständigen für Bautechnik (Fremdüberwachung)
IL 3	Überwachungsstufen für die Herstellung und Nutzung nach DIN EN 1990/NA Verstärkte und wiederholende Überwachung: Überwachung der Herstellung und Überwachung während der Nutzung durch die Bauaufsicht oder durch einen Prüfsachverständigen für Bautechnik als hoheitlich beliehener Unternehmer
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
ISO	International Organization for Standardization
KAS	Kommission für Anlagensicherheit
KAS-1	„Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) und sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches (SRB)“, Kommission für Anlagensicherheit, Bonn 2006
KFI	Beiwert für Einwirkungen zur Differenzierung der Zuverlässigkeit von Tragwerken gemäß DIN EN 1990 Anhang B
KFZ	Kraftfahrzeug
kg/m²	Kilogramm pro Quadratmeter
kg/m³	Kilogramm pro Kubikmeter
kN/m³	Kilonewton pro Kubikmeter
m	Meter
MSR-Einrichtungen	Mess-, Steuer- und Regeleinrichtungen
müNN	Meter über Normal-Null
o. a.	oben angegeben
o. g.	oben genannte(n)
RC2	Zuverlässigkeitsklasse für Tragwerke nach DIN EN 1990 Anhang B entsprechend der Schadensfolgeklasse CC 2
RC 3	Zuverlässigkeitsklasse für Tragwerke nach DIN EN 1990 Anhang B entsprechend der Schadensfolgeklasse CC 3
SRA	Sicherheitsrelevante Anlagenteile (vgl. KAS-1: Abschlussbericht – Arbeitskreis „Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) und sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches (SRB)“, KAS, Bonn 2006)
SRB	Sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches (vgl. KAS-1)
StörfallIV	Störfall-Verordnung – Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
TGL	Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen
TRAS	Technische Regel für Anlagensicherheit
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

vgl.	vergleiche
v_{max}	Maximale Geschwindigkeit
z. B.	zum Beispiel

Zusammenfassung:

Betreiber von Anlagen in Betriebsbereichen (Anlagen, die der Störfall-Verordnung (12.BImSchV) unterliegen) haben die erforderlichen Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen und zusätzlich vorbeugend Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen zu treffen. Hierbei sind umgebungsbedingte Gefahrenquellen zu berücksichtigen. Die Technische Regel für Anlagensicherheit (TRAS) 320 konkretisiert diese Betreiberpflichten in Bezug auf die umgebungsbedingten Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten. Aufgabe des Forschungsvorhabens war die Unterstützung der Erarbeitung dieser TRAS. Der erste Teil des Berichts ist die vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) bekannt gemachte TRAS 320. Im zweiten Teil des Berichts werden zu dieser Hinweise und Erläuterungen gegeben. Der dritte Teil enthält einen Forschungsbericht mit den wissenschaftlichen Grundlagen.

Im ersten Kapitel des Forschungsberichts wird erläutert, welche Gefahrenquellen sich aus Wind, Schnee- und Eislasten ergeben können. In drei entsprechenden Unterkapiteln erfolgt eine qualitative Darstellung der Formen von Wind, Schnee und Eis bevor auf quantitative Angaben hierzu und deren Umsetzung insbesondere in Form von Gefahrenkarten in Normen zur Standsicherheit eingegangen wird. Im vierten Unterkapitel wird auf Entstehung und Ausbreitung von windbedingten Projektilen eingegangen und ein Verfahren vorgeschlagen, mittels dessen die Gefahren für sicherheitsrelevante Anlagenteile abgeschätzt werden können. Im zweiten Kapitel wird der Wissensstand zum möglichen Einfluss des Klimawandels auf Wind-, Schnee- und Eislasten in Deutschland dargestellt. Im dritten Kapitel wird untersucht, ob ein „Klimaanpassungsfaktor“ in Anforderungen an statische Auslegungen sinnvoll ist, um diese Einflüsse zu berücksichtigen.

Die Grundlagen der Tragwerkssicherheit und –zuverlässigkeit werden im vierten Kapitel dargestellt. Hierzu werden die im Bauwesen verwendeten normativen Regelungen der DIN 1055-4 und DIN 1055-5 sowie die ab 2012 eingeführten Teile der DIN EN 1991-1 (kurz Eurocode 1) auf die speziellen Anforderungen bei der Sicherheit von Anlagen hin beleuchtet. Sie bilden derzeit mit der grundlegenden DIN EN 1990 die Basis für alle im Bauwesen verwendeten Sicherheitskonzepte für Baukonstruktionen. Es wird aufgezeigt, wie die Risikopotentiale, welche von Anlagen in Betriebsbereichen ausgehen, bei Sicherheitsnachweisen berücksichtigt werden können. Im fünften Kapitel wird erläutert, wie durch die grundsätzliche Einstufung von Anlagen in Betriebsbereichen in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 nach DIN EN 1990 ein Zusammenhang zwischen den Anforderungen der Normen und der Störfall-Verordnung hergestellt werden kann. Mittels höheren Teilsicherheitsbeiwerten der Einwirkungen werden die Risiken berücksichtigt, die von den in den Anlagen vorhandenen gefährlichen Stoffen ausgehen. Im sechsten Kapitel wird aufgezeigt, welche Nachrüstungsnotwendigkeiten sich ergeben können, welche Nachrüstmöglichkeiten bestehen können und welche Nachrüstpfllichten nach Störfall-Verordnung bestehen. Für das erste Thema erfolgt eine Zusammenfassung der Anforderungen der ab 1936 in Deutschland geltenden statischen Normen. Das siebte Kapitel enthält eine Abschätzung der möglichen finanziellen Folgen der TRAS bei zu errichtenden oder nachzurüstenden Anlagen. In zwei Anhängen wird berichtet, welche Erkenntnisse sich bei der probenhaften Anwendung des TRAS Entwurfes auf eine Destillationskolonne in Bezug auf Windeinwirkung und einen zylindrischen stehenden Tank in Bezug auf Schneelasten ergaben.

Summary:

Operators of installations in establishments, which are subject to the Major Accidents Ordinance (12.BImSchV), have to take the necessary measures to prevent major accidents and preventively additional measures to limit effects of such accidents. Environment-related hazards have to be regarded in that context. The Technical Rules for Plant Safety (TRAS) 320 concretizes this operator's obligations with respect to the environment-related sources of hazards wind, snow loads and ice loads. Task of the research project was to support the preparation of this TRAS. The first part of this report is the TRAS 320 as publicized by Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB). The second part of the report gives notes and explanations to the TRAS. The third part contains a research report with the scientific basis.

In the first chapter of the research report explains what hazards may arise from wind, snow and ice loads. In three corresponding subchapters a qualitative presentation of shapes of wind, snow and ice take place before quantitative information on this and their implementation in particular in the form of risk maps in standards for static design is presented. In the fourth subchapter the generation and spread of wind-related projectiles is discussed and a procedure to estimate the risks for safety-related parts of installations is proposed. In the second chapter the state of knowledge is presented on the potential influence of climate change on wind loads, snow loads and ice loads in Germany. The third chapter examines whether a "climate adaptation factor" in demand on static designs makes sense to take account of these influences.

The fundamentals of structural safety and reliability are presented in the fourth chapter. The normative regulations used in construction of DIN 1055-4, of DIN 1055-5 and of DIN EN 1991-1 (short Eurocode 1), force as from 2012, were examined related to the specific requirements for the safety of hazardous installations. These codes form, together with the basic DIN EN 1990, the basis for construction safety concepts for building structures. It is shown how the potential risks, which are caused by installations subject to the Major Accidents Ordinance, can be taken into account in safety cases. The fifth chapter explains how the general classification of installations in establishments in the reliability class RC3 according to DIN EN 1990 can be used as a link between the requirements of the standards and those of the Major Accidents Ordinance. By higher partial safety factors for impacts risks are considered originated by the hazardous substances present in installations. The sixth chapter shows that retrofitting needs may arise, which retrofitting options may exist and what are retrofitting obligations under the Major Accident Ordinance. For the first issue a summary was made of the requirements static standards in force in Germany from 1936. The seventh chapter contains an estimation of the potential financial consequences of TRAS for installations to be built or to be retrofitted. Two annexes include the lessons from an implementation test of the draft TRAS to a distillation containment due to wind loads and a cylindrical tank due to snow loads.

Résumé:

Les opérateurs d'installations en «établissements» (installations qui sont soumises à l'ordonnance sur les accidents majeurs (12.BImSchV) ont à prendre des mesures préventives nécessaires pour éviter accidents majeurs et des mesures préventives supplémentaires pour limiter les effets de ces accidents. Ce faisant, les sources de risques environnementales doivent être considérées. Les règles techniques pour la sécurité d'installations (TRAS) 320 concrétise ces obligations des opérateurs concernant les sources de risques environnementales charges de vent, neige et glace. L'objectif du projet de recherche était de soutenir l'élaboration de ce TRAS. La première partie de ce rapport correspond au TRAS 320, déjà publié par le ministère fédéral de l'environnement, de la protection de la nature, construction et de la sécurité nucléaire (BMUB). Dans la deuxième partie du rapport, renseignements et explications sur celle-ci sont données. La troisième partie contient un rapport de recherche avec les bases scientifiques.

Dans le premier chapitre du rapport de recherche, les sources de dangers qui peuvent résulter des charges de vent, neige et glace sont expliquées. Dans trois sous-chapitres correspondants, une représentation qualitative des formes de vent, neige et glace est présentée avant d'aborder données quantitatives sur ce sujet et leur mise en œuvre, en particulier sous la forme de cartes de risques, dans les normes pour la stabilité structural. Le quatrième sous-chapitre traite l'origine et propagation de projectiles générés par le vent et propose une procédure qui permet d'estimer des risques pour parties d'installations importants pour la sécurité. Dans le deuxième chapitre, l'état des connaissances sur le possible impact du changement climatique sur les charges de vent, neige et glace en Allemagne est présenté. Dans le troisième chapitre, il est analysé si un "facteur d'ajustement climatique" dans les exigences sur les dimensionnements statiques est approprié pour tenir compte de ces impacts.

Les principes fondamentaux de la sécurité et fiabilité structurales sont présentés dans le quatrième chapitre. À cette fin, les règlements normatifs employés en Génie Civil des normes DIN 1055-4 et DIN 1055-5 ainsi que de la norme DIN EN 1991-1 (court ECI), introduite à partir de 2012, sont détaillés en considérant les exigences particulières pour la sécurité d'installations. Ces normes constituent, avec la norme DIN EN 1990, la base de tous les concepts de sécurité utilisés en construction de structures. Il est montré, comment les risques potentiels, qui procèdent d'installations en «établissements», peuvent être pris en compte dans les calculs de sécurité. Dans le cinquième chapitre, il est expliqué comment au travers de la classification générale d'installations en «établissements» en la catégorie de fiabilité RC3 selon la norme DIN EN 1990, un lien entre les exigences des normes et celles de l'ordonnance sur les accidents majeurs peut être établi. Au moyen de coefficients partiels de sécurité plus élevés sur les actions sur les structures, les risques provenant de substances dangereuses présentes dans les installations sont considérés. Le chapitre sixième présente quels besoins de rééquipement sont nécessaires, quelles options de rééquipement existent et quelles obligations de rééquipement sont exigées en accord avec l'ordonnance sur les accidents majeurs. Concernant le premier sujet, un résumé des exigences des normes statiques en vigueur en Allemagne à partir de 1936 est présenté. Le septième chapitre contient une estimation des conséquences financières potentielles du TRAS pour installations à construire ou à rééquiper. En deux annexes, les conclusions tirées de l'application d'essai du TRAS à une colonne de distillation par rapport aux charges de vent et à un réservoir cylindrique par rapport aux charges de neige sont présentées.

I. Technische Regel für Anlagensicherheit: Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten (TRAS 320)

Bundesministerium

für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Bekanntmachung

einer sicherheitstechnischen Regel der Kommission für Anlagensicherheit

(TRAS 320 – Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten)

Vom 15. Juni 2015

Nachstehend wird eine von der Kommission für Anlagensicherheit erarbeitete sicherheitstechnische Regel „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten (TRAS 320)“ bekannt gegeben.

Der Text der sicherheitstechnischen Regel kann ebenfalls über das Internet unter der Adresse: www.kas-bmu.de/publikationen/tras/TRAS_320end.pdf abgerufen werden.

Bonn, den 15. Juni 2015

Bundesministerium

für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Im Auftrag

Arens

Inhaltsverzeichnis

Präambel

1. Grundlagen – Anforderungen der Störfall-Verordnung (StörfallV)
2. Anwendungsbereich
3. Begriffe
 - 3.1. Gefahrenquelle
 - 3.2. Umgebungsbedingte Gefahrenquellen
 - 3.3. Gefahrenquellenanalyse
 - 3.4. Analyse der Gefahren und Gefährdungen
 - 3.5. Wind
 - 3.5.1. Extremwind
 - 3.5.2. Windgeschwindigkeit
 - 3.5.3. Bö
 - 3.5.4. Windspitze
 - 3.5.5. Tornado
 - 3.6. Schneelast
 - 3.6.1. Außergewöhnliche Schneelast
 - 3.6.2. Extreme Schneelast
 - 3.7. Eislast
 - 3.8. Windbedingte Projektile
 - 3.9. Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs durch Wind sowie Schnee- und Eislasten
 - 3.10. Schutzkonzept
 - 3.11. Anlagenbezogene Schutzziele
 - 3.12. Störfalleintrittsvoraussetzung
4. Systematisierung und Aufbau der TRAS
5. Beschreibung der Gefahrenquellen
 - 5.1. Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten
 - 5.1.1. Gefahrenquellen durch Windlasten
 - 5.1.2. Gefahrenquellen durch Schwingungen
 - 5.1.3. Gefahrenquellen durch Schnee- und Eislasten
 - 5.2. Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile sowie Luftdruckänderungen und Druckschwankungen
 - 5.2.1. Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile
 - 5.2.2. Gefahrenquellen durch Luftdruckänderungen und Druckschwankungen
6. Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse
7. Detaillierte Gefahrenquellenanalyse

- 7.1. Statische und dynamische Lasten
 - 7.1.1. Bezug zu Normen und Zuverlässigkeitsklassen
 - 7.1.2. Windlasten
 - 7.1.3. Schnee- und Eislasten
- 7.2. Berücksichtigung des Klimawandels
- 7.3. Windbedingte Projektile
 - 7.3.1. Verlust von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen
 - 7.3.2. Beschädigung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen
- 8. Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile des Betriebs und der Anlagen
 - 8.1. Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten
 - 8.1.1. Windlasten
 - 8.1.2. Schnee- und Eislasten
 - 8.2. Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile: Ermittlung der gefährdeten Anlagen und Anlagenteile
- 9. Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen
- 10. Festlegung von anlagenbezogenen Schutzzielen
- 11. Erarbeitung von Schutzkonzepten
- 12. Prüfung der Schutzkonzepte
- 13. Ermittlung von Szenarien entsprechend § 3 Absatz 3 StörfallV („Dennoch-Störfälle“) und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung
- 14. Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen
- 15. Planung für Notfälle, Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung
 - 15.1. Planung für Notfälle
 - 15.2. Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen
 - 15.3. Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung
- 16. Dokumentation
- 17. Erfüllung von weiteren Pflichten der StörfallV
 - 17.1. Anforderungen an die Instandhaltung
 - 17.2. Informationen und Schulungen der Beschäftigten
 - 17.3. Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall

Präambel

Die Technischen Regeln für Anlagensicherheit (TRAS) enthalten dem Stand der Sicherheitstechnik im Sinne des § 2 Nummer 5 der Störfall-Verordnung (12. BImSchV) entsprechende sicherheitstechnische Regeln und Erkenntnisse. Betriebs- und Beschaffenheitsanforderungen, die aus anderen Regelwerken zur Erfüllung anderer Schutzziele resultieren, bleiben unberührt.

Die TRAS werden gemäß § 51a des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) von der Kommission für Anlagensicherheit (KAS) unter Berücksichtigung der für andere Schutzziele vorhandenen Regeln erarbeitet und, soweit erforderlich, dem Stand der Sicherheitstechnik angepasst. Sie werden dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) vorgeschlagen und können von ihm nach Anhörung der für die Anlagensicherheit zuständigen obersten Landesbehörden im Bundesanzeiger veröffentlicht werden und es kann in Rechts- oder Verwaltungsvorschriften darauf Bezug genommen werden.

1 Grundlagen – Anforderungen der Störfall-Verordnung (StörfallV)

In dieser TRAS werden die umgebungsbedingten Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten betrachtet.

Bauliche Anlagen werden grundsätzlich entsprechend DIN EN 1991-I-4 (Dezember 2010, früher DIN 1055-4) gegen Windlasten und entsprechend DIN EN 1991-I-3 (Dezember 2010) gegen Schneelasten (früher entsprechend DIN 1055-5 (Juli 2005) gegen Schnee- und Eislasten) ausgelegt. Sicherheitsrelevante technische Anlagen, wie sie der Störfallverordnung unterliegen, sind in den o. g. Normen nicht explizit genannt. Diese haben auf Grund der in ihnen vorhandenen gefährlichen Stoffe ein erhöhtes Gefahrenpotenzial. Es sind daher besondere Betrachtungen, Vorkehrungen und Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit nötig. Für diese Anlagen, einschließlich Tragwerken und Einhausungen, ist daher auch eine besondere Auslegung hinsichtlich statischer und dynamischer Lasten erforderlich. Beides ist Gegenstand dieser TRAS.

Nach § 3 Absatz 1 der Störfall-Verordnung (StörfallV) hat der Betreiber eines Betriebsbereichs im Geltungsbereich dieser Verordnung die nach Art und Ausmaß der möglichen Gefahren erforderlichen Vorkehrungen zu treffen, um Störfälle zu verhindern. Bei der Erfüllung dieser Pflicht sind gemäß § 3 Absatz 2 StörfallV auch umgebungsbedingte Gefahrenquellen zu berücksichtigen, es sei denn, dass diese Gefahrenquellen als Störfallursachen vernünftigerweise ausgeschlossen werden können.

Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen können zu „Dennoch-Störfällen“ führen, deren Eintreten zwar nicht zu verhindern ist, gegen deren Auswirkungen jedoch unabhängig von den störfallverhindernden Vorkehrungen nach § 3 Absatz 1 StörfallV zusätzlich vorbeugend Maßnahmen zu treffen sind, um diese so gering wie möglich zu halten (§ 3 Absatz 3 StörfallV).

Solche Gefahrenquellen können z. B. sein:

1. das Versagen von Vorkehrungen nach § 3 Absatz 1 StörfallV,
2. Wind sowie Schnee- und Eislasten oberhalb einer vernünftigerweise zu unterstellenden Intensität oder Jährlichkeit (vgl. Abschnitt I3).

Dies bedeutet, dass insbesondere im Falle der Gefahr einer Stofffreisetzung oder der Gefahr der Störung von störfallverhindernden Einrichtungen aufgrund vernünftigerweise auszuschließender Gefahrenquellen zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen sind, um schädliche Auswirkungen auf Menschen, Umwelt und Sachgüter so gering wie möglich zu halten.

Als umgebungsbedingte Gefahrenquellen gemäß § 3 StörfallV können Wind sowie Schnee- und Eislasten auf Anlagen, die der Störfall-Verordnung unterliegen, oder auf sicherheitsrelevante Anlagenteile sowie bauliche Anlagenteile, in denen sich diese befinden, wirken. Weiter können unbefestigte oder unzureichend befestigte Gegenstände oder Anlagenteile mit dem Wind fortgetragen werden oder auftreffen und hierdurch sicherheitsrelevante Anlagen oder Anlagenteile gefähr-

den. Starke, lokale Luftdruckschwankungen und Druckschwankungen ausgelöst durch Sog oder Druck infolge der Wirkung von Böen auf Auslässe, können Stoffströme in Anlagen auslösen bzw. verändern. Für das Ausmaß der jeweiligen Gefährdung und die zu treffenden Maßnahmen gibt diese TRAS Hinweise.

Bezüglich der naturbedingten Gefahrenquellen, wie Wind sowie Schnee- und Eislasten, hat sich der allgemeine Kenntnisstand vor dem Hintergrund des Klimawandels weiterentwickelt. Allerdings lassen die meteorologischen Daten zu Veränderungen der Windgeschwindigkeiten, Schnee- und Eislasten in Deutschland bisher keinen klaren Trend erkennen. Modellrechnungen lassen zwar für Winter- und Gewitterstürme eine Zunahme der Schäden in der Zukunft durch den Klimawandel vermuten, erlauben aber keinen gesicherten Rückschluss auf eine anzunehmende Zunahme von Windgeschwindigkeiten und Windspitzen, Schnee- und Eislasten infolge des Klimawandels.

Bezüglich des Auftretens von Tornados in Deutschland liegen Beobachtungen seit dem neunten Jahrhundert und flächendeckend für die alten Bundesländer seit 1950 vor. Die genaue Zahl und jeweilige Intensität ist jedoch nur eingeschränkt bekannt; eine Tornado-Gefahrenkarte liegt für Deutschland nicht vor.

Aus den oben angeführten Gründen werden in dieser TRAS für die Gefahrenquellen Wind (einschließlich Tornado), Schnee- und Eislasten keine Vorschläge zur Berücksichtigung des Klimawandels in Form eines Klimaänderungsfaktors analog zur TRAS 310 gemacht.

Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) weist darauf hin, dass bei Betriebsbereichen, in denen gefährliche Stoffe in höheren Mengen vorhanden sind und bei Extremereignissen freigesetzt werden könnten, die bisherigen Sicherheitsanforderungen und das Sicherheitsmanagement entsprechend des Fortschritts beim sicherheitstechnischen Kenntnisstand sowie der Erkenntnisse bei der Beurteilung der Gefahren gemäß StörfallV zu überprüfen und ggf. anzupassen sind.¹

Betreiber von Betriebsbereichen haben Änderungen von Gefahrenkarten (Windkarte nach DIN EN 1991-1-4/NA², Böenkarten des DWD³, Schneelastkarte nach DIN EN 1991-1-3/NA⁴ sowie Eislastkarte nach DIN 1055-5⁵) zu beachten. Ergeben sich hieraus neue Erkenntnisse bezüglich Einwirkungen durch Wind, Schnee- und Eislasten, so sind diese im Rahmen der Aktualisierung von Konzepten zur Verhinderung von Störfällen (§ 8 Absatz 3 StörfallV) und Sicherheitsberichten (§ 9 Absatz 5 StörfallV) zu beachten.

Hinsichtlich der Beschaffung von Informationen über Gefährdungen durch umgebungsbedingte Gefahrenquellen besteht⁶ für die Betreiber von Betriebsbereichen eine Informationssammlungspflicht, also eine Pflicht zur Zusammenstellung andernorts oder beim Betreiber bereits vorhandener Informationen. Informationsermittlungspflichten bestehen eingeschränkt im Bereich der „erweiterten“ Pflichten (§§ 9 bis 12 StörfallV). Wesentliche Informationsquellen sind in dieser TRAS sowie den Hinweisen und Erläuterungen⁷ hierzu aufgeführt.

Am Verhältnismäßigkeitsmaßstab gemessen, hat der Betreiber folgende Informationsquellen im Rahmen einer Sammlung und Auswertung, aber auch im Rahmen einer (räumlichen) Konkretisierung auf den Betriebsbereich bzw. das Anlagengrundstück zu berücksichtigen:

- I. betreiberseitig bereits vorhandene Informationen,

¹ Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel der Bundesregierung vom 17. Dezember 2008, <http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php>

² DIN EN 1991-1-4/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten (Dezember 2010)

³ Augter Gisela, Roos Marita: Berechnung von Sturmintensitäten für Deutschland; Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 236, Offenbach am Main 2011

⁴ DIN EN 1991-1-3/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten (Dezember 2010)

⁵ DIN 1055-5: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten (Juli 2005)

⁶ Schulte, M.; Kloos, J.: Abgrenzung der Behördenpflichten gegen Betreiberpflichten gemäß Bundes-Immissionsschutzgesetz und Störfall-Verordnung in Bezug auf umgebungsbedingte Gefahrenquellen, Dresden 2010 (siehe www.kas-bmu.de)

⁷ siehe: http://www.kas-bmu.de/publikationen/tras_pub.htm

2. behördlich bekannte Informationen und
3. allgemein öffentlich bekannte Informationen.

Die Sammlungs- und Ermittlungspflichten schließen Informationen über die möglichen Folgen des Klimawandels ein; diese hat der Betreiber im Rahmen der ihn nach § 3 Absatz 1 StörfallV betreffenden Pflichten zu beachten.

2 Anwendungsbereich

Die TRAS gilt für Betriebsbereiche gemäß § 3 Absatz 5a BImSchG, die in den Anwendungsbereich der StörfallV fallen. Ihre Anforderungen gelten insbesondere für bauliche Anlagen, einschließlich Gebäude und Tragwerke, deren Versagen zu einem Störfall führen könnte. Es wird empfohlen, diese TRAS aber auch auf andere immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen anzuwenden, falls eine vergleichbare Gefahr der Freisetzung von gefährlichen, einschließlich umweltgefährdenden Stoffen⁸ besteht⁹. Auch hier sind bauliche Anlagen und deren Tragwerke entsprechend mit zu betrachten.

Da Baurecht und Immissionsschutzrecht unabhängig voneinander gelten, sind ggf. weitergehende baurechtliche Anforderungen zu beachten.

Diese TRAS richtet sich insbesondere an

1. Betreiber,
2. Behörden und
3. Gutachter/Sachverständige,

die Vorkehrungen gegen durch Wind, Schnee- und Eislasten ausgelöste umgebungsbedingte Gefahrenquellen für Betriebe zu treffen, anzuordnen oder zu beurteilen haben.

Diese TRAS gilt für Gefahrenquellen, die aus

1. Wind, einschließlich Böen, Windspitzen, winderregten Schwingungen und Tornados,
2. Entstehung windbedingter Projektile sowie Einwirkung von bodennahen und luftgetragenen Projektilen sowie
3. Schneelasten und
4. Eislasten

resultieren. Es wird darauf hingewiesen, dass Kälte über Schnee- und Eislasten hinaus weitere Gefahrenquellen auslösen kann, wie z. B. Einfrieren von Stoffen in Rohrleitungen und Sicherheitsventilen, Versagen von MSR-Einrichtungen usw. Diese Gefahrenquellen sind nicht Gegenstand dieser TRAS.

Aus den in Abschnitt I genannten Gründen werden Tornados in dieser TRAS zwar als Gefahrenquelle beschrieben, es können jedoch keine Vorgaben für Schutzziele und Schutzkonzepte gemacht werden. Tornados sollen jedoch bei der Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“ (Abschnitt 13) und Bestimmung auswirkungsbegrenzender Maßnahmen mit berücksichtigt werden.

Mit Extremwindereignissen stehen häufig auch die Gefahrenquellen Niederschlag und Hochwasser in direktem Zusammenhang. Diese Gefahrenquellen sind ebenfalls von Betreibern gemäß § 3 Absatz 3 StörfallV zu beachten. Hierfür ist die TRAS 310 heranzuziehen.

⁸ Analog zu Stoffen im Sinne von § 2 StörfallV

⁹ Nachfolgend wird von „Betriebsbereich“ gesprochen, wenn Anforderungen aufgrund der StörfallV nur für solche gelten. Ansonsten wird „Betrieb“ verwendet, wenn Anforderungen für Betriebsbereiche anzuwenden sind und die Anwendung für genehmigungsbedürftige Anlagen empfohlen wird.

3 Begriffe¹⁰

Die nachfolgenden Begriffe sind bei der Anwendung dieser TRAS besonders zu beachten. Hinweise zur Definition weiterer in dieser TRAS genutzter Begriffe können den „Hinweisen und Erläuterungen“ zu dieser TRAS, der Vollzugshilfe des BMUB zur Störfall-Verordnung und den Leitfäden der Kommission für Anlagensicherheit entnommen werden.

3.1 Gefahrenquelle

Eine Gefahrenquelle (Gefahrenursache) ist der Ursprung einer Gefahr, aus der sich destruktive Wirkungen entwickeln können. Bei der Betrachtung der betrieblichen Gefahrenquellen sind hypothetisch mögliche Zustände und Ereignisse, wie z. B. das Versagen von Anlagenteilen, die zu einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs und damit zu einer Gefahr führen können, relevant. Eine Gefahrenquelle ist mit dem Begriff „mögliche Gefahrenursache“ gleichzusetzen. Sie führt nicht zwingend zu einer Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs (siehe Abschnitt 3.9) oder Störfällen.

3.2 Umgebungsbedingte Gefahrenquellen

Umgebungsbedingte Gefahrenquellen sind Einflüsse, die von außen auf einen Betrieb einwirken und zu einer Beeinträchtigung der Funktion sicherheitsrelevanter Teile einer Anlage (SRA) oder eines Betriebsbereichs (SRB)¹¹ führen können.

3.3 Gefahrenquellenanalyse

Die Gefahrenquellenanalyse im Sinne dieser TRAS ist der erste Schritt, um in einem umfassenden Prozess Gefahrenquellen und deren Ursache zu erkennen. Die Gefahrenquellenanalyse ermittelt Gefahrenquellen, ohne eine Bewertung oder Beurteilung vorzunehmen. Im Rahmen dieser TRAS werden durch die Gefahrenquellenanalyse umgebungsbedingte Gefahrenquellen betrachtet, um festzustellen, ob und wie sie auf einen Betrieb einwirken können.

3.4 Analyse der Gefahren und Gefährdungen

Bei der Analyse der Gefahren und Gefährdungen im Sinne dieser TRAS werden die Wirkungen umgebungsbedingter Gefahrenquellen auf einen Betrieb untersucht. Es werden die sicherheitsrelevanten Anlagenteile identifiziert und die Störfalleintrittsvoraussetzungen ermittelt.

3.5 Wind

Für diese TRAS werden die verschiedenen Windarten in folgende zwei Kategorien eingeteilt:

1. Windereignisse, die von einem Beobachter auf dem Boden als geradlinige Luftbewegungen wahrgenommen werden. Dazu zählen die synoptischen Stürme (Tiefdruckstürme), Gewitterstürme sowie Schwerkraftwinde. Sie werden im Folgenden unter der Bezeichnung Stürme zusammengefasst.
2. Tornados, d. h. ein auf engem Raum rotierender Luftwirbel mit Kontakt zur Erdoberfläche. Tornados weisen hohe Tangential- und geringere Translationsgeschwindigkeit auf. Sie sind mit Druckschwankungen und auch mit vertikaler Beschleunigung verbunden.

In Tabelle I sind die verschiedenen Windphänomene mit ihren charakteristischen Merkmalen zusammengefasst. Die Windphänomene unterscheiden sich nicht nur durch die Geschwindigkeiten der Windspitzen, sondern auch durch die betroffene Fläche und Dauer. Der Tiefdrucksturm verfügt über die höchste Ausdehnung und Dauer, während Tornados nur eine relativ kleine Fläche treffen und von relativ kurzer Dauer sind.

Ausgehend von den Windphänomenen nach Tabelle I werden in der DIN EN 1991-1-4 die verschiedenen Einwirkungen auf Anlagen oder Anlagenteile, wie z. B. Einhausungen, berücksichtigt. Bei dem als Grundlage verwendeten Modell

¹⁰ Vgl. Wetterlexikon des DWD

¹¹ Vgl. Kommission für Anlagensicherheit: Abschlussbericht Arbeitskreis „Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) und sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereichs (SRB)“ (KAS-I), Bonn 2006 <http://www.kas-bmu.de/publikationen/kas/KASI.pdf>

wird von einer horizontalen Luftströmung ausgegangen. Der Tornado der Klasse F1 (vgl. Tabelle 2) ist nicht Gegenstand der DIN EN 1991-1-4, da er eine andere Aerodynamik hat, als die anderen genannten Windtypen (siehe unten). Gleichwohl liegt er mit maximal 183 km/h noch im Rahmen der Geschwindigkeiten von Tiefdruckstürmen, sodass die von ihm ausgehenden, horizontalen Winddrücke indirekt von der DIN EN 1991-1-4 abgedeckt werden.

Tabelle 1: Charakterisierung verschiedener Windphänomene

Phänomen	Geschwindigkeit	Breite	Entstehung
Wasserhosen (Kleintrombe)	50 bis 100 km/h*	einige Meter	durch bodennahe Warmluft; meist nur über ausgedehnten Wasserflächen
Gewittersturm	70 bis 110 km/h	mehrere km	Durch Dichteunterschiede von Luftschichten
Föhnsturm (Fallwinde – Lokalwindssysteme)	bis 130 km/h		
in bestimmten Alpentälern bis 150 km/h	mehrere km	durch warmen und trockenen Fallwind an Berghängen	
Tiefdrucksturm	bis 180 km/h	1 000 bis 2 000 km	durch Druckunterschiede aufeinander treffender Luftmassen
Tornado (Großtrombe)	Fujitaklasse F1: bis 183 km/h*	F1: 20 bis 100 m	durch Aufeinandertreffen von trockenkalter und feucht-warmer Luft sowie Ausbildung einer rotierenden und aufwärtsgerichteten Luftsäule

* Tangentialgeschwindigkeit

3.5.1 Extremwind

Wind extremer Stärke, oberhalb von 118 km/h, wie er bei bestimmten Extremwetterereignissen auftreten kann¹².

3.5.2 Windgeschwindigkeit

Die Windgeschwindigkeit wird durch Messgeräte ermittelt und als Mittel über zehn Minuten angegeben. Bei einer Schätzung spricht man von Windstärke nach Beaufort.

3.5.3 Bö

Als eine Bö bezeichnet man im Allgemeinen einen kräftigen Windstoß, der oft mit einer plötzlichen Windrichtungsänderung verbunden ist. Gemäß Definition spricht man von einer Bö, wenn der gemessene 10-Minuten-Mittelwert der Windgeschwindigkeit innerhalb weniger Sekunden (höchstens zwanzig, mindestens drei Sekunden anhaltend) um mindestens 5,0 m/s überschritten wird.

3.5.4 Windspitze

Als Windspitze wird die größte, innerhalb eines bestimmten Zeitraums in Böen gemessene Windgeschwindigkeit bezeichnet.

¹² Vgl. Online-Lexikon der Geographie: <http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/geogr/7603>

3.5.5 Tornado

Ein Tornado ist eine Luftsäule mit Bodenkontakt, die um eine mehr oder weniger senkrecht orientierte Achse rotiert und sich unter einer sogenannten Cumulonimbus-Wolke befindet. Diese Wolkenform ist als Gewitterwolke bekannt und erstreckt sich über einige Kilometer in die Höhe.

Ein Tornado kann entstehen, wenn zwischen Luftschichten starke Temperaturunterschiede herrschen, die Luft aufsteigt bzw. gehoben wird und der darin enthaltene Wasserdampf zu Tropfen kondensiert (Bildung der Gewitterwolke). Durch die dabei frei werdende Kondensationswärme und zusätzlich eine starke vertikale Windscherung (Zunahme der radialen Windgeschwindigkeit und ggf. zusätzlich Änderung der Windrichtung mit der Höhe) wird ein rotierender Aufwindschlauch erzeugt. Dieser kann einen Durchmesser bis über einen Kilometer erreichen, wobei Windgeschwindigkeiten von mehreren Hundert Kilometern pro Stunde auftreten können. Ein Tornado verwüstet längs seiner Zugbahn einen Streifen von einigen Hundert Metern Breite (Asgardsweg).

Für den Begriff „Tornado“ existieren auch andere Bezeichnungen: „Großtrombe“, „Windhose“ (Tornado über Land), „Wasserhose“ (Tornado über Meer oder großen Binnenseen).

Eine Klassifizierung von Tornados erfolgt u. a. durch die Fujita-Skala, die in Tabelle 2 wiedergegeben ist. Weil die in der Tabelle 2 angegebenen Windgeschwindigkeiten häufig nicht bestimmt werden können, werden Tornados oft nach dem Schaden an der Bausubstanz eingestuft.

Tabelle 2: Fujita-Skala mit Einteilung nach typischen Schäden

Fujita-Skala	Stärkeeinstufung	Geschwindigkeit in m/s für v _{max}	Geschwindigkeit in km/h für v _{max}	Typischer Schaden
F0	Schwach (= Beaufort 8)	17,5 bis 32,5	63 bis 117	Leichte Gegenstände werden umhergewirbelt, einzelne Dachziegel und Äste werden herabgerissen
F1	schwach	32,8 bis 50,8	118 bis 183	Dächer werden teilweise abgedeckt, Wohnwagen und Anhänger werden umgeworfen, starke Äste werden abgebrochen, einzelne Bäume entwurzelt
F2	stark	51,1 bis 70,5	184 bis 254	Ganze Dächer werden abgedeckt, schwere Schäden an Leichtbauten, größere Schäden an Fahrzeugen, stabile Bäume werden umgeworfen bzw. gebrochen
F3	stark	70,8 bis 92,8	255 bis 334	Leichtbauten werden überwiegend zerstört, Einsturz einzelner Gebäude, schwere KFZ werden umgeworfen, schwerste Schäden an Holzgewächsen mit weitgehender Entastung
F4	verheerend	93 bis 117	335 bis 421	Schwere Schäden an Massivbauten, verbreiteter Einsturz von Gebäuden, KFZ werden über weite Strecken geschleudert, Entzündung von Baumstämmen durch umherfliegende Objekte

Fujita-Skala	Stärkeein- stufung	Geschwin- digkeit in m/s für vmax	Geschwin- digkeit in km/h für vmax	Typischer Schaden
F5	verhee- rend	> 117	> 421	Überwiegend Totalschäden an Massivbau- ten, unvorstellbare Schäden, schwere Ge- genstände wie KFZ fliegen hunderte Meter durch die Luft, totale Entrindung von ste- hengebliebenen Baumstämmen, Wurzelstö- cke abgesägter Bäume werden aus dem Boden gerissen

Auf der Fläche Deutschlands treten durchschnittlich etwa vier Tornados pro Jahr mit einer Intensität von mehr als F1 (schwach) auf. Es handelt sich um lokal begrenzte Ereignisse, die Flächen von einigen km² erfassen.

3.6 Schneelast

Die Schneelast gehört zu den klimatisch bedingten veränderlichen Einwirkungen auf Anlagen und Anlagenteile. Sie hängt von der geografischen Lage und von der Form des betrachteten Objektes ab. Je nach Beschaffenheit und Alter kann bei Schnee, von Wichten zwischen 1,0 kN/m³ und 5,0 kN/m³ ausgegangen werden. In den einschlägigen Normen¹³ werden die Schneelasten in Rechenwerte zur Ermittlung der Tragwerkssicherheit überführt. Die dort genannten Rechenwerte entsprechen der 98 %-Fraktile der Jahresmaxima und somit einer mittleren Wiederkehrperiode von 50 Jahren.

3.6.1 Außergewöhnliche Schneelast

Als „außergewöhnliche Schneelast“ wird eine außergewöhnliche Einwirkung gemäß DIN EN 1990 (Dezember 2010) Teil 1.5.3.5 durch Schneelasten bezeichnet. Bei der Tragwerksplanung dürfen daher für Einwirkungen durch außergewöhnliche Schneelasten im Rahmen einer außergewöhnlichen Einwirkungskombination die zugehörigen Teilsicherheitsbeiwerte reduziert und Kombinationsbeiwerte anderer Lastfälle reduziert berücksichtigt werden. Bei Einwirkung außergewöhnlicher Schneelasten muss weiterhin ein Tragwerksversagen ausgeschlossen werden; lokale Tragwerksschädigungen (etwa durch plastische Verformung) sind jedoch zulässig. Nach der Einwirkung einer außergewöhnlichen Schneelast ist daher vor dem Weiterbetrieb einer Anlage eine Überprüfung der Integrität des Tragwerks erforderlich.

3.6.2 Extreme Schneelast

Als „extreme Schneelast“ wird die höchste, regional vorhandenen Aufzeichnungen zu entnehmende Schneelast an einem Standort bezeichnet.

3.7 Eislast

Als Eislast bezeichnet man die durch gefrierenden Regen oder Raueis, d. h. aus unterkühlten Nebelwassertropfen an Oberflächen gebildetes Eis, an Anlagenteilen entstehenden zusätzlichen statischen (Gewicht) und dynamischen (Luftwiderstand) Belastungen. Besonders gefährdet sind Anlagenteile in Mittelgebirgslagen durch Nebelfrostablagerungen. Dieser Eisansatz wird durch starken Wind und einen hohen Gehalt flüssigen Wassers im Wolkennebel sehr begünstigt. Im Flachland hingegen tritt Eisansatz in der Regel mit gefrierendem Regen auf. Eislasten treten daher nicht nur auf horizontalen Flächen auf, können in Kombination mit Windlasten einwirken und dabei Schwingungen verursachen.

3.8 Windbedingte Projektile

In dieser TRAS wird von „windbedingten Projektilen“ bzw. von einem „windbedingten Projektilaufprall“ gesprochen. Werden Anlagenteile oder Gegenstände vom Wind abgelöst oder angehoben und durch die Luft getragen, wird von „luftgetragenen Projektilen“ gesprochen. Werden Gegenstände durch Wind am Boden versetzt oder gerollt, so wird von

¹³ DIN EN 1991-1-3 und DIN EN 1991-1-3/NA

„bodennahen Projektilen“ gesprochen. Umstürzende Anlagenteile, Bäume etc. gehören zu den sonstigen „windbedingten Projektilen“.

3.9 Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs durch Wind sowie Schnee- und Eislasten

Soweit durch Eintritt vernünftigerweise nicht auszuschließender Böen, Windspitzen, Schnee- und Eislasten sowie sekundären Gefahrenquellen, wie windbedingten Projektilen, Druckschwankungen oder Schwingungen die Auslegung sicherheitsrelevanter Anlagenteile¹⁴ überschritten wird, ist eine Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs gegeben. Eine derartige Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs liegt insbesondere in folgenden Fällen vor:

1. Die Standsicherheit und/oder Integrität sicherheitsrelevanter Teile von Betrieben und Anlagen mit besonderem Stoffinhalt ist unmittelbar gefährdet.
2. Die Funktion von sicherheitsrelevanten Teilen von Betrieben und Anlagen ist gefährdet.
3. Sicherheitsrelevante Bedienvorgänge oder Arbeitsabläufe können, z. B. wegen Einschränkungen in der Erreichbarkeit von Teilen von Betrieben und Anlagen, nicht oder nur unter erschwerten Bedingungen durchgeführt werden.

3.10 Schutzkonzept

Ein Schutzkonzept im Sinne dieser TRAS beinhaltet die Entwicklung von geeigneten Vorkehrungen zur Verhinderung und Maßnahmen zur Auswirkungsbegrenzung von Störfällen aufgrund des Wirksamwerdens umgebungsbedingter Gefahrenquellen.

3.11 Anlagenbezogene Schutzziele

Anlagenbezogene Schutzziele im Sinne dieser TRAS konkretisieren die rechtlichen Schutzziele bezogen auf Betriebe, um die menschliche Gesundheit, die Umwelt sowie Sachgüter vor nachteiligen Folgen einer Freisetzung, eines Brandes oder einer Explosion unter Beteiligung von gefährlichen Stoffen infolge des Wirksamwerdens einer umgebungsbedingten Gefahrenquelle zu bewahren. Soweit Anlagen immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig sind, muss gemäß § 5 Absatz I BImSchG gewährleistet werden, dass

1. schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft nicht hervorgerufen werden können;
2. Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen getroffen wird, insbesondere durch die dem Stand der Technik entsprechenden Maßnahmen.

Für Betriebsbereiche muss gewährleistet werden, dass Beschaffenheit und Betrieb der Anlagen des Betriebsbereichs dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen.

3.12 Störfalleintrittsvoraussetzung

Als Störfalleintrittsvoraussetzung wird der Moment/Zustand in der Ereigniskette nach Beginn einer Störung verstanden, bei dem die Voraussetzungen für das Vorliegen eines Störfalls gegeben sind. Beispielsweise sind Schnee- und Eislasten auf einem Behälter mit gefährlichen Stoffen, die dessen Auslegung überschreiten, im Sinne dieser TRAS in der Regel noch als Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs anzusehen, solange nicht die Gefahr z. B. einer Stofffreisetzung gegeben ist. Eine Störfalleintrittsvoraussetzung liegt erst dann vor, wenn die (zunehmende) Schnee- oder Eislast die Auslegung des Behälters oder die Statik der Konstruktion des Behälters soweit überschreitet, dass dies zu einer ernststen Gefahr oder zu Sachschäden nach Anhang VI Teil I Abschnitt I Nummer 4 StörfallV führen kann.

¹⁴ Siehe: Kommission für Anlagensicherheit: Abschlussbericht Arbeitskreis „Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) und sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches (SRB)“ (KAS-I), Bonn 2006 <http://www.kas-bmu.de/publikationen/kas/KASI.pdf>

4 Systematisierung und Aufbau der TRAS

Die Erfüllung der Betreiberpflichten im Sinne der Störfall-Verordnung hinsichtlich der in dieser TRAS betrachteten Gefahrenquellen kann mit den vier Schritten erreicht werden:

1. Gefahrenquellenanalyse,in der geprüft wird, welche Gefahrenquellen auf den Betrieb einwirken können,
2. Analyse der Gefahren und Gefährdungen,in der geprüft wird, ob durch Einwirkungen auf sicherheitsrelevante Anlagenteile Störfälle eintreten können,
3. Erstellung eines Schutzkonzepts,in dem Vorkehrungen zur Störfallverhinderung festgelegt werden,
4. Betrachtung von „Dennoch-Störfällen“,durch die insbesondere Maßnahmen zur Begrenzung der Auswirkungen von Störfällen festgelegt werden.

Ausgangspunkt der systematischen Vorgehensweise (vgl. Abbildung I) ist eine Gefahrenquellenanalyse, in der die möglichen Gefahrenquellen ermittelt werden. In der vereinfachten Gefahrenquellenanalyse werden zunächst nur qualitativ die regional möglichen (vernünftigerweise nicht auszuschließenden) Ereignisse am Standort (u. a. Betriebsbereich) identifiziert. In der detaillierten Gefahrenquellenanalyse werden quantitative Informationen herangezogen, um die möglichen Gefahrenquellen genauer zu ermitteln.

Im nächsten Schritt sind die gefährdeten, sicherheitsrelevanten Betriebs- und Anlagenteile zu identifizieren.

Abhängig von der Sicherheitsrelevanz und den möglichen Störfallauswirkungen, sind anlagenbezogene Schutzziele festzulegen und ein Schutzkonzept zu erarbeiten, mit dem diese Schutzziele erreicht werden. Danach ist das Schutzkonzept bezüglich seiner Wirksamkeit zu prüfen und zu dokumentieren. Ggf. ist das Schutzkonzept weiter anzupassen.

Anschließend werden vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen („Dennoch-Störfälle“) untersucht, deren Eintreten zwar nicht zu verhindern ist, deren Auswirkungen jedoch unabhängig von den störfallverhindernden Vorkehrungen nach § 3 Absatz 1 StörfallV durch zusätzliche störfallauswirkungsbegrenzende Maßnahmen so gering wie möglich zu halten sind (§ 3 Absatz 3 StörfallV). Die Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen sind in das Schutzkonzept aufzunehmen.

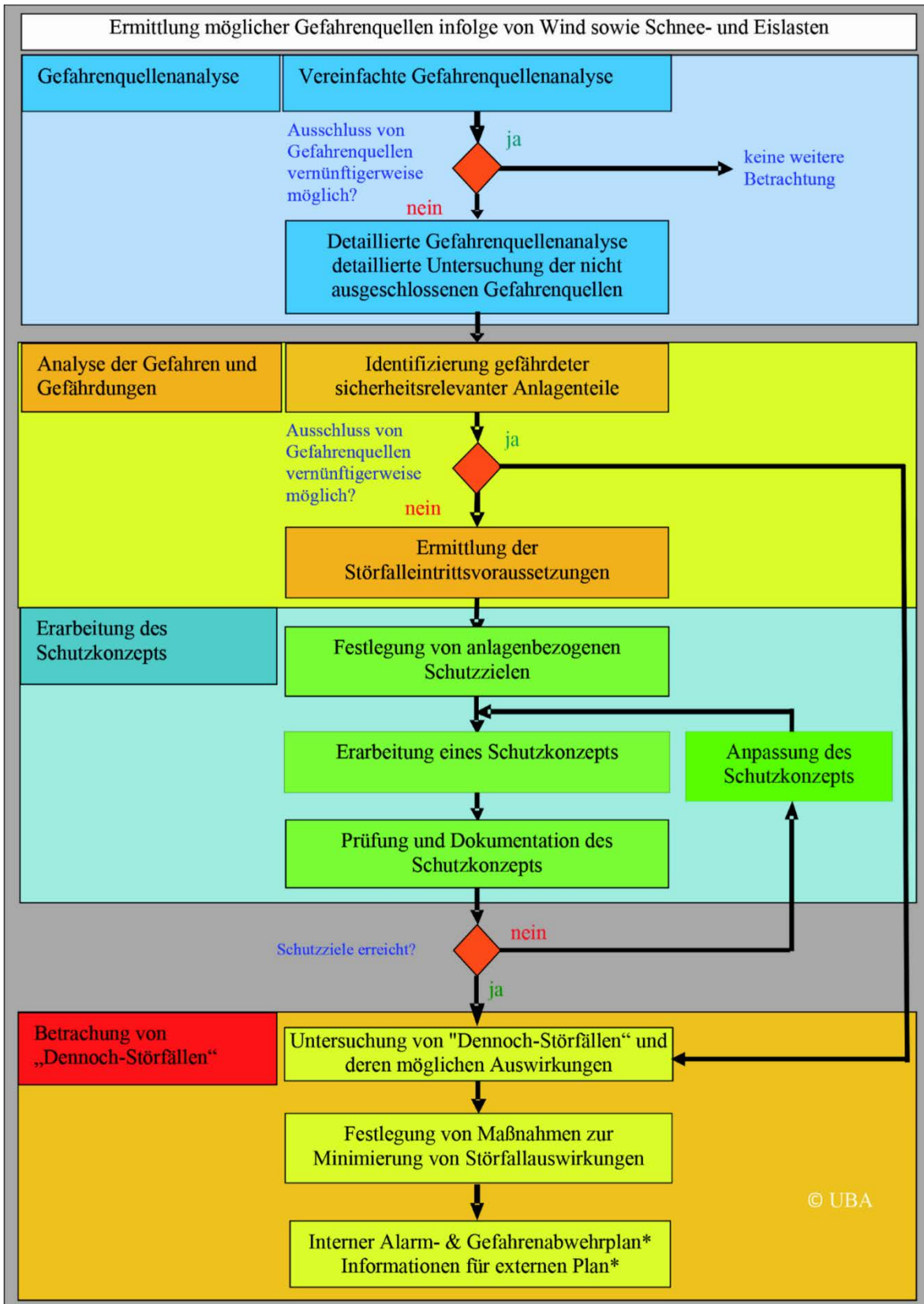
Bei verbleibenden, nicht akzeptablen Risiken, insbesondere durch unzureichende Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen, sind weitergehende Vorkehrungen und Maßnahmen zu entwickeln, um diese Risiken auf ein akzeptiertes Maß zu vermindern.

Obenstehendes gilt nicht für Gefahrenquellen, die so unwahrscheinlich sind, dass sie jenseits der Erfahrung und Berechenbarkeit liegen. Gegen diese exzeptionellen Störfälle sind keine anlagenbezogenen Vorkehrungen und Maßnahmen zu treffen.

Bei der Planung für Notfälle, der Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen (AGAP), der Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung und der Informationen hinsichtlich Ansiedlung neuer Tätigkeiten (gemäß § 9 Absatz 1 Nummer 5 StörfallV) sind die Betrachtungen der o. g. Dennoch-Störfälle ebenfalls in geeigneter Weise zu berücksichtigen.

Gefahrenquellenanalyse sowie Analyse der Gefahren und Gefährdungen sind in Konzepten zur Verhinderung von Störfällen zu berücksichtigen sowie zusammen mit Untersuchungen zu den o. g. „Dennoch-Störfällen“ in Sicherheitsberichte aufzunehmen.

Abbildung 1: Ablaufschema zur Optimierung des Schutzkonzeptes



* Soweit gemäß § 10 StörfallV gefordert.

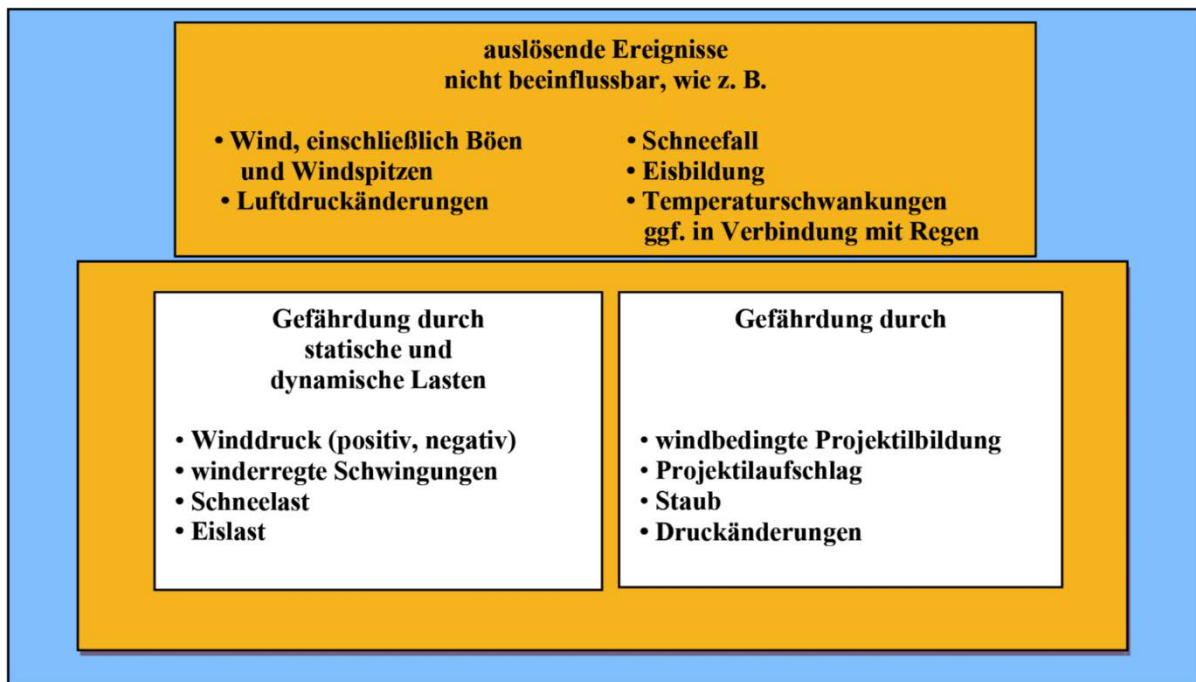
5 Beschreibung der Gefahrenquellen

Bei den mit dieser TRAS geregelten umgebungsbedingten Gefahrenquellen werden damit im Zusammenhang stehende Ereignisse wie folgt unterteilt:

1. auslösende Ereignisse, wie Wind, Schneefall, Nebelfrost oder Eisregen, die nicht durch Maßnahmen beeinflussbar sind, und
2. mögliche Folgeereignisse, wie z. B. Winddruck, Schnee- und Eislasten oder windbedingte Projektile.

Die Systematisierung der verschiedenen Ereignisse ist in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2: Systematisierung der von Wind, Schnee- und Eislasten ausgelösten Gefahrenquellen



5.1 Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten

Sicherheitsrelevante Teile von Anlagen und Betrieben sind entsprechend dem erhöhten Gefahrenpotenzial, das von den in ihnen vorhandenen gefährlichen Stoffen ausgeht, für Wind, Schnee- und Eislasten auszulegen.

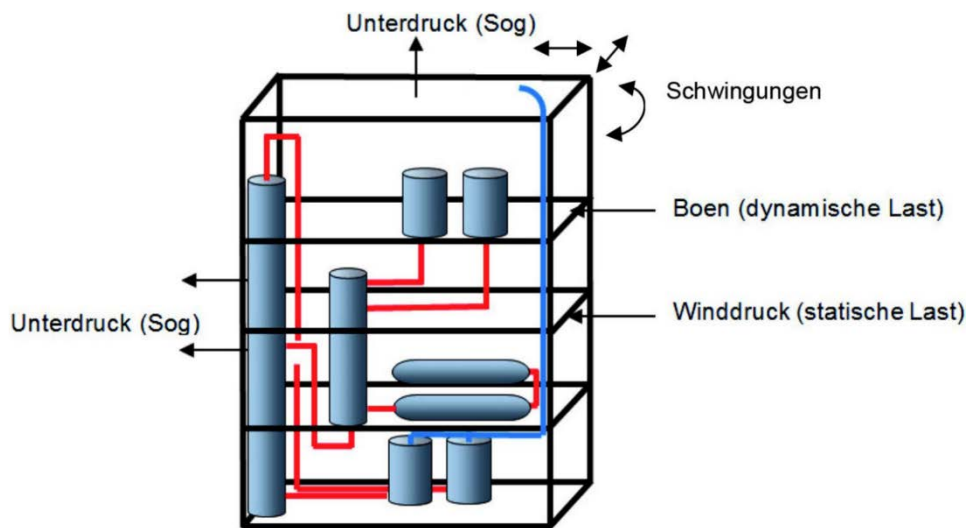
5.1.1 Gefahrenquellen durch Windlasten

Wind, insbesondere Böen und Windspitzen, üben einen Druck auf Anlagen und Anlagenteilen, wie z. B. Einhausungen, aus, der als Winddruck bezeichnet wird. Dieser ist in Luv positiv (Druck), an Seiten- und Dachflächen sowie in Lee negativ (Sog und Druck von Innen durch das Eindringen des Windes). Wind, insbesondere Böen und Windspitzen, können Tragwerke darüber hinaus zum Schwingen anregen.

Tornados zeichnen sich durch eine starke Drehgeschwindigkeit aus, zu der noch die eigentliche Wanderungsgeschwindigkeit (Translationsgeschwindigkeit) hinzukommt. Darüber hinaus entstehen starke, aufwärts gerichtete Luftströmungen, die auch zu vertikal relevanten Unterdrücken führen können. Die Charakteristik eines Tornados unterscheidet sich somit signifikant von den Windarten nach DIN EN 1991-1-4 mit horizontaler Luftströmung.

Eine Übersicht der verschiedenen potenziellen Gefährdungen durch Wind zeigt Abbildung 3.

Abbildung 3: Potenzielle Gefährdungen durch Windlasten



Zusammengefasst kann die Gefährdung durch die Lasten aus

1. Winddruck auf die Luvwand,
2. Sog auf die windparallelen Wände, das Dach und die Leewand,
3. Schwingungen

ausgelöst werden.

5.1.2 Gefahrenquellen durch Schwingungen

Die Luftströmung kann Anlagenteile zu erheblichen Schwingungen anregen.

Periodische Wirbelablösungen, sogenannte Kármánsche Wirbelstraßen, können Anlagenteile zum Schwingen bringen. Relevante Schwingungen treten bei der kritischen Windgeschwindigkeit auf, bei der die Wirbelablösefrequenz gleich einer Eigenfrequenz des Anlagenteils ist.

Auch weitere Arten von Schwingungen können auftreten, wie das Flattern von flächenhaften oder das Interferenzgalloping¹⁵ von dicht benachbarten zylindrischen Anlagenteilen.

In allen diesen Fällen versagt das Anlagenteil häufig nach einer gewissen Zahl von Spannungsschwingspielen durch Materialermüdung.

Schließlich führt auch eine Abfolge von Böen zu Schwingungen in Windrichtung, die in der Regel im Rahmen der statischen Berechnungen durch einen angemessenen Erhöhungsbeiwert der Böenwindlast abgegolten werden.

5.1.3 Gefahrenquellen durch Schnee- und Eislasten

Schneelasten wirken in erster Linie auf die horizontalen und geneigten Dächer der Einhausungen, Anlagen und Anlagenteile. Schnee kann sich bei Temperaturwechseln durch Tauen und Gefrieren stark verändern und ein höheres spezifisches Gewicht annehmen. Während der Tauperioden kann im Schnee gestauter Regen das Gewicht des Schnees stark erhöhen.

Eislasten können sich durch Eisregen oder durch Raueis, einer Abscheidung von Nebeltröpfchen (bevorzugt in Luv), bilden und daher auch an anderen Flächen ansetzen. Neben Einhausungen können andere Anlagenteile, wie Rohrleitungen, Kabeltrassen, Bühnen, Gerüste und Tanks teilweise bzw. ganz von den Belastungen betroffen sein.

¹⁵ Aeroelastisches Phänomen, das bei der Umströmung von engstehenden kreiszylindrischen Strukturen auftreten kann.

5.2 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile sowie Luftdruckänderungen und Druckschwankungen

5.2.1 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile

Böen und Windspitzen können unzureichend befestigte, sicherheitsrelevante Teile einer Anlage losreißen und mit ihrem Verlust die Sicherheit von Anlagen und Betriebsbereichen gefährden (Fall 1: Verlust von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen).

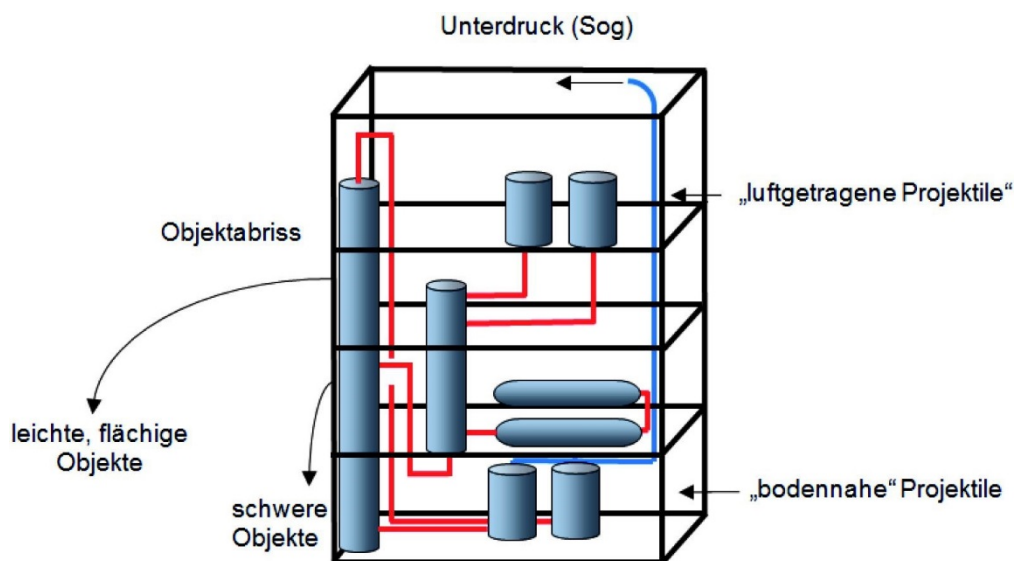
Lose Teile aus der Umgebung von Anlagen oder losgerissene Anlagenteile können auf sicherheitsrelevante Anlagenteile auftreffen und ihre Funktion oder Integrität beeinträchtigen. Bäume können entwurzelt werden und auf benachbarte Anlagenteile treffen (Fall 2: Beschädigung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen).

Bei horizontal wirkenden Winden wird die Flugbahn eines abgerissenen Objektes von einem vertikalen und einem horizontalen Geschwindigkeitsvektor bestimmt. Danach fallen Objekte mit hoher Dichte und/oder kompakte Teile nahezu senkrecht zu Boden, während flächige Objekte mit geringer Dichte mit dem Wind fortgetragen werden können (luftgetragene Projektile). Die Weite der Flugbahn wird neben den Objekteigenschaften und der Windgeschwindigkeit von der ursprünglichen Höhenlage des Objektes bestimmt.

Daneben können schwerere Objekte über den Boden bewegt werden (Versatz oder Rollen) und auf andere Anlagenteile bodennah auftreffen (bodennahe Projektile).

Die Ablösung von Anlagenteilen und die Gefährdungen durch windbedingte Projektile sind in Abbildung 4 für horizontal wirkende Luftströmungen zusammenfassend dargestellt.

Abbildung 4: Potenzielle Gefährdungen durch Objektablösung, windbedingte Projektile und Unterdruck infolge Sogwirkung



5.2.2 Gefahrenquellen durch Luftdruckänderungen und Druckschwankungen

Bei Behältern mit flexiblen Wandungen (z. B.: Foliengasspeichern von Biogasanlagen) können Luftdruckänderungen, sowie Druck und Sog bei Wind, insbesondere Böen und Windspitzen, Verformungen bewirken. Böen und Windspitzen können auf Emissionsquellen wirken und durch Druck oder Sog Druckänderungen in den angeschlossenen Anlagenteilen verursachen. Derartige Druckschwankungen können Stoffströmungen in Anlagen, z. B. in Abgas- oder Abluftsystemen, auslösen bzw. verändern. Es ist daher auch zu beurteilen, ob Luftdruckänderungen und anströmungsbedingte Druckschwankungen entsprechend Beschaffenheit und Betrieb der Anlagen überhaupt sicherheitsrelevant werden können.

6 Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse

Während die Gefahrenquelle Hochwasser für bestimmte Regionen bereits bei der „vereinfachten Gefahrenquellenanalyse“ vernünftigerweise ausgeschlossen werden kann, ist dies für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten nicht möglich. Das Ausmaß der Gefährdung ist jedoch regional unterschiedlich. Entsprechend wurden Gefahrenkarten erarbeitet¹⁶ (Ausnahme: Tornados), die die Grundlagen für eine detaillierte Gefahrenquellenanalyse bilden.

Die Beurteilung der Gefahren durch Tornados in Deutschland ist schwierig. Anders als in den USA oder der Schweiz wurde für Deutschland bislang keine validierte Gefahrenkarte für Tornados erstellt, sodass eine regionale Gefahrenabstufung analog der Wind-, Schnee- und Eislastzonenkarte dem Anlagenbetreiber nicht zur Verfügung steht. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Gefahr eines Tornados in Deutschland nicht vorhanden ist und daher nicht betrachtet werden muss.

Die Häufigkeit, mit der ein Betriebsbereich von einem Tornado getroffen werden könnte, liegt aber weit unter der für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten zu Grunde gelegten Häufigkeit (100-Jährlichkeit). Somit ist das Auftreten von Tornados vernünftigerweise auszuschließen. Daher werden Tornados in dieser TRAS zwar als Gefahrenquelle beschrieben, es sollen jedoch keine weiteren Vorgaben für anlagenbezogene Schutzziele und Schutzkonzepte gemacht werden. Möglichen Wirkungen von Tornados sollen jedoch durch Betrachtungen weitergehender Ereignisabläufe und den daraus abgeleiteten Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen und in Rahmen der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt I3).

Die Gefahrenquelle „windbedingte Projektile“ kann ebenfalls grundsätzlich nicht vernünftigerweise ausgeschlossen und muss einer detaillierten Gefahrenquellenanalyse unterzogen werden.

Für die Gefahrenquellen Druckänderungen und -schwankungen ist zu prüfen, ob Luftdruckänderung und anströmungsbedingte Druckschwankung entsprechend Beschaffenheit und Betrieb der Anlagen überhaupt sicherheitsrelevant werden können. Ist dies nicht der Fall, kann auf eine detaillierte Gefahrenquellenanalyse verzichtet werden.

7 Detaillierte Gefahrenquellenanalyse

Für den Fall, dass Gefahrenquellen vernünftigerweise nicht ausgeschlossen werden können, ist eine detaillierte Gefahrenquellenanalyse erforderlich. Da im Geltungsbereich der StörfallV das Versagen sicherheitstechnisch relevanter Anlagenteile zu einem Störfall führen kann, wird – auch in Analogie zur TRAS 310 – für die vernünftigerweise nicht auszuschließenden Gefahrenquellen ein 100-jährliches Ereignis zu Grunde gelegt. Als wesentliche Grundlage hierfür wird in dieser TRAS auf die für die relevanten Gefahrenquellen entwickelten DIN EN-Normen (siehe unten) und die DIN 1055-5 für Eislasten Bezug genommen. Diese enthalten Gefahrenkarten für naturbedingte Ereignisse (vgl. nationale Anhänge zu den DIN EN-Normen). Sie basieren auf statistischen Auswertungen vergangener Ereignisse. Die charakteristischen Parameter der jeweiligen Gefahrenquelle werden darin für 50-jährliche Ereignisse angegeben. Entsprechend des Ansatzes der DIN EN erfolgt für den Anwendungsbereich dieser TRAS die „Umstellung“ auf ein 100-jährliches Ereignis für Lasten nicht durch Änderung dieser Parameter, sondern durch die schon in DIN EN 1990 für Anlagen mit erhöhtem Gefahrenpotenzial vorgesehene Erhöhung des Teilsicherheitsbeiwertes der Einwirkungen.

7.1 Statische und dynamische Lasten

7.1.1 Bezug zu Normen und Zuverlässigkeitsklassen

Grundlagen für die Gefahrenquellenanalyse sind insbesondere die DIN EN 1991-1-4 für die Gefahrenquelle Wind sowie insbesondere die DIN EN 1991-1-3 für Schneelasten (jeweils einschließlich nationalem Anhang) und DIN 1055-5 für Eislasten. Wegen der gravierenden Folgen eines Versagens sicherheitsrelevanter Teile einer Anlage oder eines Betriebs sollen diese in Anlehnung an die Regelungen der DIN EN 1990 Anhang B und DIN EN 1990/NA (Dezember 2010) in die Zuverlässigkeitsklasse RC 3 und die Versagensfolgeklasse CC 3 eingestuft werden, wie z. B. auch Versammlungsstätten. Aus dieser Einstufung folgt die Erhöhung des Teilsicherheitsbeiwertes der Einwirkungen mit dem Faktor KFI =

¹⁶ Vgl. DIN EN 1991-1-3/NA, DIN EN 1991-1-4/NA und DIN 1055-5

I,1 (siehe auch DIN EN 1990/NA zu Anhang A I.3.I). Damit erhöht sich das Schutzziel der Normen vom 50-jährlichen auf das 100-jährliche Ereignis (Weiteres siehe Abschnitt I0).

Mit dieser Eingruppierung sind die Anlagen und Anlagenteile, insbesondere Tragwerke, im Rahmen der Gefahrenquellenanalyse für Wind sowie Schnee- und Eislasten zu überprüfen (siehe Abschnitt I0).

Bei besonders hohem Gefahrenpotenzial ist im Rahmen der Festlegung der anlagenbezogenen Schutzziele zu prüfen, ob es der Anwendung weitergehender Teilsicherheitsbeiwerte bedarf (entsprechend DIN EN 1990 Anhang B Tabelle 2 Anmerkung).

Weiterhin ist zu beachten, dass neben der Pflicht zur Störfallvorsorge aufgrund von Verkehrssicherungspflichten eine Personengefährdung durch z. B. Tragwerksversagen oder Projektile ausgeschlossen werden muss.

7.1.2 Windlasten

Den Anforderungen dieser TRAS wird durch die oben erläuterte Erhöhung des Teilsicherheitsbeiwertes durch Multiplikation mit dem Faktor $KFI = 1,1$, d. h. von 1,5 auf 1,65, Rechnung getragen (Weiteres siehe Abschnitt I0).

7.1.3 Schnee- und Eislasten

Gemäß Anhang D der DIN EN 1991-1-3 lässt sich für die Anforderungen dieser TRAS eine Erhöhung von circa 10 % mittels der zugrunde gelegten Gumbel-Verteilung berechnen. Der Erhöhung der Jährlichkeit wird durch die Erhöhung des Teilsicherheitsbeiwertes durch Multiplikation mit dem Faktor $KFI = 1,1$, d. h. von 1,5 auf 1,65, Rechnung getragen (Weiteres siehe Abschnitt I0).

Außergewöhnliche Schneelasten sind als außergewöhnliche Einwirkungen nach DIN EN 1990 zu berücksichtigen. Soweit die zuständige Behörde hierfür nach DIN EN 1991-1-3/NA Teil 4.3 Rechenwerte festgelegt hat, sind diese zu nutzen. Soweit von der zuständigen Behörde keine derartigen Rechenwerte festgelegt wurden (wie dies insbesondere außerhalb des Norddeutschen Tieflands der Fall sein kann), sind Daten über aufgezeichnete regionale, extreme Schneelasten zu nutzen.

Im Rahmen der Neuregelung der Lastannahmen nach dem europäischen Normenkonzept wurde die Lastannahme Eislasten (aus Eisregen und Raueis) nicht neu geregelt. Eislasten werden in der DIN EN 1991-1-3 nicht berücksichtigt. Die DIN 1055-5 war diesbezüglich mit ihrem informativen Anhang A auf dem Stand der Technik. Im Zuge der EurocodeEinführung entfällt dieser Teil ersatzlos, sodass in den baurechtlichen Normen keine detaillierten Angaben zu der Eisbelastung (mehr) zu finden sind. Das bedeutet natürlich nicht, dass es diese Belastung nicht gibt. Da Eislasten in der Gefahrenquellenanalyse zu betrachten sind, sollte hierfür die DIN 1055-5 unter Beachtung des Obenstehenden weiter als Erkenntnisquelle genutzt werden, solange die DIN EN nicht um Eislasten ergänzt wurde.

7.2 Berücksichtigung des Klimawandels

Im Rahmen der Gefahrenquellenanalyse sollen die voraussichtlichen Folgen des Klimawandels Berücksichtigung finden, selbst wenn diese naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet sind. Es ist davon auszugehen, dass der bereits eingetretene Wandel des Klimas Einfluss auf Intensität und Häufigkeit des Wirksamwerdens zumindest eines Teils der oben genannten Gefahrenquellen hat.

Es liegen jedoch für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten keine ausreichenden Informationen hinsichtlich Änderungen aufgrund des Klimawandels vor (vgl. Abschnitt I). Daher können derzeit¹⁷ keine Klimaänderungsfaktoren für die obenstehenden Lasten angegeben werden.

7.3 Windbedingte Projektile

Halten Anlagen oder Anlagenteile den oben beschriebenen statischen oder dynamischen Lasten nicht Stand, so kann es zum Ein- oder Umstürzen oder zur Ablösung sowie zur Bildung von Projektilen kommen („interne Projektilbildung“).

¹⁷ Stand Juni 2015

Gleiches gilt für dem Betrieb eventuell benachbarte Anlagen. Ähnliches tritt auch bei Anderem als baulichen Anlagen ein, wie z. B. Bäumen („externe Projektbildung“).

Wie Erfahrungen mit windbedingten Projektilen gezeigt haben, können mögliche Gefahrenquellen wie folgt zusammengefasst werden:

7.3.1 Verlust von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen

Der Verlust von Anlagenteilen kann selbst sicherheitsrelevant sein.

7.3.2 Beschädigung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen

Sicherheitsrelevante Anlagenteile können grundsätzlich durch windbedingte Projektile gefährdet werden (vgl. Abschnitt 5.2.1). Soweit nur ein Ein- oder Umstürzen relevant ist, kann der gefährdete Bereich meist einfach bestimmt werden. Bei luftgetragenen Projektilen hängt die Gefährdung vom Projektilweg, den Aufprallbedingungen und dem Material des potenziell getroffenen sicherheitsrelevanten Anlagenteils ab. Für idealisierte „Modellprojekte“ ist eine Abschätzung der möglichen Flugbahnen und der Folgen eines Auftreffens möglich.

Als Ursache von Projektildbildung und Projektildbewegung können Böengeschwindigkeiten, die über dem 1,1-fachen nach DIN EN 1991-1-4 liegen, vernünftigerweise ausgeschlossen werden.

8 Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile des Betriebs und der Anlagen

Derartige sicherheitsrelevante Teile des Betriebs und der Anlagen sind

1. Anlagen und Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt,
2. Anlagen und Anlagenteile mit besonderer Funktion

(siehe auch KAS-I¹⁸ und Vollzugshilfe des BMUB zur StörfallV).

Gefährdete Anlagen und Anlagenteile im Sinne dieser TRAS sind sicherheitsrelevante Anlagen und Anlagenteile, bei denen bei Wirksamwerden der jeweiligen umgebungsbedingten Gefahrenquellen (d. h. Gefährdung durch die Umgebung) eine Gefahr bzw. Gefährdung durch einen Störfall (Gefahr bzw. Gefährdung im Betrieb oder für die Umgebung) bestehen kann. Der Kreis der zu schützenden Anlagen und Anlagenteile ist daher von der Art der Gefahrenquelle und der unterstellten Intensität derselben abhängig.

Sofern für bestehende Betriebsbereiche Sicherheitsberichte vorliegen, waren die sicherheitsrelevanten Anlagen und Anlagenteile bereits hierfür zu ermitteln. Diese Ermittlung ist zu überprüfen, wenn die jeweilige Gefahrenquelle auf mehr als eine Anlage mit dem gleichen Stoff bzw. der gleichen Stoffgruppe gemäß Anhang I StörfallV wirken kann.

Hinsichtlich der in dieser TRAS behandelten Gefahrenquellen sind nicht alle sicherheitsrelevanten Teile des Betriebs und der Anlagen gefährdet. Der qualifizierten Eingrenzung der gefährdeten Teile von Betrieben und Anlagen kommt daher eine hohe Bedeutung zu. Um hier zu einer sinnvollen Eingrenzung zu kommen, werden im Folgenden entsprechende Hinweise gegeben.

8.1 Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten

8.1.1 Windlasten

Auf Grundlage der bereits gemäß KAS-I¹⁹ ermittelten sicherheitsrelevanten Anlagenteile sind die Teile zu ermitteln, die durch Windlasten (Böen oder Schwingungen) gefährdet sind.

¹⁸ Kommission für Anlagensicherheit: Abschlussbericht Arbeitskreis „Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) und sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches (SRB)“ (KAS-I), Bonn 2006 <http://www.kas-bmu.de/publikationen/kas/KASI.pdf>

¹⁹ Vgl. Kommission für Anlagensicherheit: Abschlussbericht Arbeitskreis „Richtwerte für sicherheitsrelevante Anlagenteile (SRA) und sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereiches (SRB)“ (KAS-I), Bonn 2006 <http://www.kas-bmu.de/publikationen/kas/KASI.pdf>

Folgende Hinweise zur Identifizierung sind zu beachten:

1. Die Gefährdung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen in baulichen Anlagen, die nach DIN EN 1990 entsprechend RC 3 errichtet wurden, kann als gering eingestuft werden. Bei besonders hohem Gefahrenpotenzial ist zu prüfen, ob es der Anwendung weitergehender Teilsicherheitsbeiwerte bedarf (vgl. DIN EN 1990 Anhang B Tabelle 2 Anmerkung).
2. Sind die baulichen Anlagen nicht entsprechend nach DIN EN 1990 RC 3 errichtet oder handelt es sich um Leichtbauwerke, so ist eine Gefährdung der darin untergebrachten Anlagenteile zu prüfen.
3. Die Gefährdung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen, die vollständig im Erdreich verlegt sind, ist auszuschließen.
4. Sicherheitsrelevante Anlagenteile, die ohne Einhausung im Freien stehen, sind potenziell gefährdet.

8.1.2 Schnee- und Eislasten

Grundsätzlich können die Schnee- und Eislasten auf alle außen liegenden Anlagenteile einwirken. Aufgrund von Schneeverwehungen, Abrutschungen oder Ansammlungen ist besonderes Augenmerk auf Flächen bzw. Anlagenteile unterhalb höher gelegener Anlagenteile zu legen.

Der Betreiber sollte anhand eines Lageplans die in besonderem Maße betroffenen Anlagenteile hinsichtlich ihrer Gefährdung kategorisieren.

Bei der Auswahl der betroffenen Anlagenteile können folgende Einschränkungen berücksichtigt werden:

1. Liegt die Temperatur der Gebäude- bzw. Anlagenhülle aufgrund innerer Prozesse dauerhaft höher als 0° C, so kann auf eine detaillierte Betrachtung verzichtet werden.
2. Sind die Anlagenteile gemäß gültiger DIN EN 1990 unter Berücksichtigung der erhöhten Zuverlässigkeitsklasse RC 3 entworfen bzw. überprüft worden, so kann die Gefahr als gering eingestuft werden.

8.2 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile: Ermittlung der gefährdeten Anlagen und Anlagenteile

Jeder Anlagenbetreiber muss verhindern, dass sich Gebäude- oder Anlagenteile durch Böen oder Windspitzen losreißen und zu luftgetragenen Projektilen werden können. Diese Pflicht schließt auch Bäume/Äste im Betrieb ein. Sie dient zum einen dem Schutz von Personen entsprechend der Verkehrssicherungspflicht und dem Arbeitsschutz. Zum anderen sind im Geltungsbereich der Störfall-Verordnung auch sicherheitsrelevante Anlagenteile zu schützen, unabhängig davon, ob gleichzeitig eine unmittelbare Personengefährdung vorliegt.

Die Gefahrenquelle „windbedingte Projektile“ sollte daher systematisch untersucht werden. Hierfür wird nachfolgend eine Vorgehensweise dargestellt, die sich im Rahmen des Gebäudemanagements bewährt hat. Andere, gleichwertige Vorgehensweisen können ebenfalls angewandt werden. Die Systematik beruht auf folgenden Elementen:

1. Regelmäßige, dem Zustand und Gefahrenpotenzial der Anlage angepasste Überprüfungen
2. Bewertung vorgefundener Mängel und Festlegung wirksamer Maßnahmen
3. Umsetzung der Maßnahmen in dem vorgegebenen Zeitrahmen Ggf. Ersatzmaßnahmen zur Sicherung gefährdeter Bereiche
4. Ggf. Anpassung der Überprüfungsfrequenz

Im Rahmen der Überprüfungen (Schritt I) sind vorzugsweise durch eine Vor-Ort-Kontrolle potenzielle Quellen für windbedingte Projektile zu ermitteln. Neben möglichen betriebsinternen Projektilquellen ist auch das nähere Umfeld des Betriebs zu berücksichtigen (z. B. Bäume an der Werksgrenze, naheliegende Anlagen und Infrastruktureinrichtungen).

Als potenzielle Projektilquellen sind beispielweise zu betrachten:

- a) Nicht sicher befestigte Anlagenteile (z. B. Gerüstteile, Blechverkleidungen).
- b) Nicht bauliche Anlagen, wie z. B. Bäume, die bei Böen oder Windspitzen umstürzen und sicherheitsrelevante Anlagenteile treffen können.

- c) Freie Lagerflächen mit z. B. Containern, Ersatzteilen, Gebinden usw., die durch Wind fortgetragen werden können.

Zunächst ist zu prüfen, ob sich unter den identifizierten, potenziellen Projektilen Anlagenteile befinden, deren Verlust sicherheitsrelevant ist.

Anschließend ist zu prüfen, ob sich Projektile in einer solchen Entfernung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen und in einer solchen Art bilden können, dass eine funktionsstörende Einwirkung auf sicherheitsrelevante Anlagenteile vernünftigerweise nicht ausgeschlossen werden kann.

Mögliche Maßnahmen zur Vermeidung der Bildung von windbedingten Projektilen (Schritte 2 bis 4) sind in Abschnitt II beschrieben. Falls dennoch eine Gefährdung sicherheitsrelevanter Anlagenteile durch windbedingte Projektile nicht ausgeschlossen wird, kann unterstellt werden, dass sicherheitsrelevante Anlagen oder Anlagenteile, soweit sie aus massivem, duktilem Material bestehen, wie z. B. häufig Druckbehälter, oder durch massive Wände, z. B. aus Stahlbeton, geschützt werden, durch nach dieser TRAS nicht auszuschließende Windereignisse in aller Regel nicht gefährdet sind. Falls sicherheitsrelevante Anlagen oder Anlagenteile dagegen weniger robust gegen mechanische Beschädigungen und nicht anderweitig geschützt sind (z. B. Einhausung), ist eine Gefährdung nicht auszuschließen.

9 Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen

Nicht jedes Wirksamwerden einer Gefahrenquelle auf die gemäß Abschnitt 8 identifizierten im Sinne dieser TRAS relevanten Anlagen und Anlagenteile, wie Tragwerke, wird tatsächlich zu einer ernststen Gefahr führen. Bei der Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen ist für die einzelnen sicherheitsrelevanten Anlagenteile und sicherheitsrelevanten Teile eines Betriebs daher im Einzelfall zu prüfen, ob im Falle der unterstellten Art und Intensität des Wirksamwerdens der jeweiligen Gefahrenquelle tatsächlich ein Störfall eintreten kann oder ob nur eine Störung des Betriebes vorliegt. Hierzu ist zu untersuchen, wie sich das Wirksamwerden der Gefahrenquelle auf die jeweils gefährdeten sicherheitsrelevanten Anlagenteile und sicherheitsrelevanten Teile eines Betriebs auswirken kann.

Zur weiteren Eingrenzung der im Sinne dieser TRAS gefährdeten Teile von Betrieben und Anlagen wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

1. Ermittlung der Auswirkungen auf gefährdete Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt,
2. Ermittlung der Auswirkungen auf gefährdete Anlagenteile mit besonderer Funktion (innerhalb von Anlagen),
3. Ermittlung der Auswirkungen auf gefährdete Anlagen mit besonderem Stoffinhalt,
4. Ermittlung der Auswirkungen auf gefährdete Anlagen mit besonderer Funktion innerhalb und außerhalb des Betriebsbereichs,
5. Ermittlung der Auswirkungen auf den Betrieb.

Spätestens im letzten Schritt sind die Folgen des gleichzeitigen Wirkens von Gefahrenquellen auf alle Anlagen und Anlagenteile des Betriebes sowie Wechselwirkungen (Wirkung auf eine Anlage/ein Anlagenteil löst Störfall in einer anderen Anlage/einem anderen Anlagenteil aus) zu betrachten.

Beispiele von Szenarien zur Ermittlung der Voraussetzungen von Störfällen:

- I. Extremwind:
 - a) Umstürzen und Rollen von unbefestigten Gebinden und Tanks,
 - b) Lösen von Tanks oder Behältern aus den Verankerungen mit Beschädigung der verbindenden Rohrleitung (Lageveränderung),
 - c) Rohrleitungsabriss durch Schwingungen,
 - d) Beschädigung von Schwimmdächern durch windinduzierte Schwingungen,
 - e) Druckänderung und Druckschwankung in Abgassystemen,
 - f) Beschädigung von Gebäuden bzw. Gebäudeteilen,
 - g) Ausfall der Versorgung mit Betriebsmitteln,

h) Ausfall der Kommunikationsverbindungen.

2. Extreme Schnee- und Eislasten:

- a) Einsturz von Dächern oder Gebäudeteilen,
- b) Unterbrechung von Versorgungsleitungen innerhalb und außerhalb des Betriebes wie z. B.
 - i. Stromversorgung,
 - ii. Prozessleittechnik,
 - iii. Rohrleitungen für Betriebsmittel,
 - iv. Sonstige sicherheitstechnische Einrichtungen, wie z. B. Kommunikationseinrichtungen,
 - v. Eisbildung auf Rohrleitungen und Pumpen.

3. Windbedingte Projektile:

- a) Durchschlagen von Tanks, Behältern oder Reaktionsgefäßen mit gefährlichen Stoffen aus dünnwandigem bzw. mechanisch nicht ausreichend robustem Material (z. B. Folien oder Glas),
- b) Abriss von Rohrleitungen,
- c) Beschädigung von Pumpen, Ventilen und MSR-Einrichtungen,
- d) Einschränkung der Funktion oder Ausfall von Anlagenteilen und Versorgungseinrichtungen innerhalb und außerhalb des Betriebes, wie z. B.
 - i. Stromversorgung,
 - ii. Prozessleittechnik,
 - iii. Rohrleitungen für Betriebsmittel,
 - iv. Sonstigen sicherheitstechnischen Einrichtungen, wie z. B. Kommunikationseinrichtungen.

10 Festlegung von anlagenbezogenen Schutzziele

Auf der Grundlage der Kenntnisse der möglichen Gefahrenquellen (Abschnitt 7 Detaillierte Gefahrenquellenanalyse) und der hierdurch möglichen Gefahren bzw. Gefährdungen (Abschnitt 9 Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen) sind anlagenbezogene Schutzziele aufzustellen.

Vorgaben für die Aufstellung von Schutzziele

- 1. Auslegung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile und sicherheitsrelevanten Teile eines Betriebs und baulicher Anlagen, in denen sicherheitsrelevante Anlagen oder Anlagenteile betrieben werden, entsprechend der Zuverlässigkeitsklasse RC 3 nach DIN EN 1990, was einer Auslegung gegen ein 100-jährliches Ereignis entspricht. Bei besonders hohem Gefahrenpotenzial ist zu prüfen, ob es der Anwendung weitergehender Teilsicherheitsbeiwerte bedarf (vgl. DIN EN 1990 Anhang B Tabelle 2 Anmerkung).
- 2. Überwachung der Planung und Herstellung von neuen sicherheitsrelevanten Anlagenteilen und sicherheitsrelevanten Teilen eines Betriebs und baulichen Anlagen, in denen sicherheitsrelevante Anlagen betrieben werden, entsprechend der Überwachungsmaßnahmen DSL 2 und der Überwachungsstufe IL 2 nach DIN EN 1990/NA. Bei besonders hohem Gefahrenpotenzial²⁰ ist zu prüfen, ob es der Anwendung von Überwachungsmaßnahmen bzw. -stufen der Kategorien DSL 3 bzw. IL 3 bedarf. Für bestehende Anlagen und Anlagenteile gilt diese Anforderung nicht, da die Überwachung gemäß DSL 3 oder DSL 2 und IL 3 oder IL 2 bei Planung und Herstellung nachträglich nicht oder nur bedingt realisierbar ist.

²⁰ Z. B. wenn das Anlagenteil selbst die Mengenschwellen von Anhang I Spalte 5 StörfallV erreicht oder überschreitet.

3. Auslegung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile und sicherheitsrelevanten Teilen eines Betriebs und baulichen Anlagen, in denen sicherheitsrelevante Anlagen betrieben werden, gegen Böen, Windspitzen und Schwingungen entsprechend DIN EN 1991-I-4/NA mit den erhöhten Anforderungen gemäß Nummer 1.
4. Auslegung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile und sicherheitsrelevanten Teilen eines Betriebs und baulichen Anlagen, in denen sicherheitsrelevante Anlagen betrieben werden, gegen Schneelasten entsprechend DIN EN 1991-I-3/NA, mit den erhöhten Anforderungen gemäß Nummer 1 sowie zusätzlich gegen außergewöhnliche Schneelasten aufgrund behördlich hierfür festgelegter Rechenwerte oder, falls diese nicht vorhanden sind, bisher regional eingetretenen extremen Schneelasten.
5. Auslegung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile und sicherheitsrelevanten Teilen eines Betriebs und baulichen Anlagen, in denen sicherheitsrelevante Anlagen betrieben werden, gegen Eislasten entsprechend DIN 1055-5 und mit den erhöhten Anforderungen gemäß Nummer 1.
6. Überwachung von baulichen Anlagenteilen, die sicherheitsrelevant sind oder in denen sicherheitsrelevante Anlagenteile betrieben werden, entsprechend VDI Richtlinie 6200.²¹
7. Sicherung von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen und sicherheitsrelevanten Teilen eines Betriebs gegen Projektilbildung (Verlust von Anlagenteilen).
8. Schutz von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen und sicherheitsrelevanten Teilen eines Betriebs gegen Projektilaufprall (Beschädigung von Anlagenteilen durch luftgetragene, bodennahe und sonstige Projektile).

Für bestehende Anlagen und Anlagenteile, d. h. für die vor der Bekanntgabe dieser TRAS eine Genehmigung erteilt wurde, gilt:

- a) Es ist nachzuweisen, dass die obenstehenden Anforderungen (Nummer 1, 3, 4 und 5, insbesondere Auslegung gegen ein 100-jährliches Ereignis) erfüllt werden. Hierfür hält die Kommission für Anlagensicherheit eine Frist von fünf Jahren nach Bekanntgabe dieser TRAS für angemessen. Dieser Nachweis ist mit den Einwirkungen aus DIN EN 1991, DIN 1055-5 bezüglich Eislasten und (um das 100-jährliche Ereignis abzubilden) einem Faktor von $KFI = 1,1$ (entsprechend RC 3 gemäß DIN EN 1990) zu führen. Methodisch kann die Bemessung jedoch auch nach den Normen erfolgen, die zum Zeitpunkt der letzten Erteilung einer Genehmigung galten.
- b) Bei Anlagen, an denen Änderungen vorgenommen werden sollen, die sich wesentlich auf die Standsicherheit auswirken (z. B. entsprechende Nutzungsänderungen, Änderungen an der Haupttragkonstruktion einschließlich der zugehörigen Aussteifungssysteme, etc.), ist die Führung des Nachweises nach den aktuell gültigen Normen erforderlich.
- c) Bei immissionsschutzrechtlich wesentlichen Änderungen, die sich nicht oder nicht wesentlich auf die Standsicherheit auswirken (z. B. keine Änderung der Haupttragkonstruktion einschließlich der zugehörigen Aussteifungssysteme), ist die Führung des Nachweises gemäß Buchstabe a nicht zusätzlich erforderlich.
- d) Bei älteren Anlagen kann der Fall eintreten, dass ein Nachweis gemäß Buchstabe a nicht geführt werden kann, insbesondere da
 - i. der mit der Prüfung Beauftragte keine ausreichenden Unterlagen vorfindet oder
 - ii. die ursprünglichen Berechnungen auf für diese Prüfung nicht geeigneten älteren Normen bzw. sonstigen Technischen Bauvorschriften beruhen (VDI 6200 Kapitel 3 Absatz 3).

In diesen Fällen ist eine Erstüberprüfung nach VDI 6200 (siehe insbesondere Kapitel 6 Bauwerksbestand) oder einem mindestens gleichwertigen Verfahren durch eine besonders fachkundige Person gemäß VDI 6200 Kapitel II durchzuführen. Insbesondere ist dabei zu prüfen, ob die durch die bei der ursprünglichen Auslegung verwendeten Normen gegebenen Lastreserven noch nutzbar sind (z. B. Prüfung von tragenden Anlagenteilen auf Integrität)

²¹ VDI Richtlinie 6200: Standsicherheit von Bauwerken – Regelmäßige Überprüfung (Februar 2010)

und das Schutzziel von Buchstabe a erfüllen. Ist dies der Fall, hat der Betreiber organisatorische Sicherheitsmaßnahmen zu treffen, damit im Rahmen des Betriebs die zulässigen Nutzlasten eingehalten werden, sodass die Lastreserven gewahrt bleiben. Die Nutzbarkeit von Lastreserven muss auch Inhalt der regelmäßigen Überprüfungen sowie gezielter Überprüfungen nach besonderen Lastfällen (z. B. hohen Schneelasten, Orkanen) sein.

Falls die o. g. Lastreserven nicht mehr nutzbar sind, hat der Prüfer den Betreiber unverzüglich über die erforderlichen Konsequenzen zu informieren (VDI 6200 Kapitel 10.1.3).

- e) Kann der Nachweis gemäß Buchstabe a nicht – auch nicht durch eine Überprüfung gemäß Buchstabe d – geführt werden, muss eine Sanierung (Anpassung an den Stand der Technik oder Sicherheitstechnik) durchgeführt werden (vgl. VDI 6200 Kapitel 10.2.1). Hierfür hält die Kommission für Anlagensicherheit eine Frist von zehn Jahren nach Bekanntgabe dieser TRAS für angemessen.

11 Erarbeitung von Schutzkonzepten

Auf der Grundlage der vernünftigerweise nicht auszuschließenden Gefahrenquellen, identifizierten Gefahren bzw. Gefährdungen und Schutzziele sind Schutzkonzepte zu entwickeln. Bei der Erarbeitung von Schutzkonzepten ist die Forderung zur Einhaltung des Standes der Sicherheitstechnik in § 3 Absatz 4 StörfallV zu beachten.

Bei der Erarbeitung eines Schutzkonzeptes ist neben der Intensität eines Ereignisses

1. die Geschwindigkeit des Eintritts des Ereignisses sowie
2. die Vorwarnzeit (z. B. Wettervorhersage),
3. die Handlungsfähigkeit während des Ereignisses

von mitentscheidender Bedeutung. Dies betrifft insbesondere organisatorische Maßnahmen, wie z. B. die Umlagerung von gefährlichen Stoffen in sichere Anlagen, die Befestigung loser Anlagenteile, den zusätzlichen Schutz von Anlagenteilen oder die rechtzeitige Außerbetriebnahme von Anlagen oder Anlagenteilen.

Die wesentlichen technischen Schutzmaßnahmen, die bei der Erarbeitung eines Schutzkonzeptes berücksichtigt werden können, sind baulicher Art:

1. Bauliche Maßnahmen gegen Extremwinde sind z. B.
 - a) Auslegung von sicherheitsrelevanten Anlagen und Anlagenteilen für Windlasten entsprechend DIN EN 1991-1-4 mit der Zuverlässigkeitsklasse RC 3,
 - b) entsprechende Anwendung auf nicht bauliche Anlagen,
 - c) Einhausung gefährdeter Anlagenteile,
 - d) Sicherung von Anlagenteilen, die potenzielle betriebsinterne Quellen für die Projekttilbildung darstellen, Trümmerteile, wie z. B. Kamine, Abluftfilter usw.,
 - e) vollständig unterirdische Anordnung von sicherheitsrelevanten Anlagen oder Anlagenteilen, soweit mit den Anforderungen der Überwachung, Instandhaltung und des Gewässerschutzes vereinbar.
2. Bauliche Maßnahmen gegen winderregte Schwingungen sind z. B.
 - a) aerodynamische Maßnahmen zur Störung der auslösenden Strömungskräfte,
 - b) strukturelle Maßnahmen wie Schwingungsdämpfer, Störabspannungen, Frequenzverstimmungen.
3. Bauliche und organisatorische Maßnahmen gegen Schnee- und Eislasten sind z. B.
 - a) Auslegung von sicherheitsrelevanten Anlagen und Anlagenteilen für Schnee- und Eislasten entsprechend DIN EN 1991-1-3 bzw. DIN 1055-5 unter Anwendung der Zuverlässigkeitsklasse RC 3 und Berücksichtigung außergewöhnlicher Lasten,
 - b) entsprechende Anwendung auf nicht bauliche Anlagen,

- c) ergänzend Messung der Schneelast mit Sensoren und Räumung der Dächer ab einer bestimmten Last (organisatorische Maßnahme).

4. Maßnahmen gegen Projektile sind z. B.

- a) regelmäßige Sensibilisierung und Unterweisung der Beschäftigten hinsichtlich möglicher Folgen von Projektilen und ihrer Pflichten zur Vermeidung von Projektilbildung,
- b) Begehung des Werksgeländes mit besonderem Augenmerk auf potenzielle Quellen für Projektilbildung; regelmäßig und im Falle von Sturmwarnungen,
- c) Bewertung der vorgefunden Mängel und Bestimmung von wirksamen Maßnahmen, wenn bis zur nächsten Überprüfung die Sicherheit nicht gewährleistet werden kann. Dazu zählen z. B. folgende Maßnahmen:
 - i. Erneuerung der Befestigung nicht ausreichend befestigter Anlagenteile,
 - ii. ggf. Anbringung zusätzlicher tragender bzw. stabilisierender Strukturen,
 - iii. Anbringung von Fangnetzen zur Sicherung gegen herabfallende Fassadenteile,
 - iv. ggf. zusätzliche Abgrenzung gefährdeter Bereiche,
 - v. Anbringung von Anfahrerschutz,
 - vi. Sicherung oder Entfernung von Bäumen, in deren Einwirkungsbereich beim Umstürzen sicherheitsrelevante Anlagenteile getroffen werden können.

Durch diese Maßnahmen ist sicherzustellen, dass eine Projektilbildung als Störfallursache vernünftigerweise ausgeschlossen werden kann.

- d) Umsetzung der Maßnahmen im vorgegeben Zeitraum oder von Ersatzmaßnahmen, um den Zeitraum bis zur Umsetzung der Maßnahmen zu überbrücken. Dazu zählen z. B.
 - i. Reduzierung der Deckenlast bis zum Einbau zusätzlicher tragender Elemente,
 - ii. Sicherung von Bäumen gegen Umstürzen durch fest verankerte Seile.

Unter Umständen kann es erforderlich sein, die Überprüfungsfrequenz anzupassen, um den zeitlichen Verlauf des Schadensbildes im Auge zu behalten und ggf. erforderliche Maßnahmen auch rechtzeitig treffen zu können.

12 Prüfung der Schutzkonzepte

Das gemäß Abschnitt II entwickelte Schutzkonzept ist hinsichtlich des Erreichens der Schutzziele zu überprüfen. Hierbei sind die Intensitäten der umgebungsbedingten Gefahrenquellen sowie die Versagenswahrscheinlichkeiten der gewählten Vorkehrungen und Maßnahmen zur Risikoverminderung zu berücksichtigen.

Die Untersuchung dient dem Nachweis, dass die Betreiberpflichten gemäß StörfallV und BImSchG erfüllt sind.

Werden die gewählten Vorkehrungen und Maßnahmen nicht als ausreichend bewertet, so ist das jeweilige Schutzkonzept zu überarbeiten, um weitere Vorkehrungen und Maßnahmen zur Störfallvorsorge einzubeziehen.

Sind die Vorkehrungen und Maßnahmen ausreichend, sind die bisherigen Schritte, insbesondere die Schutzziele, Schutzkonzepte und deren Prüfung, unter Beachtung der entsprechenden Anforderungen der StörfallV und des BImSchG zu dokumentieren.

13 Ermittlung von Szenarien entsprechend § 3 Absatz 3 StörfallV („Dennoch-Störfälle“) und Szenarien für die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung

Die Ermittlung dieser Szenarien erfolgt, um

1. die Maßnahmen, die erforderlich sind um die Auswirkungen von vernünftigerweise auszuschließenden Störfällen so gering wie möglich zu halten (gemäß § 3 Absatz 3 und § 5 Absatz 1 StörfallV („Dennoch-Störfälle“), 9.2.6.2.3 Nummer 2 der Vollzugshilfe des BMUB zur StörfallV),
2. die für die Ausarbeitung von internen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen (gemäß § 10 StörfallV) erforderlichen Informationen und
3. die für die Erstellung externer Alarm- und Gefahrenabwehrpläne erforderlichen Informationen (gemäß § 9 Absatz 1 Nummer 4 StörfallV, 9.2.6.2.3 Nummer 3 der Vollzugshilfe des BMUB zur StörfallV) zu ermitteln.

Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen, die zu „Dennoch-Störfällen“ führen können, können z. B. sein:

1. Das Versagen von Vorkehrungen nach § 3 Absatz 1 StörfallV,
2. Extremwinde oberhalb einer vernünftigerweise zu unterstellenden Intensität und Tornados der Stärke bis einschließlich F4, die von der Art vernünftigerweise nicht zu unterstellen sind,
3. Schnee- und Eislasten oberhalb einer vernünftigerweise unterstellten Intensität.

Dies bedeutet, dass insbesondere im Falle einer Stofffreisetzung aufgrund vernünftigerweise auszuschließender Gefahrenquellen zusätzliche Maßnahmen zu ergreifen sind, um schädliche Auswirkungen auf Menschen, Umwelt und Sachgüter so gering wie möglich zu halten.

Vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen können jedoch auch so unwahrscheinlich sein, dass sie jenseits der Erfahrung und Berechenbarkeit liegen. Gegen diese exzeptionellen Störfälle sind keine anlagenbezogenen Vorkehrungen zu treffen. Dies gilt z. B. für Tornados der Stärke F5, die in Deutschland nach dem gegenwärtigen Stand des Wissens bislang nicht sicher nachgewiesen sind. Eine Berücksichtigung im Rahmen der Störfallauswirkungsbetrachtung ist unter diesen Bedingungen nicht weiterführend.

Die in dieser TRAS betrachteten Gefahrenquellen können grundsätzlich dazu führen, dass der sichere Einschluss von Gefahrstoffen nicht mehr gewährleistet ist. Es ist daher mindestens die ursachenunabhängige Freisetzung der größten zusammenhängenden Masse (GZM) eines gefährlichen Stoffes im Sinne der StörfallV anzunehmen.

Alternativ kann sich der Betreiber z. B. orientieren an:

- a) Historischen Ereignissen,
- b) maximal aufgetretenen Windspitzen (sofern ermittelbar).

Im Einzelnen ist bei der Darstellung der Szenarien noch zu beachten:

1. Umgebungsbedingte Gefahrenquellen, wie z. B. Tornados, Extremwinde und Schneelasten, sind flächige Ereignisse und können daher auf mehrere Anlagenteile gleichzeitig wirken und Störungen verursachen.
2. Als Folge ist zu prüfen, ob mehr als die GZM freigesetzt werden kann (z. B. Versagen mehrerer Behälter).
3. Es ist davon auszugehen, dass die Verfügbarkeit bisher vorgesehener auswirkungsbegrenzender Maßnahmen bei umgebungsbedingten Gefahrenquellen u. U. eingeschränkt ist (kein Aufenthalt im Freien möglich, Zufahrtswege blockiert etc.).
4. Es ist darüber hinaus anzunehmen, dass die Verfügbarkeit externer Kräfte eingeschränkt ist.
5. Darüber hinaus ist zu prüfen, inwieweit eine Störung eine weitere Störung an einer anderen Anlage und an einem anderen Anlagenteil auslösen kann.

14 Festlegung von Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen

Nach § 3 Absatz 3 StörfallV hat der Betreiber zur Erfüllung seiner Pflichten vorbeugend Maßnahmen zu treffen, um die Auswirkungen von Störfällen so gering wie möglich zu halten. Geeignete technische und organisatorische Maßnahmen werden in den folgenden Kapiteln dargestellt. Bei den technischen Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen sind zwei grundsätzliche Möglichkeiten zu unterscheiden:

1. Maßnahmen, die unmittelbar an dem betroffenen Betrieb, Anlage oder Anlagenteil ansetzen (z. B. Tanklager, Rohrleitungen), um die Freisetzung von gefährlichen Stoffen zu minimieren,
2. Maßnahmen, die um den betroffenen Betrieb ansetzen, um die Ausbreitung von Stoffen zu verhindern bzw. einzuschränken.

Ob und inwieweit die in dieser TRAS betrachteten äußeren umgebungsbedingten Gefahrenquellen Maßnahmen zur Verhinderung von Schadstoffausbreitungen überhaupt zulassen, muss systematisch im Einzelfall geprüft werden. Bei Windereignissen kann für Personen der Aufenthalt im Freien unmöglich, da lebensgefährlich sein. Als Gefahrenquelle kann auch die Vereisung von internen Verkehrswegen angesehen werden. Sollte es zur Vereisung kommen und dadurch die Gefahr bestehen, dass Fahrzeuge die Verkehrswege nicht sicher befahren können und ggf. gegen sicherheitsrelevante Anlagenteile stoßen, so ist z. B. durch Enteisungsmaßnahmen diese Gefahrenquelle auszuschließen.

Neben dem betroffenen Betrieb kann auch die nähere Umgebung dieses Bereiches betroffen sein und die Gefahrenquelle kann über eine längere Zeit andauern. Dies ist im Alarm- und Gefahrenabwehrplan zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 16.2).

Es ist zu prüfen, ob die bereits entwickelten Schutzkonzepte im Sicherheitsbericht ohnehin die Szenarien Freisetzung von Stoffen, Brand und Explosion abdecken und ob die hier ggf. bereits vorgesehenen störfallauswirkungsbegrenzenden Maßnahmen ausreichend sind.

Als für den Geltungsbereich dieser TRAS spezifische Hinweise für Maßnahmen zur Begrenzung der Störfallauswirkungen können beispielhaft genannt werden:

1. Sicherheitstechnische Einrichtungen und Schutzvorkehrungen:
 - a) Auffangräume,
 - b) Schutzmauern oder Schutzwälle,
 - c) Schnellschlusseinrichtungen.
2. Berücksichtigung der Gefährdungen durch Wind, Schnee- und Eislasten in der betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrorganisation.
3. Berücksichtigung der Gefährdungen durch Wind, Schnee- und Eislasten bei der Beratung der Gefahrenabwehrbehörden und Einsatzkräfte bei einem Störfall (§ 5 Absatz 2 StörfallV).

15 Planung für Notfälle, Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung

15.1 Planung für Notfälle

Gemäß § 8 Absatz 3 StörfallV hat der Betreiber in den Fällen des § 7 Absatz 2 Nummer 1 bis 3 StörfallV das Konzept zur Verhinderung von Störfällen, einschließlich des diesem Konzept zugrunde liegenden Sicherheitsmanagementsystem, sowie die Verfahren zu dessen Umsetzung zu überprüfen und erforderlichenfalls zu aktualisieren. Dies betrifft daher auch die in Anhang III Nummer 3 Buchstabe e StörfallV erforderliche Planung für Notfälle. Im Rahmen einer derartigen Aktualisierung sind die Ergebnisse der obigen Schritte zu berücksichtigen.

15.2 Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen

Nach § 10 StörfallV hat der Betreiber eines Betriebsbereichs, der den erweiterten Pflichten unterliegt, einen Alarm- und Gefahrenabwehrplan zu erstellen und nach § 10 Absatz 4 StörfallV zu erproben, zu überprüfen und zu aktualisieren. Auch Betriebsbereiche mit Grundpflichten können entsprechend einer Anordnung im Einzelfall zum Aufstellen derartiger Pläne verpflichtet werden (§ 1 Absatz 2 in Verbindung mit § 6 Absatz 4 StörfallV).

Bei der Erstellung des Alarm- und Gefahrenabwehrplans sind auch Einrichtungen zu berücksichtigen, die nicht auf dem Betriebsgelände stehen und nicht Teil des Betriebs sind, wie z. B. Freileitungen, Masten mit Kommunikationseinrichtungen, deren Funktionsverlust infolge von Windlasten aber als externe Gefahrenquelle Auswirkungen auf den Betrieb haben könnte. Auch die Infrastruktureinrichtungen wie Straßen und Bahngleise sind zu betrachten, damit auch deren Funktionen in einem Alarm- und Gefahrenabwehrplan berücksichtigt werden kann.

Es ist zu berücksichtigen, dass derartige Störungen über eine längere Zeit andauern können. Dies gilt vor allem für großflächige Tiefdruckstürme, sowie hohe Schnee- und Eislasten, die die Nutzung der Infrastruktur um den betroffenen Betrieb einschränken oder gar gänzlich blockieren können. Hierzu zählen:

1. Zerstörung von freien Stromleitungen außerhalb des Betriebs

Eine Zerstörung von Freileitungen kann zum einen durch Stürme/Tornados aber auch durch eisigen Niederschlag in Kombination mit stärkeren Winden erfolgen. Hierbei werden entweder durch die Windbeanspruchung die Masten direkt umgeknickt oder aber bei starkem Eisregen die Stromleitungen durch anhaftendes Eis über die Belastungsgrenze hinaus beansprucht. Das kann dann zu lokalen oder aber auch großflächigen Stromausfällen führen. Grundsätzlich sollten Störungen der Versorgung mit Strom und anderen Energien zu keinen Störfällen führen. Auch in dem hier beschriebenen Szenario können die Gegenmaßnahmen in erster Linie durch eine unabhängige Stromversorgung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile eingeleitet werden. Im Notfall ist betrieblicherseits dafür Sorge zu tragen, dass auch für diese Fälle ausreichend Treibstoff für die Notstromaggregate verfügbar ist.

2. Blockierung der Zuwegungen zu dem Betrieb

Durch Schnee oder Frostperioden, umgestürzte Bäume oder verstreute Projektile können die Zuwegungen zum Betrieb langanhaltend gestört sein. Durch langanhaltenden und außergewöhnlich hohen Schneefall könnte die Räumung der Straßen und Wege gestört und nicht mehr möglich sein. Darüber hinaus ist durch langanhaltende Frostperioden die Gefahr der Vereisung von Wasserstraßen, welche zur Andienung dienen, gegeben. Eine Verhinderung von Gefahren kann durch ausreichende Lagerhaltung sicherheitsrelevanter Betriebsmittel und vorausschauende Planung und Beobachtung der Wetterlage erfolgen. Falls die mögliche Abgeschnittenheit zeitlich nicht vorhersehbar ist, muss mittels eines Notfallplans die sukzessive Abschaltung von gefährdeten Prozessen möglich sein, um Gefährdungen durch Mangel an sicherheitsrelevanten Betriebsmitteln zu vermeiden.

Meteorologische Dienstleister können je nach Art des meteorologischen Ereignisses mit unterschiedlicher Vorwarnzeit und Zuverlässigkeit vor Extremereignissen warnen. Der Betreiber hat zu bewerten, ob derartige Informationen für seine Alarm- und Gefahrenabwehrplanung verfügbar sind, und im betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplan festzulegen, wie der Informationsfluss von einem derartigen Dienstleister erfolgt und welche Maßnahmen ab welchen Schwellen von wem ergriffen werden. Die Alarm- und Gefahrenabwehrplanung wegen Gefahren durch Extremwinde sowie Schnee- und Eislasten ist in der Regel als integraler Bestandteil eines gesamten internen Alarm- und Gefahrenabwehrplanes einzubringen. Im Einzelfall kann es aber auch sinnvoll sein, einen separaten internen Alarm- und Gefahrenabwehrplan, z. B. nur für meteorologische Extremereignisse, zu erstellen. Dieser separate Plan kann allerdings nur ein Teilbereich eines AGAPs sein. Eine Vernetzung mit dem Gesamt-AGAP ist hierbei erforderlich, da Folgeabläufe wie Stofffreisetzungen, resultierend aus Extremwindereignissen in wesentlichen Punkten wieder mit den Organisations- und Handlungsabläufen des Gesamt-AGAP konform sein müssen.

15.3 Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung

Betreiber von Betriebsbereichen mit erweiterten Pflichten haben den zuständigen Behörden die für die Erstellung externer Alarm- und Gefahrenabwehrpläne erforderlichen Informationen zu übermitteln (§ 10 Absatz 1 Nummer 2 StörfallV).

Hinsichtlich der in dieser TRAS betrachteten Gefahrenquellen sind insbesondere die Angaben zu den „Dennoch-Störfällen“ (vgl. Abschnitt I3 und I4) zu überprüfen und ggf. zu ergänzen. Auch eine eventuelle Gefährdung außerhalb des Betriebsbereichs durch luftgetragene Projektile wäre mitzuteilen.

16 Dokumentation

Die bisherigen Schritte und ihre Ergebnisse, insbesondere die anlagenbezogenen Schutzziele, Schutzkonzepte und deren Prüfung, sind zu dokumentieren. Bei Betriebsbereichen mit erweiterten Pflichten hat dies im Sicherheitsbericht sowie ggf. im betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplan zu erfolgen.

17 Erfüllung von weiteren Pflichten der StörfallV

17.1 Anforderungen an die Instandhaltung

Nach § 6 Absatz 1 Nummer 1 und 2 StörfallV hat der Betreiber zur Erfüllung seiner Pflichten die Errichtung und den Betrieb der sicherheitsrelevanten Anlagenteile zu prüfen sowie die Anlagen des Betriebsbereichs in sicherheitstechnischer Hinsicht ständig zu überwachen und regelmäßig zu warten.

Darüber hinaus sind die Wartungs- und Reparaturarbeiten nach dem Stand der Technik durchzuführen. Auf Anhang I Nummer 3.2 der Vollzugshilfe des BMUB wird hingewiesen.

Die Instandhaltungspflicht schließt Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen aufgrund von umgebungsbedingten Gefahrenquellen und Maßnahmen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen ein.

17.2 Information und Schulung der Beschäftigten

Die Schulung des Personals beinhaltet sowohl das erforderliche Verhalten zur Erfüllung der Pflichten nach StörfallV, z. B. zur Verhinderung von Störfällen und zur Begrenzung von Störfallauswirkungen, als auch das Verhalten zur eigenen Sicherheit im Falle des Wirksamwerdens der in dieser TRAS betrachteten, umgebungsbedingten Gefahrenquellen.

Das Personal ist hinsichtlich Art, möglicher Intensität und Häufigkeit der vernünftigerweise nicht ausgeschlossenen umgebungsbedingten Gefahrenquellen und bei deren Wirksamwerden erforderlichem Verhalten zu schulen. In Anweisungen ist festzulegen, wer das Vorliegen einer akuten Gefahr bzw. Gefährdung feststellt, wie das Personal darüber informiert wird, wer sich wie zur Verhinderung von Störfällen oder zur Begrenzung von Störfallauswirkungen und zur eigenen Sicherheit zu verhalten hat. Dies gilt für das gesamte Personal im Betriebsbereich, d. h. auch für Beschäftigte in nicht sicherheitsrelevanten Teilen des Betriebsbereichs.

Im Rahmen von periodisch durchzuführenden Schulungen zur Vermittlung dieser Anweisungen sind auch Übungen (gemäß § 10 Absatz 4 StörfallV mindestens alle drei Jahre), z. B. zur Evakuierung von Teilen eines Betriebsbereichs, durchzuführen. Dabei sind die Organisation, die Vorbereitung sowie die Abläufe zur Umsetzung von Maßnahmen zu prüfen und Anweisungen sowie Schulungen ggf. zu verbessern.

17.3 Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall

Nach § 5 Absatz 2 StörfallV hat der Betreiber einer Anlage zur Erfüllung seiner Pflichten im Störfall die für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden und Einsatzkräfte unverzüglich, umfassend und sachkundig zu beraten. Auf Anhang I Nummer 2.3 der Vollzugshilfe des BMUB wird hingewiesen. Sachkundige Beratung setzt voraus, dass die gegebenen Informationen dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand entsprechen.

Im Falle von umgebungsbedingten Gefahrenquellen ist diese Beratung nicht nur gegenüber den für den Vollzug der StörfallV verantwortlichen Behörden zu leisten, sondern gegenüber allen für die Verhinderung des Wirksamwerdens der Gefahrenquellen oder Begrenzung ihrer Folgen verantwortlichen oder tätigen Behörden und Einsatzkräften.

II Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 320

Diese Hinweise und Erläuterungen ergänzen die Technische Regel für Anlagensicherheit „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten“ (TRAS 320). Sie wurden mit dem Arbeitskreis umgebungsbedingte Gefahrenquellen der Kommission für Anlagensicherheit abgestimmt; es handelt sich jedoch nicht um eine Technische Regel.

Zur Präambel

Üblicherweise enthalten Rechtsvorschriften Präambeln, in denen Sinn und Zweck der nachfolgenden Regelungen umrissen werden. Dieser Praxis folgt auch die Präambel der TRAS 320. Das verfolgte Anliegen der TRAS 320 und ihr Zustandekommen werden kurz beschrieben.

Zu Kapitel 1 Grundlagen

Die Ausführungen im Kapitel Grundlagen zielen darauf ab, die rechtliche Zuordnung der TRAS 320 zu verdeutlichen. Die Pflichten der Betreiber von Betriebsbereichen leiten sich aus § 3 der Störfall-Verordnung (StörfallV, 12. BImSchV) ab und umfassen Folgendes:

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

Gemäß § 3 Absatz 2 StörfallV sind bei der Erfüllung dieser Betreiberpflichten umgebungsbedingte Gefahrenquellen zu berücksichtigen.

Vorkehrungen zur Verhinderung von Störfällen sind vom Betreiber zu treffen, wenn die Gefahrenquellen vernünftigerweise nicht ausgeschlossen werden können und müssen Art und Ausmaß der ansonsten bei Wirksamwerden der Gefahrenquellen resultierenden Gefahren entsprechen (d.h. im Verhältnis zu den hervorgerufenen Risiken stehen).

Zur Auslegung des Begriffs „vernünftigerweise“ wird auf die vom BMUB veröffentlichte Vollzugshilfe zur StörfallV hingewiesen.²² Ob und wie die hier relevanten Gefahrenquellen vernünftigerweise ausgeschlossen werden können, wird im Zusammenhang mit den Erläuterungen zur vereinfachten Gefahrenquellenanalyse diskutiert.

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

Betreiber mit „erweiterten“ Pflichten haben nach § 9 StörfallV ihren Sicherheitsbericht sowie ihr Konzept zur Verhinderung von Störfällen und ihr Sicherheitsmanagementsystem zu jedem anderen 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.

Im Rahmen der Erarbeitung der TRAS 320 wurde geprüft, inwieweit der wissenschaftliche Kenntnisstand Aussagen über eine zukünftige Veränderung der in der TRAS 320 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 Luftfeuchtigkeit ist bei Anwendung der verschiedenen Modellrechnungen für die Entwicklung von Windgeschwindigkeit, Schnee- und Eislasten kein eindeutiger Trend erkennbar. Eine wissenschaftlich allgemein anerkannte Prognose über die Entwicklung der Häufigkeiten und Intensitäten dieser Gefahrenquellen ist somit derzeit noch nicht möglich. Anders als in der TRAS

²² BMUB: Vollzugshilfe zur Störfall-Verordnung vom März 2004
<http://www.bmub.bund.de/bmub/parlamentarische-vorgaenge/detailansicht/artikel/vollzugshilfe-zur-stoerfall-verordnung-vom-maerz-2004>

310 „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser“ wird daher auf die Einführung eines Klimaanpassungsfaktors verzichtet.

Gleichwohl kann ein Einfluss des Klimawandels auf die zukünftigen Häufigkeiten und Intensitäten der betrachteten Gefahrenquellen nicht ausgeschlossen werden. Der Einfluss kann sich ergeben aus:

- ▶ Veränderung der Anteile der verschiedenen Großwetterlagen in Westeuropa
- ▶ Verlagerung der Hauptniederschlagsperioden im Jahresgang
- ▶ Veränderung von Häufigkeiten und Intensitäten von Starkniederschlagsereignissen und extremen Wetterlagen

Werden entsprechende Veränderungen bei Intensitäten oder Häufigkeiten von Wind-, Schneelast- oder Eislastereignissen festgestellt, so sind diese aufgrund der dynamischen Pflichten der StörfallV 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. Die oben genannten Veränderungen sind auch bei der alle 5 Jahre vorgeschriebenen Überarbeitung der TRAS zu beachten.

Zu Kapitel 2 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. Sollen Anforderungen für Betriebsbereiche gelten und werden sie für entsprechende, immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen empfohlen, so wird in der TRAS 320 von „Betrieb“ gesprochen. Von Betriebsbereich wird nur gesprochen, wenn Anforderungen aufgrund der StörfallV und damit nur für Betriebsbereiche gelten.

Die TRAS 320 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 320 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). Die TRAS 320 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.

Zu Kapitel 3 Begriffe

In der TRAS 320 werden nur jene Begriffe erläutert, die für das Verständnis der Zusammenhänge unverzichtbar sind. Im Einzelnen werden folgende Begriffe definiert:

- | | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| 1. TRAS 320, Abschnitt 3.1: | Gefahrenquelle |
| 2. TRAS 320, Abschnitt 3.2: | Umgebungsbedingte Gefahrenquellen |
| 3. TRAS 320, Abschnitt 3.3: | Gefahrenquellenanalyse |
| 4. TRAS 320, Abschnitt 3.4: | Analyse der Gefahren und Gefährdungen |
| 5. TRAS 320, Abschnitt 3.5: | Wind |
| 6. TRAS 320, Abschnitt 3.5.1: | Extremwind |
| 7. TRAS 320, Abschnitt 3.5.2: | Windgeschwindigkeit |
| 8. TRAS 320, Abschnitt 3.5.3: | Bö |
| 9. TRAS 320, Abschnitt 3.5.4: | Windspitze |
| 10. TRAS 320, Abschnitt 3.5.5: | Tornado |
| 11. TRAS 320, Abschnitt 3.6: | Schneelast |
| 12. TRAS 320, Abschnitt 3.6.1: | außergewöhnliche Schneelast |
| 13. TRAS 320, Abschnitt 3.6.2: | extreme Schneelast |
| 14. TRAS 320, Abschnitt 3.7: | Eislast |

- | | |
|-------------------------------|--|
| 15. TRAS 320, Abschnitt 3.8: | Windbedingte Projektile |
| 16. TRAS 320, Abschnitt 3.9: | Störungen des bestimmungsgemäßen Betriebs durch Wind sowie Schnee- und Eislasten |
| 17. TRAS 320, Abschnitt 3.10: | Schutzkonzept |
| 18. TRAS 320, Abschnitt 3.11: | Anlagenbezogene Schutzziele |
| 19. TRAS 320, Abschnitt 3.12: | Störfalleintrittsvoraussetzung |

Folgende Hinweise ergänzen die Begriffsdefinitionen:

Zu TRAS 320 Abschnitt 3.2 Umgebungsbedingte Gefahrenquellen

Der Begriff „umgebungsbedingte Gefahrenquellen“ wird in der Störfall-Verordnung 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, wind-erregte Schwingungen, Schnee- und Eislasten sowie windbedingte Projektile, Staub und Druckschwankungen als Gefahrenquellen auf Anlagen oder Anlagenteile wirken (Abbildung 2 der TRAS 320). Während die auslösenden Gefahrenquellen nicht beeinflusst werden können, ist dies bei der zweiten Gruppe möglich.

In der Vollzugshilfe des BMUB 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 320 betrachteten naturbedingten Gefahrenquellen werden ausschließlich durch Wind, Schnee- und Eislasten unmittelbar oder mittelbar, wie z. B. durch windbedingte Projektile, verursacht. Nicht betrachtet wird die Wirkung von Kälte, insbesondere Gefahrenquellen durch die Bildung von Eis aus in den Betrieben vorhandenem Wasser, wie z. B. Kühlturmschwaden.

Zu TRAS 320, Abschnitt 3.10: 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 verschiedenen Arten von Gefahrenquellen innerhalb des Sicherheitskonzepts nicht ausschließen.

Zu Kapitel 4 Systematisierung und Aufbau der TRAS 320

Die Erfüllung der Betreiberpflichten im Sinne der StörfallV hinsichtlich der umgebungsbedingten Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten kann mit einer methodischen Vorgehensweise erreicht werden, die als Grafik Abbildung 1 in der TRAS 320 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^{23 24 25}. Sie wurden für die zu betrachtenden umgebungsbedingten Gefahrenquellen nur inhaltlich angepasst.

Zu Kapitel 5 Beschreibung der Gefahrenquellen

Um das Verständnis der Vielzahl der Gefahrenquellen zu erleichtern wird in der Abbildung 2 der TRAS 320 unterschieden zwischen:

- I. auslösenden Gefahrenquellen, wie Wind (Tiefdruckstürme oder Tornados), Schnee und Eis

²³ SFK "Leitfaden Anlagensicherheit" (Kapitel 3) SFK-GS-06, November 1995

²⁴ Arbeitskreis des Ministeriums für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg: "Vollzug der §§ 9 und 13 Störfall-Verordnung (12. BImSchV)" (Kapitel 3), März 2002

²⁵ SFK „Risikomanagement im Rahmen der Störfall-Verordnung“ (Kapitel 4.4) April 2004

2. 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. Durch geeignete Vorkehrungen und Maßnahmen können diese verhindert oder in ihrer Wirkung vermindert werden.

Zu Abschnitt 5.1 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 Abschnitt 3: Begriffsbestimmungen. Die durch den natürlichen Wind verursachten statischen und dynamischen Lasten, die auf eine Anlage wirken können, werden in den folgenden Abschnitten erläutert²⁶.

Zu Abschnitt 5.1.1 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.

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 in Betrieben 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.

Zu Abschnitt 5.1.2 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.

²⁶ DIN EN 1991-1-4, Ausgabe Dezember 2012: Eurocode Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

Schlanke, lang gestreckte Tragstrukturen können infolge der Windströmung zudem zu Schwingungen angeregt werden, deren Bewegungen quer zur Anströmrichtung erfolgen²⁷. 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. Nähere Hintergründe finden sich z. B. in Niemann, H.-J.; Peil, U.: „Windlasten auf Bauwerke“²⁷. Sie werden wie folgt zusammengefasst:

1. Formanregung (Galopping)

Formanregung tritt bei Stäben mit kantigen Querschnitten auf. Sie führt zu einer Schwingung mit anwachsenden Amplituden, dem Galopping. 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.

2. 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 Galopping 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.

3. 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.

4. 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

²⁷ Niemann, H.-J.; Peil, U.: Windlasten auf Bauwerke, Stahlbau-Kalender 2003, S. 673-748, Verlag Ernst&Sohn, Berlin

und gehen entsprechend ohne Schwingbewegungen einher. Infolge einer zunehmenden Verringerung der Torsionssteifigkeit bei anwachsenden Windgeschwindigkeiten können Flatterschwingungen ausgelöst werden.

5. 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:

a) 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 Anströmungswinkels 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.

- b) wirbelerregte Querschwingungen
- c) 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 Anlagenteilermüdung 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:

- i. Im Zwischenraum zwischen großen Einzelbauwerken oder Anlagenteilen 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.
- ii. Das Strömungsfeld, das von einem der großen Bauwerke oder Anlagenteile ausgeht, kann an einem zweiten Bauwerk oder Anlagenteil 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.

Zu Abschnitt 5.1.3 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 schwererer 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 Dichtigkeit 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 Schneeschicht immer dichter wird.

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 3 gibt als erste Einschätzung die Größenordnung der unterschiedlichen Schneemassen (Schneelasten) – je nach Einstufung – wieder:

Tabelle 3: Dichte von Schnee in kg/m³

Dichte	Bezeichnung der Schneart
30 bis 50 kg/m ³	trockener, lockerer Neuschnee
50 bis 100 kg/m ³	gebundener Neuschnee
100 bis 200 kg/m ³	stark gebundener Neuschnee
200 bis 400 kg/m ³	trockener Altschnee
300 bis 500 kg/m ³	feuchtnasser Altschnee
150 bis 500 kg/m ³	Schwimmschnee
500 bis 800 kg/m ³	mehrfähriger Firn
800 bis 900 kg/m ³	Eis

Die Größe der Schneebelastung wird in erster Linie vom Standort der Anlage bestimmt. Daneben spielen die geometrischen Form der Bauwerke 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 Niederschlags 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 abtauemdem Schnee an exponierten Stellen des Bauteils Eiskörper bilden und dort zu lokalen Belastungen führen.

Zu Abschnitt 5.2 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile sowie Luftdruckänderungen und -schwankungen

Zu Abschnitt 5.2.1 Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile

Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch den Winddruck bzw. durch Schwingungen Anlagenteile gelöst und durch den Wind zu Projektilen werden. Hierbei können sowohl am Ort der Projektilbildung als auch am Immissionsort, also dem Ort des Projektilaufpralls, Schäden an Anlagenteilen auftreten, die die Sicherheit der Anlagen gefährden. Tankanlagen oder Rohrleitungen, die oftmals direkt in ein Bauwerk führen, können dabei ebenso getroffen werden, wie z. B. Trafostationen, Messfühler, Regelarmaturen oder Kabelverbindungen.

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 für den Aufprall von Fahrzeugen auf sicherheitsrelevante Anlagenteile.

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

Zu Abschnitt 5.2.2 Gefahrenquellen durch Luftdruckänderungen 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 über einen vergleichsweise langen Zeitraum statt, so dass die Druckunterschiede in baulichen und sonstigen Anlagenteilen sich an die Änderungen des atmosphärischen Luftdruck 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 Foliensysteme 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 auftreten und sicherheitsrelevant werden können.

Zu Kapitel 6 Vereinfachte Gefahrenquellenanalyse

Die vereinfachte Gefahrenquellenanalyse hat die Aufgabe, diejenigen Gefahrenquellen zu bestimmen, die auf einen Betrieb einwirken können. Die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten können grundsätzlich im ganzen Bundesgebiet auftreten und können nur unter bestimmten Bedingungen ausgeschlossen werden.

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

Danach ist zu prüfen, welche Gefahrenquellen vernünftigerweise ausgeschlossen werden können, so dass keine Vorkehrungen und Maßnahmen nach § 3 Absatz 1 StörfallV 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 wieder zu berücksichtigen (vgl. Abzweig nach „Identifizierung gefährdeter sicherheitsrelevanter Anlagenteile“ in der Abbildung I 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 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Kriterien zum Ausschluss von Gefahrenquellen

Gefahrenquelle	Kriterium	Beispiele
Wind (Ausnahme Tornados)	eingehauste Anlagen, sofern die Gebäude gemäß DIN EN 1991 mit Einstufung RC3 gegen Wind bemessen sind	Produktionsanlagen, Aufbereitungsanlagen
Wind (einschließlich Tornados)	unter Erdgleiche befindliche Anlagenteile	Rohrleitungen, Tanks
Schnee und Eis	Betriebsbereiche, die mit hoher Temperatur betrieben werden. ^{a)}	Reaktoren, Rohrleitungen, Destillationskolonnen, Lagertanks für Stoffe mit hoher Kristallisationstemperatur, 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, Armaturen
Windbedingte Projektile		
Gefährdung durch Losreißen von sicherheitsrelevanten Anlagenteilen	eingehauste Anlagenteile	
Gefährdung durch Aufschlagen von Projektilen	keine Bauwerke, Anlagen, Maschinen oder Bäume in der Nähe, die als Projektilquelle zu betrachten wären	

a) 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.

Zu Kapitel 7 Detaillierte Gefahrenquellenanalyse

Die detaillierte Gefahrenquellenanalyse dient einer eingehenderen Untersuchung von möglichen Eintrittswahrscheinlichkeiten und 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).

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

Zunächst wird die Einstufung von Anlagen, die der StörfallIV unterliegen, in die Zuverlässigkeitsstufe RC3 gemäß DIN EN 1990 näher erläutert. Diese Einstufung gilt sowohl für die Nachweise gegen Wind- als auch gegen Schnee- und Eiswirkungen. Anschließend werden wegen ihrer hohen Wind- bzw. Böengeschwindigkeiten die Tiefdruckstürme sowie die Tornados näher betrachtet.

Zu Abschnitt 7.1 Statische und dynamische Lasten

Zu Abschnitt 7.1.1 Bezug zu Normen und Zuverlässigkeitsklassen

Für Betreiber gerät ein Tragwerk dann in einen kritischen Zustand, wenn entweder dessen planmäßige Nutzung nicht mehr gewährleistet ist oder wenn eine unmittelbare Gefahr für die Tragsicherheit, im Bauwesen oft als Standsicherheit bezeichnet, besteht. Heutige moderne, weltweite ähnliche Sicherheitskonzepte für Nachweisverfahren zur baulichen Gefahrenabwehr definieren hierfür bestimmte Grenzzustände als Nachweis- oder Bemessungsziele. Je nachdem, ob Versagenssicherheiten oder Gebrauchseigenschaften der Konstruktion das Bemessungsziel sind, wird zwischen

- a) Grenzzuständen der Tragfähigkeit (des Versagens) und
- b) Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

unterschieden. Für beide Grenzzustandssituationen, die im Allgemeinen beide gleichzeitig zu gewährleisten sind, existieren international abgestimmte Mindestwerte (operativer) Eintrittswahrscheinlichkeiten P_f . Letztere werden für Deutschland durch die Europäische Normung CEN sowie das Deutsche Institut für Normung (DIN) bestimmt und mit der Einführung der entsprechenden Norm als Technische Baubestimmung durch die Länder verbindlich.

Für jeden der obigen Grenzzustände ist zu verifizieren, dass während eines festgelegten Bezugszeitraums, beispielsweise der Tragwerksnutzungsdauer, die zu erwartenden Folgen der Einwirkungen E die zugeordneten Tragwerkswiderstände R mit einer festgelegten hohen Wahrscheinlichkeit nicht überschreiten:

$$(I) R \geq E, \Rightarrow Z = R - E \geq 0.$$

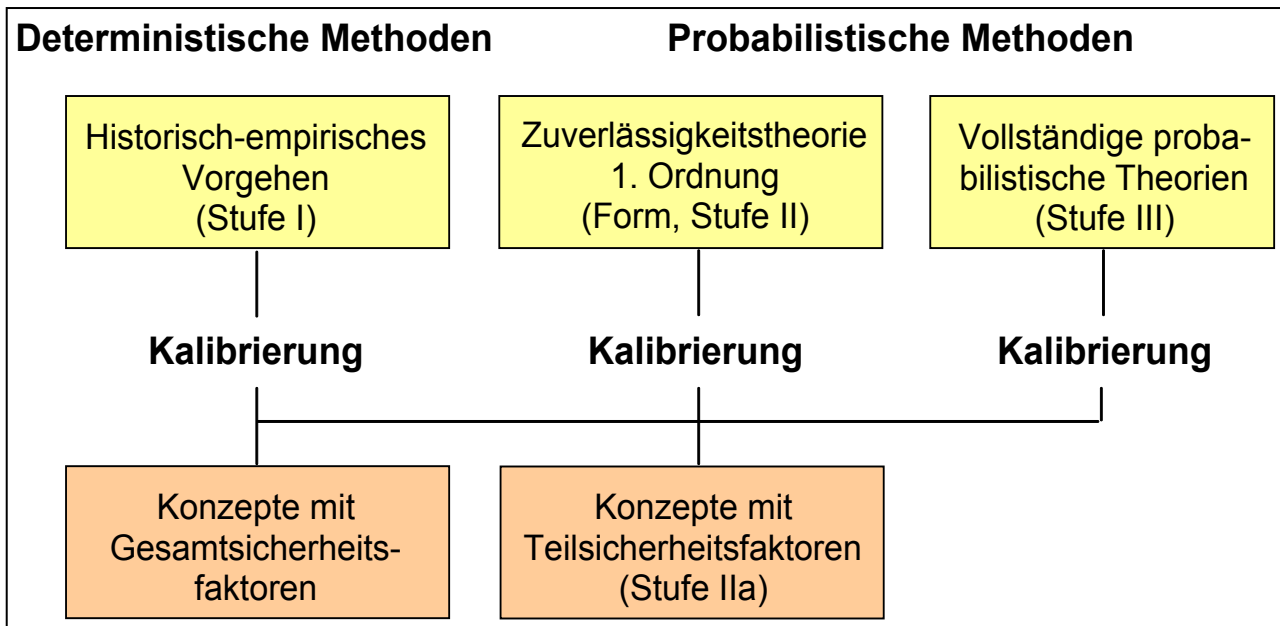
Z bezeichnet man hierin als Sicherheitszone. Beide Größen E und R sind mit Unschärfen stochastischen Charakters behaftet, die mittels probabilistischer Vorgehensweisen über die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsfunktionen erfasst werden können. Z beschreibt somit ebenfalls eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und die gesamte Beziehung einen stochastischen Prozess.

Die modernen Vorgehensweisen der baulichen Gefahrenabwehr basieren auf Methoden der probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie²⁸. Die zur Behandlung empfohlenen Vorgehensweisen sind hierarchisch gestuft, von traditionellen (historischen) Nachweis Konzepten bis hin zu vollständig stochastischen Vorgehensweisen. Einen Überblick hierüber in Anlehnung an den Anhang C der DIN EN 1990²⁹ gibt Abbildung 5.

²⁸ Schuëller, G.I. (1981): Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin.

²⁹ DIN EN 1990 (2010) (Eurocode 0): Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.

Abbildung 5: Überblick über Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse (UFOPLAN 203 48 362)



Jedes moderne zuverlässigkeits-theoretische Nachweis-konzept hat sich mit den statistischen Eigenschaften seiner einwirkenden und widerstehenden Elemente auseinander zu setzen: Alle Tragwerkseigenschaften, die Werkstoffeigenschaften und vor allem die Einwirkungen unterliegen unterschiedlichen Verteilungsfunktionen, statistischen Unschärfen und führen damit zu Sicherheitsstreuungen, welche durch das verwendete Zuverlässigkeitskonzept sicher abgefangen werden müssen.

Historisch gesehen sind Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprobleme in der Technik gemäß Abbildung 5 zunächst mittels Gesamtsicherheitsfaktoren und im Rahmen von sogenannten zulässigen Spannungen behandelt worden. Da die hierin beteiligten Unschärfeparameter, interpretiert als Fraktilwerte der beteiligten Wahrscheinlichkeitsverteilungen, jedoch sehr unterschiedlichen Verteilungsfunktionen entstammen, wurden derartige Sicherheitskonzepte der Stufe I bereits früh als relativ unsicher erkannt³⁰. Bei ihrer Anwendung können unbeabsichtigt sowohl Sicherheitsdefizite als auch erhebliche Sicherheitsüberschüsse auftreten.

Vom mathematischen Standpunkt kann Abhilfe durch gesteigerte Genauigkeit letztlich nur mittels vollständig probabilistischer Zuverlässigkeitskonzepte (Stufe III, SORM: Second-order reliability method) geschaffen werden, welche die spezifischen Eigenschaften der jeweiligen statistischen Verteilungsfunktionen berücksichtigen. Die hierbei einzusetzenden mathematischen Methoden gelten jedoch in der Ingenieurpraxis als so schwierig, dass Theorien der Stufe III in naher Zukunft kaum Eingang in die technische Nachweispraxis finden werden³¹. Sie leiden außerdem unter dem Makel, dass für die sehr seltenen Zustände an der Rändern ihrer Verteilungsfunktionen, den für Zuverlässigkeitsaussagen entscheidenden Bereichen, kaum physikalisch verlässliche Information vorliegen, die Ergebnisse somit entscheidend von physikalisch fragwürdigen mathematischen Funktionseigenschaften abhängen. Allenfalls wäre ein Eingang in linearisierter Form als Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung (Stufe II, FORM: First-order reliability method) denkbar, wie dies beispielsweise im Anhang von DIN 1055-100 (März 2001) erläutert wird. Schätzt man mit dem Ziel einer Vereinfachung die hierbei auftretenden statistischen Verteilungsfunktionen durch geeignete Fraktilwerte ab, so gelangt man zu Zuverlässigkeitskonzepten mittels Partialsicherheitsfaktoren (Teilsicherheitsfaktoren). Diese Stufe IIa gemäß Abbildung 5

³⁰ NABau im DIN (1977): Richtlinie zur Bestimmung der der Sicherheitsmaße im Ingenieurbau (Richtlinie GruSiBau). NABau-Arbeitsausschuss Sicherheit von Bauwerken, Berlin.

³¹ Schuëller, G.I. (1981): Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin.

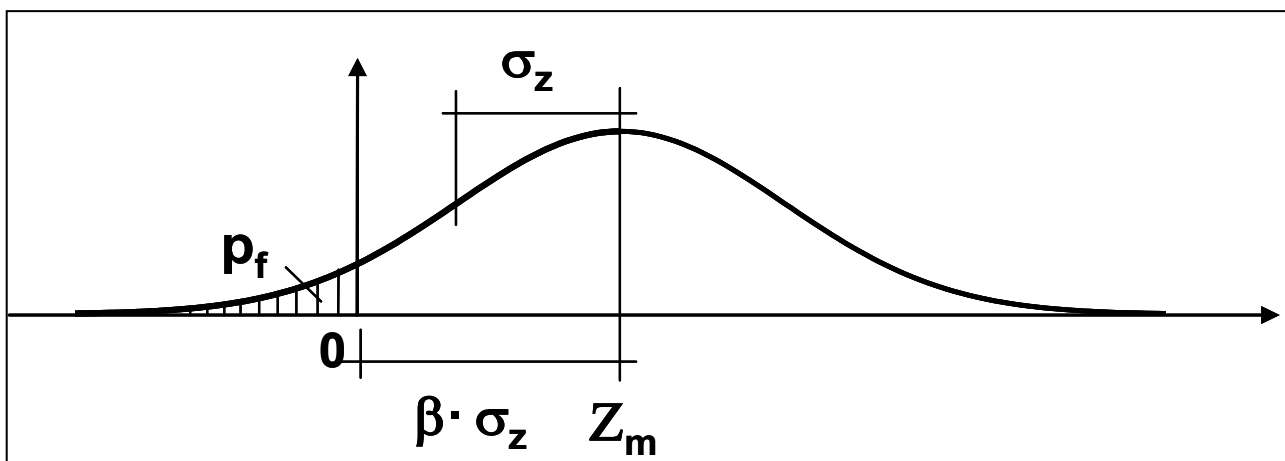
stellt die Basis der ab dem 01. Juli 2012 geltenden DIN-EN-Normen 1990 und 1991 dar, die auf den entsprechenden Eurocodes basieren, den modernen Europäischen Baunormen und Nachweisformaten vieler weiterer Länder.

Schwachpunkt aller deterministischen und probabilistischen Zuverlässigkeitstheorien bildet stets deren Kalibrierung an der technischen Realität. Tragwerksversagen stellt einen äußerst unwahrscheinlichen Grenzfall für seltene Extremereignisse dar, häufig zusätzlich gekoppelt an menschliches Versagen. Da letzteres im Zusammenhang mit technischen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen als rational nicht erfassbar ausgeklammert werden muss, sind vertrauenswürdige statistische Unterlagen über bauliche Versagensfälle äußerst rar.

Im Rahmen von Zuverlässigkeitskonzepten der Stufe IIa, die in ihren technischen Nachweisproblemen mit Partialsicherheitsfaktoren arbeiten und daher auch als semi-probabilistisch bezeichnet werden, wird der Zuverlässigkeitsindex β als Maß für die Sicherheit einer vorliegenden Tragwerkssituation betrachtet. Ausgehend von Gleichung 1 repräsentieren sowohl der Tragwerkswiderstand R als auch der Einwirkungseffekt E infolge kombinierter Tragwerkseinwirkungen grundsätzlich Zufallsverteilungen. Deshalb besitzt natürlich auch die Sicherheitszone Z statistische Eigenschaften:

Alle Werte $Z > 0$ garantieren das Überleben des Tragwerks, Werte $Z < 0$ sein Versagen und der Zustand $Z = 0$ beschreibt gerade die Grenze zwischen Versagen und Überleben. Diese Grenze bezeichnet man als Grenzzustandsfunktion $g: R - E = 0$. Sind sowohl R als auch E normalverteilt (Gauss-verteilt), so gilt dies auch für Z . Üblicherweise gehorchen R und E andere Verteilungsfunktionen. Dennoch wird auch dann die Sicherheitszone Z gern als normalverteilt vorausgesetzt. Dies stellt eine näherungsweise geltende Praktikabilitätsannahme dar, die aber wegen der geringen Wahrscheinlichkeiten für $Z < 0$ allgemein als konfident angesehen wird.

Abbildung 6: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Sicherheitszone Z



Damit wird deutlich, dass die Tragwerkssicherheit grundsätzlich nur durch Wahrscheinlichkeitsaussagen bewertet werden kann. Die Wahrscheinlichkeit $(1-P_f)$ dafür, dass Versagen nicht eintritt, d.h. dass für die Sicherheitszone Z die Überlebensaussage $Z > 0$ gilt, ist ein Maß für die Zuverlässigkeit des Tragwerks. Aus Abbildung 6 erkennt man, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit umso höher liegt, je größer der Mittelwert Z_m der Sicherheitszone Z im Verhältnis zu deren Standardabweichung σ_z ist. Umgekehrt gilt natürlich auch, dass die Versagenswahrscheinlichkeit P_f als Maß für die Wahrscheinlichkeit eines Tragwerkversagens umso geringer bleibt, je größer dieser Verhältniswert ist. Er wird daher als Sicherheits- oder Zuverlässigkeitsindex β bezeichnet und zur Quantifizierung sowohl der Überlebenswahrscheinlichkeit $(1-P_f)$ als auch der Versagenswahrscheinlichkeit P_f verwendet:

$$(2) \beta = Z_m / \sigma_z.$$

Dieses Modell ist Grundlage sowohl der DIN EN 1990 als auch der früheren DIN 1055-100: *Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*. In ihr wird für den Sicherheitsindex β im Grenzzustand der Tragfähigkeit ein Zielwert von $\beta = 4,7$ gefordert. Das entspricht einer Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f \approx 1,25 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr. Mit anderen Worten: das Überleben der Konstruktion ist mit einem Wert der Überlebenswahrscheinlichkeit von $(1 - 1,25 \cdot 10^{-6})$ ein nahezu sicheres Ereignis. Die Standardabweichung der Streuungen der Sicherheitszone ist eine

Funktion der Standardabweichungen der widerstehenden Größen R sowie der schädigenden Größen, insbesondere der Einwirkungen S. Sie wird aus praktischen Gründen im Rahmen der sogenannten First Order Reliability Method (FORM) linearisiert:

$$(3) \sigma_z = \alpha_R \sigma_R - \alpha_S \sigma_S$$

Die Linearfaktoren σ gewichten die unterschiedlichen Beiträge der Streuungen des Tragwerkswiderstands bzw. der einzelnen Einwirkungen zur Streuung der Sicherheitszone. Dabei ist das Vorzeichen σ_S der schädigenden Größen vereinbarungsgemäß negativ. Durch den geforderten Wert für den Sicherheitsindex β wird gleichzeitig die maximale Überschreitungswahrscheinlichkeit für den Bemessungswert einer Einwirkung, F_d , festgelegt:

$$(4) P(F > F_d) = \Phi(\alpha_F \beta)$$

Φ ist die Standardnormalverteilung. Die Anhänge der DIN EN 1990 und der zuvor angewandten DIN 1055-100 enthalten pauschale Werte für die Wichtungsfaktoren aller Einwirkungstypen.

Am Beispiel der Einwirkung Wind wird die Herleitung des Teilsicherheitsfaktors und der Kombinationsbeiwerte erläutert und die Konsequenz der Einstufung in RC3 dargestellt.

Wendet man diese vereinfachend auf die Windlast an, so ergeben sich folgende Fälle:

1. Die Windlast ist Leiteinwirkung und ihre Streuung dominiert. Dann wird $\alpha_F = -1$ angesetzt, und die maximal zulässige Überschreitungswahrscheinlichkeit des Bemessungswertes F_d der Windlast ergibt sich zu

$$P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-1 \mid 4,7) = 1,25 \cdot 10^{-6}$$

2. Die Windlast ist Leiteinwirkung und ihre Streuung dominiert nicht. Dann ist $\alpha_F = -0,7$ und die maximal zulässige Überschreitungswahrscheinlichkeit des Bemessungswertes der Windlast ist

$$P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-0,7 \mid 4,7) = 5 \cdot 10^{-4}$$

3. Die Windlast ist Begleiteinwirkung und ihre Streuung dominiert. Dann ist $\alpha_F = -0,7$ und

$$P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-0,7 \mid 4,7) = 5 \cdot 10^{-4}$$

4. Die Windlast ist Begleiteinwirkung und ihre Streuung dominiert nicht. Dann ist $\alpha_F = -0,4$ $0,7 = -0,28$ und

$$P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-0,28 \mid 4,7) = 10^{-1}$$

In seltenen Fällen überwiegt die Streuung der Windlast so stark, dass die Fälle (1) oder (3) vorliegen. Die Fälle (2) und (4) sind die Regel. Sie werden etwas genauer betrachtet. Um das Windlastniveau für die Bemessung festzulegen, wird das 10-min Mittel der Windgeschwindigkeit als Basisvariable herangezogen. Die Windlast hängt mit ihm quadratisch zusammen. Für den Bemessungswert der Windlast F_{wd} gilt:

$$(5) F_{wd} = C_{aero} \cdot v_d^2$$

Dabei ist C_{aero} ein Faktor, der die aerodynamische Übertragung von quadrierter Windgeschwindigkeit in Windlast erfasst; er schließt u. a. die aerodynamischen Beiwerte und die Böenwirkung ein. v_d bezeichnet die Bemessungswindgeschwindigkeit.

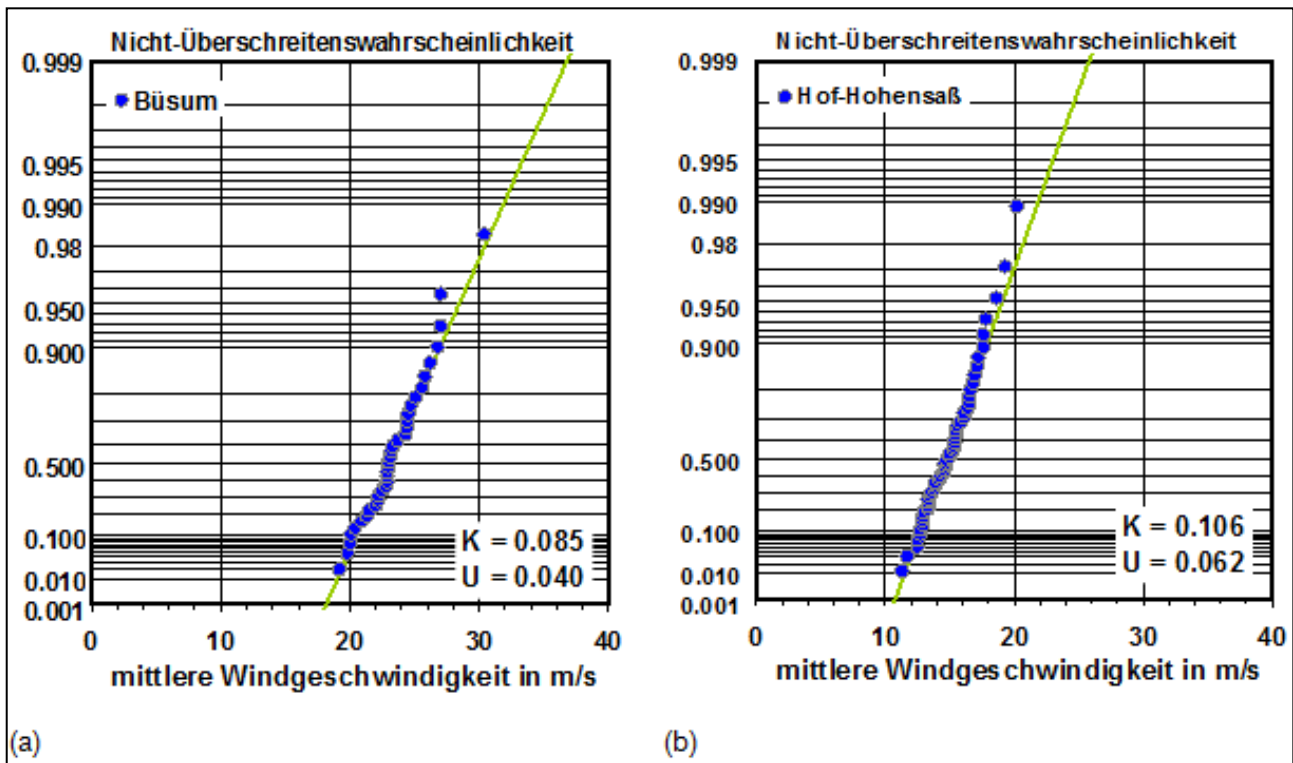
Die Bemessungswindgeschwindigkeit ergibt sich nun mit den oben angegebenen Sicherheitsvorgaben aus der Statistik der mittleren Windgeschwindigkeit. Man benutzt als Extremwertverteilung die Gumbelverteilung vom Typ I sowie als Datenbasis die jährlichen Maxima der mittleren Windgeschwindigkeit, die unabhängig von der Windrichtung betrachtet werden. Die Messung muss unter den Standardbedingungen der World Meteorological Organisation erfolgen. Die

Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert v der Geschwindigkeit nicht überschritten wird, lässt sich so mit folgendem Ausdruck berechnen:

$$(6) \quad P(\leq v) = F(v) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{1}{K}\left(\frac{v}{U}-1\right)\right]\right\}$$

K ist der sogenannte Formbeiwert, U der Modalwert der Verteilung. Beide Parameter werden durch Anpassung der Verteilungsfunktion an die Messdaten einer meteorologischen Station in einem speziellen Wahrscheinlichkeitspapier gewonnen. Abbildung 7 zeigt das Vorgehen anhand zweier Beispiele auf.

Abbildung 7: Wahrscheinlichkeitsverteilung $F(v)$ der Extremwerte der mittleren Windgeschwindigkeit



für (a) Nordseeküste und (b) Süddeutschland

Für den Formparameter benutzt man $K = 1/10$ als eine im europäischen Windklima brauchbare Näherung. Die mittlere Windgeschwindigkeit v zu einem gewählten Wahrscheinlichkeitsniveau P ergibt sich daraus zu:

$$(7) \quad v = U \cdot \left\{1 - K \cdot \ln[-\ln(P(\leq v))]\right\}$$

Ist die Windlast Leiteinwirkung, d.h. $P(v < v_d) = 1 - P(v > v_d) = 1 - 5 \cdot 10^{-4}$ (Fall 2), so ergibt sich die Entwurfsgeschwindigkeit zu

$$(8) \quad v_{md} = 1,760 U$$

Ist die Windlast dagegen lediglich Begleiteinwirkung, so erhält man analog (Fall 4)

$$(9) \quad v_{md} = 1,225 U$$

Die Bemessungswerte der Windlast sind sehr seltene Ereignisse, deren Wiederkehrperiode zumeist viel größer ist, als der Zeitraum, für den Beobachtungsergebnisse zur Verfügung stehen. Entsprechend unsicher ist die Extrapolation mit Hilfe

einer Modellannahme über die Wahrscheinlichkeitsverteilung, nämlich derjenigen, dass die Gumbelverteilung das statistische Verhalten der Windgeschwindigkeit zutreffend beschreibt. Im Sicherheitskonzept der DIN EN 1990 werden deshalb nicht direkt die Bemessungswerte F_d benutzt. Vielmehr wird ein charakteristischer Wert F_k eingeführt, der häufiger eintritt und insoweit mit viel größerer statistischer Sicherheit angegeben werden kann. Die Norm legt dafür generell bei allen veränderlichen Einwirkungen eine Nicht-Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,98 pro Jahr, mit anderen Worten eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren fest. Für die charakteristische Windgeschwindigkeit ergibt sich

$$(10) \quad v_{mk} = 1,390 U$$

Die Bemessungswerte sind durch den Teilsicherheitsbeiwert γ und den Kombinationsbeiwert Ψ_0 mit dem charakteristischen Wert verknüpft. Ist die Windlast Leiteinwirkung, so gilt

$$(11) \quad F_{wd} = \gamma_w \cdot F_{wk}$$

ist sie dagegen nur Begleiteinwirkung, so ist der Bemessungswert mit dem Kombinationsbeiwert Ψ_0 abzumindern

$$(12) \quad F_{wd} = \Psi_0 \cdot \gamma_w \cdot F_{wk}$$

Man erhält, je nach vorliegendem Fall:

$$(13) \quad F_{wk} = C_{aero} \cdot (1,390 U)^2$$

$$(14) \quad F_d = \gamma_w \cdot F_{wk} = C_{aero} \cdot (1,760 U)^2 \text{ Leiteinwirkung}$$

$$(15) \quad F_d = \Psi_0 \cdot \gamma_w \cdot F_{wk} = C_{aero} \cdot (1,225 U)^2 \text{ Begleiteinwirkung}$$

Daraus ergibt sich der Teilsicherheitsbeiwert zu

$$(16) \quad \gamma_w = \frac{F_{wd}}{F_{wk}} = \left(\frac{1,760}{1,390} \right)^2 = 1,603$$

In der DIN EN 1990 wird für alle nichtständigen Einwirkungen (sie sind mit dem Symbol Q bezeichnet) einheitlich der Wert $\gamma_Q = 1,5$ festgelegt. Für den Kombinationsbeiwert ergibt sich

$$(17) \quad \Psi_{0w} = \frac{F_{wd}(\text{Begleiteinwirkung})}{F_{wd}(\text{Leiteinwirkung})} = \left(\frac{1,225}{1,760} \right)^2 = 0,484$$

In der DIN EN 1990 wird für der Kombinationsbeiwert die Windlast der $\Psi_{0w} = 0,6$ festgelegt, der Normwert liegt also um 24% höher.

Die DIN EN 1990 über die Grundlagen der Tragwerksplanung bietet die Möglichkeit, die bautechnische Sicherheit zu differenzieren. Sie führt 3 Schadensfolgeklassen CC I bis 3 und zugehörige Zuverlässigkeitsklassen RC I bis RC 3 ein. Die folgende Tabelle 5 gibt einen Überblick.

Tabelle 5: Schadenfolge- und Zuverlässigkeitsklassen nach DIN EN 1990

Schadensfolge- bzw. Zuverlässigkeitsklasse	Merkmale	Mindestwert für den Sicherheitsindex β , Bezugszeitraum 1 Jahr
CC 3 / RC 3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder Umweltschäden	5,2
CC 2 / RC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben,	4,7
CC 1 / RC 1	beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder Umweltschäden	4,2

Die Zuverlässigkeitsklasse RC 2 für mittlere Versagensfolgen mit dem Sicherheitsindex $\beta = 4,7$ ist Grundlage für die festgelegten, oben angegebenen Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte. Für Anlagen mit hohen Schadensfolgen ist $\beta = 5,2$ maßgebend entsprechend einer Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f = 10^{-7}$. Sie ist also etwa um den Faktor 7,7 geringer als bei RC 2. Im Ergebnis empfiehlt die DIN EN 1990, in den Zuverlässigkeitsklassen RC 1 bis 3 den Teilsicherheitsbeiwert für die veränderlichen Einwirkungen mit 1,35 bei RC 1, 1,5 bei RC 2 und 1,65 bei RC 3 anzusetzen. Darüber hinaus empfiehlt sie als begleitende Maßnahmen die Anwendung entsprechender Stufen bei der Überwachung von Planung und Herstellung. Definitionsgemäß können von Betriebsbereichen aufgrund von Art und Menge der darin vorhandenen gefährlichen Stoffe Störfälle ausgehen. 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 I 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. Durch die TRAS 320 wird deshalb eine Einstufung der sicherheitsrelevanten Anlagen in Betriebsbereichen in die Klasse CC 3 / RC 3 vorgenommen. Die Anwendung der Anforderungen der TRAS 320 auf immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen wird empfohlen, da und soweit diese schädliche Umwelteinwirkungen hervorzurufen oder in anderer Weise die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft gefährden können.

Das vorgestellte semi-probabilistische Verfahren ist die Grundlage des Teilsicherheitskonzeptes der DIN EN 1990. Die Erhöhung der Teilsicherheitsbeiwerte, welche innerhalb der TRAS zur Erzielung einer höheren Jährlichkeit über die Einstufung von Anlagen in Betrieben in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 vorgenommen wurde, ist eine vereinfachte aber mit Hilfe der gängigen Mittel gut anwendbare Methode.

An dieser Stelle sei der Vollständigkeit halber ebenfalls auf weiterführende und komplexere Methoden zur Differenzierung der Zuverlässigkeit hingewiesen, welche in der DIN EN 1990 Anhang B bis D ergänzend erwähnt und beschrieben werden. Wird unter Anwendung dieser Methoden eine gleiche Zuverlässigkeit eines Anlagenteils hinsichtlich Wind-, Schnee- und Eislasten erzielt und diese Gleichwertigkeit gegenüber den zuständigen Bau- und Immissionsschutzbehörden nachgewiesen, können diese ebenfalls angewendet werden. Dieses gilt an den jeweiligen Stellen, in denen die TRAS 320 oder auch die Hinweise und Erläuterung auf die Erhöhung der Teilsicherheitsbeiwerte zur Erhöhung der Zuverlässigkeitsklasse eingehen.

Zu den begleitenden Maßnahmen bei Planung und Herstellung finden sich Regelungen in Kapitel 10 der TRAS 320.

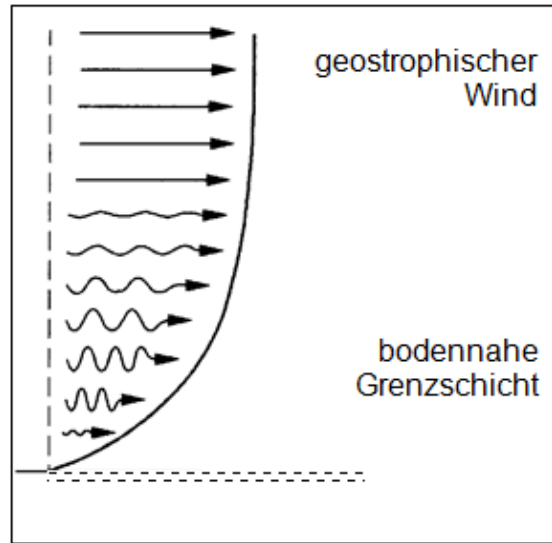
Zu Abschnitt 7.1.2 Windlasten

Tiefdruckstürme werden, wenn die Windeinwirkungen auf Bauwerke, Anlagen und Anlagenteile zu erfassen sind, als ein horizontal gerichtetes, paralleles Strömungsfeld verstanden. Zwischen dem Boden und der Luftströmung der freien Atmosphäre bildet sich dabei eine turbulente Strömungsgrenzschicht, die sogenannte atmosphärische Grenzschicht aus, wie Abbildung 8 verdeutlicht. Um die Eigenschaften der turbulenten Strömung zu erfassen, trennt man den Vorgang in die mittlere, zeitlich konstante Geschwindigkeit und die ihr überlagerten turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen auf. Die mittlere Windgeschwindigkeit ist dabei definiert als Mittelwert über ein Zeitintervall von 10 Minuten. Diese Werte werden von den Wetterdiensten aufgezeichnet und bilden die Grundlage für die Festlegungen in den Windlastnormen.

In der Bodengrenzschicht nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit mit wachsendem Bodenabstand zu. Dagegen ist die Turbulenz in der bodennahen Grenzschicht, der sogenannten Prandtlschicht, zunächst konstant. Sie nimmt oberhalb davon kontinuierlich bis auf null (in einer Höhe von mehreren Kilometern) ab.

Abbildung 8 soll die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeiten von der Höhe über dem Boden verdeutlichen.

Abbildung 8: 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.

Zur Beschreibung der mittleren Windgeschwindigkeit verwendet man u. a. das logarithmische Windprofil. Es gilt in der Prandtlschicht, die bis in eine Höhe von ca. 70 m über Grund reicht. Das logarithmische Windprofil wird wie folgt beschrieben:

$$(18) \quad u(z) = u_r(z_0) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)}$$

mit: $u(z)$ mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe z ;

$u_r(z_0)$ Referenzgeschwindigkeit in Referenzhöhe z_r in der betrachteten Geländekategorie;

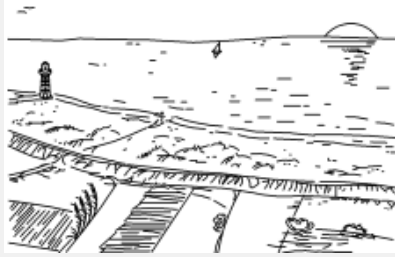

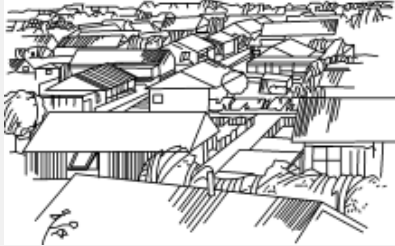
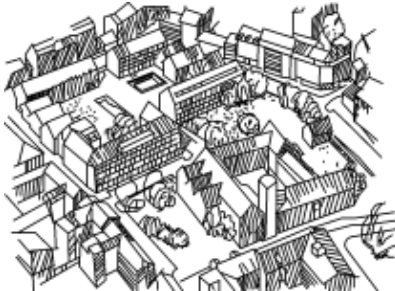
z Höhe über Grund;

z_0 aerodynamische Rauigkeitslänge.

Tabelle 6 gibt die zugehörigen Rauigkeitslängen z_0 für unterschiedliche Geländekategorien an. Die Referenzhöhe ist durch Europäische Normung mit 10 m über Grund festgelegt. Die Referenzgeschwindigkeit hängt von der Windzone und der Geländekategorie ab. In den europäischen Windzonenkarten ist sie für die Geländekategorie II als Referenzgelände angegeben. Wegen der Umrechnung zwischen unterschiedlichen Geländekategorien siehe Niemann, H.-J.; Peil, U.: „Windlasten auf Bauwerke“³².

³² Niemann, H.-J.; Peil, U.: Windlasten auf Bauwerke, Stahlbau-Kalender 2003, S. 673-748, Verlag Ernst&Sohn, Berlin

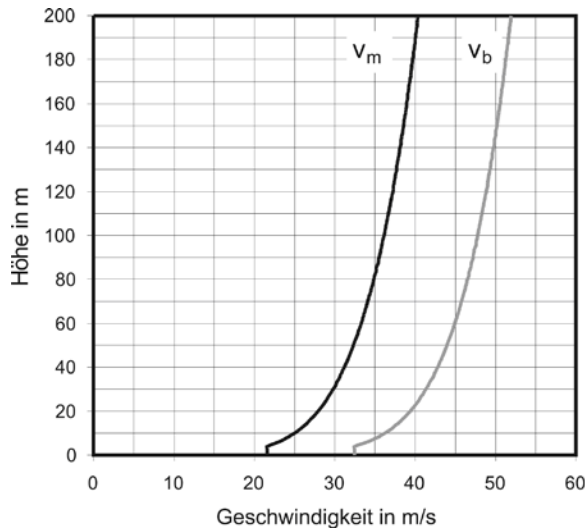
Tabelle 6: Aerodynamische Rauigkeitslängen

Geländekategorie	Beispiel
<p>Geländekategorie I</p> <p>Offene See; Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung; glattes, flaches Land ohne Hindernisse</p> <p>$z_0 = 0,01 \text{ m}$</p>	
<p>Geländekategorie II</p> <p>Gelände mit Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen, z. B. landwirtschaftliches Gebiet</p> <p>$z_0 = 0,05 \text{ m}$</p>	
<p>Geländekategorie III</p> <p>Vorstädte, Industrie- oder Gewerbegebiete; Wälder</p> <p>$z_0 = 0,30 \text{ m}$</p>	
<p>Geländekategorie IV</p> <p>Stadtgebiete, bei denen mindestens 15% der Fläche mit Gebäuden bebaut ist, deren mittlere Höhe 15m überschreitet</p> <p>$z_0 = 1,05 \text{ m}$</p>	

Bilder: © DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Die mittlere Windgeschwindigkeit reicht als Grundlage für die Windlasten nicht aus. Vielmehr müssen die Geschwindigkeitserhöhungen infolge der Windböigkeit erfasst werden. Man benutzt dazu die einhüllende Böengeschwindigkeit. Abbildung 9 zeigt die Vergrößerung der mittleren Windgeschwindigkeit durch die Böigkeit des natürlichen Windes.

Abbildung 9: Windgeschwindigkeitsprofile der mittleren Windgeschwindigkeit und der Böengeschwindigkeit für Geländekategorie II (Referenzgelände)

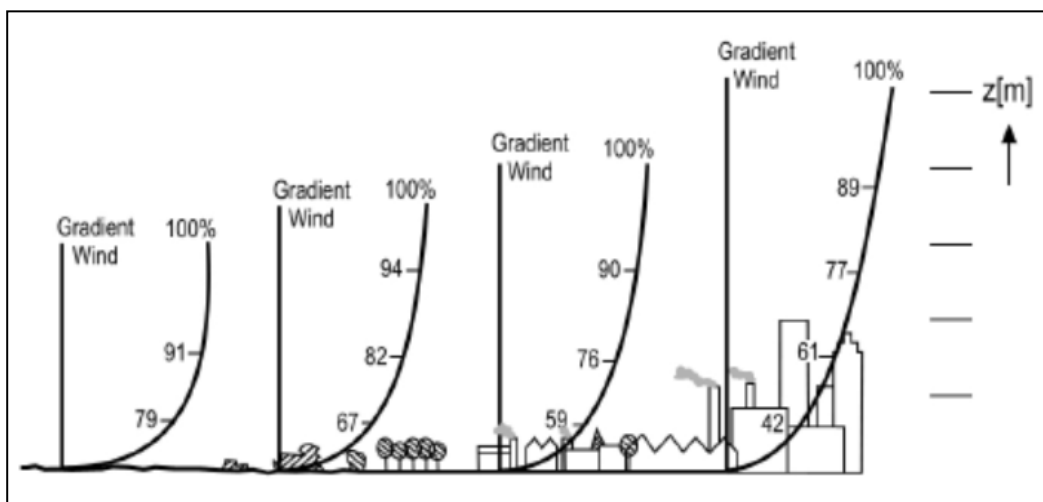


V_b = Böengeschwindigkeit

V_m = mittlere Windgeschwindigkeit

Den Einfluss der Geländekategorie auf die mittlere Windgeschwindigkeit illustriert schließlich die Abbildung 10.

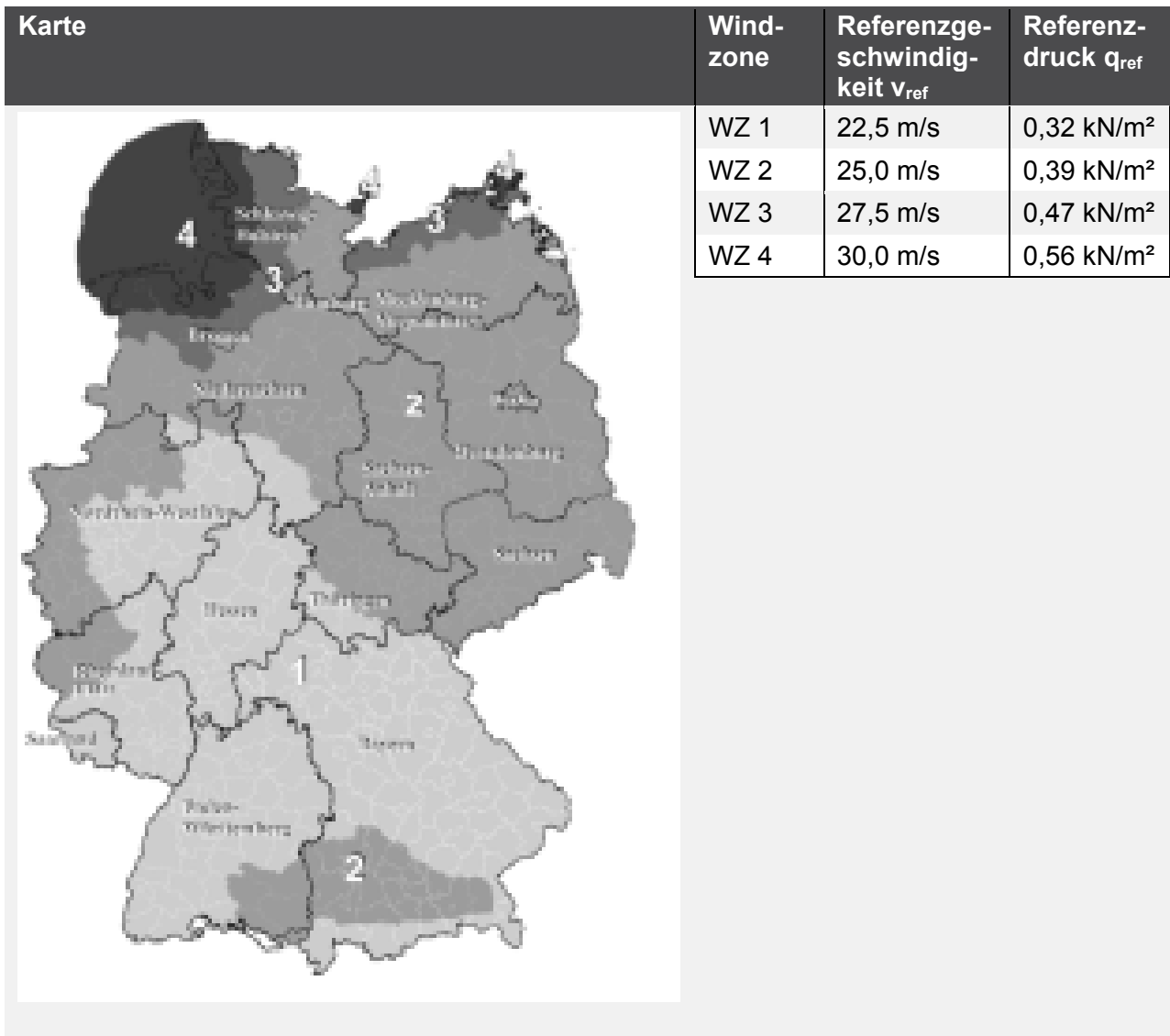
Abbildung 10: Windgeschwindigkeitsprofile in Abhängigkeit von der Bodenrauigkeit



Die mittlere Windgeschwindigkeit am Anlagenstandort ist Grundlage zur Ermittlung der Böengeschwindigkeit. Sie hängt von der Windzone, in der die Anlage liegt, und von der Geländekategorie ab. Sie wird anhand einer Basisgeschwindigkeit ermittelt, die in der Windzonenkarte im Deutschen Nationalen Anhang der DIN EN 1991-1-4 (Abbildung 11) angegeben ist. Die Werte gelten für 10 m Höhe über Grund in ebenem, offenem Gelände. Sie sind beschränkt auf Standorte bis in einer Meereshöhe von 800 m über NN. Sie gelten nicht für Kamm- und Gipfelflagen der Mittelgebirge.

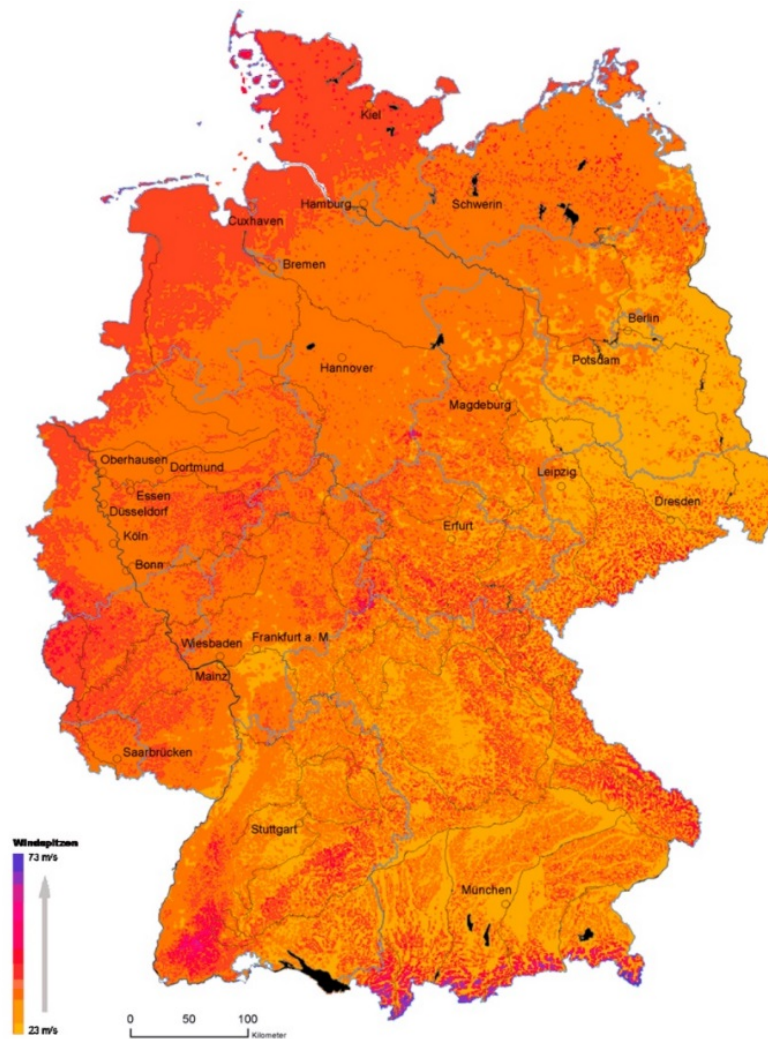
Der genaue Verlauf der Zonengrenzen kann beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) abgefragt werden. Die Regelung obliegt jedoch den obersten Baubehörden der Bundesländer und kann im Detail von der Liste des DIBt abweichen.

Abbildung 11: Windzonenkarte der DIN EN 1991-1-4



Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat auf Veranlassung des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenvorsorge (BBK) eine flächendeckende Karte zur Einschätzung der Sturmgefahren in Deutschland erarbeitet. Basisgröße ist dabei die Böenwindgeschwindigkeit als 3-Sekundenmittelwert. 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 12 zeigt exemplarisch die Verteilung der 100-Jahres Windspitzen. Für diese Böenwindgeschwindigkeit 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.

Abbildung 12: Sturmkarte des DWD: Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 100 Jahren³³



(© DWD Deutscher Wetterdienst)

In Tabelle 7 sind zum Vergleich die Böengeschwindigkeiten nach DIN EN 1991-1-4 in Abhängigkeit von der Windzone, der Geländekategorie sowie der Jährlichkeit angegeben. Maßgebend für die Gefahrenquellenanalyse der TRAS 320 ist die Jährlichkeit von 100 Jahren. Die den Böenwerten in Tabelle 7 zugrunde liegende Zonierung entstammt der Windzonenkarte von Abbildung 11.

³³ Augter G.; Roos M. (2011): Berechnung von Sturmintensitäten für Deutschland, Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nummer 236, Offenbach

Tabelle 7: Böengeschwindigkeiten nach DIN EN 1991-1-4

Windzone	Geländekategorie	Böengeschwindigkeit V_p in m/s 10 m Höhe über Grund			
		R=50a	R=100a	R=500a	R=1000a
		1,000 ^{b)}	1,050 ^{b)}	1,166 ^{b)}	1,216 ^{b)}
1	GK I	36,2	38,0	42,2	44,1
	GK II	32,6	34,2	38,0	39,7
2	GK I	40,2	42,2	46,9	48,9
	GK II	36,2	38,0	42,2	44,1
3	GK I	44,2	46,5	51,7	53,9
	GK II	39,9	41,9	46,5	48,5
4	GK I	48,3	50,7	56,3	58,7
	GK II	43,5	45,7	50,7	52,9

b) Erhöhungsfaktor für die Jährlichkeit

Beim Vergleich der Böengeschwindigkeit der Windlastnorm mit denen der Sturmkarte Abbildung 12 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 Standort 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 oben angegebene Sturmkarte enthält keine Angabe über die Entwicklung des Böenprofils.

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.

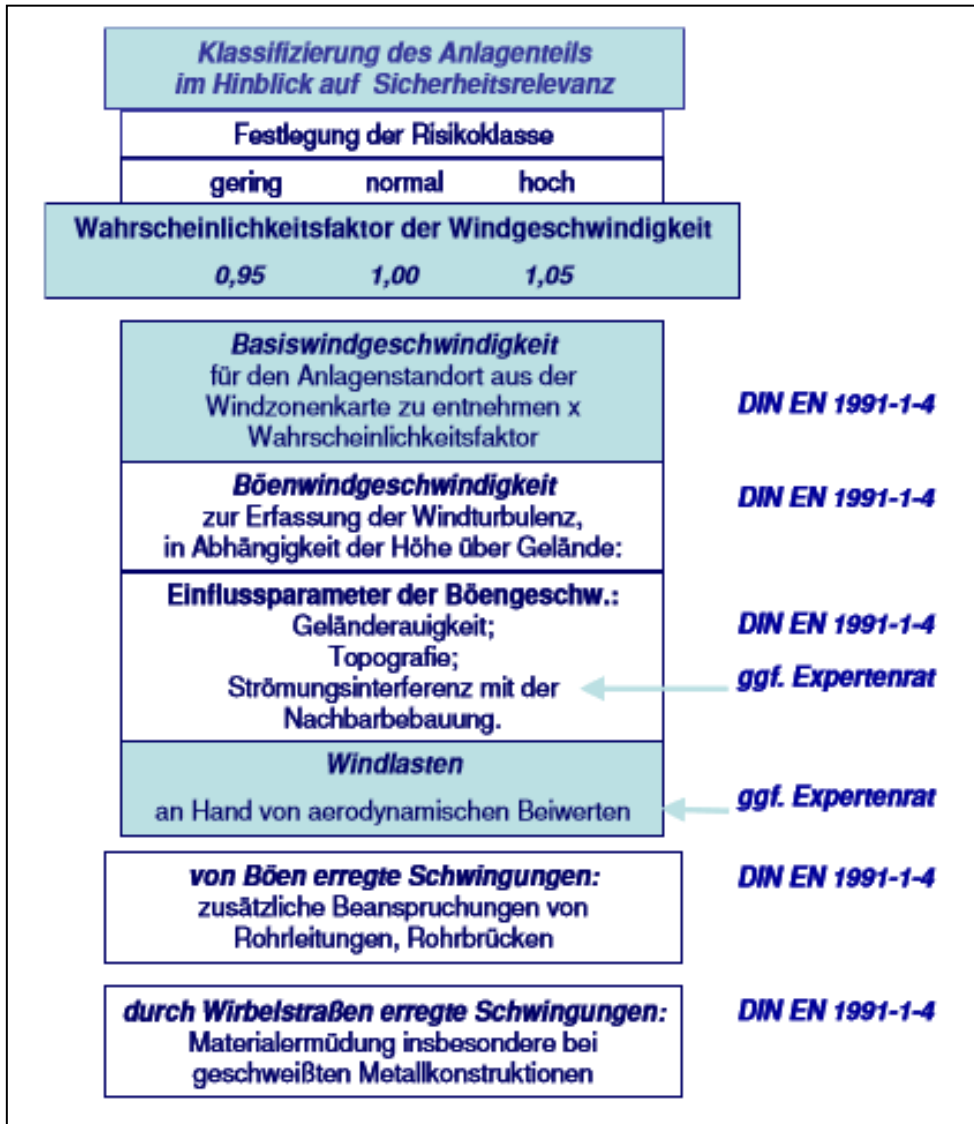
Abbildung 13 zeigt zusammenfassend den Ablauf einer Windlastermittlung für ein Anlagenteil.

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 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 verfahrenstechnische 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 geeignet ist. Mögliche Einschränkungen sind der Norm zu entnehmen.

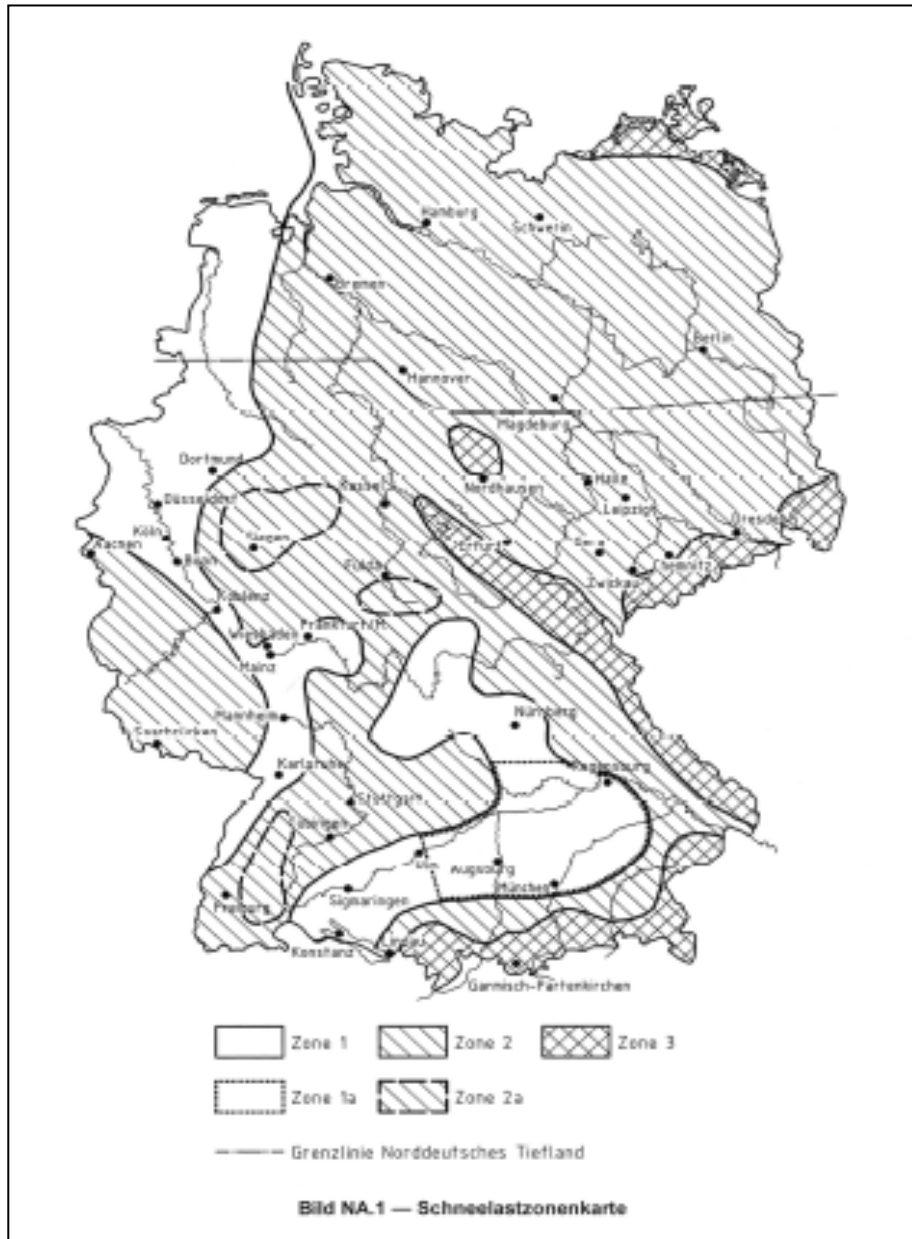
Abbildung 13: Für den Nachweis von baulichen Anlagen zu berücksichtigende Einwirkungen infolge der Gefahrenquelle Wind



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.I der Windlastnorm DIN EN 1991-1-4 zwei Verfahren zur Verfügung. Das erste Berechnungsverfahren in Anhang E.I.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.I.5.3 der Norm (Spektralmethode) gilt für den Grenzfall turbulenzfreier Windströmung, wie sie in den Küstenregionen Nordeuropas auftritt. Das Verfahren nach Anhang E.I.5.3 liefert in der Regel Berechnungsergebnisse, die deutlich auf sicherer Seite liegen. Es kann bei hohem Schadenspotential einer Anlage oder eines Anlagenteils zur Anwendung kommen.

Zu Abschnitt 7.1.3 Schnee- und Eislasten

Abbildung 14: Schneelastzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2010, Nationaler Anhang DIN EN 1991-1-3



© DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

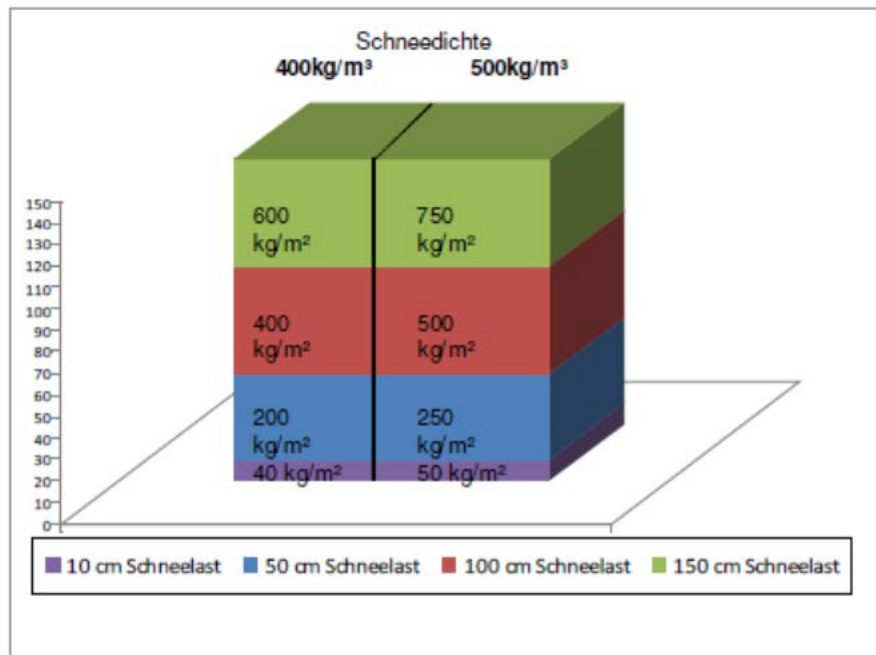
Die Größe der Schneebelastung eines Baukörpers wird in erster Linie vom Standort des Bauwerks bestimmt. Daneben spielen die geometrischen Form der Bauwerke oder Anlagenteile, auf die der Schnee einwirkt, sowie ihre gegenseitige Anordnung eine erhebliche Rolle. Diese Abhängigkeit entsteht vornehmlich durch die Wechselwirkung von Schneefall und Wind. Durch Wind kann gefallener Schnee in großem Maße versetzt werden, 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 geeigneten 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

Bauwerke, Anlagen- und Maschinenteile eines Betriebs kommen kann. Daher ist die Gefahren-quelle Schneelast in komplexen Produktionsanlagen für einzelne Anlagen und Anlagenteile stets separat zu untersuchen.

Die Abbildung 15 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 Anlagen und Anlagenteile über die Bedeutung der Schneedichte im Klaren sein sollte.

Abbildung 15: Verdeutlichung der Höhe der Schneelast in Abhängigkeit von der Schneedichte



Der in Deutschland am häufigsten auftretende Schnee ist gebundener Neuschnee bis feuchtnasser Altschnee. Für dessen Dichte stellen 400 kg/m³ einen guten Mittelwert dar. Mit diesem Mittelwert ergibt sich, dass Schneehöhen von knapp unter 20 cm auf einer ebenen Fläche bereits die Lastgrenze (75 kg/m²) eines üblichen Bauwerks in einem mittleren Standort in Deutschland darstellen. Bei sehr ungünstigen Verhältnissen kann bereits bei einer Schneehöhe 15 cm die Last von 75 kg/m² erreicht werden.

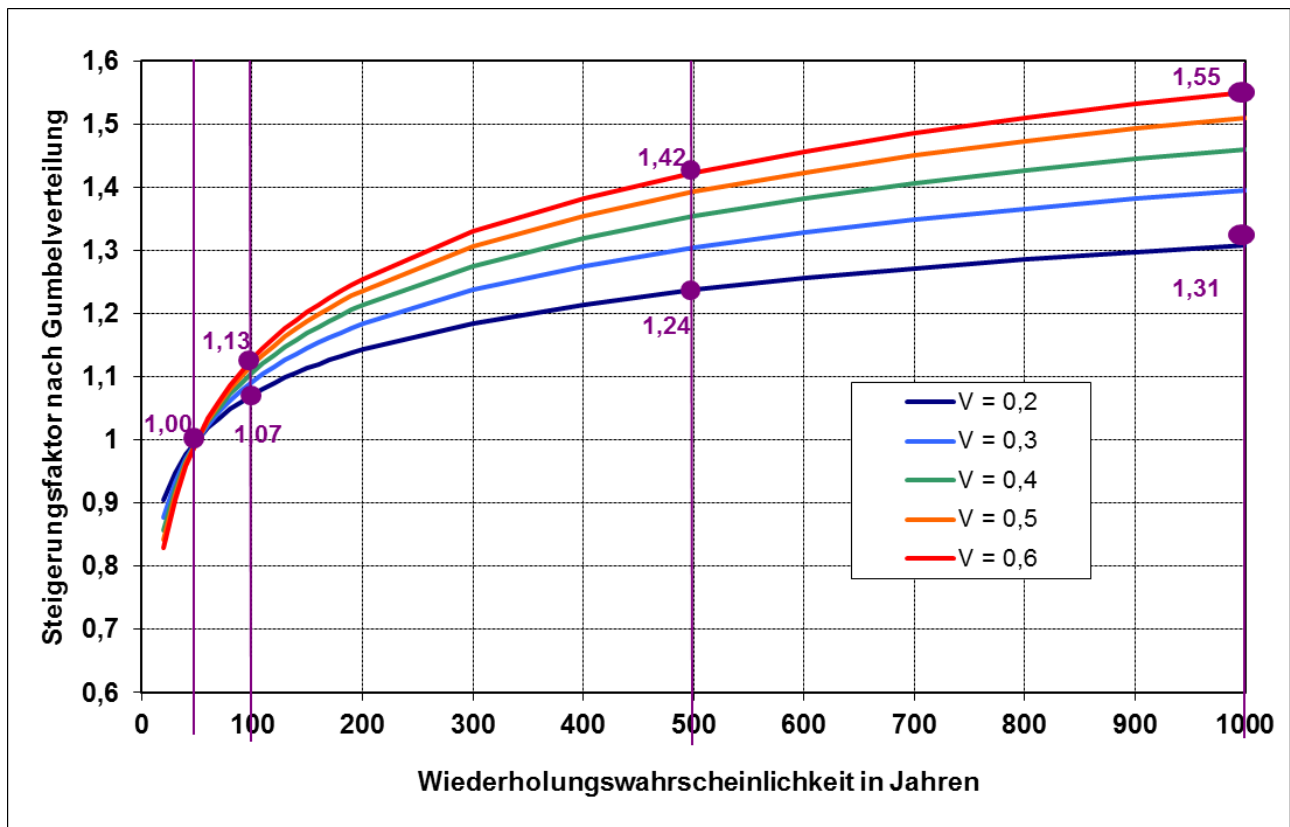
Eine Schneedichte von >500 kg/m³ ist jedoch nur bei mehrmaligen Schneereignissen zu erwarten, da der dichteerhöhende Prozess nur durch permanenten Druck durch neue Schneeschichten auf den alten Schnee erfolgt.

Aufgrund der Vielzahl von beeinflussenden Faktoren lassen sich keine Regelwerte für die Schneedichte angeben.

Mit den zu Beginn der Erläuterungen zu Abschnitt 7 am Beispiel der Windbelastung hergeleiteten Zusammenhängen zwischen der Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 und der Jährlichkeit des betrachteten Ereignisses lässt sich in gleichem Maß die somit erzielte Jährlichkeit von 100 Jahren bei der Schneelast begründen.

Abbildung 16 zeigt diesen Zusammenhang anschaulich. An dieser Stelle ist ersichtlich, dass die Einführung eines Faktors von 1,1 einer Erhöhung der Wiederkehrperiode von 50 auf 100 Jahre gleichkommt. Hierin ist der Parameter V der Koeffizient der Schwankungen der jährlichen Höchstsneelast

Abbildung 16: Mögliche Anpassung der Schneelast auf dem Boden gemäß DIN EN 1991-1-3 (2010), Anhang D in Abhängigkeit von der Wiederholungswahrscheinlichkeit B



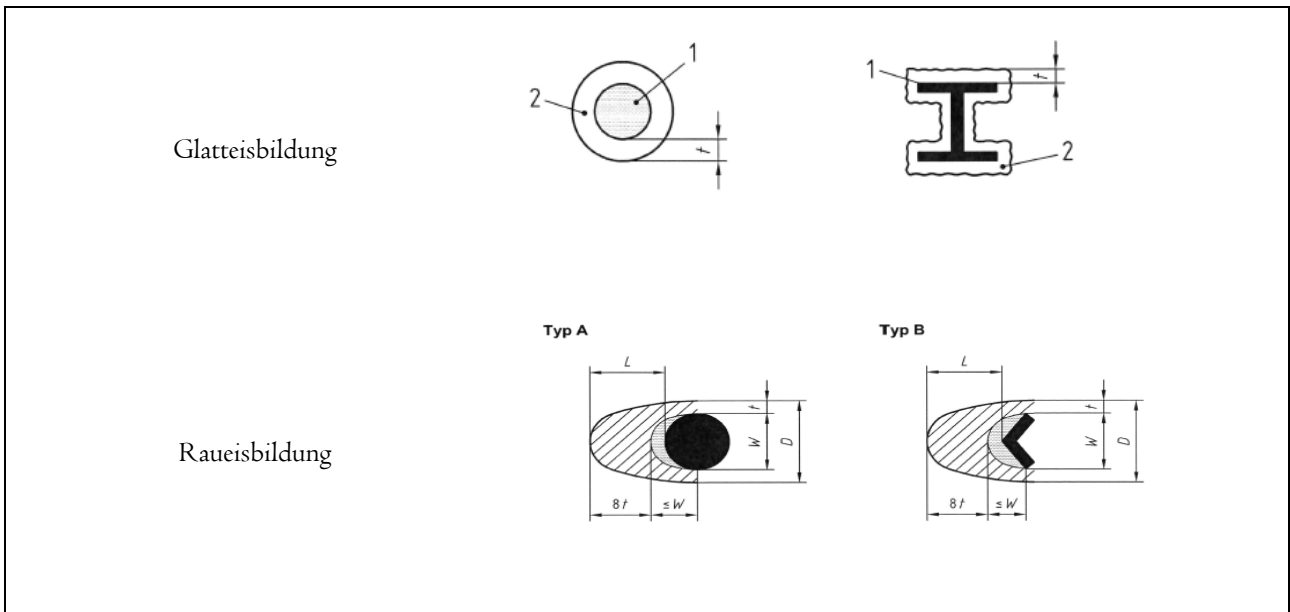
Die DIN 1055-5 aus dem Jahr 2005 stellte bezüglich der Eislasten mit dem informativen Anhang A den damaligen Stand der Technik dar. Im Zuge der Einführung der Eurocodes entfiel dieser Teil ersatzlos, so dass in den derzeit aktuellen Lastnormen keine detaillierten Angaben zu der Eisbelastung zu finden sind. Derzeit wird innerhalb der Normenkommission die Wiederaufnahme der Eisbelastung diskutiert und vorbereitet.

Es gibt weiterhin aktuelle Untersuchungen zu diesem Thema, welche sich zumeist auf die ISO 12494 (August 2001) der International Organization of Standardization (ISO) „Einwirkungen auf Tragwerke infolge atmosphärischer Eiseildung“ beziehen, welche Lastbilder und Größenordnungen der Eisbelastungen vorgeben. In erster Linie ist diese ISO Norm die Grundlage für die Erstellung von Anwendungsnormen. Sie ist im Sinne des Baurechts nicht bauaufsichtlich eingeführt und somit nicht direkt bindend. Allerdings stellt sie in gewisser Weise den Stand der Technik dar, welcher grundsätzlich bei der Berechnung und Auslegung von Anlagen und Anlagenteilen zu berücksichtigen ist.

Grundsätzlich entsteht die durch die TRAS 320 betrachtete Eiseildung an einer Anlage oder einem Anlagenteil durch das Gefrieren des Wassers aus der Luft (entweder Luftfeuchtigkeit oder Niederschlag). Hierbei kann sowohl das Glatteis um den gesamten Körper aber auch das Raueis auf einer Seite des Körpers entstehen. Allerdings kann es aufgrund von Kombination mit starken Winden auch zu einer starken Ausprägung von Eisfahnen kommen. Eine Erhöhung der Windbeanspruchung der zumeist dünnen Anlagenteile ist hierbei aufgrund der Vergrößerung der Oberfläche besonders zu betrachten.

Die DIN 1055-5 widmet sich, wie bereits oben erwähnt, den Eislasten an Tragwerken, allerdings nur solchen natürlichen Ursprungs. (Sogenanntes Industrieis infolge austretendem und gefrorenem Wasser oder Dampf wird in der Norm nicht behandelt.) Hierzu werden die Vereisungsklassen GI und G2 (Glatteis) sowie RI bis R5 (Raueis) definiert. Aufgrund der unterschiedlichen Entstehungsweise sind die anzusetzenden Lastbilder auch unterschiedlicher Ausprägung (Abbildung 17).

Abbildung 17: Typische Lastbilder der Eisbildung



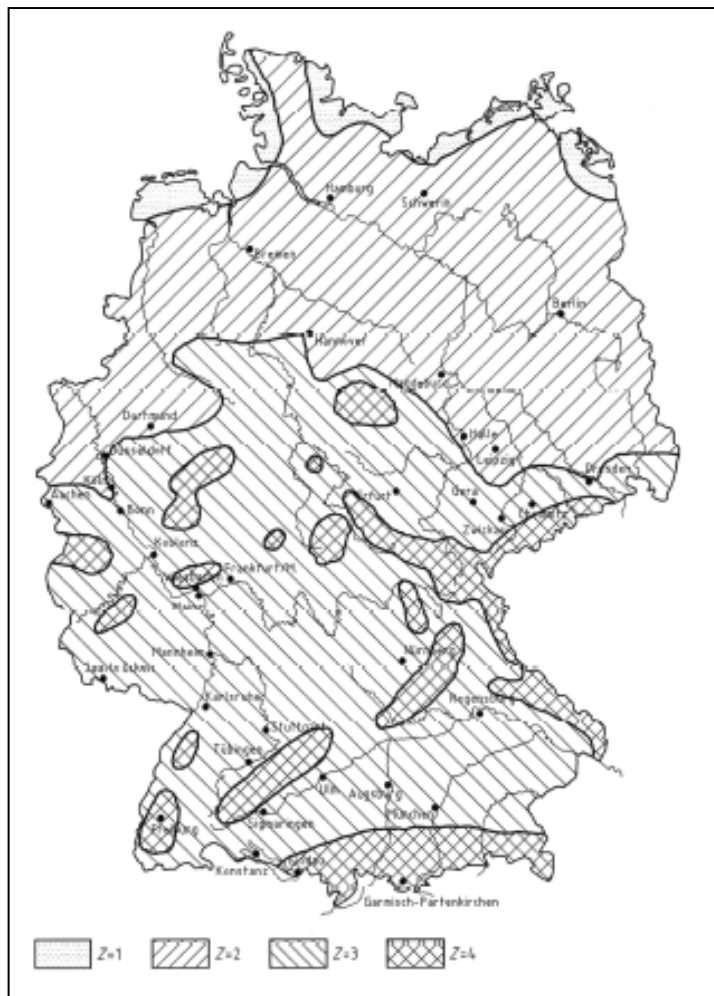
© DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Die Bundesrepublik Deutschland ist durch die Eiszonenkarte A.3, die in Abbildung 18 wieder gegeben ist, in die Eiszonen 1 bis 4 aufgeteilt. Diesen Eiszonen sind gemäß DIN 1055-5, Tabelle A.4, hier wiedergegeben als Tabelle 8, 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 8: Vereisungsklassen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland nach DIN 1055-5

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

Abbildung 18: Eiszonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2005



© DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

In Anbetracht des derzeitigen Fehlens einer DIN EN-Norm zu Eislasten stellt die TRAS 320 klar, dass bei Anlagen Eislasten weiterhin zu berücksichtigen sind, und fordert, dass grundsätzlich die DIN 1055-5 bis zum in Kraft treten einer DIN EN-Norm weiter angewandt werden soll.

Zu Abschnitt 7.2 Berücksichtigung des Klimawandels

Ein Klimaänderungsfaktor bzgl. der Wind-, Schnee- und Eislasten kann aus den derzeit vorliegenden Untersuchungsergebnissen der Klimaforschung nicht abgeleitet werden. Die Unsicherheiten der Prognosen sind derzeit noch zu groß. Daher wurde zu dem Zeitpunkt der Bekanntmachung der TRAS 320 (Juni 2015) auf die Einführung eines solchen Faktors verzichtet. Die Grundlagen dieser Entscheidung sind dem Forschungsbericht zur TRAS 320 zu entnehmen.

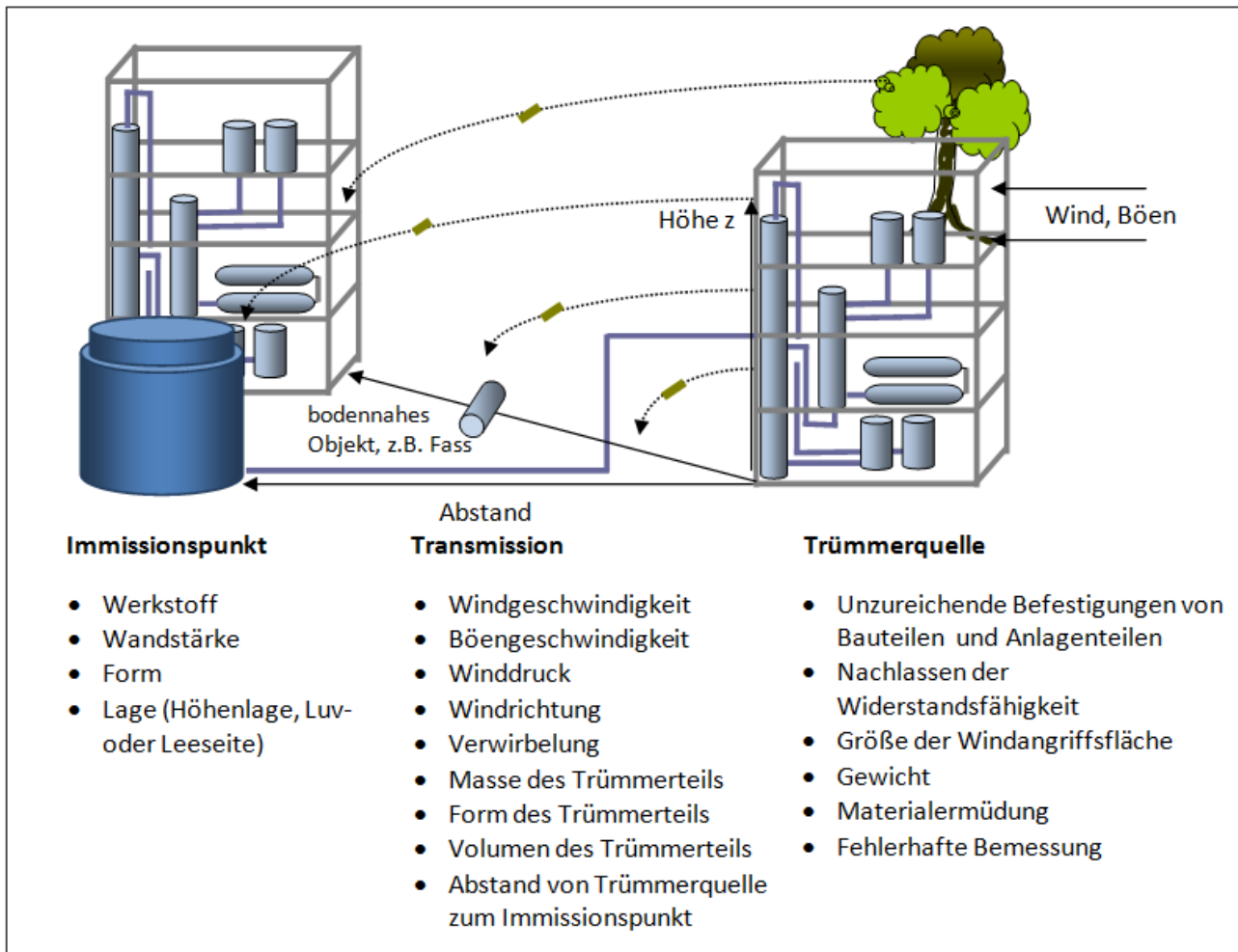
Zu Abschnitt 7.3 Windbedingte Projektile

Unter Abschnitt 7.1.2 wird die Wirkung von Windlasten auf das gesamte Bauwerk bzw. Tragwerke von Anlagen berücksichtigt. Unter Abschnitt 7.3. werden weitere Gefahrenquellen berücksichtigt, die durch Wind verursacht werden können.

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. Abschnitt 7.3.I 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, Gerüste, Baumaschinen usw. umstürzen, die dann als sekundäre Gefahrenquellen sicherheitsrelevante Anlagenteile gefährden.

Abbildung 19: Darstellung möglicher Gefahrenquellen durch windbedingte Projektile



In Abbildung 19 ist der gesamte Bereich zur Gefahrenquellenanalyse windbedingter Projektile mit den verschiedenen Einflussfaktoren grafisch dargestellt. 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 potenzielle Projektilquellen sind unter anderem benachbarte Anlagen oder Bauwerke aber auch Bäume, Gerüste, Kräne, 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 zum Beispiel unzureichende Befestigungen, Materialermüdung oder die Größe der Windangriffsfläche sein.

Die Transmission von Objekten kann durch die Luft aber auch am Boden erfolgen. Zum Beispiel kann ein umgestürztes Fass 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, von einem hoch gelegenen Bauwerksteil, wie z. B. eine Fassade, oder einem Gerüst ein Teil heraus, das anschließend weitere Zerstörungen durch Herabstürzen innerhalb und außerhalb einer Anlage verursachen kann.
3. Ein Gegenstand, wie z. B. ein Baum, Gerüst, Kran oder ein Anlagenteil, wird von einer Bö um-gestürzt 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. 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.

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

Als sicherheitsrelevante Teile des Betriebsbereichs und von Anlagen sind jene

1. mit besonderem Stoffinhalt oder
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 potenziell betroffenen sicherheitsrelevanten Anlagenteile. Hierbei ist grundsätzlich wie folgt zu differenzieren:

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

Zu Abschnitt 8.1 Gefahrenquellen durch statische und dynamische Lasten

Zu Abschnitt 8.1.1 Windlasten

Es kann davon ausgegangen werden, dass die Wahrscheinlichkeit eines Tragwerksversagens durch Wind, Schnee- und Eislasten bei Bauwerken, die nach DIN EN 1990 mit Einstufung RC3 errichtet wurden, sehr gering ist (Ausnahme Tornados). Aus diesem Grund sind vorzugsweise diejenigen Bauwerke und Anlagenteile zu betrachten, die nicht dieser Bemessungsgrundlage entsprechen und in denen sicherheitsrelevante Anlagenteile untergebracht oder die selber sicherheitsrelevante Anlagenteile sind.

Bei der Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile eines Betriebsbereichs ist Baujahr der Anlage bzw. des Anlagenteils sowie das Erscheinungsjahr des zur Auslegung verwandten Technischen Regelwerks zur Tragwerksberechnung zu beachten.

Die DIN 1055-4 regelte die Windeinwirkungen auf Tragwerke. Nach Kriegsende galt in der Bundesrepublik Deutschland - 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 Bundesrepublik Deutschland. In der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) war bereits im Dezember 1976 der DDR-Standard Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (TGL) 32274/07: Lastannahmen für Bauwerke/ Windlasten eingeführt worden. Die Ausgabe DIN 1055 Blatt 4 (August 1986) galt seit dem Beitritt der DDR zur Bundesrepublik Deutschland im Oktober 1990 auch in den neuen Bundesländern. Im März 2005 erschien die grundsätzliche Neufassung DIN 1055-4 (März 2005), die erstmals regionale Unterschiede bei den Windgeschwindigkeiten durch Ausweisung von vier Windzonen berücksichtigte. Sie galt nach ihrer bauaufsichtlichen Einführung bis zur Einführung der entsprechenden, seit Dezember 2010 veröffentlichten DIN EN 1991-1. Mittlerweile wurde die DIN EN 1991-1 am 1. Juli 2012 bauaufsichtlich eingeführt. Sie 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. Dezember 2013 geschaffen.

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_{sc_d} in Abhängigkeit der Turbulenzstruktur und der dynamischen Tragwerkseigenschaften, insbesondere der Dämpfung
Berechnung des Böengeschwindigkeitsdrucks q_p in der Bezugshöhe z_e	Berechnung des Böengeschwindigkeitsdrucks q_p in der Bezugshöhe z_s wie bei nicht schwingungsanfälligem Tragwerk
<ul style="list-style-type: none"> Windzone des Anlagenstandorts Berücksichtigung der Bodenrauigkeit; Auswirkung einer topographisch exponierten Lage Einfluss der Windrichtung; Stärkewindrose Höhe des Standortes über NN Erfassung der Windturbulenz 	Berechnung des Strukturbeiwerts c_{sc_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	

Die Festlegungen zum Geschwindigkeitsdruck in der Fassung August 1986 stammten aus der Ausgabe vom Juni 1938. Er war dort in Form der bekannten Treppenkurve angegeben (Abbildung 20). 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. Er hat den in Tabelle 10 dargestellten Wert:

Tabelle 10: Abminderungsfaktor nach TGL-Richtlinie

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 der DIN 1055-4 (März 2005) ersetzte die Treppenkurven durch realistische, stetige Windprofile, deren Verlauf von der Bodenrauigkeit bestimmt ist. Darüber hinaus führt sie Windzonen ein, um die geografisch unterschiedliche Sturmintensität zu erfassen. Diese Zuschärfungen entsprachen dem Eurocode 1991-I-4, der im Dezember 2010 als DIN EN 1991-I-4 veröffentlicht wurde. Man erkennt in Abbildung 20, 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.

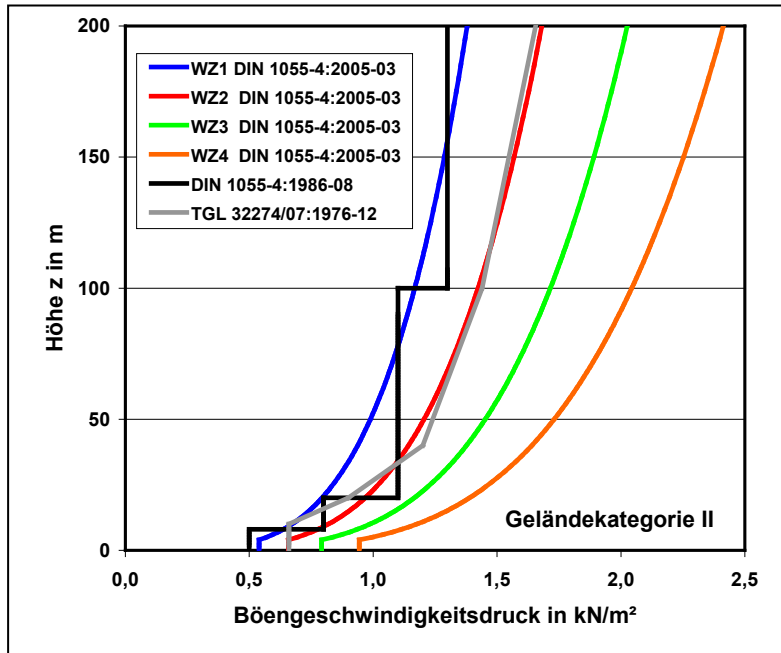
Man kann die Treppenkurve der DIN 1055 Blatt 4 durch

$$(19) \quad q = 0,75 \left(\frac{z}{10}\right)^{0,22}$$

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

Abbildung 20: Festlegungen des Geschwindigkeitsdruckes in deutschen Normen



in TGL 32274/07, Ausgabe Dezember 1976;
als Polygonzug; in DIN 1055-4, Ausgabe Juni 1938;
als Treppenkurve, in der Ausgabe März 2005 als Potenzprofile, hier für Geländekategorie II in Abhängigkeit der Windzonen

Zu Abschnitt 8.1.2 Schnee- und Eislasten

Anlagen und Anlagenteile, die im Freien aufgestellt sind, sind den Gefahrenquellen Wind, Schnee und Eis grundsätzlich ausgesetzt. Allerdings lässt sich der Kreis der tatsächlich zu betrachtenden Anlagen und Anlagenteile mit folgenden Überlegungen einschränken.

Sicherheitsrelevante Anlagenteile, die mit hohen Temperaturen betrieben werden, können unter bestimmten Bedingungen bei der Ermittlung der gefährdeten Anlagenteile bzgl. der Gefahrenquellen Schnee- und Eislast aus der Betrachtung ausscheiden (vgl. auch vereinfachte Gefahrenquellenanalyse). Typische Anlagenteile sind Destillationskolonnen, Reaktoren, Tanklager für Stoffe, die bei erhöhten Temperaturen gelagert werden, Rohrleitung mit Begleitheizung usw.

Allerdings müssen in diesem Zusammenhang auch Anlagenstillstände berücksichtigt werden, bei denen keine erhöhten Temperaturen vorliegen.

Durch Schnee und Eis können u. a. folgende Anlagenteile gefährdet werden:

1. Alle Anlagenteile mit mechanischen Funktionen, wie z. B. Ventile und Pumpen. Deren Funktion ist vor allem dann gefährdet, wenn längere Stillstandsphasen auftreten.
2. Rohrleitungsbrücken
3. freiliegende Kabelverbindungen

Anlagenteile, wie z. B. frostsicher im Erdreich verlegte Rohrleitungen, können dagegen vernünftigerweise ausgeschlossen 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 I der TRAS).

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

Tabelle 11: Liste zur Überprüfung von Anlagen in Betriebsbereichen

Anlagen	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
	Tankanlagen	Wind, Eis
	Schwimmdachkonstruktionen	Gefährdung durch hohe und ungleichmäßig verteilte Schneelasten
Anlagen mit besonderen Auslegungen	Rohrleitungs- und Schlauchentleerungen	Wind, Eis

Anlagen	Beschreibung	Gefahrenquelle
Anlagen mit besonderen Materialien	Glaskonstruktionen (wg. Beständigkeit gegenüber Korrosion)	Wind, windbedingte Projektile
	emaillierte 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)

Die erste normative Regelung zu einheitlichen Schneelasten wurde im Dezember 1936 mit der DIN 1055, Blatt 5 – Schneebelastung eingeführt. Die Schneebelastung wurde pauschal für das gesamte Rechtsgebiet des damaligen Deutschen Reichs zu 0,75 kN/m², also 75 kg/m², festgelegt, bezogen auf die Grundrissfläche des Objektes. Für Dachflächen mit Neigungen kleiner 20° wird die Schneelast nicht abgemindert, und für Flächen größer 60° entfällt die Schneelast vollständig. Darüber hinaus werden in der Norm Hinweise auf die Gefahr von Schneesackbildung, Hinweise auf eventuell höhere Lasten in Gebirgsregionen und auf die besondere Situation bei Gewächshäusern gegeben.

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

Die für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik Deutschland einheitlichen Regelungen wurden mit Einführung der DIN 1055 im Jahre 1975 aufgehoben. Statt der einheitlichen Schneelast von 75 kg/m² 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 kN/m² und 5,50 kN/m². Für Höhen oberhalb 1000 m wird auf Festlegungen der zuständigen Baubehörden und des DWD verwiesen. Tabelle 12 gibt diese Regelungen der DIN 1055 wieder. Im gleichen Zuge wurden auch die Grenzen zur Abminderung bei Schrägdächern verändert.

Tabelle 12: Regelschneelast s₀ in kN/m² (kg/m²)

1	2	3	4	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)

1	2	3	4	5
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

gemäß Tabelle 2 der DIN 1055 Teil 5

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 I numerisch vorgegeben wird. Der dem Sicherheitsnachweis zugrunde zu liegende Rechenwert der Schneelast ergibt sich aus dem Abminderungsfaktor k_s multipliziert mit der Regelschneelast.

Normative Regelungen zum Überlagern der Schneelast mit der Windbelastung werden ebenfalls eingeführt. Bei Dächern mit einer Neigung bis 45° muss entweder die volle Schneelast mit der halben Windlast oder aber die halbe Schneelast mit der vollen Windlast kombiniert werden. Bei Dächern mit einer Traufneigung größer als 45° darf entweder nur die Schneelast oder aber nur die Windlast betrachtet werden. Der Nachweis der Tragwerkssicherheit ist dann die größere der beiden Alternativen als maßgebend zugrunde zu legen.

Erstmals wurden 1975 auch Regelungen zu einer möglichen Eislast in die DIN 1055-5 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 Meter über Normalnull angesetzt werden muss. Die Eisrohwrchte ist mit 7 kN/m^3 (700 kg/m^3) einzusetzen. Für Geländehöhen über 400 Meter über Normalnull wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass genauere Untersuchungen erforderlich sind. Bei Berücksichtigung von Eisansatz ist die Windlast auf die durch den Eisansatz vergrößerte Fläche des Anlagenteils anzusetzen. Dafür darf die Windlast mit 75% des Windstaudrucks ermittelt werden.

Im Anhang der DIN 1055-5 (1975) wird erstmalig auf die Herleitung der Regelschneelast eingegangen. Es wird erläutert, dass die Regelungen der Norm auf Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes in Abhängigkeit von geologischen und meteorologischen Verhältnissen fußen. Das Normengremium reagiert damit auf den inzwischen auf Europäischer Ebene erfolgten stärkeren Bezug normativer Regelungen im Bauwesen auf statistische Grundlagen. Die Regelschneelast wurde hierbei als ein 95%-Fraktilwert $s_{95\%}$ der Jahresmaxima eines 30-jährlichen Beobachtungszeitraums bestimmt. Zugrunde gelegt wurde hierbei eine Extremwertverteilung vom Typ I nach Fisher-Tippet mit einem Variationskoeffizienten von $V \approx 45\%$. Der hierzu erforderliche Zusammenhang zwischen der Regelschneelast und den Messgrößen (mittleres Schneehöhenmaximum s_h), mittlere Schneerohwrchte γ und Abminderungsfaktoren χ für Schneedrift wird angegeben. Mit diesem Formelwerk kann bei veränderten Eingangsparametern, wie beispielsweise Altschneeanlagerungen, eine Neuermittlung oder Anpassung der Lasten vorgenommen werden.

Mit Einführung der Änderung AI der DIN 1055, Teil 5 im April 1994 bleiben alle Regelungen der Norm von Juni 1975 bestehen. Lediglich die Karte der Schneelastzonen wird auf die wiedervereinigte Bundesrepublik Deutschland einschließlich der neuen Bundesländer erweitert. Diese Karte wurde aus der Normenfassung 1994 übernommen.

Zu Abschnitt 8.2 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 der Einwirkung durch Wind zu untersuchen. Besonders zu beachten sind dabei sicherheitsrelevante Mess- und Regeltechnik mit Sensoren, Aktoren oder Kabeln an exponierten Stellen. Um Gefahren aufgrund Verlust oder Beschädigung derartiger Anlagenteile zu verhindern, ist entweder die Befestigung dieser Anlagenteile zu überprüfen oder sie sind gegen Funktionsverlust sicher auszuführen.

Als relevante Quelle von windbedingten Projektilen, die durch Auftreffen auf sicherheitsrelevante Anlagenteile Gefahren verursachen können, 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 320 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. 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 am Boden fortbewegen, wie z. B. ein rollendes Fass. Ausgehend von den verschiedenen Lagerflächen auf dem Betriebsgelände sind die potenziellen Rollwege mit ihren Hindernissen zu ermitteln und zu bewerten. Von besonderer Bedeutung sind hierbei Gefällestrecken, die zu einer Erhöhung der Rollgeschwindigkeit beitragen können. Die ermittelten Wege sollten mit den potenziellen Aufprallpunkten, wie z. B. Tankanlagen, verglichen werden, die schon im Rahmen der Analyse Verkehrswege innerhalb des Betriebsgeländes durchgeführt wurden.

Zusätzlich sei auf die besondere Gefährdung durch windbedingte Projektile im Bereich von temporären Baumaßnahmen oder Aktivitäten durch werkszugehörige Abteilungen aber auch durch Fremdfirmen hingewiesen. Auf diese potentielle Gefährdung ist vor Aufnahme der Arbeiten hinzuweisen und die verantwortlichen Aufsichtsführenden auf eine ordnungsgemäße Befestigung der temporär installierten Gegenstände und Maschinen hinzuweisen.

Zu Kapitel 9 Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen

Kernstück dieses Abschnitts der TRAS 320 sind Beispiele von Szenarien der Einwirkung natürlicher, umgebungsbedingter Gefahrenquellen für die geprüft werden muss, ob sie zu Störfällen führen können.

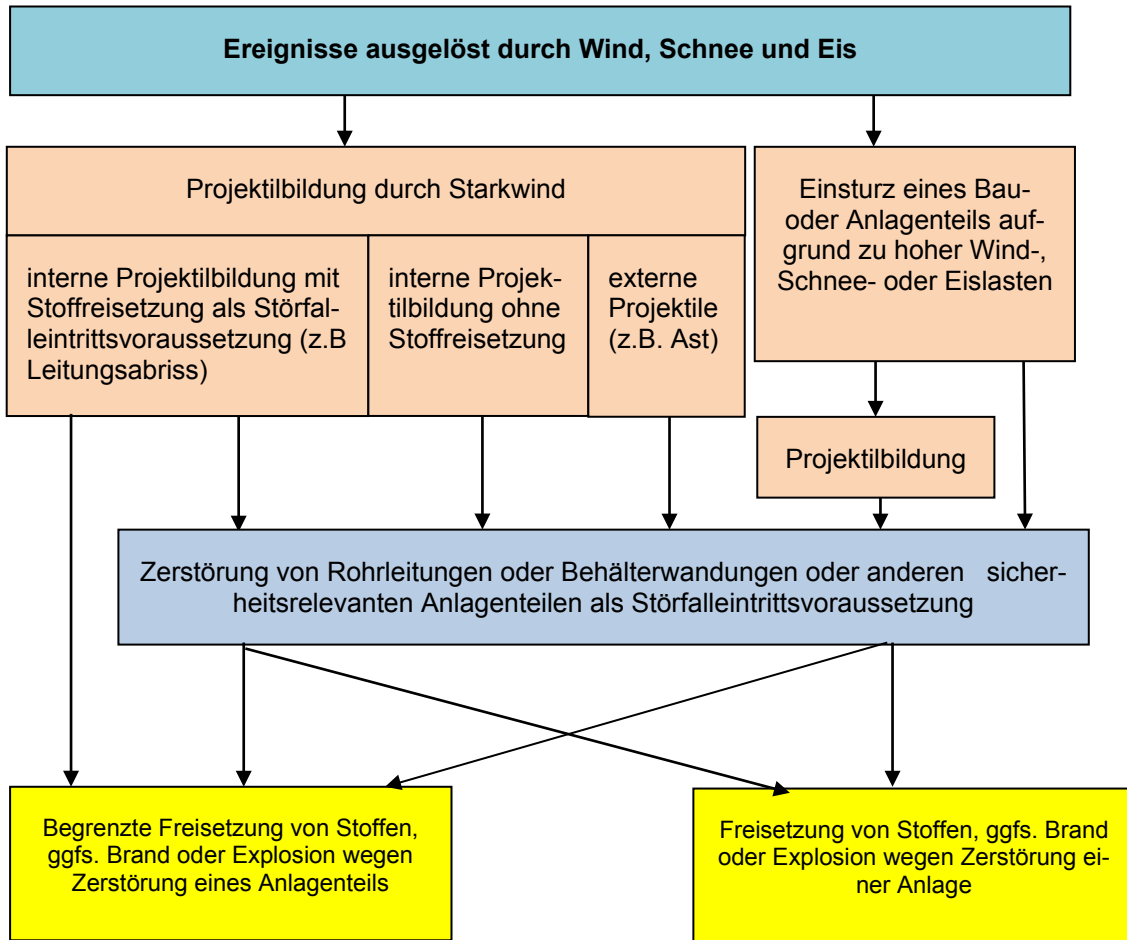
Hierbei sollten nicht nur gefährdete sicherheitsrelevante Anlagenteile mit besonderem Stoffinhalt oder besonderen Funktionen innerhalb des Betriebs berücksichtigt werden, sondern auch sicherheitsrelevante Anlagenteile außerhalb des Betriebs. Dies kann z. B. Trafostationen und Kommunikationseinrichtungen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

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 Bauwerks, eines Tragwerks oder einer Gefahrstoffumschließung eintreten kann. Nur mit einem Teilversagen ist bei Einwirkung windbedingter Projektile zu rechnen.

Eine denkbare Kausalkette ist in Abbildung 2I dargestellt.

Abbildung 21: Einwirkungen, Störfalleintrittsvoraussetzungen und Folgen durch die Gefahrenquellen Wind, Schnee und Eis



Zu Kapitel 10 Festlegung von anlagenbezogenen Schutzziele

Um die Anforderungen des § 9 Absatz 1 Nummer 2 in Verbindung mit Anhang II Nummer 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.

Die in der TRAS aufgeführten Vorgaben für die Aufstellung von Schutzziele sollen an dieser Stelle noch einmal erläutert werden.

Schutzziele wegen Staudruck bei Böen und Windspitzen

Die Gefährdung durch die Szenarien wie Staudruck bei Böen und Windspitzen wird mit einer Jährlichkeit von 100 Jahren festgelegt. Um dieses mittels der bereits bestehenden Baunormen zu erreichen werden die sicherheitsrelevanten Anlagen und Bauwerke in denen solche sicherheitsrelevanten Anlagen betrieben werden in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 eingestuft. Wie bereits ausführlich in den Hinweisen und Erläuterung zu Abschnitt 7 beschrieben, wird dadurch die Erhöhung des Teilsicherheitsfaktors der Einwirkung vorgenommen. In einer Rückwärtsbetrachtung wird dadurch die Erhöhung der Jährlichkeit von normgemäßen 50 Jahren für die Anlagen mit mittleren Versagensfolgen auf eine 100 Jährlichkeit für Anlagen in Betrieben (mit hohen Versagensfolgen) erreicht.

Für die Planung und Errichtung von neuen Gebäuden und Anlagen erfolgt eine Einstufung in die Klasse DSL2 der Überwachungsmaßnahmen bei der Planung und in die Klasse IL2 der Überwachungsmaßnahmen bei der Herstellung gemäß DIN EN 1990 Nationaler Anhang. Dieses führt zu einer stärkeren Überwachung und soll Planungs- und Herstellungsfehlern, welche oftmals Auslöser von Schadensfällen sind, verhindern.

Bei besonders hohem Gefahrenpotenzial von Anlagen in Betriebsbereichen ist zu prüfen, ob es der Anwendung von Überwachungsmaßnahmen bzw. –stufen der Kategorien DSL3 bzw. IL3 bedarf.

Bei bestehenden Anlagen ist eine nachträgliche Überwachung der Planung und Ausführung nur schwer bis unmöglich, von daher wird von der Einstufung in DSL3 bzw. DSL2 und IL3 bzw. IL2 abgesehen.

Schutzziele wegen Schwingungen bei Böen und Windspitzen

Schwingungen sind vordringlich durch das Resonanzverhalten der Struktur geprägt und treten bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten auf. Eine Untersuchung gegenüber Schwingungen muss bei schwingungsanfälligen, sicherheitsrelevanten Anlagen durchgeführt werden, da schädliche Schwingungen bei anfälligen Systemen vielfach mit einer sehr hohen Eintrittswahrscheinlichkeit auftreten können. Hierbei sollte die mittlere Windgeschwindigkeit, welche als Grenzwert zur Einstufung in schwingungsanfällig und nicht schwingungsanfällig verwendet wird, für eine Jährlichkeit von 100 Jahren verwendet werden.

Schutzziele wegen Verlust und Aufprall durch windbedingte Projektile

Der Verlust von Anlagenteilen durch Sturmereignisse kann am einfachsten durch die Überprüfung der Verschraubungen, Schweißnähte oder sonstiger Befestigungen vermieden werden. Hierzu zählen auch Container, Fässer oder andere Behältnisse, die auf Lagerflächen abgestellt sind und im Falle eines Sturmereignisses gesichert oder in geeigneten Bauwerken verlagert werden müssen.

Durch mögliche Projektile gefährdete Anlagenteile sind vor Projektilaufprall zu schützen. Dies kann z. B. durch Einhausung oder im Falle von bodennahen Projektilen durch Schutzzäune oder –wände sichergestellt werden.

Schutzziele wegen Schnee und Eisbelastung

Der Gefährdung von Anlagenteilen durch Schneelasten wird mit der Festlegung einer Jährlichkeit von 100 Jahren begegnet. Um dieses mittels der bereits bestehenden Baunormen zu erreichen, werden die sicherheitsrelevanten Anlagen und Bauwerke, in denen solche sicherheitsrelevanten Anlagen betrieben werden, in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 eingestuft. Wie bereits ausführlich in den Hinweisen und Erläuterung zu Abschnitt 7 beschrieben, wird dadurch die Erhöhung des Teilsicherheitsfaktors der Einwirkung vorgenommen. In einer Rückwärtsbetrachtung wird dadurch die Erhöhung der Jährlichkeit von normgemäßen 50 Jahren für die Anlagen mit mittleren Schadensfolgen auf eine 100 Jährlichkeit erreicht.

Das Szenarium Eisbildung ist mit der Umstellung auf die DIN EN Normen entfallen. Abweichend hierzu sollen sicherheitsrelevante Anlagen und Anlagenteile weiterhin entsprechend dem Stand der Technik nach den Regelungen der DIN 1055-5³⁴ ausgelegt werden.

Eine Auslegung gegen außergewöhnliche Schneelasten ist bislang gemäß DIN EN 1991-1-3/NA (Dezember 2010) nur im Norddeutschen Tiefland erforderlich. Da Überschreitungen der ordentlich anzusetzenden Schneelasten jedoch in der Vergangenheit nicht nur im Norddeutschen Tiefland festgestellt wurden, wird durch die TRAS 320 diese Regelung auf das gesamte Gebiet Deutschlands ausgedehnt. Damit ist eine Auslegung gegen außergewöhnliche Schneelasten unter Nutzung behördlich festgelegter Lasten oder regional aufgezeichneter historischer Maximallasten für alle Schneelastzonen und in allen Bundesländern erforderlich.

Zu Kapitel 11 Erarbeitung von Schutzkonzepten

Die TRAS 320 gibt an dieser Stelle nur eine Übersicht über die möglichen Vorkehrungen und Maßnahmen gegen die naturbedingten Gefahrenquellen Wind-, Schnee- und Eislasten. Wichtig ist, dass mit dem Schutzkonzept alle vernünftigerweise nicht auszuschließenden Gefährdungen und Szenarien abgedeckt werden.

³⁴ DIN 1055-5: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

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

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 13 stellt für verschiedene Anlagen und Anlagenteile geeignete Nachrüstungsmöglichkeiten gegen die statischen Einwirkungen beispielhaft zusammen.

Tabelle 13: Konstruktive Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Widerstandes gegenüber Wind und Schneelasten

Anlage oder Anlagenteil	Gefahrenquelle	Nachrüstungsmaßnahmen
Dächer	Wind	<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
	Schnee	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkung von leichten Dachkonstruktionen durch zusätzliche Dachbinder bzw. Verstärkung der Vorhandenen • 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	Wind	<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	Wind	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkung der Verankerung im Baugrund oder an Bauwerken • Sicherung durch zusätzliche Seilabspannungen (soweit Eigentum von Fremdfirmen ist eine vorherige Abstimmung erforderlich)
Behälter, Tanks, Silos	Wind	<ul style="list-style-type: none"> • Verstärkung der Befestigung auf der Fundamentplatte • Versteifungen bzw. Abspannungen gegen Formänderungen bei großen Querschnitten
	Schnee	<ul style="list-style-type: none"> • Schutz von Schwimmdächern gegen Überlastung durch Schneelast mit Hilfe einer zusätzlichen, mobilen schrägen Abdeckung am oberen Behälterrand zur Abhaltung der Schneelast.

Anlage o-der Anla-genteil	Gefah-ren-quelle	Nachrüstungsmaßnahmen
Türme, Maste, Schornsteine	Wind	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherung durch zusätzliche Seilabspannungen

Darüber hinaus gibt es weitere Nachrüstungsmöglichkeiten, welche besonders gefährdete Anlagenteile schützen soll. Tabelle 14 stellt für verschiedene Anlagen und Anlagenteile geeignete Nachrüstungsmöglichkeiten gegen die Gefahrenquellen dar, welche keine direkten baulichen Veränderungen an den bestehenden Anlagen darstellen.

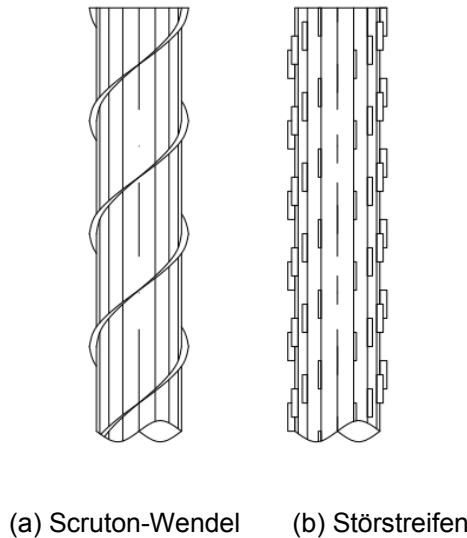
Tabelle 14: Weitere Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Widerstandes gegenüber Wind, Schnee- und Eislasten

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. <p>Gefahrenquelle Tornado</p> <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 (bei Gerüsten von Fremdfirmen ist die Zustimmung des Eigentümers erforderlich) • Einrichten eines Frühwarnnetzes hinsichtlich aufkommender Extremwetterereignisse, wie zum Beispiel Winterstürme, Tornados oder extremer Schneefälle. Dieses kann durch die Einrichtung von Vernetzungen zu den umliegenden regionalen und überregionalen Wetterstationen gelingen. Einschätzung der Gefährdung obliegt dem verantwortlichen Werksleiter. Je nach Gefährdungseinschätzung sind die im jeweiligen Notfallplan vor-gesehenen 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 22 zeigt mit dem sogenannten Scruton-Wendel sowie Störstreifen stellvertretend zwei Beispiele.

Abbildung 22: Aerodynamische Maßnahmen gegen wirbelerregte Querschwingungen



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.

Durch Überwachung der Wetterlage können zu erwartende extreme Wind- und Schneereignisse erkannt werden (nur bedingt bei Tornados). Bei Eintritt entsprechender Wetterlagen ist zu Beginn bereits die Alarmbereitschaft 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.

Sind Überschreitungen der Schneelasten zu erwarten ist die Bereitschaft für die Schneeräumungsmaßnahmen herzustellen. 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.

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 Projektquellen 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 Schneereignis 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 (Gefährliche Stoffe und Personal). Hierbei ist natürlich die Sicherheit des Räumungspersonals zu berücksichtigen.

Nach dem Wirksamwerden der Gefahrenquelle

Nach dem Einwirken der Gefahrenquellen ist unter angemessenen Sicherheitsmaßnahmen zu prüfen, ob es zu Freisetzungen von gefährlichen Stoffen kam und ob diese noch andauern. Sind die Freisetzungen beendet, so sind kontaminierte Bereiche zu identifizieren, zu sperren und auf der Grundlage einer ausgearbeiteten Planung sowie unter angemessenen Sicherheitsmaßnahmen zu dekontaminieren.

Beschädigungen von Anlagen und Anlagenteilen sind 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.

Zu Kapitel 12 Prüfung der Schutzkonzepte

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

1. intuitive Methoden (Brainstorming)
2. induktive Methoden (z. B. Ereignisablaufanalyse)³⁵

³⁵ DIN 25419: Ereignisablaufanalyse: Verfahren, grafische Symbole und Auswertung, Normenausschuss Kerntechnik, 1995

3. deduktive Methoden (z. B. Fehlerbaumanalyse) ^{36 37}
4. PAAG-Verfahren (Prognose, Auffinden der Ursachen, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen) mit intuitiven, induktiven und deduktiven Elementen ³⁸

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 320 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.

Zu Kapitel 13 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, sogenannten „Dennoch-Störfällen“, 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. mit Wind, Schnee- und Eislasten verbundene Gefahrenquellen, die „vernünftigerweise“ ausgeschlossen wurden, daher in Zusammenhang mit der Verhinderung von Störfällen nicht betrachteten wurden und mit qualitativ zusätzlichen Wirkungsweisen eintreten, wie zum Beispiel die Einwirkungen durch Tornados mit Stärken bis einschließlich F4.

Darüber hinaus wurden Gefahrenquellen auf der Grundlage einer vereinfachten Gefahrenquellenanalyse 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 können z. B. die Szenarien nach Abbildung 21 dieser Hinweise und Erläuterungen herangezogen werden:

1. Beschädigung oder Einsturz eines Bauwerkes 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.

³⁶ DIN 25424 Fehlerbaumanalyse, Teil 1 und 2, Ausgabe 1981-09, Beuth Verlag Berlin

³⁷ Böhnert, R.: Bauteil- und Anlagensicherheit. Vogel Verlag Würzburg 1992, ISBN 3-8023-0469-3

³⁸ Selbmann, B.: Das PAAG-Verfahren - Methodik / Anwendung / Beispiele - Risikobegrenzung in der Chemie, Ausgabe 2000. Herausgeber: Internationale Sektion der IVSS für die Verhütung von Arbeitsunfällen und Berufskrankheiten in der chemischen Industrie, Kurfürsten Anlage 62, D-69115 Heidelberg, Deutschland

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 Kraftfahrzeug) 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 durch bereits angestellte „Dennoch-Störfall“- Betrachtungen berücksichtigt sind. Bei der Analyse der zuvor beschriebenen Szenarien muss insbesondere bei den Szenarien I bis 3 im Einzelfall geprüft werden, ob aufgrund gleichzeitiger schädigender Einwirkung auf mehrere sicherheitsrelevante Anlagenteile mehr als die größte zusammenhängende Masse (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 darauf basierenden auswirkungsbegrenzenden Maßnahmen nicht gegeben ist.

Zu Kapitel 14 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:

1. Begrenzung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen aus ihrer Umschließung,
2. Minderung der Ausbreitung freigesetzter, gefährlicher Stoffe,
3. Begrenzung der Verdampfung von freigesetzten gefährlichen Stoffen,
4. Verhinderung der Zündfähigkeit oder Zündung gefährlicher Stoffe,
5. 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 I Nummer I StörfallV 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 Bauwerks- und Anlagenteile 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 I Nummer I 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 unter Umständen 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. April 2010 stark beschädigte. Die auslaufenden Flüssigkeiten konnten weitgehend aufgefangen werden³⁹.

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

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

Zu Kapitel 15 Planung für Notfälle, Ergänzung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen, Übermittlung von Informationen für die externe Alarm- und Gefahrenabwehrplanung

Dieser Abschnitt der TRAS 320 widmet sich der Ausarbeitung von betrieblichen Alarm- und Gefahrenabwehrplänen und dem Katastrophenschutz.

Bei Betriebsbereichen mit Grundpflichten 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 mit erweiterten Pflichten 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.

³⁹ <http://www.complexchemical.com/tornado.htm>

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 Informationen⁴⁰. *Informationsermittlungspflichten* bestehen eingeschränkt im Bereich der „erweiterten“ Pflichten der StörfallV (§§ 9 – 12 StörfallV).

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

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

Unter mobil.dwd.de (bei älteren Handy-Browsern <http://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.unwetterzentrale.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.

Informationsermittlung

Einfache lokale „Messsysteme“ können für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten eingerichtet werden. Ein Windmessgerät auf dem Dach eines Betriebs, Bauwerks 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 Bauwerks oder Anlagenteils integriert werden. Auch bestehen Möglichkeiten

⁴⁰ Schulte, M.; Kloos, J.: 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)

zur Nachrüstung derartiger Sensoren. Über einstellbare Alarm-Schwellenwerte 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 Bauwerken 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 Bauwerken oder Anlagen 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 wurde⁴¹.

Für dieses System wurden spezielle und kostengünstige Unwettersensoren in einem engmaschigen Netz unter anderem 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 nutzte 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 weiter geführt, 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 Industrieunternehmen⁴².

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 und Schneelasten 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

⁴¹ Klafft, M.; et al.: SAFE: A Sensor-Actuator-based Early-warning System for Extreme Weather Situations, 2008

⁴² https://www.fokus.fraunhofer.de/de/fokus/news/katwarn_basf_2015_09

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 der entsprechenden Fortschreibung der Planung für Notfälle sowie der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung ist der Einbezug von Fremdfirmen im Betriebsbereich und Beschäftigter dieser Firmen erforderlich.

Bei dem hier dargestellten Beispiel wird die Verlagerung von gefährlichen Stoffen in ungefährdete Bereiche vorgeschlagen. Hierbei ist zu beachten, dass während eines Ereignisses potenzielle Transportwege außerhalb von Bauwerken 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 I Nummer 2 StörfallV sind Betreiber von Betriebsbereichen mit erweiterten Pflichten 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 vorhandenen Stoffe
 - b) Angaben über physikalische und toxikologische Eigenschaften der vorhandenen Stoffe
3. Angaben über Infrastruktureinrichtungen
- a) Örtliche Lage von Löscheinrichtungen
 - b) Angaben zu Auffangräumen für Flüssigkeiten und Löschwasserrückhaltebecken (örtliche Lage, Volumen)
 - c) Absprerrmöglichkeiten 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

Zu Kapitel 16 Dokumentation

Hier wird auf die in der StörfallV verankerten Dokumentationspflichten verwiesen.

Zu Kapitel 17 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)

Zu Abschnitt 17.1 Anforderungen an die Instandhaltung (§ 6 Absatz 1 Nummer 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 Zeitrafter 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).

Ausgeführte Maßnahmen zur Instandhaltung sind zu dokumentieren.

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

Im Einzelnen können beispielhaft folgende Maßnahmen zur Instandhaltung erforderlich sein:

Tabelle 15: Vorschlag für einen Begehungs- und Kontrollplans für die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten der Autoren dieser Hinweise und Erläuterungen

Grundsätzlich	Gemäß VDI Richtlinie 6200	Intervall
	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	Intervall
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
Sicherheitstechnische Einrichtungen	wie <ul style="list-style-type: none"> • 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
auf Dächern oder an Gerüsten befestigte Anlagenteile	Sichtkontrolle der Befestigungen von z. B. <ul style="list-style-type: none"> • Entlüftungsrohren und Abgaskaminen, • Staubfiltern, • Abgaswäschern, 	2 x /Jahr

Grundsätzlich	Gemäß VDI Richtlinie 6200	Intervall
	<ul style="list-style-type: none"> • Kühltürmen • Lampen 	
Rohrleitungen	Sichtkontrolle der Halterungen und Verschraubungen	2 x /Jahr
Kabeltrassen	Sichtkontrolle der Halterungen	2 x /Jahr
Abdeckungen	Kontrolle der Befestigung und Verschraubungen von <ul style="list-style-type: none"> • Wetterschutzhauben • Schwimmdächer • Gebäudefassaden • Gitterrosten • sowie weiteren Abdecksystemen 	2 x /Jahr
Mögliche externe Projektilen	Sichtkontrolle von Bäumen, Masten, Antennen	2 x /Jahr
Wettermesssysteme	Prüfung und Kalibrierung der Messsysteme	2 x /Jahr
Kommunikationsmittel	Kontrolle der Funktion von Kommunikationsmitteln	2 x /Jahr

Entsprechend VDI-Richtlinie 6200 soll grundsätzlich eine Begehung und Kontrolle der Vorkehrungen gegen Einwirkungen von Wind, Schnee- und Eislasten mindestens einmal jährlich erfolgen. Für bestimmte sicherheitsrelevante Anlagenteile wird von den Autoren dieser Hinweise und Erläuterungen darüberhinausgehend eine Begehung und Kontrolle zwei Mal jährlich, wie vor und nach der Saison für Winterstürme, empfohlen.

Von den genannten Intervallen unabhängig, wird eine Begehung und zumindest Sichtkontrolle auch nach Extremereignissen empfohlen.

Zu Abschnitt 17.2 Information und Schulung 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 sowie Sicherung von temporären Einrichtungen wie Gerüste oder Baustellen (ggf. nur mit Zustimmung des Eigentümers möglich)
 - 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

Zu Abschnitt 17.3 Beratung von zuständigen Behörden und Einsatzkräften im Störfall (Beratungspflicht gemäß § 5 Absatz 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 beraten werden. Die umfasst insbesondere

- 1. Informationen zum Schadensfall, wie z. B.:
 - a) Freisetzung von Flüssigkeit aus einem Behälter oder Rohrleitung
 - b) Freisetzung von gasförmigen Stoffen oder festen Stoffen
 - c) Fortreißen von Behältern oder Gebinden mit dem Wind
- 2. Informationen über Art, Gefährlichkeit und Menge der ausgetretenen Stoffe
- 3. Informationen zum Emissionsweg (Kanal, Gewässer, Atmosphäre)
- 4. Informationen zum Verhalten der Stoffe in der Umwelt (z. B. Durchmischung mit Wasser, Ausbreitungsfahne in der Atmosphäre)
- 5. Abschätzung der Schadstoffkonzentrationen im Verlauf des Emissionspfades
- 6. Bewertung der Gefährlichkeit der ausgetretenen Stoffe auf Grundlage der abgeschätzten Schadstoffkonzentrationen

7. 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)
8. 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).

III Forschungsbericht: Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten

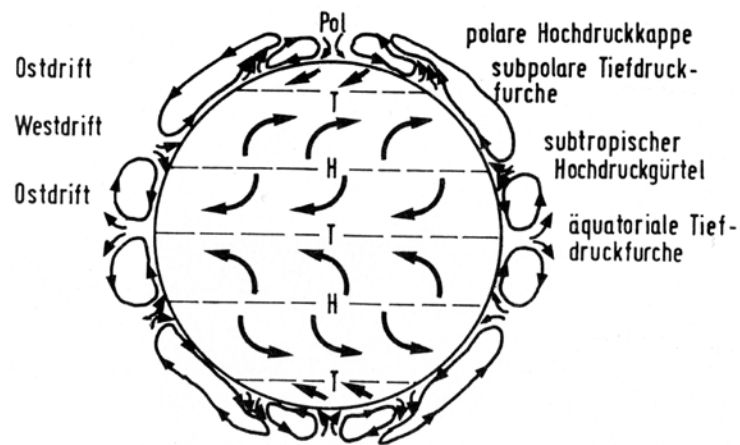
1 Die umgebungsbedingten Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten

1.1 Wind als umweltbedingte Gefahrenquelle

1.1.1 Vorbemerkungen: Entstehung und Eigenschaften von Luftbewegungen in der Atmosphäre

Die Luft der Atmosphäre ist ständig in Bewegung. Ausgelöst wird sie durch Luftdruckunterschiede, die zu einer geordneten großräumigen Bewegung wie z.B. um Hoch- und Tiefdruckgebieten führt. Beide Drucksysteme sind durch geschlossene, meist kreisförmige bis elliptische Isobaren gekennzeichnet. Bei einem Tiefdruckgebiet fällt der Druck allseitig zum Zentrum ab, man spricht daher von einer zyklonalen Druckzone. Entsprechend zeigt sich bei einem antizyklonalen Hochdrucksystem ein ins Zentrum anwachsender Luftdruck. Auch die in Europa wirkenden großräumigen, globalen Windereignisse mit großen Windgeschwindigkeiten entstehen meist infolge des Druckgefälles zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten. Wegen der Rotation der Erdkugel unterliegt der Wind zusätzlich zu den Druck- auch Corioliskräften. Dadurch wird die Strömung in großer Höhe von der Richtung des Druckgradienten in die Richtung der Isobaren abgelenkt. Beim Umströmen von Hoch- und Tiefdruckzentren, ist die Bahnkrümmung mitunter jedoch so groß, dass zusätzliche Zentrifugalkräfte wirksam werden. Das Zusammenspiel aller Kräfte bestimmt schließlich Größe und Richtung der Geschwindigkeit des in großen Höhen wehenden, von der Erdoberfläche weitgehend ungestörten Windes. Er wird als geostrophischer Wind oder als Gradientenwind bezeichnet und tritt einer Höhe von etwa 1000m über dem Erdboden auf.

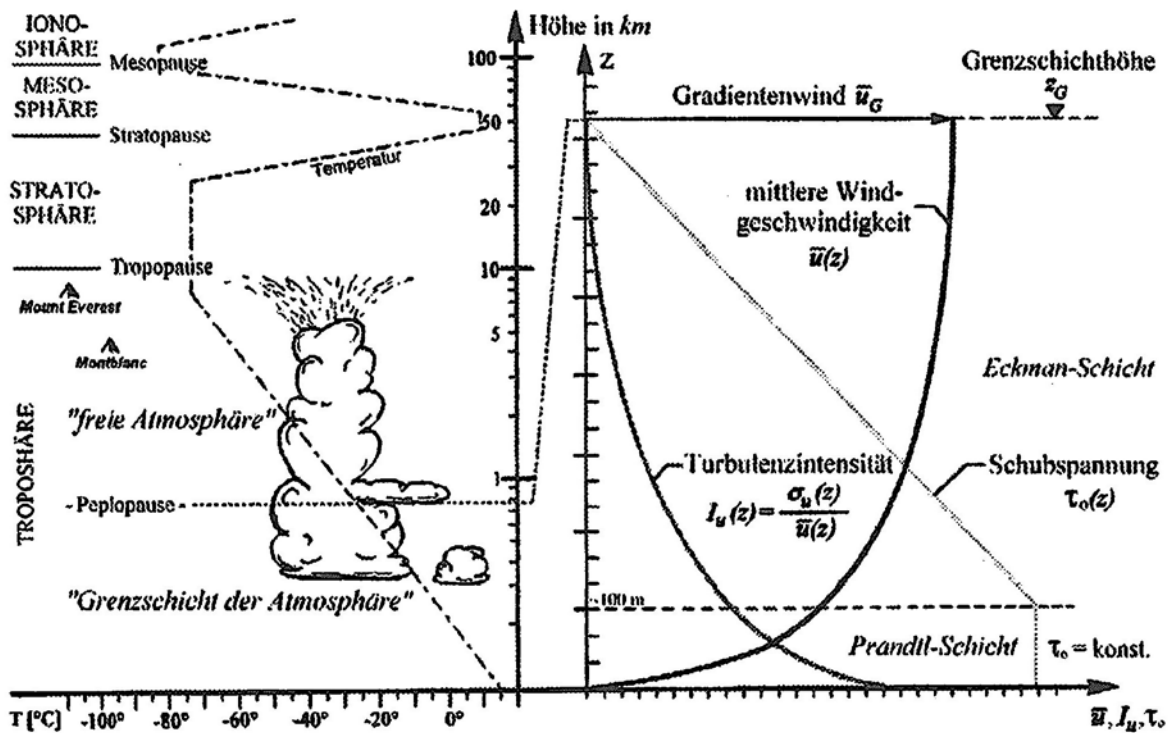
Abbildung 23: Schema der Hoch- und Tiefdruckgebiete und den Windverhältnissen in der freien Atmosphäre



Als eine allgemeine Erscheinung kann man in Abbildung 23 eine Abfolge von Druckzonen vom Äquator zu den jeweiligen Polen erkennen, mit tiefem Luftdruck am Äquator (das ist die innertropische Konvergenzzone ITCZ die auch als äquatoriale Tiefdruckrinne bezeichnet wird), hohem Luftdruck in den Subtropen, gefolgt von tiefen Luftdruck um den Breitengrad bei 60° (Mittelbreitentief bzw. subpolare Tiefdruckfurche) und wieder höherem Luftdruck in den polaren Gebieten. Dieses Grundmuster ist auf dem gesamten Globus im klimatologischen Mittel zu verfolgen, stellt sich auf der Südhalbkugel wegen der dort etwas gleichförmigeren Anordnung von Land- und Wasserflächen tendenziell deutlicher als in der nördlichen Hemisphäre heraus. Mit diesen Druckzonen verbunden ist ein System zonalen, den Breitenkreisen folgenden Winden.

Abbildung 23 fasst die Windvorgänge in einer prinzipiellen Darstellung zusammen. Auf der Nordhalbkugel werden Zyklonen vom Wind im Gegenuhrzeigersinn, die Antizyklonen im Uhrzeigersinn umweht. Das bedeutet gleichzeitig, dass auf der nördlichen Hemisphäre an der Ostseite des Hochs und der Westseite des Tiefs mit einer nördlichen Strömung Kaltluft nach Süden geführt wird und jeweils umgekehrt nach Norden strömt. Ein Vorgang der für den Klimahaushalt der Erde, aber ebenso für das tägliche Wettergeschehen von außerordentlicher Bedeutung ist.

Abbildung 24: Vertikalstruktur der Atmosphäre und Eigenschaften der planetarischen Grenzschicht



Der Atmosphärenbereich in der die oben beschriebenen Luftbewegungen und somit das Großwettergeschehen hervorgerufen werden, ist die Troposphäre, die in mitteleuropäischen Breiten eine durchschnittliche Höhe von ca. 10 km erreicht. Abbildung 24 lässt sie in der Vertikalstruktur der Atmosphäre oberhalb der planetarischen Grenzschicht erkennen. In diesem bodennahen Bereich wird der Gradientenwind durch Reibung an der Erdoberfläche verzögert. Da die Reibungskraft entgegengesetzt zur Strömung wirkt, fällt die Windrichtung nun nicht mehr mit der Isobarenrichtung zusammen, sondern schwenkt in Richtung des Druckgefälles. Sie wächst zudem mit Annäherung an den Boden und kann bei starkem Wind in Bodennähe bis zu ca. 40° betragen. Man spricht daher von der Verdrehungsschicht (Ekman-Layer) der Atmosphäre, sie macht den Hauptteil der gesamten atmosphärischen Grenzschicht aus. Nur in der so genannten Prandtl-Schicht oder surface-layer, die nicht mehr als etwa 10% der gesamten Grenzschicht umfasst, ist die Windrichtung praktisch konstant. Die Erdrotation spielt hier keine Rolle und der Einfluss der Reibung dominiert die Verhältnisse.

Der Strömungszustand in der Grenzschicht ist turbulent. Sie wird von der freien Atmosphäre über den Gradientenwind angetrieben und erreicht je nach Bodenbeschaffenheit Höhen von wenigen 100m bis maximal etwa 700m. Bei mäßigen Windgeschwindigkeiten gewinnen thermische Prozesse an Einfluss. Die Bodengrenzschicht und insbesondere ihr Turbulenzzustand unterliegen daher auch einem tageszeitlichen Zyklus, der dem Rhythmus der solaren Einstrahlung folgt. Ein typischer Tag-Nacht-Gang der atmosphärischen Schichtungsverhältnisse zeigt, dass nach Sonnenaufgang die von der Sonne zugestrahlte Energie von der Unterlage aufgenommen wird und durch turbulente Austauschprozesse in die bodennahen Luftschichten zurückgeführt wird. Die Atmosphäre erwärmt sich und bildet eine gut durchmischte turbulente Schicht (Mischungsschicht oder convectivemixedlayer) aus, die über die Entrainment-Zone mit der freien Atmosphäre in

Wechselwirkung steht. Mit Sonnenuntergang nimmt die Turbulenzintensität innerhalb dieser Schicht stark ab, in Bodennähe beginnt sich eine stabile Schicht auszubilden, die im Laufe der Nacht anwächst (nächtliche Grenzschicht). Sie ist oft nur von begrenzter Mächtigkeit, so dass der darüber verbleibende Rest der Mischungsschicht vom Vortage als Residual-Schicht einen Puffer zur freien Atmosphäre bildet.

1.1.2 Qualitative Analyse des natürlichen Windes

1.1.2.1 Erscheinungsformen und ihre Entstehungsmechanismen

Eine erste Übersicht extremer Windphänomene

Extreme Windverhältnisse, die zu schweren Schäden an baulichen Anlagen führen und insofern auch eine Gefahrenquelle von Anlagen nach StörfallV darstellen können, sind insbesondere für die folgenden Windphänomene

1. Tropische Wirbelstürme,
2. Tornados,
3. Außertropische Stürme (Tiefdruckstürme),
4. Gewitterstürme,
5. Schwerkraftwinde

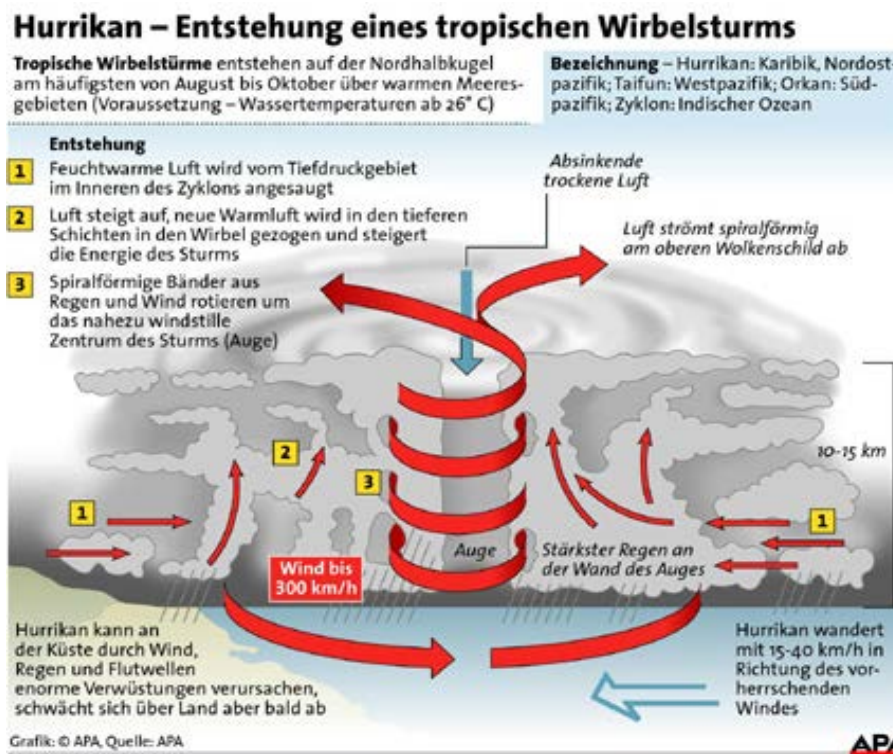
zu erwarten. In Schönwiese 2008 wird eine weltweite Übersicht gezeigt. Die meisten Gefahren durch Wind treten in den Tropen und Subtropen auf. Extreme Windverhältnisse infolge tropischer Wirbelstürme können sich entlang der Küstenlinie der südlichen USA, an der Ostküste Afrikas einschließlich Madagaskar und Ozeanien sowie im asiatischen Pazifikraum und Australiens ereignen. Sie sind saisonal bedingt und reichen vom Frühsommer bis in den Herbst. Außerhalb dieser Bereiche sorgen insbesondere im Winterhalbjahr starke Sturmböen infolge großräumiger Tiefdruckfronten für extreme Windverhältnisse. Von Tornados sind vor allem die USA, die hier mit deutlich größerer Intensität und Häufigkeit als in den anderen Regionen über das Land ziehen, aber auch weite Teile Europas und Australiens betroffen. Über Land können zudem starke Gewitterstürme auftreten. Sie sind mit bis zu ca. 200 Gewittertagen pro Jahr weltweit am häufigsten in den kontinentalen Tropen anzutreffen. In Europa nimmt die Gewitteranzahl von Nord nach Süd zu: in Nordskandinavien sind bis zu 5, in Deutschland um die 20 und im Mittelmeerraum um etwa 30 Gewittertage pro Jahr wahrscheinlich.

Die nachfolgende Zusammenstellung liefert eine qualitative Charakterisierung weltweiter Windphänomene mit potentiell extremen Windgeschwindigkeiten:

Tropische Wirbelstürme

Man nennt sie in der Karibik und im Golf von Mexiko Hurrikan, im westlichen Pazifik Taifun, in Indien Zyklon, in Australien Willy-Willy. Tropische Wirbelstürme sind extreme thermische Tiefdruckgebiete. Sie entstehen ausschließlich über tropischen Meeren ab etwa 5° nördlicher bzw. südlicher Breite. Im Bereich des Äquators treten sie nicht auf, da hier infolge der zu geringen Corioliskraft keine sturmtypische Wirbelstruktur entstehen kann. Voraussetzung für die Entstehung tropischer Wirbelstürme ist eine starke Strömungsdivergenz (Auseinanderfließen der Luftmassen) in einer Höhe von etwa 15 bis 18 Kilometer. Dieses Wegströmen der Luft in großer Höhe sorgt für eine geringere Luftmasse in diesem Bereich der Atmosphäre, wodurch auf Meeresebene tiefer Druck entsteht. In den Tropen ist vor allem im Bereich der innertropischen Konvergenzzone (ITCZ, Zone der größten Erwärmung, Zusammenströmen der nördlichen und südlichen Passatwinde) eine starke Höhendivergenz vorhanden. Dem entsprechend lässt sich auch häufig beobachten, dass Wirbelstürme aus großen Gewittern oder Gewitter-Ansammlungen der ITCZ entstehen. Als zweite wichtige Voraussetzung muss das Meerwasser eine Mindesttemperatur von 27° aufweisen. Nur dann kann genügend Wasserdampf bereitgestellt werden. Das ist auch der Grund, warum vor den Westküsten Südamerikas und Afrikas keine Wirbelstürme entstehen. Die hier aufdriftenden kalten antarktischen Meeresströmungen verhindern eine großflächige Erwärmung des Meerwassers bis auf die notwendige Mindesttemperatur. Abbildung 25 stellt in anschaulicher Weise die Abläufe bei der Ausbildung eines tropischen Wirbelsturms zusammen.

Abbildung 25: Entstehung eines tropischen Wirbelsturms



© www.klimawandel.com (abgerufen am 11.11.2011)

Wirbelstürme erreichen gewaltige Ausmaße, typisch sind Durchmesser von mehreren hundert Kilometern. In ihnen werden Windgeschwindigkeiten von bis zu 400 km/h erreicht. Sie entstehen, wenn im Spätsommer über großen Wasserflächen große Mengen an Wasser verdunsten. Ein Hurrikan hat dabei die Fähigkeit, sich selbst anzutreiben und sogar weiter zu verstärken. Sobald der Sturm jedoch über Land ist, fehlt die Zufuhr von Wasserdampf in großem Umfang, so dass er dann an Kraft verliert. Hurrikane entstehen oft weit entfernt vor der Küste. Ihre Zugbahnen lassen sich relativ genau voraus berechnen, so dass in begrenztem Maß einer Gefährdung durch den extremen Sturm vorgebeugt werden kann. Die besondere Gefahr, die ein Hurrikan mit sich bringt, liegt in der enormen Kraft und Geschwindigkeit der Winde, die sich rund um das Sturmzentrum, das so genannten Auge, in dem es nahezu windstill ist, wirbelförmig drehen. Der Wind gefährdet dabei bauliche Anlagen, sorgt aber vor allem für meterhohe Wellen und einen starken Anstieg des Meeresspiegels, was in den betroffenen Küstenregionen Sturmfluten mit sich bringen kann. Zusätzlich entstehen bei einer Abkühlung des Luftwirbels über dem Festland große Niederschlagsmengen, die weite Teile der betroffenen Regionen überfluten können.

Die Saffir-Simpson-Hurrikan-Skala bietet eine Möglichkeit zur Klassifizierung eines Hurrikans entsprechend der beobachteten Windgeschwindigkeiten. Sie erlaubt zudem eine erste Einschätzung der durch einen Hurrikan zu erwartenden Schäden.

Ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Tropischen Wirbelstürmen und Tornados wurde bereits festgestellt. So besteht die Möglichkeit, dass sich beim Auftreffen des Hurrikans auf Land Tornados jeder Intensität ausbilden, so z.B. der Fall bei den Wirbelstürmen Beulah (1967) und Danny (1985). In der Regel sind die entstehenden Superzellen kleiner und von geringerer Intensität und kürzerer Lebensdauer, aber nicht unbedingt weniger gefährlich.

Tornados

Tornados können im Gegensatz zu den Tropischen Wirbelstürmen sowohl über Wasser als auch über Land entstehen. Die genauen Umstände, unter denen sie sich entwickeln, sind noch nicht abschließend erforscht. Sicher ist jedoch, dass

auch hier aufsteigende Feuchtigkeit einen großen Anteil hat. Zusammentreffende feuchtwarmer Luft meist aus dem Mittelmeerraum und zeitgleich zuströmende trocken-kalte Polarluft erzeugen einen starken Temperaturgradienten. Durch den Auftrieb der Warmluft bilden sich sogenannte enge Aufwindchlote. Dort findet ein Kondensationsprozess statt, der zu einer Gewitterwolke mit Schauern führt. Es ist eine sogenannte Superzelle entstanden. Hohe Seitenwinde versetzen die aufsteigende Luft in Rotation. In Richtung Erde entwickelt sich ein Wirbel. Kondensationsprozesse in dem Wirbel und vom Erdboden aufgenommenes Material lassen den Wirbel als dunklen Wolkenschlauch sichtbar werden. Die weitaus meisten Tornados bleiben folgenlos, da sie nur kurzzeitig bestehen und in unbesiedeltem Gelände keine durchgreifenden Schäden auslösen. Starke Wirbel haben aber die Kraft, auch schwere Gegenstände wie Fahrzeuge vom Boden anzuziehen und zu verwerfen. Abbildung 26 zeigt die weltweite Verbreitung von Tornados. Im Wesentlichen betroffen sind neben den USA, Europa, Südafrika, der asiatische Raum und Australien.

Abbildung 26: Weltweite Verbreitungsgebiete von Tornados

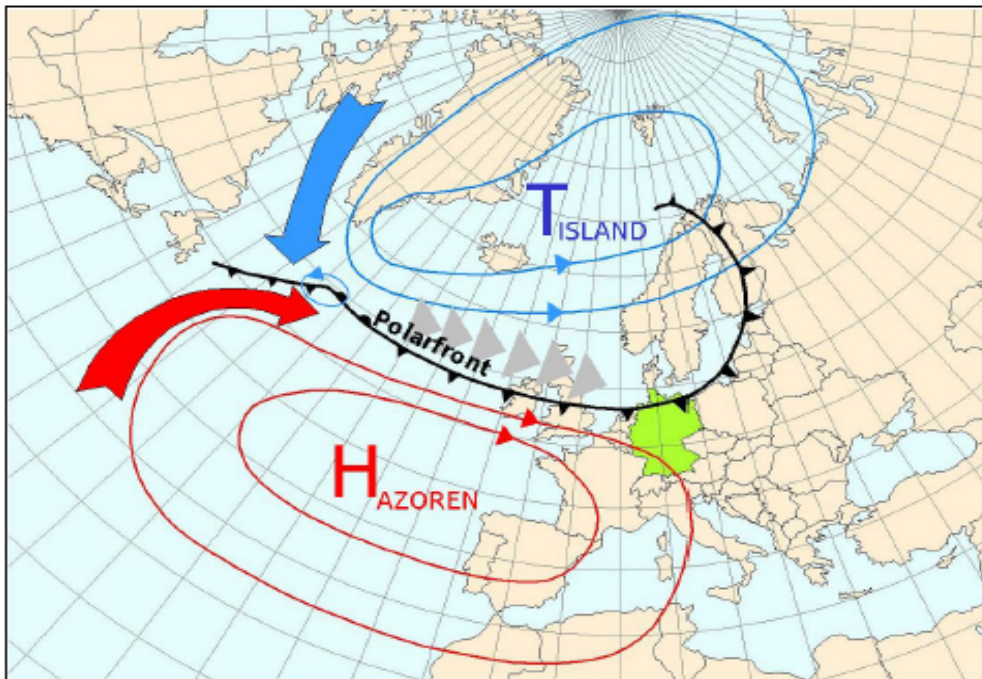


© www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/servereweather/tornadoes.html (abgerufen am 11.11.2011)

Tiefdruckstürme

Über Europa sind im klimatologischen Mittel zwei globale Strömungen für das Zustandekommen von Tiefdruckstürmen hauptverantwortlich. Dies sind zum einen das Hochdruckgebiet über den Azoren (kurz: Azorenhoch) und zum anderen das polare Tiefdruckgebiet, Abbildung 26.

Abbildung 27: Azorenhoch und Islandtief als typische Auslöser europäischer Tiefdruckstürme



© Deutsche Rückversicherung

Dabei transportiert das Hochdruckgebiet feucht, warme Luftmassen aus dem Mittelmeer- und Atlantikraum, während das Tiefdruckgebiet trocken, kalte Polarluft mit sich führt. Im Bereich der zusammentreffenden Strömungen kommt es dabei zu einer Wechselwirkung zwischen beiden Luftmassen. Die Kaltfront bewirkt, dass die in der warmen Luft des Azorenhochs gespeicherte Feuchtigkeit auskondensiert. Hierdurch entsteht ein Tiefdruckgebiet, das sich regelmäßig über Island entwickelt und als Islandtief bezeichnet wird. Durch die entgegengesetzte Drehrichtung entsteht zwischen beiden Gebieten ein relativ breiter Streifen, dem ständig neue Polarluft nachgeführt wird. Die kanalisierende Wirkung führt zu einer Geschwindigkeitszunahme der Luftmassen und diese treffen in den häufigsten Fällen aus einer nord-westlichen Richtung auf das mitteleuropäische Festland. Die Ausdehnung dieses Sturmtyps kann mehrere tausend Kilometer betragen, wobei die dort vorherrschenden Geschwindigkeiten im Vergleich zu denen von Tropischen Gewitterstürmen eher gering sind. Besonders stark ausgebildete Tiefdruckstürme in Deutschland waren Vivian (1990), Wiebke (1990), Lothar (1999) und Anatol (1999).

Gewitterstürme

Gewitterstürme entstehen aus einer Cumulonimbus Wolke mit aus großer Höhe herabstürzenden Kaltluftmassen. Im Gegensatz zu den Tiefdruckstürmen ist hierbei der Dichteunterschied der unterschiedlichen Schichten als Auslöser zu sehen. Am Boden kommt es durch die Umlenkung der Luftmassen zur Entwicklung einer Böenfront. Schlagregen oder Hagel gehen oftmals mit diesem Sturmtyp einher. Tropische Gewitterstürme können auch in Wüstengebieten auftreten und führen dort bei entsprechenden Geschwindigkeiten zur Ausbildung eines Sandsturms.

Neben diesen großräumig wirkenden Windereignissen gibt es eine Reihe weiterer, lokaler Entstehungsursachen für den Wind, die von den lokalen Bedingungen gesteuert werden. Beispiel hierfür sind die See-Landwinde oder Land-Seewinde, Föhn usw. Bei den See-Landwinden steigt die über dem Land erwärmte Luft auf, in das entstehende Gebiet niedrigen Luftdrucks am Boden strömen Luftmassen die von der See kommen, beim Land-Seewind ist es umgekehrt. Beim Föhn sinkt eine wolkenfreie Luftmasse hinter einem Gebirge ab und erwärmt sich aufgrund des nach unten anwachsenden Luftdruckes, die Luft am Gebirgsfuß ist warm. Wenn dieselbe Luftmasse zuvor beim Anstieg über das Gebirge noch Feuchtigkeit durch Ausregnen und Kondensation verloren hat, so ist wegen der entstehenden Kondensationswärme der

Temperaturabfall auf der Luvseite geringer als der Temperaturanstieg auf der Leeseite. Hieraus resultieren die bekannten Temperaturunterschiede. Der entstehende Fallwind kann Geschwindigkeiten bis zu 60m/s erreichen.

Tabelle 16: Extreme Windgeschwindigkeiten weltweiter Sturmphänomene

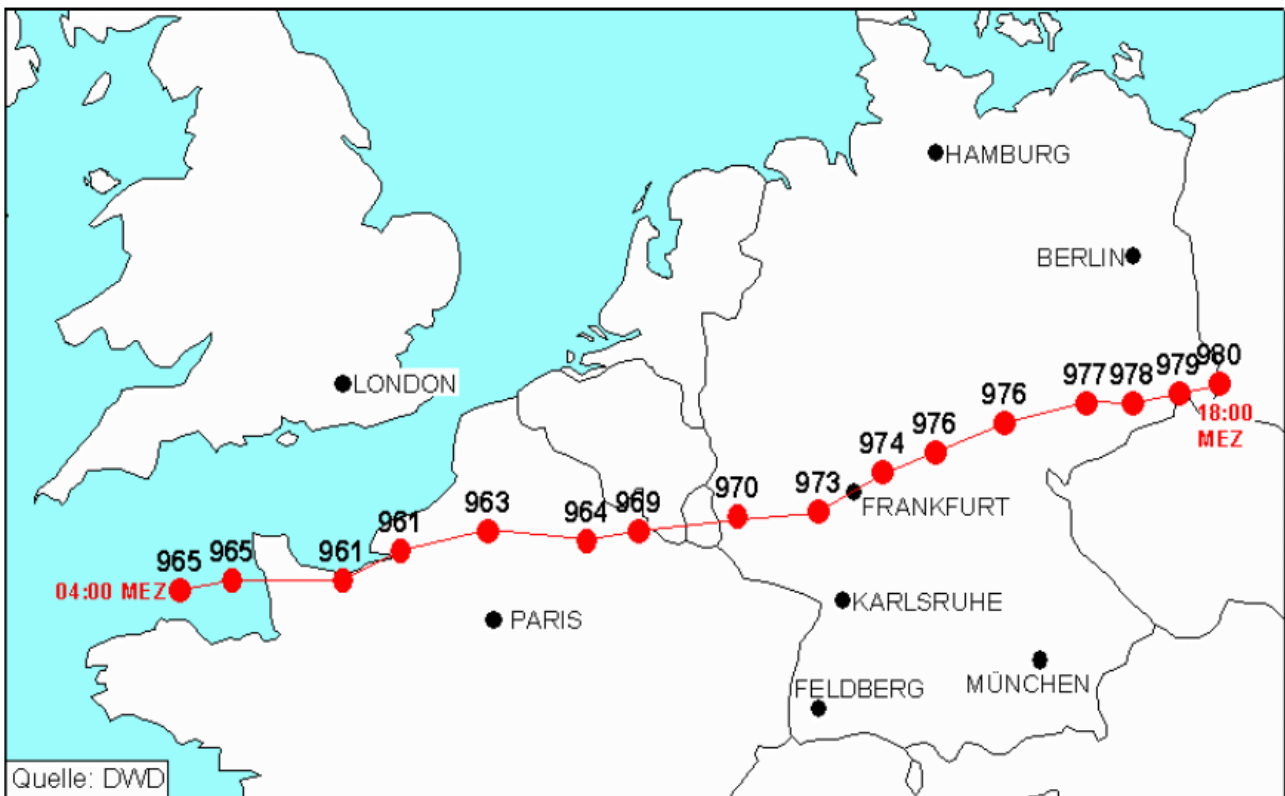
Phänomen	Geschwindigkeiten	Ausdehnung	Entstehung
Tornado (Groß-Trombe)	mehrere hundert km/h	100 bis 1000 m	beim Aufeinandertreffen von trocken-kalter und feucht-warmer Luft
Windhose, Sand- oder Staubteufel (Klein-Trombe)	100 bis 200 km/h	einige Meter	durch bodennahe Warmluft, ist meist nur über ausgedehnten, ebenen Flächen zu finden
Tiefdrucksturm	bis 180 km/h	1000 bis 2000 km	Druckunterschiede der aufeinander treffenden Luftmassen
Föhnsturm (Fallwinde) – Lokalwindssysteme	bis 220 km/h	mehrere km	warmer und trockener Fallwind an Berghängen
Hurrikan, Taifun, Zyklon (Tropische Wirbelstürme)	an Küsten		
Gewittersturm	70 bis 110 km/h	mehrere km	Dichteunterschied der Luftschichten als Auslöser
Blizzard	50 bis 100 km/h	mehrere km	Kälteeinbruch durch Polarluft

Tabelle 16 fasst einige Eckdaten der skizzierten Windphänomene nach Größe der auftretenden Windgeschwindigkeiten sowie des zugehörigen Einzugsgebietes zusammen und gibt überdies Hinweise auf die wesentlichen Entstehungsmechanismen.

1.1.2.2 Tiefdruckstürme – Windverhältnisse in der atmosphärischen Grenzschicht

Im globalen Windsystem gehört Deutschland zur Zone der Westwinde. In dieser Zone driften Zyklone überwiegend ostwärts. Abbildung 28 zeigt in stündlichen Abständen die Position des Tiefdruckkerns des Orkans Lothar auf seinem Durchzug von der Nordostküste Frankreichs über Trier, Frankfurt und Jena bis nach Ostsachsen.

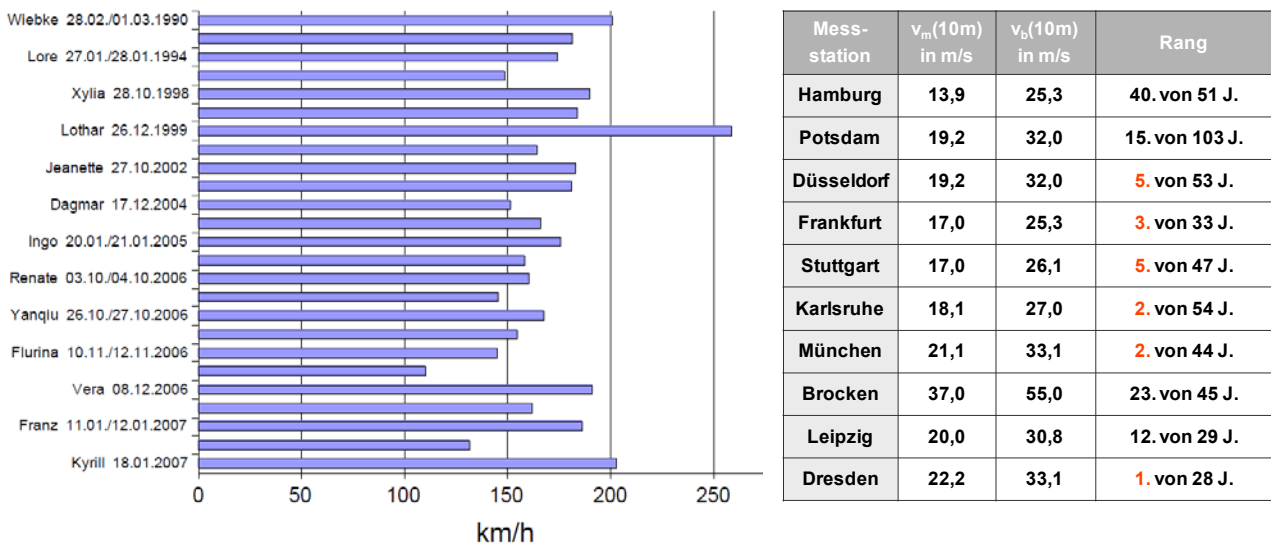
Abbildung 28: Zugbahn des Orkanes „Lothar“ am 26.Dez.1999



Die stärksten Winde wurden hinter der durchziehenden Front auf der Südseite des Orkantiefs beobachtet und betrafen weite Teile Frankreichs, der Schweiz und Süddeutschlands. So wurden z.B. im Rheintal maximale Mittelwinde von etwa 90 km/h und Spitzenböen von bis zu 150 km/h erreicht. Auf den Bergen waren die Windgeschwindigkeiten noch höher: am Feldberg im Schwarzwald traten Mittelwinde von 130 km/h und Böen mit ca. 210 km/h auf. Auf den Alpengipfeln, wie dem Wendelstein, wurden sogar Windspitzen um 260 km/h erreicht.

Abbildung 29a zeigt die herausragende Stellung des Orkans Lothar innerhalb des letzten Jahrzehnts. Er setzt sich mit deutlich größeren Windspitzen von den anderen Orkanen ab, die aber immer noch zu Maximalwerten zwischen 150 km/h bis 200 km/h innerhalb von Deutschlands geführt haben. Abhängig von den meteorologischen Rahmenbedingungen unterscheiden sich die Abläufe während der Orkane und ihre möglichen Auswirkungen. Der Orkan Kyrill zeichnete sich z.B. dadurch aus, dass er ungewöhnlich großflächig und schnell über ganz Deutschlands eingefallen ist. Im Durchzug der Kaltfront hat der Orkan zu lokalen Extremwinden geführt. Abbildung 29b lässt einen gewissen Schwerpunkt von Süd- (München) über Mittel- (Düsseldorf) bis Ostdeutschland (Dresden) erkennen. Kyrill hat in diesen Regionen Spitzenpositionen bei den in den letzten 50 Jahren beobachteten Stürmen erreicht. Begleitet wurde er von extremen Temperaturstürzen. Betrachtet man das Schadensausmaß wird dem Orkan Lothar deutschlandweit ein Gesamtschaden von ca. 8,4 Mrd.-€ zugeschrieben. Kyrill hat sich durch seine weiträumige Spur als der schwerste Orkan mit den größten versicherten Schäden von ca. 7 Mrd.-€ erwiesen.

Abbildung 29: Orkane über Europa



maximale Windspitzen, (Stuck J., 2008)

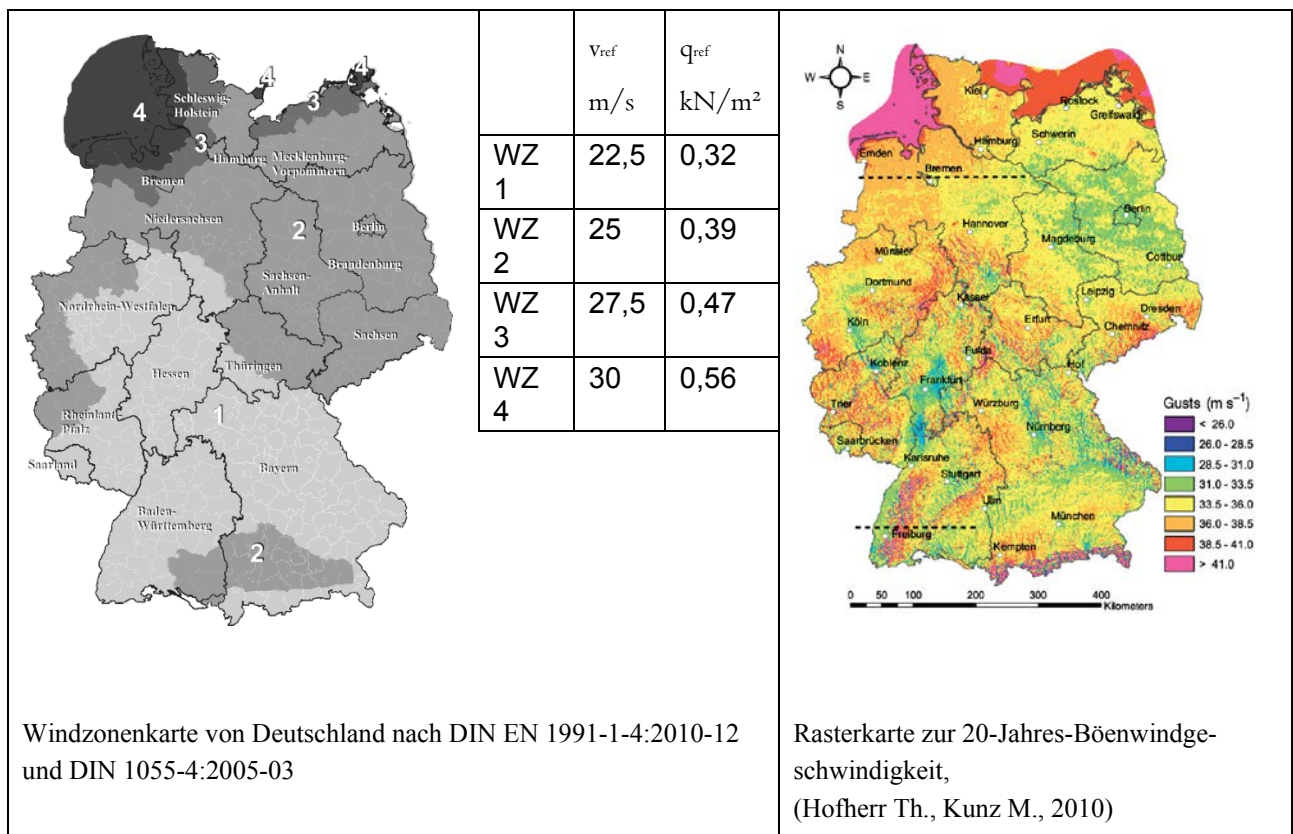
Windgeschwindigkeiten innerhalb Deutschlands zum Orkan Kyrill, (Diburg S. et. al., 2011)

Die Extremwinde in Deutschland sind fast ausschließlich die Folge derartiger Tiefdruckstürme. Es liegt daher auf der Hand, dass in den zurückliegenden Jahrzehnten viele Anstrengungen unternommen wurden, die Eigenschaften dieser Extremwinde ingenieurmäßig aufzuarbeiten. Ziel dieser Bemühungen ist es, die Einwirkungen aus Wind auf Tragwerke des Hoch- und Ingenieurbaus sicher beurteilen zu können.

Die bei Bauwerken übliche Risikoanalyse beruht auf dem 50-Jahreswiederkehrwert der mittleren Windgeschwindigkeit. In Abbildung 30a ist die Windzonenkarte Deutschlands nach DIN 1055-4:2005-03 zusammen mit den zonenabhängigen mittleren Windgeschwindigkeiten und zugehörigen Geschwindigkeitsdrücken dargestellt. Diese sind identisch zu denen der DIN EN 1991-1-4:2010-12, welche seit dem 01.07.2012 bauaufsichtlich eingeführt ist. Grundlage der Karte ist das dichte Windmessnetz in Deutschland. Allein der Deutsche Wetterdienst betreibt etwa 180 Messstationen, (Wichura B. 2009). Damit verfügt man über langjährige Aufzeichnungen, die Voraussetzung für eine statistische Auswertung auf Basis von Jahresextremwerten der zeitlich mittleren Windgeschwindigkeit sind, (Kasperski M., Hölscher N., Versen U., 2001).

Die Windmessungen erfolgen nach internationalen Standards in offenem und ebenem Gelände in einer Messhöhe von 10m über Grund. Die in der Windzonenkarte angegebenen Werte gelten für diese Standardbedingungen. Sie haben eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 2% pro Jahr, d.h. sie werden in 50 Jahren im statistischen Mittel gerade einmal erreicht oder überschritten. Sie sind aus der Windstatistik unabhängig von der Windrichtung bestimmt worden. Die Tatsache, dass gerade bei extremen Stürmen bestimmte Windrichtungssektoren vorherrschen, wird in der Windzonenkarte nicht berücksichtigt. Es wird vielmehr konservativ angenommen, dass der extreme Sturm aus jeder beliebigen Richtung zu erwarten ist. Die Windzonenkarte nimmt daher im Wesentlichen die Veränderlichkeit von Windstärke und Windhäufigkeit innerhalb von Deutschland auf. Insgesamt vier Windzonen werden unterschieden, die windstärkste Zone liegt erwartungsgemäß im norddeutschen Küstenbereich.

Abbildung 30: Karten zur Sturmgefährdung



Zu einem ähnlichen Bild führen neuere Untersuchungen des Deutschen Wetterdienstes (Augter G., Roos M., 2011) oder der Münchener Rückversicherungsgesellschaft (Hofherr Th., Kunz M., 2010). Abbildung 30b zeigt als exemplarisches Ergebnis dieser Arbeiten eine Kartierung der Böenwindgeschwindigkeiten mit einer jährlichen Eintrittswahrscheinlichkeit von $p=0,05$ (Wiederkehrperiode ca. 20 Jahre). Die Affinität zum extrem Mittelwind nach DIN EN 1991-1-4:2010-12 und DIN 1055-4:2005-03 ist bemerkenswert, zeigt sich doch der globale Trend maximaler Winde in den Küstenregionen und ein „Abflauen“ in Richtung der norddeutschen Tiefebene in guter Übereinstimmung. Mit Abbildung 30b ist eine hohe räumliche Auflösung gelungen. Die Windgeschwindigkeiten sind in einer Rasterung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ hinterlegt. Grundlagen der extremwertstatistischen Auswertungen sind neben den langjährigen Windbeobachtungen zusätzlich Rechenmodelle, entweder auf meteorologischer Basis, wie z.B. das Mesoskalenmodell KAMM (Karlsruher Atmosphärisches Mesoskaliges Modell), oder wie im Fall der DWD-Sturmkarten ein statistisches Windfeldmodell.

Die Unterscheidung von Mittelwind und Böenwind zeigt, dass der Strömungszustand in der atmosphärischen Grenzschicht bei derart starken Extremwinden praktisch überall und immer turbulent ist. Die Luftmassen führen zusätzlich zu ihrer Hauptbewegung noch eine ungeordnete Störbewegung aus. Turbulenz ist ein stochastischer Prozess, der sowohl in Zeit und Raum veränderlich ist. Seine Eigenschaften werden durch statistische Parameter beschrieben, die empirisch gewonnen werden. Man spaltet den turbulenten Wind in seinen zeitlichen Mittelwert und die ihm überlagerten stochastischen Schwankungsanteile infolge der Turbulenz auf. Dieser klassische Ansatz benutzt die Modellannahme, dass die Mittelwerte und Schwankungsanteile statistisch stationär sind. Tatsächlich weicht der natürliche Wind von dieser Annahme ab: auch die Hauptbewegung, die nach einem strömungsfesten Koordinatensystem zur mittleren Windrichtung verfolgt wird, hängt von der Zeit ab.

Abbildung 31: Entwicklung der mittleren Windgeschwindigkeit v_m und der zugehörigen Windrichtung zum Orkantief Lothar gemessen an der DWD-Station in Stötten

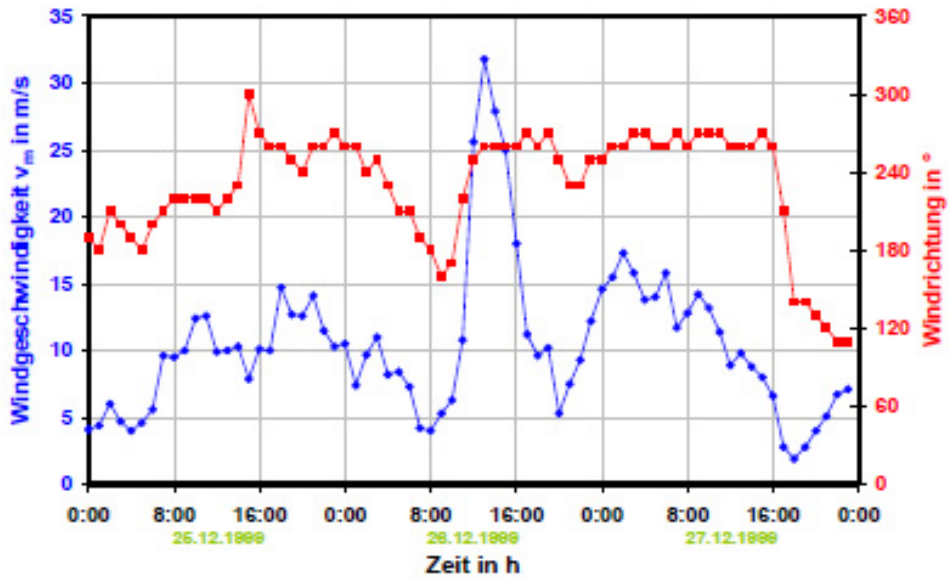
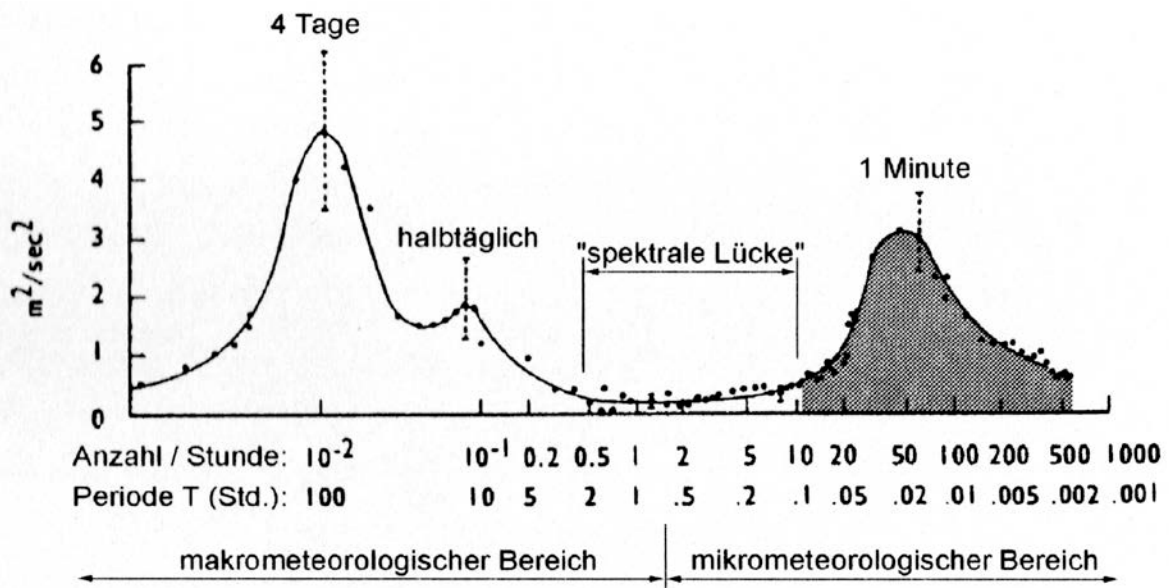


Abbildung 31 zeigt, wie sich das Orkantief Lothar mit der Zeit entwickelt und über eine Zeitspanne von etwa 5 Stunden seine maximale Sturmstärke erreicht. Ordinate ist die mittlere Windgeschwindigkeit als 10-min-Mittelwert. Die Windgeschwindigkeitsschwankungen mit Perioden von mehr als 10min rechnet man zu den meso- und makroskaligen Bewegungen. Die turbulente Schwankungsbewegung ist mikroskalig und in der Darstellung nicht enthalten.

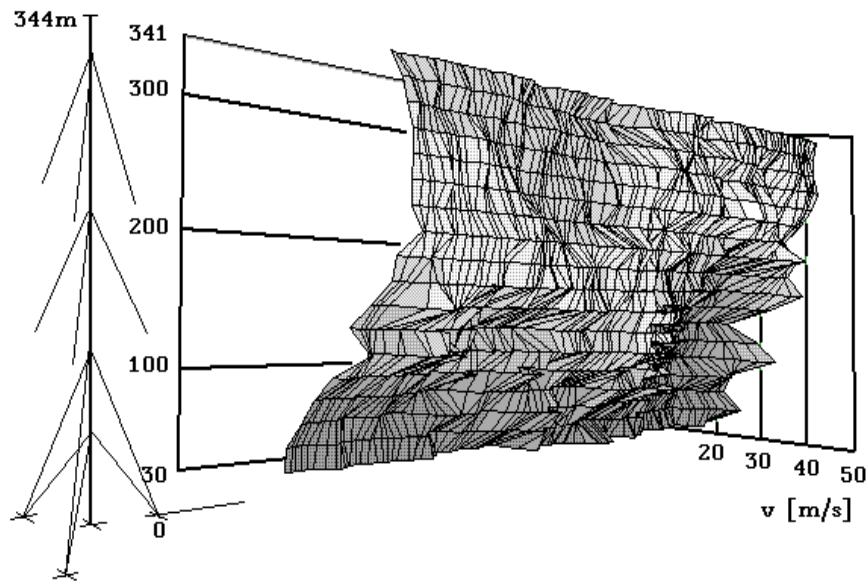
Abbildung 32: Spektraldichtevertelung der mittleren Windgeschwindigkeit zum makro- und mikrometeorologischen Bereich



Aus dem instationären Verhalten des natürlichen Windes ergibt sich die Notwendigkeit Haupt- und Schwankungsbewegung für ein geeignet festgelegtes Zeitintervall zu trennen. Dies führt dazu, dass heute eine Mittelungszeit von 10-min üblich ist. Bei Perioden zwischen 10-min und 1h tritt nämlich eine spektrale Lücke auf, die die turbulente Bewegung in der Strömung von der der Großräumigen trennt. Das Energiespektrum von Abbildung 32 gibt Aufschluss über die Frequenzbereiche, in denen große Beiträge zum Effektivwert der Schwankungsgeschwindigkeit in Windrichtung liegen. Das erste Maximum im makrometeorologischen Bereich entspricht der viertägigen Periode des Großwettergeschehens, sie wird als die durchschnittliche Durchzugszeit eines voll entwickelten Tiefdruckgebietes verstanden. Der zweite niedrigere Höchstwert spiegelt die halbtäglichen Änderungen infolge der Windflauten bei Sonnenauf- und Sonnenuntergang wieder. Das Maximum im mikrometeorologischen Bereich bei einer Periode von etwa 1min ist auf die von der Rauigkeit der Erdoberfläche erzeugte Windturbulenz zurückzuführen.





Die Windgeschwindigkeitsschwankungen der Turbulenz werden in der Natur als Windböen wahrgenommen, die in einem Gelände mit hoher Oberflächenrauigkeit mit größerer Intensität als in weniger rauem Gelände ablaufen. Auch die durchschnittliche Böengröße ist von der Geländebeschaffenheit abhängig. Hohe Rauigkeit führt zu eher kleineren aber intensiveren Windböen, glattes Gelände lässt eine starke Ordnung der Windturbulenz zu, so dass sich Windböen über größere Entfernung entwickeln können. Man beobachtet zudem ein Zusammenwirken von Böen unterschiedlicher Größe, in dem große, energietragende Turbulenzballen zu immer kleineren Elementen zerfallen. Abbildung 33 zeigt hierzu einen 20-sec Ausschnitt eines Windgeschwindigkeitsfeldes, das bis in die Höhe von 341m während des Orkans Vivian am 25.1.1990 gemessen wurde, (Peil U., Nölle H., 1992). Man erkennt die unterschiedlich großen Böenballen, die sich zufällig dem Grundwind überlagern. Wegen der beschränkten Größe der Windböen werden kleinere Anlagen vollständig von ihr umhüllt, bei großen Anlagen werden dagegen nur Teile der Anlage von der Böe getroffen. Die Erkenntnis, dass die maximalen Windgeschwindigkeiten in Form dieser Böenkörper sehr lokal auftreten, ist wesentlich für die Beanspruchung einer Anlage. Ihre Größe und ihr Energiegehalt sind wichtige Informationen zur Bewertung böeninduzierter Schwingungen.

Abbildung 33: Zeitlicher Ablauf eines Windprofils



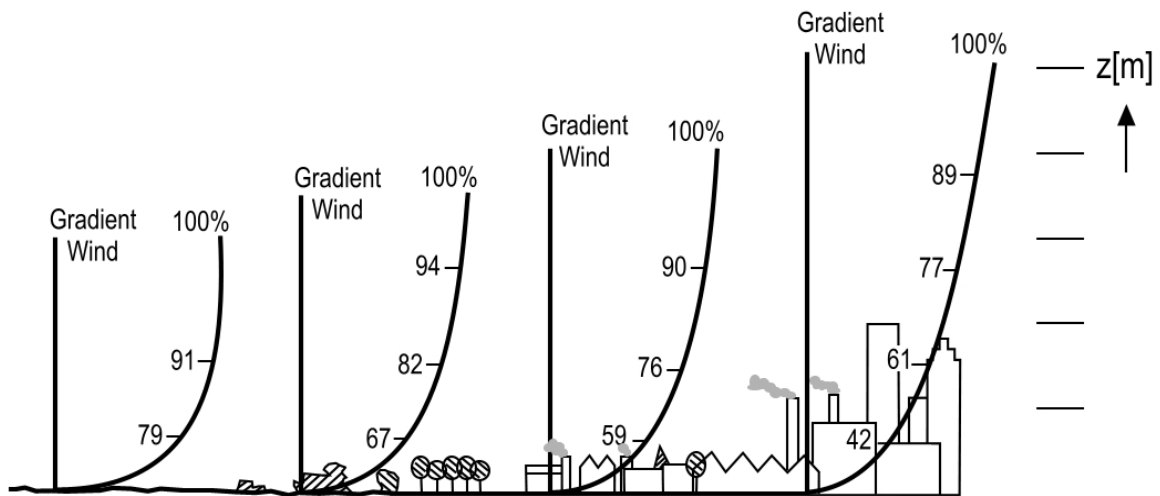
Im Ergebnis führt die Trennung von zeitlich mittlerer Grundströmung und Böentätigkeit dazu, dass in offenem wenig rauem Gelände etwa 50% der Windlast als statische und 50% als stochastisch schwankende Last zu berücksichtigen sind. DIN EN 1991-1-4:2010 und DIN 1055-4:2005-03 erfassen die Auswirkungen der Bodenrauigkeit auf beide Lastanteile durch vier Geländekategorien, die in Abbildung 34 definiert sind. Mit der Kategorie GK-I wird die geringe Reibung zwischen einer Eisfläche oder Wasserfläche und der Luftströmung, also z.B. der Seewind erfasst. Die Kategorie GK-I tritt auf den Inseln der Deutschen Bucht und teilweise auf den Ostseeinseln sowie in unmittelbarer Nähe zur Küste auf. GK-II gilt für freies, offenes Gelände mit einzelnen, weit auseinander liegenden, niedrigen Hindernissen. Dadurch sind Standorte in glatten Landflächen, z.B. auf Flughäfen oder in landwirtschaftlicher Umgebung, abgedeckt. Diese Kategorie entspricht gleichzeitig dem Referenzgelände, auf das die Referenzwindgeschwindigkeit v_{ref} der Windzonenkarte nach Abbildung 30 bezogen ist. Der Bauwerksbestand in Deutschland liegt überwiegend in rauem Gelände. Der Geländekategorie GK-III werden Vorstadtgebiete aber auch Industrie- und Gewerbeflächen zugeordnet. Stadtgebiete, bei denen mindestens 15% der Fläche mit Gebäuden bebaut ist, deren Höhe 15m überschreitet, fallen in die höchste Kategorie GK-IV mit größter Oberflächenrauigkeit.

Abbildung 34: Geländekategorien der DIN EN 1991-1-4:2010-12 und DIN 1055-4:2005-03

<p>Geländekategorie I</p> <p>Offene See; Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung; glattes, flaches Land ohne Hindernisse</p> <p>$z_0 = 0,01 \text{ m}$</p>	
<p>Geländekategorie II</p> <p>Gelände mit Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen, z.B. landwirtschaftliches Gebiet</p> <p>$z_0 = 0,05 \text{ m}$</p>	
<p>Geländekategorie III</p> <p>Vorstädte, Industrie- oder Gewerbegebiete; Wälder</p> <p>$z_0 = 0,30 \text{ m}$</p>	
<p>Geländekategorie IV</p> <p>Stadtgebiete, bei denen mindestens 15% der Fläche mit Gebäuden bebaut ist, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet</p> <p>DIN 1055-4:2005-03: $z_0 = 1,00 \text{ m}$</p> <p>DIN EN 1991-1-4: 2010-12: $z_0 = 1,05 \text{ m}$</p>	

In Abbildung 35 ist zu erkennen, dass abhängig von der Bodenrauigkeit die mittlere Windgeschwindigkeit vom Boden aus mehr oder weniger rasch zunimmt, bis am Rand der Bodengrenzschicht die Gradientenwindgeschwindigkeit erreicht wird. Sehr raue Oberflächen führen zu einer langsamen Zunahme. Der ungestörte Gradientenwind wird erst in viel größeren Höhen erreicht, als es bei glatten Oberflächen, wo der Wind sehr rasch mit der Höhe zunimmt, der Fall ist. Umgekehrt ist die Turbulenz über rauem Gelände größer und klingt langsamer über die Höhe ab als in weniger oberflächenrauen Gebieten. Für die Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit, der Turbulenzintensität und Böengröße gelten einfache Potenzgesetze, deren Parameter in Abhängigkeit der Geländerauigkeit festgelegt sind, (Niemann H.-J., 2006).

Abbildung 35: Windprofile für unterschiedlich raues Gelände

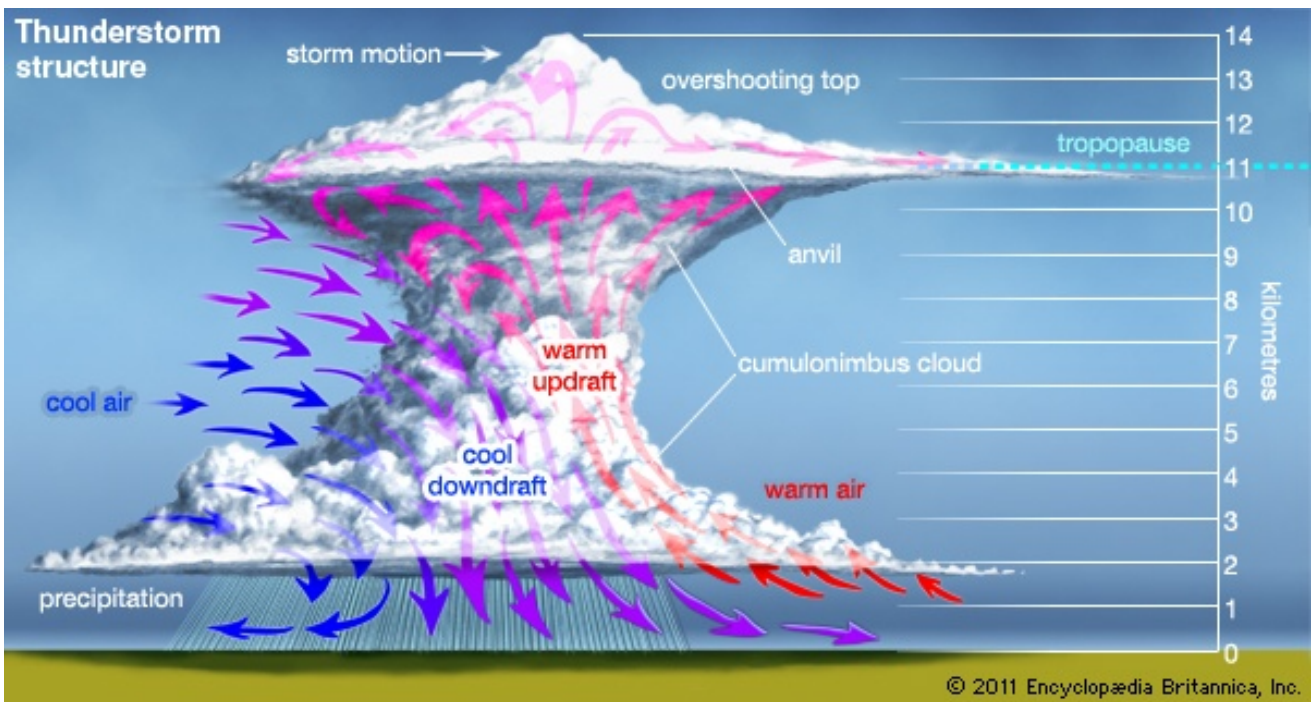


Ist die Bodenrauigkeit dagegen ungleichförmig und wechselt zwischen unterschiedlichen Kategorien, so bildet sich ein Mischprofil aus. Die Windverteilungen sind dann zusätzlich von der Lauflänge ab dem Rauigkeitswechsel abhängig. Beim Wechsel von glattem auf raues Gelände verbleibt bodennah zunächst ein Geschwindigkeitsüberschuss, umgekehrt erreicht bei einer Öffnung des Geländes, z.B. im Übergang von städtischen Flächen ins Umland, der Wind erst nach längerem Anlauf seine endgültige, der glatten Oberfläche entsprechende Stärke. Der Einfluss ist zusätzlich von der Windrichtung abhängig. Um die üblichen Rauigkeitswechsel zu erfassen, stellt die Windlastnorm zwei typische Mischprofile für Gebiete nahe der Küste bzw. dem Binnenland zur Verfügung. Soll der Einfluss genauer erfasst werden, muss die Bodenrauigkeit am Standort und die Wirkung von Rauigkeitswechseln in einem größeren Umkreis erfasst werden. Dann ist es ebenso erforderlich, die Flächennutzungen des Untersuchungsgebietes mit höherer Detaillierung einzubinden, (Niemann H.-J., Hölscher N., 2004). Das CORINE-Kataster bietet hierzu geeignete Angaben und erlaubt eine genauere Lokalisierung der unterschiedlichen Landnutzungen innerhalb von Deutschlands, (Statistisches Bundesamt, 2001), die für eine windrichtungsscharfe aerodynamische Bewertung der Oberflächenbeschaffenheiten benötigt wird.

1.1.2.3 Gewitterstürme

Extreme Gewitterstürme entstehen im Grundsatz aus dem Zusammenwirken einer aus großer Höhe herabstürzenden Kaltluftströmung mit einer gleichzeitig aufwärtsgerichteten Warmluftströmung. Sie zählen damit zu den konvektiven Wetterereignissen. In ihrer Entstehungsphase steigt in einer so genannten Cumulonimbus Wolke zunächst feuchte sowie vergleichsweise warme Luft in kältere Höhenlagen auf (updraft). Ursache hierfür kann zum einen eine durch Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche hervorgerufene Aufwärmung und eine damit verbundene Dichteverminderung sein (Luftmassengewitter). Zum anderen werden entsprechende Aufwärtsbewegungen an den Grenzen zweier unterschiedlicher Luftmassen ausgelöst (Frontengewitter). Mit zunehmender Höhe fällt das in der Warmluftströmung gebundene Wasser als Tropfen oder Eispartikel aus und führt zur Abkühlung der Strömung. Im bezüglich der Strömungsrichtung hinteren Teil der Gewitterwolke entwickelt sich hierdurch ein Abwindgebiet (downdraft), in dem mit Niederschlag versetzte Kaltluftpakete abwärts beschleunigt werden. Die entstehende Abwärtsströmung trifft auf die Erdoberfläche auf und wird in eine Horizontalströmung umgelenkt. Dabei breitet sich die Kaltluft am Boden ähnlich einem Freistrahler, der auf eine Platte trifft, in Form eines ringförmigen Wirbels unter der vorhandenen Warmluft aus. Es kommt zu der Ausbildung des typischen „Böenkopfes“ oder „Böenwalze“ (downburst). In seiner Front herrscht dabei eine hochturbulente Strömung. In dieser als Reifestadium bezeichneten Phase besitzt die Gewitterzelle ihre höchste Aktivität mit ausgeprägt böigen Winden und Starkniederschlägen. Sie dauert etwa 20 Minuten und beginnt mit dem Auftreffen des Niederschlages auf den Erdboden. Abbildung 36 zeigt den Aufbau eines Gewittersturms über die Höhe während des Reifestadiums mit den Strömungsrichtungen der Luftmassen.

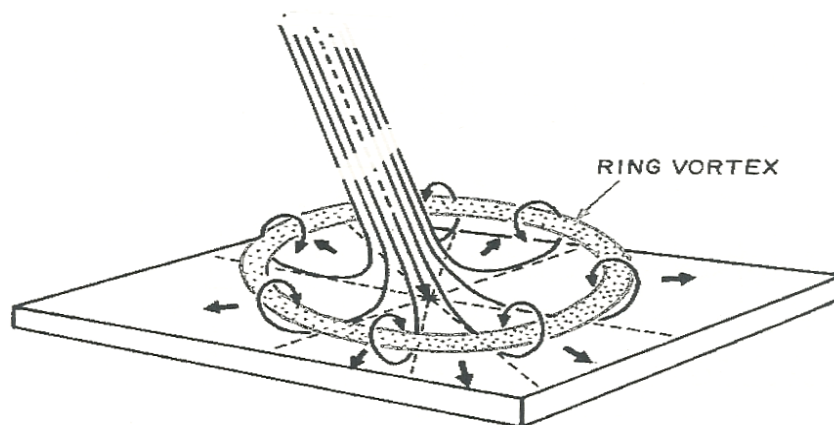
Abbildung 36: Aufbau eines Gewittersturms über die Höhe während des Reifestadiums



Im so genannten Zerfallsstadium wird der energieliefernde Warmluftstrom durch den Kaltluftstrom verdrängt. Die Gewitterzelle besteht nur noch aus Abwindströmen und ist dabei kälter als die Umgebungsluft. Bis zum vollständigen Zerfall tritt eine langsame Abnahme der Starkniederschläge zu leichteren Niederschlägen ein.

In Abhängigkeit der Intensität unterscheidet man zwischen einzelligen Gewittern, mehrzelligen Gewittern und Superzellen. Einzellige Gewitter gehen aus einer einzelnen Cumulonimbus Wolke hervor und sind von vergleichsweise schwacher Intensität und kurzer Dauer. Mehrzellige Gewitter sind dagegen aus einem Ensemble von Gewitterzellen in unterschiedlichsten Entwicklungsstadien zusammengesetzt. Sie stellen die in Deutschland häufigsten zu beobachtende Gewitterart dar und werden von heftigen Wettererscheinungen wie kleiner bis mittlerer Hagel (1,5 – 3cm), sehr heftiger Regen mit Überflutungen oder Sturmböen (70 – 110 km/h) begleitet. In seltenen Fällen lösen sie die Entstehung von Tornados aus. Häufig bildet sich aus der Vereinigung mehrerer Türme von Cumulonimbus Wolken eine Gewitterfront (squall line), die eine viele Kilometer breite, linienförmige Böenfront entwickeln, Abbildung 37 nach (Letchford, Mans und Chay, 2002).

Abbildung 37: Gewitterböenfront in Form eines Ringwirbels (Squall)

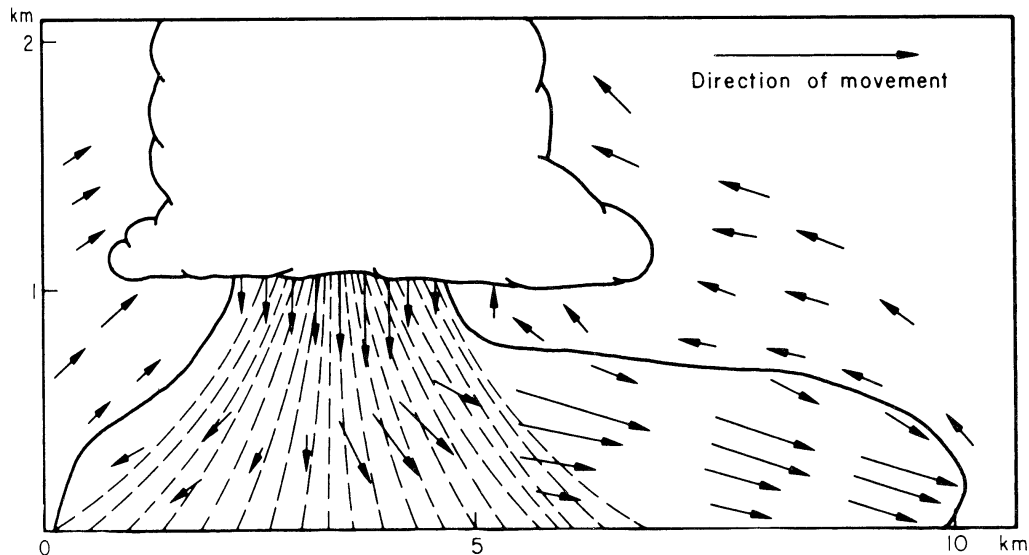


Superzellen bestehen aus einem einzelnen, außergewöhnlich stark entwickelten Aufwindstrom mit einer maximalen Breite von 250 km. Sie treten in Deutschland schätzungsweise rund 20 – 40 Mal pro Jahr auf und gehen in 90% aller Fälle mit extremen Wettererscheinungen, wie großen Hagel, Sturm- und Orkanböen oder Überschwemmungen einher. Sie bilden den intensivsten und gefährlichsten Gewittertyp und führen in etwa 30% der Fälle zur Tornadobildung, s.a. nachstehendes Kapitel.

Unabhängig vom Typ werden Gewitter grundsätzlich von Blitzen und Donner begleitet. Blitze bilden sich durch elektrische Entladung zwischen Erdoberfläche und Wolke, zwischen einzelnen Wolkenteilen, von Wolke zu Wolke oder von der Wolke zur Umgebungsluft aus. Die im jeweiligen Blitzkanal hervorgerufene explosive Ausdehnung der Luft infolge der extremen Temperaturanstiege wird dabei akustisch als Donner wahrgenommen.

Die im Reifestadium eintretende Umlenkung der Luftströmung führt darüber hinaus zu dem bekannten Phänomen des Schlagregens bzw. des Hagelsturms. Dabei kann die Flugbahn der einzelnen Tropfen bzw. Körner um mehr als 45° gegenüber der Horizontalen abgelenkt werden, Abbildung 38. Dies ruft vor allem eine erhebliche Belastung für Fassaden und Fenster hervor.

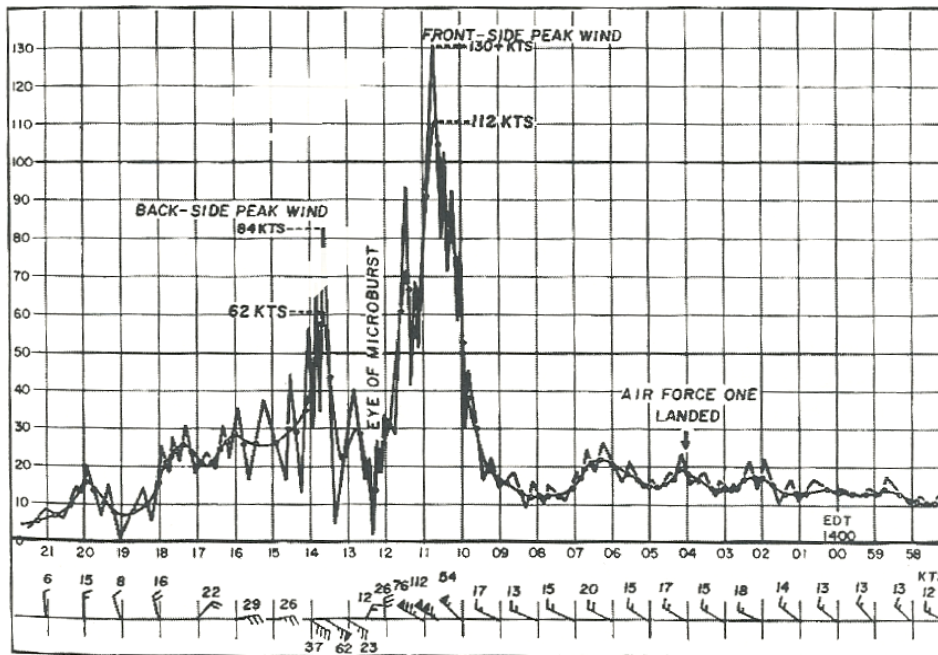
Abbildung 38: Abfluss kalter Luftmassen aus einer Cumulonimbus Wolke mit bodennaher Umlenkung der Flugbahn



© Choi, 2000

Für relativ kurze Zeiten von wenigen Minuten können dabei hohe Windgeschwindigkeiten entstehen. Abbildung 39 zeigt die Aufzeichnung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Gewittersturm vom 1. August 1983, der über die Windmessstation des Flughafens Andrew Air Base bei Washington zieht, (Letchford, Mans und Chay, 2002).

Abbildung 39: Aufzeichnung von Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Gewittersturm über der Andrews Air Force Base am 1. August 1983



Wie die Aufzeichnung erkennen lässt, erstreckt sich das Sturmereignis insgesamt etwa über 10min. Feldstudien in den Vereinigten Staaten und in Australien haben gezeigt, dass intensive Kaltluftabflüsse in Gewitterstürmen etwa 5 bis 30min andauern, bevor sich die Kaltluftquelle erschöpft hat und sich die Böenfront abschwächt. In Zugrichtung gesehen auf der Vorderseite des Cumulonimbus tritt die höchste Windgeschwindigkeit auf; eine zweite Böenfront auf der Rückseite bringt geringere Windgeschwindigkeiten. Dabei dreht der Wind nach dem Durchzug der ersten Böenfront. Wenn die zweite Böenfront durchgeht, erreicht die Winddrehung etwa 180° und geht danach wieder in die ursprüngliche Richtung zurück. Die höchste hier erreichte Böengeschwindigkeit in 4,90m Höhe betrug 68m/s. Die zweite Böenfront erreichte mit 43m/s eine Böengeschwindigkeit, die etwa den extremen Tiefdruckstürmen an der Deutschen Nordseeküste entspricht. Die bisher beobachtete, höchste Böengeschwindigkeit betrug 75m/s.

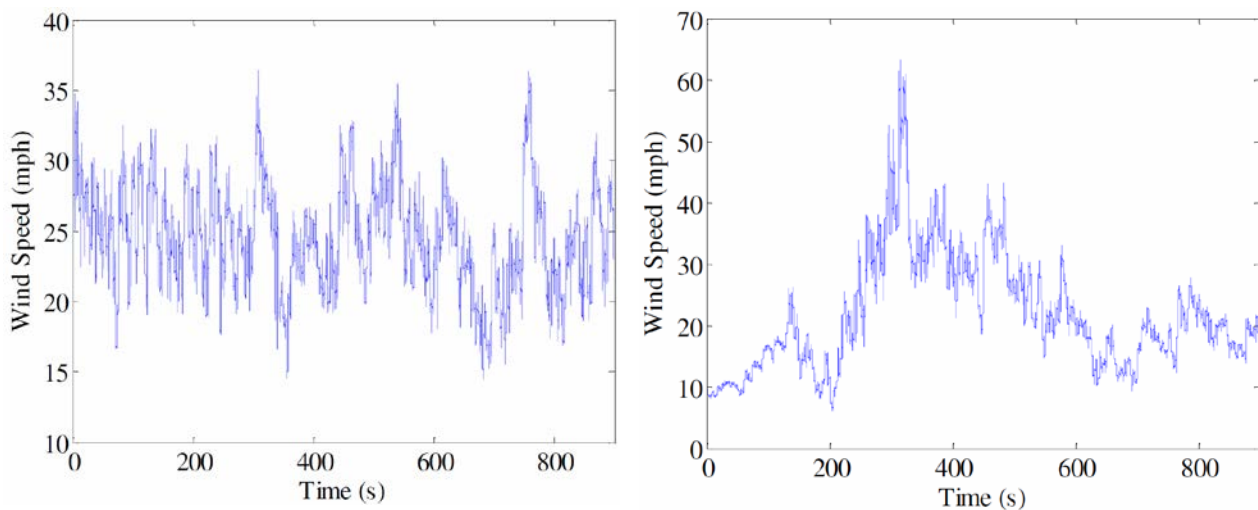
Glättet man die Zeitreihe der Geschwindigkeit mit einem gleitenden Mittelwert von einigen Minuten Mittelungszeit, so erhält man die vermittelnde Kurve. In der Frontböe zeigt sich eine geglättete Geschwindigkeit von 112kn entsprechend 58m/s, die man als Ausbreitungsgeschwindigkeit der Böenfront versteht. Zusätzlich bewegt sich die Gewitterzelle translatorisch mit einer mittleren Geschwindigkeit. In diesem Falle wurde die Translationsgeschwindigkeit des Gewittersturms zu 25kn geschätzt. Sie kann bis zu 1/3 der Frontgeschwindigkeit betragen. Daraus erklärt sich teilweise der Unterschied in den Frontgeschwindigkeiten auf Vorder- und Rückseite des Gewittersturms.

Tiefdruckstürme werden von horizontalen Druckgradienten in der Atmosphäre angetrieben. Die Kaltluftausströmung aus einer Cumulonimbus Wolke ist dagegen eine Dichteströmung, die ihre Energie aus dem Gewichtsunterschied der Kaltluft zur umgebenden Luft gewinnt. Die Strömung in einem Gewittersturm verhält sich deshalb in vielerlei Hinsicht anders als die voll ausgebildete atmosphärische Grenzschichtströmung (atmospheric boundary layer - ABL) eines Tiefdrucksturms:

- Im Windprofil eines Gewittersturms wird die – über eine kurze Zeit von 2 bis 5min geglättete – maximale Geschwindigkeit in einer Höhe zwischen 50m und 200m erreicht. In einer Feldstudie in Colorado wurde im Mittel eine Höhe von 80m beobachtet, (Chay und Letchford, 2002). Darüber fällt die Geschwindigkeit wieder ab. Im Gegensatz dazu wächst die mittlere Geschwindigkeit in der ABL weiter an, und zwar bis zum Rand der Grenzschicht, der sich in etwa 10-facher Höhe befindet. Unterhalb von (im Mittel) 80m sind beide Profile nahezu identisch, d.h. das gut erforschte Profil der ABL kann für bauliche Anlagen, die niedriger sind als 80m, benutzt werden.

- Die *mittlere Geschwindigkeit* wird bei der ABL-Strömung für eine Mittelungszeit von 10 bis 60min gebildet. Ihr sind zusätzliche Geschwindigkeitsschwankungen überlagert, die von der atmosphärischen Turbulenz in der ABL herrühren (Böigkeit). Sie sind näherungsweise als stationärer Prozess zu verstehen und können so mit den Methoden der Strömungsmechanik als klassische turbulente Grenzschicht behandelt werden. Das hat wesentlich zum Verständnis der Strömung in der ABL beigetragen. Diese Methode der Trennung von Grundströmung und überlagerten Geschwindigkeitsschwankungen ist offensichtlich unzweckmäßig, wenn man die gleiche Mittelungszeit wie für die ABL anwendet: der abgespaltene Prozess ist hochgradig instationär und lässt sich mit den erprobten Verfahren des Windingenieurwesens nicht behandeln. Abbildung 40 verdeutlicht diesen Aspekt anhand von Windgeschwindigkeitszeitreihen, (Lombardo, 2009). Der im linken Bildbereich gezeigte Zeitschrieb korrespondiert zu einem stationären Sturmereignis und ist folglich charakteristisch für die ABL-Strömung. In dem betrachteten Beobachtungsintervall von etwa 900s ergeben sich sowohl die aus der Grundströmung des Windes resultierende mittlere Geschwindigkeit als auch die böeninduzierten Schwankungsanteile nahezu konstant über die Zeit. Die zugrunde liegenden Prozesse können damit als stationär interpretiert werden. Anders verhält es sich bei der Zeitreihe für den Gewittersturm. Sie ist in der Beobachtungsdauer starken Veränderungen unterworfen, so dass auch die mittlere Geschwindigkeit und die Geschwindigkeitsschwankungen über die Zeit variieren. Im betrachteten Untersuchungsfenster zeigen sich die zugehörigen Prozesse folglich als instationär.

Abbildung 40: Illustration eines stationären Windereignisses und eines instationären Gewittersturms



Stationäres Windereignis

instationärer Gewittersturm

Tropische Gewitterstürme treten dem Namen nach nahe dem Äquator auf. Dort stellen sie in vielen Gebieten die stärksten Sturmereignisse dar, (Choi, 2002). Für den Entwurf von Anlagen verursachen sie in einem solchen Klima die maßgebenden Windgeschwindigkeiten. Eine besondere Ausbildung eines Gewittersturms findet sich in Wüstengebieten. Dort können Gewitterböen bei geeigneten Randbedingungen zu einem Sandsturm führen. Hierzu müssen Windgeschwindigkeiten von mindestens 8Bft erreicht werden. Durch den aufgewirbelten Sand dringt kaum noch Licht in die bodennahen Luftschichten und die Sicht geht auf fast Null zurück. Aber auch in den gemäßigten Breiten tragen Gewitterstürme bis zu 50% zur Sturmstatistik bei, (Panneerselvam und Holmes, 1992).

1.1.2.4 Tornados

Tornados zählen neben den Tromben und Staubhosen zu den kleinräumigen Wirbelstürmen. Der Begriff ist dabei aus dem Amerikanischen übernommen und entspricht der deutschen Bezeichnung einer Großtrombe. Zu der Kategorie der Kleintromben gehört der sogenannte Staubteufel, eine weniger intensive Ausbildung der Staubhose.

Im Vergleich zu anderen Wirbelsystemen, in erster Linie den Tropischen Wirbelstürmen, sind Tornados kleinräumig, von relativ kurzer Lebensdauer und einem geringen Durchmesser des Wirbels. Sie weisen sehr hohe Windgeschwindigkeiten auf und können sowohl über Land, als auch über Wasser auftreten.

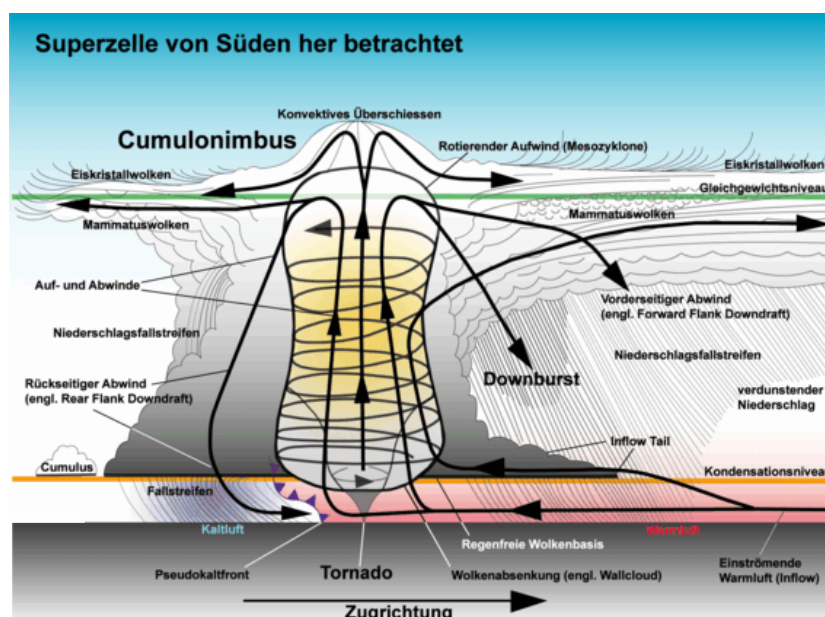
Ein Tornado ist dabei definitionsgemäß eine ständig rotierende Luftsäule mit Bodenkontakt, die entweder von einer cumuliformen Wolke herab reicht oder sich darunter befindet und deren Wolkenschlauch oftmals sichtbar wird. Berührt der Luftwirbel den Boden noch nicht, spricht man von einem Wolkentrichter oder Wolkenschlauch. Historisch wurde dieser Typ auch als Blindtrombe bezeichnet. Die Kleintromben weisen ebenfalls einen Bodenkontakt auf, stehen aber nicht direkt mit einer Cumuluswolke in Wechselwirkung.

Die europäische Tornado-Klimatologie beginnt Mitte des 19. Jahrhunderts (Jh.) mit einem anwachsenden öffentlichen und wissenschaftlichen Interesse an der Tornadoforschung. Zu den Pionieren dieser Zeit zählt Martins (1850) mit dem ersten Richtlinienkatalog zur Tornadobeobachtung. Reye publiziert (1872) eine noch umfangreichere Monographie über Tornados und Hurrikane. Im 20. Jh. sind Wegener (1917), Letzmann (1937) und Koschmieder (1940) als bedeutende Tornadoforscher zu nennen. Zu diesem Zeitpunkt ist die deutsche Tornadoforschung intensiver als die der USA. Einhergehend mit dem Zweiten Weltkrieg verebbt das Interesse und erfährt erst zu Beginn der frühen 70er Jahre eine erneute Blütezeit. Dies wird vor allem durch auffällig starke Tornadoereignisse (z.B. Nestle 1969) begünstigt. Sowohl auf Seiten der Meteorologen und mithin des Deutschen Wetterdienstes (DWD) führt das wachsende Interesse dazu, dass Arbeiten zur Klassifizierung des Gefährdungspotentials durch Tornados, aber auch Risikoanalysen vorgenommen wurden. Hierzu zählen Arbeiten zur Beurteilung des Risikos für Kernkraftwerke (Jurksch und Cappel, 1976), als auch eine Risikoanalyse aus Sicht der Rückversicherungen, (Berz, 1980).

Bei der Entstehung von Tornados lassen sich zwei Entstehungstypen unterscheiden. Zum einen können Tornados aus einer ausgeprägten Superzelle entstehen, Abbildung 41.

Am häufigsten treten Superzellen dabei im Frühjahr und Sommer auf. Superzellen gehören der Klasse der Gewitter an und sind durch einen einzigen, dauerhaften rotierenden Hauptaufwind gekennzeichnet. Ihre Zugrichtung weicht dabei oft von anderen Gewitterstürmen ab.

Abbildung 41: Entstehung eines Tornados aus einer Superzelle



© www.wetter24.de (abgerufen am 11.11.2011)

Damit eine Superzelle entsteht, ist zunächst die Erwärmung des Bodens durch die zu dieser Jahreszeit starke Sonneneinstrahlung notwendig, so dass warme Luftmassen aus dem bodennahen Bereich aufsteigen. Gleichzeitig findet ein Transport von Feuchtigkeit in höhere Luftschichten statt. Enthaltene Feuchtigkeit kondensiert durch das Abkühlen der Luftmassen aus und formt lokale Wolkengebiete. Sind nun noch spezielle meteorologische Voraussetzungen gegeben, kann sich hieraus ein Tornado entwickeln. Zu diesen zählen eine bodennahe Wolkenuntergrenze, die Zunahme der Windgeschwindigkeit in vertikaler Richtung und eine Änderung der Windrichtung über die Höhe bis in etwa fünf bis sechs Kilometer. Diese Veränderlichkeit in der Windrichtung kann im äußersten Fall zu direkt entgegengesetzten Strömungen führen. Als Folge hieraus entsteht eine horizontale Luftwalze. Thermische Effekte führen dazu, dass die rotierende Luftmasse vom bodennahen Bereich nach oben gedrückt wird. Die weiterhin rotierende Luftwalze geht in einen vertikalen Wirbel über, dem sogenannten Mesozyklon.

Abbildung 42: Aufnahme einer Superzelle



Man unterscheidet dabei zwischen hochreichenden Mesozyklonen („Great Plains-Typ“) und flachen, kleinen Mesozyklonen („Mini-Superzelle“). Superzellen benötigen keine extrem labilen Luftmassen zu ihrer Entstehung, die Kombination aus Scherung und Labilität der Luftschichten reicht dabei aus. Abbildung 42 zeigt eine Superzelle über Texas, USA.

Nur in etwa 30% der Fälle entwickelt sich hieraus ein Tornado.

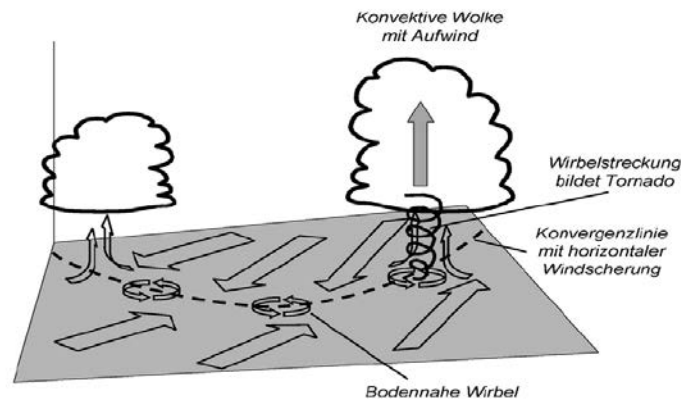
Die vorhandene Vertikalbewegung innerhalb des Mesozyklons führt zu einem notwendigen Nachströmen von Luft unterhalb der entstandenen Cumulonimbuswolke. Die Rotationsbewegung überträgt sich dabei auf die von unten nachgeführten Luftmassen. Ein Wirbel bzw. eine Luftsäule bildet sich, der sich durch seine Dynamik nach außen hin abschließt. Das Nachströmen neuer Luftmassen ist somit nur noch vom Fußpunkt des Wirbels möglich. Querströmungen sind nahezu vollständig unterbunden.

Solange der Luftwirbel noch keinen Bodenkontakt aufweist, aber schon optisch erkennbar ist, spricht man von einer Trichterwolke. Zur Entstehung geht die Expertenmeinung auseinander. Eine Ausbildung des Mesozyklons in Richtung Boden, als auch umgekehrt wird als wahrscheinlich angenommen. Zudem besteht die Möglichkeit, dass sich eine am Boden liegende Luftwalze aufrichtet und so einen Tornado ausbildet. Von ihrer Längserstreckung kann sie eine Größenordnung von 900m erreichen.

Die Rotation des Rüssels ist wie bei den Tropischen Wirbelstürmen auf nördlicher Hemisphäre i.d.R. entgegen dem Uhrzeigersinn bzw. im Uhrzeigersinn auf der südlichen Hemisphäre. Sichtbar wird er durch kondensierendes Wasser, da innerhalb des Wirbels sowohl die Temperatur, als auch der Druck gegenüber der Umgebung deutlich absinken. Druckunterschiede liegen dabei im Bereich von 50 bis 100hPa. Als besonders langlebige aber eher seltene Erscheinungsform wird an dieser Stelle die zyklische Superzelle erwähnt.

Neben der Ausbildung eines Tornados aus einer Superzelle ist die vor allem in Europa am häufigsten anzutreffende Entstehung aus einem Gewittersturm, Abbildung 43. Dabei bestimmen vor allem extrem große Temperatur- und Feuchtegegensätze das Geschehen.

Abbildung 43: Entstehung eines Tornados aus einer Gewitterwolke



© www.ksk.ch (abgerufen am 11.11.2011)

Als dritte Möglichkeit ist die Entwicklung aus einer Schauerwolke ohne Gewitterscheinungen wie Blitz und Donner zu sehen. Dabei ändern sich Windgeschwindigkeit und Windrichtung bis in ca. 1 km Höhe stark.

Tornados treten in erster Linie zwischen den Breiten 20 bis 60°N (S) auf. Die Zugrichtung wird in den mittleren Breiten überwiegend durch die Westwindzirkulation beeinflusst. Die häufigste Zugrichtung weist daher meist von Westen bzw. Südwesten nach Osten bzw. Nordosten.

Großstädte sind vom Durchzug eines Tornados weniger betroffen, als weniger dicht bebaute Flächen oder Waldflächen. Wahrscheinlich wird dieser Effekt durch die hohe Rauigkeit der Stadtbebauung hervorgerufen, die zu einer abbremsenden Wirkung führt. Die zwar warme, aber recht trockene Stadtluft hat ebenfalls den Effekt, dass dem herannahenden Gewittersystem weniger Energie in Form von Feuchtigkeit zugeführt wird.

Ein Tornado mittlerer Ausprägung ist dabei ein kurzlebiges Ereignis weniger Minuten mit einer Zugbahn bis maximal 10 km und einem Durchmesser von wenigen Dekametern. Windgeschwindigkeiten bis 180 km/h können dabei aber lokal schon zu erheblichen Beschädigungen führen. Tornados dieser Intensität treten in Deutschland am häufigsten auf.

In Tabelle 17 sind charakteristische Größen für einen durchschnittlichen und einen extremen Tornado angegeben. Als Vergleichswerte sind die Daten eines Hurrikans mit aufgenommen.

Tabelle 17: Charakteristische Größen eines Tornados mit unterschiedlicher Intensität

	Tornado mit mittlerer Intensität	Tornado mit extremer Intensität	Tropischer Wirbelsturm
Dauer	wenige Minuten	mehrere Stunden	mehrere Tage
Zugbahn	2 bis 10 km	>100 km	mehrere hundert km
Durchmesser	20 bis 100m	1000m	ca. 160 km
Windgeschwindigkeit	120 bis 180 km/h	bis 510 km/h	>117 km/h

Extreme Tornados sind sehr seltene Ereignisse und sind vor allem in den USA in der sogenannten „tornadoalley“ zu finden. Die höchste bisher gemessene Geschwindigkeit eines Tornados lag bei 510 km/h (F5-Tornado, Oklahoma City, 1999). Aus physikalischer Sicht wird eine maximale Geschwindigkeit von 600 km/h als möglich angenommen.

Zu den Tornados mit schwächerer Intensität und kleineren äußeren Abmessungen zählen die sogenannten Wasserhosen. Diese nicht superzelligen Tornados weisen oftmals Durchmesser von weniger als 50m auf. Sie entstehen über größeren warmen Wasserflächen im Bereich zusammenströmender Luft bei eher ruhigen Windverhältnissen. Im Spätsommer sind sie im Mittelmeerraum, aber auch auf dem Bodensee anzutreffen. Sie sind nicht an die Ausbildung eines Gewitters gekoppelt, sondern können auch in Folge leichter Schauer entstehen. Abbildung 44 zeigt mehrere nahezu in einer Reihe entstandene Wasserhosen über dem Mittelmeer.

Abbildung 44: Wasserhosen über dem Mittelmeer



© Dotzek, 2005

Im Gegensatz zu Tornados sind Tropische Wirbelstürme mesoskalige Windphänomene mit einem Durchmesser von über 100 km. Mit einer Dauer von mehreren Tagen und gewaltigen Zugbahnen übertreffen sie die Eigenschaften des eher lokalen Tornados deutlich. Mit einer Zuggeschwindigkeit von 120 km/h sind sie aber vergleichsweise langsame und damit gut vorhersagbare Wettererscheinungen.

Tabelle 18: Fujita-Skala mit Auftretenshäufigkeit der Tornadoereignisse je Tornadoklasse

Fujita-Skala	Stärkeeinstufung	Geschwindigkeit in m/s für v_{max}	Geschwindigkeit in km/h für v_{max}	Typischer Schaden
F0	Schwach (= Beaufort 8)	17,5 bis 32,5	63 bis 117	Leichte Gegenstände werden umhergewirbelt, einzelne Dachziegel und Äste werden herabgerissen
F1	schwach	32,8 bis 50,8	118 bis 183	Dächer werden teilweise abgedeckt, Wohnwagen und Anhänger werden umgeworfen, starke Äste werden abgebrochen, einzelne Bäume entwurzelt
F2	stark	51,1 bis 70,5	184 bis 254	Ganze Dächer werden abgedeckt, schwere Schäden an Leichtbauten, größere Schäden an Fahrzeugen, stabile Bäume werden umgeworfen bzw. gebrochen
F3	stark	70,8 bis 92,8	255 bis 334	Leichtbauten werden überwiegend zerstört, Einsturz einzelner Gebäude, schwere KFZ werden umgeworfen, schwerste Schäden an Holzgewächsen mit weitgehender Entastung

Fujita-Skala	Stärkeinstufung	Geschwindigkeit in m/s für V_{max}	Geschwindigkeit in km/h für V_{max}	Typischer Schaden
F4	verheerend	93 bis 117	335 bis 421	Schwere Schäden an Massivbauten, verbreiteter Einsturz von Gebäuden, KFZ werden über weite Strecken geschleudert, Entrindung von Baumstämmen durch umherfliegende Objekte
F5	verheerend	> 117	421 bis 514	Überwiegend Totalschäden an Massivbauten, unvorstellbare Schäden, schwere Gegenstände wie KFZ fliegen hunderte Meter durch die Luft, totale Entrindung von stehengebliebenen Baumstämmen, Wurzelstöcke abgesägter Bäume werden aus dem Boden gerissen

Eine Basis zur Klassifizierung von Tornados unterschiedlicher Intensität hat der Tornadoforscher Tetsuya Theodore Fujita durch die nach ihm benannte Fujita-Skala geschaffen. Je nach Windgeschwindigkeit wird der Wirbelsturm von F0 bis F5 eingestuft. Die Skala reicht theoretisch bis F12, was einer physikalischen nicht mehr plausiblen Windgeschwindigkeit von mehr als 1000 km/h entspräche. Für die praktische Anwendung ist die Einteilung nach Geschwindigkeit weniger gut geeignet, da diese nicht zuverlässig gemessen werden kann. Daher wird ein Tornado nach dem an der Baubsubstanz entstandenen Schaden nachträglich eingestuft. Aus diesem Grund ist es auch nicht verwunderlich, dass für ein und denselben Tornado verschiedene F-Klassen bestimmt wurden. Tabelle 18 gibt die Fujita-Skala mit den Häufigkeiten der bisher beobachteten Tornados je Tornadoklasse an.

Tornados in Verbindung mit einer Superzelle erreichen dabei die höchste Klasse der F-Skala, nicht-Superzellentornados maximal F2.

In den USA wird seit 2007 eine modifizierte Skala, die sogenannte EF-Skala (Enhanced Fujita Scale), verwendet. Diese basiert auf einer Qualifizierung von aufgetretenen Schadensstrukturen an 28 Bauwerkstypen. Windgeschwindigkeiten wurden in diesem Zusammenhang aus mangelnder Datengrundlage nicht zur Klassifizierung verwendet. Neben einer Kurzbeschreibung des jeweiligen Bauwerkstyps ist der Zerstörungsgrad in Abhängigkeit der Geschwindigkeit angegeben.

Eine Übertragung der F-Skala bzw. der EF-Skala auf Europa ist ein weiteres Problem, da sich die europäische Bauweise gerade im einfachen Hausbau erheblich von der amerikanischen unterscheidet. Auch Wohnwagenparks - in den USA häufig anzutreffen - sind in Deutschland eher eine Seltenheit.

Neben der Fujita-Skala gibt es noch die TORRO-Skala. Diese umfasst die Kategorien T0 bis T10 (bzw. T11) und wurde von der meteorologischen Organisation „Tornado and Storm Research Organisation“ – kurz TORRO - im Vereinigten Königreich als Ergänzung zur Beaufort-Skala entwickelt. In der Skala stellt T0 das Äquivalent zu Bft 8 dar und ist mit der Beaufort-Skala über die Gleichung $T = (B/2 - 4)$ verknüpft. Dabei unterscheidet sie sich auch dahingehend von der Fujita-Skala, dass allein Windgeschwindigkeiten und keine phänomenologischen Merkmale wie das Ausmaß der Zerstörungen zur Klassifizierung genutzt werden. Die Skala wird vor allem in Großbritannien und in Mitteleuropa verwendet, während die Fujita-Skala eher in den USA gebräuchlich ist. Tornados in Großbritannien erreichen dabei meist Stärken von T0 bis T6, der stärkste bisher beobachtete wurde mit T8 eingestuft. Der stärkste amerikanische Tornado würde nach der T-Skala hingegen als T11 klassifiziert.

Zusätzlich wurde eine Sturmschadensskala für Holzgewächse, basierend auf der für Mitteleuropa angepassten Skalierung nach TORRO entworfen. Eine Beurteilung der Sturmintensität auf Grundlage der hervorgerufenen Forstschäden war aus mehreren Gründen schwieriger als bei Schäden an Bauwerken. Kenntnisse im Bereich der Biologie, Geologie und der Meteorologie sind notwendige Voraussetzung, um einen entstandenen Schaden richtig zu deuten. Fehlinterpretationen in der Klassifizierung eines Sturmereignisses sind auf diesem Wege nicht auszuschließen.

In deutschsprachigen Ländern findet zudem die an die TORRO-Skala angelehnte Tornado-Klassifikation von TorDACH (www.tordach.de, abgerufen am 11.11.2011) Verwendung, da sie der örtlichen Bausubstanz besser Rechnung trägt. Die 12 Klassen umfassende Skala beinhaltet zusätzlich die Auswirkung eines Wirbelsturms auf Sach- und Flurschäden für Bauten in Leicht- und Massivbauweise.

1.1.2.5 Einflüsse aus Orographie und Topographie

In manchen Gebieten Deutschlands treten bestimmte kleinräumige Winde mit einer solchen Häufigkeit und Regelmäßigkeit auf, dass Anlagen in diesen Regionen ggf. einer größeren Gefährdung durch Starkwinde ausgesetzt sein können. Eine wichtige Rolle spielt dabei die Orographie des Anlagenstandortes, d.h. der Einfluss des Geländereiefs auf die örtliche Windentfaltung. Je nach Geländeform können Kanalisierungseffekte oder Strömungsumlenkungen ausgelöst werden und zu einem erheblichen Anstieg der bodennahen Windgeschwindigkeiten führen. Auch günstige Effekte infolge einer Windabschirmung sind möglich, wobei die jeweilige Ausprägung stark von den örtlichen und baulichen Gegebenheiten des Einzelfalls sowie der Windrichtung abhängt. Für Anlagen in gegliedertem Gelände sind daher besondere Überlegungen anzustrengen, um ihre Gefährdung durch Wind aus den Beobachtungen und Erkenntnissen der übergeordneten Windereignisse rückzuschließen.

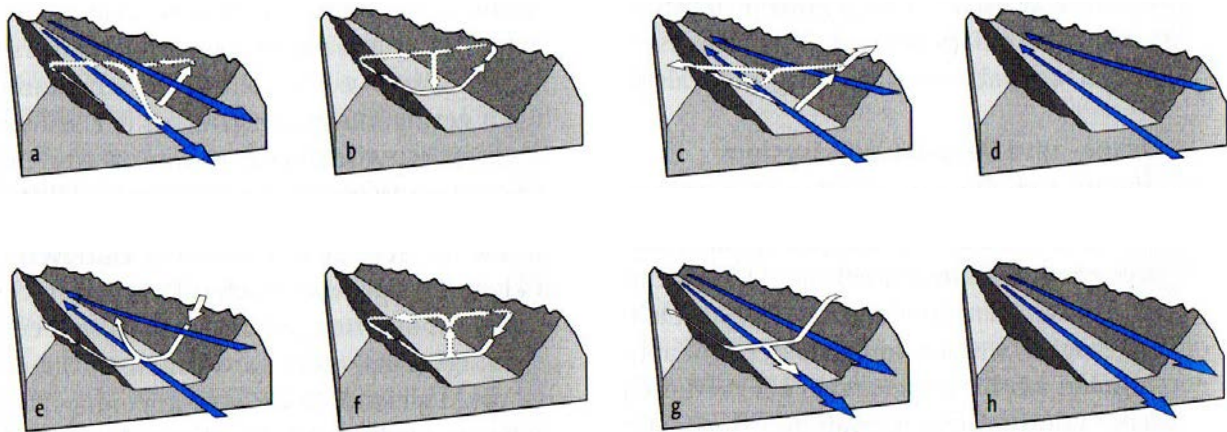
Der Geländeeinfluss kann sich lokal (mikroskaliger Einflussbereich) entwickeln oder bei weiträumigen Geländebewegungen (mesoskaliger Einflussbereich) aus größerer Entfernung in die unmittelbare Anlagenumgebung getragen werden. Hiermit verbunden ist auch das Zustandekommen eigenständiger orographiebedingter Windsysteme, zu denen z.B.

- Windsysteme mit tagesspezifischer Richtungsumkehr wie Land-See bzw. Berg-Talwinde
- reliefbedingte Fallwinde wie Luv-Lee-Winde (in den Alpen als Föhn bezeichnet)
- synoptische Regionalwinde (mit ortsspezifischer Bezeichnung wie Mistral, Schirokko, Bora, oder Chasmin)

zählen. Windsysteme mit tagesspezifischer Richtungsumkehr entstehen als Druckausgleichsströmungen, deren Ablauf und Rhythmus sich in Perioden von 24h kontinuierlich jedoch mit abweichender Intensität wiederholt. Besonders günstige Ausgangsbedingungen für deren Entwicklung ergeben sich bei Wetterlagen mit geringen Luftdruckunterschieden sowie stärkerer Sonneneinstrahlung. Die hierbei ausgelösten kleinräumigen thermischen Tief- und Hochdruckgebiete lassen z. B. an der Küste sowie an den Ufern großer Binnenseen (z.B. Bodensee) Land- und Seewinde oder in Gebirgsgehenden Berg- und Talwinde entstehen. Beide Windsysteme sind von einer Richtungsumkehr im Laufe des Tages begleitet. So weht tagsüber der bodennahe Wind von der See zum Land (Seewind). Nachts strömt die Luft dagegen als Landwind zur See, dort steigt sie auf, strömt in der Höhe zum Land zurück um dort wieder in die bodennahe Zirkulation abzusinken. Der Seewind ist am stärksten im Frühsommer ausgeprägt, wenn der Temperaturgegensatz zwischen Land und See am größten ist. Er kann eine Windstärke von typischerweise ca. 5 Bft erreichen und in seltenen Ausnahmen mit bis zu 8-9 Bft auch auf Sturmstärke anwachsen.

Abbildung 45 zeigt die Abläufe in einem Berg-Tal-Windsystem, das von der stärkeren Erwärmung der Luftmassen an einem in südlicher Richtung exponierten Gebirgshang ausgelöst wird, (Schönwiese, 2008). Infolge der Sonneneinstrahlung kommt es tagsüber zu einem Hangaufwind. Erst die nächtliche Abkühlung kehrt die Windrichtung um, kalte Luftmassen fließen hangabwärts ins Tal zurück. Entsprechende Vorgänge entwickeln sich auch längs der geneigten Talachse. Auch hier werden die talaufwärts dem Erdboden aufliegenden Luftmassen tagsüber stärker erwärmt bzw. nachts stärker abgekühlt als die höhengleiche Luftschicht weiter talabwärts. Abbildung 45b stellt die Ausgangssituation mit der hangaufwärts gerichteten morgendlichen Luftströmung dar. Sie induziert einen Talwind Richtung Gebirgsfuß, der als Trägheitsströmung am Spätnachmittag (d) übrig bleibt, bevor ihn am Abend (e) die einsetzenden Hangabwinde zum Stillstand bringen. Weitergehend induzieren diese dann während der Nacht (g) einen Bergwind, der am frühen Morgen (h) noch besteht, bevor ihn die vormittags einsetzenden Hangaufwinde (b) stoppen. Bei besonders günstigen Schönwetterlagen kann das Windsystem bis in das Gebirgsvorland reichen. Der Talwind übertrifft mit Geschwindigkeiten von etwa 20 km/h den Hangaufwind (im Regelfall 2 bis 3 km/h) deutlich an Stärke, im Hinblick auf eine mögliche Beeinträchtigung von Anlagen sind die einhergehenden Windverhältnisse insgesamt aber eher als unkritisch einzuschätzen.

Abbildung 45: Schema des gekoppelten Hang- und Berg-Tal-Windsystems

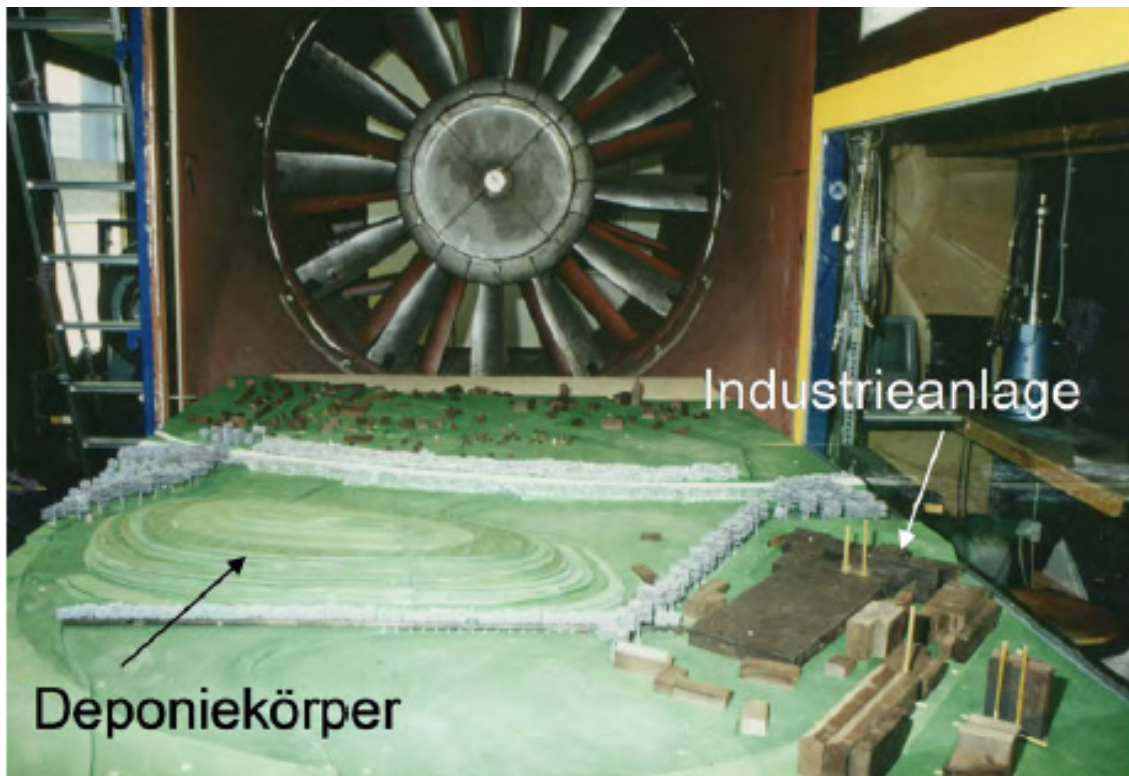


Reliefbedingte Fallwinde entwickeln sich aus einem Luftmassenstrom im Zuge der Überquerung eines Gebirges. Luvseitig wird die zum Aufsteigen gezwungene Luft dabei von Wolkenbildung und gegebenenfalls Steigungsregen begleitet. Auf der Leeseite kommt es zunächst zur verstärkten Erwärmung der Luftmassen. Als Folge dessen lösen sich die Wolken in großen Höhenlagen auf und die erwärmte Luftströmung fällt beschleunigt ins Tal hinein. Entsprechende leeseitige Fallwinde erhalten regionsspezifisch besondere Bezeichnungen wie beispielsweise der Chinook in den Rocky Mountains. Für Deutschland ist der sich an den Alpen ausbildende Föhn von Bedeutung, der durch sturmartige Windgeschwindigkeiten (Föhnsturm), warme Temperaturen und geringe Luftfeuchtigkeit gekennzeichnet ist. Er geht in Ausnahmefällen mit sehr großen Windgeschwindigkeiten einher, die auch eine Gefährdung für Anlagen bedeuten können. Beispielsweise sorgte eine ausgeprägte und außergewöhnlich lang andauernde Föhnwetterlage im November 2002 für einen Föhnsturm mit maximalen Böenwindgeschwindigkeiten von bis zu 216 km/h, der in Bayern, Baden-Württemberg und auf der Alpennordseite schwere Sturmschäden zur Folge hatte.

Synoptische Regionalwinde ergeben sich bei bestimmten, für die Region charakteristischen Wetterlagen. Hierunter fallen als spezielle Form Windströmungen, die darüber hinaus durch das vorliegende Geländere relief beeinflusst sind. Als Beispiel ist der Mistral zu nennen, der ursächlich als Ausgleichsströmung zwischen einem Hochdruckgebiet über der Biskaya und einem Tiefdruckgebiet über dem Mittelmeer entsteht und zusätzlich durch Kanalisierungseffekte des Rhône-tals geprägt ist.

Die Grenze zur Unterscheidung mesoskaliger und mikroskaliger Geländeeinflüsse ist nicht fest definiert und als eher fließend zu verstehen. Üblicherweise werden alle Geländebewegungen, deren größte Erstreckung kleiner als etwa 5 bis 10 km ist, dem mesoskaligen Bereich zugeordnet. Hierunter fallen beispielsweise Hügel, kleinere Bergformationen, Täler oder Senken, Geländesprünge oder mehrfach abgestufte Terrassen. Zu den mikroskaligen Geländebewegungen zählen Formationen mit Erstreckungen bis zu 500 m. Sie sind häufig künstlichen Ursprungs wie z. B. Lärm- oder Windschutzwälle, Straßen in Dammlage.

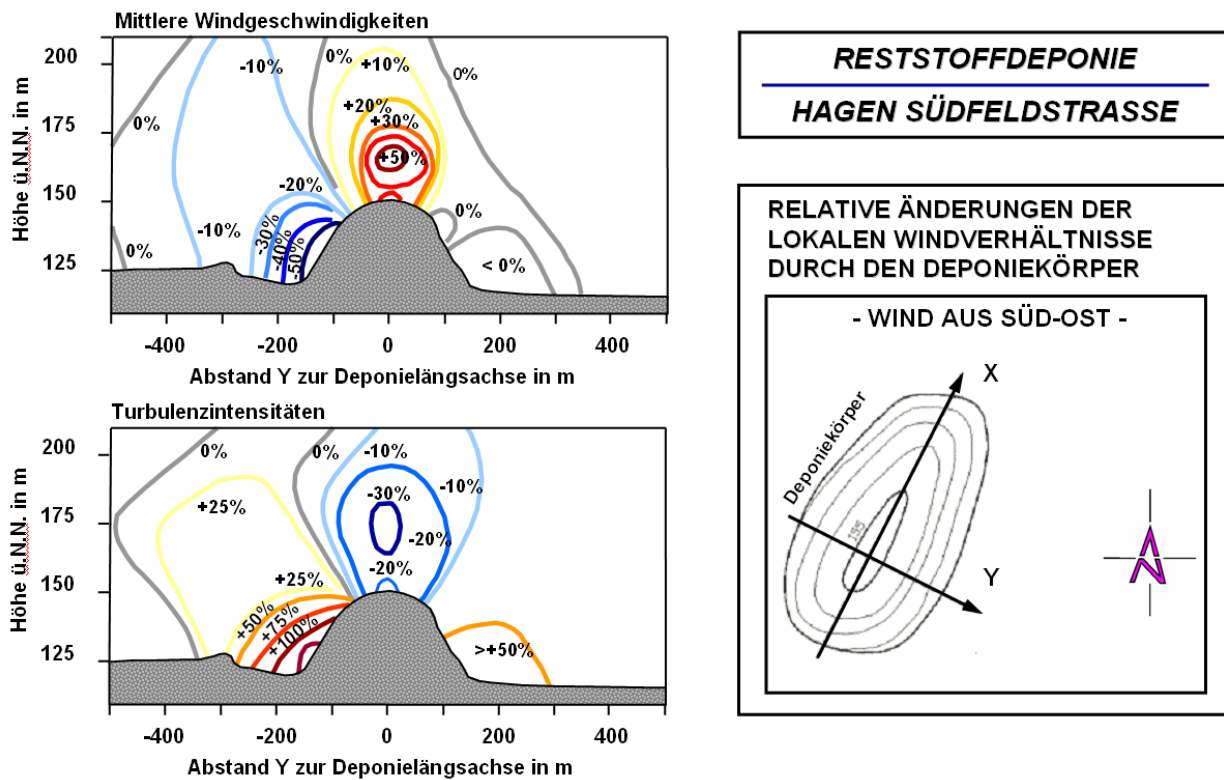
Abbildung 46: Windkanalmodell der Reststoffdeponie Hagen Sudfeldstraße



© Romberg und Hölscher, 1995

Die Windverhältnisse an derartigen Geländeformen hat man in zahlreichen Windkanaluntersuchungen und vereinzelt mit theoretischen Modellen untersucht. In Abbildung 46 ist exemplarisch das maßstäblich verkleinerte Windkanalmodell zu einer solchen Untersuchung wiedergegeben, (Romberg E., Hölscher N., 1995). Die Zielstellung bestand u. a. darin, die veränderten Strömungsverhältnisse an einer Industrieanlage durch einen vorgelagerten Deponiekörper zu erfassen.

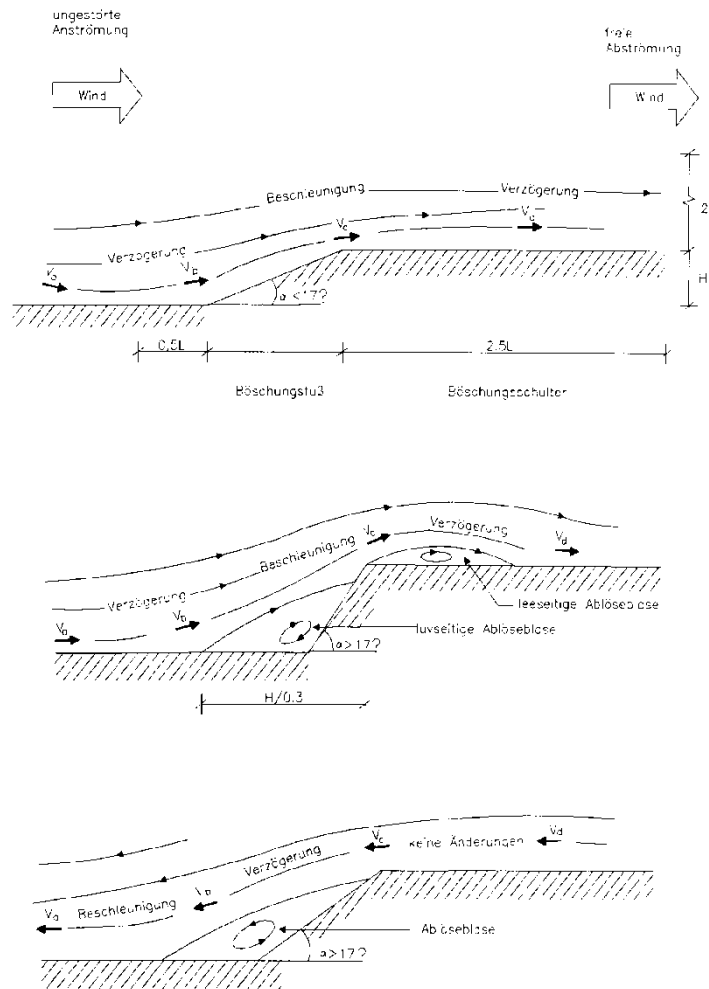
Abbildung 47: Geschwindigkeitsüberhöhung an einer Reststoffdeponie



Als ein Ergebnisbeispiel zeigt Abbildung 47 die prozentuale Geschwindigkeitsüberhöhung und die Veränderungen der Turbulenzintensitäten an der Deponie auf. Die Deponie verläuft relativ flach und hebt sich um maximal ca. 35m aus dem Umgebungsgelände heraus. Maximale Geschwindigkeitsüberhöhungen von +50% treten nahe der Deponieschulter auf. Gleichzeitig ist eine Turbulenzberuhigung um -30% zu erwarten. Der Wind steht dabei näherungsweise senkrecht zur Deponielängsachse.

Für die baupraktische Anwendung hat man derartige Untersuchungsergebnisse verallgemeinert und um einige empirische Ansätze ergänzt. Als ein wesentlicher Schritt wird dabei die in der Regel dreidimensionale Geländestruktur zunächst durch ein zweidimensionales, "unendlich breites" Modell ersetzt. Betrachtet wird hierzu der in Strömungsrichtung verlaufende Schnitt der Geländebewegung. Damit können die verschiedenartigsten Geometrien auf wenige charakteristische Geländeformen reduziert werden. So unterscheidet man zwischen einer Böschung, die zu einer einfachen Geländeerhebung führt und einem Geländekamm, bei dem nach Überwinden eines Höhenunterschiedes vor und hinter dem Hindernis das gleiche Geländeniveau vorliegt. Die hierzu inversen Querschnittsformen entsprechen einer Senke bzw. einem Tal.

Abbildung 48: Strömungsverhältnisse an einer Böschung



In der natürlichen Situation hat die endliche Breite der Geländebewegung ein Ausweichen der Windströmung quer zur Strömungsrichtung und damit eine Verringerung der lokalen Windgeschwindigkeiten zur Folge. Dies könnte bei einer ausschließlichen 2D-Geländemodellierung zu einer Geschwindigkeitsüberschätzung führen. Man hat daher entsprechende Abminderungsfaktoren entwickelt, mit denen die Ergebniswerte der zweidimensionalen Betrachtungen zu korrigieren sind.

Der prinzipielle Einfluss derartiger Querschnittsformen auf die lokalen mittleren Windverhältnisse ist in Abbildung 48 für eine einfache Böschung aufgezeigt, (Cook N., 1986). Ihre Geometrie wird über die Böschungslänge (L) und die Böschungshöhe (H) festgelegt. Je nach Geländeneigung ergeben sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Strömungszustände. An einer flach verlaufenden Böschung folgt die Strömung der Geländekontur. Vor Erreichen des Böschungsfußes, über eine Stromaufentfernung von ca. $0.5 \cdot L$, wird die mittlere Windgeschwindigkeit zunächst verzögert, bevor entlang der ansteigenden Böschung eine Strömungsbeschleunigung einsetzt. Die maximale Geschwindigkeit wird an der Böschungsschulter erreicht. Stromab hiervon geht sie kontinuierlich zurück und erreicht in einer Entfernung von ca. $2.5 \cdot L$ den Wert der ungestörten Anströmung. Der Einflussbereich einer derartigen Geländeform erstreckt sich in vertikaler Richtung über etwa $2 \cdot L$.

Dieser Strömungszustand resultiert für Böschungen mit einer Neigung von weniger als ca. 17° bzw. $H/L < 0.3$. An steileren Geländeformen bildet sich luvseitig des Böschungsfußes eine Ablöseblase mit lokaler Rezirkulation aus. Ablöseblase und Böschung bilden einen neuen Störkörper, dessen äußere Kontur für die mittlere Windgeschwindigkeitsverteilung

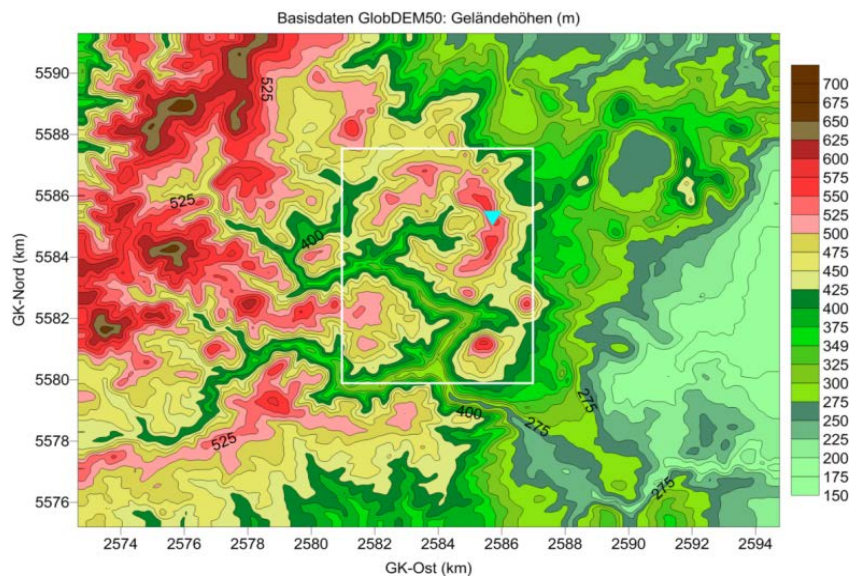
lung maßgebend wird. Er erstreckt sich in vertikaler Richtung bis hin zur Böschungsschulter. Seine luvseitige Längserstreckung folgt aus der Maximalneigung einer ablösungsfreien Geländestufe zu $\approx H/0.3$. Die maximale Windgeschwindigkeit wird mit deutlich größeren Werten als bei flachgeneigten Böschungen erneut im Bereich der Böschungsschulter erreicht. Hier kann zudem eine leeseitige Ablöseblase vorliegen.

Wird die Böschung in umgekehrter Richtung überströmt, liegt der Fall einer Senke vor. Abbildung 48 zeigt, dass nunmehr die Geschwindigkeiten entlang der Böschungsschulter nahezu unbeeinflusst bleiben. Stromab löst sich die Strömung für überkritische Neigungswinkel von der Kontur ab. Oberhalb der damit entstehenden Ablöseblase wird die Strömungsgeschwindigkeit auf ein Minimum reduziert, das am Böschungsfuß zu finden ist. Mit zunehmender Entfernung wird schließlich wieder der Zustand der ungestörten Anströmung erreicht. Die einmalige Geländeabsenkung führt damit im Gegensatz zu der Geländeanhebung zu keinen Geschwindigkeitszunahmen über das Niveau der Anströmung.

Die DIN 1055-4:2005-03 setzt diese Effekte mit Hilfe eines Topographiebeiwerts $c_t(z)$ für Geländesprünge, Kuppen oder Hügelkämme in die Praxis um. Er ist auf Tragwerke anzuwenden, die weniger als die halbe Länge des Abhangs oder weniger als das 1,5-fache der Klippenhöhe vom Kamm entfernt sind. Das Modell erfasst den Topographieeffekt in richtiger Tendenz und in der Größenordnung abdeckend. DIN EN 1991-1-4:2010-12 setzt diese Effekte in nahezu gleicher Form mit dem Beiwert $c_0(z)$ um. Lediglich die Anwendungsgrenzen werden in anderer Form definiert.

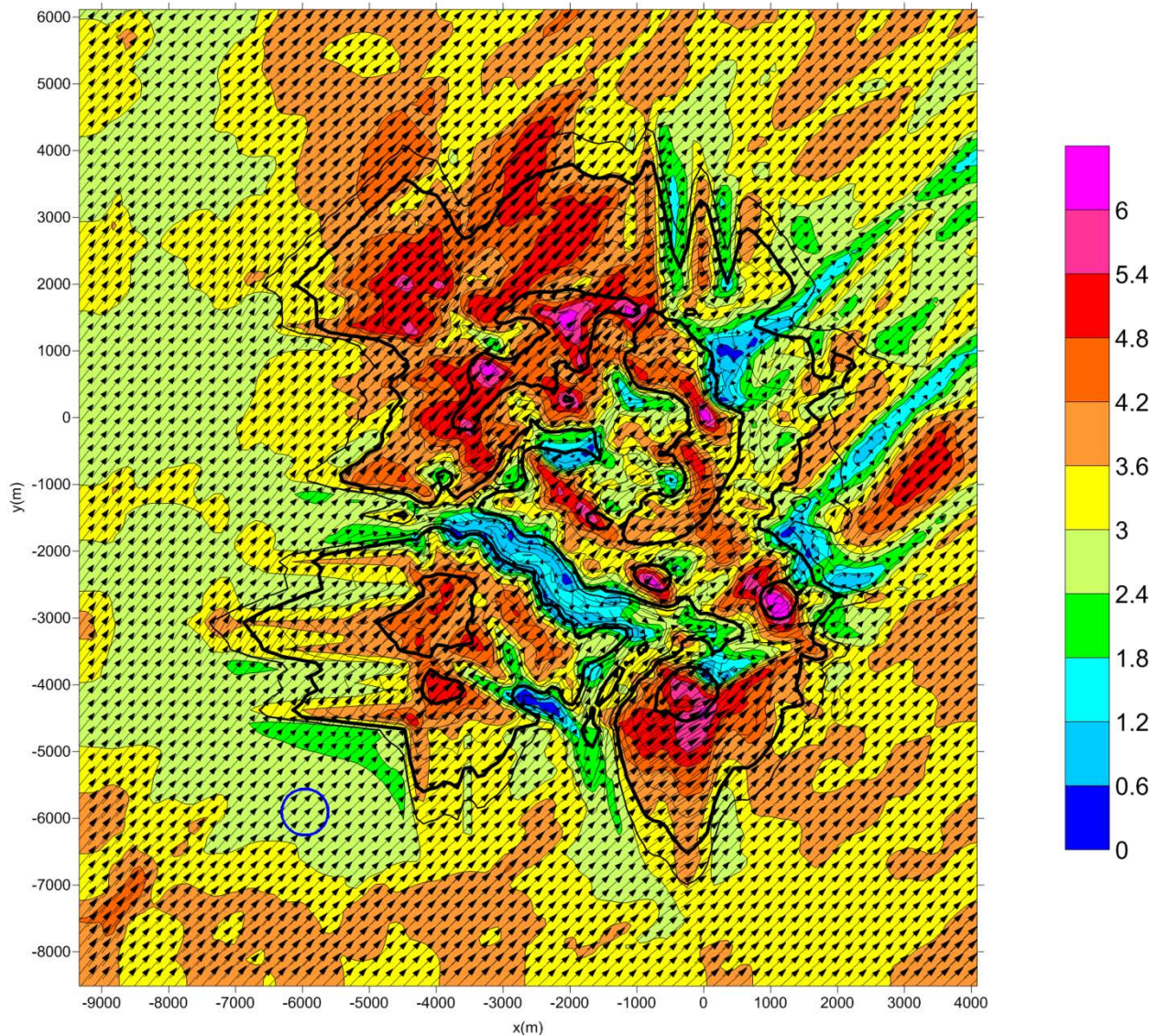
Das Normvorgehen ist dabei auf isolierte Geländebewegungen beschränkt und liefert bei sehr stark gegliedertem Gelände ohne geeignete Zusatzüberlegungen keine belastbaren Ergebnisse. Zur Behandlung solcher komplexen Topographien wie z. B. Mittelgebirgereliefs kommen zunehmend prognostische Windfeldberechnungen zur Anwendung. Ausgangsbasis der numerischen Analyseverfahren ist ein digitales Geländemodell einer ausreichend großen Umgebung um den betrachteten Standort. Unter Einbeziehung der relevanten physikalischen Gesetzmäßigkeiten werden hierauf aufbauend die vorherrschenden Strömungsverhältnisse realitätsnah simuliert.

Abbildung 49: Digitales Geländemodell in der weiteren Umgebung des Standortes



In Abbildung 49 ist für einen Beispielstandort (Dreiecksmarkierung) das zugehörige digitale Geländemodell der weiteren Umgebung wiedergegeben, (Hölscher N., Niemann H.-J., 2011). Die topographischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet zeigen sich sehr komplex, die Geländehöhen variieren dabei zwischen 150m und 700m. Abbildung 50 weist als ein Ergebnis der numerischen Untersuchung die maßgebenden bodennahen Windverhältnisse bei einem orkanartigen Höhenwind von 32m/s aus. Sie stellen sich in diesem Fall unter einer Anströmung aus Süd-West ein, da eine seitliche Umströmung der standortnahen Geländeerhebung durch die sichelförmige Ausrichtung erschwert ist. Im Vergleich zur unmittelbaren Umgebung resultieren für den Bauwerksstandort dabei bis zu 60% überhöhte Geschwindigkeitswerte.

Abbildung 50: Windrichtung und –geschwindigkeit in m/s in ca. 10m über Grund bei einem Höhenwind von 32m/s aus Süd-West



1.1.2.6 Auswirkungen der Gefahrenquelle Wind

Einer dem natürlichen Wind ausgesetzten Tragstruktur werden Lasten aufgeprägt, die in Abhängigkeit der Zeit stochastisch um einen mittleren Wert schwanken. Der mittlere Lastwert resultiert dabei aus einer konstanten Grundströmung des Windes. Dem Grundwind sind in Zeit und Raum lokal Böenstörungen überlagert, die eine Erhöhung bzw. Verringerung der mittleren Windgeschwindigkeit bewirken. Diese böeninduzierten Geschwindigkeitsschwankungen spiegeln sich auf dem Tragwerk in entsprechenden Lastschwankungen wieder.

Abbildung 51: Windschäden an einzelnen Bauteilen sowie am Gesamttragwerk



Windschäden an einzelnen Bauteilen

Windschäden am Gesamttragwerk

Durch die Veränderlichkeit der aus dem Böenwind hervorgerufenen Windlasten mit der Zeit können Tragwerke mehr oder weniger zu Resonanzschwingungen angeregt werden. Je nach Ausprägung der Resonanz unterscheidet sowohl die DIN EN 1991-1-4:2010-12 als auch die DIN 1055-4:2005-3 zwischen Konstruktionen, die nicht schwingungsanfällig sind und solchen, die schwingungsanfällig sind. NA.C.2(1) bzw. Abschnitt 6.2 (1) führt konkret aus, dass Bauwerke als schwingungsanfällig einzustufen sind, wenn die Verformungen unter Windeinwirkungen durch Böenresonanz um mehr als 10% vergrößert werden. Dabei wird die Grenze der Schwingungsanfälligkeit lediglich dazu genutzt, unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung der Windlast heranzuziehen. Grundlage der Berechnung der Windlast auf nicht schwingungsanfällige Konstruktionen ist die Böengeschwindigkeit. Sie ist im Hauptteil der Windlastnorm geregelt. In Erweiterung hierzu bietet die DIN 1055-4:2005-03 mit Anhang C die Möglichkeit, die Windlast mit einem Böenreaktionsfaktor auch bei schwingungsanfälligen Konstruktionen zu erfassen. Das Verfahren kann auch auf nicht-schwingungsanfällige Tragwerke angewandt werden. Ebenso bietet die DIN EN 1991-1-4:2010-12 eine vergleichbare Möglichkeit zur Berücksichtigung über den Strukturbeiwert c_{sc} in Abschnitt 6. Bei dessen Ermittlung sind ebenfalls die Regelungen des nationalen Anhangs zu berücksichtigen.

Die in extremen Stürmen hervorgerufenen Böenwindlasten können zu Schäden an einzelnen Bauteilen und in seltenen Fällen zum Versagen der gesamten baulichen Anlage führen. Abbildung 51 verdeutlicht dies anhand zweier aufgetretener Schadensfälle. Während das in (a) gezeigte Mehrfamilienhaus lediglich Schädigungen in der Dacheindeckung aufweist, ist es bei dem in (b) wiedergegebenen Kirchturm zum Gesamtversagen gekommen. Ursächlich verantwortlich für den Kirchturmeinsturz war dabei vermutlich nicht allein die extreme Böenwindbelastung, vielmehr ist zusätzlich von einer über die Lebensdauer verminderten Tragfähigkeit auszugehen.

Abbildung 52: Wirbelstraße an einem kantigen Profil



© wdickt.net

Schlanke, lang gestreckte Tragstrukturen können infolge der Windströmung zudem zu Schwingungen quer zur Anströmrichtung angeregt werden (Niemann H.-J., Peil U., 2003). Den Querschwingungen liegt ein Anregungsmechanismus zugrunde, bei dem zyklisch und alternierend Strömungswirbel an den Flanken des Baukörpers ablösen. Hierbei bilden sich sogenannte Wirbelstraßen gemäß Abbildung 52 aus. Der Vorgang der Strömungsablösung geht auf der entsprechenden Seite mit einer Geschwindigkeitsabnahme einher, während die Windströmung auf der gegenüberliegenden Seite eine Beschleunigung erfährt. Dem Bernoullischen Gesetz entsprechend bildet sich hierdurch zwischen den Flanken ein Druckunterschied aus, der schließlich eine Quertriebskraft in Richtung des Druckgefälles hervorruft. Die wirbelinduzierten Quertriebskräfte sind in der Regel nur von unwesentlicher Größe. Bei ungünstiger Lage der Eigenfrequenzen zur Erregerfrequenz wird die Tragstruktur in Resonanz erregt. Hierdurch stellen sich insbesondere bei schwach gedämpften Tragwerken und Tragwerksteilen große resonante Überhöhungen ein, so dass auch sehr kleine Erregerkräfte große Verformungen und Schnittkräfte hervorrufen können. Die eigentliche Beanspruchung resultiert dabei im Wesentlichen aus den Massenträgheitskräften des in Resonanz geratenen Systems.

Sowohl die DIN EN 1991-1-4:2010-12 als auch die DIN 1055-4:2005-03 stellt ein Berechnungsverfahren bereit, mit dem die Schwingungsanfälligkeit eines Tragwerkes gegenüber Wirbelerregung beurteilt und die wirbelinduzierten Beanspruchungen für den Resonanzfall erfasst werden können.

Abbildung 53: Tragwerksversagen des Fernsehturms „Hoher Bogen“ infolge Ermüdung aus wirbelerregten Querschwingungen



Die aus Wirbelresonanz hervorgerufenen Beanspruchungen sind meist deutlich geringer als die im jeweiligen Tragwerk vorliegenden Beanspruchbarkeiten. Ein Tragwerksversagen infolge Gewaltbruch kann daher i. d. R. ausgeschlossen werden. Gleichwohl können langandauernde Querschwingungen häufige Lastwechsel auslösen, die zu signifikanten Ermüdungsschäden des Tragwerks führen. Abbildung 53 zeigt in diesem Zusammenhang als Schadensbeispiel den Fernsehturm „Hoher Bogen“ im Bayerischen Wald. Er bestand aus einem 52,0 m hohen Stahlbetonturm, auf den ein 33m hoher Stahlmast aufgesetzt war. Die während seiner Lebensdauer aufgetretenen Querschwingungen infolge Wirbelresonanz haben die Anschlusskonstruktion des Stahlmastes dermaßen geschädigt, dass diese während eines Herbst-Sturms versagte und der Stahlschaft abbrach. I. a. weisen insbesondere Stahlkonstruktion aufgrund ihres geringen Gewichtes eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Wirbelerregung auf. Sie sind vor diesem Hintergrund im Rahmen einer Ermüdungsuntersuchung gegen die dynamische Lastwirkung nachzuweisen.

Neben möglichen böen- sowie wirbelinduzierten Schwingungen können bauliche Anlagen oder Teile von ihnen unter Windeinwirkungen zu selbsterregten Schwingungen angeregt werden (Niemann H.-J., Peil U., 2003). 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 umströmten Medium entnehmen. Sie gehen im Allgemeinen mit sehr großen Amplituden einher und können gegebenenfalls zur Zerstörung des Tragwerks führen. Entsprechende Erscheinungen werden unter dem Begriff der aeroelastischen Effekte zusammengefasst. Sie werden wie folgt differenziert:

Formanregung (Galloping)

Die Formanregung stellt ein bei Baukonstruktionen häufig zu beobachtendes Phänomen dar. Sie wird ursächlich durch eine senkrecht zur Anströmrichtung hervorgerufene Verschiebung der Anlage oder Anlagenteils ausgelöst, die eine un-symmetrische Umströmung zur Folge hat. Hierdurch bedingt bildet sich auf den ursprünglich windparallelen Querschnittsflächen eine nicht-symmetrische Druckverteilung aus. Bei nicht kreisförmigen Querschnittsformen wie z. B. einem Rechteck stellt sich infolgedessen eine resultierende Kraft in Richtung der Querbewegung ein, die zunächst die Verschiebung und im Weiteren die Kraft selbst vergrößert. Der Querschnitt wird in Störungsrichtung beschleunigt bewegt. Mit zunehmender Auslenkung steigt die Federkraft des Tragsystems dabei proportional an und bewirkt beim Überschreiten der strömungsinduzierten Kraft die Umkehr der Verschiebungsrichtung. Das System wird letztlich zu sehr ausgeprägten, niederfrequenten Schwingungen mit großen Amplituden senkrecht zur Anströmrichtung angeregt.

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. Als Beispiel zeigt Abbildung 54 ein durch Regen-Wind-induzierte Schwingungen hervorgerufenen Ermüdungsriss an den Hängeranschlüssen der Elbebrücke Dömitz. Die Schädigungen traten dabei schon nach einer relativ kurzen Nutzungsdauer von 9 Monaten nach der Einweihung zu Tage.

Abbildung 54: Ermüdungsriss nach Regen-Wind induzierten Schwingungen



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.

Das wohl bekannteste Beispiel für ein Brückenversagen durch selbsterregte Flatterschwingungen ist der Einsturz der Tacoma-Brücke über dem Puget Sound in Amerika im Jahre 1940. Abbildung 55 stellt Momentaufnahmen der Verformungen der Fahrbahn kurz vor und während des Versagens zusammen.

Abbildung 55: Sturmschäden durch Flatterschwingungen



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 Anlagenteile in Reihe oder als Gruppe können etwaige aeroelastische Effekte durch Strömungsinterferenz begünstigt werden. In diesem Zusammenhang sind folgende Schwingungserscheinungen zu unterscheiden:

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 Anströmungswinkels 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.

wirbelerregte Querschwingungen

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 Ermüdung nicht mit Erfolg geführt werden kann. Aus diesem Grunde sind sie unbedingt durch konstruktive Maßnahmen zu vermeiden. Im Anhang E der DIN EN 1991-1-4:2010-12 und der DIN 1055-4:2005-03 sind geeignete Kriterien formuliert, mit denen unter Einbeziehung der Geometrie und Struktureigenschaften des betrachteten Tragwerkes die grundsätzliche Anfälligkeit gegenüber aeroelastischer Effekte beurteilt werden kann.

Neben einer Begünstigung möglicher aeroelastischer Effekte kann eine sehr enge Anordnung der einzelnen Anlagenkomponenten 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:

- Im Zwischenraum zwischen großen Einzelanlagenteilen 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.
- Das Strömungsfeld, das von einem der großen Anlagenteile ausgeht, kann an einem zweiten Anlagenteil 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.

Abbildung 56: Übergeschwindigkeitsfaktoren zwischen den Anlagenbauten eines Steinkohlekraftwerkes

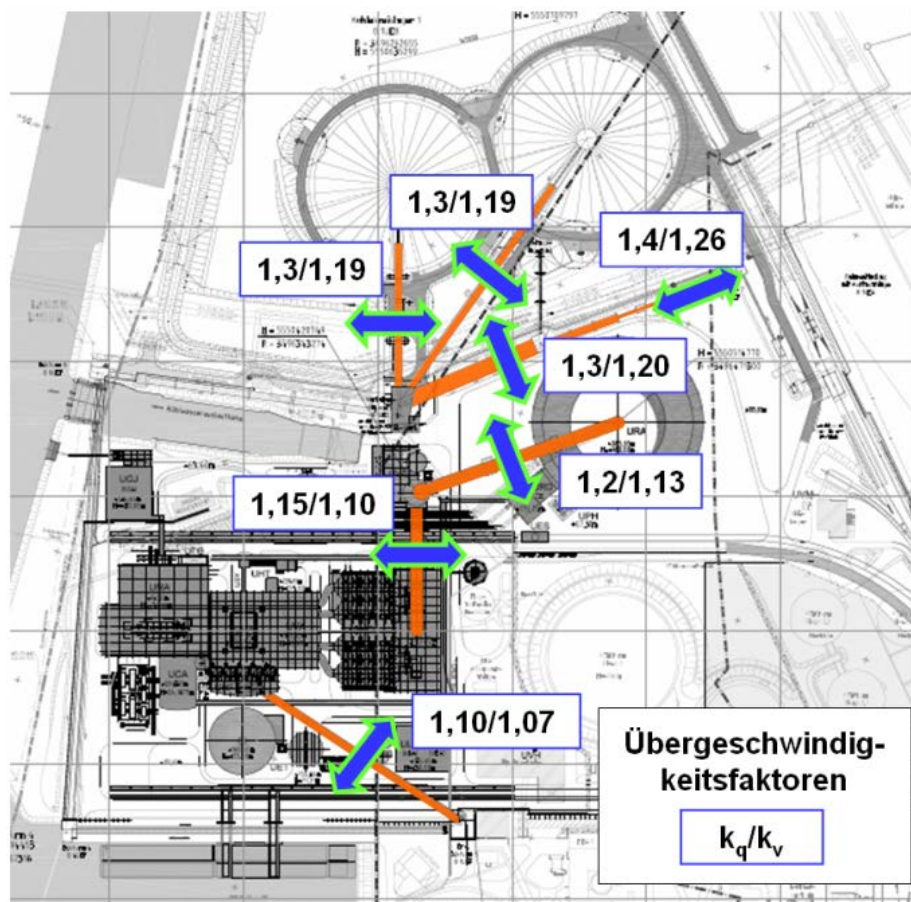


Abbildung 56 zeigt am Beispiel eines Steinkohlekraftwerkes die aus Interferenzeffekten zwischen den Anlagenbauten hervorgerufenen Übergeschwindigkeiten auf. In den betroffenen Anlagenbereichen sind zu diesem Zweck die bezüglich der freien Anströmung resultierenden Geschwindigkeitsüberhöhungen mit der zugehörigen Windrichtung in der Draufsicht wiedergegeben.

Anlagen oder Anlagenteile, die sich in solchen Windfeldern befinden, erfahren eine bezüglich der freien Anströmung vergrößerte Windlast, die beim Tragwerksentwurf in geeigneter Weise zu berücksichtigen ist.

1.1.3 Quantitative Analyse

1.1.3.1 Wind- und Sturmstatistik

Eine dem natürlichen Wind ausgesetzte Tragstruktur erfährt in ihrer Lebensdauer eine zeitlich stark veränderliche Belastung. Die Windbelastung kann dabei als ein aus der Grundströmung des Windes hervorgerufener mittlerer Lastanteil verstanden werden, dem zufällige, auf die Böigkeit des Windes zurückzuführende Schwankungen überlagert sind. Bei schlanken, stabförmigen Anlagen können darüber hinaus Windlastschwankungen senkrecht zur Windrichtung auftreten. Sie werden durch aus Wirbelablösung erregte Querschwingungen ausgelöst. Im Rahmen des baupraktischen Nachweises ist für die Konstruktion sicherzustellen, dass die in der Lebensdauer aufgeprägten Windeinwirkungen sicher aufgenommen und in den Baugrund abgetragen werden können. Der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit erfolgt dabei in abdeckender Weise für die rechnerisch maximal zu erwartende Windlast. Sie korrespondiert normgemäß zu einem Ereignis, das in 50 Jahren statistisch nur einmal eintritt und somit eine jährliche Eintrittsrate von 0,02 aufweist. Die zugehörige Windgeschwindigkeit wird mit Hilfe extremwertstatistischer Methoden aus für den Anlagenstandort repräsentativen Winddaten entwickelt.

Durch die böen- und wirbelinduzierten Schwankungen der Windlast ist das Tragwerk Spannungsänderungen unterworfen, die bei ermüdungsanfälligen Bauteilen über die planmäßige Nutzungsdauer zu einer maßgeblichen Betriebsbeanspruchung führen können. Für entsprechende Bauteile ist der Nachweis der Betriebsfestigkeit zu erbringen. Die hierbei zu berücksichtigenden ermüdungswirksamen Beanspruchungen werden von der Gesamtheit aller aus dem Wind hervorgerufenen Spannungsschwankungen gebildet. Während selten auftretende Starkwindereignisse mit großen Spannungsamplituden einhergehen, lösen schwächere Windereignisse entsprechend kleinere Spannungswechsel größerer Häufigkeit aus. Das einwirkende, sehr komplexe Lastkollektiv wird für den Betriebsfestigkeitsnachweis durch geeignete Lastangaben erfasst. Zu diesem Zweck ist die Grundgesamtheit aller innerhalb der planmäßigen Nutzungsdauer zu erwartenden Windgeschwindigkeiten auf statistischer Grundlage zu beschreiben.

Ausgangspunkt für die Beschreibung der standortspezifischen Windverhältnisse bilden in allen Fällen kontinuierlich vorliegende, repräsentative Registrierungen der Windgeschwindigkeit mit möglichst großer Genauigkeit. Aus ihnen wird getrennt für den gesamten sowie extremen Wertebereich eine theoretische Wahrscheinlichkeitsverteilung approximiert, die eine Extrapolation über die Beobachtungsbasis hinaus auf kleinere oder größere Werte hin ermöglichen. Das hierzu jeweils verfolgte methodische Vorgehen wird nachstehend zusammenfassend dargelegt.

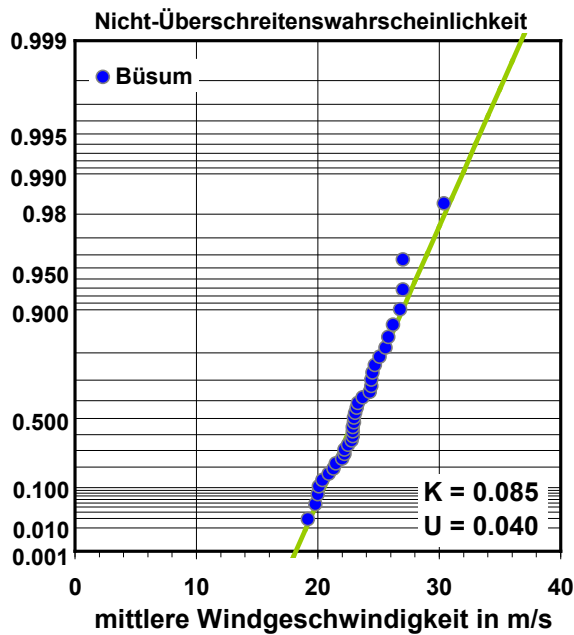
Extremwertstatistik

Man benutzt zur statistischen Erfassung extremer Stürme als Datenbasis in der Regel die jährlichen Maxima der mittleren Windgeschwindigkeit, die unabhängig von der Windrichtung betrachtet werden. Die Messung muss unter den Standardbedingungen der WMO erfolgen. Der Gumbelverteilungstyp I gilt als eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die zur Beschreibung der Daten geeignet ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert v der Geschwindigkeit nicht überschritten wird, lässt sich so mit folgendem Ausdruck berechnen:

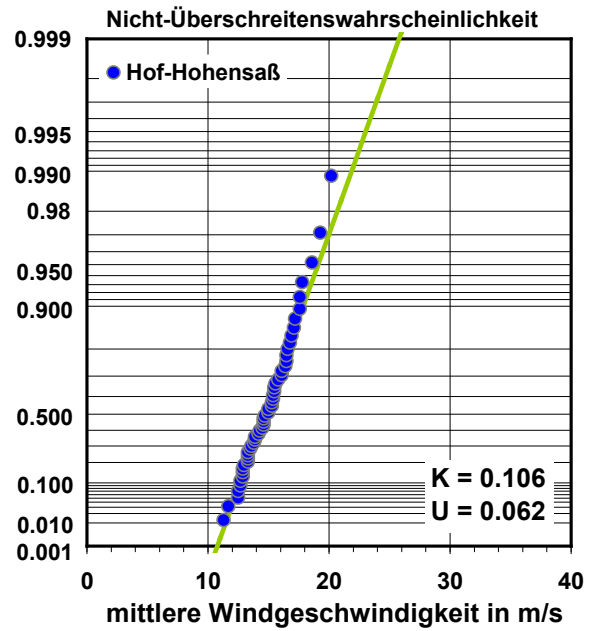
$$(20) \quad P(\leq v) = F(v) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{1}{K}\left(\frac{v}{U} - 1\right)\right]\right\}$$

K ist der sog. Formbeiwert, U der Modalwert der Verteilung. Beide Parameter werden durch Anpassung der Verteilungsfunktion an die Messdaten einer meteorologischen Station in einem speziellen Wahrscheinlichkeitspapier gewonnen. Abbildung 57 zeigt das Vorgehen anhand zweier Beispiele auf.

Abbildung 57: Wahrscheinlichkeitsverteilung $F(v)$ der Extremwerte der mittleren Windgeschwindigkeit für Nordseeküste und Süddeutschland



Nordseeküste



Süddeutschland

Für den Formparameter ist $K \approx 1/10$ im europäischen Windklima eine gute Näherung. Die mittlere Windgeschwindigkeit v zu einem gewählten Wahrscheinlichkeitsniveau ergibt sich daraus zu

$$(21) \quad v = U \cdot \{1 - K \cdot \ln[-\ln(P(\leq v))]\}$$

Die jährliche Überschreitungsrate λ hängt mit der Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit $F(v)$ zusammen. Für $F(v) \geq 0,9$ gilt näherungsweise

$$(22) \quad \lambda = 1 - F(v)$$

Unter Annahme eines Poisson-Prozesses ergibt sich der exakte Zusammenhang zwischen λ und der jährlichen Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit $F(v)$ über die Beziehung

$$(23) \quad \lambda = [-\ln(F(v))]$$

Für die Rückkehrperiode R gilt:

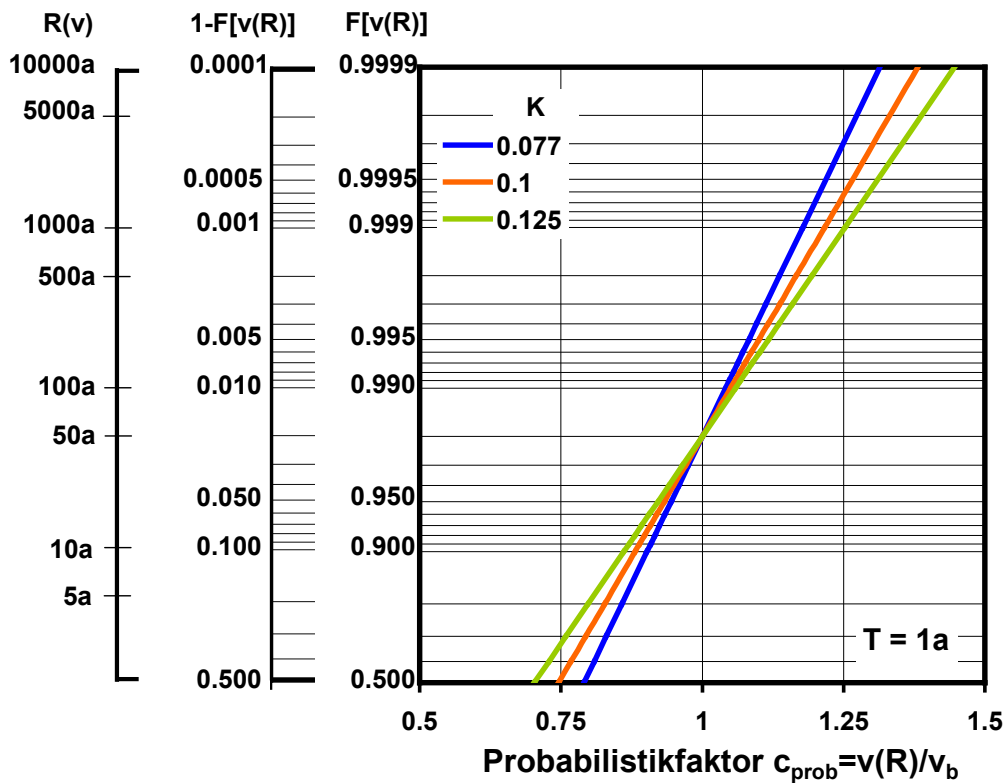
$$(24) \quad R = \frac{1}{\lambda}$$

Um die Geschwindigkeit für eine andere Überschreitenswahrscheinlichkeit $1 - F(v)$ zu bestimmen, benutzt man den Wahrscheinlichkeitsfaktor c_{prob} gemäß

$$(25) \quad c_{prob} = \frac{v(R)}{v_b(R=50)} = \frac{1 - K \cdot \ln(-\ln F(v))}{1 - K \cdot \ln(-\ln 0,98)} = \frac{1 - K \cdot \ln(1/R)}{1 - K \cdot \ln(1/50)}$$

Er kennzeichnet das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten mit Rückkehrperioden R und R = 50 a. Abbildung 58 zeigt den Faktor für unterschiedliche Werte des Formparameters K.

Abbildung 58: Verhältnis von $v(R) / v_b$ für unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsniveaus bei einem Formparameter der Gumbel-Verteilung von $K = 1/8, 1/10$ bzw. $1/13$



Statistik der Grundgesamtheit

Im Hinblick auf einen Betriebsfestigkeitsnachweis ist zur Ermittlung des maßgebenden Windlastkollektivs zunächst die statistische Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten zu modellieren. Zu diesem Zweck wird aus der Gesamtheit aller für den Standort zur Verfügung stehenden Windbeobachtungen die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilung approximiert. Als theoretischer Verteilungsansatz erweist sich in diesem Zusammenhang die so genannte Weibull-Verteilung als bestmöglich geeignet, die wie folgt definiert ist:

$$(26) \quad P(\leq v) = F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right]$$

Sie besitzt mit dem Skalenparameter A und dem Formparameter k zwei freie Parameter, die mittels geeigneter Schätzverfahren wie z. B. der Momentenmethode aus der zur Verfügung stehenden Stichprobe zu schätzen sind.

Für eine richtungsunabhängige Betrachtung darf vereinfachend ein pauschaler Formparameter von $k=2,0$ in Ansatz gebracht werden, für den Skalenparameter A stellt der Erwartungswert der mittleren Windgeschwindigkeit $E[v]$ dividiert durch 0,890 eine geeignete Näherung dar. Die Weibullverteilung der Grundgesamtheit aller mittleren Windgeschwindigkeit vereinfacht sich hiermit zu

$$(27) \quad P(\leq v) = F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{E[v]/0,89}\right)^2\right]$$

Abbildung 59 stellt exemplarisch zum Standort Travemünde die geschätzte theoretische Verteilung der empirischen Verteilung der Beobachtungen gegenüber. Die Weibull-Verteilung ist dabei richtungsunabhängig auf Grundlage der Winddaten mit Hilfe des Momentenschätzverfahrens entwickelt worden. Hierzu standen Windbeobachtungen für eine Beobachtungsdauer von 28 Jahren zur Verfügung.

In den Untersuchungen von (Christoffer J., Ulbricht-Eissing M., 1989) sind zur flächendeckenden Beschreibung der bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland die Winddaten von insgesamt 40 Messstationen analysiert worden. Auf der Grundlage 10-jähriger Windgeschwindigkeitsmessungen wurden für die betrachteten Stationen die zugehörigen Weibullverteilungen richtungsunabhängig sowie sektorspezifisch für eine 30°-Einteilung bestimmt. Tabelle 19 gibt die diesbezüglichen Untersuchungsergebnisse am Beispiel der Station Düsseldorf-Flughafen wieder. Neben den Weibullparametern k und A stellt die Tabelle in der letzten Zeile zudem die prozentuale Häufigkeit der Windrichtung bereit.

Abbildung 59: Weibull-Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten zum Standort Travemünde

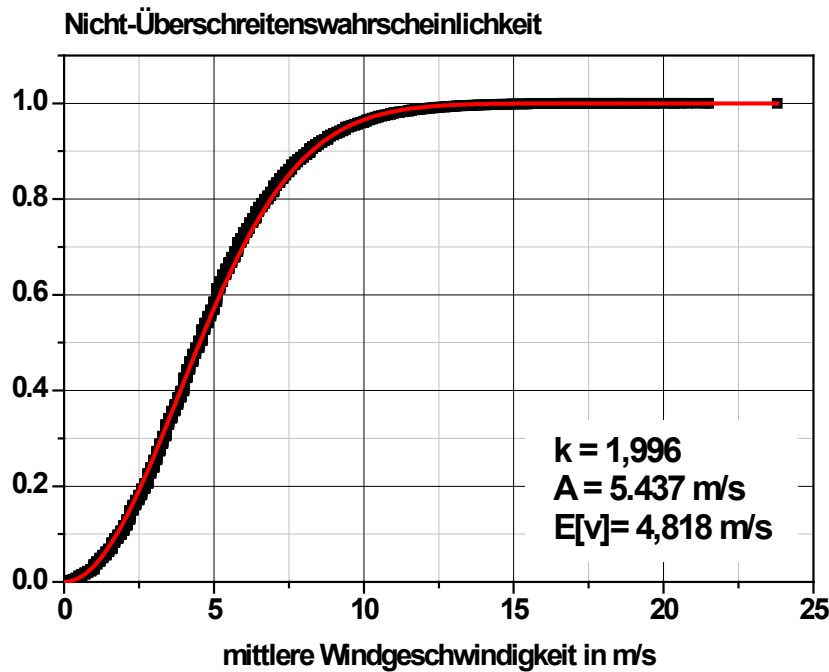


Abbildung 60 setzt die Stationsangaben graphisch in eine Darstellung der Windgeschwindigkeitsverteilung innerhalb einer planmäßigen Nutzungsdauer von 50 Jahren um. Die Grafik zeigt hierzu die für ein Geschwindigkeitsniveau in den einzelnen Sektoren in diesem Zeitraum zu erwartende Anzahl von 10-Min-Intervallen. In diesem speziellen Fall ergeben sich die meisten 10-Min-Intervalle mit einer Anzahl von 72.751 für eine Geschwindigkeit von 5m/s im Sektor 6 (135°-165°), der auch insgesamt am häufigsten belegt ist.

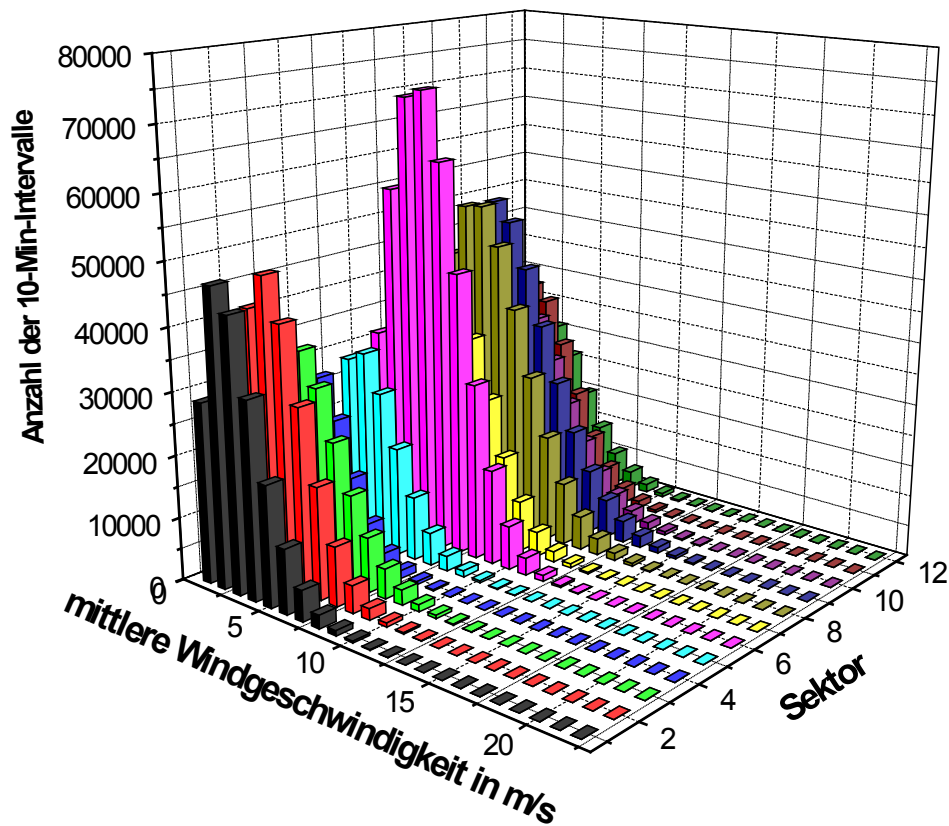
Tabelle 19: Richtungsabhängige Weibullparameter für 12 Sektoren und prozentuale Häufigkeit der Windrichtung zur Station Düsseldorf-Flughafen

Sektoren	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	gesamt
	345° - 15°	15° - 45°	45° - 75°	75° - 105°	105° - 135°	135° - 165°	165° - 195°	195° - 225°	225° - 255°	255° - 285°	285° - 315°	315° - 345°	
k	1,64	1,84	1,68	1,56	1,76	2,33	2,16	2,10	1,85	1,79	1,87	1,66	1,64
A [m/s]	3,0	3,6	3,7	2,5	3,4	5,2	5,0	5,5	5,3	4,7	4,0	3,5	3,0
r. H. [%]	7,2	8,2	6,5	3,7	5,3	15,4	8,9	12,7	12,9	8,2	6,5	4,6	100

(Erwartungswert der mittleren Windgeschwindigkeit: $E[v]=3,92\text{m/s}$)

Die Auswertungen zu den sektorspezifischen Weibullverteilungen wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes zur Bereitstellung von Winddaten für Windenergienutzer (Traup S., Kruse B., 1996) auf insgesamt 107 Messstationen fortgeführt. Erstmals haben dabei Stationen in den neuen Bundesländern Berücksichtigung gefunden, so dass für das Gesamtgebiet der Bundesrepublik Deutschland geeignete Windstatistiken zur Grundgesamtheit flächendeckend zur Verfügung stehen.

Abbildung 60: Verteilung der 10-Min-Intervalle am Standort Düsseldorf-Flughafen auf die 30°-Sektoren und Geschwindigkeitsklassen der Breite 1m/s in der planmäßigen Lebensdauer von 50Jahren



1.1.3.2 Entwicklung von Gefährdungskarten für betriebliche Anlagen auf dem Bundesgebiet

Tabelle 20 gibt einen Überblick über die Berechnung der Windeinwirkungen in einer hochturbulenten Windströmung und die dabei wesentlichen Parameter. Man unterscheidet zwischen nicht-schwingungsanfälligen Tragwerken, bei denen die Abfolge der Böenstöße nicht in Resonanz mit einer der Eigenfrequenzen eines Tragwerks gerät, die Windlast also quasi statisch wirkt. Schwingungsanfällige Tragwerke reagieren in teilweiser Resonanz auf die Windturbulenz. Grundlage ist in beiden Fällen der Spitzenwert des Geschwindigkeitsdruckes (Böengeschwindigkeitsdruck).

Tabelle 20: 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_{scd} in Abhängigkeit der Turbulenzstruktur und der dynamischen Tragwerkseigenschaften
Berechnung des Böengeschwindigkeitsdrucks q_p in der Bezugshöhe z_e <ul style="list-style-type: none"> • Windzone des Anlagenstandorts • Berücksichtigung der Bodenrauigkeit; • Auswirkung einer topographisch exponierten Lage • Einfluss der Windrichtung: Stärkewindrose • Höhe des Standortes über Normalnull • Erfassung der Windturbulenz 	Berechnung des Böengeschwindigkeitsdrucks q_p in der Bezugshöhe z_s wie bei nicht schwingungsanfälligem Tragwerk Berechnung des Strukturbeiwerts c_{scd} 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

Charakteristischer Geschwindigkeitsdruck zur Beurteilung der Gefährdung von baulichen Anlagen

Nach heutigem Erkenntnisstand gründet man den bautechnischen Sicherheitsnachweis für bauliche Anlagen und ihre Teile auf den Böengeschwindigkeitsdruck. Dieser wird aus einer Zeitreihe des Geschwindigkeitsdruckes bestimmt, der infolge der Turbulenz des natürlichen Windes einen zeitabhängigen stochastischen Prozess darstellt. Es handelt sich um den lokalen Spitzenwert q_p dieses Prozesses in einer Bezugszeit von 10 min. Er setzt sich aus folgenden statistischen Prozessparametern zusammen: dem zeitlichen Mittelwert q_m , der Standardabweichung σ_q bzw. der Intensität $I_q = \sigma_q/q_m$ und dem so genannten Spitzenfaktor k_p (Gleichung 28). Der Spitzenfaktor ergibt sich aus der Poissonschen Wahrscheinlichkeitsverteilung der Spitzenwerte und ist als ihr Mittelwert festgelegt.

$$(28) \quad q_p = q_m \left[1 + k_p I_q \right]$$

Die Prozessparameter des Geschwindigkeitsdruckes unterscheiden sich von denen der Windgeschwindigkeit. Nach (Niemann, H.-J., Peil, U., 2003) ergeben sich folgende Verknüpfungen:

$$(29) \quad \begin{aligned} q_m &= \frac{1}{2} \rho v_m^2 (1 + I_v^2) \\ I_q &= \frac{2I_v}{\sqrt{1 + I_v^2}} \end{aligned}$$

Darin ist ρ die Luftdichte, die in DIN EN 1991-1-4:2010-12 und DIN 1055-4:2005-03 mit $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ angesetzt ist. Der Spitzenwert des Geschwindigkeitsdruckes ergibt sich aus Gleichung (28) und (29) nach Gleichung (30) zu:

$$(30) \quad q_p = \frac{1}{2} \rho v_m^2 (1 + I_v^2) \cdot \left[1 + k_p 2I_v \frac{1}{\sqrt{1 + I_v^2}} \right] = \frac{1}{2} \rho v_m^2 \left[1 + I_v^2 + k_p 2I_v \sqrt{1 + I_v^2} \right] \approx \frac{1}{2} \rho v_m^2 \left[1 + k_p 2I_v \right]$$

Am Ende ist die in den Normen benutzte Näherung formuliert. Sie ist bei einer typischen Turbulenzintensität von $I_v = 0,2$ um 2,7% geringer als der exakte Wert. Hinsichtlich des Spitzenfaktors k_p setzt die DIN EN 1991-1-4:2010-12 einen Wert von 3,5 an, während die DIN 1055-4:2005-03 von 3,0 ausgeht.

Das Konzept des Eurocodes zur Berechnung des Spitzengeschwindigkeitsdruckes führt viele Sonderfälle in den Ausgangsgleichungen mit. Gleichung (31) führt die benutzten Parameter zusammen.

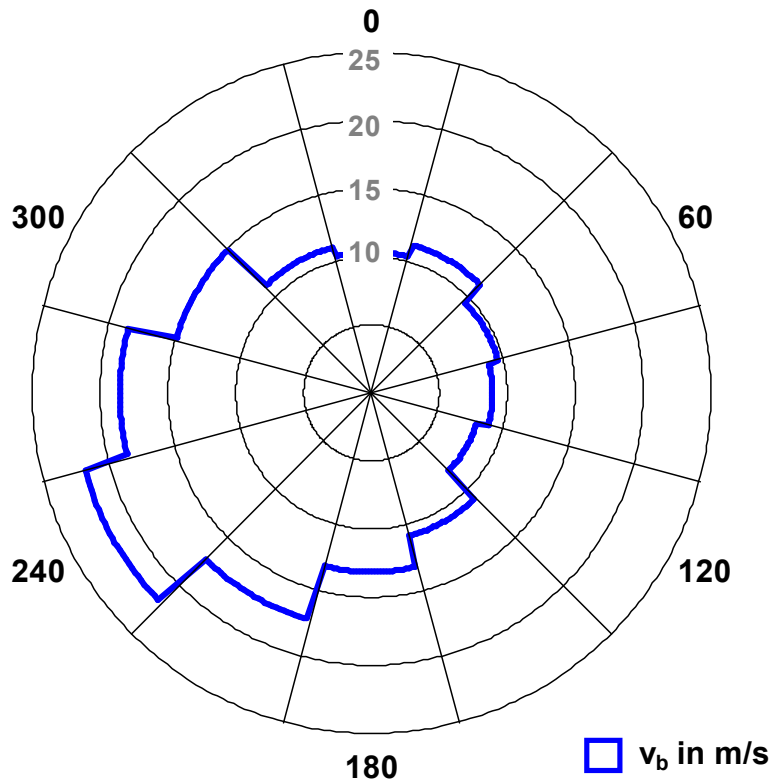
$$(31) \quad q_p = c_{dir}^2 \cdot c_{season}^2 \cdot c_{prob}^2 \cdot c_r^2(z, z_0) \cdot c_o^2(z) \cdot \left[1 + 2k_p I_v(z, z_0) \right] \cdot \frac{\rho}{2} v_{b,0}^2$$

Der erste Parameter ist zunächst die mittlere Windgeschwindigkeit: Sie ist als ein zeitliches Mittel über 10 min definiert, das unter den von der World Meteorological Organisation WMO definierten Standardbedingungen (ebenes, offenes Gelände mit niedriger Vegetation; Anemometer in 10 m Höhe über Grund) gemessen wird. Der Grundwert dieser Basisgröße $v_{b,0}$ ist unabhängig von Windrichtung und Jahreszeit. Seine Rückkehrperiode ist mit 50 Jahren festgelegt, d.h. es handelt sich bei diesem Ereignis um das maximale 10-min Mittel im Ablauf eines extremen Sturms. Dieser Grundwert ist in der Windzonenkarte angegeben. Er wird mit verschiedenen Faktoren an die besonderen Anforderungen eines Standorts angepasst. Die einzelnen Beiwerte seien kurz vorgestellt.

I. Richtungsfaktor c_{dir}

Die Windrichtung der extremen Stürme liegt, wie die Messdaten zeigen, in Mitteleuropa etwa zwischen Südwest und Nordwest. In den anderen Windrichtungssektoren beobachtet man geringere Sturmstärken. Die Windrose wird in der Regel in 12 Sektoren von 30° eingeteilt. Abbildung 6I zeigt ein typisches Beispiel.

Abbildung 61: Stärkewindrose für den 50-Jahreswind am Frankfurter Flughafen

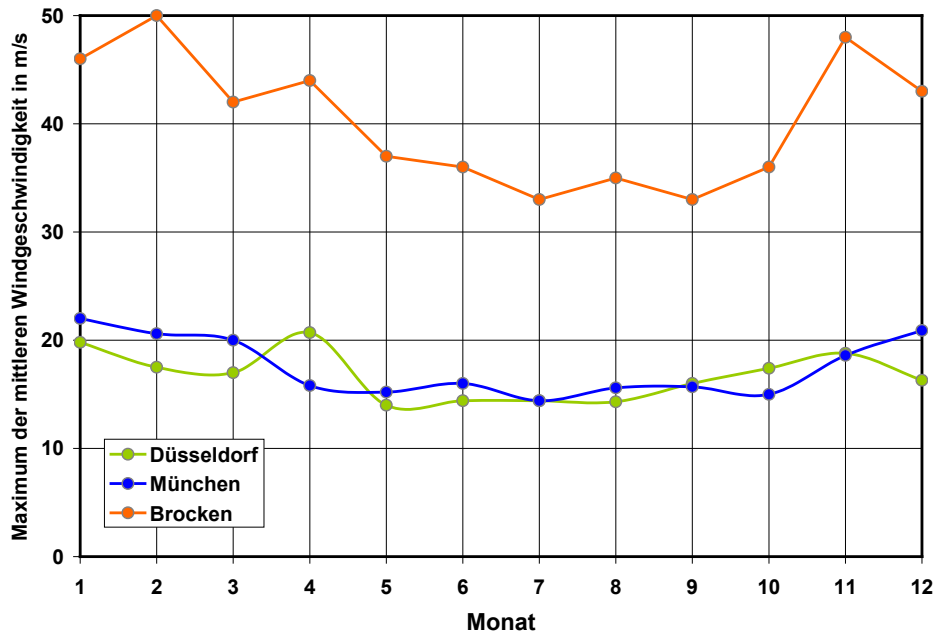


Der Richtungsfaktor c_{dir} ist als das Verhältnis des 50-Jahreswertes der mittleren Windgeschwindigkeit eines Richtungssektors zum Grundwert $v_{b,0}$ der Basisgeschwindigkeit definiert. Der Einfluss kann je nach Ausrichtung einer Anlage zu einer erheblichen Abminderung der Windlasteffekte führen, von der man aber nur bei Bedarf Gebrauch macht. Der übliche Wert ist $c_{dir} = 1$.

2. Jahreszeitenbeiwert c_{season}

Im Windklima der gemäßigten Breiten treten die extremen Stürme vorwiegend im Winterhalbjahr auf, die Sommerstürme sind, wie Abbildung 62 zeigt, geringer. Der Jahreszeitenbeiwert erfasst dieses Verhalten. Er kann bei betrieblichen Prüfungen einer Anlage nützlich sein und ist in der Norm als Option angegeben, deren Ausgestaltung nicht im Einzelnen geregelt ist. Sie erfolgt je nach konkreter Aufgabe in unterschiedlicher Weise. Der Regelwert ist 1.

Abbildung 62: Jahreszeitliche Veränderlichkeit der monatlichen Extremwerte der mittleren Windgeschwindigkeit



3. Wahrscheinlichkeitsfaktor c_{prob}

Wie im Abschnitt 0 im Einzelnen dargestellt wird, ist der Wahrscheinlichkeitsfaktor das Verhältnis des Jahresextremwerts der mittleren Windgeschwindigkeit mit Nichtüberschreitungswahrscheinlichkeiten von $F(\leq v) = 1 - p(>v)$ zu $F(\leq v) = 0,98$. Gleichung (4.6) zeigt den Zusammenhang für eine Extremwert-Wahrscheinlichkeitsverteilung vom Typ Gumbel I. Abbildung 58 zeigt den Verlauf für unterschiedliche Überschreitungswahrscheinlichkeiten mit dem Formbeiwert K als Parameter.

4. Rauigkeitsbeiwert $c_r(z, z_0)$

Der Rauigkeitsbeiwert ist definiert als das Verhältnis zwischen der mittleren Windgeschwindigkeit bei ebenem Gelände der Rauigkeitslänge z_0 in der Höhe z und der Basiswindgeschwindigkeit v_b :

$$(32) \quad c_r = \frac{v_m(z, z_0)}{v_b}$$

Die konkrete Umsetzung mit dem Normmodell der atmosphärischen Grenzschichtströmung führt auf Gleichung (33).

$$(33) \quad c_r = k_r \ln \frac{z}{z_0} = \frac{1}{\ln \frac{10}{z_{0,II}}} \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} \ln \frac{z}{z_0}$$

Dabei bezeichnet $z_{0,II} = 0,05$ m die Rauigkeitslänge im Referenzgelände der Kategorie II. Der Rauigkeitsbeiwert hat zwei Aufgaben:

- Der Geländefaktor k_r dient der Umrechnung von der Geländekategorie am Standort, die durch die Rauigkeitslänge z_0 charakterisiert ist, zum Standardgelände der Kategorie II mit der Rauigkeitslänge $z_{0,II}$;
- Der Logarithmus von z/z_0 erfasst das Profil der mittleren Windgeschwindigkeit in der Geländekategorie am Standort für den Fall eines ebenen Geländes.

Die DIN EN 1991-1-4:2010-12 verwendet also das so genannte logarithmische Profil, während in DIN 1055-4:2005-03 das Potenzgesetz nach Hellmann benutzt wird.

5. Topographiebeiwert $c_o(z)$

Der Topographiebeiwert bezieht sich wiederum auf die mittlere Windgeschwindigkeit in einer Höhe z über Grund. Er kennzeichnet das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit $v_{m,o}$ bei Überströmung einer Geländeerhöhung und der im flachen Gelände.

$$(34) \quad c_o = \frac{v_{m,o}(z, z_0)}{v_m(z, z_0)}$$

Die DIN EN 1991-1-4:2010-12 gibt den Topographiebeiwert für einzelne Geländesprünge oder Kuppen an. Er beschränkt sich auf Werte ≥ 1 . Ebenes Gelände ist der Fall $c_o = 1$.

6. Turbulenzintensität $I_v(z, z_0)$

Die Turbulenzintensität wandelt den Geschwindigkeitsdruck der mittleren Windgeschwindigkeit in den benötigten Böengeschwindigkeitsdruck nach Gleichung (30) um. Sie hängt von der Rauigkeitslänge z_0 und der Höhe über Grund z ab. Die Grenzschichttheorie ergibt:

$$(35) \quad I_v(z, z_0) = \frac{1}{c_o \cdot \ln \frac{z}{z_0}}$$

In Gleichung (35) ist durch den Topographiebeiwert im Nenner berücksichtigt, dass die Topographie die Turbulenzintensität verändert. Die Beschleunigung der mittleren Strömung über dem Hindernis glättet die Strömung, führt also zu einer verminderten Intensität.

7. Einfluss der Meereshöhe

Für das Gebiet der Bundesrepublik gilt die Windzonenkarte nur bis zu einer Meereshöhe des Standortes von $H_s = 800$ m über NN. Oberhalb davon wird der Geschwindigkeitsdruck um folgenden Faktor linear erhöht:

$$(36) \quad \left(\frac{H_s}{1000} + 0,2 \right) \quad 800m \leq H_s < 1100m$$

Der Faktor beträgt maximal 1,3. Für Kamm- und Gipfellagen der Mittelgebirge sowie oberhalb von 1100 m über NN gelten die Werte nicht und es sind besondere Überlegungen erforderlich.

Das Windlastniveau der DIN EN 1991-1-4:2010-12 und DIN 1055-4:2005-03

Das Windlastniveau der Norm ergibt sich aus dem Grundwert des Geschwindigkeitsdruckes der mittleren Windgeschwindigkeit, der in der Windzonenkarte Abbildung 30 angegeben ist. Daraus bestimmt man den Spitzenwert des Geschwindigkeitsdruckes, den so genannten Böengeschwindigkeitsdruck, der wie gesehen von zahlreichen Parametern abhängt. In Tabelle 21 sind typische Werte zusammengestellt, und zwar zunächst der Standardfall Geländekategorie II in allen Windzonen. Für die Windzonen 1 bis 3 sind außerdem die Werte für die Meereshöhe 1100m über Normalnull aufgeführt. In Windzone 4 ist im Bereich der Deutschen Bucht die Geländekategorie I maßgebend. Standorte, auf die diese ungünstige Geländekategorie zutrifft, kommen in allen Windzonen vor.

Tabelle 21: Böengeschwindigkeitsdruck (Spitzengeschwindigkeitsdruck) in den 4 Windzonen in 10 m Höhe über Grund

Windzone	Geschwindigkeitsdruck des 10-min Mittels $q_{b,0}$	q_p GK II, z=10m $H_s < 800m$	q_p GK II, z=10m $H_s = 1100m$	q_p GK I, z=10m $H_s < 800m$
1	0,32 kN/m ²	0,67 kN/m ²	0,87 kN/m ²	0,83 kN/m ²
2	0,39 kN/m ²	0,82 kN/m ²	1,07 kN/m ²	1,01 kN/m ²
3	0,47 kN/m ²	0,99 kN/m ²	1,29 kN/m ²	1,22 kN/m ²
4	0,56 kN/m ²	1,18 kN/m ²	(1,53 kN/m ²)	1,46 kN/m ²

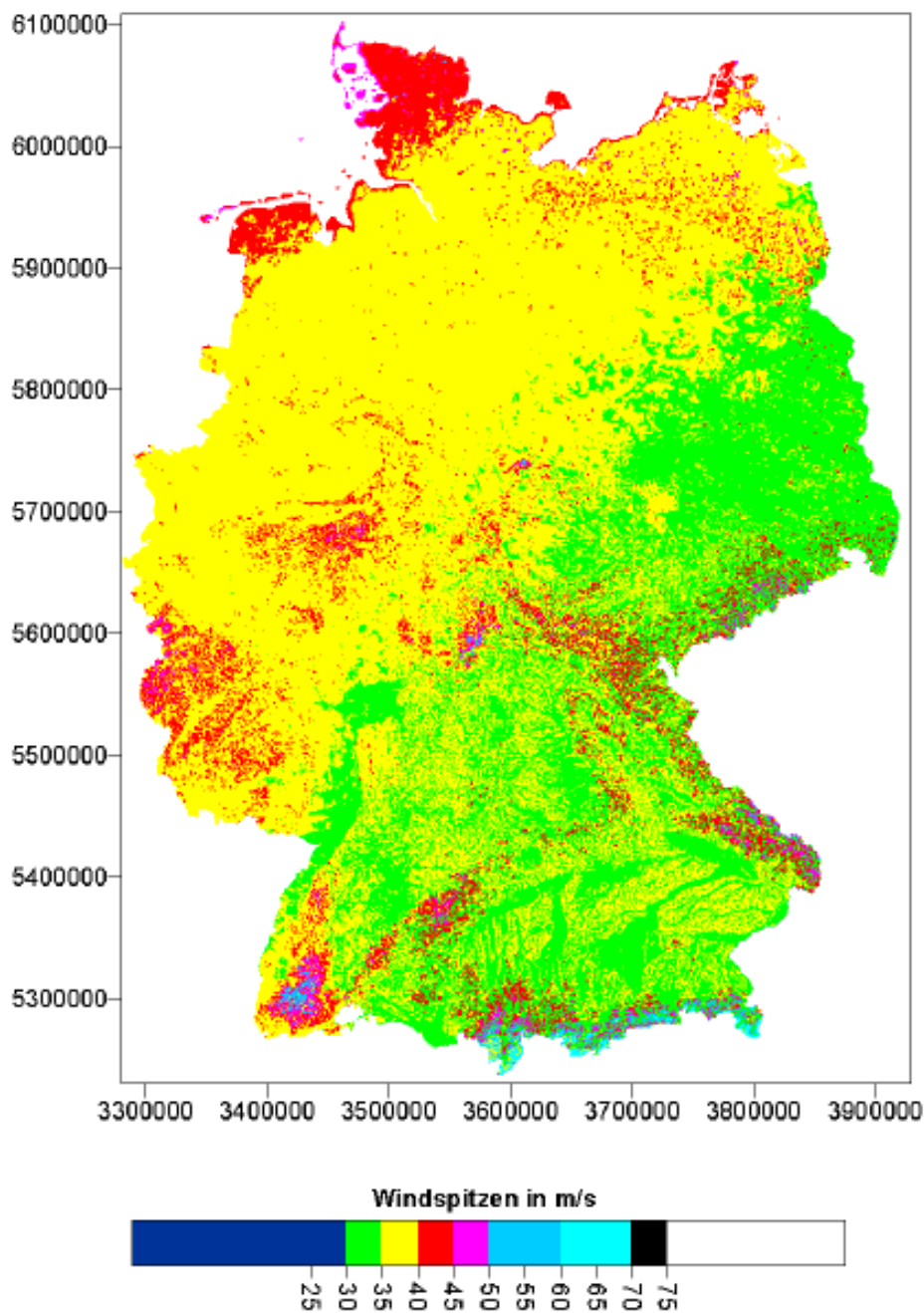
Tabellenunterschrift, z.B. für Quellenangabe und Anmerkungen

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der bautechnischen Windlastnorm ein Windlastmodell zugrunde liegt, das von den statistischen Parametern des stochastischen Prozesses des Geschwindigkeitsdruckes ausgeht. Der zeitliche Spitzenwert des Geschwindigkeitsdruckes benutzt die zuverlässigen Parameter Mittelgeschwindigkeit und Turbulenzintensität. Die Böengeschwindigkeit ist darin nicht eingegangen.

Karten des Deutschen Wetterdienstes zur Sturmgefährdung in Deutschland

Der Deutsche Wetterdienst hat auf Veranlassung des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenvorsorge (BBK) einen eigenständigen Ansatz zur Einschätzung der Sturmgefahren in Deutschland verfolgt. Basisgröße ist dabei nicht der Mittelwind entsprechend DIN EN 1991-1-4:2010-12, sondern die Böenwindgeschwindigkeit angegeben als 3-Sekundenmittelwert. Sie ist in Form von Sturmkarten für das gesamte Bundesgebiet für Windböen illustriert, deren Auftreten im statistischen Mittel z. B. einmal in 50, 100 und 500 Jahren zu erwarten ist. Abbildung 63 zeigt exemplarisch die Verteilung der 50-Jahres Windspitzen. Für diese Böenwindgeschwindigkeit findet sich deutschlandweit eine Bandbreite von etwa 30m/s als Kleinst- und ca. 68m/s als Größtwert. 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 +5,0m/s um den jeweiligen Kartenwert.

Abbildung 63: Windspitzen für eine mittlere Wiederkehrzeit von 50 Jahren



(Augter G., Ross M., 2011)

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 3ten 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. Tabelle 22 gibt eine Zusammenstellung von Böengeschwindigkeiten beispielhaft ausgewählter Standorte.

Tabelle 22: Böenwindgeschwindigkeiten v zu Wiederkehrzeiten R von 50, 100 und 500 Jahren ausgewählter Standorte

Ort	geografische Lage		DWD Sturmkarten		
	Breiten- und Längengrad	Gauß-Krüger Koordinaten	$v(R=50a)$ in m/s	$v(R=100a)$ in m/s	$v(R=500a)$ in m/s
Wilhelms- haven	53°33'6"N 8°8'56"E	3443.600 5935.760	36	37	40
Rostock	54°8'58"N 12°8'43 "E	3705.450 6006.500	33	34	36
Hamburg Moorburg	53°29'0"N 9°58'6 "E	3564.275 5928.250	40	41	44
Leuna	51°18'0"N 12°1'9"E	3710.525 5689.200	34	35	38
Marl-Hüls	51°40'55"N 7°5'47"E	3368.350 5729.000	38	39	42
Gelsenkir- chen-Schol- ven	51°36'10"N 7°1'36"E	3363.300 5720.400	36	38	40
Leverkusen	51°1'11"N 6°59'1"E	3358.500 5655.650	39	41	45
Köln	50°51'39"N 6°52'9"E	3345.000 5638.200	37	39	42
Ludwigsha- fen	49°30'16"N 8°25'44"E	3458.650 5485.325	39	40	43
Ingolstadt	48°47'21"N 11°28'18"E	3681.700 5408.700	38	39	42
Wilhelms- haven	53°33'6"N 8°8'56"E	3443.600 5935.760	36	37	40
Rostock	54°8'58"N 12°8'43 "E	3705.450 6006.500	33	34	36

Sämtliche Sturmkarten des DWDs beruhen auf Beobachtungen der Tageswindspitzen, die an insgesamt 130 Stationen über einen Zeitraum von 1971 bis 2008 erfasst wurden. Man nutzt sie zur Anpassung einer generalisierten Extremwertverteilung (GEV) mit der eine Hochrechnung der Windspitzen auch zu solch langen Wiederkehrzeiten möglich wird, die durch die vorliegenden Beobachtungsdaten nicht unmittelbar abgedeckt sind. Das setzt u.a. voraus, dass die Reihe der Tageswindspitzen auf voneinander unabhängige Windereignisse bereinigt wird und nur Windgeschwindigkeiten (POT Peak-over-Threshold) oberhalb eines geeigneten Schwellenwertes herangezogen werden. Vorteil dieser Verfahrensweise ist, dass man gegenüber der ansonsten üblichen Auswertung von Jahrestremwerten von Windgeschwindigkeiten, die Parameteranpassung der GEV auf eine vergrößerte Datenbasis gründen kann. Dies lässt eine höhere statistische Genauigkeit erwarten. Allerdings gibt es keinen Algorithmus zur Festlegung des benötigten Schwellenwertes, so dass er sehr sorgfältig geprüft und im Rahmen der DWD-Untersuchungen stichprobenartig verifiziert wird.

Die benutzte Extremwertverteilung entspricht der allgemeinen Gumbelverteilung und ist in der gewählten Formulierung

$$(37) \quad F(\leq v) = \exp \left\{ - \left(1 + \xi \cdot \frac{v - \mu}{\beta} \right)^{1/\xi} \right\}$$

durch die GEV-Parameter μ = location, β = scale und ξ = shape eindeutig festgelegt. Sie werden anhand der POT der Windmessdaten je Station bestimmt und mit Hilfe von Regressionsgleichungen in Abhängigkeit der geographischen Lage dargestellt. In diese Beziehungen integriert wird ein Zusammenhang zwischen dem Extremwindklima und dem Mittelwindklima Deutschlands. Er wird im Wesentlichen über das Statistische Windfeldmodell (SWM) des DWDs eingebracht, das Einflüsse wie z.B. die Standorthöhe über Meeresspiegel, die Geländeform (Ebene, Tal, Kuppe und Küste) und die örtliche Landnutzung auf die mittlere Windgeschwindigkeit windrichtungsscharf aufnimmt, (Gerth W.-P., Christoffer J., 1994). Soweit gegeben, wird auch der Einfluss von Einzelhindernissen auf die genutzten Windmessdaten in empirischer Weise rechnerisch korrigiert, (Europäischer Windatlas, 1990). Das SWM weist den Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit sowie Formparameter für die Häufigkeitsverteilungen (Weibull-Verteilungen) der Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit zu den lokalen Gegebenheiten eines Ortes aus. Sie werden im Rahmen der Regressionsanalysen für die Sturmkarten mit den Auswertergebnissen der Extremwindstatistik pauschal verknüpft und so zu einem deutschlandweiten Modell der Windspitzen zusammengefasst. Es gibt die GEV-Parameter in Abhängigkeit der geographischen Koordinate an, so dass mit Hilfe einer standortspezifischen Extremwertverteilung Gitterpunktwerte für Windspitzen mit vorgegebener Wiederkehrzeit berechnet werden können. Sie bilden die Datengrundlage für die Sturmkarten.

Die Karten zum Mittelwind und zu den Windspitzen liefern damit standortspezifische Größen zum örtlichen Windklima. Das Windlastmodell der Windlastnorm nutzt dagegen die mittlere Windgeschwindigkeit, deren Grundwerte $v_{b,0}$ einheitlich für ein ebenes, offenes und unbebautes Bezugsgelände entsprechend WMO-Standard (Geländekategorie GK-II) umgerechnet und so in der nationalen Windzonenkarte ausgewiesen sind. Sie bilden die normgemäße Basis für den Nachweis der Einwirkungen aus Wind auf bauliche Anlagen. Sie sind gleichermaßen Grundlage für die Beurteilung der Sturmgefährdung von Betrieben mit Anlagen und Einrichtungen nach StörfallV, wenn die zusätzlichen Einflussparameter auf den Spitzenwert des Geschwindigkeitsdruckes in einem extremen Sturm geeignet erfasst werden. Hierzu anzustreben wäre eine extremwertstatistische Bewertung möglichst langjähriger Windmesszeitreihen von Stationen, die für das Starkwindgeschehen im Anlagenbereich charakteristisch sind und auf die maßgebenden Größen der normgemäßen Windlast rückschließen lassen. Hier sind Angaben zur zeitlich mittleren Windgeschwindigkeit verschiedener Wiederkehrzeiten $v_m(R)$ oder c_{prob} , wie ebenso Informationen zum jahreszeitlichen Einfluss auf die Starkwindsituation c_{season} sowie Aussagen zur Stärkewindrose c_{dir} aufzuführen. Geländeform und zur Landnutzung sind im Hinblick auf anlagenspezifische Topographie- und Rauigkeitsbeiwerte normgemäß umzusetzen. Hierfür geeignete Daten zur Landnutzung sind z.B. im CORINE-Kataster (Statistisches Bundesamt, 2001) hinterlegt und ermöglichen eine Bewertung der örtlichen Geländebeschaffenheit hinsichtlich der aerodynamischen Rauigkeitslänge z_0 . Diese Feststellungen genügen, um bei ansonsten ebenem Gelände alle weiteren davon abhängigen Windparameter wie z.B. den Rauigkeitsbeiwerte $c_r(z, z_0)$, die Turbulenzintensität $I_t(z, z_0)$ oder den Böenfaktor $G_r(z, z_0)$ zu bestimmen. Der Böenfaktor gibt das Verhältnis vom Spitzenwert der Windgeschwindigkeit, der Böengeschwindigkeit $v(z, z_0)$, zu ihrem zeitlichen Mittelwert $v_m(z, z_0)$ wieder. Er hängt von der betrachteten Böendauer, der Länge des Mittelungsintervalls und zusätzlich von der Geländerauhigkeit z_0 ab. Untersuchungen von (Wieringa, 1976) zeigen für eine Böendauer von 3 sec Werte zwischen $\approx 1,36$ über Wasserflächen und von $\approx 1,88$ über großer Bodenrauhigkeit wie z.B. in städtischer Bebauung. Sie sind in DIN 1055-4:2005-03 und DIN EN 1991-1-4:2010-12 entsprechend umgesetzt. Tabelle 23 stellt die hieraus abgeleiteten Böengeschwindigkeiten zu den Hochrechnungen der DWD-Sturmkarten für Standorte unterschiedlicher Windzonen gegenüber. Abhängig von Windzone und örtlicher Geländerauhigkeit kommen beide Vorgehensweisen zu praktisch übereinstimmenden Ergebnissen. Insbesondere an Standorten mit größerer Geländerauhigkeit wird der Böeneinfluss auf die wirksame Windlast mit den Windspitzen der DWD Sturmkarten überschätzt.

Tabelle 23: 50-Jahreswindgeschwindigkeiten ausgewählter Standorte

Ort	Windzone	DWD Sturm- karte V in m/s	Böenfaktoren nach Wieringa				
			$v_{b,0}$ in m/s	Gelände- kategorie	V_m ($z=10m, z_0$) in m/s	Böen- faktor v/v_m	$v(z=10m, z_0)$ in m/s
Wilhelms- haven	4	36,0	30,0	GK I	35,4	1,36	48,30
Rostock	3	33,0	27,5	GK I	32,45	1,36	44,28
Hamburg Moorburg	2	40,0	25,0	GK II	25,0	1,45	36,25
Leuna	2	34,0	25,0	GK II	25,0	1,45	36,25
Marl-Hüls	1	38,0	22,5	GK II	22,5	1,45	32,63
Gelsenkirchen- Scholven	1	36,0	22,5	GK II	22,5	1,45	32,63
Leverkusen	1	39,0	22,5	GK II	22,5	1,45	32,63
Köln	1	37,0	22,5	GK II	22,5	1,45	32,63
Ludwigshafen	1	39,0	22,5	GK II	22,5	1,45	32,63
Ingolstadt	1	38,0	22,5	GK II	22,5	1,45	32,63

Zusammenfassung:

1. Die Daten des DWD – Sturmatlas unterscheiden sich von den Regulierungen der Windlastnorm u.a. dadurch, dass sie die Abhängigkeit der natürlichen Windströmung von den lokalen Standortbedingungen implizit in den Böengeschwindigkeiten erfassen. Die Windlastnormen benutzen dagegen Mittelgeschwindigkeiten, die auf eine einheitliche Geländekategorie homogenisiert angegeben sind. Das hat teilweise baurechtliche Gründe: Beim Nachweis der Sicherheit einer baulichen Anlage darf z.B. die Schutzwirkung einer Bewaldung nicht ausgenutzt werden, da sie nicht zuverlässig dauerhaft vorhanden ist.
2. Insbesondere für Stahlbauten können Nachweise der Betriebsfestigkeit sicherheitsrelevant werden. Das gilt sowohl für Ermüdung durch Böenerregung als auch durch Wirbelerregung. Um dieser Gefährdung zu begegnen, sind die statistischen Parameter der Weibullverteilungen für die Grundgesamtheit der 10-min Mittel an Anlagenstandort erforderlich.
3. Das Sicherheitskonzept der bautechnischen Normen DIN EN 1990 bzw. DIN 1055-100 über die Grundlagen der Tragwerksplanung beruht auf charakteristischen Werten der klimatischen Einwirkungen, die eine jährliche Überschreitungsrate von 1/50 aufweisen. Sie werden für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit einem Teilsicherheitsbeiwert vergrößert. Dieser beträgt für die Windlast 1,5. Im Falle hoher Versagensfolgen für Menschen oder Umwelt kann dieses durch eine Erhöhung des Lastbeiwertes auf 1,65 erfasst werden. Alternativ sind besondere Überlegungen erforderlich, in denen auch der charakteristische Widerstand mit einem höheren Teilsicherheitsbeiwert beaufschlagt wird.

Die Windlastangaben der normgemäßen Windzonenkarte gelten für eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren entsprechend einer Überschreitungsrate von 0,02 pro Jahr. Um Tragwerke gegenüber Versagen (Kollaps, Bruch) nachzuweisen, werden die Windlasten noch um den Teilsicherheitsfaktor Faktor 1,5 vergrößert. Um höhere Gefahrenpotentiale abzudecken, wird zweckmäßigerweise eine größere Rückkehrperiode (Jährlichkeit) gewählt. Zu diesem Zweck erfolgt in Tabelle 24 die Umrechnung der zu einer Wiederkehrperiode von 50a korrespondierenden Normwerte auf weitere Jährlichkeiten von 100a, 500a und 1000a. Für die Umrechnung wird dabei der Probabilistikkfaktor c_{prob} gem. Abbildung 58 un-

ter Zugrundelegung eines Formparameters von $k = 0,1$ herangezogen. Die resultierenden mittleren Windgeschwindigkeiten werden im Weiteren auf Werte der Böengeschwindigkeit überführt. Auf sicherer Seite liegend werden dabei ausschließlich Geländeverhältnisse entsprechend der Kategorien I und II betrachtet, die auch für den Großteil der Anlagen bedeutsam sein dürften.

Tabelle 24: Böenwindgeschwindigkeiten v zu Wiederkehrzeiten R von 50, 100, 500 und 1000 Jahren in Abhängigkeit der Windzone und Geländekategorie

Windzone	Geländekategorie	Böengeschwindigkeit v_p in m/s in 10m Höhe über Grund			
		R=50a 1,000 ¹⁾	R=100a 1,050 ¹⁾	R=500a 1,166 ¹⁾	R=1000a 1,216 ¹⁾
1	GK I	36,2	38,0	42,2	44,1
	GK II	32,6	34,2	38,0	39,7
2	GK I	40,2	42,2	46,9	48,9
	GK II	36,2	38,0	42,2	44,1
3	GK I	44,2	46,5	51,7	53,9
	GK II	39,9	41,9	46,5	48,5
4	GK I	48,3	50,7	56,3	58,7
	GK II	43,5	45,7	50,7	52,9

1) Erhöhungsfaktor für die Jährlichkeit

Für die Überprüfung einer Anlage gegenüber der Gefahrenquelle Wind empfehlen wir die in Tabelle 24 zusammengestellten Böenwindgeschwindigkeiten zur Verwendung. Die den Böenwerten zugrunde liegende Zonierung entstammt der Windzonenkarte. Der genaue Verlauf der einzelnen Zonen ist anhand von Verwaltungsgrenzen definiert und wird in tabellarischer Form seitens des Deutschen Instituts für Bautechnik (www.dibt.de) zur Verfügung gestellt. Abbildung 64 gibt am Beispiel des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen die Festlegung der in diesem Fall relevanten Windzonen 1 und 2 wieder.

Abbildung 64: Zuordnung der Windzonen nach Verwaltungsgrenzen

5 Nordrhein-Westfalen			
5.1	Münster		
5.1.1	Kreis Recklinghausen	WZ 1	Städte Bottrop, Gelsenkirchen, Gemeinde Gladbeck
		WZ 2	alle Gemeinden, soweit nicht in WZ 1
5.1.2	Kreise Steinfurt, Borken, Coesfeld, Warendorf, kreisfreie Stadt Münster	WZ 2	alle Gemeinden
5.2	Düsseldorf		
5.2.1	Kreis Mettmann, kreisfreie Städte Oberhausen, Duisburg, Essen, Mülheim, Düsseldorf, Solingen, Wuppertal, Remscheid	WZ 1	alle Gemeinden
5.2.2	Kreise Kleve, Wesel, Viersen, Neuss, kreisfreie Städte Krefeld, Mönchengladbach	WZ 2	alle Gemeinden
5.3	Detmold		
5.3.1	Kreise Herford, Lippe, Paderborn, Höxter, kreisfreie Stadt Bielefeld	WZ 1	alle Gemeinden
5.3.2	Kreis Gütersloh	WZ 1	alle Gemeinden, soweit nicht in WZ 2
		WZ 2	die Gemeinden Versmold, Harsewinkel, Gütersloh, Verl, Rheda-Wiedenbrück, Rietberg, Langenberg
5.3.3	Kreis Minden-Lübbecke	WZ 2	alle Gemeinden
5.4	Arnsberg	WZ 1	alle Gemeinden außer Hamm in WZ 2
5.5	Köln	WZ 1	alle rechtsrhein. Gemeinden sowie die Stadt Köln
		WZ 2	alle Gemeinden, soweit nicht in WZ 1



1.1.3.3 Tornados: Häufigkeit und Lokalität

Ein Tornado ist ein atmosphärischer Wirbel, eine sog. Trombe, die sich von den Zyklonen der mittleren Breiten oder der Tropen durch ihren geringen Durchmesser von einigen 10 Metern unterscheidet. Tornados sind daher weder vom Wetterradar noch von Satelliten zu erfassen. Wettervorhersagemodelle wie sie z.B. beim Deutschen Wetterdienst

(DWD) Verwendung finden arbeiten mit einer Auflösung von zwei bis drei Kilometern. Daher wird eine Methode zur indirekten Erfassung und Erstehung von möglichen Tornados verwendet. Über 17 Wetterradarstandorte, die Deutschland lückenlos abdecken, werden rotierende Gewitterwolken registriert, da sie als Auslöser von Tornados in Frage kommen. Die Aktualität der Radarbilder beträgt dabei fünf Minuten. Zudem sind geschulte und freiwillige Helfer ein nicht unerheblicher Teil des deutschlandweiten Frühwarnsystems.

Im Internet sind die aktuellen bestätigten 27 Tornadofälle einschließlich Wasserhosen jeglicher Kategorie für das Jahr 2011 dargestellt. Mit bisher 147 weiteren Verdachtsfällen ist das Jahr 2011 ein durchschnittliches Jahr.

Sowohl Tornados als auch Wasserhosen folgen dabei einem ausgeprägtem Jahres- und Tagesgang, wie eine Auswertung von Dotzek (2005) auf der Grundlage von 804 registrierten Ereignissen zeigt.

Danach beginnt die Tornadosaison mit einem deutlichen Anstieg der Tornadomeldungen im Mai und hält sich bis September. Ein eindeutiges Maximum ist für den Monat Juli festzustellen. Für November bis Februar liegt ein Minimum vor. Die Verteilung im Jahresgang ist dabei als repräsentativ für Regionen des kontinentalen Mitteleuropas anzusehen. Zusätzlich findet sich eine positive Korrelation zwischen Tornado- und Gewitteraktivität.

Für den Tagesgang verringert sich die Datenmenge auf 332 Fälle, da nur zu diesen Ereignissen die genaue Uhrzeit festgehalten wurde. Eine deutliche Tagesspitze ist dabei in den späten Nachmittagsstunden zwischen 15 und 19 Uhr MEZ (UTC + 1h) abzulesen.

Bei den auftretenden Wasserhosen machen sich physikalische bzw. thermische Effekte in größerem Maße bemerkbar. Der Jahresgang weist ein ausgeprägtes Maximum im Monat August auf. Zu diesem Zeitpunkt sind die Wassertemperaturen der Nord-, Ostsee und des Mittelmeeres am höchsten. Bei genauerer Betrachtung liegt zu diesem Zeitpunkt, dem Hoch- bzw. Spätsommer, die größte Instabilität der Grenzschicht über großen Wasserflächen bei hohen Temperaturen und gleichzeitig geringer Lufttemperatur vor. Dieser Trend wird zudem von der Land-Seewindzirkulation gestützt.

Dotzek (2003) und Feuerstein (2005) haben die Auftretenshäufigkeit der zur F- bzw. T-Skala eingestuften Tornados untersucht und eine theoretische Weibullverteilung ermittelt, Abbildung 65. Es werden zwei Ansätze verfolgt, für Tornados ab der Intensitätsstufe F0 bzw. einschließlich der eher theoretischen F1 und F2 Werte. Ein Ziel dieser Arbeiten ist es, zu einer besseren Unterscheidung schwacher Tornados und einfacher Gewitter zu kommen. Ergebnis ist aber auch, dass die mit der theoretischen Weibullverteilung hochzurechnenden starken Tornados von den Schwächeren in der statistischen Bewertung kaum beeinflusst werden.

Abbildung 65: Tornado-Intensitätsverteilung

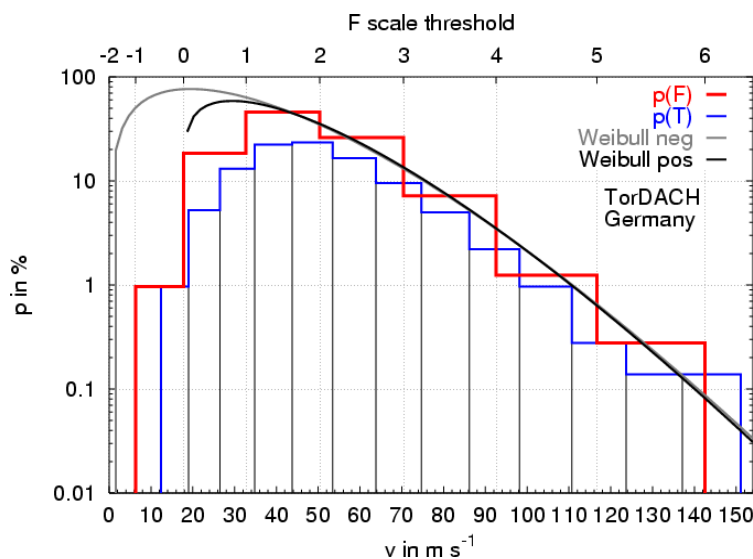
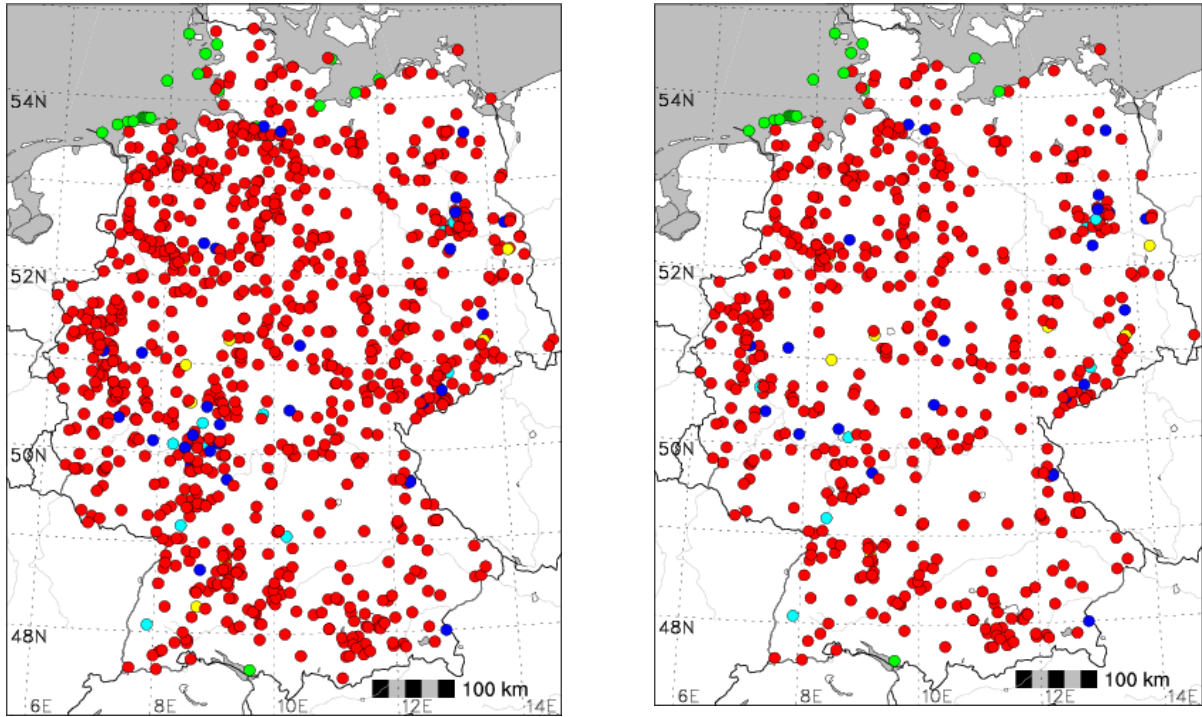


Abbildung 66 zeigt die für Deutschland aufgezeichneten Tornadomeldungen einschließlich der historischen Nachweise ab 855 bis 2005. Die Datengrundlage umfasst insgesamt 1027 mögliche Tornadoaktivitäten. Nicht für alle ist dabei eine Klassifizierung möglich.

Abbildung 66: Tornadomeldungen in den Jahren 855 – 2005



855 bis 2005: 1027 Meldungen

1950 bis 2005 592 Meldungen

Legende: rot = Tornado, grün = aufs Land ziehende Wasserhose, blau = Tornado/Downburst, hellblau = Tornado/Kleintrombe, gelb = Tornado/Böenfrontwirbel

Betrachtet man den Zeitraum seit 1950, ab dem mit einer flächendeckenden Erfassung von Tornadodaten begonnen wurde, ist die Anzahl von beobachteten Tornados deutlich angestiegen. Tornadomeldungen zeigen dabei eine starke Korrelation mit der Bevölkerungsdichte. Dies legt nahe, dass selbst heute noch Ereignisse in den schwächer besiedelten Gebieten nicht gemeldet werden. Ebenfalls fehlen offenbar auch viele Fälle aus Ostdeutschland aus der Zeit von 1940 bis 1990. Darüber hinaus dürften anwachsende Bevölkerungs- und Besiedlungsdichte sowie die Zunahme von in der Sturmbeobachtung geschulten Personen zu einer vollständigeren Erfassung der auftretenden Tornadoereignisse beitragen. Auch finden sich Hinweise darauf, dass in Folge des sich abzeichnenden Klimawandels Tornados in Deutschland vermehrt auftreten. Die bekanntesten Tornados des späten 20. Jahrhunderts sind in Tabelle 25 aufgelistet.

Tabelle 25: Extreme Tornados in Deutschland

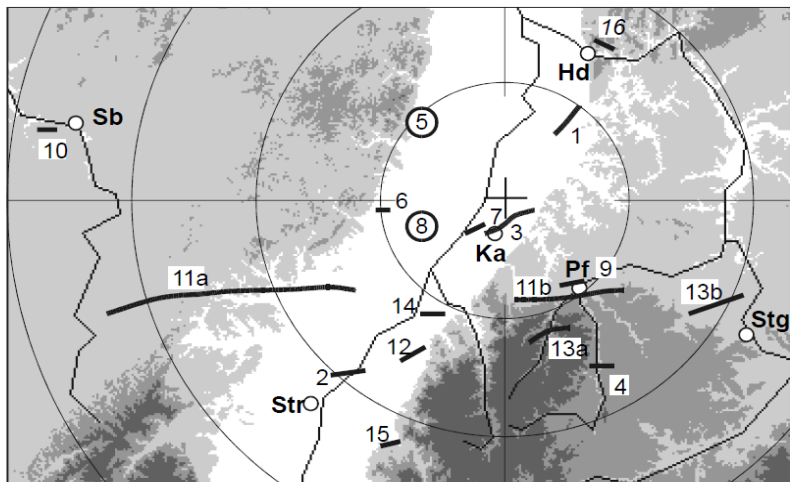
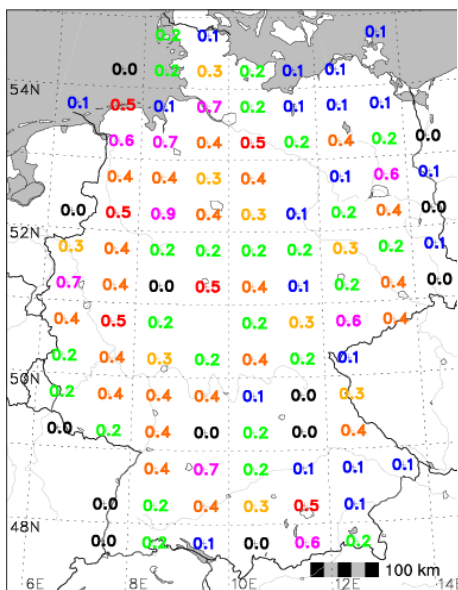
Datum	Intensität	betroffene Region
05.07.1890	F3	Oldenburg, NI
01.07.1891	F4	Süchteln bis Anrath, NW
14.07.1894	F3/F4	Forstinning bis Forstern, BY
01.07.1895	F2	Nagoldtal bei Calw, BW
01.06.1927	F4	Lingen, NI
17.06.1931	F3	Plettenberg, NW

Datum	Intensität	betroffene Region
10.01.1936	F4	Düsseldorf, NW
11.07.1951	F2	Bremen, HB
04.05.1952	2xF3	Göttingen, NI
16.09.1964	2xF3	Nienburg, NI
10.07.1968	F3	Pforzheim, BW
02.07.1980	F2	Bonn, NW
23.06.2004	F3	Micheln, ST
18.07.2004	F2	Duisburg, NW
29.07.2005	F2/F3	Hammerunterwiesenthal, SN
02.10.2006	F3	Quirla, TH
18.01.2007	F3	Wittenberg, ST
18.01.2007	F3	Brachwitz, Chemnitz, BB
18.01.2007	F3	Lauchhammer, BB
24.05.2010	F2/F3	Großenhain, SN

Aus den Tornadosichtungen der Jahre 1950 bis 2005 (622 Ereignisse) hat man für Deutschland eine Rasterkarte der Beobachtungshäufigkeiten angefertigt, s. Abbildung 67. Die Rastergröße beträgt in N-S-Richtung 0,5 Breitengrade = 55,55 km und in O-W-Richtung 1 Längengrad entsprechend im Mittel 70 km. Die Angabe der Häufigkeit von Tornadobeobachtungen (unabhängig von der Tornadostärke) erfolgt in Anzahl pro Jahr und 10.000 km². Abgesehen von den bereits erwähnten Beobachtungsmängeln lassen sich hinsichtlich der Tornado-Aktivität drei klimatologisch unterschiedliche Gebiete ausmachen, Abbildung 67a. Hierzu zählen die Küstenregion mit der gesamten norddeutschen Tiefebene, die süddeutschen Mittelgebirgszonen und das Gebiet des Oberrheingrabens im Südwesten.

Abbildung 67b detailliert die Auftretensorte der Tornados im mittleren Oberrheingraben von Straßburg bis Heidelberg. Ihre relativ dichte Anordnung ist nur beispielhaft und sollte nicht dazu verleiten, diese Region in Anlehnung an die amerikanische Bezeichnungsweise als „Tornado-Allee“ auszuweisen.

Abbildung 67: Auftreten von Tornados in Deutschland



Regionale Verteilung der Meldungen errechnet aus 622 Meldungen in 55 Jahren; in Meldungen pro 10.000 km² und Jahr

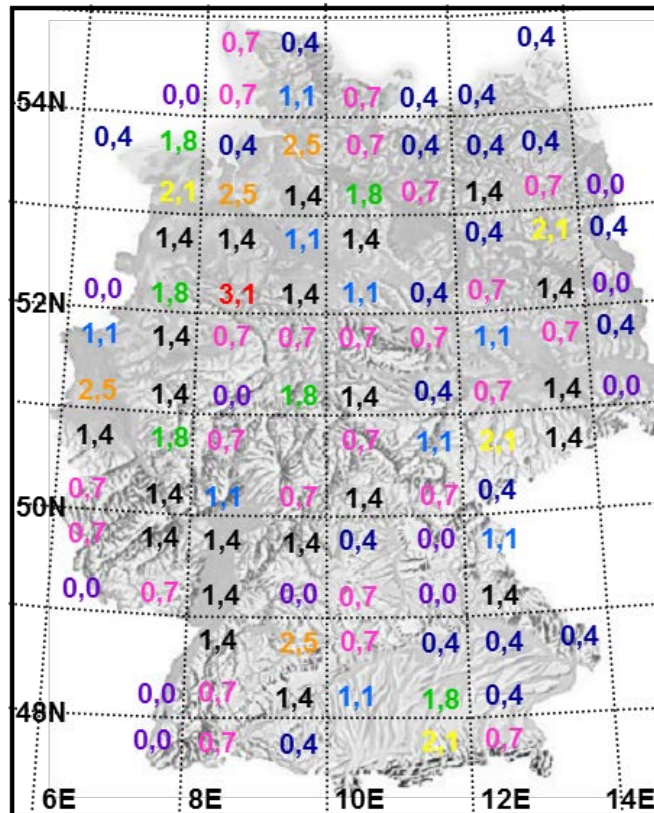
Tornadozugbahnen am mittleren Oberrhein

© www.tordach.org
(abgerufen am 11.11.2011)

© Dotzek, 2011

Tornados geringer Stärke sind durch die Gefahrenquelle Wintersturm abgedeckt. Die Grenze wird beim jetzigen Erkenntnisstand bei der Stärke FI gesehen. Zur Gefahrenbewertung und Gefahrenabwehr ist eine Angabe über die lokale Überschreitungsanzahl der Grenze zur Intensität F2 geeignet.

Abbildung 68: Überschreitung der Tornadointensität F1 in Anzahl pro Jahr und km² (Kartenwert · 10⁻⁵):



Eine Auswertung der Beobachtungen ergibt, dass im Mittel 35% der Tornados in Deutschland größer als F1 ist. Bei allen Vorbehalten gegenüber der Datenlage insbesondere was Dichte der Beobachtungen und Zuverlässigkeit der Bewertungen angeht, wird aus Abbildung 67 eine Karte abgeleitet, die sektorweise die Anzahl derjenigen Fälle erfasst, in denen Tornados einer Stärke > F1 aufgetreten sind, s. Abbildung 68. Sie gibt den Stand der Erkenntnisse wieder. Dargestellt ist die Anzahl der Überschreitungen pro Jahr auf einer Bezugsfläche von 1 km². Da Tornados lokal begrenzt auftreten, ist die gewählte Bezugsfläche geeignet, das Risiko für einen bestimmten Standort zu beurteilen. Das Maximum tritt in einem Rasterfeld nördlich des Wiehengebirges im Osnabrücker Land auf. Dort lagen im Zeitraum von 1950 bis 2005 7 Meldungen von Tornados vor, deren Stärke mit größer als F1 angegeben wurde. Dafür ergibt die Umrechnung auf 1 Jahr und 1 km²: $7 / \{55 \cdot (55,55 - 70)\} = 3,3 \cdot 10^{-5}$ Tornados(>F1) pro Jahr und km² entsprechend einer Wiederkehrperiode von 30.550 Jahren.

Im Zuge der Herleitung der Tornadogeschwindigkeiten waren einige Vereinfachungen nicht zu vermeiden. Das betrifft insbesondere die Zuordnung des Intensitätsmaßes zur maximalen Geschwindigkeit. Diese ist in hohem Grade spekulativ. Das betrifft auch den statistischen Zusammenhang von Tornadohäufigkeit und –stärke. Hier unterstellt man, dass die aus der Gesamtheit aller Tornados entwickelte Wahrscheinlichkeitsverteilung uneingeschränkt für das Gesamtgebiet Deutschlands Gültigkeit besitzt. Tatsächlich muss jedoch von regionalen Abhängigkeiten ausgegangen werden, die nur durch spezifische Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die einzelnen Regionen zutreffend abgebildet werden können. Grundvoraussetzung hierfür ist eine breitere Datenbasis von Tornadobeobachtungen. Von großer Bedeutung dürfte daher der Aufbau eines Tornado-Frühwarnsystems seitens des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sein, das auf der Grundlage einer an 16 Standorten eingesetzten Radartechnologie eine flächendeckende Erfassung von Tornadoereignissen in Deutschland ermöglicht. Schließlich muss über die reine statistische Datenerfassung auch gefragt werden, inwieweit Tornados durch landschaftliche Strukturen und Bewuchs zu beeinflussen sind.

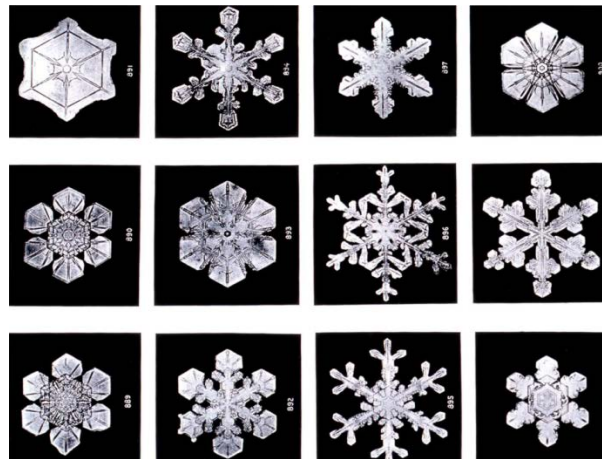
1.2 Schneelasten als umgebungsbedingte Gefahrenquelle

1.2.1 Qualitative Analyse

1.2.1.1 Beschreibung der Niederschlagsform Schnee

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. Ausbildung, Form und Struktur dieser Schneeflocken sind von kaum beschreibbarer Vielfalt und hängen von den Temperaturen beim Schneefall, der Luftfeuchtigkeit, dem Luftdruck und weiteren Faktoren ab. Einen kleinen Überblick über die Formen und Ausbildungen des Schnees vermitteln Zusammenstellungen wie beispielsweise <http://de.wikipedia.org/wiki/Schnee>. Abbildung 69 entstammt dieser Quelle: Der amerikanische Autodidakt Wilson A. Bentley hat vor über 100 Jahren über 5.000 verschiedene Schneeflocken unter dem Mikroskop fotografiert, um ihre Kristallvielfalt zu dokumentieren.

Abbildung 69: Fotos von Schneeflocken nach W. A. Bentley, USA



© Wikipedia

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 Dichte 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.

Bei nicht geräumten Vordächern kann deutlich diese Schichtenbildung durch wechselnde Wetterbedingungen während einer Folge von Schneefällen beobachtet werden. Man erkennt dann, dass die Niederschlagsform Schnee infolge vielfältiger temperaturbedingter Kompressionsvorgänge nicht einfach nur durch eine allgemeine Lastangabe abgebildet werden kann. 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 26 gibt als erste Einschätzung die Größenordnung der unterschiedlichen Schneemassen (Schneelasten) – je nach Einstufung – wieder:

Tabelle 26: Dichte von Schnee in kg/m^3

Masse	Bezeichnung Schneeart
30...50 kg/m^3	trockener, lockerer Neuschnee
50...100 kg/m^3	gebundener Neuschnee
100...200 kg/m^3	stark gebundener Neuschnee
200...400 kg/m^3	trockener Altschnee
300...500 kg/m^3	feuchtnasser Altschnee
150...300 kg/m^3	Schwimmschnee
500...800 kg/m^3	mehrfähriger Firn
800...900 kg/m^3	Eis

Ohne eine genaue Untersuchung des Schichtenaufbaus lassen sich somit keine gesicherten Angaben über die Größenordnung einer Schneelast treffen. Einen Eindruck dieser Schwierigkeiten gewinnt man aus den regelmäßig in den Medien auftauchenden Reportagen der Arbeiten alpiner Lawinenkommissionen, bei deren Gefährdungsbeurteilungen es immer um Gewichtsbestimmungen von geschichtetem Schnee geht.

1.2.1.2 Beschreibung des Phänomens der witterungsbedingten Eisbildung

Anders als der Schneefall kann eine Eisbildung unterschiedliche auslösende Ursachen haben. Im Folgenden wird ausschließlich die Eisbildung infolge Niederschlags betrachtet werden. 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 Leitungen kommen. Fast in jedem Winter berichten die Medien von Schäden oder (Teil)Einstürzen an baulichen Anlagen 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 Anlagenteil. 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 Anlagenteilen. 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 Anlagenteils Eiskörper bilden und dort zu lokalen Belastungen führt.

Im Allgemeinen ist die Einwirkung aus Eisbildung auf die Struktursicherheit nicht maßgebend. Allerdings kann in einigen besonderen Situationen auch dieser Lastfall ein maßgebender werden. Leider ist der Kenntnisstand über die zu erwartenden Vereisungsstärken in der Bundesrepublik Deutschland sehr gering (Nölle, Peil 1990). Dennoch soll diese Gefahrenquelle hier ebenfalls mit betrachtet werden.

1.2.1.3 Lasterhöhende und –mindernde Einflüsse von Baukörperform und -anordnung

Die Größe der Schneebelastung eines Baukörpers wird in erster Linie vom Standort des Tragwerks bestimmt. Daneben spielt die geometrischen Form der Anlage oder Anlagenteile, auf die der Schnee einwirkt eine erhebliche Rolle, sowie

ihre gegenseitige Anordnung. Diese Abhängigkeit entsteht vornehmlich durch die Wechselwirkung von Schneefall und Wind, wie jeder Leser aus den winterlichen Verwehungen in den Schneefallgebieten Deutschlands weiß: Gerade Wind kann gefallenen Schnee in großem Maße versetzen, woraus sich schnell Betriebsgefährdungen entwickeln können.

Die gängigen Normen des Bauwesens berücksichtigen dies mit Hilfe von Formbeiwerten. Diese dienen als Hilfsmittel, um die Schneelast bei geneigten Dachformen 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 Anlagen, Anlagenteile und Einhausungen eines Betriebsbereiches kommen kann. Daher ist die Gefahrenquelle Schneelast in komplexen Produktionsanlagen für einzelne Anlagenkomponenten und –teile stets separat zu untersuchen.

1.2.1.4 Auswirkungen durch die Gefahrenquellen Schnee und Eis

Ebenso wie für Wind sind auch für Schneeeinwirkungen viele Beispiele für katastrophales Tragwerksverhalten dokumentiert. Einige der kürzlich erfolgten Voll- oder Teileinstürze von Dachkonstruktionen sollen im Folgenden beispielhaft skizziert werden.

Am Sonntag, dem 12.12.2010, traf ein schwerer Schneesturm (Blizzard) den Nordosten und die Mitte der USA. In der Region um Minneapolis im nördlichen Mississippital fielen binnen kurzer Zeit bis zu 60cm Schnee, verbunden mit erheblichen Windgeschwindigkeiten. Diesen Einwirkungen hielt das Dach des Hubert H. Humphrey Metrodomes in Minneapolis, einer Sportarena für bis zu 64.111 Zuschauer, nicht stand und stürzte ein. Menschen waren zum Zeitpunkt des Unglücks nicht in der Sporthalle.

Die Dachkonstruktion der Halle war ein Tragluftdach aus Stahlseilen und dazwischen gespannten Folienpanelen aus glasfaserverstärktem Teflon, das durch einen leichten inneren Luftüberdruck getragen wurde. Nachdem mehrere Kunststoffpanelen durch die Schneelast gerissen waren, bestand die Gefahr der Folgeschädigung der Stahlkabel. Daher wurden weitere Paneelen absichtlich herausgenommen, um das Dach weiter zu entlasten und so die Stahlkabel vor Schäden zu bewahren.

Der Winter 2005/2006 war in Süddeutschland, Polen, Tschechien und Österreich ungewöhnlich schneereich, ihm fielen nach Kenntnis der Autoren mindestens 22 Hallendächer zum Opfer. Nachdem bereits am 02.01.2006 die 30 Jahre alte Eissporthalle in Bad Reichenhall bei nur mittlerer Schneelast einstürzte und 15 Menschen mit in den Tod riss, kumulierte Mitte Februar die Schneesituation. Allein in der zweiten Februarwoche brachen in Bayern 13 Dächer durch Schneeüberlastung ein.

Zu diesen Einstürzen gehörte auch das Flachdach des Netto-Marktes in Töging. Die vom Betrachter aus rechte Dachseite ist bis zur Hallenmitte eingestürzt und liegt auf den Verkaufsregalen auf. Das Dach wird von zwischengestützten Holzleimbändern getragen. Im Vergleich zu dem (fast schneefreien) Dach des Gebäudes am rechten Bildrand erkennt man den negativen Effekt der hohen Attika bei der Ansammlung von Schnee (Schneesackbildung).

Besonders deutlich wird dieser Aspekt auf bei einem aufgetretenen Teileinsturz eines Hallendachs in Tirol/Österreich. Hinter der über einen Meter hohen Attika hatte sich ein Schneesack als Einsturzauslöser gebildet, während das restliche Dach nur nichtnennenswerte Schneehöhen aufwies. Dieser Schneesack verursachte vermutlich primär den dargestellten, interessanterweise sehr lokal begrenzten Teileinsturz.

Auf der zugehörigen Fotodokumentation kann man an den Kühlaggregaten im Vordergrund das Entstehen von Schnee-Verwehungen auf großen Flachdächern erahnen. Üblicherweise bilden Schnee-Verwehungen in Deutschland eher lokale Lasteinwirkungen, deren hohe lokale Lastintensitäten sich im Allgemeinen ausgleichend auf mehrere lastabtragende Bauglieder spannungsmindernd verteilen.

Bei der Behandlung von Schneelasten auf komplizierten Baukörpern sind noch weitere Aspekte zu beachten, von denen hier nur abstürzende Schneemassen und Eiskörper auf niedrigere Anlagenteile genannt werden sollen, ähnlich den bekannten Wirkungen von Dachlawinen auf tiefer gelegene Dächer oder geparkte Fahrzeuge.

Besonders in Nord- und Westdeutschland führt nasser Schnee mit Eisbildung immer wieder zu Schäden an Baukonstruktionen. Ein Beispiel ist das Münsterländer Schneechaos in der ersten Adventswoche 2005. Am 24.11.2005 lag ein

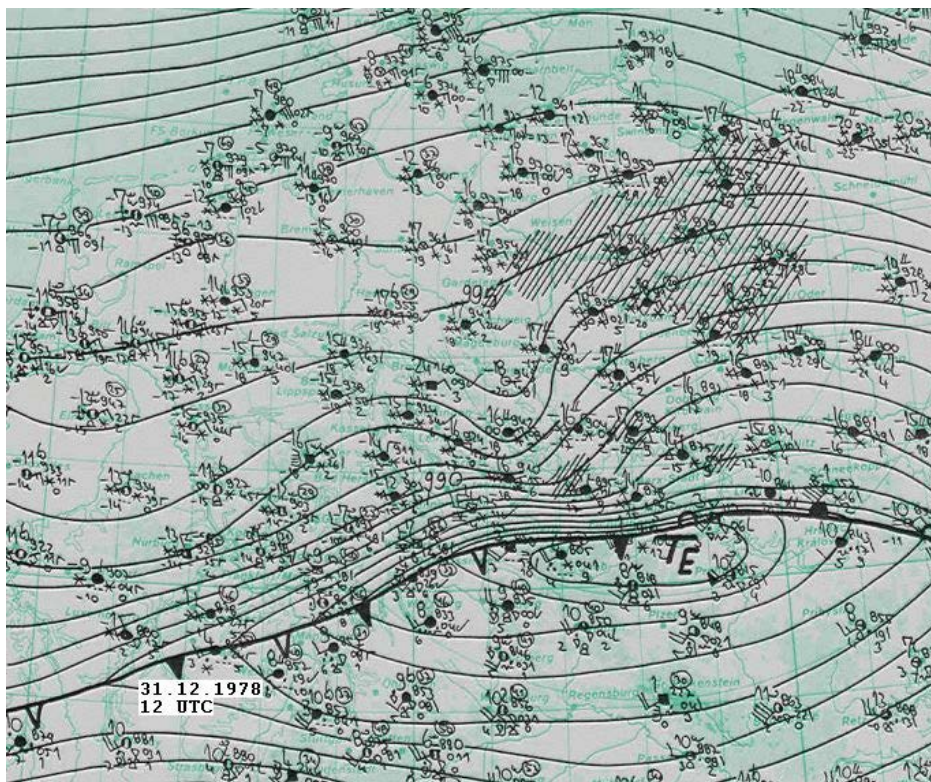
Hoch mit nasskalter Luft über Norddeutschland, während ein skandinavisches Tief kalte und sehr nasse Meeresluft in diese Region steuerte. Dadurch begann es am 25.11.2005 stark zu schneien. Bis zum Abend fielen teilweise 50cm Schnee. Am Nachmittag wurden die Flughäfen Düsseldorf für 5 Stunden, Münster/Osnabrück für 24 Stunden gesperrt.

Der gefallene Schnee war extrem feucht und haftete somit gut. Unter anderem lagerte er sich auf den Hochspannungsleitungen ab und bildeten an den Kabeln schließlich Eiswalzen mit Durchmessern bis zu 12 cm. Durch ihr Vermögen, Lasterhöhungen mittels größeren Durchbiegungen zu begegnen, verhalten sich Seiltragwerke bekanntlich relativ überlastungsresistent. Dieses günstige Überlastverhalten endet, wenn schließlich das sich über viele Kilometer erstreckende Hochspannungskabel an einem überbeanspruchten Leitungspunkt reißt. Der Nassschneefall zerstörte so reihenweise Hochspannungsmaste. 250.000 Menschen in 25 Gemeinden waren von dem folgenden Stromausfall teilweise bis zu 5 Tage betroffen. Die Gesamt-Schadenssumme wird auf über 100 Mio € beziffert.

Ein noch schwerwiegenderes Ereignis war die sog. Schneekatastrophe vom Jahreswechsel 1978/79 in Norddeutschland. Über die Nachweihnachtszeit herrschte in Deutschland windiges, aber sehr mildes Winterwetter mit relativ milder südeuropäischer Luft über Deutschland. Ab dem 28. Dezember näherte sich eine Kaltfront mit extrem niedrigen Temperaturen aus Norden und es begann an der Luftmassengrenze zu schneien. Binnen Stunden sanken die Temperaturen von 10°C auf bis zu -15°C mit starken Niederschlägen bis zu 60 cm Schnee. Die Luftmassengrenze kam über Norddeutschland hinaus nur sehr langsam voran, so dass der Schwerpunkt der Schneefälle in Schleswig-Holstein und Mecklenburg lag. Die Wetterkarte auf Abbildung 70 skizziert diese Situation.

Als am 31. Dezember noch ein kleines, aber intensives Sturmtief sich entlang der Kaltfrontgrenze bewegte, brach praktisch das gesamte öffentliche Leben in Norddeutschland zusammen. Der Straßen- und Schienenverkehr kam flächendeckend unter bis zu 4 m hohen Schneewehen zum Erliegen, die Stromversorgung fiel teilweise aus, und viele Ortschaften in Norddeutschland waren völlig von der Außenwelt abgeschnitten. Dazu drückte der anhaltende Nordoststurm große Wassermassen mit Eisschollen an die deutsche Ostseeküste, wo sich in den Häfen bei -25°C teilweise undurchdringliche Eispanzer auf türmten.

Abbildung 70: Bodenwetterkarte Deutschlands am 31.12.1978 um 12:00 Uhr



Noch im Frühjahr nach der Schneeschmelze wurden Erfrorene in den Schneewehen gefunden. Der finanzielle Schaden dieser Katastrophe belief sich allein in Schleswig-Holstein auf 140 Mio. DM. Insgesamt übertraf er die Summe von 250 Mio. DM.

Auch wenn derartige Katastrophenwinter nur alle 20 bis 30 Jahre in Deutschland auftreten, werden doch alljährlich Menschen und bauliche Anlagen Opfer von Schnee- und Eislasten. Ein zufälliger Blick in die Liste der dpa-Meldungen belegt dies eindrucksvoll:

- 09.12.2010, 12:50 Uhr: Unter der Last von nassem Schnee ist das Dach einer Lagerhalle der Kulmbacher Brauerei in Kulmbach eingebrochen. Es entstand ein Sachschaden von 120 000 €, verletzt wurde niemand.
- 18.12.2010, 19:59 Uhr: Ein schneebedecktes Vordach eines Supermarktes in Haag im Landkreis Mühl-dorf/Inn ist eingestürzt. Verletzt wurde glücklicherweise niemand.
- 20.12.2010, 14:44 Uhr: Ein Scheunendach in der belgischen Gemeinde Bertrix ist unter Schneemassen zu-sammen gebrochen. Ein Familienvater starb, sein Bruder konnte schwer verletzt ge-rettet werden.
- 28.12.2010, 17:57 Uhr: Ein Hallendach der Gedenkstätte „Point Alpha“ mit Kriegsgerät aus dem 2. Welt-krieg ist unter Schneemassen eingebrochen.
- 03.01.2011, 08:08 Uhr: Unter der Last von Eis und Schnee ist im süd-thüringischen Rippertshausen das Dach eines Schweinestalls eingestürzt und hat 300 Tiere verschüttet. Drei Schweine starben bei dem Einsturz, die übrigen Tiere konnten geborgen und in anderen Ställen untergebracht werden.

Aus diesem kurzen, qualitativen Überblick wird die generelle Größe der Gefahrenquelle Schnee für Anlagen in Deutsch-land ersichtlich. Da es sich bei Einstürzen infolge Schnee-Überlastung meist um Einzelfälle handelt, graben sich diese nicht in das Bewusstsein der Menschen ein, auch nicht in das der Fachleute.

1.2.1.5 Ergebnisse

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Gefahrenquellen Schnee und Eisbildung beschrieben. Die nachfolgende Tabelle 27 gibt die einzelnen Gefahrenquellen, welche sich aus der Niederschlagsform Schnee und Eis bilden, wieder.

Tabelle 27: Gefahrenquellen infolge Eis- und Schneebildung

Phänomen	Erscheinungsort	Bestimmung der Belastungshöhe	Maßnahme bei Lastüberschrei-tung
Schneelast	Dachformen mit Winkel kleiner 60°	Wasseräquivalent	Räumen
Schneesack-bildung	In Tälern und Versprün-gen von Dächern	Wasseräquivalent	Räumen
Schnee-ver-wehung	Ansammlung an Versprün-gen von Anlagen, Einhausungen und Dach-formen	Wasseräquivalent	Räumen
Eisbildung	An Anlagenteilen in exponierten Lagen	Dickenmessung	Abschlagen / Entei-sen

1.2.2 Quantitative Analyse

1.2.2.1 Ein Schneelastmaßstab für den praktischen Gebrauch

Bevor wir uns den verschiedenen normativen Regelungen der Schneelasten zuwenden, wollen wir noch einen Blick auf die Tabelle 26 der Massendichten von Schnee werfen, insbesondere im Hinblick auf ihre praktische Umsetzung. Es ist

nämlich immer wieder zu beobachten, dass diejenigen Eigentümerbeauftragten, die für Sicherheitseinschätzungen von Anlagen und Anlagenteile auch unter Schneeeinwirkungen verantwortlich sind, das Verhältnis von Schneehöhen zu Schneelasten falsch einschätzen. Dachräumungen werden entweder erheblich zu früh, gelegentlich aber auch zu spät veranlasst.

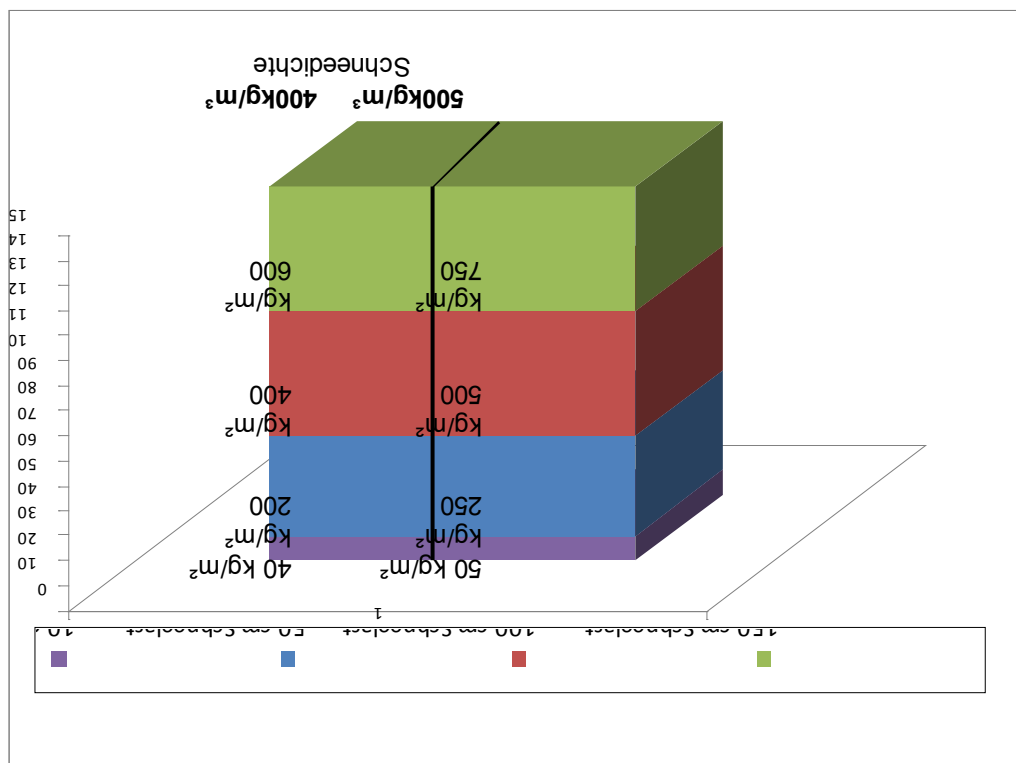
Der in Deutschland am häufigsten auftretende Schnee ist gebundener Neuschnee bis feuchtnasser Altschnee. Für dessen Massendichte stellt eine Größe von 400 kg/m^3 einen anschaulichen Mittelwert seiner Massendichte dar. Ohne tiefere Detailkenntnisse wird deutlich, dass Schneehöhen von knapp unter 20 cm auf einer ebenen Fläche bereits die Lastgrenze (75 kg/m^2) einer üblichen baulichen Anlage in einem mittleren Standort in Deutschland darstellen.

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 71 zeigt anschaulich 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. Bei sehr ungünstigen Verhältnissen kann bereits bei einer Schneehöhe 15cm die Last von 75 kg/m^2 erreicht werden.

Abbildung 71: Verdeutlichung der Höhe der Schneelast in Abhängigkeit von der Schneedichte



1.2.3 Aktuelle DIN EN-Norm und letzter Stand der DIN-Norm

1.2.3.1 07/2005: DIN 1055-5 – Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 5: Schnee- und Eislast

Im Zuge der Modernisierung der Baunormen in Deutschland und im Hinblick auf die europäische Harmonisierung wurde die Einwirkungsnorm DIN 1055 vollständig überarbeitet. Wie es im Vorwort zur Norm heißt, wurde eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren zugrunde gelegt. Die Schneekarte wurde konsequent auf den Bodenschnee kalibriert, und

neue Regelungen für Schneesackbildungen wurden aufgenommen. Die Schneelastzonenkarte (DIN 1055-5, Kapitel 4) wurde unter Berücksichtigung aktueller Messdaten überarbeitet, und es wurden detaillierte Regelungen für Eislasten (DIN 1055-5, Kapitel 6) aufgenommen.

Die neue Schneelastzonenkarte gemäß Abbildung 73 enthält nunmehr die Schneelastzonen 1, 1a, 2, 2a und 3. Die charakteristischen Lastwerte s_k in den Zonen 1a und 2a ergeben sich jeweils durch Anhebung der Zonenwerte 1 und 2 um den Faktor 1,25. Somit kann die Ermittlung der Schneelast s_k nunmehr über Formeln in Abhängigkeit der Geländehöhe A erfolgen:

Zone 1: $s_k = 0,19 + 0,91 ((A+140)/760)^2$

Zone 1a: $s_k = 1,25 s_k (\text{Zone 1})$

Zone 2: $s_k = 0,25 + 1,91 ((A+140)/760)^2$

Zone 2a: $s_k = 1,25 s_k (\text{Zone 2})$

Zone 3: $s_k = 0,31 + 2,91 ((A+140)/760)^2$

Für den Höhenparameter $A = 0$ entstehen aus den angegebenen Formeln in den einzelnen Schneelastzonen Werte unterhalb sogenannter Sockelbeträge, die als Mindestschneelasten eingehalten werden müssen, siehe Tabelle 28:

Tabelle 28: Sockelbeträge der Schneelast in der Bundesrepublik Deutschland nach DIN 1055-5

Schneezone	Sockelbetrag [kN/m ²]
Zone 1	0,65
Zone 1a	0,8125
Zone 2	0,85
Zone 2a	1,0625
Zone 3	1,10

Im Gegensatz zu der tabellarischen Angabe der Schneelasten in den Ausgaben 1975 und 1994 der DIN 1055-5 findet sich in der derzeit gültigen Norm eine grafische Darstellung der Bodenschneelasten gemäß den angegebenen Formeln. Diese Darstellung ist in Abbildung 72 wiedergegeben.

Abbildung 72: Charakteristische Bodenwerte der Schneelast s_k nach DIN 1055-5:2005-07

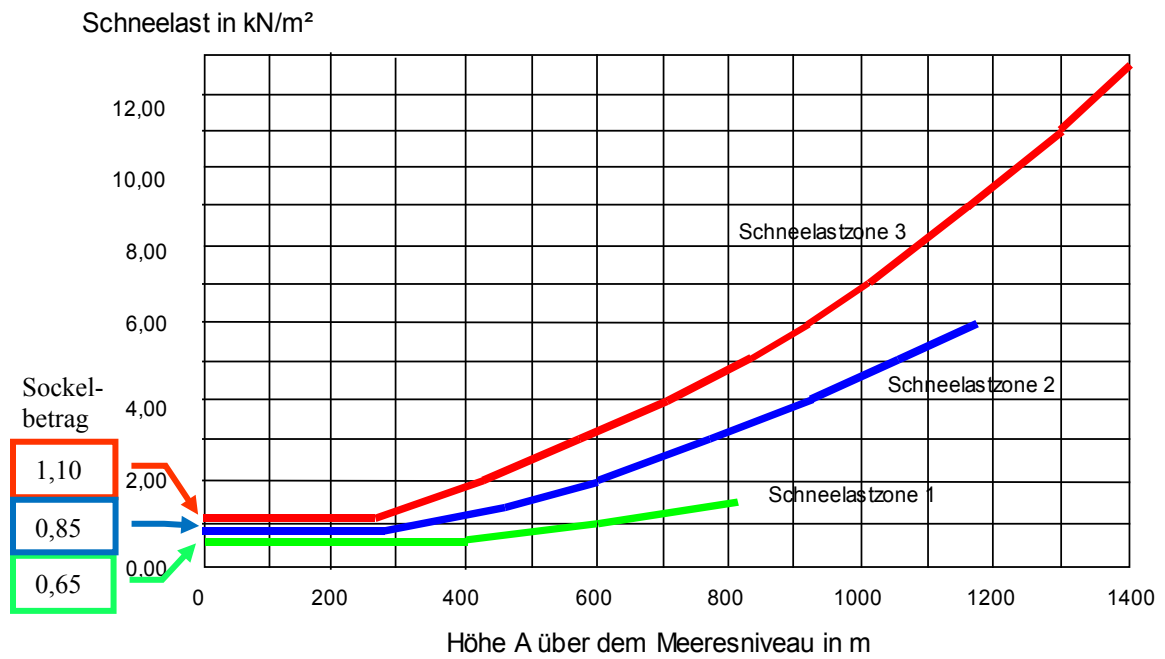
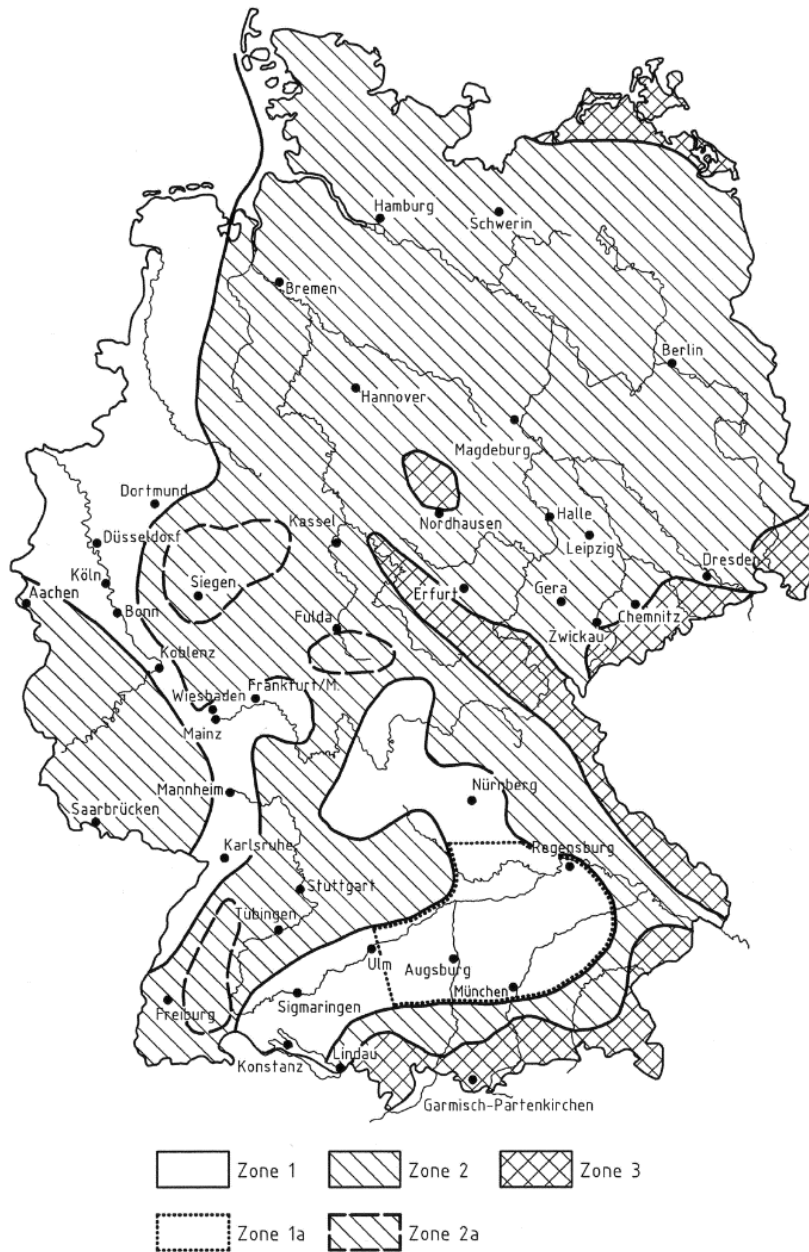


Abbildung 73: Schneelastzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2005



© DIN DIN e.V.

Erstmalig enthält die Norm im Kapitel 4.2 – analog zur Windlastnorm – in Sicherheitsnachweisen zu berücksichtigende Schneelastbilder für häufige Dachformen. In den angegebenen Schneelastverteilungen sind sowohl Entlastungen steiler Dachteile als auch Lasterhöhungen infolge von Schneesackbildungen mittels definierter Formbeiwerte μ berücksichtigt. Auch finden sich Schneelastbilder für Höhensprünge auf Dächern sowie solche für Verwehungen an Aufbauten. Es wird zusätzlich auf weitere mögliche lasterhöhende Aspekte hingewiesen, wie beispielsweise Verstopfung von Dachentwässerungssystemen.

Die wichtige Frage der Gleichzeitigkeit von Schnee-, Eis- und Windlasten findet sich nunmehr nicht mehr in den beiden Lastnormen, sondern ist durch die Kombinationsregeln für Einwirkungen in der DIN EN 1990:2010-12 und DIN 1055-100:2001-03 festgeschrieben.

1.2.3.2 12/2010: DIN EN 1991-1-3 – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten

Mit der europaweiten Einführung der Eurocodes im Jahre 2012 wurde es notwendig, ebenfalls die Einwirkungsnormen neu aufzulegen. Im Wesentlichen bleiben aufgrund der länderspezifischen Regelungen in den nationalen Anhängen die Regelungen für die Bundesrepublik Deutschland gegenüber der DIN 1055-5 aus dem Jahre 2005 unverändert gültig.

Dennoch erscheint es notwendig, hier einen kritischen Blick in die Regelungen der DIN EN 1991-1-3 zu werfen. Die Schneelast hierin berechnet sich für die für die Bundesrepublik maßgebenden Klimaregionen wie folgt:

$$\text{Alpine Region: } s_k = (0,642 Z + 0,009) (1 + (A / 728))^2$$

$$\text{Zentral Ost: } s_k = (0,264 Z - 0,002) (1 + (A / 256))^2$$

mit: s_k – Charakteristische Schneelast auf dem Boden [kN/m²]

Z – Nummer der Zone gemäß zugehöriger Karte der Abbildung 75, Abbildung 76

A – Geländehöhe über dem Meeresspiegel [m]

Abbildung 74: Europäische Klimaregionen nach DIN EN 1991-1-3: 2012-12

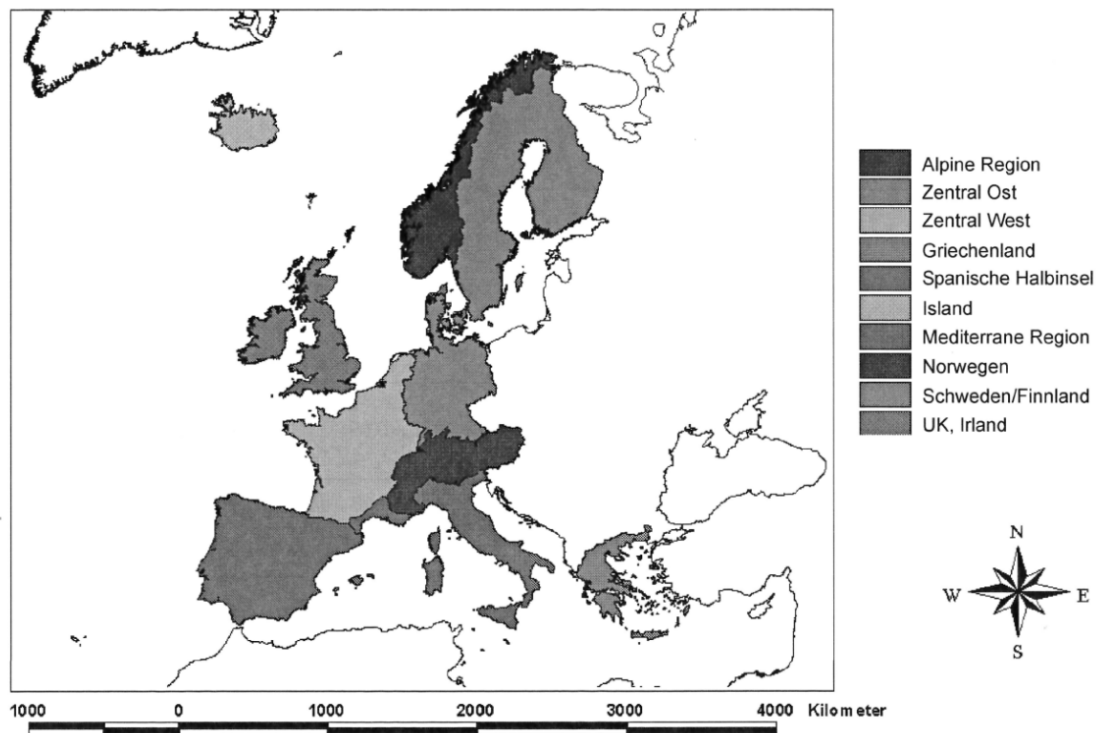


Bild C.1 — Europäische Klimaregionen

Die mit Hilfe der auf der vorletzten Seite angegebenen Formeln ermittelte charakteristische Schneelast s_k spiegelt, ebenso wie in DIN 1055-5, die Schneebelastung am Boden in Abhängigkeit von der Höhenlage A wieder. Zur Schneelastermittlung nach DIN EN 1991-1-3 ist Europa in die Regionen nach Abbildung 74 unterteilt. Jede einzelne Region enthält eine Reihe von Schneelastzonen Z, wie dies aus Abbildung 75 und Abbildung 76 zu ersehen ist.

Abbildung 75: Schneelastzonenkarte von Europa, Alpine Region 2010

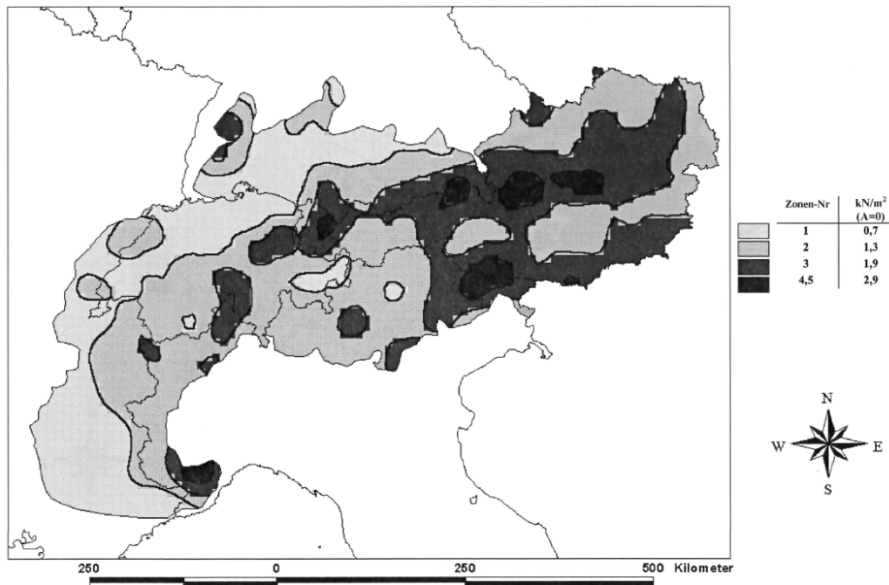


Bild C.2 — Alpine Region: Schneelast auf Höhe des Meeresspiegels

© DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Abbildung 76: Schneelastzonenkarte von Europa, Region Zentral Ost 2010

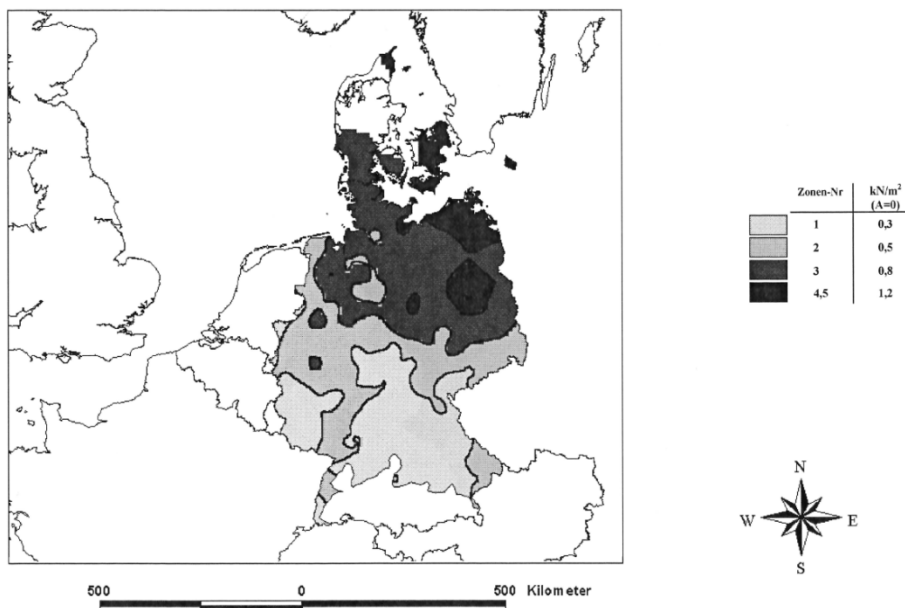


Bild C.3 — Zentral Ost: Schneelast auf Höhe des Meeresspiegels

© DIN DIN e.V.

Vergleicht man nun die ermittelten Schneelasten s_k der DIN 1055-5 mit denjenigen der DIN EN 1991-1-3 für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, so stellt man mit Erstaunen fest, dass beide sehr unterschiedlich ausfallen, obwohl sie beide auf statistischen Auswertungen von Aufzeichnungen des DWD beruhen sollen: Die Eurocode-Lasten liegen zwischen 50% und 150% der DIN-Lasten. Allerdings verweist der Eurocode auf die Ergebnisse einer eigens für die Erstellung der europäischen Schneelastkarten eingesetzten Forschungsgruppe der DGIII/D-3, welche Daten gesammelt und im Sinne einer Harmonisierung in Übersichtskarten für das gesamte Gebiet der europäischen Union umgewandelt hat. Die teilweise große Diskrepanz zwischen den Werten ist bauordnungspolitisch allerdings in keiner Weise hinnehmbar. Daher setzt der nationale Anhang DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12 des Eurocodes praktisch die dort eingeführte Zonierung der Bundesrepublik gemäß Abbildung 75 und Abbildung 76 außer Kraft und verfügt die Schneelastermittlung wieder nach DIN 1055-5:2005-07. Die im nationalen Anhang aufgeführte verbindliche Schneezonenkarte entspricht damit fast vollständig derjenigen der DIN 1055-5 mit einer Ausnahme: Der Abgrenzung des Norddeutschen Tieflandes.

Eine solche Neuregelung und Festlegung erlaubt der Eurocode auch explizit in Abschnitt 4.1 (1):

„Anmerkung 1: Der Nationale Anhang legt die zu verwendenden charakteristischen Werte fest. Um ungewöhnliche örtliche Verhältnisse zu berücksichtigen, darf der Nationale Anhang zulassen, dass abweichende charakteristische Werte für einzelne Projekte zwischen Bauherren und der zuständigen Behörde vereinbart werden.“

Anmerkung 2: Anhang C enthält die europäische Karte für Schneelasten auf dem Boden, die nach entsprechenden Untersuchungen, die von DGIII/D-3 in Auftrag gegeben worden war, entstand. Der Nationale Anhang darf auf diese Karte Bezug nehmen, um Unstimmigkeiten an den Grenzen auszumerzen oder zu verringern.“

Darüber hinaus muss an dieser Stelle herausgestellt werden, dass die europäischen Karten lediglich im Anhang C als informativ anzusehen sind und somit ausdrücklich nur als Arbeitshilfe für zuständige nationale Behörden anzusehen sind.

Der Unterschied zwischen allgemeinem Eurocode und nationalem Anhang wird bei Betrachtung der Abbildung 73 und Abbildung 77 deutlich. Nach der Schneekatastrophe von 1978/79 hat der DIN im nationalen Anhang auf die eigentlich erforderliche, statistisch begründbare Hochstufung der norddeutschen Tiefebene verzichtet. Stattdessen wurde gegenüber der DIN 1055-5 lediglich die Grenzlinie für die norddeutsche Tiefebene ergänzt sowie folgender Passus hinzugefügt: Im Bereich der norddeutschen Tiefebene „wurden in seltenen Fällen Schneelasten bis zum mehrfachen der rechnerischen Werte gemessen“.

Dieser seit 2005 existierende Hinweis führt dazu, dass der Lastfall Schnee für den Bereich nördlich dieser Grenzlinie zusätzlich als außergewöhnlicher Lastfall mit einem Erhöhungsfaktor von 2,3 berücksichtigt werden muss. Die pauschale Einstufung der Norddeutschen Tiefebene in eine höhere Schneelastzone konnte so vermieden werden. Der gewählte Ausweg ermöglicht damit eine wirtschaftlichere Berücksichtigung der Schneelast gegenüber der Zonierung des allgemeinen Eurocodes und bleibt im Rahmen der existierenden Deutschen Schneelastnormen.

1.2.4 Zonierung der Schneelasten in Europa

Die Bildung großflächiger Zonen zur Festlegung der Schneebelastung in den Schneezonenkarten der Normen ist hinsichtlich des Naturphänomens Schnee nur als ein aufgrund fehlender Alternativen anzusehendes Hilfsmittel zur Bestimmung einer Lastgröße. Schnee ist bekanntlich, noch stärker als Wind, ein äußerst lokales Wetterphänomen. Statt des Versuchs, lokal-geographische Gegebenheiten bei der Mikrozonierung der Schneebelastung zu berücksichtigen, wurde innerhalb der Bundesrepublik eine durch administrative Gesichtspunkte bestimmte Zonierung auf die Landkreise als Verwaltungseinheiten vorgenommen (DITB 2008).

Abbildung 77: Schneelastzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2010, Nationaler Anhang EC1

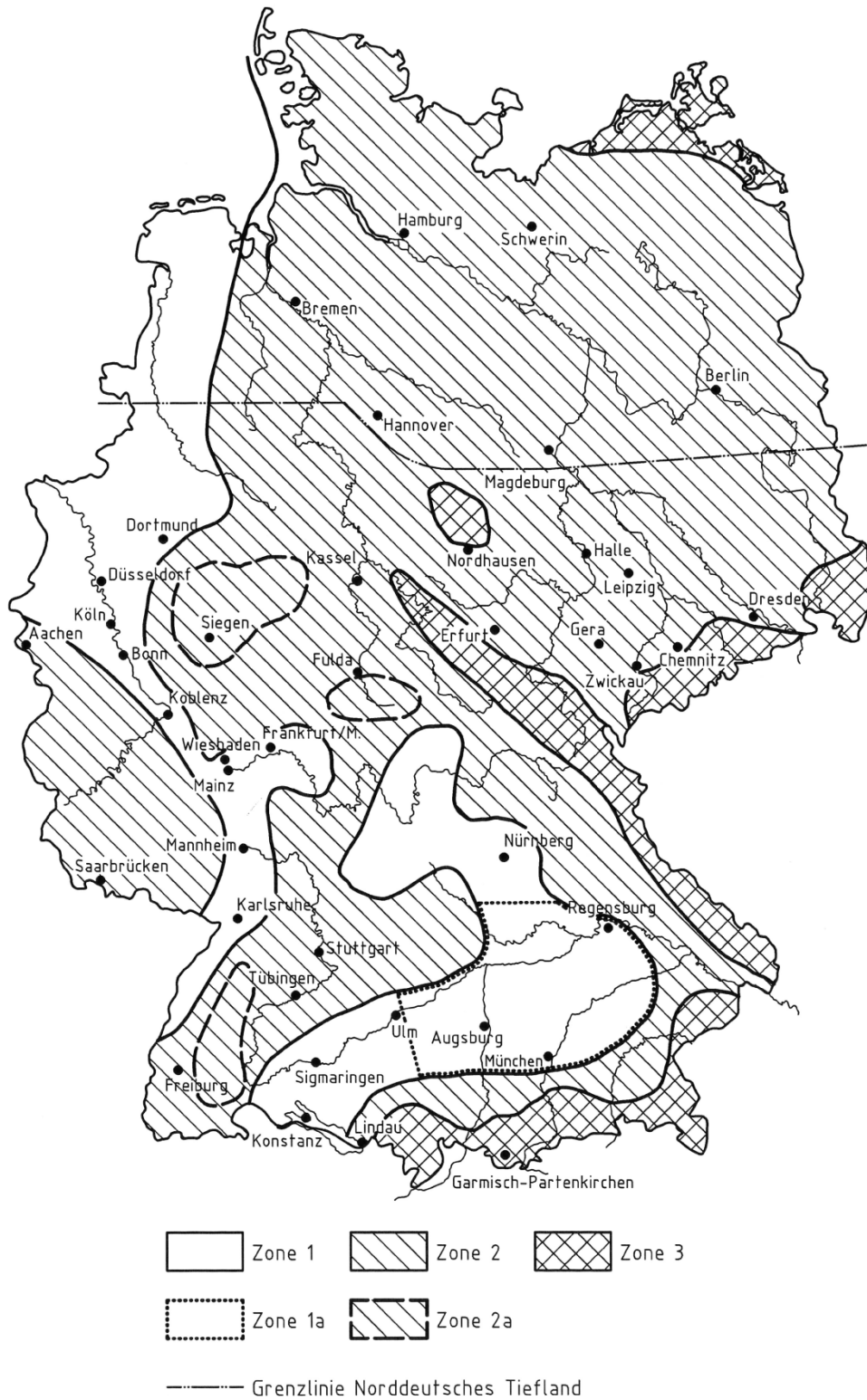


Bild NA.1 — Schneelastzonenkarte

Ein solches Herunterbrechen der allgemeinen Zonierung (Mikrozonierung) auf Landkreisebene ist für den Normenanwender begrüßenswert, allerdings bleibt dieser Zustand für manche Gebiete geo-wissenschaftlich fragwürdig. Eine lokale Betrachtung wäre zur besseren Ausnutzung von Ressourcen begrüßenswert, lässt sich aber nur schwer in ein allgemeines Normenkonzept integrieren. So kann die durchgeführte Zonierung sowohl eine auf der sicheren als auch auf der unsicheren Seite liegende Einstufung der Schneelasten zur Folge haben. Das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBT 2008) bietet eine Excel-unterstützte Zonierungslösung an, um mittels Suche nach Postleitzahlen die normengemäße Schneelast zu ermitteln. Dieses Arbeitsblatt kann frei im Internet heruntergeladen werden und bietet so die Möglichkeit, einfach und unkompliziert eine Einstufung der Schneelast für den jeweiligen Standort vorzunehmen. Tabelle 29 gibt einen Ausschnitt aus den dort hinterlegten Daten

Tabelle 29: Ausschnitt aus DIBT 2008: Einteilung der Landkreise und Gemeinden in die Schneelastzonen der DIN-Normung

Land	Landkreis	Gemein- deschlüs- sel	Gemeinde	Schneelast- zone	Fuß- note(n)
NW	Düsseldorf	05111000	Düsseldorf	1	
NW	Duisburg	05112000	Duisburg	1	
NW	Essen	05113000	Essen	1	
NW	Krefeld	05114000	Krefeld	1	
NW	Mönchengladbach	05116000	Mönchengladbach	1	
NW	Mülheim an der Ruhr	05117000	Mülheim an der Ruhr	1	
NW	Oberhausen	05119000	Oberhausen	1	
NW	Remscheid	05120000	Remscheid	2	
NW	Solingen	05122000	Solingen	1	
NW	Wuppertal	05124000	Wuppertal	1	
NW	Kleve	Alle	Alle	1	
NW	Mettmann	Alle	Alle	1	
NW	Neuss	Alle	Alle	1	
NW	Viersen	Alle	Alle	1	
NW	Wessel	Alle	Alle	1	
NW	Aachen	05313000	Aachen	2	
NW	Bonn	05314000	Bonn	1	
NW	Köln	05315000	Köln	1	
NW	Leverkusen	05316000	Leverkusen	1	
NW	Aachen	05354004	Alsdorf	2	
NW	Aachen	05354008	Baesweiler	1	
NW	Aachen	05354012	Eschweiler	2	
NW	Aachen	05354016	Herzogenrath	2	
NW	Aachen	05354020	Monschau	2	
NW	Aachen	05354024	Roetgen	2	
NW	Aachen	05354028	Simmerrath	2	
NW	Aachen	05354032	Stolberg (Rheinland)	2	

Land	Landkreis	Gemein- deschlüs- sel	Gemeinde	Schneelast- zone	Fuß- note(n)
NW	Aachen	05354036	Würselen	2	

Aus der historischen Entwicklung der Schneelastnorm in Deutschland erkennt man das Dilemma der normengebenden Stellen: Die Normen werden immer detaillierter und umfangreicher, und der Ruf nach Reglementierung wird seitens aller am Bau und an der Planung beteiligten Gruppen (Bauherren, Planer, Behörden, Versicherungen) immer lauter. Der Wunsch nach einer vergleichbaren und verlässlichen Planung führt zu einer immensen Regelungsdichte zur vermeintlichen Schaffung von Sicherheit. Dieses hat zur Folge, dass dem planenden Ingenieur kaum Handlungsspielraum bleibt. Die aus den vorhergehenden Normen bekannten Verweise auf sachverständige Behörden sind daher in den modernen Normen weitestgehend entfallen, womit eine Entwurfsreaktion auf lokale Besonderheiten nur schwer durchzusetzen ist.

Abgesehen von einzelnen Wintersportorten beruhen Schneelastangaben in Deutschland auf höchstens 30-jährigen Schneehöhenaufzeichnungen, die daher häufig von Einzelereignissen übertroffen werden. Diese bezeichnet man dann als lokale Phänomene. Als solche werden Ereignisse bezeichnet, welche aufgrund ihres zeitlichen und/oder örtlich eingeschränkten Auftretens nur geringe Einflüsse auf ein gesamtes Gebiet besitzen. Dennoch können diese Ereignisse einzelne Tragwerke, Bauteile oder Anlagenteile in starkem Maße funktional beeinträchtigen oder sogar außer Funktion setzen. Der hierunter betrachtete Schnee tritt normalerweise bei entsprechender Witterungslage großflächig in üblicher Höhe auf, kann allerdings lokal erheblich stärker (oder schwächer) ausfallen.

Als ein solches Phänomen wird allgemein die sogenannte Schneekatastrophe 1978/79 angesehen, von der hauptsächlich Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern betroffen war. Dort führte das Wettergeschehen zu einer geschlossenen Schneedecke von 67 Tagen Dauer und allein in Schleswig-Holstein zu einer Schadenssumme von 140 Mio. DM. Zum Jahreswechsel traf damals ein skandinavisches Kaltlufttief über der Ostsee auf eine Südwestströmung milder, sehr feuchter atlantischer Luft. Als Folge schneite es zu Jahresbeginn 1979 in dem betroffenen Gebiet ca. 1 Woche lang, bei Stürmen bis 10 Beaufort. Während die mittlere Schneehöhe lediglich ca. 20cm betrug, wurden in Ostholstein lokal 70 cm gemessen. Im Internet ist das Ereignis mit Bildern von bis zu 4m hohen lokalen Schneewehen dokumentiert.

1.2.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der vorangegangenen Abschnitte lassen sich wie folgt in Tabellenform (Tabelle 30) zusammenstellen. Hier sind neben der Belastung auch die erforderlichen Maßnahmen, welche durch den Aufsteller und/oder den Betreiber durchzuführen sind, erwähnt. Dennoch kann diese Tabelle nur als eine Richtschnur dienen. Wie hier bereits ersichtlich, sind die Gefahrenquellen Schnee und Eis hinlänglich in den im Bauwesen verwendeten Normen behandelt und beschrieben. Daher sind in erster Linie die Regelungen der entsprechenden Baunormen einzuhalten. Hierbei ist die besondere Gefährdung bei Versagen und oder Einschränkung der Funktionstauglichkeit bei Anlagenteilen zu berücksichtigen.

Tabelle 30: Tabellendarstellung der wesentlichen Belastungsfälle

Phänomen	Einteilung der Dachform	Bestimmung der Belastungshöhe	Nachweis der Konstruktion
Schneelast	Pultdach Flachdach Sheddach Tonnendach	Formbeiwert und Grundschneebelastung nach DIN EN 1991-1-3 in Kombination mit Überhöhungsfaktor	Vergleich mit Lastannahmen und Nachweis der Struktur / Alternativ: Verhinderung der Belastung
Schneesackbildung	Bestimmung mittels Formbeiwerten	Formbeiwert und Grundschneebelastung nach DIN EN 1991-1-3 in Kombination mit Überhöhungsfaktor	Vergleich mit Lastannahmen und Nachweis der Struktur / Alternativ: Verhinderung der Belastung
Schnee- verwehung	Lokale Schneeverwehungen bis maximal Versprunghöhe	Formbeiwert und Grundschneebelastung nach DIN EN 1991-1-3 in Kombination mit Überhöhungsfaktor	Vergleich mit Lastannahmen und Nachweis der Struktur / Alternativ: Verhinderung der Belastung
Eisbildung	Bestimmung mittels DIN 1055-5	Beiwerte und Grundbelastung nach DIN 1055-5	Vergleich mit Lastannahmen und Nachweis der Struktur / Alternativ: Verhinderung der Belastung

1.2.6 Auswirkungen des Klimawandels auf die Schnee- und Eisbelastung

Im Gegensatz zu der Philosophie der Normung, die Lastparameter nach den gemachten Messungen der vergangenen Jahrzehnte zu bestimmen und stochastisch zu verwerten, soll an dieser Stelle die Belastung aufgrund möglicher kommender Ereignisse neu bewertet und bestimmt werden.

Wie in Kapitel 3.4.4 noch diskutiert wird, lässt sich hinsichtlich der Entwicklung der Schnee- und Eisbelastung in den kommenden Jahrzehnten derzeit noch keine gesicherte Prognose erstellen. Vielmehr ist aus den Ergebnissen der Klimanalysen folgendes qualitativ ersichtlich:

Generell scheinen die Temperaturen anzusteigen, was tendenziell mildere Winter mit sich bringen wird. Somit könnte sich eine Vielzahl von jetzigen Schneeereignissen in Zukunft in Regenfälle verwandeln, welche für die Dachbelastung der Anlagen keine Rolle spielt. Auf der anderen Seite könnten sich auch eine erhöhte Anzahl an wechselnden Bedingungen (Frost-Tau-Perioden) einstellen, welche die Belastungen aus bereits gefallenem Schnee stark verändern können. Hinzu kommen die bei höheren Temperaturen vermehrt auftretenden Extremwetterereignisse. Diese können zu lokalen hohen Schneeereignissen führen.

Das Fazit der Klimawandeluntersuchung ist zu diesem Zeitpunkt allerdings: Aufgrund der hohen Abhängigkeiten der Schneeereignisse von einer Vielzahl von Parametern ist mit den derzeit durchführbaren Analysen keine belastbare Prognose hinsichtlich der Entwicklung der Schneebelastung auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland möglich.

Die grundsätzlich prognostizierbare Entwicklung zeigt allerdings, dass durch lokale Extremereignisse und die gehäuft auftretenden Frost-Tauperioden eine Erhöhung der Belastungen lokal möglich wäre. Es liegen derzeit keine belastbaren Größen hinsichtlich einer Prognose für die Schneebelastung vor. Allerdings kann in Anlehnung an die Extremwertverteilung und in Anlehnung an den Klimaanpassungsfaktor der TRAS 310 ein Faktor von 1,2 bis zum Jahr 2100 vorgeschlagen werden.

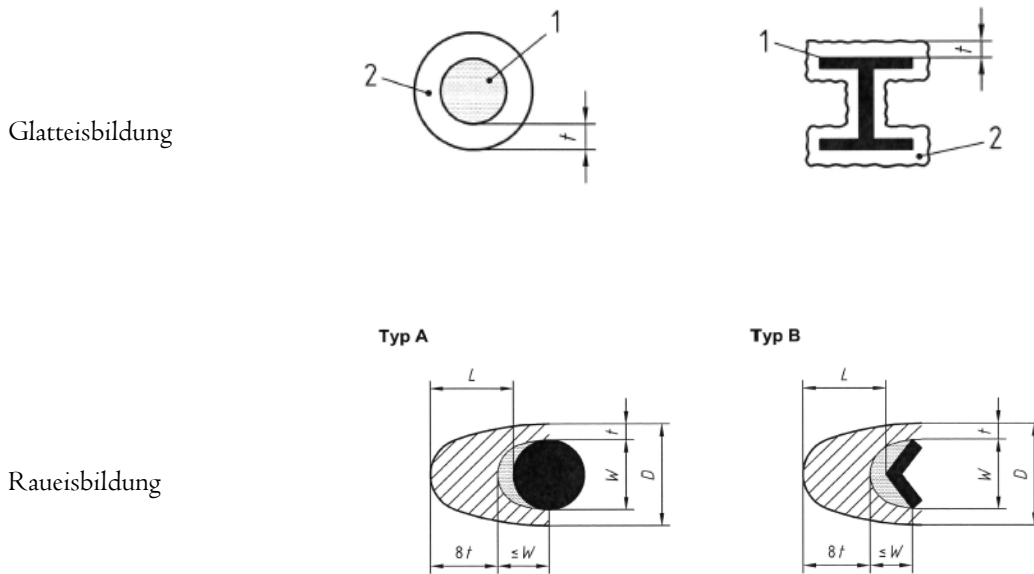
Sollten die Modelle durch Weiterentwicklung und Verbesserung zukünftig in der Lage sein, eine solche Simulation für die Schneebelastung zu ermöglichen, so muss über eine Anpassung der Faktoren erneut nachgedacht werden.

1.3 Eislast als umgebungsbedingte Gefahrenquelle

1.3.1 Qualitative Analyse

Die bereits im Zuge der Beschreibung der DIN 1055 erwähnten Eislasten bedürfen einer etwas ausführlicheren Darstellung an dieser Stelle. Grundsätzlich lässt sich das Phänomen der Eisbildung in Raueisbildung und Glatteisbildung unterscheiden. Aufgrund der unterschiedlichen Entstehungsweise sind die anzusetzenden Lastbilder auch unterschiedlicher Ausprägung. Abbildung 78 zeigt hier

Abbildung 78: Typische Lastbilder der Eisbildung

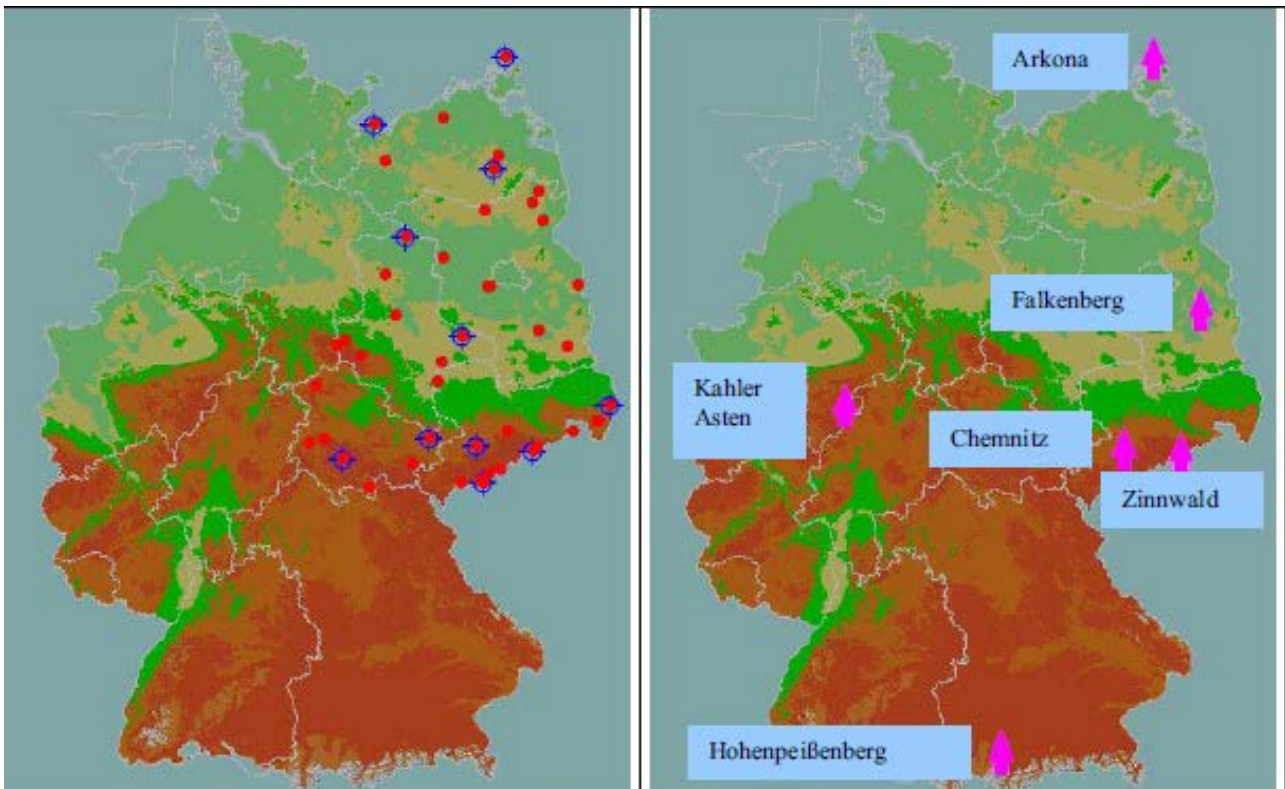


Die DIN 1055 war an dieser Stelle mit dem informativen Anhang A auf dem Stand der Technik. Im Zuge der Eurocode-Einführung entfällt dieser Teil ersatzlos, so dass in den Lastnormen keine detaillierten Angaben zu der Eisbelastung zu finden sind. Das bedeutet natürlich nicht, dass es diese Belastung nicht gibt, sondern zeigt vielmehr nur, wie schwer ein Abstimmungsprozess auf europäischem Parkett sein kann.

Es gibt weiterhin aktuelle Untersuchungen zu diesem Thema, die sich zumeist auf die DIN ISO 12494 beziehen, weil sie Lastbilder und Größenordnungen der Eisbelastungen vorgibt. In erster Linie ist diese ISO Norm, von der „International Organization of Standardization“ als Grundlage für die Erstellung von Anwendungsnormen erarbeitet worden. Sie ist jedoch im Sinne des Baurechts nicht bauaufsichtlich eingeführt und somit nicht direkt bindend. Allerdings stellt sie in gewisser Weise den Stand der Technik dar, welcher grundsätzlich bei der Berechnung und Auslegung von Anlagen und Anlagenteilen zu berücksichtigen ist. Einige weitere Veröffentlichungen zu diesem Thema sind beispielsweise die Veröffentlichung des Messprojekts COST 727: 2006 und die Zusammenstellung eines Kurses an der University of Delaware CIEG 407: 2007. Im Bericht des COST 727-Projekts wird beispielsweise die Anzahl der derzeit noch aktiven Messstationen in der Bundesrepublik Deutschland dargestellt (siehe Abbildung 79). Es ist ersichtlich, dass die Reduzierung von 40 auf derzeit noch 6 Messstationen nicht zur Erhöhung der statistischen Grundmasse der Messungen beiträgt.

Darüber hinaus wurden im Hinblick auf Offshore-Windenergieanlagen ebenfalls einige Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt, wie beispielsweise die Ausarbeitungen von Foder: 2001 und Homola: 2005 zeigen.

Abbildung 79: Anzahl der Beobachtungsstationen für Eisbildung in der BRD



Zeitraum 1965 bis 1990;
Rote Punkte: 24-Messungen;
Blaue Punkte Vereisungsmessungen
(Cost 727:2006)

Zeitraum 1990 (teilweise) bis 2006;
Ständige Messungen der Vereisung an allen ge-
nannten Stationen

Grundsätzlich entsteht die Eisbildung an einem Anlagenteil durch das Gefrieren des Wassers aus der Luft (entweder Luftfeuchtigkeit oder Niederschlag). Hierbei kann sowohl das Glatteis um den gesamten Körper aber auch das Raueis auf einer Seite des Körpers entstehen. Allerdings kann es aufgrund von Kombination mit starken Winden auch zu einer starken Ausprägung von Eisfahnen kommen. Eine Erhöhung der Windbeanspruchung der zumeist dünnen Anlagenteile ist hierbei aufgrund der Vergrößerung der Oberfläche besonders zu betrachten.

Für eine Untersuchung seitens des Betreibers, ob eine Struktur durch Eis signifikant belastet werden kann, sollte wie folgt vorgegangen werden:

1. Einstufung einzelner Anlagenteile, ob sie der freien Witterung ausgesetzt sind oder nicht.
2. Die Anlagenteile, welche der freien Witterung ausgesetzt sind, müssen dahingehend untersucht werden, ob sie für die Auslegung gegen eine Eislast in Frage kommen. Maßgebend ist der Lastfall Eisbildung in erster Linie für dünne Anlagenteile, wie z.B. Masten, Gerüstelemente, Kabeltrassen, welche eine signifikante Erhöhung des Eigengewichts und/oder Oberfläche durch anhaftende Eiskörper erfahren.
3. Überprüfung des bei der Auslegung berücksichtigten Eisansatzes und ggfs. Verstärkung und/oder Festlegung von organisatorischen Schutzmaßnahmen, wie bspw. Entfernen von Eiswalzen durch Abschlagen o. ä.

1.3.2 Aktuelle DIN EN-Norm und letzter Stand der DIN-Norm

1.3.2.1 07/2005: DIN 1055-5 – Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 5: Schnee- und Eislast

Das Kapitel 6 der vorliegenden Norm widmet sich den Eislasten an Tragwerken, allerdings nur solchen natürlichen Ursprungs. (Sogenanntes Industrieeis infolge austretendem und gefrorenem Wasser oder Dampf wird in der Norm nicht behandelt.) Hierzu werden neu die Vereisungsklassen GI und G2 (Glatteis) sowie R1 bis R5 (Rau eis) definiert. Die

Bundesrepublik ist nun durch die Eiszonenkarte A.3, die in Abbildung 80 wieder gegeben ist, in die Eiszonen I bis 4 aufgeteilt. Diesen Eiszonen sind gemäß DIN 1055-5, Tabelle A.4, hier wiedergegeben als Tabelle 31, 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.

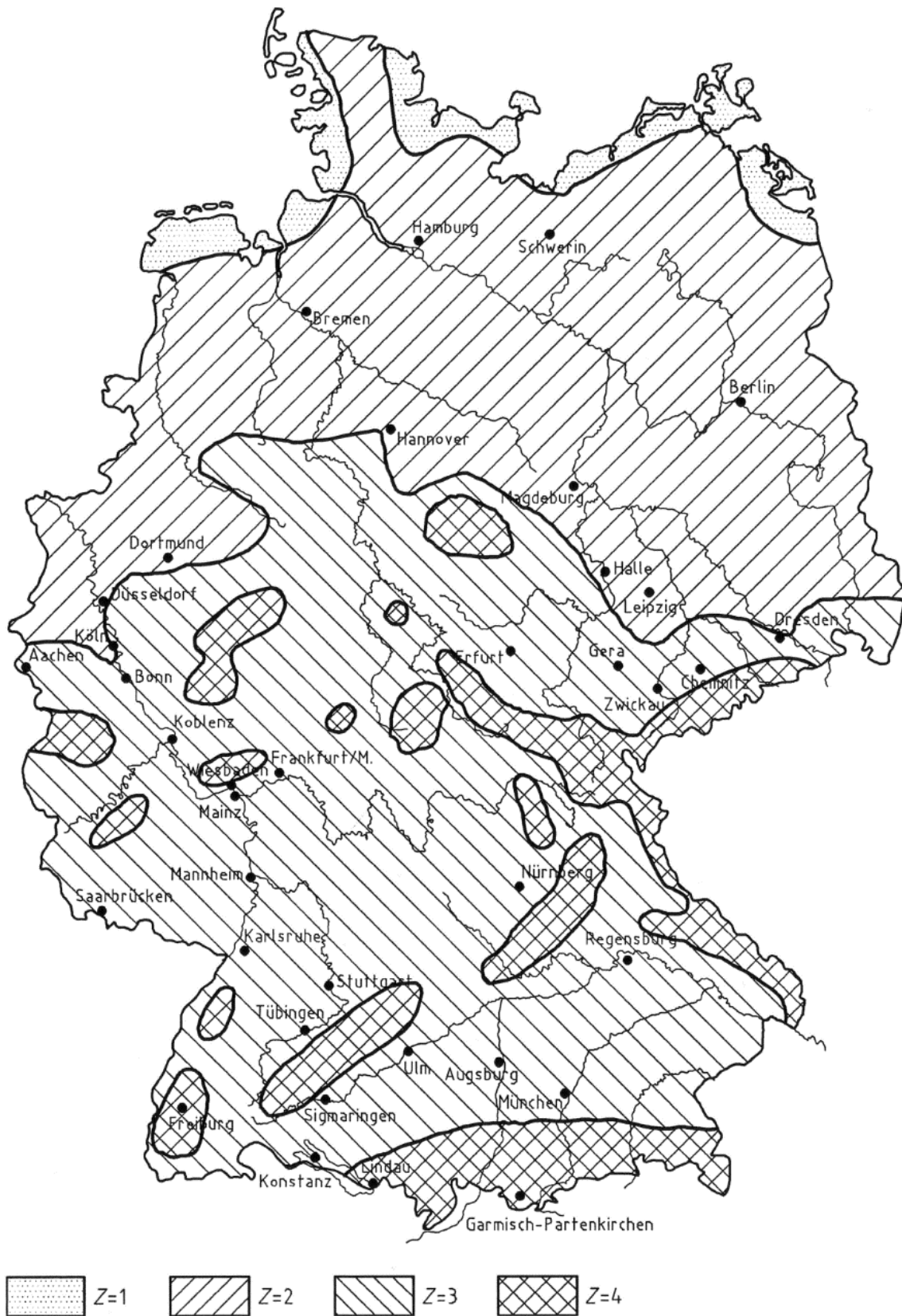
Tabelle 31: Vereisungsklassen im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland nach DIN 1055-5

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

In den Bildern A.1 und A.2 nebst zugehörigen Tabellen ist versucht worden, die als Lasten anzunehmende Eismäntel bzw. Eisfahnen (Eiswalzen) dickenmäßig abzuschätzen.

Im Anhang B der Norm wird schließlich erneut hervorgehoben, dass der charakteristische Wert der Schneelast einen 98%-Fraktilewert darstellt und zwischen $0,65$ kN/m² und 14 kN/m² liegen kann.

Abbildung 80: Eiszonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 2005



© DIN DIN e.V.

1.4 Windbedingte Projektile als Umgebungsbedingte Gefahrenquelle

Starkwinde als primäre umgebungsbedingte Gefahrenquelle können Objekte mit sich tragen oder Bäume, Masten usw. umstürzen, die dann als sekundäre Gefahrenquellen störfallrelevante Anlagenteile gefährden. Welche Kräfte bei einem Orkan freigesetzt werden und welche zerstörerische Kraft sie besitzen, zeigt die folgende Momentaufnahme in Abbildung 81, während des Orkans Lothar von 1999.

Abbildung 81: Projekttilbildung während des Orkans Lothar.



Foto: Christian Häßlinger, Büren NW, Schweiz

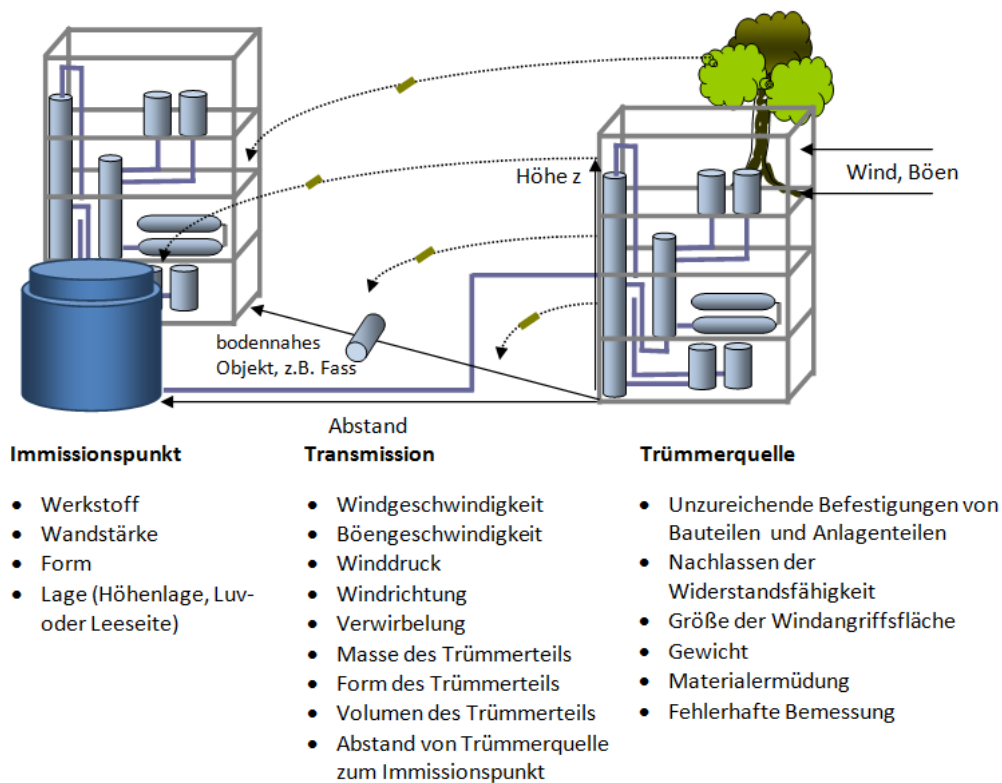
Im Rahmen der Gefahrenquellenanalyse ist von folgenden Szenarien auszugehen:

1. Ein Extremwind reißt 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.
2. Ein Trümmerteil, wie z.B. ein umstürzender Baum oder ein abgerissener Ast, trifft von außen durch Starkwind auf ein Anlagenteil.
3. Durch Extremwind werden auf dem Boden liegende lose Teile, wie z.B. Fässer, bodennah fortgetragen.
4. Durch einen Tornado werden bodennahe Teile hochgeschleudert und stark beschleunigt.

Die ersten drei Fälle können durch Orkane (Tiefdruckstürme) ausgelöst werden. Hierbei handelt es sich um großflächige Ereignisse, die relativ häufig in Europa auftreten. Der vierte Fall beschränkt sich auf den Sonderfall eines Tornados, der ein kleinflächiges Ereignis darstellt, dessen Windcharakteristiken und Windgeschwindigkeiten jedoch ein hohes Risikopotenzial beinhaltet.

In Abbildung 82 ist der gesamte Bereich zur Gefahrenquellenanalyse windbedingter Projektile mit den verschiedenen Einflussfaktoren grafisch dargestellt.

Abbildung 82: 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 potenzielle 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. Im Falle von Tornados wirkt lokal eine Saugkraft in vertikaler Richtung und kann auf diese Weise Objekte am Boden hochschleudern, durch die Rotation des Windes beschleunigen und anschließend tangential aus der Rotationsbewegung fortschleudern. Die Windcharakteristiken zwischen Tiefdruckstürmen einerseits und Tornados andererseits unterscheiden sich somit signifikant.

Wie die Abbildung 82 vermuten lässt, ist eine mathematische Beschreibung der Flugbahnen windbedingter Projektile auf eine einfache Art nicht möglich. Daher ist es erforderlich, vereinfachende Annahmen zu treffen, um Szenarien abzubilden, die das mögliche Gefahrenpotenzial der meisten Projektile abdecken. Hierbei ist zwischen Tiefdruckstürmen und Tornados aufgrund der unterschiedlichen Strömungsrichtungen zu differenzieren. Tiefdruckstürme besitzen näherungsweise ein waagrechtes Strömungsprofil, während die Tornados neben der Wirbelströmung auch noch eine nach oben gerichtete Windkomponente aufweisen, die lose Teile nach oben hochreißen kann.

1.4.1 Mathematische Beschreibung der Flugbahnen von Modellprojektilen bei Orkanen

Grundlage zur Beschreibung der Flugbahnen von Projektilen sind die Böengeschwindigkeiten, die in der Tabelle 24 für eine Jährlichkeit von 100 Jahren angegeben sind. Die dort angegebenen Böengeschwindigkeiten berücksichtigen die in der DIN EN 1991-1-4 ausgewiesenen Windzonen sowie die Geländekategorien I, II und III entsprechend Abbildung 34. Weil sich die Böengeschwindigkeiten auf eine Höhe von 10 m über Grund beziehen, muss für die Berechnung der Flugbahn eine Umrechnung auf die Höhe des Emissionspunktes durchgeführt werden. Die Umrechnung auf die Höhe der potenziellen Projektilquelle erfolgt mit Hilfe der folgenden Gleichungen:

$$(38) \quad \text{Geländekategorie I} \quad u_x(z) = u_x(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,095}$$


$$(39) \quad \text{Geländekategorie II} \quad u_x(z) = u_x(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12}$$

$$(40) \quad \text{Geländekategorie III} \quad u_x(z) = u_x(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,155}$$

$$(41) \quad \text{Geländekategorie IV} \quad u_x(z) = u_x(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,2}$$

Auf diese Weise erhält man die Böengeschwindigkeit, die einen Körper losreißen bzw. beschleunigen kann. Aufgrund der Vielzahl möglicher Formen und Dichten von Projektilkörpern kann die weitere Betrachtung nur anhand von Modellkörpern (Ersatzkörper) erfolgen, die eine mathematische Berechnung der Beschleunigung sowie der Flugweite ermöglichen. Hierzu zählt z.B. ein Rohr von 2 m Länge, einem Durchmesser von 10,4 mm und einem Gewicht 10,2 kg (Abbildung 83).

Abbildung 83: Auswahl eines Modellkörpers zur Ermittlung des Gefahrenpotenzials windbedingter Projektilen



Modellkörper: Rohr
Länge 2 m ; 10,2 kg

Reihe A Rohrmaße nach DIN 11850 – Reihe 2 (erweitert mit DN 6 und DN 8)

Nennweite DN/DIN	6	8	10	15	20	25	32	40	50	65	80	100	125	150	200
Rohr-Außendurchmesser [mm]	8	10	13	19	23	29	35	41	53	70	85	104	129	154	204
Rohr-Innendurchmesser [mm]	6,00	8,00	10,00	16,00	20,00	26,00	32,00	38,00	50,00	66,00	81,00	100,00	125,00	150,00	200,00
Grenzabmaße Außen (±)	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,12	0,15	0,15	0,25	0,30	0,43	0,52	0,65	0,77	1,02
Wanddicke [mm]	1,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Grenzabmaße Wand (±)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Gewicht [kg/m]	0,175	0,226	0,432	0,658	0,808	1,034	1,260	1,485	1,937	3,409	4,162	5,114	6,368	7,621	10,13

Als einen weiteren Modellkörper kann auch eine ebene Platte herangezogen werden. Allerdings ist die Berechnung der Flugweiten sehr viel komplexer als bei einem Rohr, weil in Abhängigkeit des Anstellwinkels, die Platte nach oben geschleudert werden kann, womit sich die Flugweite erhöht. Zur Berechnung der Flugbahn eines solchen Objekts wird auf die Literatur von Tachikawa (1983, 1988), Lin et.al. (2006) und Holmes (2004) verwiesen.

Als Modellkörper, der am Boden umstürzen und vom Wind getrieben auf störfallrelevante Anlagenteile zu rollen kann, wird ein Fass mit den in Abbildung 84 zusammengestellten Dimensionen und Gewicht gewählt. Auch hierfür wird eine Beispielrechnung vorgeführt.

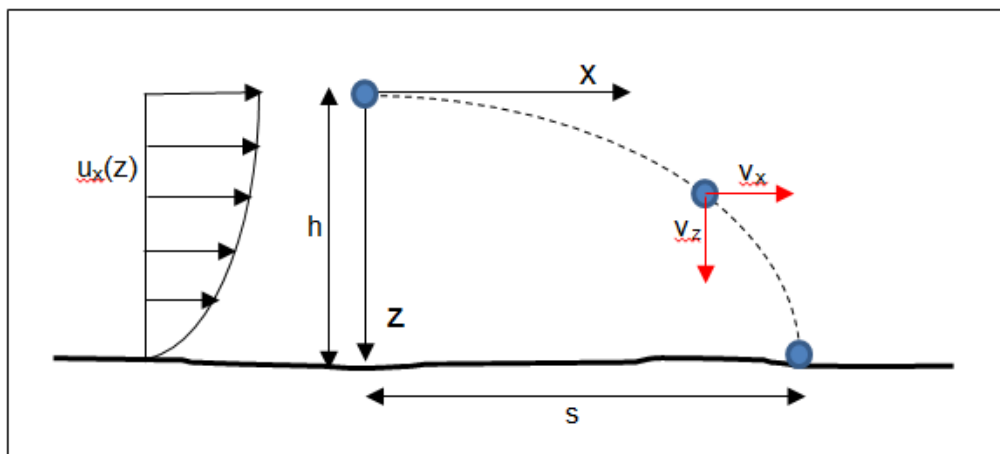
Abbildung 84: Fass als bodennahes Projektil



Zur Beschreibung des Projektilflugs sind verschiedene Lösungsansätze entwickelt worden (Moghim, Caracoglia 2012) An dieser Stelle wird ein einfaches Berechnungsverfahren angegeben, das zur Abschätzung des Gefahrenpotenzials windbedingter Projektile ausreicht.

Die mathematischen Grundlagen zur Berechnung der Flugweiten von Objekten können aus der Betrachtung des waagerechten Wurfs abgeleitet werden. Allerdings müssen anders als beim waagerechten Wurf verschiedene Effekte berücksichtigt werden. Beim waagerechten Wurf wird das Objekt zum Zeitpunkt $t = 0$ auf eine bestimmte Geschwindigkeit gebracht, das anschließend ohne weitere Beschleunigung in x-Richtung zu Boden fällt. Im Rahmen dieser Betrachtung wird das Objekt beim Fallen jedoch weiter in x-Richtung beschleunigt, es sei denn, es befindet sich im Windschatten eines Gebäudes (Abbildung 85).

Abbildung 85: Darstellung des waagerechten Wurfs



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

$$(42) \quad m \cdot a_x = - \frac{\rho_L}{2} c_w (u_x(z) - v_x)^2 A$$

Mit:

m	Masse des Projektils (kg)
a_x	Beschleunigung des Projektils in x-Richtung (m/s ²)
c_w	Widerstandsbeiwert des umströmten Körpers (-)
ρ_L	Dichte der Luft (kg/m ³)
$u_x(z)$	Wind- oder Böengeschwindigkeit der Luft in x-Richtung (m/s) als Funktion der Höhe z
v_x	Geschwindigkeit des umströmten Körpers in x –Richtung (m/s)
A	Querschnittsfläche (m ²)

Für das Kräftegleichgewicht in z-Richtung gilt:

$$(43) \quad m \cdot a_z = m g - c_w \frac{\rho_L}{2} v_z^2 A$$

Mit:

m	Masse des Projektils (kg)
a_z	Beschleunigung des Projektils in z-Richtung (m/s ²)
g	Erdbeschleunigung (9,81 m/s ²)
c_w	Widerstandsbeiwert des umströmten Körpers (-)
ρ_L	Dichte der Luft (kg/m ³)
v_z	Geschwindigkeit des umströmten Körpers in z-Richtung (m/s)
A	Querschnittsfläche (m ²)

Die Lösung der beiden Gleichungen ist deshalb schwierig, weil die Beschleunigung nicht konstant ist. Sie verändert sich in jedem Moment der Bewegung, da sich die Geschwindigkeit verändert. Zur Berechnung der Bewegung kann jedoch ein Rechenprogramm verwendet werden (Lorenz 1996). Zur Lösung der Gleichungen gibt es verschiedene Ansätze. Einer basiert auf dem Euler-Verfahren, das davon ausgeht, dass zu einem bestimmten Startzeitpunkt ($t = 0$) die Startwerte der Geschwindigkeit $v(t)$, des Ortes $h(t)$ bzw. $s(t)$ und der Beschleunigung $a(t)$ bekannt sind. Es können dann die weiteren Funktionswerte mit einem vorgegebenen Δt für den Zeitpunkt $t + \Delta t$ berechnet werden. Mit der Definition der Beschleunigung

$$(44) \quad a(t) = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t}$$

kann die Projektilgeschwindigkeit zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ wie folgt berechnet werden (Gleichung 1.26):

$$(45) \quad v(t + \Delta t) = v(t) + a(t) \Delta t$$

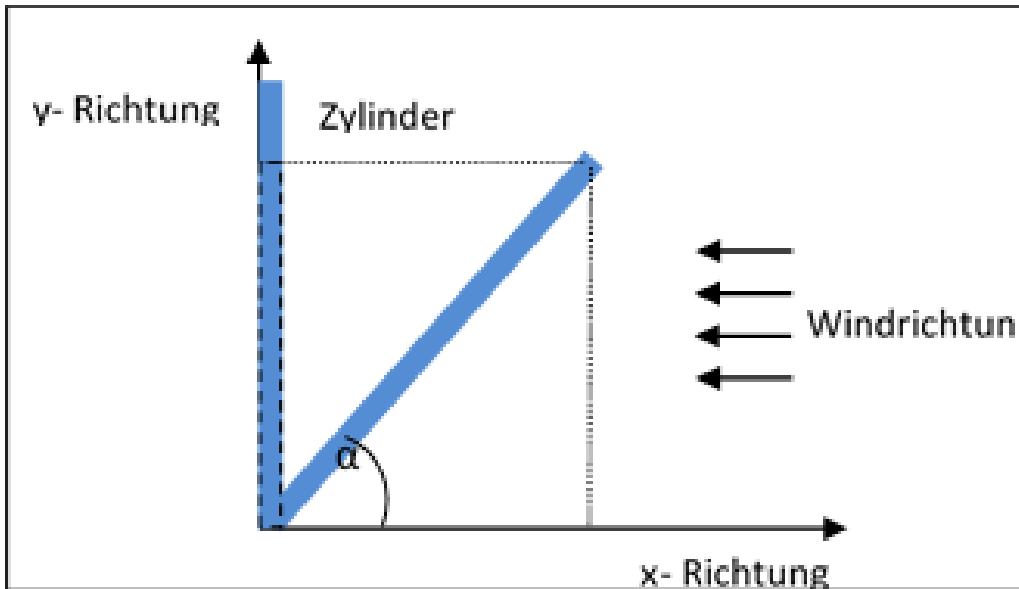
Mit der Definition der Geschwindigkeit $v(t)$ (Gleichung 46) kann die aktuelle Flugstrecke s berechnet werden (Gleichung 47, Anmerkung: Der Parameter s ist der Weg in x-Richtung; ersetzt man s durch h , wird der Weg in z-Richtung beschrieben).

$$(46) \quad v(t) = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{s(t + \Delta t) - s(t)}{\Delta t}$$

$$(47) \quad s(t + \Delta t) = s(t) + v(t) \Delta t$$

Die Berechnung der Flugweite eines Rohrs, wie er als Modellkörper ausgewählt wurde, setzt voraus, dass der Wind den Körper quer anströmt. Tatsächlich ist diese Voraussetzung nicht zu jedem Zeitpunkt t gegeben. So kann sich der Körper in der Luft drehen, wobei die Anströmfläche durch die Rotation laufend verändert wird. Ein einfacher Weg die Drehbewegungen zu berücksichtigen, ist die Einführung eines Drehwinkels α (Abbildung 86)

Abbildung 86: Verminderung der Anströmfläche eines Rohres (Draufsicht)



$$(48) \quad \sin \alpha = \frac{\text{Anströmfläche beim Drehwinkel } \alpha}{\text{Anströmfläche bei senkrechter Anströmung}}$$

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

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

Die am Aufprallpunkt erreichte Endgeschwindigkeit des Projektils v_p kann mit den Geschwindigkeitsvektoren in x- und z-Richtung berechnet werden:

$$(49) \quad v_p = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$$

Damit ergibt sich der in Tabelle 32 Berechnungsalgorithmus in x und z-Richtung:

Tabelle 32: Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Flugweite

x-Richtung	z-Richtung
Berechnung der Beschleunigung $a_x(t)$: $a_x = -c_w \frac{\rho_L}{2} (u_x(z) - v_x)^2 \frac{A \sin \alpha}{m}$	Berechnung der Beschleunigung $a_z(t)$: $a_z(t) = g - c_w \frac{\rho_L}{2} v_z(t)^2 \frac{A \sin \alpha}{m}$
Anfangsbedingungen: $v_x(t=0) = 0$ Berechnung von $u_x(z)$ für die gewählte Geländekategorie (hier GK III): $u_x(z) = u_x(10) \left(\frac{z}{10}\right)^{0,155}$	Anfangsbedingungen: $v_z(t=0) = 0$
Wahl einer Schrittweite für Δt (z.B. 0,025 s) Berechnung der Geschwindigkeit v_x für $t + \Delta t$: $v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + a_x(t) \cdot \Delta t$	Wahl einer Schrittweite für Δt (z.B. 0,025 s) Berechnung der Geschwindigkeit v_z für $t + \Delta t$: $v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + a_z(t) \cdot \Delta t$
Berechnung der horizontale Flugweite s_x für $t + \Delta t$: $s_x(t + \Delta t) = s_x(t) + v_x(t) \cdot \Delta t$	Berechnung des Fallweges h_z für $t + \Delta t$: $h_z(t + \Delta t) = h_z(t) + v_z(t) \cdot \Delta t$
erneute Berechnung von a_x mit $v(t + \Delta t)$ und $u_x(z)$	erneute Berechnung von a_z mit $v(t + \Delta t)$
Berechnung der Aufprallgeschwindigkeit v_p des Projektils: $v_p = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$	

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

$\rho_L = 1,29 \text{ kg/m}^3$ (Dichte der Luft)

Für den gewählten Modelkörper (Zylinder) ist:

$A = 0,1 \text{ m}^2$ (Querschnittsfläche)

$m = 10 \text{ kg}$ (Gewicht)

$c_w \sim 1,0$ (Widerstandsbeiwert)

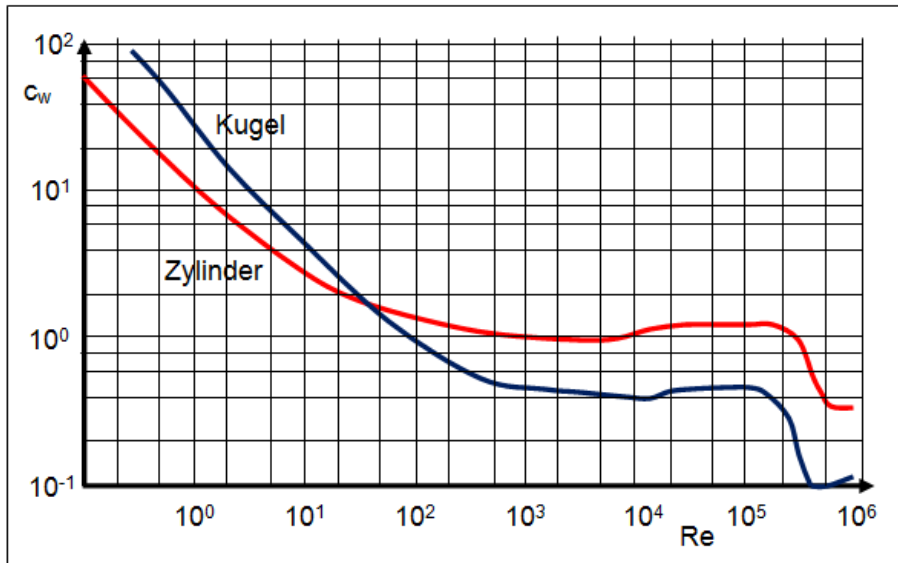
Der Widerstandsbeiwert eines Zylinders ist abhängig von der Reynoldszahl:

$$(50) \quad Re = \frac{u_x d}{\nu}$$

ν kinematische Viskosität von Luft: $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ (m}^2/\text{s)}$

Abbildung 87 verdeutlicht die Abhängigkeit des Widerstandsbeiwert c_w für verschiedene definierte Körper (Zylinder und Kugel) von der Re-Zahl.

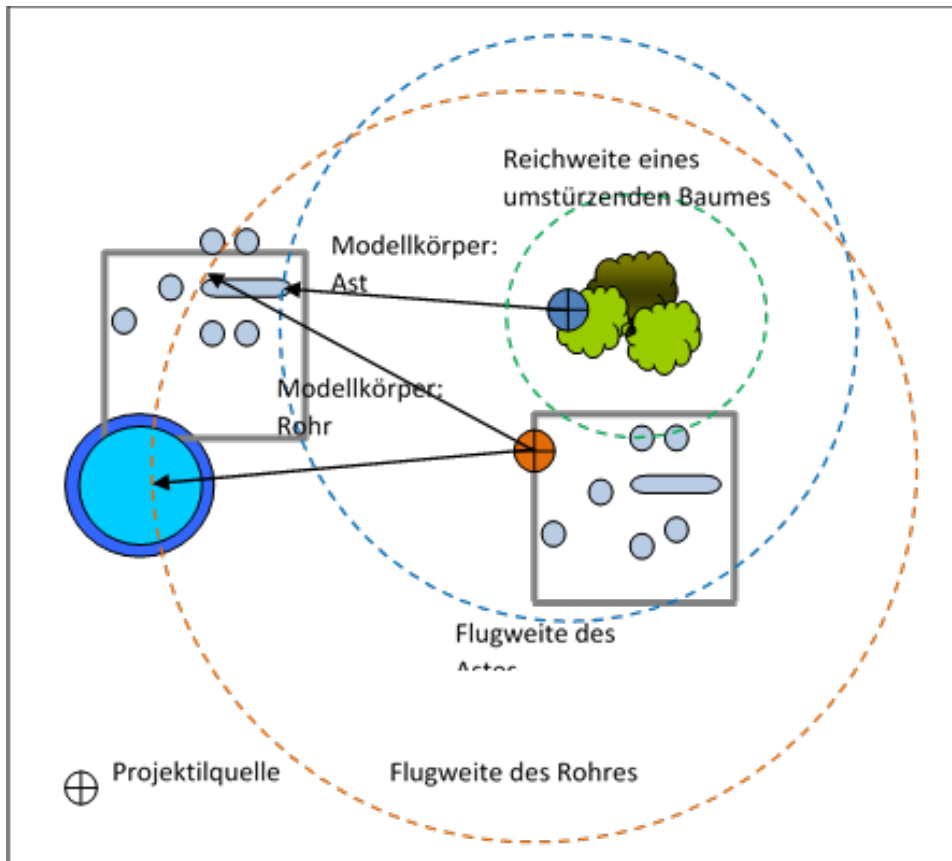
Abbildung 87: c_w -Wertermittlung in Anhängigkeit von der Reynolds-Zahl für eine Kugel und einen Zylinder



In Abschnitt 7.9 des Forschungsberichts wird eine Beispielrechnung vorgeführt.

Sind die Flugweiten in Abhängigkeit vom gewählten Projektil bekannt, können diese z.B. in einem Lageplan als Kreise eingetragen werden, wie die Abbildung 88 vereinfachend darstellt. Auf diese Weise kann abgeschätzt werden, welche Anlagenteile gefährdet sein könnten.

Abbildung 88: Berechnete Reichweiten unterschiedlicher Modellkörper



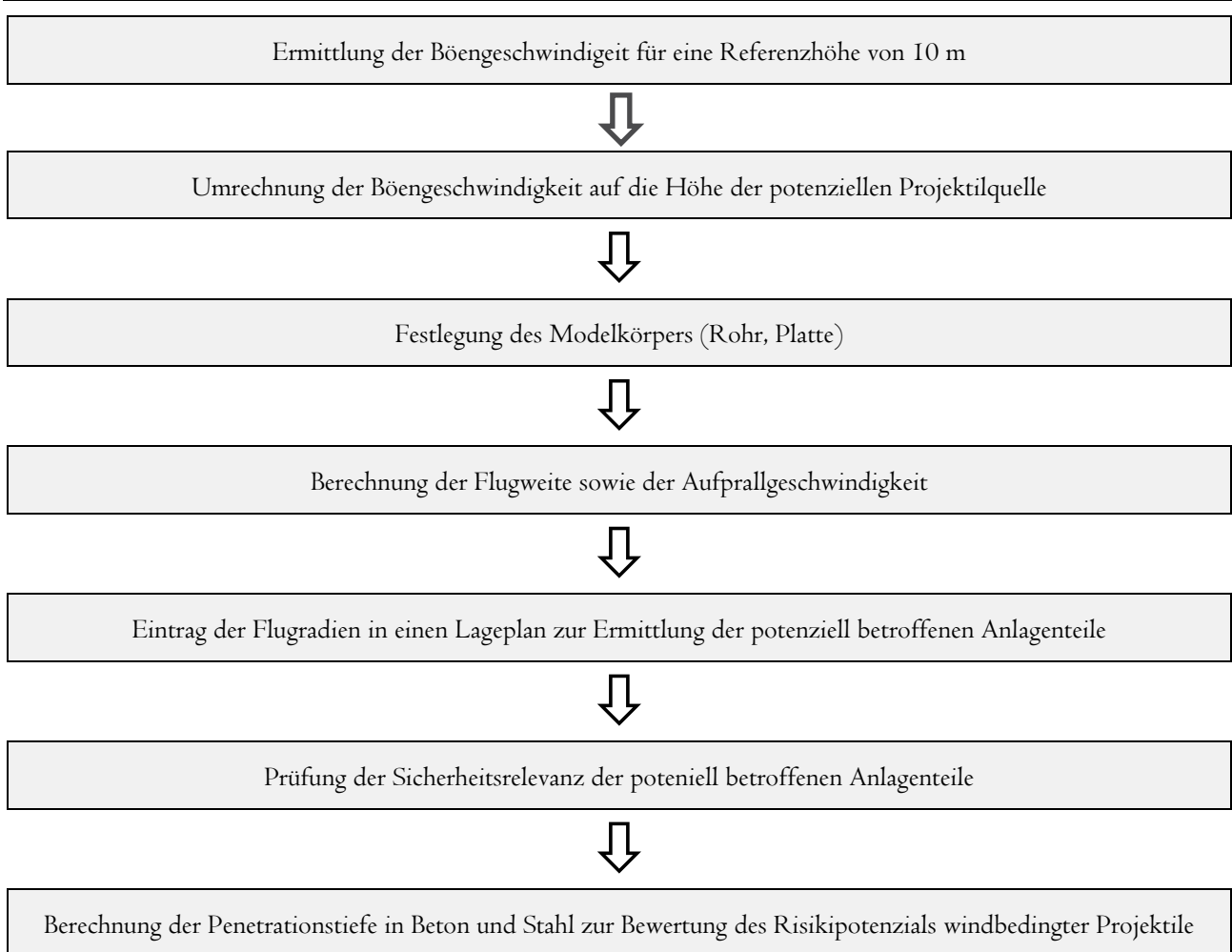
Nach Ermittlung der potenziell betroffenen Anlagenteile muss zunächst deren Sicherheitsrelevanz geprüft werden. Grundsätzlich sind dem Betreiber die sicherheitsrelevanten Betriebsbereiche bekannt. Anschließend müssen die Einwirkungen auf die betroffenen sicherheitsrelevanten Anlagenteile berechnet bzw. abgeschätzt werden. Hierzu gibt es Berechnungsgrundlagen (DOE-Standard 3014, 1996), die vom US Department of Energy für Betonwände entwickelt wurden. Die Einwirkungen auf Stahlwände können nach Berechnungsmethoden des Ballistic Research Laboratory bewertet werden (Dietrich 1976). Diese wurden ursprünglich zur Ermittlung der Wirkung von Trümmerteilen bei einem Flugzeugabsturz auf ein Atomkraftwerk entwickelt. Obwohl es sich hierbei um eine andere Aufgabenstellung handelt, wird auch hier der Effekt des Aufpralls eines Projektils auf eine Stahlwand beschrieben. Daher ist eine Übertragung der Ergebnisse in Form der Gleichung 51 zu rechtfertigen.

$$(51) \quad t_{\text{Stahl}} = K_{\text{Stahl}} \frac{m^{0,67}}{d} \left(\frac{v_p}{100}\right)^{1,33}$$

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

Ist die nach Gleichung (51) berechnete Stahlwanddicke t_{Stahl} größer als die tatsächliche Stahlwanddicke des Behälters, muss bei den angesetzten Bedingungen (Projektilmasse, Durchmesser und Aufprallgeschwindigkeit) von einer Freisetzung des gelagerten Stoffes ausgegangen werden. Eine Beispielrechnung für eine Destillationskolonne in Norddeutschland wird in Abschnitt 7 durchgeführt. Zusammengefasst ergibt sich für die detaillierte Gefahrenquellenanalyse durch windbedingte Projektile folgende Vorgehensweise:

Abbildung 89: Methodische Vorgehensweise einer Gefahrenquellenanalyse für windbedingte Projektile



1.4.2 Projektilflug bei Tornados

Als Grundlage für die Auslegung von Anlagen gegenüber der Gefahrenquelle „windbedingte Projektile“ wurden in den USA „Design-Tornados“ festgelegt. Mit Hilfe dieser „Design-Tornados“ werden auf der Grundlage der Windgeschwindigkeit Belastungen abgeleitet, nach denen in Verbindung mit den noch zu diskutierenden Modellprojektilen eine Auslegung für sicherheitsrelevante Anlagen und Anlagenteile zu erfolgen hat.

In den USA wurde eine Gefahrenkarte für Tornados entwickelt, in deren Zonen von unterschiedlich intensiven Tornados ausgegangen wird, Tabelle 33 zeigt die Einteilung der max. anzusetzenden Windgeschwindigkeiten entsprechend den Zonen I bis III (U.S. Nuclear Regulatory Guide 1.76, 2007). Ergänzt wurde die Tabelle 33 durch die Tornadostärken entsprechend der Fujita-Skala. Bei allen Tornados wurde ein Durchmesser von 91,4 m angesetzt. Hierbei ist zu beachten, dass sich der Durchmesser nicht vorhersagen lässt und diese Annahme aus einem Mittelwert der Schadenskorridore abgeleitet wurde (Konersmann 1976). Darüber hinaus ist in Tabelle 33 der Druckabfall angegeben, der sich von außen nach innen beim Tornado einstellt. Aufgrund dieses Druckabfalls werden z.B. Häuser regelrecht auseinander gerissen, wie es bei Explosionen der Fall ist.

Tabelle 33: Tornados-Charakteristiken (Design-Tornados)

Windzone	max. Windgeschwindigkeit v_{max} in m/s	v_{trans} in m/s	v_{rot} in m/s	max. Wirbeldurchmesser in m	Druckabfall in hPa	Tornadostärke (Fujita)
I	103	21	82	91,4	83	~ F4
II	90	18	72	91,4	63	~ F3
III	71	14	57	91,4	40	~ F2

In Deutschland wurde bislang keine amtliche Gefahrenkarte für Tornados veröffentlicht, so dass eine Zonierung wie in den USA derzeit nicht möglich ist. In Abhängigkeit von der Tornadostärke können die in der Tabelle 33 zusammengestellten Daten zur Auslegung von Anlagen herangezogen werden. Als Grundlage für die weiteren Berechnungen wird ein Tornado der Stärke F3 herangezogen, der auch in Deutschland mehrmals im Jahr auftreten kann.

Die FEMA 361 gibt für die einzelnen max. Windgeschwindigkeiten der Tornados auch Fluggeschwindigkeiten eines Modellkörpers (hier: Kantholz: 15 lbs 4 x 2 entspricht 6,8 kg, 5 cm x 10 cm mit einer Länge von ca. 2 m). Umgerechnet auf metrische Maße und eingesetzt in Tabelle 33 ergibt sich (Tabelle 34):

Tabelle 34: Projektilgeschwindigkeiten eines Kantholzes als Modellkörper nach FEMA 361

Windzone	maximale Windgeschwindigkeit v_{max} in m/s	horizontale Geschwindigkeit des Projektils in m/s	vertikale Geschwindigkeit des Projektils in m/s	Tornadostärke (Fujita)
I	103	44,7	30	~ F4
II	90	40,2	26,8	~ F3
III	71	38	25	~ F2

Während die äußeren Dimensionen des Kantholzes mit denen des Rohres als Modellkörper näherungsweise übereinstimmen, so unterscheiden sich beide Körper im Gewicht (6,8 kg für das Kantholz; 10 kg für das Stahlrohr). Für das Stahlrohr als Modellkörper liegen jedoch keine Angaben vor. Wie sich jedoch aus Gleichung (5) errechnen lässt, wäre die Beschleunigung des Stahlrohres ca. 2/3 der Beschleunigung des Kantholzes. Somit ergibt sich eine entsprechende Verminderung auch für die Geschwindigkeiten des Stahlrohres (Tabelle 35).

Tabelle 35: Projektilgeschwindigkeiten eines Stahlrohres als Modellkörper (10 kg, Durchmesser 10 cm)

max. Windgeschwindigkeit v_{max} in m/s	horizontale Geschwindigkeit des Projektils in m/s	vertikale Geschwindigkeit des Projektils in m/s	Tornadostärke (Fujita)
90	26,8	17,9	~ F3

Die Flugweite von Projektilen, die durch Tornados verursacht werden, können aufgrund der komplexen Windströmungen nicht oder nur unter großem Aufwand berechnet werden.

Da weder die Bildung von Tornados noch die Richtung eines Tornados genau vorhergesagt werden können, muss im Rahmen der Gefahrenquellenanalyse sowie der Vorsorgeplanung davon ausgegangen werden, dass alle sicherheitsrelevanten Anlagenteile durch Projektile gefährdet würden. Vor diesem Hintergrund ist eine genaue Kenntnis der Flugweiten von Projektilen, die von Tornados ausgelöst werden, nicht erforderlich.

Zusammengefasst und bezugnehmend auf Abbildung 89 kann festgestellt werden, dass für den Sonderfall eines Tornados bestimmte Windgeschwindigkeiten auf der Basis U.S.-amerikanischer Untersuchungen bzw. Codes für die jeweilige

Tornadostärke entsprechend der Fujitaskala festgelegt werden. Aufgrund der spezifischen Strömungsverhältnisse in einem Tornado lässt sich die Quellhöhe eines Projektils nicht bestimmen. Daher entfallen die ersten beiden Schritte in Abbildung 89 für die Projektilbetrachtung infolge eines Tornados. Die Berechnung der Flugweite ist nicht erforderlich, weil davon ausgegangen werden muss, dass alle Betriebsbereiche einer Anlage durch Projektilflug gefährdet wären.

2 Erkenntnisse über die Bedeutung des Klimawandels

(Stand November 2013)

2.1 Szenarien des Klimawandels

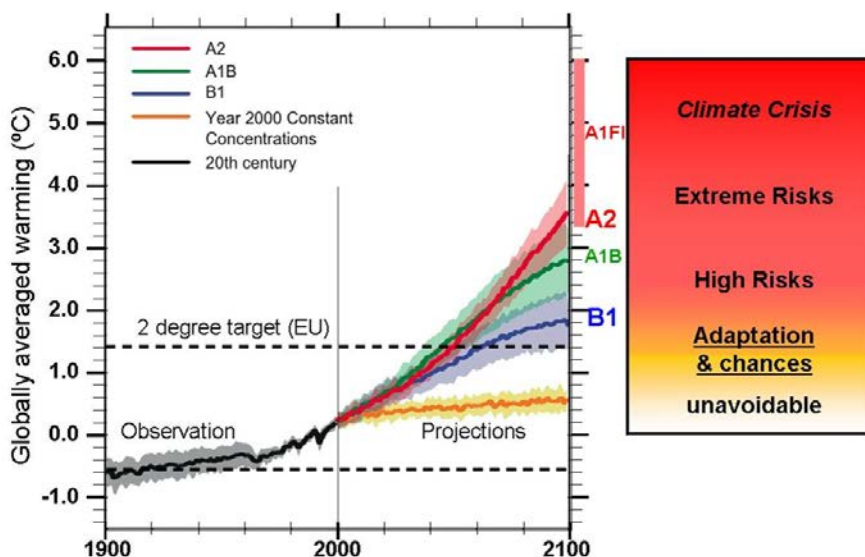
Die im laufenden Jahrhundert zu erwartende zukünftige Entwicklung des Klimas der Erde hängt wesentlich von den zu erwartenden Konzentrationen der Treibhausgase in der Atmosphäre ab. Die im Szenarienbericht des IPCC 2001 dargestellten Szenarien erfassen mögliche zukünftige Freisetzungen der Treibhausgase wie CO₂, Methan und andere auf der Basis unterschiedlicher Entwicklungen von Bevölkerung, Landnutzung und Wirtschaft. Die dafür gebräuchlichen Bezeichnungen A1, B1, A2 und B2 unterscheiden verschiedene Typen der wirtschaftlichen Entwicklung, Priorität der Ökonomie (A) oder der Ökologie (B) sowie mehr globale (1) oder eher mehr regionale (2) Abhängigkeiten. Derzeit werden neue Szenarien vom IPCC erarbeitet, da die aktuell festgestellten Emissionen von Treibhausgasen über den bisherigen Maximalszenarien liegen (Meinshausen et al. 2011). Für die in diesem Bericht beschriebenen möglichen Auswirkungen des Klimawandels liegen aber bisher nur relevante Ergebnisse auf der Basis der bisherigen Szenarien vor.

Die inzwischen mehr als 20 global rechnenden Klimamodelle zeigen für jedes Szenario etwas unterschiedliche Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung der Klimaparameter Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit etc., wobei der Leitparameter die globale Jahresmitteltemperatur an der Erdoberfläche ist. Die Rechnungen zeigen übereinstimmend für das laufende Jahrhundert einen globalen Temperaturanstieg um etwa 0,5 bis 8 °C, je nach angenommener Veränderung der relevanten atmosphärischen Spurenstoffe auf der Basis der Emissionsszenarien.

Die Klimamodelle berechnen auch die zukünftige Entwicklung weiterer Klimaparameter, sogenannte Projektionen z.B. von Temperatur- und Niederschlagsverteilung und Extremwerten.

Abbildung 90 zeigt links ein häufig gezeigtes Diagramm der mittleren globalen Erwärmung, wie sie zwischen 1900 und 2000 beobachtet wurde und wie sie sich nach den Emissionsszenarien B1, A1B und A2 bis 2100 weiterentwickeln könnte (IPCC 2007). Beim Vergleich des Klimas im Jahre 2100 mit demjenigen von 2000 ist in der Regel der Vergleich des Klimas der Zeitintervalle 2070-2100 und 1970-2000 gemeint. Nimmt man das Extremszenario A1FI mit der Bandbreite seiner Unsicherheiten hinzu, könnte der Temperaturanstieg von 1990 bis 2100 etwa 6°C betragen bzw. über 8°C nach neueren Berechnungen (Meinshausen et al. 2011). Ergänzt ist das Diagramm um das mittlerweile allgemein akzeptierte Zwei-Grad-Ziel der EU, das an der Untergrenze der Temperaturprojektionen liegt sowie um eine kompilierende Bewertung der sich nach IPCC (2007) und Smith et al. (2009) ergebenden Risikobereiche für mögliche Auswirkungen der globalen Erwärmung (Stock 2010).

Abbildung 90: Globale Erwärmung an der Erdoberfläche in °C (relativ zu 1980 -1999) für die Szenarien A2, A1B und B1.



Die derzeit erreichte globale Erwärmung von nahezu 0,9°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau ist nach dem Stand der Forschung zum überwiegenden Teil auf die Erhöhung des Treibhauseffekts infolge anthropogener Emissionen von Treibhausgasen zurückzuführen. Bereits bei diesem Zwischenstand im Klimawandel gibt es eine Fülle von Beobachtungsdaten zu regionalen Veränderungen des Klimas weltweit mit daraus resultierenden physikalischen, geologischen und biologischen Folgewirkungen. Der letzte Bericht des IPCC (2007) enthält auch eine Fülle von Daten zu bereits dokumentierten Folgen der Erwärmung im Zeitraum 1970 bis 2004. So sind z.B. auch mit der beobachteten Erwärmung konsistente Veränderungen bei extremen Wetterphänomenen zu verzeichnen. Es betrifft zunehmende Temperaturextreme, Hitze- und Dürreperioden, zunehmende Starkniederschläge sowie Stürme. Hierzu gibt es auch einen Spezialbericht zu Extremereignissen (IPCC 2011). Die Münchener Rückversicherung berichtet in ihren Jahresrückblicken zu Naturkatastrophen über den Anstieg der Anzahl und Auswirkungen von Extremereignissen mit meteorologischen, hydrologischen und schleichenden klimatologischen Ursachen, deren Zahl sich seit 1980 verdreifacht hat (MunichRe 2011).

Die Zahl der durch Stürme verursachten Naturkatastrophen hat sich mehr als verdoppelt. Auch wenn nichtklimatische Faktoren gerade beim Schadensausmaß eine wichtige Rolle spielen und sich einzelne Katastrophen kaum direkt auf klimatische Veränderungen zurückführen lassen, gibt es im Gesamtbild viele Indizien für den zunehmenden Anteil des Klimawandels. Es ist daher zu erwarten, dass sich die meisten Trends entsprechend der weiteren Erwärmung zukünftig fortsetzen werden.

2.2 Methoden der Analyse regionaler Klimaänderungen und Extremereignisse

Zur Berechnung von Klimaänderungen werden Klimamodelle eingesetzt, die in der Regel auf Weiterentwicklungen von Wettermodellen aufbauen und neben der atmosphärischen Zirkulation weitere diese beeinflussende Faktoren berücksichtigen, wie z.B. ozeanische Strömungen, Vegetation-, Schnee- und Eisflächen. Der Vergleich der mit Klimamodellen simulierten Entwicklung in der Vergangenheit mit Beobachtungsdaten dient einerseits der Modellvalidierung und andererseits der Reanalyse extremer Ereignisse, wie Hitzewellen, Starkregenereignissen oder extremen Stürmen. Die Simulation zukünftiger Entwicklung erfolgt mit validierten Modellen.

Die räumliche Auflösung eines Globalen Klimamodells (GCM) ist mit einer horizontalen Gitterweite in der Größenordnung von 100 km noch zu grob, um für regionale Auswirkungen von Extremereignissen differenzierte Aussagen treffen zu können. Daher werden verschiedene statistische oder dynamische Verfahren der Regionalisierung verwendet, um mit Regionalen Klimamodellen (RCM) räumlich bessere Auflösungen zu erreichen, die sinnvollerweise in der Größenordnung von 10 km liegen.

In Deutschland werden vor allem die folgenden vier Regionalen Klimamodelle eingesetzt:

1. CCLM: Climate Limited-area Modeling-Community; <http://www.clmcommunity.eu>
2. REMO: MPI Hamburg (Jacob et al. 2008)
3. STAR: PIK Potsdam (Orlowsky et al. 2008)
4. WETTREG: CEC Potsdam (Spekat et al. 2007)

Alle Regionalmodelle mit Ausnahme von STAR benötigen ein Globales Klimamodell (GCM) als externen Antrieb für die Klimaänderungsinformation, z.B. das Hamburger GCM ECHAM5. Ein Multimodellantrieb kann die Übertragung möglicher Fehler von einem Modelllauf auf die Regionalmodelle vermeiden. STAR vermeidet dies indem ein Temperaturextremwert vorgegeben wird, wie er sich beispielsweise aus einer Multimodellrechnung mit GCMs ergibt. Die regionalen und lokalen Auswirkungen ergeben sich erst aus der Kopplung der Klimamodelle mit Wirk- oder Schadenmodellen, die eine räumlich höher auflösende Eingrenzung der Wirkungen ermöglichen.

CCLM und REMO sind numerische Regionale Klimamodelle, das heißt, sie berechnen wie die Globalen Klimamodelle in Zeitschritten die dynamische Veränderungen verschiedener Größen für zahlreiche Punkte eines drei-dimensionalen Gitters, aber mit höherer Auflösung. STAR und WETTREG sind dagegen statistische Regionale Klimamodelle. Diese analysieren mittels statistischer Verfahren die Beziehungen zwischen den Klimaparametern aus Daten von Klimastationen für vergangene Zeitabschnitte. Das Klima einer Region wird aus den Stationsdaten interpoliert, deren Abstand die

räumliche Auflösung bestimmt. Zukünftige Klimaszenarien der Region werden dann auf der Basis dieser statistischen Beziehungen simuliert.

Mit der Regionalisierung der zu erwartenden Klimaänderung beim Übergang von globalen zu regionalen Klimamodellen und Klimaszenarien verbinden sich folgende Vorteile:

1. Höhere räumliche Auflösung der Klimaszenarien zumindest bei den Mittelwerten der Klimagrößen; bei den Extremwerten ist dies aber schwieriger.
2. Bezug zu lokal auftretenden Auswirkungen durch Kopplung mit Geodaten, beobachteten Schäden und Wirkmodellen. Dies liefert in der Regel erst die wesentlichen Randbedingungen hinsichtlich einer größeren räumlichen Auflösung.
3. Validierung der Simulationsergebnisse von Klimagrößen und Auswirkungen für zurückliegende Zeiträume durch Vergleich mit Beobachtungsdaten.
4. Entwicklung statistischer Aussagen für zukünftige Klimagrößen und Auswirkungen, insbesondere für Extreme, durch eine große Zahl verschiedener Simulationsläufe (Realisierungen) und Transformation von Unsicherheiten in statistische Bandbreiten.

Verschiedene Realisierungen zukünftiger Klimaentwicklungen erhält man mit Ensembles verschiedener Modelle oder auch mit leicht unterschiedlichen Startbedingungen eines Modells. Dieser Multi-Modell-Ansatz erlaubt, die Unsicherheit der berechneten Ergebnisse besser abzuschätzen. Folgende Arten der Unsicherheit werden berücksichtigt:

1. Szenarien-Unsicherheit durch verschiedene Pfade möglicher Emissionen von strahlungsaktiven Substanzen (Treibhausgase, Staub, Ruß und Aerosole).
2. Bandbreiten-Unsicherheit der verschiedenen Globalen Klimamodelle und der in ihnen implementierten Randbedingungen mit unterschiedlich empfindlichen Reaktionen auf die Emissionen der strahlungsaktiven Substanzen.
3. Bandbreiten-Unsicherheit der Regionalisierung durch verschiedene Regionale Klimamodelle und verschiedene Rechenläufe (Realisierungen).
4. Stichproben-Unsicherheit durch die willkürliche Auswahl einer Klimaperiode (30 Jahre) als Modellklima sowohl bei der Kontrollrechnung der Vergangenheit (1961-1990) als auch bei der Simulationsrechnung des zukünftigen Klimas.

Die Unsicherheiten sind für den Parameter Temperatur am kleinsten und sind für andere Klimaparameter wie den Niederschlag oder insbesondere die Windgeschwindigkeit z.T. deutlich größer (Stock et al. 2009). Böen beispielsweise lassen sich nicht durch Modelle erfassen und müssen durch einen Böenfaktor nachträglich Berücksichtigung finden. Die Unsicherheiten sind auch für Extremwerte und Extremereignisse deutlich größer als für die Mittelwerte der Klimaparameter und zwar umso größer je geringer die Eintrittswahrscheinlichkeit ist (Jonas et al. 2005).

2.3 Beobachtete und erwartete Veränderungen bei außertropischen Stürmen

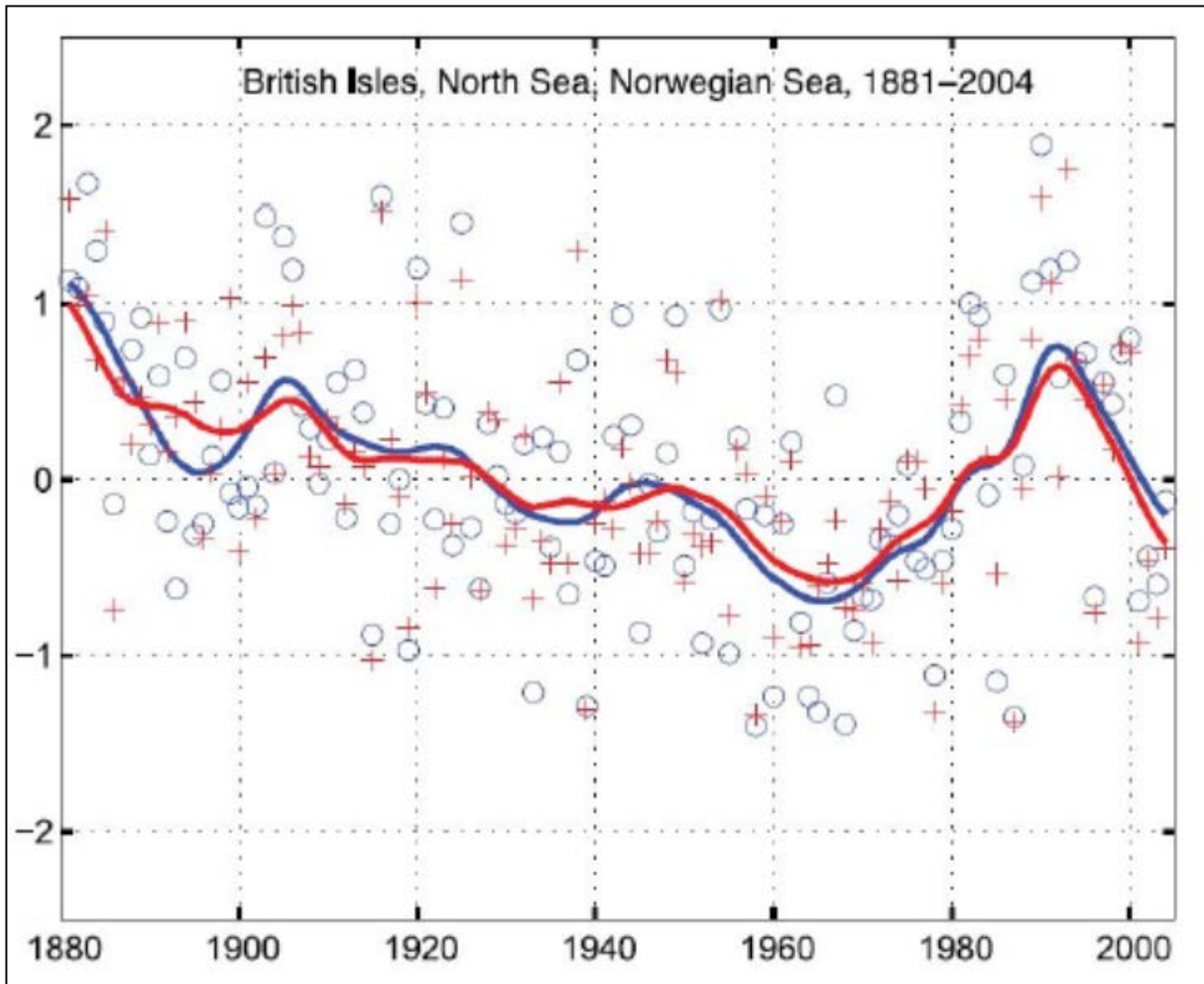
Während sich bei tropischen Wirbelstürmen (Hurrikan, Taifun, Zyklon) über die Zunahme der Temperatur der Wasseroberfläche und damit der globalen Erwärmung ein Anstieg der Sturmstärke abzeichnet, scheint dies für die in unseren Breiten vor allem im Winter schadenswirksamen außertropischen Stürme nicht der Fall zu sein.

Stürme werden häufig durch einen Sturmindex charakterisiert, der als skalares Maß der zusammengefassten Sturmbedingungen über dem europäischen Kontinent (oder einem Teilgebieten davon) zu einem festen Zeitpunkt dient. Dies erfolgt meist auf der Basis meteorologischer Größen, wie z.B. des (räumlichen) Mittelwerts der Amplitude des geostrophischen Windes oder des 95% Perzentils, könnte aber auch Faktoren der Schadensempfindlichkeit einschließen.

Abbildung 91 zeigt die Entwicklung der Sturmstärke über Teilen Nordwesteuropas und der Nordsee Küste von 1881 bis 2004 (Trenberth et al. 2007), weiterentwickelt aus Alexandersson et al (2000). Dargestellt sind das 95% Perzentil (blaue Kreise) und das 99% Perzentil (rote Kreuze) sowie dekadische Mittelwerte des geostrophischen Windes an Messstationen. Neben einer quasiperiodischen Veränderung im Rhythmus der Nordatlantischen Oszillation (NAO) ist eine

Abnahme der Sturmstärke bis 1970 mit einer anschließenden Zunahme bis etwa 1990 zu verzeichnen. Dies ist nicht hinreichend geeignet, einen Zusammenhang zwischen Sturmentwicklung und bisherigem Klimawandel zu erkennen.

Abbildung 91: Sturmindex für die Britischen Inseln, die Nordsee und die norwegische Küste von 1881 bis 2004

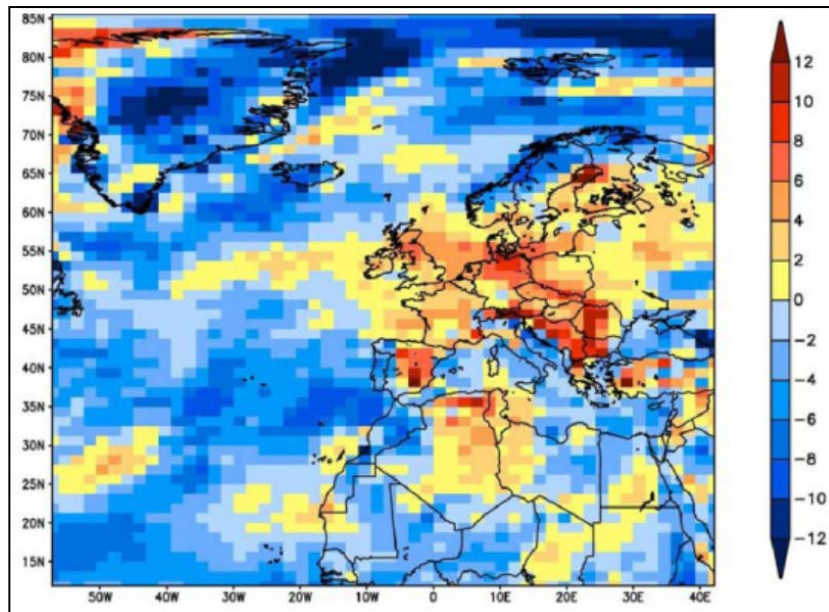


Zu einem ähnlichen Resultat kommen Albrecht et al. (2008), die vor dem Hintergrund großer Schäden in der Forstwirtschaft infolge mehrerer extremer Stürme über Europa eine Literaturübersicht zum möglichen Zusammenhang mit dem Klimawandel verfasst haben. Die Analyse stützt sich auf Literaturquellen wie beispielsweise von Gardiner & Quine (2000). Der folgende Abschnitt zur zukünftigen Entwicklung von Stürmen wurde der Arbeit von Albrecht et al. (2008) nahezu wörtlich übernommen.

Zur Analyse der zukünftigen großräumigen Zirkulation in der Nordhemisphäre und Sturmaktivität über der nordatlantisch-europäischen Region wurde eine Vielzahl von Modellsimulationen durchgeführt (Donat 2010, Donat et al. 2011). Die Ergebnisse dieser Simulationen fallen nicht alle gleich aus, da die den Modellsimulationen zugrunde gelegten verschiedenen Klimawandelszenarien (z. B.: SRES A2, A1B1, B2) des Intergovernmental Panel on Climate Change (Donat 2010) neben unterschiedlichen Modelleigenschaften die Simulationsergebnisse beeinflussen.

Abbildung 92 zeigt ein Beispiel für die mit globalen Klimamodellen berechneten Ergebnisse zur Sturmentwicklung über Europa bis 2100 (Woth & von Storch 2008). Es ergibt sich ein regional sehr differenziertes Bild mit einer möglichen Zunahme der Sturmereignisse über der Deutschen Bucht und Norddeutschland.

Abbildung 92: Änderung der Starkwindereignisse in Prozent für Wintermaxima im Szenario A2 zum Ende des 21ten Jahrhunderts (Änderungen von 2071---2100 gegenüber 1961---1990)



Die Studienlage zur zukünftigen Entwicklung außertropischer Stürme ist nach Albrecht et al. (2008) zweigeteilt: Die Ergebnisse einer großen Anzahl von Untersuchungen (Knippertz et al. 2000, Leckebusch et al. 2004, Bengtsson et al. 2006a, Lambert et al. 2006, Leckebusch et al. 2006, Pinto et al. 2006, Pinto et al. 2007a, Pinto et al. 2007b) lassen den Schluss zu, dass die Anzahl extremer Stürme über der nordatlantisch-europäischen Region steigt und die Anzahl schwacher Tiefdruckgebiete zurückgehen könnte. Dabei ist die Zunahme extremer Sturmereignisse mit einer größeren Zahl intensiverer Tiefdruckgebiete verbunden. Zudem wird die interannuelle Variabilität extremer Stürme ansteigen und zu einem höheren Sturmrisiko führen (Leckebusch et al. 2007, Pinto et al. 2007a). Im Gegensatz dazu deuten die Ergebnisse weiterer Untersuchungen (Lambert 1995, Beersma et al. 1997, Zhang & Wang 1997, Kharin & Zwiers 2000, Finnis et al. 2007) auf eine Abnahme der Sturmaktivität über Europa bzw. in der nördlichen Hemisphäre hin.

Unterschiedliche Ergebnisse gibt es auch für die Zusammenhänge zwischen den zukünftigen Zugbahnen von Stürmen und der Sturmaktivität über Europa. Die Änderung der Sturmaktivität steht dabei nicht immer im Zusammenhang mit einer Verlagerung der Zugbahnen von Stürmen. So wurde in einer Studie beispielsweise keine zukünftige Nordverlagerung der atlantischen Zugbahnen festgestellt, wohl aber ein Zusammenhang zwischen erhöhter Sturmhäufigkeit und ansteigenden Treibhausgaskonzentrationen (Lambert & Fyfe 2006). Es gibt jedoch auch Anhaltspunkte für eine Nordverlagerung der Zugbahnen von Stürmen über dem Nordatlantik sowie für eine Abschwächung der Zugbahnen über dem Mittelmeerraum (Bengtsson et al. 2006b).

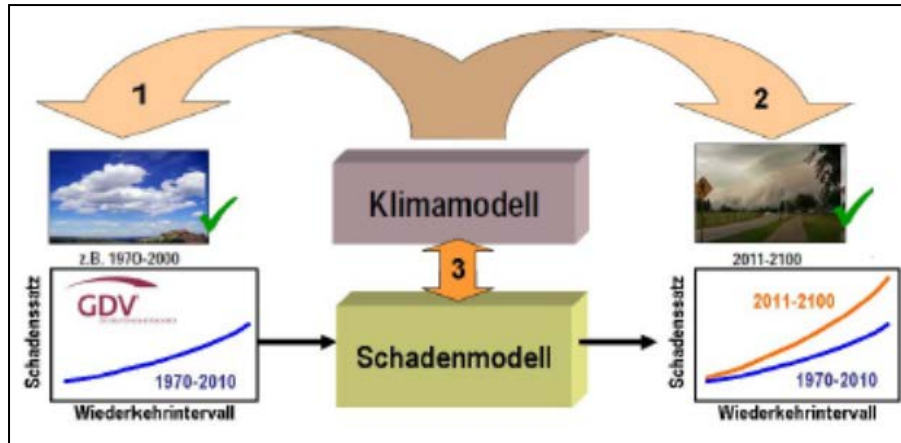
Im Hinblick auf die Saisonalität von Stürmen zeichnet sich tendenziell eine Abnahme von Stürmen in den Sommermonaten Juni bis August ab (Walter et al. 2006), während mehrheitlich mit einer Zunahme von Winterstürmen von Dezember bis Februar gerechnet wird (Giorgi et al. 2004, Walter et al. 2006, Beniston et al. 2007, Hanson et al. 2007, Pinto et al. 2007a, Pinto et al. 2007b). Weiter ist eine leichte Verschiebungstendenz von Winterstürmen in den Herbst (Oktober) zu beobachten (Hanson et al. 2007, Ulbrich et al. 2008). In einer Studie treten im Sommer allerdings deutliche Unterschiede in den Modellergebnissen auf, da im Sommer lokale Effekte und deren modellmäßige Beschreibung an Bedeutung gewinnen (Giorgi et al. 2004).

2.4 Auswirkungen des Klimawandels auf Sturm- und Hagelschäden in Deutschland

Im Auftrag des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) hat das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) zusammen mit Klimaforschern der Freien Universität (FU) Berlin die wetterbedingten Schäden der

letzten Jahrzehnte mit unterschiedlichen Klimamodellen verknüpft und auf dieser Basis konkrete Schadensszenarien für die Zukunft ermittelt (Gerstengarbe 2011). Das Hauptaugenmerk lag dabei auf den in Deutschland am häufigsten auftretenden Naturkatastrophen: Sturm und Hagel sowie Hochwasser. Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung 93 dargestellt.

Abbildung 93: Methode zur Abschätzung der zukünftigen Häufigkeit von Schadensereignissen im Klimawandel



(1) Validierung des Klimamodells, (2) Projektion zukünftiger Klimaänderung, (3) Kopplung von Klima- und Schadenmodell auf der Basis von Schadensdaten

Verschiedene Klimamodelle werden zur gegenseitigen Absicherung der Ergebnisse eingesetzt und mit den Schadensdaten der Deutschen Versicherer zu Extremereignissen wie Sturm und Hagel verknüpft. Erst durch diese Verknüpfung lassen sich räumlich und zeitlich aufgelöste Ergebnisse für Sturmereignisse erzielen, da die Klimamodelle allein zu unsichere Ergebnisse liefern. Die FU Berlin verwendet dabei ein dynamisches, das PIK ein statistisches Modell. Zwei Schritte sind zur Ermittlung zukünftiger Schäden durch Stürme erforderlich:

1. Resimulation der bekannten Vergangenheit und Reanalyse vergangener Extremereignisse.

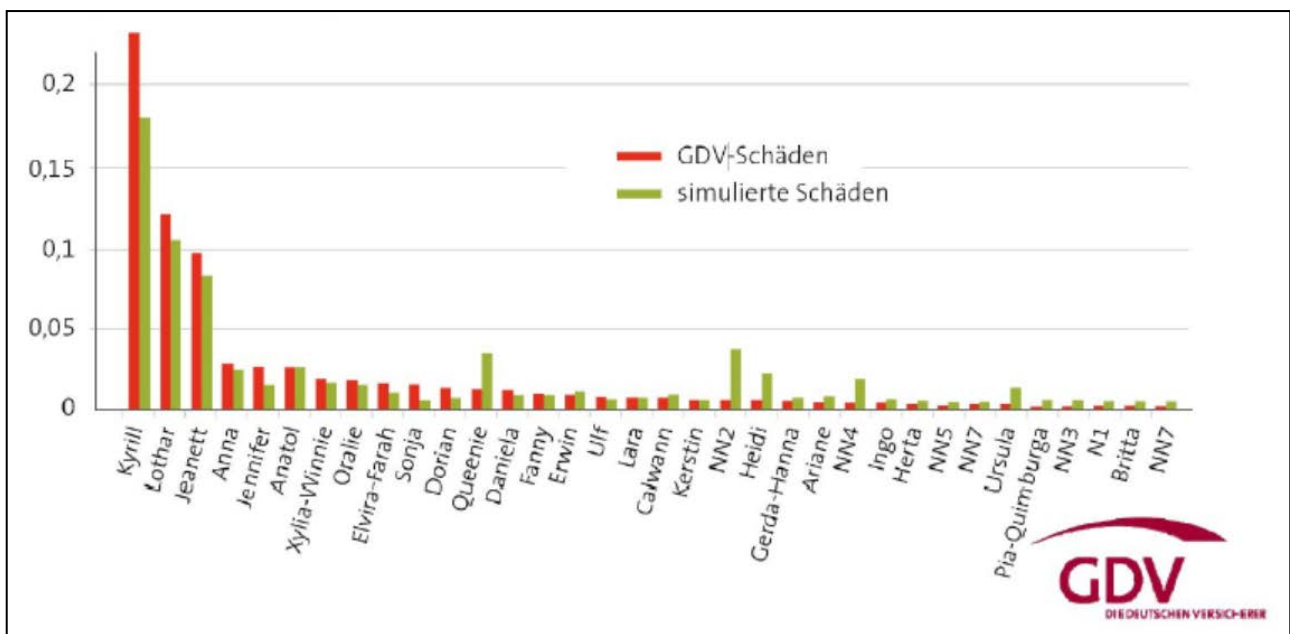
Es wird untersucht, wie das schadenswirksame Wettergeschehen von den Modellen abgebildet wird. Wenn diese die Vergangenheit zuverlässig abbilden können, dann kann angenommen werden, dass auch die Zukunft plausibel abgebildet wird.

2. Simulation der zukünftigen Klima- und Schadensentwicklung mit den Modellen.

Durch Vergleich der Häufigkeit des Eintretens von Schäden unterschiedlicher Höhe in Vergangenheit und Zukunft erhält man Aussagen zur Veränderung von Wiederkehrintervallen.

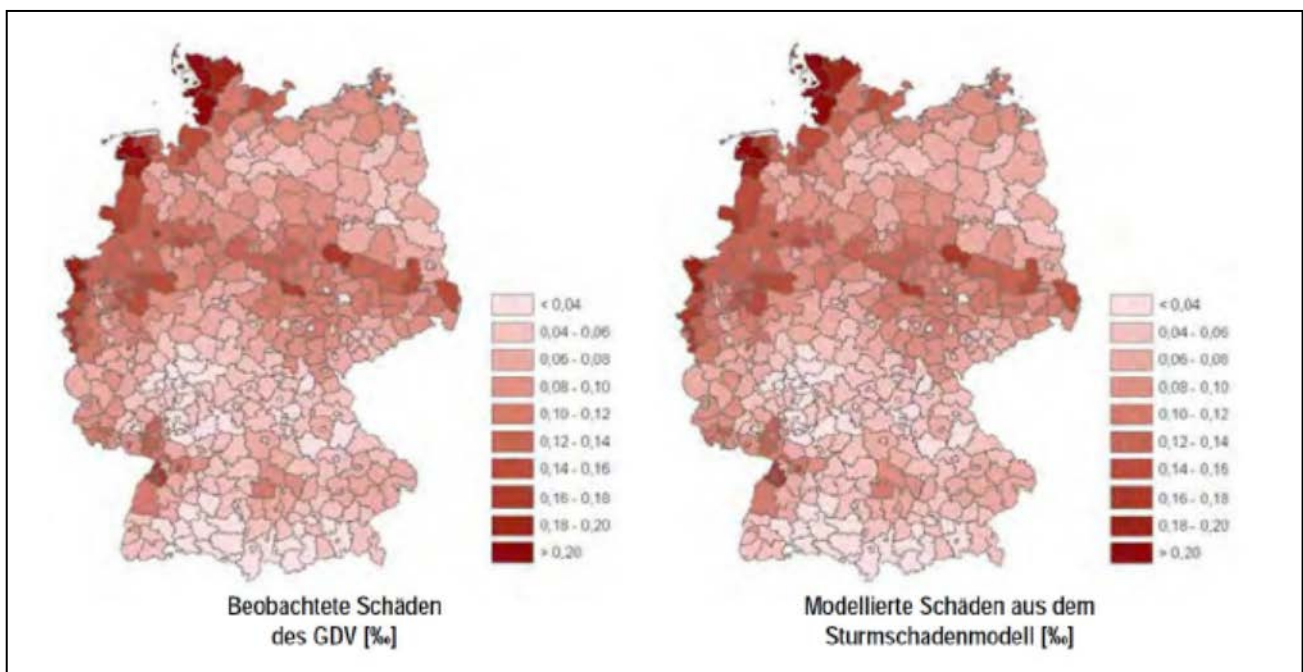
Für das dynamische Modell der FU Berlin sind die Ergebnisse der Resimulation in den Abbildung 94 und Abbildung 95 dargestellt. Das Modell ist in der Lage, die Schäden der großen Sturmereignisse der Vergangenheit sehr gut abzubilden und zeigt auch bei der räumlichen Zuordnung der Schäden eine hohe Übereinstimmung mit GDV-Schadensdaten (Korrelation 0,98) – die Validierung des Modells ist erfolgreich. Das gilt auch für das statistische Modell des PIK.

Abbildung 94: Modellvalidierung des dynamischen Sturmschadenmodells der FU Berlin durch Vergleich beobachteter und simulierter Schäden einzelner Sturmereignisse mit hoher Übereinstimmung der Schadenhöhen (Schadensatz ‰ des GDV)



(Gerstengarbe 2011)

Abbildung 95: Modellvalidierung des dynamischen Sturmschadenmodells der FU Berlin durch Vergleich der räumlichen Verteilung beobachteter und simulierter mittlerer jährlicher Schadensätze im Winterhalbjahr, Zeitraum 1997-2007.

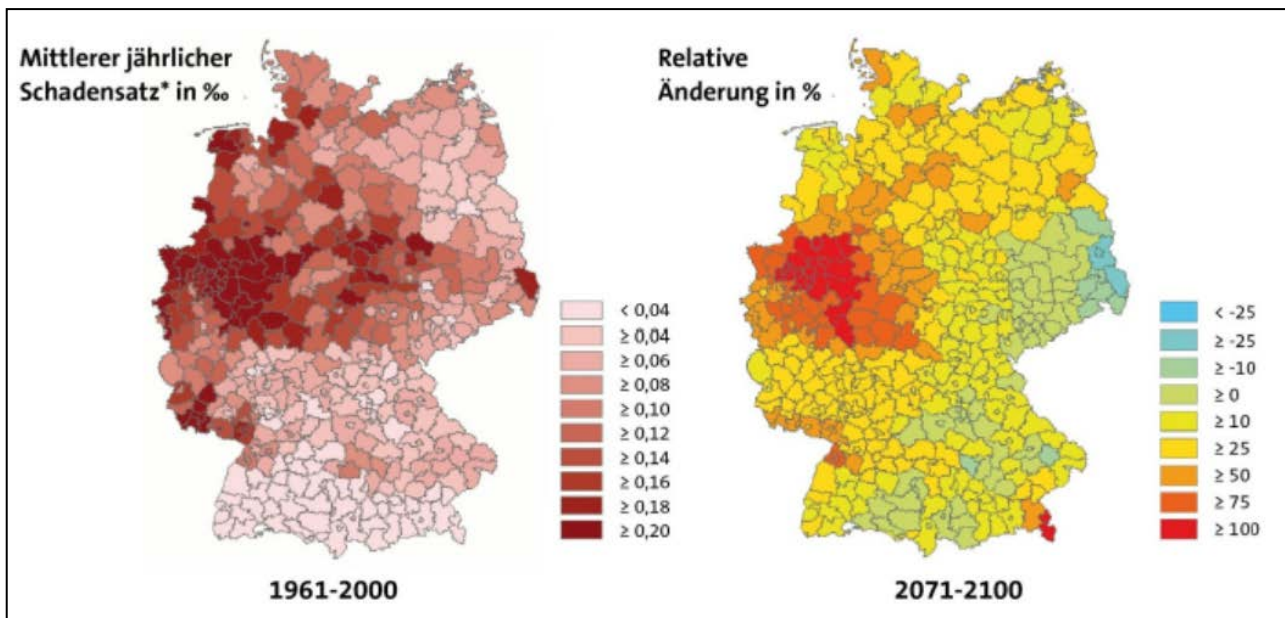


(Gerstengarbe 2011)

Als Ergebnis der Simulation der zukünftigen Entwicklung der Winterstürme mit dem dynamischen Modell der FU Berlin zeigt Abbildung 96 die relativen Änderungen der Schäden im AIB Szenario im Zeitraum 2071-2100 gegenüber den

in der Referenzperiode 1961-2000. Es ist eine deutliche regional unterschiedliche Zunahme der Auswirkungen durch Winterstürme zu erwarten, in einigen Regionen um 100 % gegenüber heute.

Abbildung 96: Relative Änderungen der Schäden durch Winterstürme im A1B-Szenario 2071-2100 gegenüber den mit dem Modell der FU Berlin simulierten Schadensätzen im Zeitraum 1961-2000.



(Gerstengarbe 2011)

Das statistische Modell des PIK ordnet die Schäden, die durch außertropische Stürme vorwiegend im Winter entstehen, und die durch Hagel, die vor allem im Sommer zu verzeichnen sind, den Versicherungsbezirken in Deutschland zu. Abbildung 97 zeigt die zu erwartende Schadensentwicklung in näherer (2011-2040) und fernerer Zukunft (2041-2070). Ein Ergebnis ist, dass Schäden durch Stürme im Winter vor allem in Südwestdeutschland stark zunehmen werden und zwar zwischen 20 und 40%.

Ein weiteres aus Abbildung 97 abzulesendes Ergebnis ist eine zu erwartende drastische Zunahme von Gewittersturm- und Hagelschäden im Sommer, vor allem in Nordostdeutschland und zwar bis 2070 um über 60% gegenüber der Referenzperiode.

Beide Modelle zeigen ähnliche Trends zur zukünftigen Zunahme von Sturmschäden in Deutschland, dargestellt durch eine drastische Verkürzung der Wiederkehrintervalle in Abbildung 98 (dynamisches Modell der FU Berlin) und Abbildung 99 (statistisches Modell des PIK). Dargestellt sind versicherte Jahresschäden in der Referenzperiode und Erwartungen für die Zukunft unter dem A1B-Szenario.

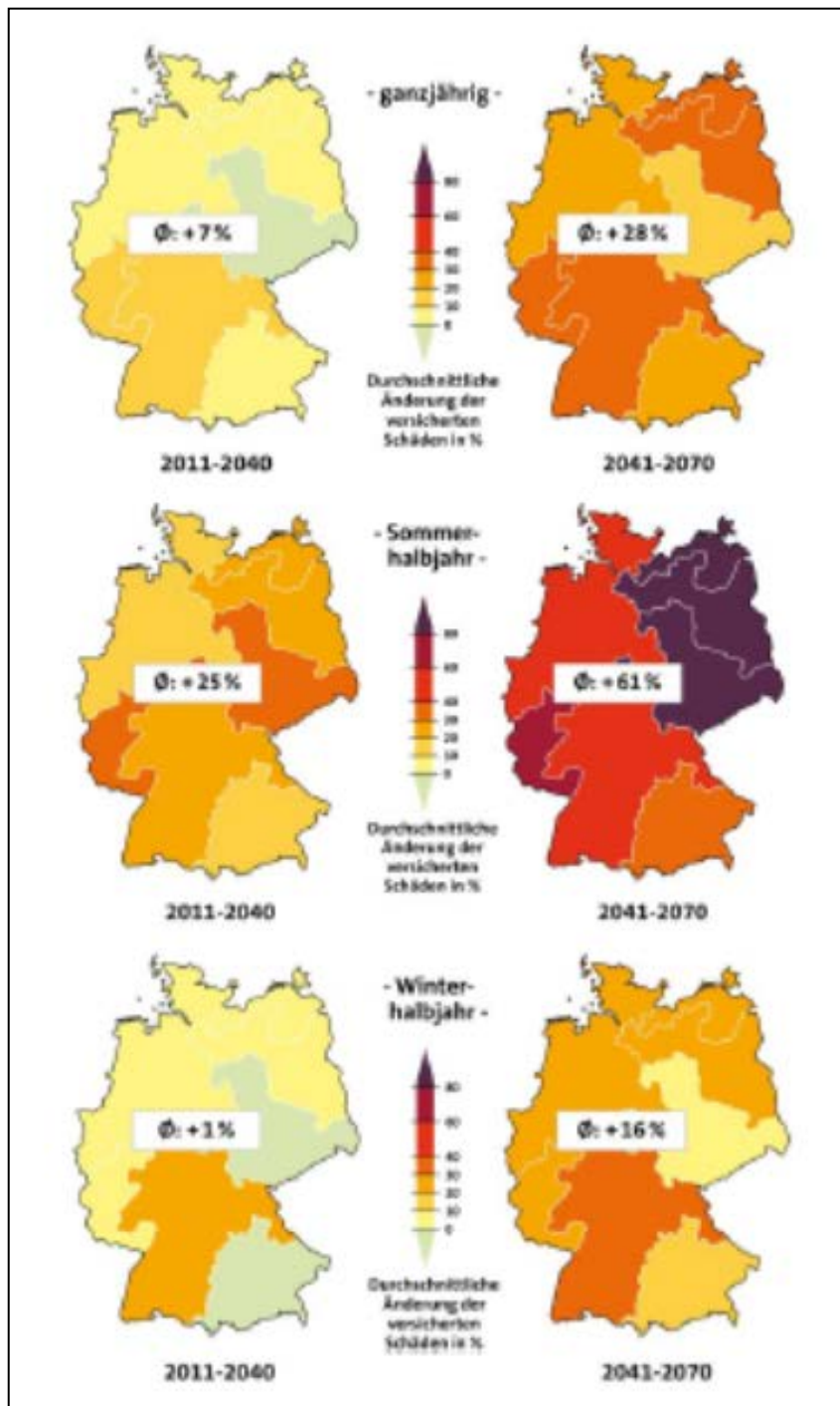
Das dynamische Modell der FU Berlin ermittelt eine drastische Verkürzung der Wiederkehrperioden 1971-2000 vs. 2071-2100:

1. 20-jährliche Schäden werden zu 6-jährlichen Schäden,
2. 50-jährliche Schäden werden zu 9-jährlichen Schäden,
3. 100-jährliche Schäden werden 12-jährlichen Schäden.

Die Verkürzung der Wiederkehrperioden 1971-2000 vs. 2041-2070 beim statistisches Modell des PIK ist ähnlich drastisch, wenn auch etwas geringer:

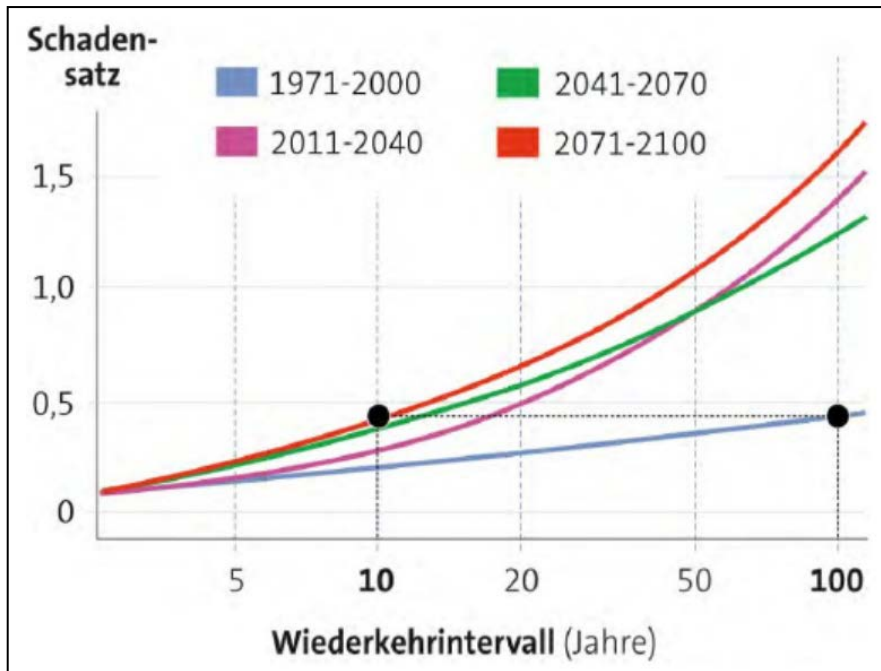
1. 20-jährliche Schäden werden zu 10-jährlichen Schäden,
2. 50-jährliche Schäden werden zu 25-jährlichen Schäden.

Abbildung 97: Räumliche Verteilung der Schadensätze in Deutschland und deren Änderungen im A1B-Szenario in näherer und fernerer Zukunft gegenüber 1984-2008,



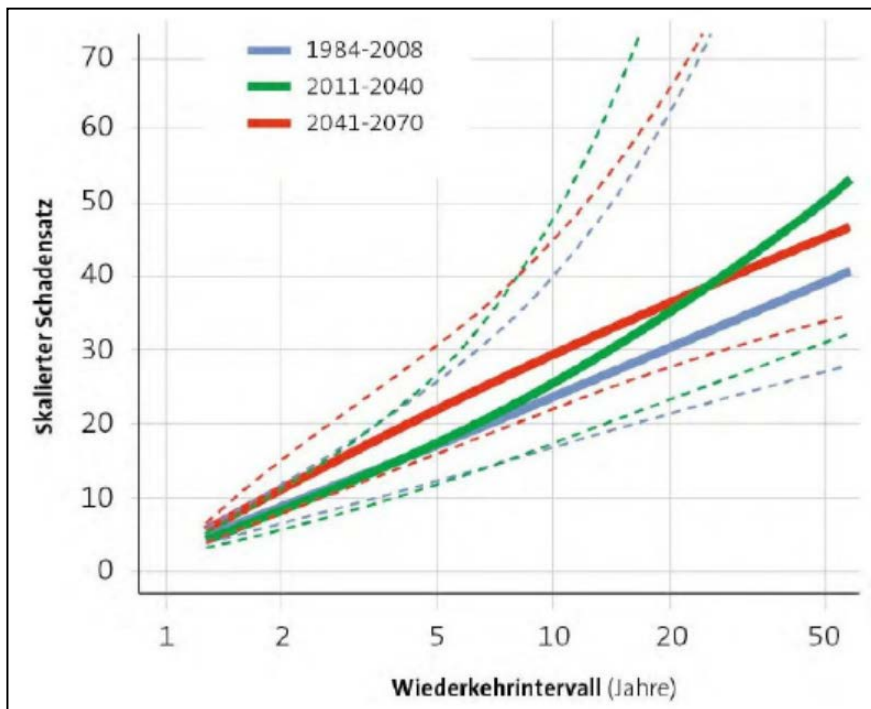
Abgeleitet mit dem statistischen Schadenmodell Sturm-/Hagel des PIK; Mittelwerte des 30-jährigen Zeitraums (Gerstengarbe 2011)

Abbildung 98: Verkürzung der Wiederkehrperioden versicherter Jahresschäden durch Wintertürme der Referenzperiode 1971- 2000 in der Zukunft bis 2100 unter dem A1B-Szenario.



Abgeleitet mit dem dynamischen Schadenmodell der FU Berlin (Gerstengarbe 2011)

Abbildung 99: Verkürzung der Wiederkehrperioden versicherter Jahresschäden der Referenzperiode 1971-2000 in der Zukunft bis 2070 unter dem A1B-Szenario.



Abgeleitet mit dem statistischen Schadenmodell für Sturm und Hagel des PIK (Gerstengarbe 2011)

2.5 Risikobeeinflussende Faktoren für Schneelasten im Klimawandel

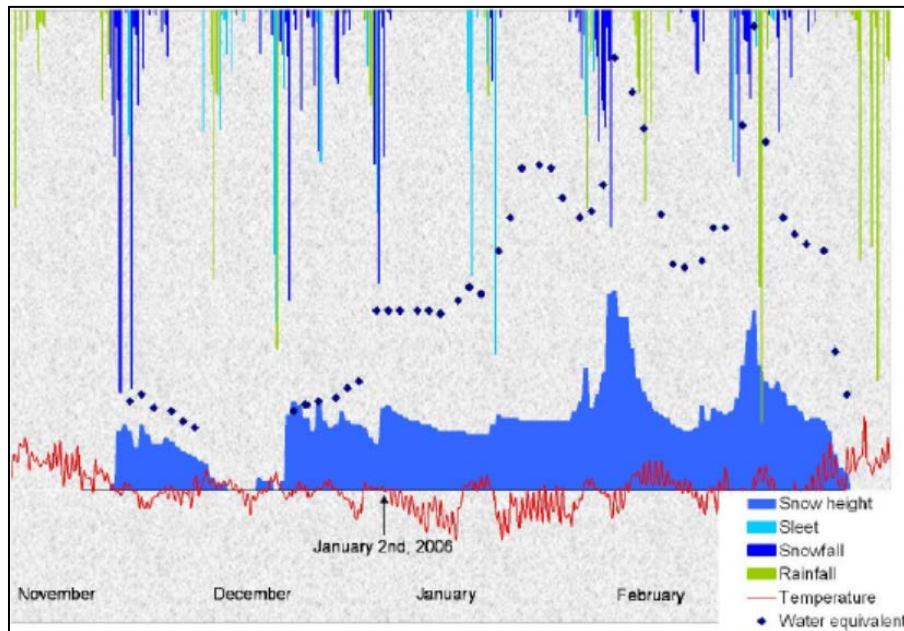
Vor dem Hintergrund verschiedener außergewöhnlicher Wetterlagen in mehreren Wintern der letzten zwei Jahrzehnte, die vereinzelt zu außergewöhnlichen Gefahrensituationen durch Eis und Schnee geführt haben, stellt sich die Frage, inwieweit der Klimawandel zu neu zu bewertenden Belastungen durch Eis und Schnee Anlass gibt und welche Fakten dafür herangezogen werden können. Ausgehend von einigen gut analysierten Fallbeispielen, wird der Frage nachgegangen, welche meteorologischen und klimatischen Faktoren maßgeblich das Risiko beeinflussen und welche Änderungen dieser Faktoren im Klimawandel erwartet werden können.

2.5.1 Fallbeispiel 1: Analyse von Halleneinstürzen im Januar/Februar 2006

Anfang 2006 führten heftige Schneefälle im Zusammenspiel mit anderen Faktoren zu einer Serie von Gebäudeschäden und Halleneinstürzen in Bayern mit z.T. katastrophalem Ausgang, wie beim Einsturz der Eislaufhalle in Bad Reichenhall am 2. Januar 2006 mit 15 Toten. Neben konstruktiven Schwachstellen an Gebäuden rückte auch die außergewöhnliche Wetterlage ins Blickfeld der Ursachenforschung. Eine detaillierte Analyse der besonderen Bedingungen im Winter 2005/06 findet sich bei Strasser (2007) und Strasser (2008) und ist in Abbildung 100 für die Wetterstation Bad Reichenhall des Deutschen Wetterdienstes (DWD) dargestellt.

Der 2005 früh einsetzende Winter war gekennzeichnet durch außergewöhnlich starke und anhaltende Schneefälle, um den Gefrierpunkt schwankende Temperaturen mit typischen eingeschobenen Warmphasen, die aber die kontinuierlich lastende Schneedecke nicht zum Verschwinden bringen konnten. Zum Unfallzeitpunkt lagen aber allgemein keine außergewöhnlichen Schneelasten vor. An der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Bad Reichenhall wurden eine Schneehöhe von 26 cm und ein Schnee-Wasser-Äquivalent von 54 mm verzeichnet. Die akkumulierte Niederschlagssumme an der Station betrug 66 mm. Bei Abschätzung von Verlusten durch Abfluss, Windabtrag und Sublimation sollte die maximale Dachlast einen Wert von 66 kg/m² normalerweise nicht übersteigen.

Abbildung 100: Aufzeichnung der Schneehöhe und der meteorologischen Parameter Temperatur, Niederschlag als Regen, als Schnee und als Graupel von November 2005 bis Februar 2006 an der Wetterstation Bad Reichenhall des DWD.



Schneehöhe (hellblau), Temperatur (rot), Niederschlag als Regen (grün), als Schnee (blau) und als Graupel (türkis) von November 2005 bis Februar 2006 an der Wetterstation Bad Reichenhall des DWD. Dunkel-blaue Rauten kennzeichnen das Schnee-Wasser-Äquivalent (Strasser 2008)

Neben den denkbaren verminderten sind aber auch einige die Last erhöhende Faktoren zu berücksichtigen. Durch die Frostwechsel zuvor fiel möglicherweise Schmelzwasser an, das möglicherweise an anderer Stelle angesammelt anschließend in der starken Frostperiode wieder gefror. Die dann in einer wärmeren Phase folgenden ergiebigsten Niederschläge seit langem, kamen anfangs als Regen, dann als Graupel und schließlich als Schnee, begleitet von einem erneuten Absinken der Temperatur unter den Gefrierpunkt. Dies führte zu einem abrupten Anstieg der Schneelast und dem Einsturz der Halle. Ganz ähnliche Verhältnisse galten übrigens auch an den übrigen Orten in Bayern mit Halleneinstürzen im Januar und Februar 2006, in Aying (3.1.), Passau (20.1.), Deggendorf (22.1.) und Töging (7.2.), glücklicherweise ohne Todesfälle.

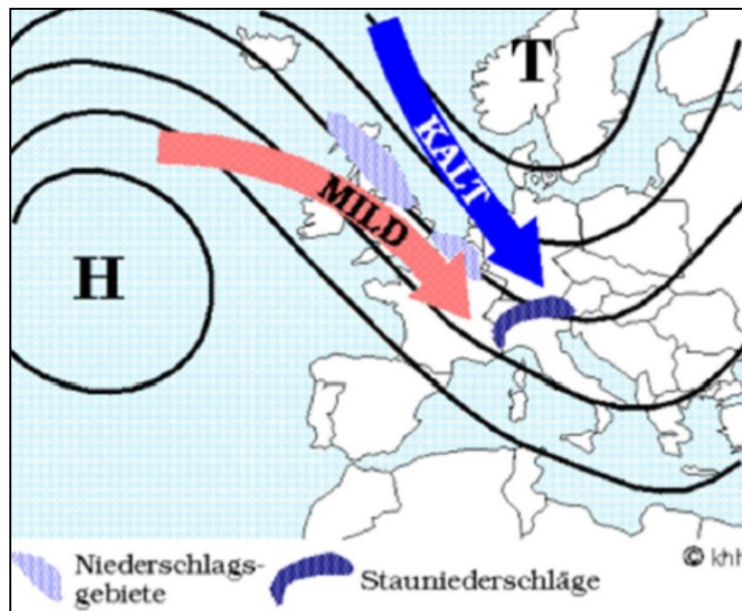
Ein vergleichbar katastrophaler Halleneinsturz mit 65 Todesfällen ereignete sich am 28. Januar 2006 in Kattowitz, Polen. Die tatsächliche Schneelast auf einem Dach ist möglicherweise aber deutlich größer als das gemessene Wasseräquivalent einer Freiland-Schneedecke, z.B. durch Verlagerung der Lastverteilung durch abgeflossenes und an anderer Stelle wieder gefrorenes Schmelzwasser, wie oben erwähnt, oder durch Windverwehung und Aufstauung an bestimmten, der Gebäudekonstruktion geschuldeten Stellen.

2.5.2 Fallbeispiel 2: Die Lawinenkatastrophen in den Alpen im Februar 1999

Die Lawinenkatastrophen in den Alpen im Jahr 1999 mit über 100 Todesopfern wurden als Extremsituation diskutiert (Jahrhundertwinter?), jedoch anders als im vorher erörterten Fallbeispiel damals noch nicht im Kontext des Klimawandels (Thaler 1999, MunichRe 2000). Dies erfolgte an anderer Stelle (Stock 2003, 2004 und 2005), mit Hinweis auf die spezifischen meteorologischen Risikofaktoren, die bei der Lawinenkatastrophe von Galtür am 23.2.1999 vorlagen.

Die in Abbildung 101 gezeigte Großwetterlage im Februar 1999 hat Ähnlichkeiten zur Situation, die zum Halleneinsturz in Bad Reichenhall im Januar 2006 beigetragen haben.

Abbildung 101: Die Großwetterlage im Februar 1999. Eine ausgeprägte Nordwestlage über Europa führt in kurzen Abständen mehrere aktive Niederschlagsgebiete gegen die Alpen



Mit freundlicher Genehmigung von MeteoSchweiz.

Ein Tief mit kalter Luft liegt über dem Nordmeer und Skandinavien einerseits, und ein Hochdruckgebiet mit milder Luft über dem Atlantik andererseits. Kaltluft aus Norden und milde Luftmassen aus Westen begegnen sich zwischen

den beiden Druckzentren und werden in einer stürmischen Nordwestströmung gegen Mitteleuropa und die Alpen geführt. An den Alpen werden die Luftmassen zum Aufsteigen gezwungen, was zum Stau am Alpennordhang und damit zu einer Intensivierung der Schneefälle führt (MeteoSchweiz 1999).

Das spezielle an der Wettersituation ab dem 26. Januar war, dass Tief- und Hochdruckgebiet ihre Lage jeweils während mehreren Tagen kaum änderten, also stationär verharrten. Intensive Schneefallperioden hielten deshalb über mehrere Tage an. Schwächten sich Hoch- und Tiefdruckgebiet endlich ab und wanderten diese Druckgebiete weg, so wurden sie nach kurzer Zeit durch neue Hoch- und Tiefdruckgebiete an alter Stelle ersetzt, womit die nächste, mehrtägige Staulage entstand.

Auf diese Weise können seit dem 26. Januar drei Starkschneefallperioden (26.-29.1., 5.-10.2. und 17.-24.2.) innerhalb von insgesamt 30 Tagen festgestellt werden. Insgesamt hatte die extreme Wettersituation im Februar 1999 folgende Charakteristika, die das Lawinenrisiko vor der Katastrophe von Galtür signifikant erhöht haben (MunichRe 2000):

1. Extreme Niederschlagsmengen über Wochen in aufeinanderfolgenden Niederschlagsperioden mit Schneehöhen von mehreren Metern Pulverschnee;
2. Wechsel von Kalt-, Warm- und wieder Kaltfront mit Bildung einer Schwachschicht sowie erhöhten Schnee-Wasser-Äquivalenten;
3. außergewöhnlich heftige Winde aus Nordwesten vor dem Unglück mit der Konsequenz von Windverlagerung und Anhäufung großer Schneemengen an kritischen Stellen.

Das Fallbeispiel Galtür zeigt bezüglich der risikoverstärkenden meteorologischen Faktoren Parallelen zum vorherigen Fallbeispiel Bad Reichenhall.

2.5.3 Schlussfolgerungen zur möglichen Entwicklung von Schneelasten im Klimawandel

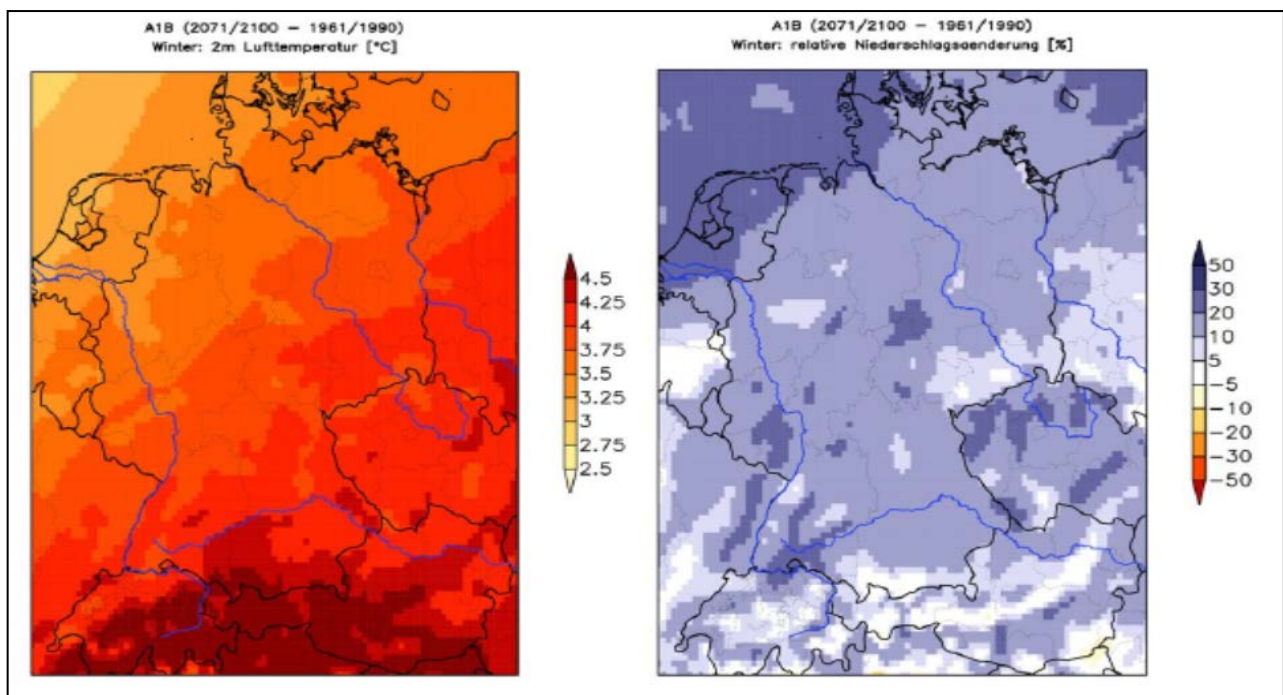
Aus den betrachteten Fallbeispielen lassen sich folgende Risikofaktoren für die Ausbildung extremer Schneelasten ableiten:

1. stationäre West- bzw. Nordwest-Großwetterlagen im Winter, die extreme Niederschlagsmengen mit sich bringen;
2. um den Gefrierpunkt pendelnde Temperaturen mit wechselnder Niederschlagsart (Schnee, Graupel, Regen) und/oder wechselnden Schmelz- und Gefriervorgängen;
3. stürmische Winde, die zu verstärkten Schnee- und Eisanhäufungen an kritischen Stellen führen können.

Die zukünftig zu erwartenden Veränderungen bei diesen Risikofaktoren lassen sich nur mit Hilfe von Klimamodellen ermitteln, die allerdings gerade diesbezüglich noch sehr große Unsicherheiten aufweisen. Abbildung I02 zeigt für das AIB Klimaszenario Simulationsergebnisse des Regionalen Klimamodells REMO (<http://www.remo-rcm.de/REMO-UBA.II89.0.html>). Gezeigt sind die Veränderungen der mittleren Wintertemperaturen (DJF) und der mittleren relativen Niederschläge im Winter für den Zeitraum 2071-2100 relativ zur Referenzperiode 1961-1990.

Für die im Fallbeispiel Bad Reichenhall betrachtete Region in Süddeutschland erhält man einen Anstieg der Wintertemperaturen von etwa 4°C und eine räumlich sehr unterschiedliche Erhöhung der Niederschläge im Winter bis zu 25%.

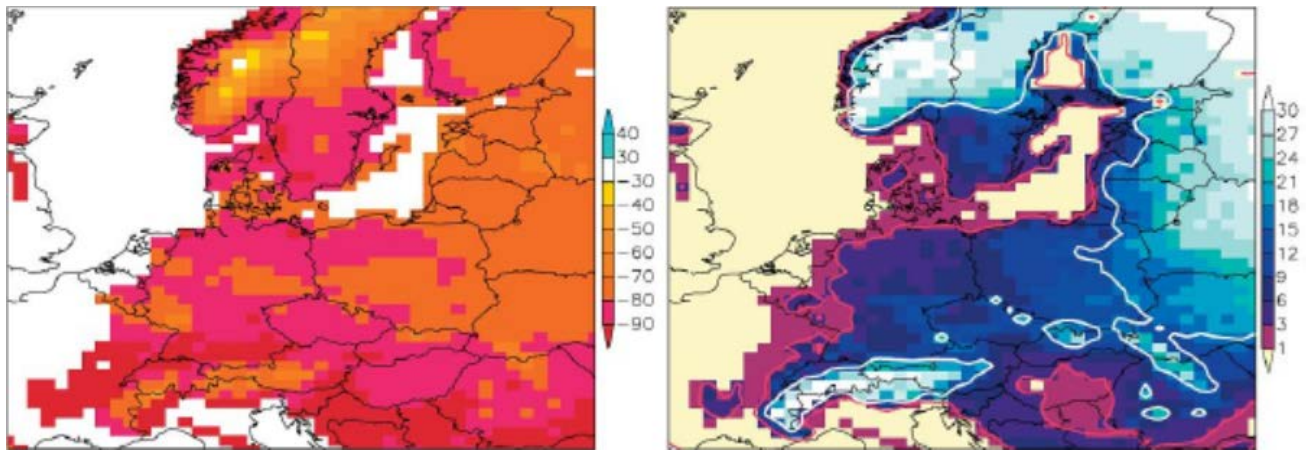
Abbildung 102: Simulationsergebnisse mit REMO zur erwarteten Änderung der mittleren Temperatur (links) und des mittleren Niederschlag (rechts) im Winter (DJF) im A1B Szenario im Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Referenzperiode 1961-1990.



Quelle: REMO-UBA aktualisierte Abbildungen

Für die mittlere Schneesituation im Winter ergeben diese Simulationen die in Abbildung 103 gezeigten Ergebnisse für die Veränderungen der Schneehöhe und der Anzahl der Schneetage, definiert als Tag mit einer Schneehöhe von mindestens 3 cm (MPI 2006). Danach fällt infolge der Erwärmung ein zunehmender Anteil des winterlichen Niederschlags in Form von Regen. In weiten Teilen Deutschlands geht die mittlere Schneehöhe im Januar im A1B Szenario am Ende des 21. Jahrhunderts um mehr als 80% zurück, in den Hochlagen der Alpen und der norwegischen Gebirge um 30-50% (Abbildung 103, links). Betrachtet man in Abbildung 103, rechts die Gebiete mit mehr als drei Schneetagen im Januar (eingegrenzt durch die rote Linie für das heutige Klima und die weiße Linie am Ende dieses Jahrhunderts), so zeigt sich hier der Rückzug des Schnees besonders deutlich.

Abbildung 103: Simulationsergebnisse mit REMO zur erwarteten Änderung der mittleren Schneehöhe im Januar (links) für das A1B Szenario.



Gezeigt ist die relative Änderung (%) im Zeitraum 2071-2100 bezogen auf den Mittelwert der Jahre 1961-1990. Rechts ist die mittlere Zahl der „Schneetage“ im Januar für den Zeitraum 1961-1990 gezeigt. Ein Schneetag ist definiert als Tag mit einer Schneehöhe von mindestens 3 cm. Das Gebiet mit mehr als drei Schneetagen im Januar wird durch die rote Linie eingeschlossen. Im Szenario A1B (Zeitraum 2071-2100) schrumpft das Gebiet auf die von der weißen Linie eingeschlossene Fläche. Quelle: MPI 2006.

Diese Ergebnisse gelten für Mittelwerte und dafür erscheint die qualitative Trendaussage plausibel. Sie beruhen allerdings nur auf einem Rechenlauf mit einem einzigen Regionalmodell und für quantitative Aussagen bedarf es angesichts der großen Unsicherheiten selbst bei den Mittelwerten aufwendiger Multi-Modell Ensemble Rechnungen.

Die zu erwartende Abnahme bei den langjährigen Mittelwerten von Schneehöhe und Schneebedeckung gilt nicht für extreme Winter und die dabei möglichen Extremwerte von Niederschlag, Schnee-Wasser-Äquivalent, Temperaturvariabilität und Sturmstärke und damit für die davon abhängigen Schneelasten. Der letzte Winter 2010/11 in Deutschland war ein aus dem vorherigen langjährigen Trend herausragendes Beispiel für besonders schneereiche Winter.

Die Erderwärmung könnte in Europa sogar verstärkt kalte Winter zur Folge haben, wie eine am PIK kürzlich durchgeführte Studie mit umfangreichen Modellrechnungen zeigte Petoukhov & Semenov (2010). In der östlichen Arktis schrumpft das Eis auf dem Meer infolge der Erwärmung und hierdurch werden örtlich die unteren Luftschichten aufgeheizt. Dies wiederum kann zu einer starken Störung der arktischen Luftströmungen führen, deren Ergebnis eine mögliche Abkühlung der nördlichen Landgebiete ist. Dadurch könnte sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens extrem kalter Winter in Europa und Nordasien verdreifachen. Harte Winter wie 2010/11 oder wie 2005/06 passen zur im Klimawandel erhöhten Variabilität der Witterung.

Als Ergebnis der Untersuchungen zur Entwicklung der klimatischen Bedingungen im Winter bleibt festzuhalten:

1. Temperatur- und Niederschlagstrends sind regional sehr variabel.
2. Die langjährigen Mittelwerte von Schneehöhe und saisonaler Schneebedeckungsdauer werden (außer in Hochlagen) tendenziell abnehmen, dies gilt aber nicht für die in einzelnen Wintern möglichen Extremwerte von Schneehöhe und Schnee-Wasser-Äquivalent.
3. Wegen der anzunehmenden stärkeren Variabilitäten werden sehr intensive Schneefälle und um den Gefrierpunkt pendelnde Temperaturen weiterhin vorkommen.
4. Vor allem aber werden kritische Verhältnisse, wie bei den betrachteten Fallbeispielen, in Zukunft weiterhin auftreten können und es können dabei auch zunehmende Risiken nicht ausgeschlossen werden. Dies gilt insbesondere für Niederschlagsmenge und Wind.
5. Zum jetzigen Zeitpunkt sind Trendaussagen zur Eintrittswahrscheinlichkeit für kritische Schneelastsituationen nicht möglich.

3 Berücksichtigung des Klimawandels durch „Klimaanpassungsfaktoren“ in der TRAS 320

3.1 Inhalt

Aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse zur möglichen zukünftigen Entwicklung von Schnee-, Eis- und Windlasten im Klimawandel werden dahingehend untersucht, ob sich daraus ein entsprechender Klimaanpassungsfaktor in einer Technischen Regel Anlagensicherheit herleiten lässt. Für Schneelasten wurden in den letzten Jahrzehnten mehrere Fälle mit deutlichen Überschreitungen der DIN EN 1991-1-3-NA beobachtet. Nach Analyse der für extreme Schneelasten relevanten meteorologischen Faktoren lässt sich eine zukünftige Zunahme infolge des Klimawandels für seltene Einzelfälle nicht ausschließen. Ein Klimaanpassungsfaktor von 1,2 bei Schneelasten kann daher als Vorsorgemaßnahme sinnvoll erscheinen, ist aber angesichts der bisherigen Daten noch unzureichend unterstützt. Dies gilt in noch stärkerem Maße für Windlasten, wo auf eine Quantifizierung der regionalen Verteilung auslegungsrelevanter Böengeschwindigkeiten und Windspitzen bis zur qualitativen, evaluierten Verbesserung der Modelle verzichtet werden sollte.

3.2 Veranlassung

Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde untersucht, welche Vorkehrungen und Maßnahmen aufgrund der Gefahrenquellen Wind und Schnee unter Berücksichtigung des Klimawandels erforderlich erscheinen. Der Bericht (Stand 11/2013) wurde im Arbeitskreis „Umgebungsbedingte Gefahrenquellen Wind-, Schnee- und Eislasten“ der Kommission für Anlagensicherheit (KAS) diskutiert und führte zu einem Entwurf einer Technischen Regel Anlagensicherheit (TRAS 320). Zu diesem Entwurf gab es kritische Stellungnahmen, die eine Reihe von ergänzenden Fragen zur Klärung in einem Fachgespräch am 17.04.2015 in Bonn aufgeworfen haben. Dieses Kapitel wurde zur Vorbereitung des Fachgesprächs erarbeitet und behandelt diese Fragen auf der Grundlage neuer Erkenntnisse zu den möglichen Auswirkungen des Klimawandels, u.a. im 5. IPCC-Bericht 2013/2014, die auf ihre Relevanz zum Thema bewertet werden.

3.3 Fachliche Bewertung einer Anpassung von Windlasten an den Klimawandel

Die aufgrund der Klimamodelle prognostizierten Änderungen bei Winterstürmen werden bisher als so unsicher und gering eingeschätzt, dass ein Faktor zur Anpassung der Windlasten an den Klimawandel nicht sinnvoll erscheint. Dies gilt analog auch für extreme Windlasten bei konvektiven Ereignissen, bei denen aber andere Faktoren eine Rolle spielen. Diese Einschätzungen sollen im Lichte etwaiger neuer Erkenntnisse überprüft werden. Auch hier ergaben sich ergänzende Fragen zur Klärung in einem Fachgespräch:

- a) Wie könnten sich Intensitäten und Eintrittshäufigkeiten von Böen innerhalb von Winterstürmen aufgrund des Klimawandels verändern?
- b) Welche Erkenntnisse über extreme Windspitzen in Deutschland aufgrund konvektiver Ereignisse liegen hinsichtlich Intensität und Eintrittshäufigkeit vor?
- c) Wie könnten sich Intensitäten und Eintrittshäufigkeiten von extremen Windspitzen aufgrund konvektiver Ereignisse und aufgrund des Klimawandels verändern?
- d) Gibt es hierbei regionale Unterschiede? Werden diese durch die Windzonenkarte zutreffend beschrieben?
- e) Ist die Ableitung von auslegungsrelevanten Böengeschwindigkeiten aus Daten über Winterstürme (DIN EN 1991) im Hinblick auf diese Erkenntnisse noch Stand der Wissenschaft?
- f) Wie lassen sich mögliche Änderungen der auslegungsrelevanten Böen und Windspitzen quantitativ beschreiben?

3.3.1 Mögliche Veränderungen der Windspitzen bei Winterstürmen

(zu den Fragen a und e)

Nahezu alle Klimaprojektionen zeigen eine Zunahme häufig auftretender Südwest- und Nordwestwetterlagen. Mit der Zunahme der Westwinde und einem verstärktem, meridionalen Druckgradienten über Mitteleuropa ist im Winter mit einem Zuwachs von Stürmen und hohen Windgeschwindigkeiten zu rechnen (Donat et al. 2010, Riediger 2012). Für Zentraleuropa werden voraussichtlich extreme Windgeschwindigkeiten leicht zunehmen, verbunden mit veränderten

Zugbahnen von Sturmtiefs (IPCC 2014b). Die zu erwartenden lokalen Änderungen der winterlichen Böenextrema wurden von Rauthe et al. (2010) für die kommenden Jahrzehnte mit Hilfe der regionalen Klimamodelle CCLM und RMO quantifiziert, die von unterschiedlichen Läufen des globalen Modells ECHAM5 angetrieben wurden. Die horizontale Modellauflösung beträgt weniger als 20 km. Zur Charakterisierung des Böenklimas werden die Böengeschwindigkeiten im Kontroll- (1971–2000) und im Projektionszeitraum (2021–2050) für die SRES-Szenarien A1B, B1 und A2 herangezogen. Mit Methoden der Extremwertstatistik werden an jedem Gitterpunkt die Böengeschwindigkeiten für verschiedene Wiederkehrperioden berechnet. Dabei zeigt sich, dass sich die einzelnen regionalen Modellläufe im Änderungssignal erheblich unterscheiden und die statistische Signifikanz ausschließlich für einige Hauptcharakteristika gegeben ist. Die regionale Variabilität der Böen ist nur in geringem Maße durch die Wiederkehrperiode beeinflusst, die Signifikanz nimmt jedoch mit zunehmender Wiederkehrperiode ab. Das globale Modell bestimmt hingegen die übergeordneten Strukturen im Änderungssignal der einzelnen regionalen Klimasimulationen. Mit einem Ensemble aus insgesamt sieben Mitgliedern ist es möglich, die gemeinsamen Änderungen der Böengeschwindigkeiten zu untersuchen. Über Norddeutschland wurde für eine Wiederkehrperiode von 10 Jahren eine Änderung zwischen den untersuchten Zeiträumen von +6 % bis –1.5 % festgestellt, wobei Median, 25 % und 75 % Perzentil bei 1.5 %, 0.7 % bzw. 2,8 % liegen. Dieser Anstieg wird auch von der Mehrheit der Modellläufe bestätigt. Im übrigen Deutschland sind die Ergebnisse nicht eindeutig. Gleichwohl wird über einigen Regionen Mittel- und Süddeutschlands durch die Mehrheit der Modellläufe eine leichte Abnahme der Böengeschwindigkeit projiziert. Insgesamt ergibt sich damit, dass das derzeitige hohe Niveau in der Sturmaktivität bis 2050 nicht wesentlich absinken und in Norddeutschland sogar noch weiter ansteigen wird. Im Unterschied zur relativ grob eingeteilten Ableitung von auslegungsrelevanten Böengeschwindigkeiten nach DIN EN 1991 zeigen neuere Verfahren räumlich sehr viel differenziertere Verteilungen der zu erwartenden Windlasten in Deutschland. Allerdings zeigen die Ergebnisse, wie des oben zitierten Klimamodellansatzes von Rauthe et al. (2010) oder des DWD (Augter & Roos 2011), die aus Stationsdaten mit einem statistischen Windfeldmodell ermittelt wurden, sehr große modell- und methodenabhängige Unterschiede.

3.3.2 Mögliche Veränderungen bei konvektiven Ereignissen

(zu den Fragen b und c)

Erkenntnisse über extreme Windspitzen in Deutschland aufgrund konvektiver Ereignisse liegen beim Deutschen Wetterdienst hinsichtlich Intensität und Eintrittshäufigkeit vor und sind in die Verteilungskarte in Abbildung 63 in Kapitel I eingeflossen (Augter & Roos 2011). Bei tropischen Wirbelstürmen zeichnet sich bereits eine Veränderung hin zu heftigeren Ereignissen mit der globalen Erwärmung ab (Stock 2009). Welche Veränderungen hingegen bei Gewitterstürmen und Tornados durch den Klimawandel zu erwarten sind, ist nach wie vor eine offene Frage (Brooks 2013). Schwere Gewitterstürme nehmen an Heftigkeit mit der Erhöhung zweier atmosphärischer Parameter zu, der potenziell verfügbaren konvektiven Energie (CAPE) und der vertikalen Windscherung in der Troposphäre (SHR6), wobei insbesondere hohe Werte beim letzten Parameter maßgeblich für die Ausbildung von Tornados sind. Einfache physikalische Ansätze lassen erwarten, dass die globale Erwärmung infolge erhöhter Oberflächentemperatur und steigender Luftfeuchte im Mittel auch höhere verfügbare Energiewerte für CAPE ergeben. Dagegen könnte die Windscherung SHR6 mit niedriger werdendem Temperaturgradienten Äquator-Pol abnehmen. Diese Erwartungen werden durch die Mehrzahl (~2/3) von Klimamodellsimulationen gestützt, die diese Parameter betrachten (Brooks 2013). Wären die Prozesse so einfach, wie in dieser großskaligen vereinfachenden Betrachtung, dann würden mit dem Klimawandel Gewitterstürme stärker und Tornados schwächer werden. Leider sind die Prozesse komplexer, da die Ausbildung von Gewitterzellen und daran anschließend die Bildung von Superzellen sehr stark von lokalen Parametern der Geländeoberfläche sowie der sich darüber ausbildenden atmosphärischen Schichtung abhängen.

3.3.3 Mögliche regionale quantitative Veränderungen

(zu den Fragen b, e und f)

Es besteht zwar durchaus Anlass anzunehmen, dass der Klimawandel auch in unseren Breiten zu höheren Spitzenwindlasten führen wird, z.B. bei Gewitterstürmen. Auch dürfte sich wahrscheinlich die regionale Verteilung der auslegungsrelevanten Böengeschwindigkeiten und Windspitzen gegenüber bisherigen Daten (DIN EN 1991) verändern, da sich Ver-

änderungen bei den für Winterstürme zugrundeliegenden Wetterlagen abzeichnen. Eine gesicherte Quantifizierung beider Veränderungen erscheint aber beim derzeitigen Stand der Wissenschaft nicht möglich. Mögliche regionale quantitative Veränderungen bei auslegungsrelevanten Böengeschwindigkeiten und Windspitzen lassen sich theoretisch durch aufwendige Simulationsrechnungen mittels hochauflösender regionaler Klimamodelle ermitteln. Hier sind zwar in jüngster Zeit enorme Fortschritte erzielt worden, die einige wesentliche physikalische Prozesse von Wolkendynamik, Mehrphasenprozessen und konvektivem Energietransport in den Modellen abbilden, aber die Reanalysen beobachteter Ereignisse mit Hilfe dieser weiterentwickelten Modelle zeigen noch unbefriedigende Ergebnisse (IPCC 2013). Das Fazit ist demzufolge auf eine Erhöhung oder Änderung der regionalen Verteilung auslegungsrelevanter Böengeschwindigkeiten und Windspitzen aufgrund des Klimawandels bis zur qualitativen, evaluierten Verbesserung der Modelle zu verzichten.

3.4 Fachliche Bewertung eines Klimaanpassungsfaktors für Schneelasten

Bedingt durch den Klimawandel werden Niederschläge im Winter voraussichtlich zunehmen. Dies kann als ein Faktor unter anderen auch zu erhöhten extremen Schneelasten führen. Im Entwurf zur TRAS 320 wurde daher ein „Schneelastfaktor“ (Teilsicherheitsfaktor für die Einwirkung Schneelast wegen möglicher Änderungen des Klimas) mit 1,2 gewählt, analog zum Klimaanpassungsfaktor für Niederschläge und Hochwasser in der TRAS 310. Dazu gab es eine Reihe von kritischen Anmerkungen und ergänzenden Fragen:

- a) Welche meteorologischen Faktoren bestimmen die Höhe extremer Schneelasten?
- b) Gibt es hierbei regionale Unterschiede?
- c) Ist aus historischen Daten eine Veränderung dieser meteorologischen Faktoren erkennbar?
- d) Ist aus den Erkenntnissen über mögliche Änderungen des Klimas eine Veränderung dieser meteorologischen Faktoren erkennbar?
- e) Welche Bedeutung haben die prognostizierten Änderungen der Verteilung von Großwetterlagen für extreme Schneelasten?
- f) Welche Bedeutung haben die prognostizierten Steigerungen von Niederschlägen im Winter für extreme Schneelasten?
- g) Wie lassen sich mögliche Änderungen der extremen Schneelasten quantitativ beschreiben?

Wesentliche Grundlagen zur Beantwortung der Fragen finden sich bereits im Kapitel 2.5. Es gibt jedoch ergänzende Erkenntnisse, die im Folgenden hinsichtlich ihrer Relevanz zum Thema dargelegt und bewertet werden.

3.4.1 Relevante meteorologischen Faktoren für extreme Schneelasten

(zu Frage a)

Folgende meteorologische Faktoren sind in verschiedenen Kombinationen und Ausprägungen relevant für ein mögliches Auftreten extremer Schneelasten:

1. Stationäre Wetterlagen im Winter, insbesondere aus West- oder Nordwestwetterlagen, die lang andauernde oder wiederholte extreme Niederschläge überwiegend in Form von Schnee bringen,
2. Temperaturschwankungen um die 0°C, verbunden mit Tau- und Gefrierzyklen sowie Niederschlägen, alternierend in Form von Regen, Graupel, Schnee und Schneeregen,
3. stürmische Winde, die zu starken Schneeverwehungen infolge Winddrift führen,
4. von regionalen geographischen Besonderheiten geprägte hohe vertikale oder horizontale Gradienten von Lufttemperatur und Feuchte. Die Faktoren (1.) bis (3.) wurden bereits im Kapitel 2.5 behandelt und ihre Relevanz anhand von Fallbeispielen dargestellt. Neu angeführt wird hier der Faktor (4.), der z.B. beim sogenannten „Lake-Effect Snow“ eine Rolle spielt (Wright et al. 2013). Anzumerken ist, dass nicht alle vier Faktoren gleichzeitig in gleicher Richtung zu extremen Schneelasten führen. So erhöht Faktor (2.) die Schneelast infolge höheren Wasseräquivalents, was aber eine anschließende Erhöhung durch Winddrift (3.) erschwert.

3.4.2 Regionale Unterschiede und frühere Änderungen

(zu den Fragen b, c)

Die bislang beobachteten regionalen Veränderungen beim Schneefall auf der Nordhemisphäre zeigen generell einen Rückgang der mittleren Schneebedeckung und Schneetiefe während der kürzer werdenden Schneefallsaison im Winter, trotz zunehmender Niederschlagsmenge (IPCC 2013). Der Rückgang beruht vor allem darauf, dass der Niederschlag bei steigenden Temperaturen im Winter vermehrt als Regen statt als Schnee fällt und dort, wo er als Schnee fällt, wird der Schwund durch Abtauen vor allem im Frühjahr nicht ausgeglichen. In der Mehrzahl der Regionen gibt es einen Rückgang der Schneefallereignisse.

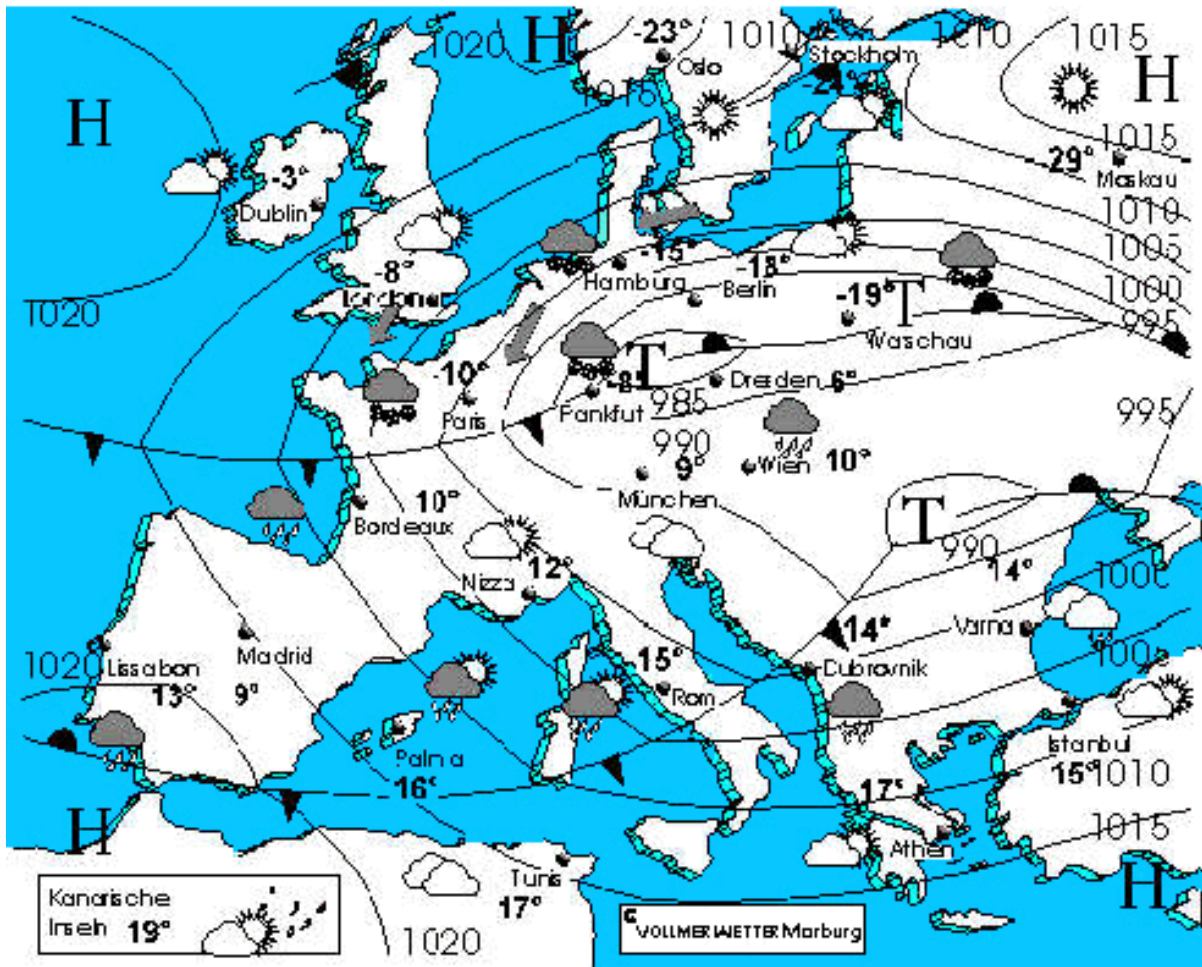
Es gibt aber auch Hinweise auf regional spezifische Zunahmen extremer Schneemengen bei Einzelereignissen in Westeuropa (IPCC 2012, IPCC 2014b). Dabei wird darauf hingewiesen, dass es an langjährigen konsistenten Messreihen des Schneefalls mangelt, die spärlichen Daten sehr unsicher sind und mit über die Messperioden wechselnder Instrumentierung erfolgten, was eine statistische Analyse erschwert. Verbesserungen können zukünftig Satellitendaten sowie Reanalysen mit Hilfe weiter verbesserter Klimamodelle bringen.

Extreme schadenswirksame Schnee- und Eislasten gehören in Deutschland zu den seltenen Ereignissen, für die es zwar statistische Berechnungen für die Wiederkehrdauer an einzelnen Stationen gibt, jedoch kaum eine flächendeckende Aussage über die Gefährdung in den verschiedenen Landesteilen. Anhaltspunkte für extreme Schneelasten liefern die langjährigen Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Schneehöhen und Schneelasten zum Beispiel des Winters 1978/1979 sowie auch 2009/2010 waren in Norddeutschland außergewöhnlich. In verschiedenen Wintern und an mehreren Stationen waren deutliche Überschreitungen der Schneelasten nach DIN EN 1991-1-3-NA festzustellen (Wichura 2015). Eine regional differenzierte Aussage liefert auch die Arbeit von Schmitt (2012). Für Schnee- und Eislasten an Stromleitungen wurde nach einer Methode gesucht, die dafür kritische meteorologische Situationen in Klimamodell-daten detektiert und somit Aussagen zur räumlichen Verteilung ermöglicht. Dazu wurden zunächst aus Untersuchungsberichten zum Ereignis im November 2005 im Münsterland sowie weiterer Literatur die Bedingungen herausgefiltert, bei denen die Bildung von Schneelasten wahrscheinlich ist. Als besonders geeignet stellte sich eine auf den drei Variablen Schneefall, 2m-Temperatur und 10m-Windgeschwindigkeit basierende Methode heraus, mit der eine statistische Auswertung von Schneelastereignissen im Zeitraum 1950-2000 in Deutschland auf Basis diverser hochauflösender Klimäläufe des Regionalen Klimamodells REMO erfolgte. Bei der statistischen Analyse kristallisieren sich generell die mittleren Lagen der deutschen Mittelgebirge und vor allem das östliche Bayern sowie das Erzgebirge samt Vorland als Regionen heraus, die besonders oft von solchen Ereignissen vor allem bei winterlichen Vb-Wetterlagen betroffen sind. Schmitt (2012) testete auch eine andere Methode auf der Basis von ISO 12494 (Atmospheric icing of structures), die Schneelasten in Abhängigkeit von Schneefall und der Feuchttemperatur berechnet, und fand sie weniger geeignet, die beobachteten Ereignisse wiederzugeben. Eine solche Methode zur Berechnung regionaler Unterschiede der Schneelast in Frankreich haben Ducloux & Nygaard (2014) verwendet. Lehtonen et al. (2014) untersuchten die räumliche Verteilung von schweren Schneelasten auf Baumkronen in Finnland an 29 Standorten zwischen 1961 und 2010. Sie verwendeten ein Modell, das die Schneelast in vier verschiedene Typen klassifiziert: Reif, trockener Schnee, nasser Schnee und gefrorener Schnee. Die größten Schneelasten treten in der Regel im Osten Finnlands auf. Dies ergibt sich nicht nur für die Gesamtschneelasten, sondern auch für die verschiedenen Schneelasttypen mit einigen Unterschieden in der geografischen Verteilung. Für Baumkronen zeigt sich als wesentlicher Faktor das Auftreten von Raureif insbesondere auf bewaldeten Hügeln im Norden Finnlands. Darüber hinaus sind die Ergebnisse dort allerdings ungenauer, je größer die Unterschiede in der Geländehöhe sind. Außerdem beruhen die größten Unsicherheiten in dieser Studie auf der Unsicherheit der Windgeschwindigkeitsmessungen. Möglicherweise konnte deshalb kein signifikanter Trend in der Entwicklung der Schneelasten festgestellt werden.

Seit über einem Jahrzehnt gibt es trotz Erwärmungstrend eine auffallende Häufung extremer Winter in Europa, Nordamerika und Ostasien, verbunden mit extremen Schneefallereignissen (IPCC 2014b). Dies hat die Frage aufgeworfen, ob die globale Erwärmung zukünftig zu mehr oder weniger Schnee führen wird (Räisänen 2008). Verschiedene Studien zeigen einen Zusammenhang zwischen einer beobachteten Zunahme verschiedener Extremereignisse auf der Nordhalbkugel mit veränderten großräumigen atmosphärischen Strömungen wie z.B. dem Jetstream (Petoukhov & Semenov 2010; Jaiser et al. 2012; Coumou et al. 2014, 2015). Als Ursache sehen sie die starke Erwärmung in der Arktis in den letzten

Jahrzehnten, verbunden mit einem starken Rückgang des Meereises. Liu et al. 2012 zeigen den Zusammenhang zwischen den ungewöhnlich hohen Schneefällen in den letzten Wintern in großen Teilen von Nordamerika, Europa und Ostasien und den Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation im Winter auf der nördlichen Hemisphäre. Die veränderte atmosphärische Zirkulation infolge des Rückgangs von Meereis im Herbst führt zu häufigeren blockierenden Wetterlagen, die zu Kaltlufteinbrüchen in großen Teilen der nördlichen Kontinente führen. Darüber hinaus erhöht sich durch die Reduktion von Meereis der atmosphärische Wasserdampfgehalt in den Luftströmungen aus der Arktis im Spätherbst und Winter. Diese Konstellation könnte zukünftig die Wahrscheinlichkeit von Ereignissen mit starkem Schneefall im frühen Winter in Europa erhöhen. Das oben erwähnte meteorologische Phänomen „Lake-Effect Snow“ (LES) hat ähnliche physikalische Ursachen und wird ebenfalls durch die Veränderungen der großräumigen atmosphärischen Strömungen sowie weitere regionale Besonderheiten verstärkt. Es tritt auf, wenn im Winter kalte Winde über große Wasserflächen mit warmem Wasser strömen. Dabei wird über dem See Wasserdampf aufgenommen, der jedoch schnell gefriert und am Lee-Ufer des Sees als Schnee niedergeht. Der Effekt kann durch orografisch bedingte Aufwärtsströmung der Luft entgegen der Windrichtung verstärkt werden, wodurch es zu schmalen, dafür aber sehr intensiven Niederschlagsbändern mit Schneeablagerungen von mehreren Dezimetern Schnee pro Stunde kommen kann (http://de.wikipedia.org/wiki/Lake_Effect). Zwar ist der LES-Effekt vor allem aus Nordamerika bekannt, wo er zuletzt im November 2014 zu einem Schneechaos führte, er wurde aber auch schon in anderen Regionen, so auch in Deutschland beobachtet. In Schleswig-Holstein trat der Effekt zuletzt am 11. März 2013 auf, als vor allem die Stadt Lübeck betroffen war. In einigen Teilen der Stadt schneite es ununterbrochen mehr als 24 Stunden lang, dadurch kamen örtlich über 50 cm Neuschnee zusammen. Zuvor trat dieser Effekt auch bereits am 30. November 2010 im mittleren Teil des Kreises Ostholstein auf, als polare Ostwinde über der wärmeren Lübecker Bucht kurzfristig zu Schneehöhen von bis zu 76 cm und erheblich höheren Schneeverwehungen führten, sodass der Verkehr auf den Straßen kollabierte.

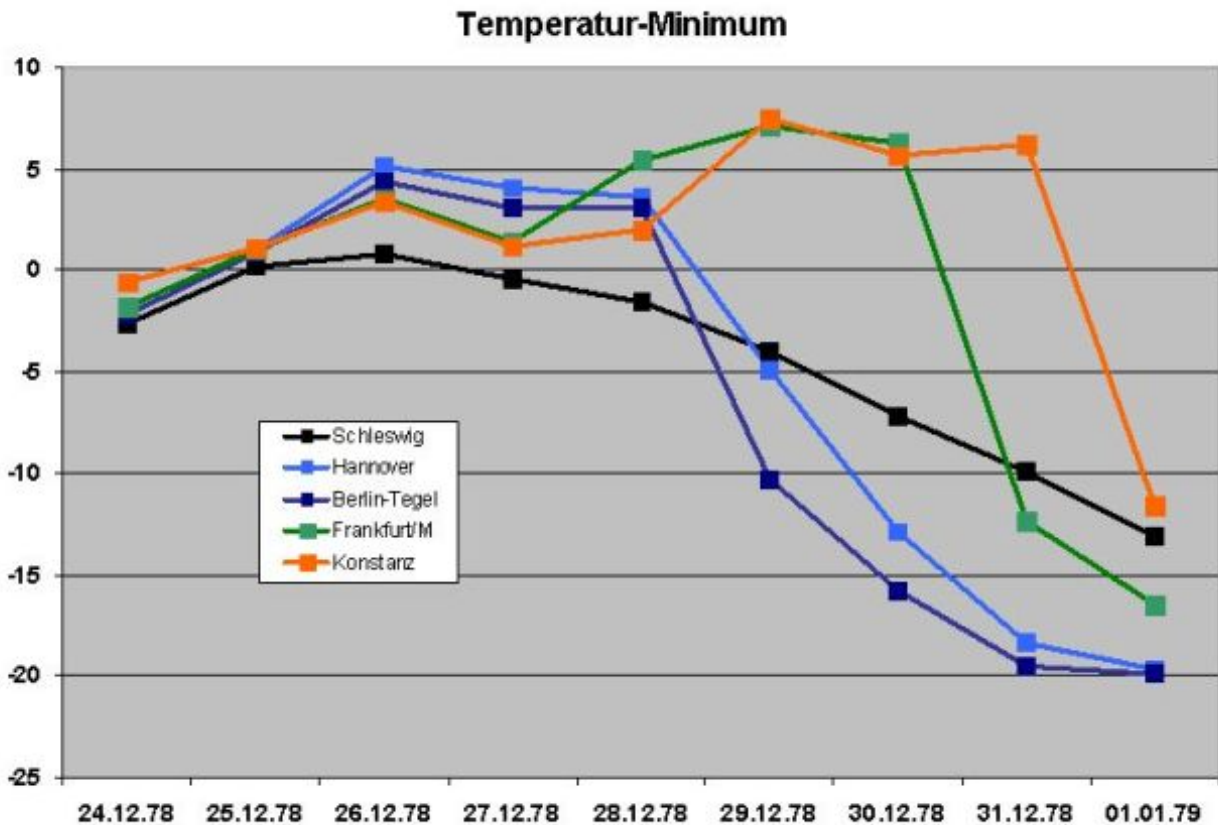
Abbildung 104: Wetterkarte vom 31.12.78, 24 Uhr (Jahreswechsel)



<http://www.wetterbild.de/wetterrevue/blitzlic/005sil78.html>

Auch beim extremen Schneewinter 1978/79 mit massiven Schneefällen in Norddeutschland kann man aufgrund der Wetterlage von einem "Lake-Snow-Effekt" ausgehen. Noch um die Weihnachtsfeiertage 1978 herrschte relativ mildes Wetter mit Temperaturen deutlich über dem Gefrierpunkt. Nach dem 28.12.1078 bis zum Jahreswechsel drang arktische Kaltluft aus Nordosten mit anhaltend starkem Wind, teilweise Sturm, nach Norddeutschland und weiter nach Mitteleuropa vor (siehe Abbildung 105). Die beobachteten außergewöhnlich extremen Schneehöhen lassen sich außer durch die sturmbedingten Verwehungen durch die Aufladung der Luft mit Feuchtigkeit über der noch relativ warmen Ostsee erklären.

Abbildung 105: Temperaturänderung im Zeitraum 24.12.1978 bis 01.01.1979



<http://www.wzforum.de/forum2/read.php?7,1496177>

3.4.3 Auswirkungen klimatischer Veränderungen

(zu den Fragen d, e)

Sowohl die Beobachtungen als auch die Klimasimulationen deuten in Vergangenheit und Zukunft auf Veränderungen bei den Häufigkeiten relevanter Wetterlagen. Vor allem im Winterhalbjahr bringen mehr regenreiche Tiefdruckgebiete aus dem Westen vermehrt Niederschläge und Starkregen. Sie werden unsere Winter bis zum Ende des Jahrhunderts im Mittel nasser und milder machen. Zumindest in Bezug auf die kritischen Vb-Wetterlagen gibt es Untersuchungen, die zukünftig keine Erhöhung der Gesamtzahl im Jahr erwarten lassen (Nissen et al. 2013). Zu beachten bleibt bei der simulierten zukünftigen Entwicklung der Wetterlagen eine sehr hohe Variabilität von Jahr zu Jahr im Verhältnis zum langjährigen Trendverhalten, so dass große Unsicherheiten bei den absoluten Maxima dieser Ereignisse bestehen (Riediger 2012). Darauf wird auch in der Arbeit von Schmitt (2012) hingewiesen. In seinen verschiedenen Klimaprojektionsläufen für das 21. Jahrhundert kristallisiert sich ebenso wie im Kontrollklima des 20. Jahrhunderts eine ähnliche regionale Verteilung der Schnee- und Eislasten heraus. Betroffen sind generell die mittleren Lagen der deutschen Mittelgebirge und vor allem das östliche Bayern sowie das Erzgebirge samt Vorland als Regionen heraus, die besonders oft von solchen Ereignissen vor allem bei winterlichen Vb-Wetterlagen betroffen sind. Dabei nimmt die Gesamtzahl der modellierten Ereignisse sowohl in den beschriebenen Regionen als auch in Gesamtdeutschland vor allem in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts stark ab. So treten im Klima des 20. Jahrhunderts in Gesamtdeutschland etwa zwei Ereignisse pro Jahr auf, während diese Zahl gegen Ende des 21. Jahrhunderts auf weniger als ein Ereignis pro Jahr abnimmt. Bei der Bewertung der von Schmitt (2012) mit dem dynamischen Modell REMO ermittelten Ergebnisse ist kritisch zu hinterfragen, ob das Modell die Beziehungen zwischen den durch den Klimawandel veränderten großräumigen atmosphärischen Mustern und den lokalen klimatischen Konsequenzen zutreffend erfassen kann. So zeigen verschiedene Versionen des REMO- Modells trotz gleicher Initialisierungs- und Randwerte teilweise deutliche Unterschiede der Anzahl von

Schneelastereignissen pro Jahr. Kreienkamp et al. (2010) haben aus Reanalysen (freie Atmosphäre) und Messdaten (Erdoberfläche) für die Periode 1971-2000 die veränderten atmosphärischen Bedingungen analysiert. Die Synthese der lokalen Zeitreihen, wie sie in einem modellierten Klima auftreten können, erfolgte unter der Maßgabe, die sich wandelnde Häufigkeit der atmosphärischen Muster zu reproduzieren. Parallel dazu wurde untersucht, wie sich die Eigenschaften großräumiger atmosphärischer Muster in Folge der sich in Klimamodellen simulierten veränderten klimatischen Bedingungen verändern. Wichtigste Erkenntnis war, dass die aus dem Klima der Gegenwart ermittelte Vielfalt der Muster nicht hinreicht, das zukünftige Klima zu beschreiben; es treten zusätzliche Muster auf. Der zuvor schon erwähnte Zusammenhang zwischen den ungewöhnlich hohen Schneefällen in den letzten Wintern in großen Teilen von Nordamerika, Europa und Ostasien und den Veränderungen der atmosphärischen Zirkulation im Winter auf der nördlichen Hemisphäre haben eine ganze Reihe von Untersuchungen zur weiteren Entwicklung dieses Effekts durch den Klimawandel angeregt (Lawrence & Slater 2010, Krasting et al. 2013, O’Gorman 2014, Vihma 2014, Handorf et al. 2015, Räisänen 2015, Rogers et al. 2015). Die Simulationsergebnisse zeigen relativ einheitlich eine zukünftige Abnahme des Gesamtniederschlags als Schnee im Winter. Dieser klare Befund bei den Mittelwerten gilt aber nicht ohne weiteres für die Extremwerte, zu denen die Klimamodelle derzeit nur sehr bedingt Hinweise liefern können. O’Gorman (2014) weist darauf hin, dass der festgestellte Rückgang beim mittleren Schneefall sich bei den Extremen so nicht wiederfinden lässt, bei keinem oder nur einem geringen Einfluss des Klimawandels. Räisänen (2015) zeigt ebenfalls, dass die Extremwerte täglichen Schneefalls nahezu unverändert bleiben. Für extreme Schneelasten in Fällen von regionalen geographischen Besonderheiten mit hohen vertikalen oder horizontalen Gradienten von Lufttemperatur und Feuchte liefern die Untersuchungen aber keine belastbaren Hinweise.

3.4.4 Evaluierung neuer Erkenntnisse zu extremen Schneelasten

(zu den Fragen f, g)

Die zuvor dargestellten Erkenntnisse zu den meteorologischen Faktoren, die zukünftig im Klimawandel zu mehr extremen Schneelasten führen können, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. In den letzten Jahren wurden in Westeuropa, Nordamerika und Ostasien mehrere Einzelereignisse bei stationären Wetterlagen im Winter mit extremen Schneefällen beobachtet. Als Ursache werden Veränderungen der großräumigen atmosphärischen Strömungen auf der Nordhalbkugel infolge des bereits stattfindenden Klimawandels gesehen. Der Beobachtungszeitraum ist aber noch zu kurz für belastbare Trendaussagen.
2. Mit den auch weiter steigenden Temperaturen ist mit höherer Luftfeuchte im Winter zu rechnen. Daher kann mit weiter fortschreitendem Klimawandel erwartet werden, dass sich der beobachtete Trend zunehmender Niederschläge im Winter weiter fortsetzt. Im Mittel wird dies zu einem Rückgang der Schneefälle führen, wahrscheinlich aber nicht zu einem Rückgang der Extremwerte des Niederschlags als Schnee- und Schneeregen. Solche Extremfälle werden vermutlich seltener werden, doch können auch höhere Schneelasten als bisher beobachtet nicht völlig ausgeschlossen werden.
3. Bei Winterstürmen ist nicht mit einem Rückgang im Klimawandel zu rechnen, sodass stürmische Winde infolge Winddrift und Schneeverwehungen Schneelasten lokal im Rahmen der bisherigen Beobachtungen erhöhen können. Für neue außergewöhnliche Schneelasten müssen weitere Faktoren hinzukommen, wie zum Beispiel der folgende.
4. Regionale geografische Besonderheiten infolge hoher Gradienten von Luftfeuchte und Temperaturschwankungen um den Gefrierpunkt sowie Winddrift können zu extremen Schneelasten beitragen. Dieser Effekt ist aber derzeit nur schwer und vor allem nicht pauschal quantifizierbar.

Als Fazit lässt sich feststellen, dass durch die im Klimawandel zukünftig zu erwartenden Entwicklungen der meteorologischen Faktoren höhere Werte als bisher angenommen für Schnee- und Eislasten in weiterhin eher seltenen Extremereignissen nicht ausschließen lassen. Eventuelle Zunahmen bei Schnee- und Eislasten können regional sehr unterschiedlich sein und auch die räumliche Verteilung könnte anderes aussehen, als die bisher aus Erfahrungswerten abgeleitete. Die zukünftig zu erwartende räumlich differenzierte Verteilung von Schnee- und Eislasten lässt sich theoretisch mittels hochauflösender regionaler Klimamodelle ermitteln, dieses Verfahren ist aber sehr aufwendig und die Modelle sind trotz bemerkenswerter Fortschritte bei der Implementierung der physikalischen Mehrphasenprozesse dazu noch nicht ausreichend in der Lage. Als Vorsorgemaßnahme der Anpassung an die Folgen des Klimawandels erscheint daher ein

„Schneelastfaktor“ (Teilsicherheitsfaktor für die Einwirkung Schneelast wegen möglicher Änderungen des Klimas) sinnvoll, ist aber beim derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstand kaum quantifizierbar. Der vorgeschlagene pauschale Wert von 1,2 begründet sich analog zum Klimaanpassungsfaktor für Niederschläge und Hochwasser in der TRAS 310, da der gleiche physikalische Prozess des Anstiegs der Luftfeuchte mit der Temperatur eine Rolle spielt.

3.4.5 Empfehlung

Aufgrund der Diskussionen im Fachgespräch ergibt sich folgende Empfehlung:

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

4 Bauliche Gefahrenabwehr und Anforderungen der StörfallV

4.1 Grundlagen

4.1.1 Rechtliche Regelungen von Tragwerkssicherheit und -zuverlässigkeit

Mit der Sicherheit von Bauten hat sich die Menschheit nachweislich schon in babylonischer Zeit beschäftigen müssen, wie aus Regelungen im Codex Hammurabi (ca. 1800 vor Christus) überliefert ist. Offenbar ist es bereits bei sehr frühen menschlichen Stadtsiedlungen zu katastrophalem Bauwerksversagen mit dem Verlust von Menschenleben gekommen, was rechtliche Regelungen erforderte. Derartiges Versagen zu verhindern dienten danach über Jahrhunderte entwickelte Konstruktionsregeln; heute ist dies das Grundanliegen der Baugesetzgebung aller Rechtsstaaten. Dabei ist die im Bauwerk vorhandene Tragwerkssicherheit unter normengemäßer (üblicher) Nutzung die wichtigste Beurteilungsgröße. Ihre Projektion auf alle Aspekte, die eine Gefährdung von Sicherheit und Ordnung verhindern, über die gesamte zukünftige Nutzungsdauer bezeichnet man als Tragwerkszuverlässigkeit. Die für Bauwerke entwickelten Zuverlässigkeitskonzepte finden sich heute in allen Gebieten der Technik in problemgerecht angepasster Form.

Die derzeitige Grundlage der Ermittlung von Sicherheiten aller Tragwerke baulicher Anlagen im Rechtsgebiet der Bundesrepublik Deutschland bildet die DIN EN 1990:2010-12 und für eine noch teilweise bestehende Übergangsfrist die DIN 1055-100:2001-03. Ab dem 01.07.2012 wurde die DIN 1055-100:2001-03 bauordnungsrechtlich durch die Euronorm DIN EN 1990:2010-12 mit ihrem nationalen Anhang DIN EN 1990-NA abgelöst. Allerdings gilt wie bereits erwähnt beispielsweise in NRW bis Ende 2013 noch eine bauordnungsrechtliche Übergangsfrist, wonach weiterhin die DIN 1055:2001-03 angewandt werden darf. Dieser Normenaustausch bedeutet aber keinesfalls einen grundlegenden Paradigmenwechsel in der Bausicherheit, da beide Normenfamilien - nationale und europäische – im hier relevanten Bereich nahezu identisch sind. Diese Gleichheit liegt in der Tatsache begründet, dass die hierzulande geltenden Normen bereits in einem früheren Anpassungsprozess in weiten Teilen den europäischen Ansätzen angeglichen wurden.

Im Jahre 1984 (Kommission der EG 1984) beschlossen die Europäischen Regierungschefs eine Reihe von Maßnahmen zur Vollendung des Europäischen Binnenmarktes. Hierbei sollte der gesamte Bauproduktmarkt der EU eine Vorreiterrolle übernehmen. Grundlage hierfür bildete 1988 mit der Verabschiedung durch den Ministerrat der EG die sog. Bauproduktenrichtlinie (Rat der EG 1988), in der Anforderungen an Bauwerke aller Art im Rechtsgebiet der EU durch hierauf aufbauende Grundlegendokumente konkretisiert wurden.

Mit der hierin verfügten Ausarbeitung zukünftiger Europäischer Baunormen, sogenannter Eurocodes, wurde das Europäische Komitee für Normung CEN durch die damalige EG beauftragt. Seit dieser Beauftragung sind viele Grundnormen des Bauwesens als Eurocodes erarbeitet und veröffentlicht worden, die zu erheblichen Veränderungen der deutschen Baunormen geführt haben. Im Rechtsgebiet der Bundesrepublik Deutschland wird gemäß einer Bund-Länder-Vereinba-

Die gesamte Baunormung durch das Deutsche Institut für Normung DIN in Berlin koordiniert. Die ebenfalls eingebundene zentrale Zulassungsstelle für alle Bauprodukte und Bauarten ist das Deutsche Institut für Bautechnik DIBT, ebenfalls ansässig in Berlin.

Nach ersten äußerst negativen Erfahrungen mit fertigen Eurocodes ECs entschloss sich 1994 der Normenausschuss Bau (NABau) im DIN bei der bauaufsichtlichen Einführung der Euronormen in die nationale Baupraxis zu einer 2-Schritt-Strategie: Zunächst sollten danach die traditionellen deutschen Baunormen im inhaltlichen Sinne der zukünftigen EU-Normen überarbeitet und diesen angeglichen werden, um noch für eine Übergangsfrist als Bautechnische Regel Gültigkeit zu erlangen. Diese Synchronisierungsfrist läuft, wie oben erwähnt, am 01.07.2012 ab.

Darüber hinaus räumt die Europäische Grundnorm EN 1990:2002 den Mitgliedsstaaten die Möglichkeit ein, wichtige sicherheitsrelevante Parameter, Nachweisverfahren und Sicherheitsklassifizierungen national festzulegen. Deswegen gilt zukünftig in Deutschland neben der in allen EU-Staaten identischen Norm DIN EN 1990:2010-12 zusätzlich der nationale Anhang DIN EN 1990/NA:2010-12.

Zwischenzeitlich wurde die oben erwähnte Übergangsfrist in einigen Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland verlängert. So schreibt beispielsweise das Bauministerium in NRW „...Daher darf für eine Übergangszeit bis zum 31.12.2013 bei Anwendung der vor dem 01.07.2012 mit RdErl. vom 03.05.2010 eingeführten technischen Regeln eine gleichwertige Lösung im Sinne des § 3 Absatz 1 Satz 3 BauO NRW vermutet werden. Zusätzlicher Nachweisführungen in Bezug auf die Gleichwertigkeit bedarf es in dieser Übergangszeit nicht. ...“. Hierbei handelt es sich ausschließlich um eine bauordnungsrechtliche Regelung. Diese entbindet den Tragwerksplaner nicht von der zivilrechtlichen Pflicht, dem Auftraggeber eine Ingenieurleistung nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik zu liefern. Somit ist klar, dass die Anwendung der Eurocodes diesen Zweifel ausräumen würde. Die parallele Verwendung der abgelösten DIN-Normen ist zwar bauordnungsrechtlich in Bundesländern wie NRW erlaubt, entbindet den Tragwerksplaner aber nicht von seiner Pflicht etwaige Neuerungen der Eurocodes zu berücksichtigen.

In den anderen Bundesländern existieren derzeit noch unterschiedliche Regelungen hinsichtlich der erweiterten Übergangsregelungen und dem Umgang mit den Nachweisen nach DIN-Normen. Über den aktuellen Stand der Regelungen ist in den entsprechenden Bauministerien der Länder Auskunft einzuholen.

4.1.2 Vorgehensweisen zum Nachweis der Tragwerkszuverlässigkeit

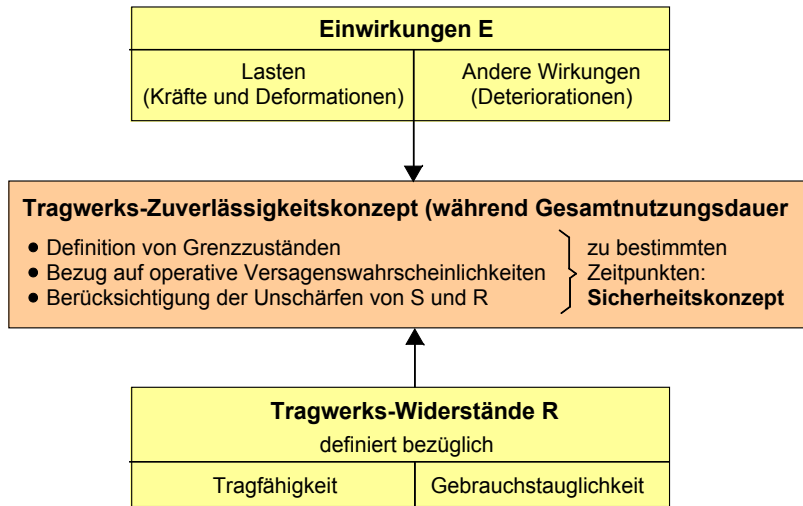
Bauwerke sind nach internationalem Rechtsverständnis technische Werke, deren Zuverlässigkeit, zumeist unterteilt in Gebrauchstauglichkeit und Versagenssicherheit, im Rahmen normenkonformer Lastzustände allein durch ihren Entwurf, ihre Konstruktionsweise und ihren Errichtungsprozess gewährleistet sein muss. Dies beinhaltet, dass sie nur begrenzte Wartungsaufwendungen erfordern sollten und von jedermann gefahrungsfrei nutzbar sein müssen. Im Sinne von Dauerhaftigkeit sollten sämtliche Tragwerksfunktionen hinsichtlich Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit ohne wesentliche Nutzungseinschränkungen und bei üblichem Erhaltungsaufwand während der gesamten planmäßigen Nutzungsdauer bewahrt bleiben.

Sämtliche Eigenschaften und Fähigkeiten eines Tragwerks zur Erfüllung dieser Zuverlässigkeitsanforderungen bezeichnet man als Tragwerkswiderstände R (engl.: „resistance“), unterteilt in Widerstände gegen Tragwerksversagen und solche zur Aufrechterhaltung der Gebrauchstauglichkeit. Diese Widerstände werden durch die Auswirkungen E unterschiedlicher Einwirkungen (engl.: „action effect“) aktiviert. Dazu gehören nutzungsbedingte Einwirkungen, die zumeist kraftbasiert sind (Lasten aus Eigengewicht, Verkehr, Betrieb), umweltbedingte Gefahren (Wind, Schnee, Flutungen), bewegungsbasierte Effekte (Ermüdung, Fundamentsetzungen, Erdbeben) oder physikalisch, chemisch, biologisch verursachte Einwirkungen wie Temperatur, Korrosion, Schwinden, Quellen, Karbonatisierung und Verwitterung.

Die erwähnten Widerstände R und Einwirkungseffekte E werden vom Zuverlässigkeitskonzept des Tragwerks verknüpft, welches alle kritischen Zustände auf einheitlich definierte, hinreichend kleine Auftretenswahrscheinlichkeiten P_f beschränken soll, und zwar während der gesamten Tragwerksnutzungsdauer. Für den Versagensfall wird P_f gern als operative Versagenswahrscheinlichkeit bezeichnet. Die oben erwähnte Eingrenzung erfolgt im Einzelnen mit den Anforderungen des Sicherheitskonzeptes, welches mittels (partiellen) Sicherheitsbeiwerten der Widerstandsseite R und (partiell-

len) Sicherheitskoeffizienten sowie Kombinationsbeiwerten der Einwirkungsseite E den Zeitpunkt eines möglichen Auftretens kritischer Tragwerkszustände vom Lebenszeitintervall der Tragwerksnutzungsdauer sicher fernhält. Abbildung 106 veranschaulicht diese in allen Europäischen Staaten heute geltenden Konzepte mit ihren grundsätzlichen Zusammenhängen.

Abbildung 106: Das Zuverlässigkeitskonzept in der baulichen Gefahrenabwehr



(UFOPLAN 203 48 362)

4.1.3 Das Dilemma der Kombinationsrisiken nach StörfallV

Die Störfall-Verordnung (12. BImSchV) regelt die Sicherheit in (genehmigungspflichtigen) Betriebsbereichen, in welchen alle Störfälle zu einer ernststen Gefahr für Leben und Gesundheit von Menschen sowie von Umwelt, Boden, Wasser, der Atmosphäre und Kultur- oder sonstigen Sachgütern führen würden. Als Störfälle nach StörfallV gelten alle Ereignisse, wie Fehlbedienungen, Explosionen oder Brände, bei denen es zu Stofffreisetzungen in die Atmosphäre, umliegende Gewässer oder den Boden kommen kann. Die während eines derartigen Störfalls möglicherweise freigesetzten Stoffe werden in der 12. BImSchV generell als gefährliche Stoffe bezeichnet und sind im Anhang nach ihrem Gefahrenpotential klassifiziert.

Der Betreiber eines Betriebsbereiches hat nach Art und Ausmaß möglicher Gefahren alle erforderlichen Vorkehrungen zu treffen, um mögliche Störfälle zu verhindern bzw. ihre Auswirkungen zu begrenzen. Dabei hat er nach dem Stand der Sicherheitstechnik vorzugehen, d.h. er muss den Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen kennen und beurteilen können, die zur Verhinderung von Störfällen sowie zur Begrenzung derer Auswirkungen erfolgreich eingesetzt werden können. In Erfüllung seiner Pflichten hat der Betreiber alle betrieblichen Gefahrenquellen, alle umgebungsbedingten Gefahrenquellen sowie Eingriffe Unbefugter mit ins Kalkül zu ziehen.

An dieser Stelle kommt die bauliche Gefahrenabwehr der Tragwerke eines Betriebsbereiches ins Spiel, weil dessen Produktionsprozesse immer in Verbindung mit Baukonstruktionen und deren Tragwerken stehen. Die Störfallverordnung erwähnt dies explizit nur im „§ 5 Anforderungen zur Begrenzung von Störfallauswirkungen“, nach welchen der Betreiber eines Betriebsbereiches „Maßnahmen zu treffen (hat), damit durch die Beschaffenheit der Fundamente und der tragenden Gebäudeteile bei Störfällen keine zusätzlichen Gefahren hervorgerufen werden können.“ Hierbei erweckt die StörfallV den Eindruck, als sehe sie die üblicherweise vorhandenen baulichen Sicherheiten als sehr (unendlich?) groß an, weil sie sich eben vornehmlich auf die Sicherheit der Betriebsprozesse im Sinne eines Störfall-Vermeidungsmanagements konzentriert. Auch gibt es verständlicherweise keine Informationen über die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Störfällen, um diese beispielsweise mit Versagenswahrscheinlichkeiten von Konstruktionen in Betriebsbereichen zu verknüpfen. Tatsächlich besitzt jedes Tragwerk bekanntermaßen eine zwar sehr kleine, aber eben doch endliche Versagenswahrscheinlichkeit, die mit der betrieblichen Störfall-Wahrscheinlichkeit im Sinne einer Risiko-Akkumulation kombiniert werden müsste, um die Versagenswahrscheinlichkeit des Gesamtsystems „Tragwerk + Betriebsprozess“ zu gewinnen. Da

dieser Weg versperrt ist, muss eine Risikominimierung von Betriebsbereichen andere Konzepte verfolgen, die über die der baulichen Gefahrenabwehr hinausgehen.

Mathematisch formuliert handelt es sich dabei um ein Problem der Begrenzung von Kombinationsrisiken. Das generelle Dilemma in den vorliegenden Fällen liegt nun darin, dass man die genaue Größe weder der baulichen Versagenswahrscheinlichkeiten unter vorgegebenen Lastfallkombinationen noch viel weniger die Wahrscheinlichkeiten von Störfällen vorgegebener Betriebsprozesse kennt. Beides wären statistische Parameter am Rand der jeweiligen Verteilungsfunktionen, die nur dann kombinierte Einzelfall-Schlussfolgerungen zulassen, wenn die statistischen Verteilungsfunktionen dort sehr detailliert bekannt wären (Klingmüller, Bourgund 1992).

4.1.4 Über Grenzzustände und Sicherheiten bei Tragkonstruktionen

Für Eigentümer und Betreiber gerät ein Tragwerk dann in einen kritischen Zustand, wenn entweder dessen planmäßige Nutzung nicht mehr gewährleistet ist oder wenn eine unmittelbare Gefahr der Tragsicherheit, im Bauwesen oft als Standsicherheit bezeichnet, besteht. Heutige moderne, weltweite ähnliche Sicherheitskonzepte für Nachweisverfahren zur baulichen Gefahrenabwehr definieren hierfür bestimmte Grenzzustände als Nachweis- oder Bemessungsziele. Je nachdem, ob Versagenssicherheiten oder Gebrauchseigenschaften der Konstruktion das Bemessungsziel sind, wird zwischen

1. Grenzzuständen der Tragfähigkeit (des Versagens) und
2. Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

unterschieden. Für beide Grenzzustandssituationen, die im Allgemeinen beide gleichzeitig zu gewährleisten sind, existieren international abgestimmte Mindestwerte (operativer) Eintrittswahrscheinlichkeiten P_f . Letztere werden für Deutschland durch die Europäische Normung CEN und das Deutsche Institut für Normung DIN festgelegt.

Für jeden der obigen Grenzzustände ist zu verifizieren, dass während eines festgelegten Bezugszeitraums, beispielsweise der Tragwerksnutzungsdauer, die zu erwartenden Folgen der Einwirkungen E die zugeordneten Tragwerkswiderstände R mit einer festgelegten hohen Wahrscheinlichkeit nicht überschreiten:

$$(52) \quad R \geq E, \Rightarrow Z = R - E \geq 0$$

Z bezeichnet man hierin als Sicherheitszone. Beide Größen E und R sind mit Unschärfen stochastischen Charakters behaftet, die mittels probabilistischer Vorgehensweisen über die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsfunktionen erfasst werden können. Z beschreibt somit ebenfalls eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und die gesamte Beziehung einen stochastischen Prozess.

Um die Sicherheitsnachweise der Konstruktionspraxis von schwierigen mathematischen Vorgehensweisen zu befreien, erfolgt die Behandlung der obigen Grenzzustandssituation durch normenseitige Festlegungen von Sicherheitsbeiwerten, welche die Einwirkungs- und Widerstandsseite ausreichend weit voneinander entfernt halten. Diese grenzen charakteristische Fraktilwerte der jeweiligen statistischen Verteilungsfunktionen R , E beider Seiten so weit voneinander ab, dass die vereinbarten sehr kleinen Eintrittswahrscheinlichkeiten kritischer Zustände garantiert sind. Weil diese Sicherheitsbeiwerte von den jeweils typischen Verteilungsfunktionen abhängen, besitzen sie unterschiedliche, durch die jeweiligen Normen festgelegte Größen. Da diese Größen beide Seiten, sowohl die Einwirkungseffekte E als auch die Widerstände R , betreffen, bezeichnet man sie als Partialsicherheitsfaktoren. Ihr Gegensatz sind Gesamtsicherheitsfaktoren älterer, heute als überholt geltender, Zuverlässigkeitskonzepte.

Bei der möglichen Übertragung der beiden Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit auf Konstruktionen von Betriebsbereichen wäre zu prüfen, ob der erstere möglicherweise durch die verschärfte Definition eines Grenzzustands der Funktionsfähigkeit zu ersetzen oder zu erweitern ist. Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist nämlich eventuell zu allgemein und zu unscharf für Anforderungen sicherer Produktionsweisen von Betrieben definiert, wie man leicht aus betrieblichen Zusatzbedingungen wie Rissefreiheit von Rohrleitungen, Gasdichtigkeit von Behältern und ähnliches erkennt.

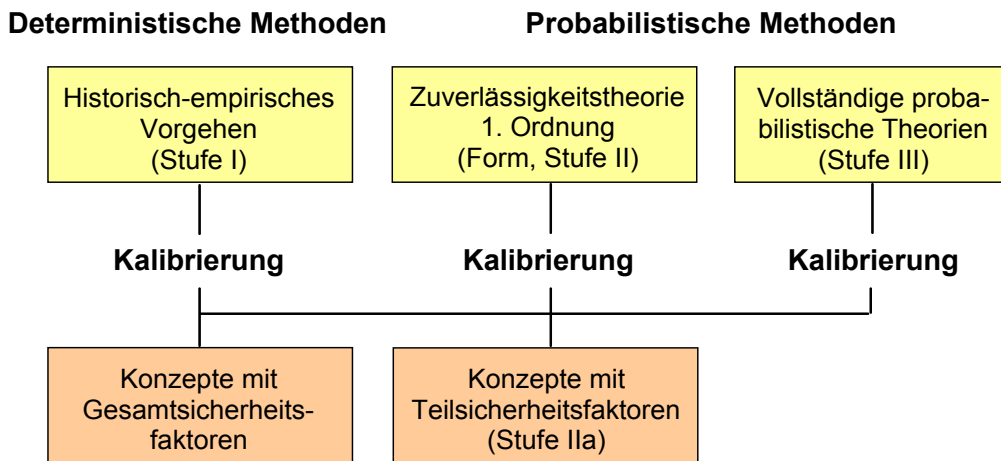
4.1.5 Zu den Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse

Die modernen Vorgehensweisen der baulichen Gefahrenabwehr bauen auf einem sehr theoretischen Hintergrund auf (Schuëller 1981): Sie alle basieren auf Methoden der probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie, formuliert mittels der mathematischen Theorie stochastischer Prozesse. Die zur Behandlung empfohlenen Vorgehensweisen sind hierarchisch gestuft, von traditionellen (historischen) Nachweiskonzepten bis hin zu vollständig stochastischen Vorgehensweisen. Einen Überblick hierüber in Anlehnung an den Anhang B der DIN 1055-100:2001-03 gibt Abb. 5.1. Erheblich stärker detaillierte Erläuterungen als in DIN 1055-100:2001-03 finden sich derzeit in den Anhängen B und C der DIN EN 1990:2010-12, und natürlich in strengen Herleitungen der Fachliteratur (Klingmüller, Bourgund 1992, Schuëller 1981).

Jedes moderne zuverlässigkeits-theoretische Nachweiskonzept hat sich mit den statistischen Eigenschaften seiner einwirkenden und widerstehenden Elemente auseinander zu setzen: Alle Tragwerkseigenschaften, die Werkstoffeigenschaften und vor allem die Einwirkungen unterliegen unterschiedlichen Verteilungsfunktionen, statistischen Unschärfen und führen damit zu Sicherheitsstreuungen, welche durch das verwendete Zuverlässigkeitskonzept sicher abgefangen werden müssen.

Bis in das letzte Drittel des 20. Jahrhunderts hinein blieben in Deutschland derartige statistische, genauer gesagt probabilistische Aspekte in der baulichen Gefahrenabwehr weitgehend unberücksichtigt. Eine Sonderrolle spielte allerdings schon früh die Widerstandsseite der Baustoffe mit ihren normenseitig vorbildlich geregelten statistischen Testauswertungen. Auch hatte gerade ein deutscher Forscher bereits 1926 nachdrücklich auf den Widerspruch deterministischer Behandlung eigentlich stochastischer Probleme hingewiesen (Mayer 1926). Grundlegende Pionierarbeiten zu probabilistischen Zuverlässigkeitskonzepten, erzwungen durch gravierende Sicherheitsprobleme im Flugzeugbau der Kriegs- und Nachkriegszeit, entstanden ab 1950 (Freudenthal 1956) vor allem in den USA. Intensivierte Forschungen im Deutschen Ingenieurwesen finden sich erst seit den 1970er Jahren, nachdem an der TU München der Sonderforschungsbereich SFB 98 der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG zu Sicherheitskonzepten im konstruktiven Ingenieurbau eingerichtet worden war (Rüsch 1970, Schuëller 1981).

Abbildung 107: Überblick über Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse (UFOPLAN 203 48 362)



Historisch gesehen sind Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprobleme in der Technik gemäß Abbildung 107 zunächst mittels Gesamtsicherheitsfaktoren und im Rahmen von sogenannten zulässigen Spannungen behandelt worden. Da die hierin beteiligten Unschärfeparameter, interpretiert als Fraktilwerte der beteiligten Wahrscheinlichkeitsverteilungen, jedoch sehr unterschiedlichen Verteilungsfunktionen entstammen, wurden derartige Sicherheitskonzepte der Stufe I bereits früh als relativ unsicher erkannt (GruSiBau 1977). Bei ihrer Anwendung können unbeabsichtigt sowohl Sicherheitsdefizite als auch erhebliche Sicherheitsüberschüsse auftreten.

Vom mathematischen Standpunkt kann Abhilfe durch gesteigerte Genauigkeit letztlich nur mittels vollständig probabilistischer Zuverlässigkeitskonzepte (Stufe III, SORM: Second-order reliability method) geschaffen werden, welche die

spezifischen Eigenschaften der jeweiligen statistischen Verteilungsfunktionen berücksichtigen. Die hierbei einzusetzenden mathematischen Methoden gelten jedoch in der Ingenieurpraxis als so schwierig (GruSiBau 1977, Schuëller 1981), dass Theorien der Stufe III in naher Zukunft kaum Eingang in die technische Nachweispraxis finden werden. Sie leiden außerdem unter dem Makel, dass für die sehr seltenen Zustände an den Rändern ihrer Verteilungsfunktionen, den für Zuverlässigkeitsaussagen entscheidenden Bereichen, kaum physikalisch verlässliche Information vorliegen, die Ergebnisse somit entscheidend von physikalisch fragwürdigen mathematischen Funktionseigenschaften abhängen. Allenfalls wäre ein Eingang in linearisierter Form als Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung (Stufe II, FORM: First-order reliability method) denkbar, wie dies beispielsweise im Anhang von DIN 1055-100:2001-03 erläutert wird. Schätzt man mit dem Ziel einer Vereinfachung die hierbei auftretenden statistischen Verteilungsfunktionen durch geeignete Fraktilwerte ab, so gelangt man zu Zuverlässigkeitskonzepten mittels Partialsicherheitsfaktoren (Teilsicherheitsfaktoren). Diese Stufe IIa gemäß Abbildung 107 stellt die Basis der ab dem 01.07.2012 geltenden Eurocodes dar, der modernen Europäischen Bau-normen, und Nachweisformaten vieler weiterer Länder.

Schwachpunkt aller deterministischen und probabilistischen Zuverlässigkeitstheorien bildet stets deren Kalibrierung an der technischen Realität. Tragwerksversagen stellt nämlich, besonders im Bauwesen, einen äußerst unwahrscheinlichen Grenzfall für seltene Extremereignisse dar, häufig zusätzlich gekoppelt an menschliches Versagen. Da letzteres im Zusammenhang mit technischen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen als rational nicht erfassbar ausgeklammert werden muss, sind vertrauenswürdige statistische Unterlagen über bauliche Versagensfälle äußerst rar. Diese können höchstens aus Schadensfällen ganzer Volkswirtschaften gewonnen werden, also für eine Parametrisierung in Sicherheitskonzepten zu wenig präzise. Dennoch stellt diese Kalibrierung natürlich die Nagelprobe von Zuverlässigkeitsnachweisen dar: Das Standardverfahren einer derartigen Kalibrierung, das jedoch vielfältige Praktikabilitätsannahmen beinhaltet, ist in DIN 1055-100:2001-03 erläutert. Vorgehensweisen bei einer Kalibrierung auf der Basis von Experimenten finden sich in (DIN EN 1990:2010-12; Ciupack, Pasternak 2012).

Wir werden im Folgenden die Grundzüge der Zuverlässigkeitstheorie Stufe IIa mit Teilsicherheitsfaktoren begründen, insbesondere auch im Hinblick auf die in der StörfallIV nicht angesprochenen, aber implizit stets vorhandenen Kombinationssicherheiten.

4.2 Sicherheitsnachweise mittels Teilsicherheitsbeiwerten

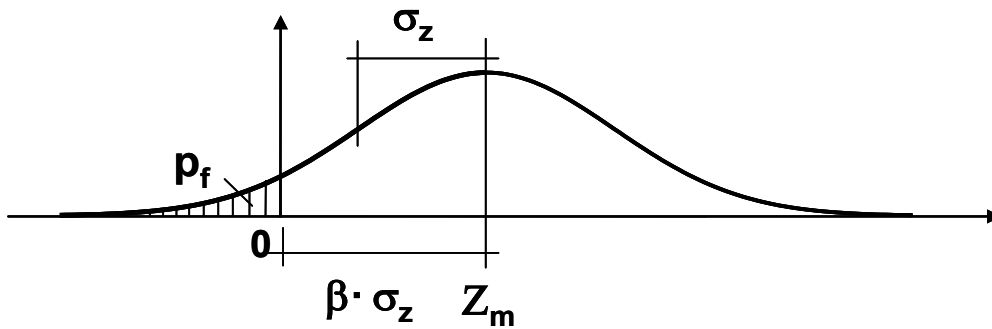
4.2.1 Grenzzustandsfunktion und Zuverlässigkeitsindex β

Im Rahmen von Zuverlässigkeitskonzepten der Stufe IIa, siehe Abbildung 107, die in ihren technischen Nachweisproblemen mit Partialsicherheitsfaktoren arbeiten und daher auch als semi-probabilistisch bezeichnet werden, wird der Zuverlässigkeitsindex β als Maß für die Sicherheit einer vorliegenden Tragwerkssituation betrachtet. Zu seiner Erläuterung beginnen wir erneut mit der Sicherheitszone Z einer bestimmten Tragwerkssituation. Sowohl der Tragwerkswiderstand R als auch der Einwirkungseffekt E infolge kombinierter Tragwerkseinwirkungen repräsentieren grundsätzlich Zufallsverteilungen, deshalb besitzt natürlich auch die Sicherheitszone Z

$$(53) \quad Z = R - E$$

statistische Eigenschaften: Alle Werte $Z > 0$ garantieren das Überleben des Tragwerks, Werte $Z < 0$ sein Versagen, und der Zustand $Z = 0$ beschreibt gerade die Grenze zwischen Versagen und Überleben. Diese Grenze bezeichnet man als Grenzzustandsfunktion $g: R - E = 0$. Sind sowohl R als auch E normalverteilt (Gauss-verteilt), so gilt dies auch für Z . Üblicherweise gehorchen R und E andere Verteilungsfunktionen. Dennoch wird auch dann die Sicherheitszone Z gern als normalverteilt vorausgesetzt. Dies stellt eine näherungsweise geltende Praktikabilitätsannahme dar, die aber wegen der geringen Wahrscheinlichkeiten für $Z < 0$ allgemein als konfident angesehen wird.

Abbildung 108: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Sicherheitszone Z



Mit dem Gesagten wird deutlich, dass die Tragwerkssicherheit grundsätzlich nur durch Wahrscheinlichkeitsaussagen bewertet werden kann. Die Wahrscheinlichkeit $(1-P_f)$ dafür, dass Versagen nicht eintritt, d.h. dass für die Sicherheitszone Z die Überlebensaussage $Z > 0$ gilt, ist ein Maß für die Zuverlässigkeit des Tragwerks. Aus Abbildung 108 erkennt man, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit umso höher liegt, je größer der Mittelwert Z_m der Sicherheitszone Z im Verhältnis zu deren Standardabweichung σ_z ist. Umgekehrt gilt natürlich auch, dass die Versagenswahrscheinlichkeit P_f als Maß für das Risiko einer technischen Anlage umso geringer bleibt, je größer dieser Verhältniswert ist. Er wird daher als Sicherheits- oder Zuverlässigkeitsindex β bezeichnet und zur Quantifizierung sowohl der Überlebenswahrscheinlichkeit $(1-P_f)$ als auch der Versagenswahrscheinlichkeit P_f verwendet:

$$(54) \quad \beta = Z_m / \sigma_z$$

Unter Annahme einer normalverteilten Sicherheitszone lässt sich folgender Zusammenhang zwischen der operativen Versagenswahrscheinlichkeit P_f und dem Zuverlässigkeitsindex β herleiten (Schneider 1994):

$$(55) \quad P_f = \text{Prob}(Z \leq 0) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta)$$

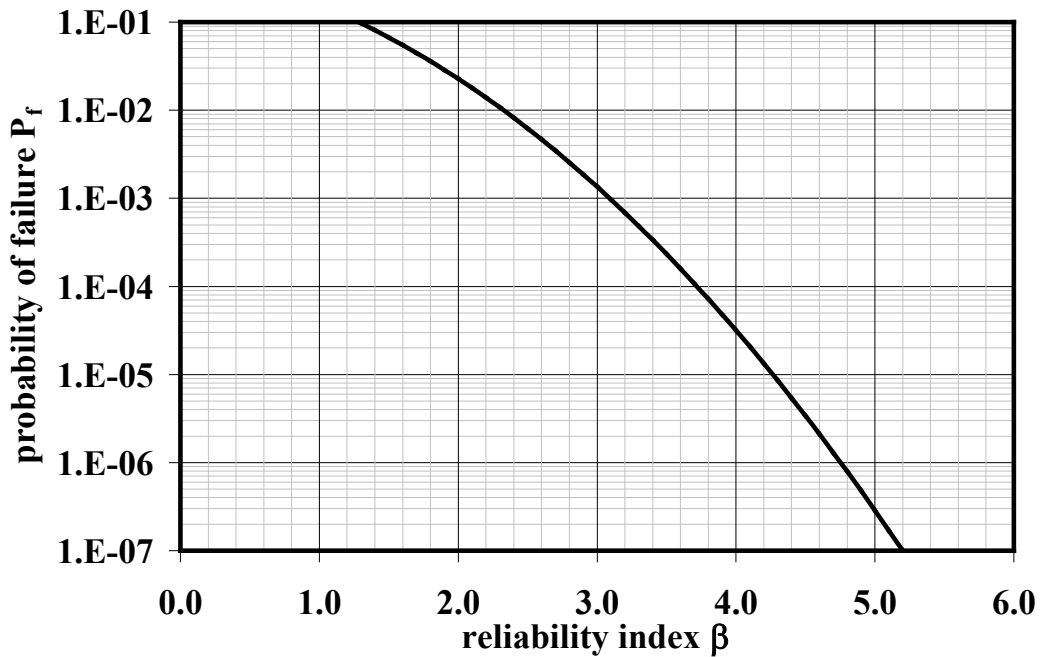
Hierin kürzt Φ die kumulative Verteilungsfunktion der vorausgesetzten standardisierten Normalverteilung ab. Der Sicherheitsindex β erweist sich hiermit als der P_f -Fraktilwert der Standardnormalverteilung. Der oben eingeführte Zuverlässigkeitsindex β wird im modernen Ingenieurbau als charakteristisches Maß für operative Versagenswahrscheinlichkeiten zu beurteilender Tragwerkssituationen verwendet. Einzelwerte der Beziehung zwischen P_f und β sind in Tabelle 36 angegeben; die Funktion $\beta(P_f)$ ist in Abbildung 109 dargestellt.

Tabelle 36: Beziehung zwischen operativer Versagenswahrscheinlichkeit P_f und Zuverlässigkeitsindex β

P_f	β
10^{-1}	1,282
10^{-2}	2,326
10^{-3}	3,090
10^{-4}	3,719
10^{-5}	4,265
10^{-6}	4,753
10^{-7}	5,199
10^{-8}	5,612
10^{-9}	5,998
10^{-10}	6,361

Wie bereits erwähnt stellen sich bei genauer Herleitung Sicherheitszonen Z selten als normalverteilt dar. In diesen Fällen hält die Forschung (Rackwitz 1978) mathematische Konzepte zur Ermittlung des Zuverlässigkeitsindex β bei anderen Verteilungsfunktionen bereit. So verwendet man beispielsweise für Baustoffeigenschaften, Tragwerkswiderstände und geometrische Ungenauigkeiten oft log-normale oder Weibull-Verteilungsfunktionen, die Gauss-Verteilung eigentlich nur für Eigenlasten sowie verschiedene Extremwertverteilungen z.B. nach Gumbel für alle veränderlichen Einwirkungen DIN 1055-100. In der Nachweispraxis aber pflegt man ohne Detailprüfung die Sicherheitszone Z als näherungsweise normalverteilt anzusehen. Das wird gelegentlich mit dem zentralen Grenzwertsatz der Statistik begründet. Allgemein stellen die Beziehungen der Tabelle 36 natürlich Näherungen dar, deren Näherungsgrenzen unbekannt bleiben.

Abbildung 109: Zuverlässigkeitsindex β und operative Versagenswahrscheinlichkeit P_f



(Niemann et al. 2012)

4.2.2 Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β

Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β für die einzelnen Grenzzustandssituationen von Tragwerken sind im Bauwesen normenseitig festgelegt. Für Tragwerke mittlerer Qualitätsklassen (RC 2) finden sich derartige Zielwerte im Anhang B der DIN 1055-100:2001-03 und im Anhang C der DIN EN 1990:2010-12, sie sind hier in Tabelle 37 wiedergegeben.

Tabelle 37: Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β für Baukomponenten mit RC 2- Anforderungen

Bezugszeiträume:	1 Jahr	50 Jahre
Grenzzustände der Tragfähigkeit	4,7	3,8
Grenzzustände der Ermüdung		1,5 – 3,8
Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit	2,9	1,5

Die in Tabelle 37 auftauchende 50-Jahresfrist wird dabei als Mittelwert der Tragwerksnutzungsdauer interpretiert. Bei vielen wichtigen Bauwerksklassen (Stadien, Brücken, Kraftwerken, Staudämmen) wird diese erheblich länger sein. Auch treten im Sicherheitsnachweis oftmals Risikokomponenten auf, deren Unsicherheiten auf unterschiedliche Mittelungszeiträume bezogen sind. Seismische Einwirkungen (Bezugszeitraum 475 Jahre), Folgen von Hochwässern (Bezugszeit-

räume 100 Jahre und darüber) sowie alle Bauwerke besonders langer Lebensdauern und dominanter natürlicher Einwirkungen (Solare Aufwindkammine) sind Beispiele derartigen Situationen. In allen derartigen Fällen kann gemäß (DIN EN 1990:2010-12) der Zuverlässigkeitsindex β für andere Bezugszeiträume mit Hilfe der Näherung

$$(56) \quad \Phi(\beta_n) = [\Phi(\beta_1)]^n$$

umgerechnet werden. Hierin bezeichnet β_n den Zuverlässigkeitsindex für einen Bezugszeitraum von n Jahren, β_1 denjenigen für 1 Jahr. Die angegebene Beziehung setzt für die Sicherheitszone Z wieder Gauss-Verteilung voraus. Die Statistik extremer Einwirkungen benutzt in der Regel als statistische Variable die Extremwerte aus jeweils einem Jahr. In diesem Falle sind als Zielgrößen der Bemessung die Zuverlässigkeitsindices β des Bezugszeitraums 1 Jahr, d.h. die höheren Werte anzuwenden.

4.2.3 Theoretische Herleitung von Teilsicherheitsfaktoren

Die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte folgt einem strengen mathematischen Konzept, das wir jetzt vorstellen. Dabei orientieren wir uns am ausführlichen Anhang des Eurocodes DIN EN 1990:2010-12 sowie an den Herleitungen in (Klingmüller, Bourgund 1992) und (König, Tue 1998). Grundlage der Bemessung sind die sog. Bemessungswerte der beteiligten Basisvariablen, Sie ergeben sich aus dem Zusammenhang $Z = E - R$ in Verbindung mit der Gleichung (54), die nunmehr als Nachweisgleichung für ein gefordertes, durch die Höhe von β gekennzeichnetes Sicherheitsniveau zu verstehen ist. Zunächst erhält man

$$(57) \quad \beta \geq \frac{m_R - m_E}{\sigma_Z}$$

Um die Standardabweichung σ_Z der Sicherheitszone auf die Standardabweichungen der beiden Basisvariablen R und E verteilen zu können, wird im FORM-Verfahren ihr Zusammenhang linearisiert, indem Wichtungsfaktoren α_E und α_R eingeführt werden:

$$(58) \quad \sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2} = \alpha_R \cdot \sigma_R - \alpha_E \cdot \sigma_E$$

Der Ansatz ist derart formuliert, dass die Wichtungsfaktoren für schädigende Basisvariable negativ oder Null sein müssen, also $-1 \leq \alpha_E < 0$ gilt, damit σ_Z in jedem Fall positiv ausfällt. Für die Widerstandsgrößen sind die Wichtungsfaktoren positiv: $0 \leq \alpha_R \leq 1$. Die Linearisierung ist exakt, wenn die Faktoren wie folgt berechnet werden:

$$(59) \quad \alpha_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_E^2}} \quad \text{wobei } i = E, R$$

Daraus folgt, dass die Summe ihrer Quadrate 1 ergibt. In den Festsetzungen der Normen ist diese Summe, wie wir sehen werden, im Allgemeinen > 1 . Eine solche Regelung liegt auf der sicheren Seite.

Mithilfe der Linearisierung kann nun Gleichung (57) nach den Größen E und R umgeordnet werden, so dass man eine Bemessungsgleichung erhält:

$$(60) \quad m_R - \alpha_R \sigma_R \beta \geq m_E - \alpha_E \sigma_E \beta$$

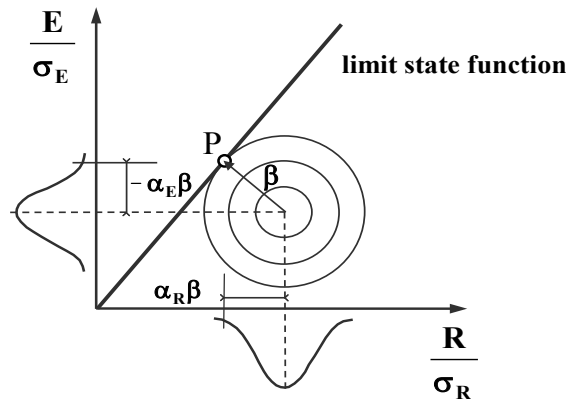
Die beiden Seiten definieren die gesuchten Bemessungswerte von Einwirkungseffekt und Widerstand, E_d und R_d :

$$(61) \quad R_d = m_R - \alpha_R \sigma_R \beta$$

$$(62) \quad E_d = m_E - \alpha_E \sigma_E \beta$$

Die Bemessungswerte sind – wie Abbildung 110 zeigt – als Koordinaten des Bemessungspunktes zu verstehen. Er ist derjenige Punkt auf der Grenzzustandsfunktion g , an dem die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen am höchsten ist.

Abbildung 110: Verbund-Wahrscheinlichkeitsdichte von Einwirkung E und Widerstand R



(Niemann et al. 2012)

Es gibt eine gewisse, geringe Wahrscheinlichkeit $P(R \leq R_d)$ dafür, dass ein Widerstand R auftritt, der kleiner als der Bemessungswert ist. Für die Gauß-Verteilung des Widerstands erhält man die normierte Koordinate

$$(63) \quad \frac{R_d - m_R}{\sigma_R} = -\alpha_R \beta$$

und daraus die gesuchte Wahrscheinlichkeit zu

$$(64) \quad P(R \leq R_d) = \Phi(-\alpha_R \beta) .$$

In analoger Weise erhält man für die Überschreitung des Einwirkungseffekts

$$(65) \quad P(E > E_d) = \Phi(\alpha_E \beta) .$$

Auch diese Wahrscheinlichkeit ist klein, wobei zu beachten ist, dass $\alpha_E < 0$ gilt.

DIN EN 1990:2010-12 nennt folgende Wichtungsfaktoren α für eine die Auswirkung E und den Widerstand R:

$$(66) \quad \alpha_E = -0.70, \alpha_R = +0.80$$

sofern die folgende Einschränkung erfüllt ist:

$$(67) \quad 0.16 < \sigma_E / \sigma_R < 7.60 .$$

Damit ergibt sich die Wahrscheinlichkeit, dass der Bemessungswert der Auswirkung überschritten wird zu

$$(68) \quad P(E > E_d) = \Phi(-0,7 \cdot \beta)$$

und analog für die Unterschreitung des Bemessungswertes des Widerstands zu

$$(69) \quad P(R \leq R_d) = \Phi(-0,8 \cdot \beta)$$

Beispielhaft erhält man für $\beta = 4,7$ mit Abbildung 109 folgende Wahrscheinlichkeiten:

$$(70) \quad P(E > E_d) = \Phi(3,29) = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$(71) \quad P(R \leq R_d) = \Phi(-3,76) = 10^{-4}$$

$$(72) \quad P_f = P(R_d \leq E_d) = \Phi(-4,7) = 10^{-6}$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit nach Gleichung (55) erweist sich als geringer als die Wahrscheinlichkeiten der o.a. Bemessungswerte. In der Praxis wirken zahlreiche Einwirkungen F auf ein Tragwerk ein. Dann gilt der Wichtungsfaktor $\alpha_F = -0,7$ nur für die Leiteinwirkung, d.h. diejenige Einwirkung, die in einer bestimmten Lastkombination die größten Beanspruchungen erzeugt. Für Begleiteinwirkungen wird $\alpha_F = -0,4$, $0,7 = -0,28$ empfohlen. Die DIN EN 1990:2010-12 enthält im Anhang C.7 noch weitere Werte der Faktoren α_E und α_R .

In einigen wenigen Normen benutzt man für die Nachweise der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit direkt die Bemessungswerte. In der europäischen Normung führt man sog. charakteristische Werte ein. Dabei geht man auf der Seite der Einwirkungseffekte E auf die Einwirkungen F selbst über. Der charakteristische Wert einer Einwirkung F_k , ist dadurch definiert, dass er mit einer gewählten Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird. Ständige Einwirkungen G rühren aus den Eigenlasten der Bauteile her. Sie wirken während der gesamten Nutzungsdauer ein und ihre Veränderlichkeit gegenüber dem Mittelwert ist gering. Bei ihnen kann daher der Mittelwert m_G als charakteristische Größe benutzt werden. Für die Einwirkungen aus Wind oder Schnee ist der charakteristische Wert so gewählt, dass die jährliche Überschreitungsrates nicht größer als 0,02 ist. Auf der Widerstandsseite handelt es sich um die charakteristische Festigkeit X_k oder eine Bauteiltragfähigkeit R_k , die mit nur noch geringer Wahrscheinlichkeit unterschritten werden.

Das für die charakteristischen Werte gewählte Wahrscheinlichkeitsniveau ist für die angestrebte Zuverlässigkeit zu hoch. Der Übergang auf die extremen, d.h. auch extrem unwahrscheinlichen Bemessungswerte der Einwirkungen erfolgt durch den Teilsicherheitsbeiwert:

$$(73) \quad \gamma_E = \frac{E_d}{E_k} = \frac{m_E + \alpha_E \beta \sigma_E}{E_k}$$

Im Falle der ständigen Einwirkung mit $G_k = m_G$ ergibt sich beispielsweise

$$(74) \quad \gamma_G = \frac{m_G - \alpha_G \cdot \beta \cdot \sigma_G}{m_G} = 1 - \alpha_G \cdot \beta \cdot V_G$$

Dabei ist $V_G = \sigma_G / m_G$ der Variationskoeffizient der Eigenlast, der typischerweise in der Größenordnung von 0,1 liegt. Man erhält für $\alpha_G = -0,7$ bei $\beta = 3,8$ einen Teilsicherheitsbeiwert von 1,27. Die Norm gibt 1,35 an. Mit der Erhöhung ist die Auswirkung der Modelunsicherheit mit einem Faktor von 1,06 abgedeckt.

Auf der Seite des Widerstands ist der charakteristische Wert R_k durch den Teilsicherheitsbeiwert γ_R zu vermindern. Daher gilt:

$$(75) \quad \gamma_R = \frac{R_k}{R_d}$$

R_k wird im Allgemeinen als 5%-Fraktile festgelegt. Anstelle einer Normalverteilung benutzt man die logarithmische Normalverteilung. Hierfür liegt die 5%-Fraktile bei

$$(76) \quad R_k = m_R \cdot e^{-1,645 \cdot V_R}$$

Der Bemessungswert ist in Tabelle 38 angegeben:

$$(77) \quad R_d = m_R \cdot e^{-\alpha_R \beta \cdot V_R}$$

Für das Beispiel mit $\alpha_R = 0,8$, $\beta = 3,8$ und $V_R = 0,10$ ergibt sich so

$$(78) \quad \gamma_R = \frac{e^{-1,645 \cdot 0,10}}{e^{-0,83,8 \cdot 0,10}} = 1,15$$

Dieser Teilsicherheitsbeiwert ist typisch für den Materialsicherheitsbeiwert des Betonstahls bei der Bemessung im Stahlbetonbau. Beanspruchung und Beanspruchbarkeit unterscheiden sich in der Regel hinsichtlich ihrer Mittelwerte und ihrer Streuungscharakteristik. Diese beiden Informationen allein sind gemäß Gleichung (57) bereits ausreichend, um die Sicherheit eines Tragwerkszustandes zu bestimmen. Dies würde natürlich auch mittels eines Gesamtsicherheitskoeffizienten gelingen, exakt allerdings nur für eine einzige Einwirkungskomponente E wie in der Herleitung. In der Entwurfspraxis treten natürlich immer mehrere Einwirkungen gleichzeitig auf, weshalb Teilsicherheitsfaktoren dann eine bessere Erfassung der jeweiligen Mittelwerte und Streuungen gestatten.

4.2.4 Unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Alle Herleitungen des letzten Kapitels basieren auf Normalverteilungen, sogenannte Gauss-Verteilungen. Nun sind aber Zufallsprozesse, denen viele Vorgänge in Natur und Technik unterliegen, in ihrer Streuungscharakteristik erheblich vielfältiger als die symmetrische Gauss-Verteilung, weshalb zu deren Beschreibung auch andere Verteilungsfunktionen in Gebrauch sind. Diese sind in ihrem funktionalen Verlauf den jeweiligen Zufallsdaten oftmals besser anzupassen als Normalverteilungen.

Tabelle 38 gibt einen Kurzüberblick über die anstatt Mittelwert und Standardabweichung zu verwendenden Entwurfsvariablen bei zwei weiteren häufig im Bauwesen eingesetzten Verteilungsfunktionen. Natürlich sind noch viele weitere Funktionstypen bei technisch-mathematischen Statistikproblemen im Gebrauch. Ein nahezu vollständiger Überblick über ausgewählte (eindimensionale) Verteilungsfunktionen, d.h. über Funktion, Dichteverteilung, ihren Definitionsbereich sowie Mittelwert bzw. Medianwert und Standardabweichung findet sich in (Rackwitz, Zilch 2012).

Tabelle 38: Bemessungswerte für weitere Verteilungsfunktionen

Verteilungstyp	Entwurfsvariablen	Bemerkungen
Gauß	$\mu - \alpha\beta\sigma$	μ - Mittelwert σ - Standardabweichung
Lognormal	$\mu * \exp(-\alpha\beta V)$	V – Standardabweichung $V = \sigma/\mu, V < 0,2$
Gumbel Typ I	$u - \frac{1}{a} \ln\{-\ln \Theta(-\alpha\beta)\}$	$u = \mu - 0,577/a$ $a = \pi/(\sigma\sqrt{6})$

(Niemann et al. 2012)

Im FORM-Konzept der DIN EN 1990:2010-12 wird, wie Tabelle 38 zeigt, die vorhandene Verteilung am Bemessungspunkt an die Gauß-Verteilung angepasst. Im Vergleich zu höheren Methoden entsteht dennoch eine Abweichung hinsichtlich der resultierenden Versagenswahrscheinlichkeit. Vor dem Hintergrund, dass diese als operative, vereinbarte Vergleichsgröße gedacht ist und nicht als ein strenges Entwurfskriterium, erscheint diese Abweichung vertretbar.

4.2.5 Die Nachweisformate in den neuen DIN- und DIN EN-Normen

Fassen wir das bisher Behandelte zusammen: Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit einer Tragwerkssituation müssen Verteilungsfunktionen, Mittelwerte (Medianwerte) und Bemessungs-Fraktilwerte (Quantilwerte) der Einwirkungen E und Widerstände R vorgegeben sein. Außerdem muss der (Mindest-) Zuverlässigkeitsindex $\beta(P_f)$ festgelegt werden, der das Überschreiten (P_f) der Grenzwerte der Bemessungssituation angibt.

Tabelle 39: Mindest-Zuverlässigkeitsindices $\beta(50)$ für Grenzzustände

Relativer Aufwand von Maßnahmen	Folgen im Grenzzustand des Tragwerksversagens			Folgen im Grenzzustand der Gebrauchsfähigkeit
	klein	normal	groß	
hoch	2,8	3,3	3,8	1,0
normal	3,3	3,8	4,3	1,5
klein	3,8	4,3	4,8	2,0
Zuverlässigkeitsklasse	RC 1	RC 2	RC 3	

(Rackwitz, Zilch 2012)

Derartige Festlegungen werden üblicherweise von Normenausschüssen getroffen. Im Rahmen der Ausarbeitungen der Eurocodes wurden zur Definition der Zielwerte von β drei Qualitätsklassen von Tragwerken – RC 1 bis RC 3 – eingeführt, abhängig von möglichen Versagensfolgen und dem Aufwand der Unterhaltungsmaßnahmen. Diese Festlegungen finden sich teilweise implizit im Anhang B der DIN EN 1990:2010-12; zusammenfassend sind sie für 50-jährige Bezugszeiträume in Tabelle 39 wiedergegeben.

In den maßgebenden Normen DIN 1055-100:2001-03 und DIN EN 1990:2010-12 werden nun zunächst einmal die nachzuweisenden Lastkombinationsgleichungen festgelegt. Geringfügig vereinfacht – ohne den Einfluss einer Tragwerksvorspannung und für nur eine ständige Einwirkung - lauten diese:

1. Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen im Grenzzustand Tragfähigkeit:

$$(79) \quad R_k/\gamma_R = R_d \geq E_d = E \{ \gamma_G G_k \oplus \gamma_{Q,1} Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \},$$

2. Außergewöhnliche Bemessungssituationen:

$$(80) \quad R_k/\gamma_{RA} = R_{dA} \geq E_{dA} = E \{ \gamma_{GA} G_k \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \}$$

3. Bemessungssituation infolge von Erdbeben:

$$(81) \quad R_k/\gamma_{RAE} = R_{dAE} \geq E_{dAE} = E \{ \gamma_G G_k \oplus \gamma_I A_{Ed} \oplus \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \}$$

In diesen Beziehungen (79 bis 81) werden folgende Abkürzungen verwendet:

- E_d, E_{dA}, E_{dAE} Bemessungswert der Beanspruchung, wie z.B. Schnittgröße, Spannung oder ein diesbezüglicher Vektor mehrerer Schnittgrößen;
- R_d, R_{dA}, R_{dAE} Bemessungswert des Tragwiderstands als Schnittgröße, Spannung, oder ähnliches, dem alle Tragwerkeigenschaften mit ihren jeweiligen Bemessungswerten zugeordnet sind;
- $\gamma_R, \gamma_{RA}, \gamma_{RAE}$ Teilsicherheitsbeiwert für den Tragwiderstand;
- R_k der charakteristische Wert eines Tragwiderstandes.

In den Bemessungswerten der Beanspruchung werden in den Lastfallkombinationen (Nachweisformaten) folgende Abkürzungen verwendet:

- \oplus „in Kombination mit“
- \sum „Kombination der unabhängigen Einwirkungen infolge von“

- $G_{k,j}$ die unabhängige ständige Einwirkung, bestehend aus einem oder mehreren charakteristischen Werten ständiger Kraft- oder Verformungsgrößen;
- $Q_{k,1}$ die vorherrschende unabhängige veränderliche Einwirkung, bestehend aus einem oder mehreren charakteristischen Werten veränderlicher Kraft- oder Verformungsgrößen;
- $Q_{k,i}$ die andere unabhängige veränderliche Einwirkung, bestehend aus einem oder mehreren charakteristischen Werten veränderlicher Kraft- oder Verformungsgrößen;
- A_d Bemessungswert einer außergewöhnlichen Einwirkung;
- A_{Ed} Bemessungswert einer Erdbebeneinwirkung;
- $\gamma_{G,j}$ Teilsicherheitsbeiwert einer unabhängigen ständigen Einwirkung $G_{k,j}$;
- $\gamma_{GA,j}$ wie $\gamma_{G,j}$, jedoch für außergewöhnliche Bemessungssituationen;
- $\gamma_{Q,1}$ Teilsicherheitsbeiwert für die vorherrschende unabhängige veränderliche Einwirkung $Q_{k,1}$;
- $\gamma_{Q,i}$ Teilsicherheitsbeiwert für eine andere unabhängige veränderliche Einwirkung $Q_{k,i}$;
- γ^I der Wichtungsfaktor für Einwirkungen aus Erdbeben nach DIN 4149-1;
- Ψ_{mi} der jeweilige Kombinationsbeiwert zur Bestimmung repräsentativer Werte veränderlicher Einwirkungen.

4.2.6 Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsfaktoren in den neuen DIN EN Normen

Die in den oben wiedergegebenen Nachweisformaten der DIN 1055-100:2001-03 und der DIN EN 1990:2010-12 zu verwendenden Teilsicherheitsfaktoren γ und Kombinationsfaktoren ψ finden sich ebenfalls in den genannten Normen. Werden hierbei wieder die beiden bereits bekannten Grenzzustände unterschieden, so lauten diese im Einzelnen wie folgt:

4.2.6.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit:

Hierbei gelten wieder die Nachweisformate der Gleichungen (79 bis 81). Für die Einwirkungsseite E_d werden folgende Grundsätze vereinbart:

1. Teilsicherheitsbeiwerte γ_F werden nur für die Risikoklasse RC 2 unter der Annahme „normaler Maßnahmen“ verbindlich vorgeschrieben. Diese sind hier in Tabelle 40 in vereinfachter Form wiedergegeben, den vollständigen Inhalt findet der Leser in DIN 1055-100:2001-03, Tabelle A.3. Diese Norm sowie DIN EN 1990:2010-12 postulieren, ohne weiteren Nachweis festgelegt vom CEN, dass hiermit die Zuverlässigkeitsindices der Tabelle 37 eingestellt werden.
2. Alle Anteilsfaktoren Ψ entstammen Tabelle 41.

Tabelle 40: Teilsicherheitsbeiwerte im Grenzzustand des Tragwerksversagens

Einwirkung	Ständige Einwirkungen G	Veränderliche Einwirkungen Q
ungünstig	$\gamma_{G,sup} = 1,35$	$\gamma_Q = 1,5$
günstig	$\gamma_{G,inf} = 1,0$	$\gamma_Q = 0$
außergewöhnlich	$\gamma_A = 1,0$	$\gamma_A = 1,0$

(Versagen des Gesamttragwerks oder einer Komponente durch Bruch oder übermäßige Verformung)

Tabelle 41: Beiwerte Ψ im Hochbau nach DIN 1055-100:2001-03

Einwirkung		Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Einwirkung		0,7	0,5	0,3
Nutzlasten	Wohn- und Aufenthaltsräume	0,7	0,5	0,3
	Büros	0,7	0,7	0,6
	Versammlungsräume	0,7	0,7	0,6
	Verkaufsräume	1,0	0,9	0,8
	Lagerräume	0,7	0,7	0,6
Verkehrslasten:	Fahrzeuglast ≤ 30 kN	0,7	0,5	0,3
	$30 \text{ kN} \leq \text{Fahrzeuglast} \leq 160$ kN	0,5	0,2	0,6
Schnee- und Eislasten	Orte bis Normalnull +1000m	0,7	0,5	0,3
	Orte über Normalnull +1000m	0,6	0,5	0,0
Windlasten		0,6	0,5	0,0
Temperatureinwirkungen		1,0	1,0	1,0
Baugrundsetzungen		0,8	0,7	0,5

4.2.6.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit:

Für diesen werden unterschieden: a) seltene Kombinationen, b) häufige Kombinationen und c) quasi-ständige Kombinationen, die alle unter Rückgriff auf die Gleichungen (79 bis 81) in beiden Normen formuliert sind. Für sämtliche Kombinationen gelten die Grundsätze:

1. Alle Teilsicherheitsbeiwerte γ_F der Einwirkungsseite sind 1,00;
2. Alle Ψ -Faktoren entstammen Tabelle 41.

Wie bereits erwähnt, gelten die in den Beziehungen (79 bis 81) für E_d auftretenden Teilsicherheitsbeiwerte γ_E und Anteilsfaktoren Ψ für Tragwerke der mittleren Risikoklasse RC 2. Sie wurden in Tabelle 5.5 der DIN 1055-100:2001-03, Anhang A.3, und in Tabelle 5.6 der DIN 1055-100:2001-03, Anhang A.2, entnommen. Ihre Gültigkeit für Konstruktionen RC 2 wird in den angegebenen Normen als „nur für den Hochbau“ geltend umschrieben, d.h. für Wohnungsbauten, öffentliche Bauten und einfache Produktionsstätten. Für andere Tragwerkstypen und Anwendungsbereiche, z.B. Brücken, Schornsteine, Kraftwerksbauten, ... gelten teilweise hiervon unterschiedliche Festlegungen.

Die im Tragwerkswiderstand R_d auftauchenden Größen R_k , γ_R werden den bauweisenspezifischen Normen entnommen. Eine Übersicht über die Partialsicherheitskoeffizienten der Widerstandsseite R für den Grenzzustand der Tragfähigkeit enthält unsere Tabelle 42.

Tabelle 42: Beispiele für Widerstands-Teilsicherheitsbeiwerte

Bauweisen und Nachweiselemente		Charakteristische Situation	Außergewöhnliche Situation
DIN EN 1992-1-1: Stahlbeton	Ortbeton	1,50	1,30
	Fertigteilbeton	1,35	1,25
	Beton-, Spannstahl	1,15	1,00
DIN EN 1993-1-1: Stahlbau	Querschnittsversagen	1,00	1,00
	Stabilitätsversagen	1,10	1,00

Bauweisen und Nachweiselemente	Charakteristische Situation	Außergewöhnliche Situation
DIN EN 1995-1-1: Holzbau	Zugbruch	1,25
	Holz	1,30
	Verbindungsmittel	1,25/1,30

(Rackwitz, Zilch 2012)

4.2.6.3 Andere Risikoklassen und modifizierte Tragwerks-Lebensdauern

In der DIN EN 1990:2010-12 sind neben der Risikoklassen RC 2 auch Klassen RC 1 und RC 3 definiert, die erste für niedrige Versagensfolgen (landwirtschaftliche Gebäude, Scheunen, Gewächshäuser), die zweite für hohe Versagensfolgen hinsichtlich Menschenleben und Sachwerte (Sportstadien, Veranstaltungshallen, Museen). Ihre genauen Definitionen enthält Tabelle B.1 der obigen Norm. Für alle 3 Risikoklassen empfiehlt die dortige Tabelle B.2 Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β . Diese Tabelle erweitert somit die Angaben der Tabelle 37, sie ist im Folgenden als Tabelle 43 wiedergegeben.

Tabelle 43: Empfehlungen für Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β

Zuverlässigkeitsklasse	Bezugszeitraum 1 Jahr: β_1	Bezugszeitraum 50 Jahre β_{50}
RC 3	5,2	4,3
RC 2	4,7	3,8
RC 1	4,2	3,3

Eine Differenzierung der Auslegung für andere Risikoklassen als RC 2 kann durch Modifikation der Teilsicherheitsbeiwerte der Tabelle 40 gemäß Tabelle 44 erfolgen. Hierbei sollen die Teilsicherheitsfaktoren γ_E der Einwirkungsseite mit den dortigen KFI-Faktoren multipliziert werden, wie dies in DIN EN 1990:2010-12, Tabelle B.3, empfohlen wird. Man erkennt hieraus einmal mehr die Flexibilität der neuen Eurocodes in den sehr allgemeinen Fragen der Zuverlässigkeitsziele eines Tragwerksentwurfs, aber auch, wie wenig präzise die derzeitigen Normenaussagen sind, d.h. wie viel Spielraum sie für Sonderkonstruktionen bereitstellen.

Tabelle 44: K_{FI} -Faktoren für Einwirkungen

K_{FI} -Werte für Einwirkungen	Zuverlässigkeitsklasse		
	RC 1	RC 2	RC 3
K_{FI}	0,9	1,0	1,1

(Tabelle B.3 DIN EN 1990:2010-12)

Die DIN EN 1990:2010-12 enthält noch ein weiteres Beispiel ihrer Flexibilität hinsichtlich der entwurfsbedingten Zuverlässigkeitsfestlegungen, nämlich die Anregung einer Tragwerksklassifikation nach Nutzungsdauer. Dieses wird in Tabelle 45 wiedergegeben. Mit Hilfe der vorzulegenden Planungsgröße der Nutzungsdauer kann mittels Gleichung (56) der nach Tabelle 39 gewählte Zuverlässigkeitsindex $\beta_{(50)}$ modifiziert werden, und hiermit sodann die der Zuverlässigkeitsanalyse zugrunde zu legenden Teilsicherheitsfaktoren bestimmt werden. Es ist offensichtlich, dass Tabelle 45 nach oben hin erweiterbar ist.

Tabelle 45: Klassifizierung der Nutzungsdauer

Klasse der Nutzungsdauer	Planungsgröße der Nutzungsdauer (in Jahren)	Beispiele
1	10	Tragwerke mit befristeter Standzeit
2	10 - 20	Austauschbare Tragwerksteile, z.B. Kranbahnträger, Lager
3	15 - 30	Landwirtschaftlich genutzte und ähnliche Tragwerke
4	50	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
5	100	Monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke

(Tabelle 2.1 DIN EN 1990:2010-12)

4.2.7 Technische Interpretation der Teilsicherheitsbeiwerte

Im Abschnitt 4.2.3 wurden die Teilsicherheitsfaktoren aus Fraktilwerten der jeweiligen Verteilungsfunktionen von Tragwerkseinwirkungen und –widerständen hergeleitet. Dies ist eine mathematisch exakte Definition. Unbeantwortet aber ist bisher die Frage, welche Unsicherheiten mit ihnen eigentlich abgedeckt werden sollen.

Hierzu enthält der Anhang C der DIN EN 1990:2010-12 einige wenige grundlegende Informationen, die aber vor dem Hintergrund der Fachliteratur (Petersen 1970; Rüschi, Kupfer 1966; Schneider 2000) erheblicher vertiefender Erläuterungen bedürfen. Im Einzelnen findet man in DIN EN 1990:2010-12 im Abschnitt I.6 und im Anhang C folgende Darlegungen, die aus der Fachliteratur und den persönlichen Erfahrungen der Autoren ergänzt werden:

Widerstandsseite R: Der Teilsicherheitskoeffizient γ_R setzt sich folgendermaßen zusammen:

- γ_m ist der Teilsicherheitsbeiwert einer Baustoffeigenschaft. γ_m beschreibt somit Unsicherheiten, die durch Abweichungen der realen Baustoffeigenschaften gegenüber den Idealisierungen im Nachweismodell entstehen ($\gamma_m \Rightarrow \gamma_{R1}$).
- γ_{Rd} ist der Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Modellunsicherheiten der Widerstandsseite: γ_{Rd} beschreibt somit Unschärfen und Unsicherheiten zwischen der Widerstandsmodellierung und der realen Bauausführung ($\gamma_{Rd} \Rightarrow \gamma_{R1}$).

Einwirkungsseite E: Der Teilsicherheitskoeffizient γ_E setzt sich folgendermaßen zusammen:

- γ_f ist der Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen, der die Möglichkeit einer ungünstigen Abweichung der Einwirkung gegenüber den repräsentativen Werten berücksichtigt: γ_f beschreibt somit Unschärfen zwischen den normenseitig vorgegebenen Einwirkungen und der Realität, d.h. zwischen Lastannahmen und wirklichen Lasten ($\gamma_f \Rightarrow \gamma_{E3}$).
- γ_{sd} ist der Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung von Modellunsicherheiten bei der Idealisierung der Einwirkungen und/oder Auswirkungen: γ_{sd} beschreibt somit Unsicherheiten in den Tragwerksmodellierungen und in den Berechnungsverfahren. Klassischerweise setzt sich dieser Koeffizient somit aus zwei Anteilen zusammen, den Modellierungsunschärfen γ_{sdl} ($\Rightarrow \gamma_{E1}$) des baustatischen Systems und den Unschärfen der Berechnung γ_{sd2} ($\Rightarrow \gamma_{E2}$).

Tabelle 46: Multiplikative Zusammensetzung der Partialsicherheitsfaktoren

Einwirkungen E_d :	γ_E	γ_{E1}	γ_{E2}	γ_{E3}
Ständig ungünstig	1,35 ≈			
Ständig günstig	1,00 ≈			
Veränderlich ungünstig	1,50 ≈			
Widerstände R_d :		γ_R	γ_{R1}	γ_{R2}
DIN EN 1992-1-1: Stahlbeton	Ortbeton	1,50 ≈	1,20	• 1,25
	Fertigteilebeton	1,35 ≈	1,17	• 1,15
	Beton-, Spannstahl	1,15 ≈	1,00	• 1,15
DIN EN 1993-1-1: Stahlbau	Querschnittsversagen	1,00 ≈	1,00	• 1,00
	Stabilitätsversagen	1,10 ≈	1,00	• 1,10
	Zugbruch	1,25 ≈	1,00	• 1,25
DIN EN 1995-1-1: Holzbau	Holz	1,30 ≈		
	Verbindungsmittel	1,25/1,30	1,20	• 1,15

Weitere Aussagen zur Größe der einzelnen Teilsicherheitsbestandteile enthält DIN EN 1990:2010-12 nicht. Es findet sich nicht einmal eine Bemerkung darüber, ob die Einzelbestandteile additiv oder multiplikativ zu verknüpfen sind. Meist erfolgt in der Fachliteratur eine multiplikative Verknüpfung (Petersen 1970; Rüscher, Kupfer 1966). In Anlehnung an diese Arbeiten sind die Werte der Tabelle 46 entstanden, sie sind als Vorschlag zu verstehen. Beispielsweise können diese Aufspaltungen bei γ_E dazu dienen abzuschätzen, welche Lastgrößen über die Normvorgaben hinaus tatsächlich von einem Tragwerk bis zum Versagen ertragbar sind.

4.3 Einbettung in Normen und technische Regeln

4.3.1 Kurzfassung des Sicherheitskonzeptes nach EC

Es ist das große Verdienst der Europäischen Normung der vergangenen 30 Jahre, dass die Sicherheit von Tragwerken des Bauwesens heute in den Ländern der EU nach einheitlichen Konzepten nachgewiesen wird. Dieses Sicherheitskonzept wurde in den Abschnitten 4.1 und 4.2 ausführlich begründet und erläutert. Hier erfolgt eine Kurzfassung zum ersten Verständnis der Integration des Lastfalls Schnee in den Nachweis normengemäßer Tragwerkssicherheit.

Wenn das Versagen des Tragwerks oder eines seiner Teile z.B. durch Bruch, übermäßige Verformung oder durch Materialermüdung betrachtet wird, muss nachgewiesen werden, dass

$$(82) \quad E_d \leq R_d$$

gilt.

Hierin ist

E_d der Bemessungswert der Beanspruchung, wie z.B. Schnittgröße, Spannung oder ein diesbezüglicher Vektor mehrerer Schnittgrößen;

R_d der Bemessungswert des Tragwiderstands, dem alle Tragwerkseigenschaften mit ihren jeweiligen Bemessungswerten zugeordnet sind.

Der Bemessungswert der Beanspruchung wird aus Lastfallkombinationen bestimmt, welche die charakteristischen Lastwerte nebst Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerten enthalten. Beispielsweise lautet die Kombination für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen für den Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit:

$$(83) \quad E_d = E \{ \sum_j \gamma_{G,j} * G_{k,j} \oplus \gamma_P * P_k \oplus \gamma_{Q,I} * Q_{k,I} \oplus \sum_i \gamma_{Q,i} * \psi_{0,i} * Q_{k,i} \}$$

Hierin gilt:

\oplus „in Kombination mit“

\sum „Kombination der unabhängigen Einwirkungen infolge von“

$G_{k,j}$ die unabhängige ständige Einwirkung, bestehend aus einem oder mehreren charakteristischen Werten ständiger Kraft- oder Verformungsgrößen

P_k die unabhängige Einwirkung infolge Vorspannung

$Q_{k,I}$ die vorherrschende unabhängige veränderliche Einwirkung, bestehend aus einem oder mehreren charakteristischen Werten veränderlicher Kraft- oder Verformungsgrößen

$Q_{k,i}$ die andere unabhängige veränderliche Einwirkung, bestehend aus einem oder mehreren charakteristischen Werten veränderlicher Kraft- oder Verformungsgrößen

$\gamma_{G,j}$ Teilsicherheitsbeiwert einer unabhängigen ständigen Einwirkung $G_{k,j}$

γ_P Teilsicherheitsbeiwert einer unabhängigen Vorspannungs-Einwirkung P_k

$\gamma_{Q,I}$ Teilsicherheitsbeiwert für die vorherrschende unabhängige veränderliche Einwirkung $Q_{k,I}$

$\gamma_{Q,i}$ Teilsicherheitsbeiwert für eine andere unabhängige veränderliche Einwirkung $Q_{k,i}$

$\Psi_{m,i}$ der jeweilige Kombinationsbeiwert zur Bestimmung repräsentativer Werte veränderlicher Einwirkungen

Der Bemessungswert des Tragwiderstandes bestimmt sich nach folgender Beziehung:

$$(84) \quad R_d = R_k / \gamma_R$$

Hierin gilt:

γ_R Teilsicherheitsbeiwert für den Tragwiderstand

R_k der charakteristische Wert eines Tragwiderstandes

Die in der Beziehung für E_d auftretenden Teilsicherheitsbeiwerte γ können für Tragwerke des Hochbaus der Tabelle 47 gemäß DIN EN 1990:2010-12 entnommen werden. Die Kombinationsbeiwerte Ψ finden sich in Tabelle 48 gemäß DIN EN 1990/NA.

Tabelle 47: Teilsicherheitsbeiwerte im Grenzzustand des Tragwerksversagens (Versagen des Gesamttragwerks oder einer Komponente durch Bruch oder übermäßige Verformung)

Einwirkung	Ständige Einwirkung	Veränderliche Einwirkung
ungünstig	1,35	1,50
günstig	1,00	1,00
außergewöhnlich	1,00	1,00

Alle diese Werte gelten stets nur für den Hochbau, d.h. für Wohnungsbauten, für öffentliche Bauten und einfache Produktionsstätten. Für andere Tragwerkstypen und Anwendungsbereiche, z.B. Brücken, Schornsteine, Kühltürme und ähnliche, gelten teilweise hiervon unterschiedliche Festlegungen. Die im Tragwerkswiderstand R_d auftauchenden Größen R_k , γ_R werden den Bauweisen-spezifischen Normen entnommen.

4.3.2 Besonderheiten im Sicherheitskonzept hinsichtlich der Schneelasten

Der Lastfall Schnee wird im Sicherheitskonzept als veränderliche Last angesehen, also wie eine Verkehrslast behandelt. Verkehrslastfälle werden im Sicherheitskonzept der modernen EC-Normen hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit gewichtet. Grundsätzlich werden sie mittels einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,50 berücksichtigt. Treten mehrere unabhängige Verkehrslastfälle gleichzeitig auf – wie beispielsweise Wind und Schnee – so kann der Einfluss des zweiten Verkehrslastfalls mittels eines Kombinationsbeiwerts abgemindert werden. DIN EN 1990:2010-12 regelt diese Kombinatorik, hinter der entsprechende statistische Betrachtungen stehen, und gibt die zu berücksichtigenden Kombinationsbeiwerte der einzelnen Lastfälle an (Tabelle 48).

In der erwähnten Tabelle 48 steckt – wie erkennbar – erneut eine Höhenabhängigkeit der Schneelast. Ersichtlich ist, dass der Lastfall Schnee aufgrund der Häufigkeit in Regionen oberhalb von +1000 m üNN mit einer größeren Wahrscheinlichkeit mit anderen Verkehrslastfällen gemeinsam auftreten kann. Daher müssen oberhalb von +1000 m üNN erhöhte Kombinationsbeiwerte angesetzt werden.

Die in den derzeit gültigen Normen festgelegten Schnee- und Eislasten haben eine Auftretenswahrscheinlichkeit von 50 Jahren. Das bedeutet, dass die für die jeweilige Region festgelegte Höchstsneelast statistisch gesehen alle 50 Jahre einmal eintreten bzw. überschritten werden kann. Die DIN EN 1991-1-3:2010 bietet im Anhang D die Möglichkeit mittels der Gumbel-Verteilung, nach welcher die Schneelastfestlegung erfolgt, die Auftretenswahrscheinlichkeit der Maximallast zu modifizieren. Dieser Weg ist ein rein statistischer Weg, welcher ausschließlich als Extrapolation der gleichen Messdaten der 50jährigen Wiederholungswahrscheinlichkeit angesehen werden kann. Daher ist bei wachsender Wiederholungswahrscheinlichkeit die Streuung der möglichen Steigerungsfaktoren in starkem Maße abhängig von dem Koeffizienten der Schwankung der jährlichen Höchstsneelast V .

$$(85) \quad s_n = s_k \left\{ \frac{1 - V \frac{\sqrt{6}}{\pi} [\ln(-\ln(1 - P_n)) + 0,57722]}{(1 + 2,5923V)} \right\}$$

Abbildung 111 zeigt diesen Zusammenhang anschaulich. An dieser Stelle ist ersichtlich, dass beispielsweise die Einführung eines Faktors von 1,1 z.B. die Erhöhung der Wiederkehrperiode von 50 auf ca. 100 Jahre anheben würde.

Abbildung 111: Anpassung der Schneelast auf dem Boden gemäß DIN EN 1991-1-3:2010, Anhang D in Übereinstimmung mit der Wiederkehrperiode

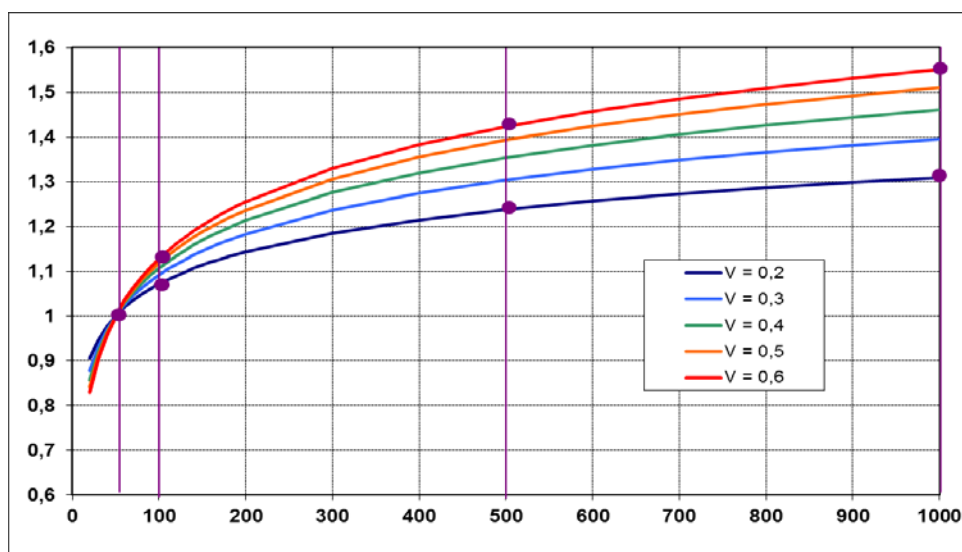


Tabelle 48: Zahlenwerte für Kombinationsbeiwerte im Hochbau nach DIN EN 1990:2010-12/NA

Einwirkung		Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
Nutzlasten im Hochbau (Kategorien Siehe EN 1991-1-1)a)				
Kategorie A	Wohn- und Aufenthaltsräume	0,7	0,5	0,3
Kategorie B	Büros	0,7	0,5	0,3
Kategorie C	Versammlungsräume	0,7	0,7	0,6
Kategorie D	Verkaufsräume	0,7	0,7	0,6
Kategorie E	Lagerräume	1,0	0,9	0,8
Kategorie F	Verkehrsflächen, Fahrzeuglast ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Kategorie G	Verkehrsflächen, 30 kN \leq Fahrzeuglast ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Kategorie H	Dächer	0	0	0
Schnee- und Eislasten, siehe DIN EN 1991-13				
	Orte bis zu Normalnull +1000 m	0,5	0,2	0
	Orte über Normalnull +1000 m	0,7	0,5	0,2
Windlasten, siehe DIN EN 1991-1-4		0,6	0,2	0
Temperatureinwirkungen (nicht Brand), siehe DIN EN 1991-1-5		0,6	0,5	0
Baugrundsetzungen, siehe DIN EN 1997		1,0	1,0	1,0
Sonstige Einwirkungen ^{b), c)}		0,8	0,7	0,5

a) Abminderungswerte für Nutzlasten in mehrgeschossigen Hochbauten Siehe DIN EN 1991-1-1

b) Flüssigkeitsdruck ist im allgemeinen als eine veränderliche Einwirkung zu behandeln, für die die Ψ -Beiwerte standortbedingt festzulegen sind. Flüssigkeitsdruck, dessen Größe durch geometrische Verhältnisse begrenzt ist, darf als eine ständige Einwirkung behandelt werden wobei alle Ψ -Beiwerte gleich 1,0 zu setzen sind.

c) Ψ -Beiwerte für Maschinenlasten sind betriebsbedingt festzulegen.

© DIN e.V.

4.4 Grundlagen und Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC3

Für Eigentümer und Betreiber gerät ein Tragwerk dann in einen kritischen Zustand, wenn entweder dessen planmäßige Nutzung nicht mehr gewährleistet ist oder wenn eine unmittelbare Gefahr der Tragsicherheit, im Bauwesen oft als Standsicherheit bezeichnet, besteht. Heutige moderne, weltweite ähnliche Sicherheitskonzepte für Nachweisverfahren zur baulichen Gefahrenabwehr definieren hierfür bestimmte Grenzzustände als Nachweis- oder Bemessungsziele. Je nachdem, ob Versagenssicherheiten oder Gebrauchseigenschaften der Konstruktion das Bemessungsziel sind, wird zwischen

1. Grenzzuständen der Tragfähigkeit (des Versagens) und
2. Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit

unterschieden. Für beide Grenzzustandssituationen, die i.A. beide gleichzeitig zu gewährleisten sind, existieren international abgestimmte Mindestwerte (operativer) Eintrittswahrscheinlichkeiten P_f . Letztere werden für Deutschland durch die Europäische Normung CEN und das Deutsche Institut für Normung DIN festgelegt.

Der Begriff der funktionalen Sicherheit aus der Anlagentechnik lässt sich nicht ohne weiteres in die Begrifflichkeiten aus dem Bauwesen eingliedern. Grundsätzlich gewährleisten beide Nachweise zusammen die funktionale Sicherheit eines Anlagenteils. So ist beispielsweise bei einer Tankanlage sowohl die Standsicherheit als auch die Dichtheit entscheidend für

die „funktionale Sicherheit“. Die Gewährleistung der Dichtheit ist im Bauwesen in den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit einzuordnen.

Es wird also deutlich, dass diese beiden Nachweise des Bauwesens zusammen die funktionale Sicherheit eines Anlagenteils für die Tragstruktur gewährleisten können.

Zum besseren Verständnis der folgenden Erläuterungen und Herleitung des Sicherheitskonzepts im Bauwesen und der speziellen Anwendung auf Anlagen nach StörfallV werden die wesentlichen Begrifflichkeiten kurz erläutert.

Einwirkungen werden grundsätzlich in ständige, veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen unterschieden. Hierbei sind die ständigen Einwirkungen die Belastungen, welche permanent auf das Anlagenteil einwirken. In erster Linie handelt es sich hierbei um das Eigengewicht der Konstruktion.

Veränderliche Lasten sind sogenannte Verkehrslasten, welche mit unterschiedlicher Häufigkeit auf die Struktur einwirken. Zu diesen Lasten zählt eine Vielzahl von Einwirkungen, wie z.B. Fahrzeuglasten, Lagerlasten, Flüssigkeitsfüllungen, Silolasten, und auch die hier vornehmlich behandelten Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten. Charakteristisch für diese Gruppe von Lasten ist die Annahme, dass diese Einwirkungen regelmäßig auf die Struktur einwirken können.

Die dritte Lastgruppe der außergewöhnlichen Lasten definiert besonders seltene Einwirkungen auf die Struktur wie beispielsweise Explosionslasten, Fahrzeuganpralllasten und Erdbeben. Normgemäß dürfen beispielsweise auch Extremschneelasten für den nördlichen Bereich Deutschlands als außergewöhnlicher Lastfall behandelt werden.

Für die beiden Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit werden Einwirkungskombinationen gebildet, für welche dann die Belastung der Struktur ermittelt wird. Eine solche Einwirkungskombination kombiniert unterschiedliche Lastfälle miteinander. Das bedeutet, dass diese Lastfälle gemeinsam auftreten können.

1. Ständige und vorübergehende Bemessungssituationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit:

$$(86) \quad R_k/\gamma_R = R_d \geq E_d = E \{ \gamma_G G_k \oplus \gamma_Q 1 Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \},$$

2. Außergewöhnliche Bemessungssituationen:

$$(87) \quad R_k/\gamma_{RA} = R_{dA} \geq E_{dA} = E \{ \gamma_G A G_k \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} Q_{k,1} \oplus \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \},$$

3. Bemessungssituation infolge von Erdbeben:

$$(88) \quad R_k/\gamma_{RAE} = R_{dAE} \geq E_{dAE} = E \{ \gamma_G G_k \oplus \gamma_1 A E_d \oplus \sum_{i>1} \psi_{2,i} Q_{k,i} \}.$$

Beispielsweise wird eine Lagerhalle gleichzeitig mit einer Fahrzeuglast, Lagerlasten und einer Windlast belastet. Diese Lastkombination kann für den nachzuweisenden Grenzzustand der Tragfähigkeit mit einer anderen Auftretenswahrscheinlichkeit als für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit behandelt werden. Um diese Unterscheidung werden in dem Sicherheitskonzept die folgenden Unterscheidungen notwendig:

Bei dem gleichzeitigen Auftreten von unterschiedlichen Verkehrslasten werden diese in eine Leiteinwirkung und in Begleiteinwirkungen eingeteilt. Die Leiteinwirkung wirkt zu dem betrachteten Zeitpunkt mit voller Größe auf die Struktur ein. Die anderen Verkehrslasten die zu diesem Zeitpunkt auftreten können werden als Begleiteinwirkungen bezeichnet. Um eine realistische Dimensionierung der Strukturen zu ermöglichen, werden die Wahrscheinlichkeiten, mit welchen die Begleiteinwirkungen mit voller Höhe der Last einwirken können betrachtet. Um diese Lasten innerhalb der Einwirkungskombination zu wichten, werden neben den Teilsicherheitsbeiwerten die sogenannten Kombinationsbeiwerte definiert.

Die in den oben genannten Einwirkungskombinationen auftretenden Teilsicherheitsbeiwerte γ_E und Anteilsfaktoren Ψ gelten im Allgemeinen für Strukturen der mittleren Risikoklasse RC 2. Sie werden explizit in der DIN EN 1990 für die mittlere Risikoklasse RC 2 angegeben (siehe Tabelle 49). Ihre Gültigkeit für Konstruktionen der RC 2 wird in den angegebenen Normen als „nur für den Hochbau“ geltend umschrieben, d.h. für Wohnungsbauten, öffentliche Bauten und einfache Produktionsstätten. Für andere Tragwerkstypen und Anwendungsbereiche wie z.B. Brücken, Schornsteine, Kraftwerksbauten, Silobauten und ähnlichem gelten hiervon unterschiedliche Festlegungen.

Bei der Auslegung der Anlagenteile nach StörfallIV ist Sorge zu tragen dass für die besonderen Betriebsverhältnisse entsprechende Kombinationsbeiwerte gewählt werden.

Tabelle 49: Beiwerte ψ im Hochbau nach DIN EN 1990

Einwirkung		ψ_0	ψ_1	ψ_2
Nutzlasten	Wohn- und Aufenthaltsräume	0,7	0,5	0,3
	Büros	0,7	0,5	0,3
	Versammlungsräume	0,7	0,7	0,6
	Verkaufsräume	0,7	0,7	0,6
	Lagerräume	1,0	0,9	0,8
Verkehrslasten:	Fahrzeuglast ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
	30 kN \leq Fahrzeuglast ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Schnee- und Eislasten	Orte bis Normalnull +1000m	0,5	0,2	0,0
	Orte über Normalnull +1000m	0,7	0,5	0,2
Windlasten		0,6	0,2	0,0
Temperatureinwirkungen		0,6	0,5	0,0
Baugrundsetzungen		1,0	1,0	1,0
Sonstige Einwirkungen		0,8	0,7	0,5

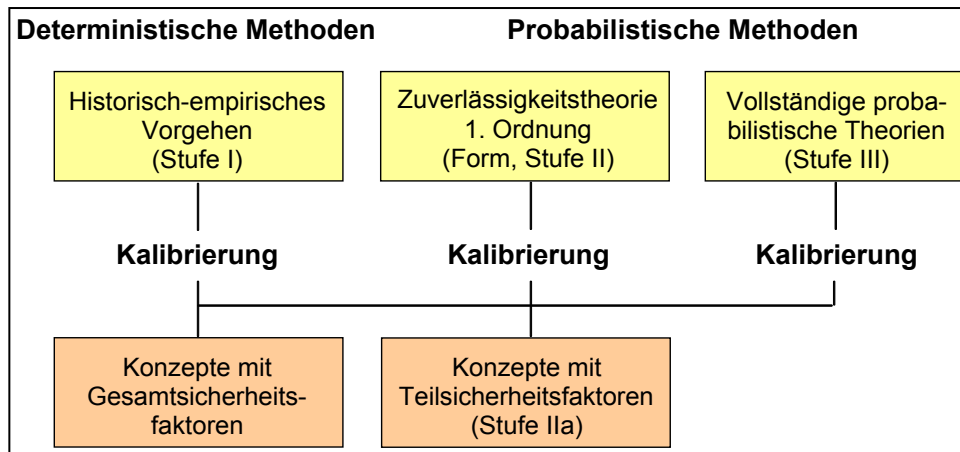
Für jeden der obigen Grenzzustände ist zu verifizieren, dass während eines festgelegten Bezugszeitraums, beispielsweise der Tragwerksnutzungsdauer, die zu erwartenden Folgen der Einwirkungen E die zugeordneten Tragwerkswiderstände R mit einer festgelegten hohen Wahrscheinlichkeit nicht überschreiten:

$$(89) \quad R \geq E, \quad \Rightarrow Z = R - E \geq 0.$$

Z bezeichnet man hierin als Sicherheitszone. Beide Größen E und R sind mit Unschärfen stochastischen Charakters behaftet, die mittels probabilistischer Vorgehensweisen über die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsfunktionen erfasst werden können. Z beschreibt somit ebenfalls eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und die gesamte Beziehung einen stochastischen Prozess.

Die modernen Vorgehensweisen der baulichen Gefahrenabwehr basieren auf Methoden der probabilistischen Zuverlässigkeitstheorie Schuëller (1981). Die zur Behandlung empfohlenen Vorgehensweisen sind hierarchisch gestuft, von traditionellen (historischen) Nachweiskonzepten bis hin zu vollständig stochastischen Vorgehensweisen. Einen Überblick hierüber in Anlehnung an den Anhang C der DIN EN 1990 gibt Abbildung II2.

Abbildung 112: Überblick über Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse (UFOPLAN 203 48 362)



Jedes moderne zuverlässigkeitstheoretische Nachweiskonzept hat sich mit den statistischen Eigenschaften seiner einwirkenden und widerstehenden Elemente auseinander zu setzen: Alle Tragwerkseigenschaften, die Werkstoffeigenschaften und vor allem die Einwirkungen unterliegen unterschiedlichen Verteilungsfunktionen, statistischen Unschärfen und führen damit zu Sicherheitsstreuungen, welche durch das verwendete Zuverlässigkeitskonzept sicher abgefangen werden müssen.

Historisch gesehen sind Sicherheits- und Zuverlässigkeitsprobleme in der Technik gemäß Abbildung 112 zunächst mittels Gesamtsicherheitsfaktoren und im Rahmen von sogenannten zulässigen Spannungen behandelt worden. Da die hierin beteiligten Unschärfeparameter, interpretiert als Fraktilwerte der beteiligten Wahrscheinlichkeitsverteilungen, jedoch sehr unterschiedlichen Verteilungsfunktionen entstammen, wurden derartige Sicherheitskonzepte der Stufe I bereits früh als relativ unsicher erkannt (NABau 1977). Bei ihrer Anwendung können unbeabsichtigt sowohl Sicherheitsdefizite als auch erhebliche Sicherheitsüberschüsse auftreten.

Vom mathematischen Standpunkt kann Abhilfe durch gesteigerte Genauigkeit letztlich nur mittels vollständig probabilistischer Zuverlässigkeitskonzepte (Stufe III, SORM: Second-order reliability method) geschaffen werden, welche die spezifischen Eigenschaften der jeweiligen statistischen Verteilungsfunktionen berücksichtigen. Die hierbei einzusetzenden mathematischen Methoden gelten jedoch in der Ingenieurpraxis als so schwierig, dass Theorien der Stufe III in naher Zukunft kaum Eingang in die technische Nachweispraxis finden werden (DIN 1055-100 2001). Sie leiden außerdem unter dem Makel, dass für die sehr seltenen Zustände an den Rändern ihrer Verteilungsfunktionen, den für Zuverlässigkeitsaussagen entscheidenden Bereichen, kaum physikalisch verlässliche Information vorliegen, die Ergebnisse somit entscheidend von physikalisch fragwürdigen mathematischen Funktionseigenschaften abhängen. Allenfalls wäre ein Eingang in linearisierter Form als Zuverlässigkeitstheorie I. Ordnung (Stufe II, FORM: First-order reliability method) denkbar, wie dies beispielsweise im Anhang von DIN 1055-100 erläutert wird. Schätzt man mit dem Ziel einer Vereinfachung die hierbei auftretenden statistischen Verteilungsfunktionen durch geeignete Fraktilwerte ab, so gelangt man zu Zuverlässigkeitskonzepten mittels Partialsicherheitsfaktoren (Teilsicherheitsfaktoren). Diese Stufe IIa gemäß Abbildung 112 stellt die Basis der ab dem 01.07.2012 geltenden Eurocodes dar, der modernen Europäischen Baunormen, und Nachweisformaten vieler weiterer Länder.

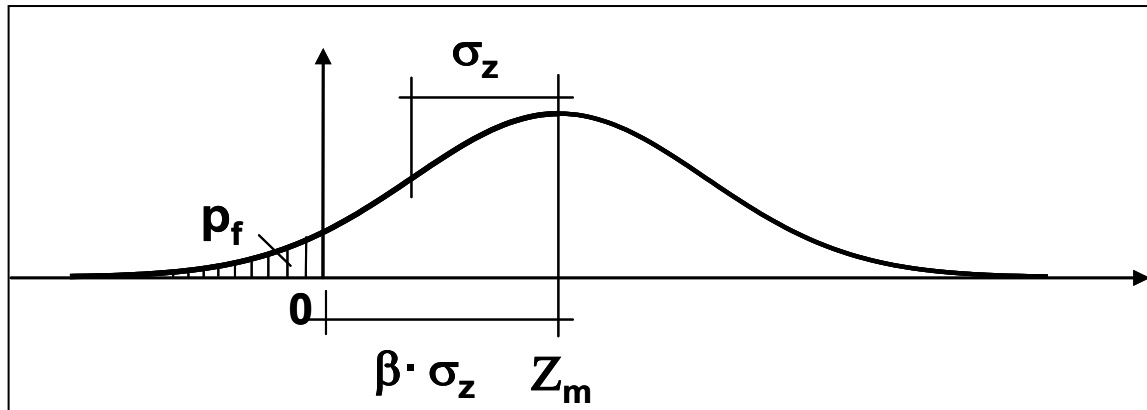
Schwachpunkt aller deterministischen und probabilistischen Zuverlässigkeitstheorien bildet stets deren Kalibrierung an der technischen Realität. Tragwerksversagen stellt einen äußerst unwahrscheinlichen Grenzfall für seltene Extremereignisse dar, häufig zusätzlich gekoppelt an menschliches Versagen. Da letzteres im Zusammenhang mit technischen Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanalysen als rational nicht erfassbar ausgeklammert werden muss, sind vertrauenswürdige statistische Unterlagen über bauliche Versagensfälle äußerst rar.

Im Rahmen von Zuverlässigkeitskonzepten der Stufe IIa, die in ihren technischen Nachweisproblemen mit Partialsicherheitsfaktoren arbeiten und daher auch als semi-probabilistisch bezeichnet werden, wird der Zuverlässigkeitsindex β als Maß für die Sicherheit einer vorliegenden Tragwerkssituation betrachtet. Ausgehend von Gleichung 5.1 repräsentieren

sowohl der Tragwerkswiderstand R als auch der Einwirkungseffekt E infolge kombinierter Tragwerkseinwirkungen grundsätzlich Zufallsverteilungen. Deshalb besitzt natürlich auch die Sicherheitszone Z statistische Eigenschaften:

Alle Werte $Z > 0$ garantieren das Überleben des Tragwerks, Werte $Z < 0$ sein Versagen, und der Zustand $Z = 0$ beschreibt gerade die Grenze zwischen Versagen und Überleben. Diese Grenze bezeichnet man als Grenzzustandsfunktion $g: R - E = 0$. Sind sowohl R als auch E normalverteilt (Gauss-verteilt), so gilt dies auch für Z . Üblicherweise gehorchen R und E andere Verteilungsfunktionen. Dennoch wird auch dann die Sicherheitszone Z gern als normalverteilt vorausgesetzt. Dies stellt eine näherungsweise geltende Praktikabilitätsannahme dar, die aber wegen der geringen Wahrscheinlichkeiten für $Z < 0$ allgemein als konfident angesehen wird.

Abbildung 113: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Sicherheitszone Z



Damit wird deutlich, dass die Tragwerkssicherheit grundsätzlich nur durch Wahrscheinlichkeitsaussagen bewertet werden kann. Die Wahrscheinlichkeit $(1-P_f)$ dafür, dass Versagen nicht eintritt, d.h. dass für die Sicherheitszone Z die Überlebensaussage $Z > 0$ gilt, ist ein Maß für die Zuverlässigkeit des Tragwerks. Aus Abbildung 113 erkennt man, dass die Überlebenswahrscheinlichkeit umso höher liegt, je größer der Mittelwert Z_m der Sicherheitszone Z im Verhältnis zu deren Standardabweichung σ_z ist. Umgekehrt gilt natürlich auch, dass die Versagenswahrscheinlichkeit P_f als Maß für das Risiko einer technischen Anlage umso geringer bleibt, je größer dieser Verhältniswert ist. Er wird daher als Sicherheits- oder Zuverlässigkeitsindex β bezeichnet und zur Quantifizierung sowohl der Überlebenswahrscheinlichkeit $(1-P_f)$ als auch der Versagenswahrscheinlichkeit P_f verwendet:

$$(90) \quad \beta = Z_m / \sigma_z.$$

Dieses Modell ist Grundlage sowohl der DIN EN 1990 als auch der DIN 1055-100: *Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*. In ihr wird für den Sicherheitsindex β im Grenzzustand der Tragfähigkeit ein Zielwert von $\beta = 4,7$ gefordert. Das entspricht einer Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f \approx 1,25 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr. Mit anderen Worten: das Überleben der Konstruktion ist mit einem Wert der Überlebenswahrscheinlichkeit von $(1 - 1,25 \cdot 10^{-6})$ ein nahezu sicheres Ereignis. Die Standardabweichung der Streuungen der Sicherheitszone ist eine Funktion der Standardabweichungen der widerstehenden Größen R sowie der schädigenden Größen, insbesondere der Einwirkungen S . Sie wird aus praktischen Gründen im Rahmen der sogenannten First Order Reliability Method (FORM) linearisiert:

$$(91) \quad \sigma_Z = \alpha_R \sigma_R - \alpha_S \sigma_S$$

Die Linearfaktoren α gewichten die unterschiedlichen Beiträge der Streuungen des Tragwerkswiderstands bzw. der einzelnen Einwirkungen zur Streuung der Sicherheitszone. Dabei ist das Vorzeichen α_S der schädigenden Größen vereinbarungsgemäß negativ. Durch den geforderten Wert für den Sicherheitsindex β wird gleichzeitig die maximale Überschreitungswahrscheinlichkeit für den Bemessungswert einer Einwirkung, F_d , festgelegt:

$$(92) \quad P(F > F_d) = \Phi(\alpha_F \cdot \beta)$$

Φ ist die Standardnormalverteilung. Der Normanhang der DIN EN 1990 und DIN 1055-100 enthält pauschale Werte für die Wichtungsfaktoren aller Einwirkungstypen.

Der Eurocode DIN EN 1990 über die Grundlagen der Tragwerksplanung bietet die Möglichkeit, die bautechnische Sicherheit zu differenzieren. Er führt 3 Schadensfolgeklassen CC 1 bis 3 und zugehörige Zuverlässigkeitsklassen RC 1 bis RC 3 ein. Die folgende Tabelle 50 gibt einen Überblick.

Tabelle 50: Schadenfolge- und Zuverlässigkeitsklassen nach Eurocode DIN EN 1990

Schadensfolge- bzw. Zuverlässigkeitsklasse	Merkmale	Mindestwert für den Sicherheitsindex β , Bezugszeitraum 1 Jahr
CC 3 / RC 3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder Umweltschäden	5,2
CC 2 / RC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder Umweltschäden	4,7
CC 1 / RC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder Umweltschäden	4,2

Die mittlere Zuverlässigkeitsklasse RC 2 mit dem Sicherheitsindex $\beta = 4,7$ ist Grundlage für die festgelegten Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte, wie sie im Folgenden exemplarisch hergeleitet werden. Für Anlagen mit hohen Schadensfolgen ist $\beta = 5,2$ maßgebend entsprechend einer Versagenswahrscheinlichkeit von $P_f = 10^{-7}$. Sie ist also etwa um den Faktor 0,077 geringer als bei RC 2. Im Ergebnis empfiehlt die Norm, in den Zuverlässigkeitsklassen RC 1 bis 3 den Teilsicherheitsbeiwert für die veränderlichen Einwirkungen mit 1,35 bei RC 1, 1,5 bei RC 2 und 1,65 bei RC 3 anzusetzen. Darüber hinaus empfiehlt sie als begleitende Maßnahmen die Anwendung entsprechender Stufen bei der Überwachung von Planung und Herstellung

Am Beispiel der Einwirkung Wind wird die Herleitung des Teilsicherheitsfaktors und der Kombinationsbeiwerte erläutert und die Konsequenz der Einstufung in RC3 dargestellt.

Wendet man diese vereinfachend auf die Windlast an, so ergeben sich folgende Fälle:

1. Die Windlast ist Leiteinwirkung und ihre Streuung dominiert. Dann wird $\alpha_F = -1$ angesetzt, und die maximal zulässige Überschreitungswahrscheinlichkeit des Bemessungswertes F_d der Windlast ergibt sich zu

$$RC2: \quad P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-1 * 4,7) = 1,25 \cdot 10^{-6}$$

$$RC3: \quad P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-1 * 5,2) = 10^{-7}$$

2. Die Windlast ist Leiteinwirkung und ihre Streuung dominiert nicht. Dann ist $\alpha_F = -0,7$ und die maximal zulässige Überschreitungswahrscheinlichkeit des Bemessungswertes der Windlast ist

$$RC2: \quad P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-0,7 * 4,7) = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$RC3: \quad P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-0,7 * 5,2) = 1 \cdot 10^{-4}$$

3. Die Windlast ist Begleiteinwirkung und ihre Streuung dominiert. Dann ist $\alpha_F = -0,7$ und

$$RC2: \quad P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-0,7 * 4,7) = 5 \cdot 10^{-4}$$

$$RC3: \quad P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-0,7 * 5,2) = 1 \cdot 10^{-4}$$

4. Die Windlast ist Begleiteinwirkung und ihre Streuung dominiert nicht. Dann ist $\alpha_F = -0,4$ $0,7 = -0,28$ und

$$\text{RC2: } P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-0,28 * 4,7) = 10^{-1}$$

$$\text{RC3: } P(F_w > F_{wd}) = \Phi(-0,28 * 5,2) = 7 * 10^{-2}.$$

In seltenen Fällen überwiegt die Streuung der Windlast so stark, dass die Fälle (1) oder (3) vorliegen. Die Fälle (2) und (4) sind die Regel. Sie werden etwas genauer betrachtet. Um das Windlastniveau für die Bemessung festzulegen, wird das 10-min Mittel der Windgeschwindigkeit als Basisvariable herangezogen. Die Windlast hängt mit ihm quadratisch zusammen. Für den Bemessungswert der Windlast F_{wd} gilt:

$$(93) \quad F_{wd} = C_{aero} \cdot v_d^2$$

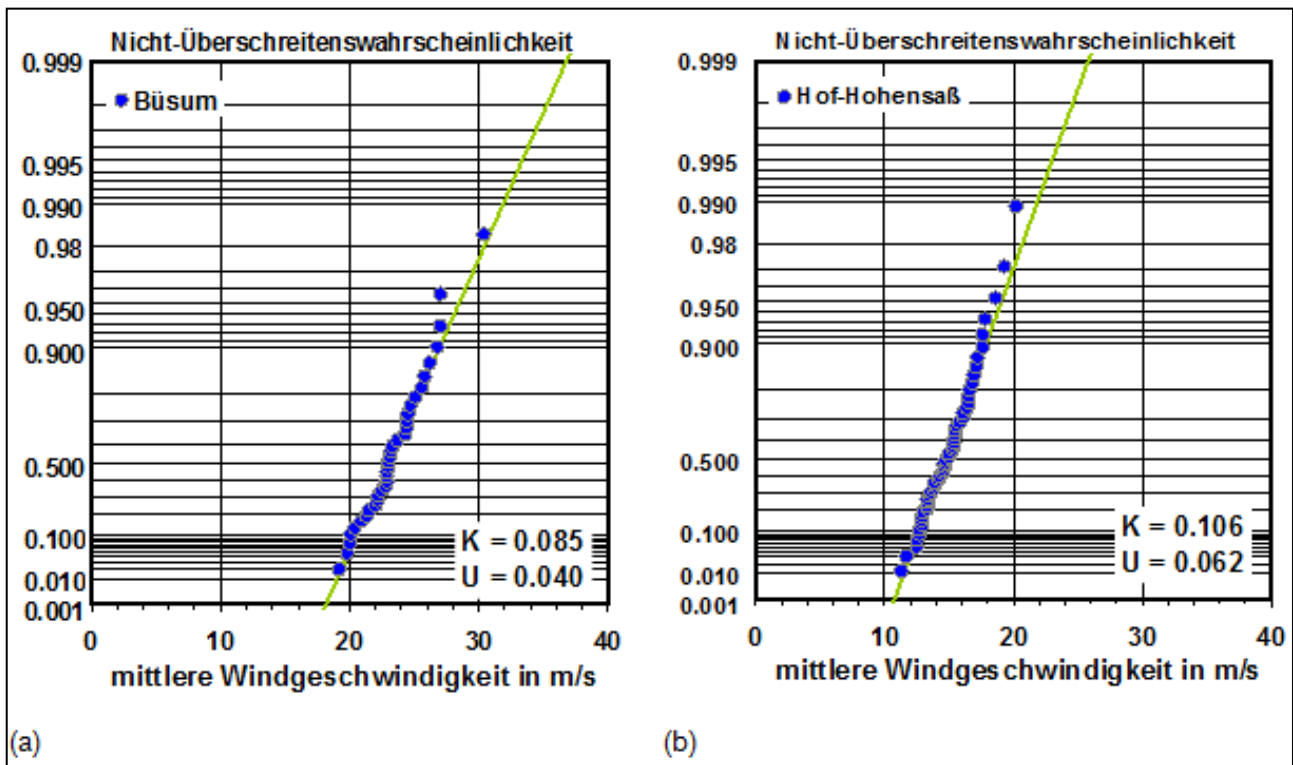
Dabei ist C_{aero} ein Faktor, der die aerodynamische Übertragung von quadrierter Windgeschwindigkeit in Windlast erfasst; er schließt u.a. die aerodynamischen Beiwerte und die Böenwirkung ein. v_d bezeichnet die Bemessungswindgeschwindigkeit.

Die Bemessungswindgeschwindigkeit ergibt sich nun mit den o.a. Sicherheitsvorgaben aus der Statistik der mittleren Windgeschwindigkeit. Man benutzt als Extremwertverteilung die Gumbelverteilung vom Typ I sowie als Datenbasis die jährlichen Maxima der mittleren Windgeschwindigkeit, die unabhängig von der Windrichtung betrachtet werden. Die Messung muss unter den Standardbedingungen der WMO erfolgen. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert v der Geschwindigkeit nicht überschritten wird, lässt sich so mit folgendem Ausdruck berechnen:

$$(94) \quad P(\leq v) = F(v) = \exp\left\{-\exp\left[-\frac{1}{K}\left(\frac{v}{U}-1\right)\right]\right\}$$

K ist der sog. Formbeiwert, U der Modalwert der Verteilung. Beide Parameter werden durch Anpassung der Verteilungsfunktion an die Messdaten einer meteorologischen Station in einem speziellen Wahrscheinlichkeitspapier gewonnen. Abbildung 114 zeigt das Vorgehen anhand zweier Beispiele auf.

Abbildung 114: Wahrscheinlichkeitsverteilung $F(v)$ der Extremwerte der mittleren Windgeschwindigkeit



für (a) Nordseeküste und

(b) Süddeutschland

Für den Formparameter benutzt man $K = 1/10$ als eine im europäischen Windklima brauchbare Näherung. Die mittlere Windgeschwindigkeit v zu einem gewählten Wahrscheinlichkeitsniveau P ergibt sich daraus zu:

$$(95) \quad v = U \cdot \{1 - K \cdot \ln[-\ln(P(\leq v))]\}$$

Ist die Windlast Leiteinwirkung (Fall 2), so ergibt sich mit $P(v \leq v_d) = 1 - 5 \cdot 10^{-4}$ die Entwurfsgeschwindigkeit zu

$$RC2: \quad P(v \leq v_d) = 1 - 5 \cdot 10^{-4}$$

$$(96) \quad v_{md} = 1,760 \cdot U$$

$$RC3: \quad P(v \leq v_d) = 1 - 1 \cdot 10^{-4}$$

$$(97) \quad v_{md} = 1,890 \cdot U$$

Ist die Windlast dagegen lediglich Begleiteinwirkung, so erhält man analog (Fall 4)

RC2:

$$(98) \quad v_{md} = 1,225 \cdot U$$

RC3:

$$(99) \quad v_{md} = 1,258 \cdot U$$

Die Bemessungswerte der Windlast sind sehr seltene Ereignisse, deren Wiederkehrperiode zumeist viel größer ist, als der Zeitraum, für den Beobachtungsergebnisse zur Verfügung stehen. Entsprechend unsicher ist die Extrapolation mit Hilfe einer Modellannahme über die Wahrscheinlichkeitsverteilung, nämlich derjenigen, dass die Gumbelverteilung das statistische Verhalten der Windgeschwindigkeit zutreffend beschreibt. Im Sicherheitskonzept der DIN werden deshalb nicht direkt die Bemessungswerte F_d benutzt. Vielmehr wird ein charakteristischer Wert F_k eingeführt, der häufiger eintritt und insoweit mit viel größerer statistischer Sicherheit angegeben werden kann. Die Norm legt dafür generell bei allen veränderlichen Einwirkungen eine Nicht-Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,98 pro Jahr, mit anderen Worten eine Wiederkehrperiode von 50 Jahren fest. Für die charakteristische Windgeschwindigkeit ergibt sich

$$(100) \quad v_{mk} = 1,390 \cdot U$$

Die Bemessungswerte sind durch den Teilsicherheitsbeiwert γ und den Kombinationsbeiwert Ψ_0 mit dem charakteristischen Wert verknüpft. Ist die Windlast *Leiteinwirkung*, so gilt

$$(101) \quad F_{Wd} = \gamma_W \cdot F_{Wk}$$

ist sie dagegen nur *Begleiteinwirkung*, so ist der Bemessungswert mit dem Kombinationsbeiwert Ψ_0 abzumindern

$$(102) \quad F_{Wd} = \Psi_0 \cdot \gamma_W \cdot F_{Wk}$$

Man erhält, je nach vorliegendem Fall:

$$(103) \quad F_{Wk} = C_{aero} \cdot (1,390 \cdot U)^2$$

Leiteinwirkung

$$(104) \quad \text{RC2:} \quad F_d = \gamma_W \cdot F_{Wk} = C_{aero} \cdot (1,760 \cdot U)^2$$

$$(105) \quad \text{RC3:} \quad F_d = \gamma_W \cdot F_{Wk} = C_{aero} \cdot (1,890 \cdot U)^2$$

Begleiteinwirkung

$$(106) \quad \text{RC2:} \quad F_d = \Psi_0 \cdot \gamma_W \cdot F_{Wk} = C_{aero} \cdot (1,225 \cdot U)^2$$

$$(107) \quad \text{RC3:} \quad F_d = \Psi_0 \cdot \gamma_W \cdot F_{Wk} = C_{aero} \cdot (1,258 \cdot U)^2$$

Daraus ergibt sich der Teilsicherheitsbeiwert zu

$$(108) \quad \text{RC2:} \quad \gamma_W = \frac{F_{Wd}}{F_{Wk}} = \left(\frac{1,760}{1,390} \right)^2 = 1,603$$

$$(109) \quad \text{RC3:} \quad \gamma_W = \frac{F_{Wd}}{F_{Wk}} = \left(\frac{1,890}{1,390} \right)^2 = 1,849$$

In der Norm wird für alle nichtständigen Einwirkungen (sie sind mit dem Symbol Q bezeichnet) einheitlich der Wert $\gamma_Q = 1,5$ für RC2 und $\gamma_Q = 1,65$ für RC3 festgelegt. Für den Kombinationsbeiwert ergibt sich

$$(110) \quad \text{RC2:} \quad \psi_{0w} = \frac{F_{wd}(\text{Begleiteinwirkung})}{F_{wd}(\text{Leiteinwirkung})} = \left(\frac{1,225}{1,760} \right)^2 = 0,484$$

$$(111) \quad \text{RC3:} \quad \psi_{0w} = \frac{F_{wd}(\text{Begleiteinwirkung})}{F_{wd}(\text{Leiteinwirkung})} = \left(\frac{1,258}{1,890} \right)^2 = 0,443$$

In der Norm DIN EN 1990 wird für der Kombinationsbeiwert die Windlast der $\Psi_{0w} = 0,6$ festgelegt, der Normwert liegt also um 24% (RC2) bzw. 35% (RC3) höher.

Ein anschauliches Maß für die Stärke einer klimatischen Einwirkung z.B. eines Sturms, eines Schneefalls, eines Tornados oder eines Hochwassers ist die Jährlichkeit oder Wiederkehrperiode R . Man versteht darunter den mittleren zeitlichen Abstand zwischen zwei Überschreitungen eines bestimmten Niveaus der betrachteten Zufallsgröße, gemessen in Jahren. Die Wiederkehrperiode hängt mit der Nicht-Überschreitungswahrscheinlichkeit $F(v)$ des betrachteten Jahresextremwerts v zusammen. Für $F(v) \geq 0,9$ gilt näherungsweise

$$(112) \quad R = \frac{1}{1 - F(v)}$$

Der exakte Zusammenhang ist

$$(113) \quad R = \frac{1}{-\ln(F(v))}$$

Ein Ereignis mit $F(\leq v) = 0,90$ hat nach der Näherungsformel eine Jährlichkeit von 10 Jahren, genauer von 9,5 Jahren. Ein Ereignis mit $F(\leq v) = 0,09$ dagegen hat nicht die Wiederkehrperiode von etwa einem Jahr sondern ist im Mittel alle 5 Monate zu erwarten.

Die Tabelle 51 enthält die Böenwindgeschwindigkeiten, die sich aus den Grundlagen der Tragwerksplanung für bauliche Anlagen ergeben. Ebenso sind die Jährlichkeiten für die Grenzzustände der Tragfähigkeit angegeben. Da die Teilsicherheitsbeiwerte sich auf die Windlast beziehen, diese proportional zum Quadrat der Windgeschwindigkeit ist, ergeben sich die Erhöhungsfaktoren der Windgeschwindigkeiten zu

$$(114) \quad \sqrt{\gamma_w} = \sqrt{1,5} = 1,225 \quad \text{für Zuverlässigkeitsklasse RC 2}$$

$$(115) \quad \sqrt{K_{FI} \cdot \gamma_w} = \sqrt{1,1 \cdot 1,5} = 1,285 \quad \text{für Zuverlässigkeitsklasse RC 3.}$$

Maßgeblich ist die letzte Spalte mit der Zuverlässigkeitsklasse RC 3. Die Wiederkehrperiode des Sturmes beträgt 2590 a. Als Vergleichszahl sei das Auslegungserdbeben angeführt: die Wiederkehrperiode beträgt 475 a bei einem Teilsicherheitsbeiwert von 1,0. Das so definierte Erdbeben wird jedoch bei höheren Sicherheitsansprüchen mit Bedeutungsfaktoren von 1,2 bzw. 1,4 vergrößert.

Tabelle 51: Normgemäße Böenwindgeschwindigkeiten für die Zuverlässigkeitsklassen RC 2 (Standard) und RC 3 (hohe Schadensfolgen) sowie zugeordnete Jährlichkeiten R

Windzone	Geländekategorie	Böengeschwindigkeit v_p in m/s in 10m Höhe über Grund			
		charakteristischer Wert	Erhöhter charakteristischer Wert, RC 3	Bemessungswert in Zuverlässigkeitsklasse RC 2	Bemessungswert in Zuverlässigkeitsklasse RC 3
		v_k R=50 a	$1,050 v_k$ R=100 a	$1,225 v_k$ R=1123 a	$1,285 v_k$ R=2590 a
1	GK I	36,2	38,0	44,1	46,5
	GK II	32,6	34,2	39,7	41,9
	GK III	28,6	30,0	35,0	36,7
2	GK I	40,2	42,2	48,9	51,7
	GK II	36,2	38,0	44,1	46,5
	GK III	31,8	33,3	38,9	40,8
3	GK I	44,2	46,5	53,9	56,8
	GK II	39,9	41,9	48,5	51,3
	GK III	34,9	36,7	42,8	44,9
4	GK I	48,3	50,7	58,7	62,1
	GK II	43,5	45,7	52,9	55,9
	GK III	38,1	40,0	46,7	49,0

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 51 zu entnehmen ist.

Schadensfälle an Anlagen und Anlagenteilen durch Wind- und Schneeeinwirkungen sind bei Anwendung der eingeführten bautechnischen Regeln vernünftigerweise auszuschließen. Die vorstehend beschriebenen Schadensfälle haben i.d.R. andere Ursachen als Unzulänglichkeiten der Windlastnormen oder eine zu geringe Windlasthöhe. Die Wahl der erhöhten Windlast nach der Zuverlässigkeitsklasse RC3 sorgt in Verbindung mit erhöhten Überwachungsmaßnahmen DSL3 nach DIN EN 1990 für eine Verminderung der Schadenshäufigkeit. Schäden, die darüber hinaus auftreten, sind als Dennoch-Störfälle zu behandeln.

5 Nachrüstungsmaßnahmen

In diesem Anhang werden die Möglichkeiten des Betreibers zur Nachrüstung und Vorsorge gegen die Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten ausführlicher behandelt.

Vor einer etwaigen Nachrüstung ist eine Bestandsaufnahme zum Tragwerkszustand erforderlich um evtl. Veränderungen gegenüber dem Entwurf aufzunehmen. Diese Bestandsaufnahme sollte in Form eines Bauwerksbuchs gemeinsam mit den Ausführungsunterlagen aufbewahrt und mit der Dokumentation aller weiteren Umbauten und Nachrüstungsmaßnahmen sorgfältig geführt werden. Dieses Vorgehen erleichtert etwaige zukünftige Veränderungen an dem Anlagenteil.

Darüber hinaus sind Alterungsprozesse der Konstruktion zu beachten. Auch diese können dazu führen, dass die Konstruktion in regelmäßigen Abständen zu überwachen und nachzurüsten ist. Zur Erläuterung dieser speziellen Problematik aller Konstruktionen ist im Folgenden der theoretische Hintergrund der Deterioration und Degradation kurz skizziert.

5.1 Normen und Technische Regeln seit 1936

5.1.1 Windlastniveau in Normen und Technischen Regeln seit 1949

Die Deutsche Norm DIN 1055-4 regelt 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 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. Sie gilt 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 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.

Die Festlegungen zum Geschwindigkeitsdruck in der Fassung 8/86 stammten aus der Ausgabe vom Juni 1938. Er war dort in Form der bekannten Treppenkurve angegeben, siehe Abbildung 115. 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. Er beträgt

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

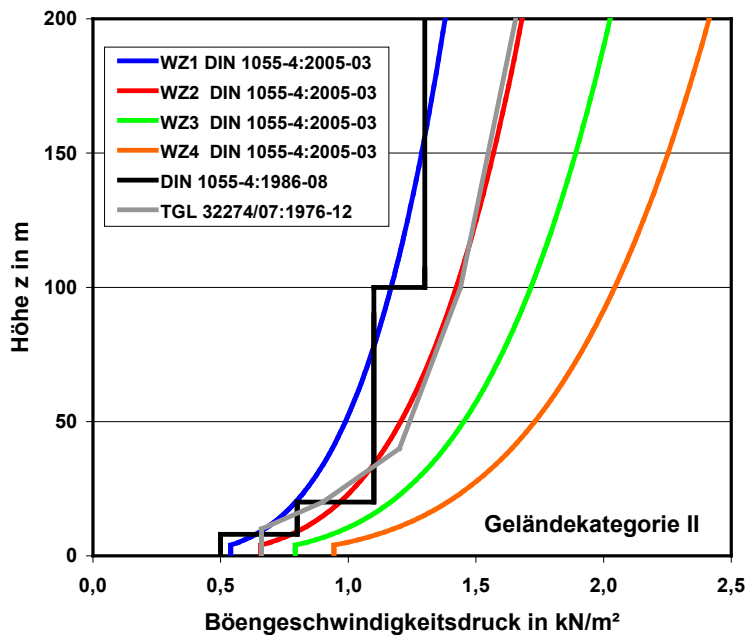
Die Neufassung DIN 1055-4:2005-03 ersetzte die Treppenkurven durch realistische, stetige Windprofile, deren Verlauf von der Bodenrauigkeit bestimmt ist. Darüber hinaus führte man Windzonen ein, um die geografisch unterschiedliche Sturmintensität zu erfassen. Diese Präzisierungen entsprachen dem Eurocode 1991-1-4, der im Dezember 2010 als DIN EN veröffentlicht wurde. Man erkennt in Abbildung 115, 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 durch

$$(116) \quad q = 0,75 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,22}$$

annähern (siehe 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 I und 2.

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

Abbildung 115: Festlegungen des Geschwindigkeitsdruckes in deutschen Normen



- in TGL 32274/07, Ausgabe Dezember 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

5.1.2 Historischer Rückblick in der Schneelast-Normenentwicklung des DIN

Wie viele Normen-Regelungen im Bauwesen in Deutschland fallen auch die ersten Überlegungen zu einheitlichen Lastannahmen für die Einwirkung Schnee in den Zeitraum der 30er Jahre. Die erste normative Regelung zu einheitlichen Schneelasten wurde im Dezember 1936 eingeführt. Weiter unten folgt die Skizzierung des historischen Ablaufs dieser Normierung mit Beschreibung der wesentlichen Inhalte.

Nun sollte man nicht glauben, dass es vor 1936 im Deutschen Reich keine Regelungen für Schneelasten gab. Belastungsvorgaben entstanden generell in Europa ab Mitte des 19. Jahrhunderts, auch im Deutschen Reich, aber eben keine einheitlichen: Das Baurecht war im Deutschen Reich traditionell der Länderhoheit unterstellt.

Daher waren die einzelnen Regelungen sehr unterschiedlich. Im Königreich Bayern beispielsweise gab es früh Lastvorschriften für Schnee, was aus Gründen der Alpennähe einleuchtend ist. Im Königreich Preußen war Schnee kein so dominanter Gesichtspunkt beim Tragwerksentwurf, hier standen Windlasten an höherer Priorität. So schreibt beispielsweise der Erlass „Bestimmungen über die bei Hochbauten anzunehmenden Belastungen“ des Preußischen Ministers der öffentlichen Arbeiten vom 31. Januar 1910 rechnerisch anzusetzende Gesamtlasten von Dächern vor. Diese bestehen aus „Eigengewicht, Schnee- und Winddruck“, und werden pro Quadratmeter des Grundrisses vorgeschrieben. Dies erfordert natürlich, dass zwischen unterschiedlichen Bauarten der Dachkonstruktionen unterschieden werden muss, so zwischen Glasdach, Schieferdach, Ziegeldach, Holzzementdach.

Ein Rückblick über Normenentwicklung ist äußerst interessant. Normen spiegeln immer den Stand der Technik wieder, und dabei spielen auch Gesichtspunkte der logischen Strenge der Ordnung einzelner technischer Fakten eine wichtige Rolle.

5.1.2.1 12/1936: DIN 1055, Blatt 5 - Schneebelastung

Die Schneebelastung 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. Für Dachflächen mit Neigungen kleiner 20° wird die Schneelast nicht abgemindert, und für Flächen größer 60° entfällt die Schneelast vollständig. Darüber hinaus werden in der Norm Hinweise auf die Gefahr von Schneesackbildung, Hinweise auf eventuell höhere Lasten in Gebirgsregionen und auf die besondere Situation bei Gewächshäusern gegeben.

5.1.2.2 12/1956: DIN 1055, Blatt 5 - Schneebelastung

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

5.1.2.3 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 Schneelast 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 $5,50 \text{ kN/m}^2$. Für Höhen oberhalb 1000 m wird auf Festlegungen der zuständigen Baubehörden und des Zentralamts des DWD verwiesen. Tabelle 52 gibt diese Regelungen der DIN 1055 wieder. 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 I numerisch vorgegeben wird. Der dem Sicherheitsnachweis zugrunde zu legende Rechenwert der Schneelast ergibt sich aus dem Abminderungsfaktor k_s multipliziert mit der Regelschneelast.

Tabelle 52: Regelschneelast s_0 in kN/m^2 (kp/m^2) gemäß Tabelle 2 der DIN 1055 Teil 5

Geländehöhe des Bauwerksstandortes über Normalnull	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)	0,75 (75)	1,25 (125)	2,10 (210)
600	0,85 (85)	0,85 (85)	1,60 (160)	2,60 (260)
700	1,05 (105)	1,05 (105)	2,00 (200)	3,25 (325)
800	1,25 (125)	1,25 (125)	2,55 (255)	3,90 (390)
900		0,75 (75)	3,10 (310)	4,65 (465)
1000			3,80 (380)	5,50 (550)
> 1000				Einzelfallregelung

Normative Regelungen zum Überlagern der Schneelast mit der Windbelastung werden ebenfalls eingeführt. Bei Dächern mit einer Neigung bis 45° muss entweder die volle Schneelast mit der halben Windlast oder aber die halbe Schneelast mit der vollen Windlast kombiniert werden. Bei Dächern mit einer Traufneigung größer als 45° darf entweder nur die Schneelast oder aber nur die Windlast betrachtet werden. Der Nachweis der Tragwerkssicherheit ist dann die größere der beiden Alternativen als maßgebend zugrunde zu legen.

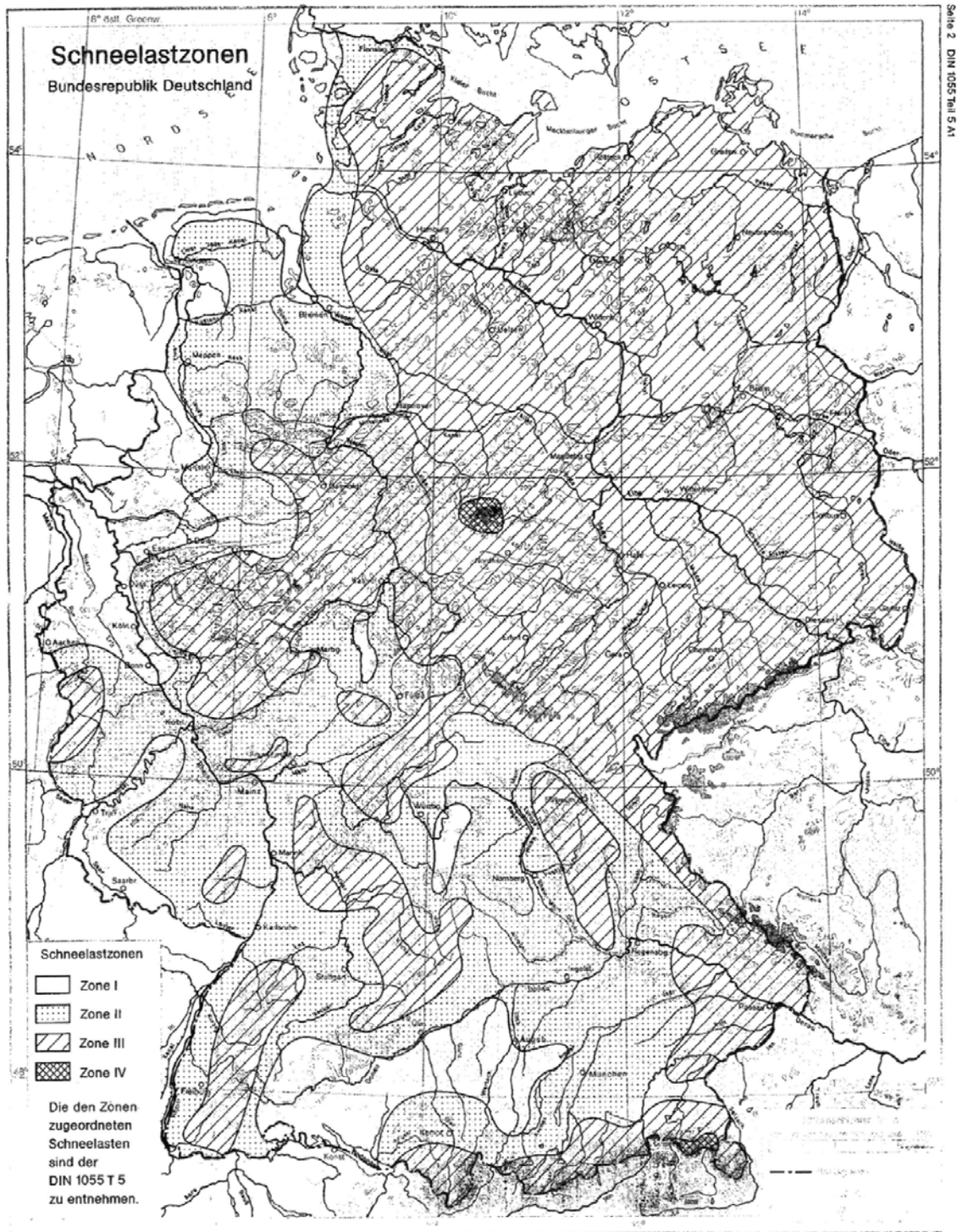
Erstmals wurden Regelungen zu einer möglichen Eislast in die Norm aufgenommen. Die Normenausgabe von 1975 gibt vor, dass bei allen Tragwerken, an denen eine Belastung aus Eis auftreten kann, eine allseitige 3 cm dicke Eisschichtbildung für Geländehöhen < 400 m über Normalnull angesetzt werden muss. Die Eisrohichte ist mit 7 kN/m^3 (700 kp/m^3) einzusetzen. Für Geländehöhen über 400 m über Normalnull wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass genauere Untersuchungen erforderlich sind. Bei Berücksichtigung von Eisansatz ist die Windlast auf die durch den Eisansatz vergrößerte Fläche des Anlagenteils anzusetzen. Dafür darf die Windlast mit 75% des Windstaudrucks ermittelt werden.

Im Anhang der Norm wird erstmalig auf die Herleitung der Regelschneelast eingegangen. Es wird erläutert, dass die Regelungen der Norm auf Auswertungen des Deutschen Wetterdienstes in Abhängigkeit von geologischen und meteorologischen Verhältnissen fußen. Das Normengremium reagiert damit auf den inzwischen auf Europäischer Ebene erfolgten stärkeren Bezug normativer Regelungen im Bauwesen auf statistische Grundlagen. Die Regelschneelast wurde hierbei als ein 95%-Fraktilwert $s_{95\%}$ der Jahresmaxima eines 30jährigen Beobachtungszeitraums bestimmt. Zugrunde gelegt wurde hierbei eine Extremwertverteilung vom Typ I nach Fisher-Tippet mit einem Variationskoeffizienten von $V \approx 45\%$. Der hierzu erforderliche Zusammenhang zwischen der Regelschneelast und den Messgrößen (mittleres Schneehöhenmaximum s_h), mittlere Schneerohichte γ und Abminderungsfaktoren χ für Schneedrift wird angegeben. Mit diesem Formelwerk kann bei veränderten Eingangsparametern, wie beispielsweise Altschneeanlagerungen, eine Neuermittlung oder Anpassung der Lasten vorgenommen werden.

5.1.2.4 04/1994: DIN 1055, Teil 5 A1 - Lastannahmen für Bauten, Verkehrslasten – Schneelast und Eislast

Alle Regelungen der Norm von 06/1975 bleiben bestehen. Lediglich die Karte der Schneelastzonen wird auf die wiedervereinigte Bundesrepublik Deutschland einschließlich der neuen Bundesländer erweitert. Diese Karte wurde aus der Normenfassung 1994 übernommen und ist in Abbildung 116 noch einmal wiedergegeben.

Abbildung 116: Schneelastzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland 1994



5.1.3 Historischer Rückblick in der Schneelast-Normenentwicklung: Die TGL

Als Gegenstück zum Marshallplan und zum OEEC (Organization for European Economic Cooperation) wurde 1949 in Moskau der Rat für gegenseitige Wirtschaftshilfe RGW (Comecon: Council for Mutual Economic Assistance) gegründet. Eine seiner Aufgaben war die verstärkte industriell-technische Koordinierung in den Mitgliedsländern. 1954 trat die DDR dem RGW bei. Der RGW löste sich 1991 auf, weil der Versuch seiner marktwirtschaftlichen Reformierung scheiterte.

Der RGW war auch befugt, das Normenwesen der Mitgliedstaaten zu koordinieren. Hieraus entstanden in der DDR die TGL-Standards, die Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen. Sie waren von 1955 bis 1990 die Entsprechung zu den DIN-Normen in der Bundesrepublik. Im Gegensatz zu den DIN-Normen waren sie allerdings Gesetze und wurden in Gesetzblatt-Sonderdrucken veröffentlicht. Zuständig in der DDR war das 1954 gegründete Amt für Standardisierung, aus dem 1974 das Amt für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung der DDR (ASMW) in Berlin-Köpenick hervorging. 1990 wurde das ASMW durch das DIN übernommen.

Die ab 1960 entwickelte TGL 20 167 (ASMW 1963) war in ihrem Sicherheitskonzept sehr fortschrittlich. Sie enthielt bereits in ihrer Erstausgabe nach sowjetischem Vorbild Partialsicherheitskoeffizienten, die allerdings in Kombination mit den Anteilsfaktoren als Grenzlastfaktoren n bezeichnet wurden. Der Hauptgrund für die Anwendung dieses Konzeptes war die chronische Materialknappheit in den RGW-Mitgliedstaaten, weshalb man auf diesen Wegen Baumaterialien sparen wollte.

5.1.3.1 11/1963: TGL 20 167-1 – Lastannahmen für Bauten, Grenzlastfaktoren, Normlasten für Verkehrs-, Schnee- und Windbelastung

Diese erste für den konstruktiven Ingenieurbau in der DDR geltende TGL regelte im Kapitel 5 die Schneelasten. Die Normlast p_n infolge Schnee auf die horizontale Projektion der Dachfläche ist nach

$$p_n = s_0 \cdot c$$

zu ermitteln. Hierin bezeichnet s_0 die Schneelast nach der hier wiedergegebenen Tabelle 53 und c einen von der Dachgestalt abhängigen Faktor nach Abschnitt 5.4 der TGL. In diesem Abschnitt finden sich erstmals in Deutschland Bilder anzusetzender Schneelastverteilungen für typische Bauwerksdächer. Der Grenzlastfaktor n (Partialsicherheits- + Anteilsfaktor) für Schnee beträgt einheitlich 1,4, so dass sich die im Sicherheitsnachweis für ein Tragwerk zu berücksichtigende sogenannte Rechenlast p zu $p = p_n \cdot n$ ergibt.

Tabelle 53: Normschneelast s_0 in kp/m^2 gemäß Tabellen 7 und 8 der TGL 20 167-1

Schneegebiet	Schneelast s_0 kp/m^2	Höhe über Normalnull in Me- ter
I	50	
II	70	0 bis 400
III	100	über 400 bis 600
IV	150	über 600

5.1.3.2 12/1976: TGL 32274/05 – Lastannahmen für Bauwerke: Schneelasten

In der Überarbeitung von 1976 sind nunmehr die gesamten Lastannahmen von den Vorschriften für die Sicherheitsnachweise getrennt und erstere in der TGL 32274 zusammengefasst worden. Das Blatt 5 enthält die Schneelasten, wobei alle Grundbeziehungen gegenüber den Regelungen vom 1963 unverändert geblieben sind. Auch blieb der Lastfaktor $n = 1,4$ unverändert.

Tabelle 54: Grundwerte der Normschneelast s_0 in kp/m^2 gemäß Tabelle 2 der TGL 32274/5

Höhe über Normalnull für den Harz	Höhe über Normalnull für das sonstige Gebiet der DDR	Grundwert s_0 kN/m^2
bis 250 m	bis 300 m	0,50
über 250 bis 375 m	über 300 bis 450 m	0,70
über 375 bis 475 m	über 450 bis 575 m	1,00
über 474 bis 525 m	über 575 bis 650 m	1,50
über 525 bis 575 m	über 650 bis 725 m	2,00
über 575 m	über 725 m	2,50

Grundsätzlich geändert wurden die Schneelastzonen. In den früheren Tabellen 7 und 8, hier Tabelle 54, waren ohnehin nur die Schneelastzonen II bis IV anwendungsmäßig belegt. Nunmehr gibt es gemäß der Tabelle 2 der TGL 32247/5 nur noch 2 Schneelastzonen, nämlich den Harz und das sonstige Gebiet der DDR. Damit haben sich natürlich auch die Höhengrenzen für die einzelnen Grundwerte der Normschneelast s_0 entsprechend geändert.

Es ist seit langem bekannt, dass bei sehr leichten Dachtragwerken mit hohen Schneelasten die Restsicherheit bis zum Versagen erheblich niedriger ist als bei normalgewichtigen Strukturen. In der vorliegenden TGL muss in der Tabelle I ein Lasterhöhungsfaktor $1 \leq k_s \leq 1,5$ bestimmt und berücksichtigt werden, der dieser Tatsache Rechnung trägt. Eine ähnliche Regelung enthielt auch die DIN 1055-5:1956-12; sie ist jedoch aus den späteren Ausgaben der DIN 1055-5 wieder herausgenommen worden. Schließlich sind in der vorliegenden Ausgabe der TGL die Bilder der Schneelastverteilungen gegenüber der Ausgabe von 1963 erweitert worden.

5.1.4 Einstufung bestehender Betriebsbereiche hinsichtlich Schneelast

Eine Klassifizierung von Betriebsbereichen nach den berücksichtigten Schneelasten kann zunächst mittels der Lastkennwerte nach Errichtungszeitraum und Betriebsstandort erfolgen. Dies allein ist aber sicher nicht ausreichend, da sich die Lastanordnungen von Schnee (Formbeiwerte) auf Dachflächen ebenfalls im Laufe der Normengeschichte geändert haben. Derartige Detailinformationen sind natürlich nur den jeweiligen statischen Berechnungen zu entnehmen. Die erwähnten Normenänderungen der Schneelast können dann dazu führen, dass einzelne Betriebsbereiche einer höheren normenmäßigen Belastung ausgesetzt sind als zum Zeitpunkt ihrer Errichtung. Hier besteht seitens des Betreibers dann, zumindest bei einer Aufgabenumwidmung, die Pflicht der Sicherheitsüberprüfung der betroffenen Anlagenteile (Bestandschutzproblematik).

Im Folgenden ergibt sich folgendes erstes Klassifizierungsschema nach dem Normenzeitraum:

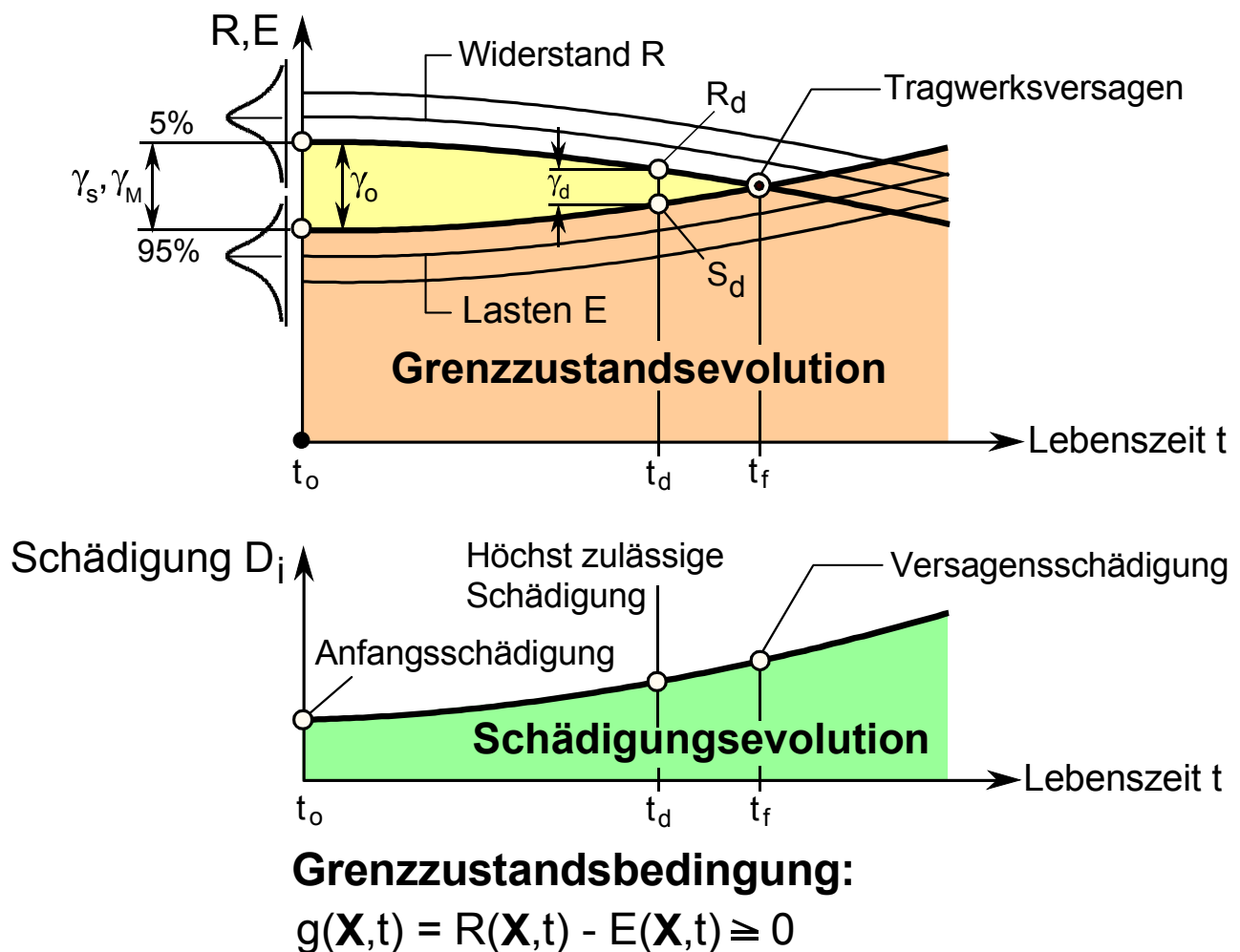
- 1936 bis 1963: Im Regelfall eine einheitliche Schneelast von $0,75 \text{ kN/m}^2$
- 1963 bis 1975: Im Regelfall im Gebiet der BRD wie zuvor
Im Gebiet der DDR vier Schneelastzonen bis $1,50 \text{ kN/m}^2$
- 1975 bis 1994: Im Gebiet der BRD Einteilung in vier Schneelastzonen bis zu $5,50 \text{ kN/m}^2$
Im Gebiet der DDR Einteilung in zwei Schneelastzonen mit höhenmäßiger Staffelung der Schneelasten von $0,50$ bis $2,50 \text{ kN/m}^2$
- 1994 bis 2005: Im Gesamtgebiet der Bundesrepublik Einteilung in vier Schneelastzonen mit höhenmäßiger Staffelung der Schneelasten von $0,65$ bis $5,50 \text{ kN/m}^2$
- 2005 bis heute: Einteilung in 3 (+2) Schneelastzonen mit starker höhenmäßiger Staffelung von $0,65$ bis $5,50 \text{ kN/m}^2$

Generell kann festgestellt werden, dass aufgrund der vielfältigen Anpassung der Normlasten in den vergangenen Jahrzehnten keine allgemeine Aussage über mögliche Defizite von Anlagenteilen getroffen werden können.

5.2 Der Zeiteinfluss: Deteriorationen und Degradationen

Wie in den vorherigen Abschnitten erläutert, besitzen moderne Ingenieurtragwerke Nutzungszeiträume - technische Lebensdauern -, während derer die Zuverlässigkeitsanforderungen gemäß DIN EN 1990:2010-12 natürlich dauerhaft erfüllt sein müssen. Diese Forderung muss durch die Feststellung ergänzt werden, dass alle in einem Zuverlässigkeitsnachweis ermittelten Sicherheitsmargen, beispielsweise die auf Fraktile bezogenen Gesamtsicherheitskoeffizienten, mehr oder weniger stets zeitabhängig sind: $\gamma = \gamma(t)$. Schädigungsprozesse der im Tragwerk verwendeten Baustoffqualitäten infolge betrieblicher oder unplanmäßiger Einflüsse, z.B. Überlastungen, reduzieren den Tragwerkswiderstand R. Dies bewirken ebenso lastunabhängige Deteriorationen mechanischen, chemischen oder biologischen Ursprungs, beispielsweise Korrosion, die ebenfalls in einer Schädigungsevolution den Tragwerkswiderstand R reduzieren. Oft erhöhen sich auch im Laufe der Tragwerksnutzungsdauer die einwirkenden Lasten E, was dann gemeinsam mit den Deteriorationen von R zu Degradationen der Grenzzustandsfunktion g führt. Ein bekanntes Beispiel für letzteres ist der seit 30 Jahren stetig zunehmende Schwerlastverkehr auf den Infrastrukturbauwerken Deutschlands.

Abbildung 117: Zeitabhängige Grenzzustandsfunktionen und Tragwerksschädigung



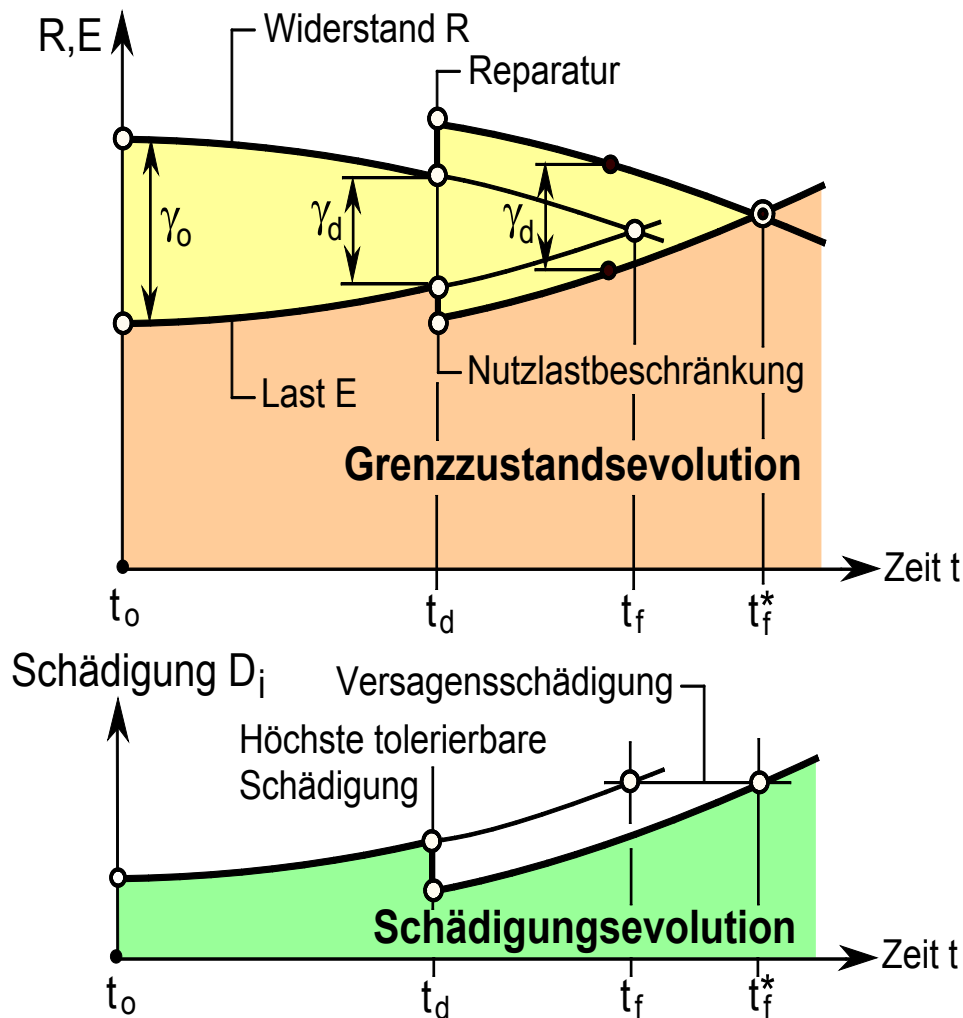
(UFOPLAN 203 48 362)

Abbildung 117 erläutert diesen zeitabhängigen Degradationsprozess. Aus den Verteilungsfunktionen von R und E bzw. mittels deren maßgebenden Fraktilwerten entsteht eine Anfangssicherheit γ_0 , hier der einfachen Darstellung halber als Gesamtsicherheitsbeiwert definiert. Durch zeitabhängige Schädigungsprozesse des Tragwerkswiderstandes R und (mögliche) Lasterhöhungen auf der Einwirkungsseite E reduziert sich diese Anfangssicherheit von γ_0 über $\gamma(t)$ im Verlaufe des weiteren Tragwerkslebens t. Diese Sicherheitsreduktion kann so weit gehen, dass bis zu einem Grenzzzeitpunkt t_f die

Sicherheitsmarge aufgezehrt ist und das Tragwerksversagen erreicht wird. DIN EN 1990:2010-12 enthält zu diesem Thema nur die Forderung einer ausreichenden Sicherheit während der gesamten Lebensdauer, jedoch erwartungsgemäß keine Hinweise, wie dies zu erreichen sei.

Ein solcher Degradationsprozess von Tragwerken kann wie in Abbildung 117 durch die nunmehr zeitabhängige Grenzzustandsfunktion $g(t)$ beschrieben werden, die im Versagensfall $g(t_f)$ verschwindet. Das gleiche physikalische Verhalten kann aber auch durch sog. Tragwerks-Schädigungsindikatoren D_i beschrieben werden, wie dies im unteren Teil von Abbildung 117 angedeutet worden ist: Dann verläuft dieser Schädigungsindikator von seinem Anfangswert D_0 bis zur Grenzschädigung D_d , bei welcher das Tragwerk versagt. Eine auf die Gebrauchstauglichkeit oder das Versagen bezogene Grenzschädigung D_d (höchste tolerierbare Schädigung) bzw. Grenzsicherheit γ_d (kleinste tolerierbare Sicherheit) beendet die Phase der problemlosen Tragwerksnutzung.

Abbildung 118: Zu Reparatur- und Rehabilitationsstrategien von Tragwerken



(UFOPLAN 203 48 362)

Derartige sicherheits- oder schädigungsorientierte Konzepte der Tragwerksmechanik bilden heute die Grundlage für Reparatur- und Rehabilitierungsstrategien großer Einzeltragwerke bzw. umfangreicher Tragwerksfamilien – sie sind u.a. bei Straßenbauverwaltungen im Ausland im Einsatz (Stangenberg 2009). Dies deutet Abbildung 118 an, auf welcher bei Erreichen einer Grenzschädigung D_d oder Grenzsicherheit γ_d Reparaturmaßnahmen den Tragwerkswiderstand R erhöhen bzw. eine Betriebseinschränkung die Einwirkung E absenkt, womit offensichtlich die Nutzungsdauer erheblich ausgedehnt werden kann (Krätzig 2004).

Nun sollte man einschränkend hinsichtlich Abbildung I18 nicht verhehlen, dass derartige Konzepte zur Ermittlung des aktuellen Zustands der Tragwerkszuverlässigkeit zwar wissenschaftlich gut fundiert, aber weit von einer Praxiseinführung nach dem Stand der Technik entfernt sind. Besonders der Spätwinter 2006 mit seinen zahlreichen Halleneinstürzen unter Schneelast hat hier erschreckend zu Tage gebracht, wie unsystematisch Bausubstanz in Deutschland gepflegt und gewartet wird (Andrä 2006; Krätzig 2006). Dabei ist seit vielen Jahren wissenschaftlich bewiesen, dass regelmäßige Wartungen und Rehabilitationsarbeiten die wirtschaftlich günstigste Lösung für die Langzeit-Erhaltung von Bausubstanz darstellen (VDI 6200 2010). Besonders die öffentliche Hand als größter Eigentümer von Bausubstanz in Deutschland agiert alles andere als vorbildlich. Fast werden Erhaltungsaufwendungen als Regel erst dann durchgeführt, wenn bereits Nutzungsgrenzen erreicht oder sogar Tragwerksschädigungen sichtbar sind: Nachweislich ist dieses Vorgehen, welches oftmals mit dem Argument der beschränkten zur Verfügung stehenden öffentlichen Gelder begründet wird, der ökonomisch teuerste Weg. Daher wundert es nicht, dass in DIN EN 1990:2010-12 und DIN 1055-100:2001-03 hierzu keine Aussagen getroffen werden.

5.3 Nachrüstungsmöglichkeiten

5.3.1 Nachrüstungs- und Vorsorgemaßnahmen vor dem Wirksamwerden der Gefahrenquelle

Durch Überwachung der Wetterlage können Extremschneereignisse erkannt werden. Bei Eintritt dieser Wetterlagen ist zu Beginn des Ereignisses bereits die Alarmbereitschaft für die Schneeräumungsmaßnahmen und die Sicherung der besonders gefährdeten Bereiche 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 ohne große bauliche Veränderungen keine besonderen Vorkehrungen zur Verhinderung treffen. Lediglich Schneesackverwehungen können auf freiem Gelände durch geeignete Schutzzäune von bestimmten Stellen ferngehalten werden.

Die typische Wetterlage für Eisbildung hingegen tritt schnell und ohne besondere Vorwarnzeit ein. Daher ist eine Vorabmaßnahme kaum durchführbar. Die besonders gefährdeten Anlagenteile sollten vorsorglich in Bezug auf die Lasteinwirkung Eis wiederholt 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 55 stellt für verschiedene Anlagen und Anlagenteile geeignete Nachrüstungsmöglichkeiten gegen die statischen Einwirkungen beispielhaft zusammen.

Tabelle 55: Konstruktive Nachrüstungsmaßnahmen zur Erhöhung des Widerstandes gegenüber Wind- und Schneeeinwirkungen

Anlage oder Anlagenteil	Gefahrenquelle	Nachrüstungsmaßnahmen
Dächer	Wind	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	
	Schnee	Verstärkung von leichten Dachkonstruktionen durch zusätzliche Dachbinder bzw. Verstärkung der Vorhandenen
		Beheizung von durch Schneelasten betroffenen Bereichen zur Verhinderung von Schneelastbildung. Regelmäßige Kontrolle der Dachkonstruktionen im Betriebsbereich und Austausch von schadhafte Dachbauteilen. Instandhaltung der Dachabdichtung zur Vermeidung von Durchfeuchtungen. Ggf. Erneuerung der Dachabdichtungen
Außenwände, Fassaden, Tore	Wind	Verstärkung der Befestigung am Tragwerk
		Stabilisierung großer Flächen wie z. B. Einfahrts-toren durch Verstreben bzw. Verstärkungen
Gerüste und Kräne	Wind	Verstärkung der Verankerung im Baugrund oder an Bauwerken
		Sicherung durch zusätzliche Seilabspannungen
Behälter, Tanks, Silos	Wind	Verstärkung der Befestigung auf der Fundamentplatte
		Versteifungen bzw. Abspannungen gegen Formänderungen bei großen Querschnitten
	Schnee	Schutz von Schwimmdachabdeckungen gegen Überlastung durch Schneelast mit Hilfe einer zusätzlichen, mobilen schrägen Abdeckung am oberen Behälterrand zur Abhaltung der Schneelast.
Türme, Maste, Schornsteine	Wind	Sicherung durch zusätzliche Seilabspannungen

Darüber hinaus gibt es weitere Nachrüstmöglichkeiten, welche besonders gefährdete Anlagenteile schützen soll. Tabelle 56 stellt für verschiedene Anlagen und Anlagenteile geeignete Nachrüstmöglichkeiten gegen die Gefahrenquellen dar, welche keine direkten baulichen Veränderungen an den bestehenden Anlagen darstellen.

Tabelle 56: Weitere Vorkehrungen zur Gefahrenabwehr gegenüber Wind- und Schneeeinwirkungen

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. <p>Gefahrenquelle Tornado</p> <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 (bei Gerüsten von Fremdfirmen ist die Zustimmung des Eigentümers erforderlich) • Einrichten eines Frühwarnnetzes hinsichtlich aufkommender Extremwetterereignisse, wie zum Beispiel Winterstürme, Tornados oder extremer Schneefälle. Dieses kann durch die Einrichtung von Vernetzungen 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.

Einrichten eines Frühwarnnetzes hinsichtlich aufkommender Extremwetterereignisse, wie bspw. Winterstürme, Tornados oder extremer Schneefälle. Dieses kann durch die Einrichtung von Vernetzungen 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.

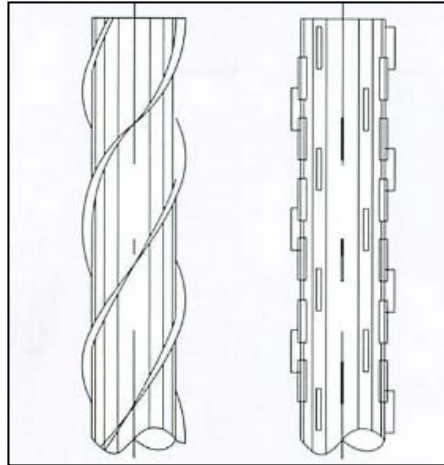
Rechtzeitiges Entleeren von freien Tanklagern, welche durch Frost zufrieren und infolge Ausdehnung Schaden nehmen könnten.

In Abweichung dazu beruhen Maßnahmen gegen winderregte Schwingungen 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 119 zeigt mit dem sogenannten Scruton-Wendel sowie Störstreifen stellvertretend zwei Beispiele.

Abbildung 119: 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 Schwingungsverhaltens, 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 planbar. Gegen bodennahe Projektile lassen sich beispielsweise Einzäunungen des Anlagenteils realisieren. Besteht eine mögliche Gefährdung infolge Eindringen 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.

Nachrüstungs- und Vorsorgemaßnahmen während des Wirksamwerdens der Gefahrenquelle

Während eines Sturmereignisses können an den Anlagenteilen im Regelfall während des Sturmereignisses 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 Schneereignisses 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 Arbeitssicherheit des Räumungspersonals vorrangig zu berücksichtigen. Vorsorglich sollten gefährdete Bereiche geräumt (Gefährliche Stoffe und Personal) werden, so dass ein mögliches Versagen der Schutzhülle keine weiteren Auswirkungen hat.

5.3.2 Nachrüstungs- und Vorsorgemaßnahmen 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.

5.4 Nachrüstungspflichten

Anlagen in Betriebsbereichen müssen gemäß § 3 Abs. 4 StörfallV dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen. Entsprechend dem Obenstehenden gibt es drei Möglichkeiten, die dazu führen können, dass dies nicht mehr der Fall ist:

1. Der Erkenntnisstand und daraus folgende Anforderungen haben sich weiterentwickelt,
2. die Degradation der Anlage hat das Sicherheitsniveau seit Genehmigung/Inbetriebnahme gesenkt,
3. es ist beides eingetreten.

Wie in Kapitel 5.1 dargelegt, hat sich der Kenntnisstand hinsichtlich Art der Wirkungen und Intensitäten der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten in Deutschland seit 1936 weiterentwickelt, was seinen Niederschlag in den Normen und nunmehr in der TRAS 320 gefunden hat.

Wie in Kapitel 5.2 erläutert kann sich der Widerstand (des Tragwerks) einer Anlage gegen die Einwirkungen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten während des Lebensalters einer Anlage vermindert haben.

In Abhängigkeit von Anlagenstandort und Alter der Anlage kann auch beides eingetreten sein.

In allen drei Fällen kann eine Pflicht zur nachträglichen Anpassung an den aktuellen Stand der Sicherheitstechnik für den Betreiber aber auch die zuständige Behörde gegeben sein.

Die Kommentierung von Landmann & Rohner (2015) zu § 3 Abs. 4 StörfallV führt diesbezüglich aus:

„Die Pflicht zur Einhaltung des Standes der Sicherheitstechnik (Absatz 4)

Absatz 4 begründet eine selbständige Pflicht. ... Sie besagt einmal, dass die Beschaffenheit und der Betrieb der Anlagen des Betriebsbereichs insgesamt dem Stand der Sicherheitstechnik entsprechen müssen, d.h. dass sie dem entsprechen müssen, was die Fachwelt aufgrund des allgemeinen technischen Entwicklungsstandes bei Anlagen der betroffenen Art für praktisch geeignet und erforderlich hält, um Störfälle zu verhindern und Störfallauswirkungen zu begrenzen. Insoweit umschreibt Absatz 4 den Mindestumfang der Maßnahmen, die unabhängig von den besonderen Standortverhältnissen stets durchzuführen sind. ... Bei einer Fortentwicklung des Standes der Sicherheitstechnik ist die Anlage ggf. nachzurüsten (dynamische Pflicht).

Darüber hinaus ist Ansatz 4 zu entnehmen, dass die einzelnen Vorkehrungen, die der Anlagenbetreiber im Hinblick auf Absatz 1 und Absatz 3 treffen will, auch isoliert betrachtet den für sie maßgebenden Stand der Technik einhalten müssen. ...

Erfüllt der Betreiber einer Anlage nicht die ihm nach § 3 obliegenden Pflichten, so kann die zuständige Behörde bei bestehenden Anlagen eine entsprechende Anordnung erlassen und ggf. mit den Mitteln des Verwaltungszwanges durchsetzen. ... Da die Pflichten nach § 3 dem Gefahrenschutz dienen, ist das Ermessen der Behörde eingeschränkt; nach § 17 Abs. 1 Satz 2 BImSchG sollen bei genehmigungsbedürftigen Anlagen nachträgliche Anordnungen getroffen werden; d.h. die Behörde muss in der Regel tätig werden. Der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit ist stets zu beachten; allerdings ist davon auszugehen, dass der Verordnungsgeber bereits eine generelle Verhältnismäßigkeitsprüfung durchgeführt hat. Bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen ... ist die Rechtslage nicht wesentlich anders. Hier ist der Ermessensspielraum der anordnenden Behörden durch das Gewicht der gefährdeten Schutzgüter eingeschränkt.“

Angesichts seiner Pflichten nach § 3 StörfallV spricht viel dafür, dass der Betreiber von sich aus Nachrüstungsnotwendigkeiten und Nachrüstmöglichkeiten prüft, sowie Maßnahmen zur Anpassung an den aktuellen Stand der Sicherheitstechnik umsetzt.

6 Abschätzung der finanziellen Auswirkungen Wirkungen der Regelungen und Vorgaben des TRAS-Entwurfs

6.1 Einleitung

Um die Auswirkungen auf die Tragwerksplanung und somit auf die Auslegung von Anlagen, die der Störfallverordnung unterliegen, bezüglich möglicher Mehrkosten aufgrund der Vorgaben der TRAS abschätzen zu können, wurden mit mehreren international tätigen Planungsabteilungen von Anlagenbauern eingehende Diskussionen geführt. Hierzu zählten u.a. die Lurgi GmbH, Frankfurt sowie ThyssenKrupp Industrial Solutions (früher ThyssenKrupp Uhde) in Dortmund. Auf der Grundlage der erhaltenen Informationen werden im Folgenden Abschätzungen für mögliche Mehrkosten aufgrund höherer Wind-, Schnee- und Eislasten präzisiert. Hierbei wird zwischen Kolonnen, Rohrleitungsbrücken und Tanks unterschieden. Darüber hinaus werden Neuanlagen und bestehende Anlagen, die möglicherweise nachzurüsten sind, getrennt betrachtet. Während die Mehrkosten bei Neuanlagen gemessen an den Gesamtinvestitionen noch relativ gut abschätzbar sind, variieren die Mehrkosten bei den Bestandsanlagen mitunter sehr stark. Ursache hierfür ist zum einen der Zeitpunkt des Baus einer Anlage mit den jeweils zu diesem Zeitpunkt gültigen Auslegungsnormen. So kommen in den heute gültigen Normen neue Erkenntnisse oder Bemessungskonzepte zur Anwendung, die in früheren Normen nicht oder nicht in dieser Form berücksichtigt wurden. Zum anderen ist der individuelle Erhaltungszustand der Anlage zu berücksichtigen. Dennoch werden im Folgenden auch für diese Anlagen einige Aussagen getroffen, welche die Größenordnung der zu erwartenden Investitionen aufzeigen können.

6.2 Anforderungen und Erfahrungen im weltweiten Anlagenbau

Beide in der Diskussionsphase befragten Unternehmen sind weltweit tätig, wobei für die Planung von Neuanlagen grundsätzlich die Anforderungen von der jeweiligen nationalen Gesetzgebung bzw. vom Bauherrn vorgegeben werden. Hierzu zählen u.a. die Wind-, Schnee und Eislasten sowie die zu berücksichtigenden Beschleunigungen bei Erdbeben. Es musste z.B. eine Anlage in Indien auf Kundenwunsch für Windgeschwindigkeiten bis max. 250 km/h ausgelegt werden. Für eine andere Anlage, die an der Küste Australiens errichtet wurde, mussten sogar Windgeschwindigkeiten bis zu 300 km/h für die Tragwerksplanung zugrunde gelegt werden. Dies bedeutet, dass extreme Windlasten planerisch berücksichtigt und beherrscht werden können. Eine solche extreme Auslegung verursacht natürlich einen erhöhten konstruktiven Aufwand in sämtlichen Anlagenbereichen.

Grundsätzlich werden bei einer ‚Standard-Auslegung‘ unterschiedliche Lastkombinationen berücksichtigt, wie zum Beispiel:

- 1) $P + P_s + D$
- 2) $P + P_s + D + L$
- 3) $P + P_s + D + T$
- 4) $P + P_s + D + S_s$
- 5) $0,6 D + (W \text{ oder } 0,7 E)$
- 6) $60,9 P + P_s + D + (W \text{ oder } 0,7 E)$
- 7) $0,9 P + P_s + D + 0,75 (L+T) + 0,75 S_s$
- 8) $0,9 P + P_s + D + 0,7 (W \text{ oder } 0,7 E) + 0,75 L + 0,75 S_s$

mit

P innerer oder äußerer Auslegungsdruck

P_s hydrostatischer Druck

D Eigengewicht

L Betriebsgewicht, Verkehrslasten

E	Erdbebenlasten
W	Windlast
Ss	Schneelast
T	Belastung aus Temperaturunterschieden

Diese Lastkombinationen zeigen lediglich die unterschiedlichen Kombinationen zwischen den Einwirkungsgruppen. Sie geben nicht die jeweiligen Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungsgruppen wieder. Diese sind entsprechend den jeweiligen Normen zu entnehmen.

Bei Prozesskolonnen (z.B. Rektifikationskolonnen oder Extraktionskolonnen) ist zudem die (Kopf-)Auslenkung unter Windlast begrenzt und somit eine wichtige Konstruktionsanforderung. Eine zu große Auslegung würde die Flüssigkeitsverteilung über den einzelnen Böden verändern und damit die Trennleistung der Kolonne insgesamt verringern.

Je nach Anforderungen der lokal gültigen Gesetze und Richtlinien sind neben extremen Windlasten, z. B. horizontale Erdbebenlasten (entsprechend 60% der Erdbeschleunigung (Chile)) oder Schneelasten mit einem Flächendruck bis zu 2 kN/m² (Kanada), zu berücksichtigen. Da bis heute keine Schäden bekannt sind, die auf diese Art der Belastungen zurückzuführen sind, scheinen die Bemessungsansätze für die statische Auslegung den realen Wetterbedingungen gerecht zu werden. Gleichwohl sind zahlreiche Störfälle bekannt, die jedoch meist auf Kombinationsrisiken zurückzuführen sind. Der Hurrikan Katrina hat zu zahlreichen Stofffreisetzungen in Verbindung mit Hochwasser geführt (Aufschwimmen von Tanks usw.).

Neben den jeweiligen Lastannahmen spielt die Materialauswahl eine große Rolle für die Standsicherheit von Anlagen. Bei den Verankerungen von Komponenten im Anlagenbau werden beispielsweise ausschließlich duktile Werkstoffe für die Verankerung (Ankerschrauben, Fußring) eingesetzt. Diese sollen sicherstellen, dass es bei unvorhergesehenen Belastungen durch elastisch-plastische Dehnungen der am stärksten belasteten Bauteile (Schrauben, Fußring) zu Lastumlagerungen- bzw. -übernahmen kommen kann. Durch diesen Effekt kann die Differenz zwischen Bruchfestigkeit und Streckgrenze der eingesetzten Werkstoffe als zusätzliche Tragreserve betrachtet werden. Mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen können plastische Verformungen gemessen und somit überwacht werden. Auf diese Weise können Schwachstellen rechtzeitig erkannt und behoben werden, bevor es zu einem Tragwerksversagen kommt. Dieses verhindert in vielen Fällen, dass eine zu konservative Auslegung gewählt werden muss, welche schnell unwirtschaftlich werden könnte. Vielmehr wird auf diesem Weg ein unvorhergesehenes Versagen verhindert und trotzdem eine sichere und wirtschaftliche Lösung für den Entwurf von Anlagen erzielt.

6.3 Gewichtung von Wind-, Schnee und Eislasten im Vergleich zu anderen Einflussfaktoren auf die Standsicherheit von Anlagen

Im Rahmen der Diskussion mit den Anlagenplanern stellte sich besonders heraus, dass in vielen Industriegebieten der Welt der maßgebende Einflussfaktor auf die Standsicherheit die horizontale Beschleunigung durch Erdbeben ist. Dieses ist allerdings beschränkt auf die Verankerung der Bauteile sowie auf besonders schlanke Strukturen mit verhältnismäßig großen Lasten in den oberen Bereichen der Struktur. Fundamentkörper werden nur bedingt durch eine hohe seismische Erregung beansprucht. Eine Auslegung unter Berücksichtigung von Erdbeben ist für die Anlagen in der Bundesrepublik Deutschland i.d.R. von untergeordneter Bedeutung. Weil sich die meisten Anlagen in Deutschland in Gebieten ohne oder mit sehr geringer Gefahr eines Erdbebens befinden, wurden diese auch nicht für diesen Lastfall ausgelegt. Die wenigen ausgewiesenen Erdbebenzonen in der Bundesrepublik beinhalten zum Großteil nur eine geringe Horizontalbeschleunigung als Auslegungsgröße, so dass hier die Erdbebenauslegung nur eine geringe Bedeutung besitzt. Das bedeutet allerdings im Umkehrschluss, dass eine Auslegung gegenüber Windeinwirkung die herausragende Größe beim Entwurf und der Planung sein kann.

Dies gilt vor allem für Anlagenteile mit einem vergleichsweise niedrigen Betriebsinnendruck. Die Berechnung der Wandstärke wird in diesen Fällen nicht vom Betriebsdruck sondern von der Windlast dominiert. Mit zunehmendem Betriebs-

druck verschieben sich die jedoch die Verhältnisse. Mehr und mehr wird dann die Wandstärkenberechnung vom Innendruck bestimmt. Bei einem Betriebsdruck von z.B. 40 bar spielt die Windlast für die Berechnung der Wandstärke nur eine untergeordnete Rolle.

Die Verankerung und Fundamentauslegung ist in jedem Fall von einer steigenden Windlast betroffen. Entscheidend hierbei ist das Einspannmoment, das sich aus der auf die Kolonne wirkenden Windkraft und der Höhe der Kolonne ergibt. Dieses Einspannmoment muss durch das Fundament und die Verankerung aufgenommen und sicher in den Baugrund abgeleitet werden.

Bei den Eislasten sind vor allem „kalte“ Leitungen zu berücksichtigen. Rohrleitungen mit „warmen“ Medien sind in der Regel isoliert. Dennoch wird davon ausgegangen, dass ein bestimmter Verlustwärmefluss eintritt und eine Eisbildung auf den Isolierungen im Regelfall verhindert. Nur bei extremen Witterungsbedingungen kann eine Eisbildung auf isolierten Rohrleitungen nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Dieser Fall wird jedoch von den Anlagenbauern nicht als Auslegungsfall herangezogen. Unterirdisch verlegte Leitungen sind generell nicht von Wind-, Schnee- und Eislasten betroffen.

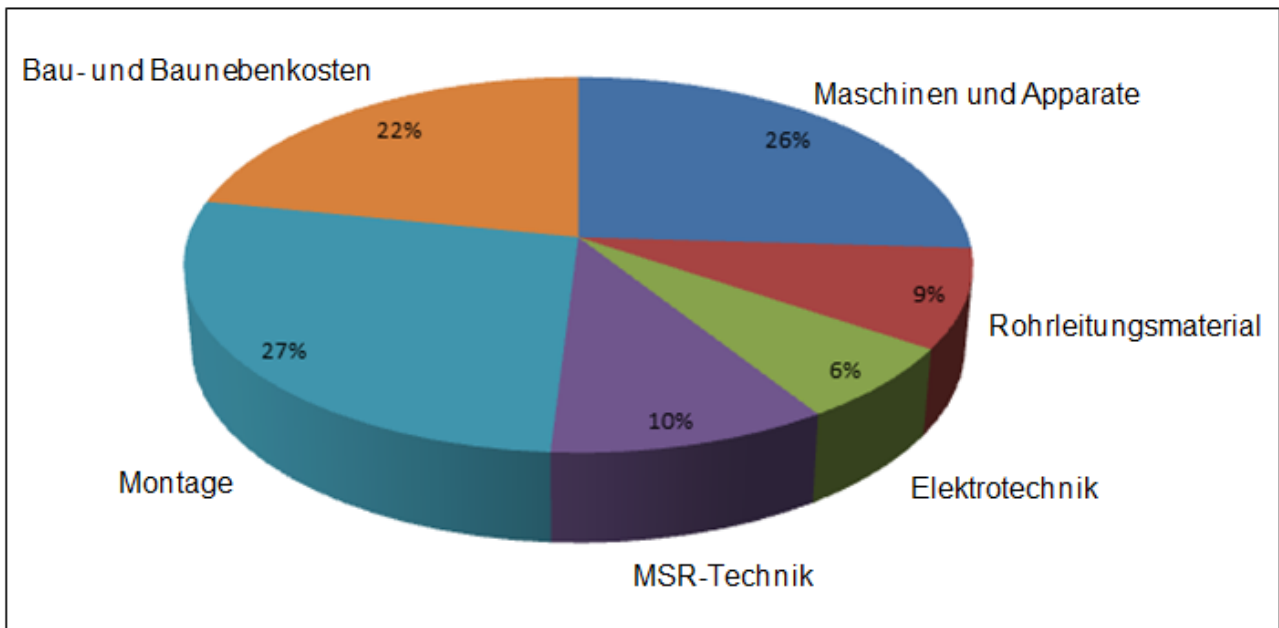
Für Anlagen mit weit gespannten Dächern sind Wind- und Schneelasten grundsätzlich die maßgebenden Lasten. Somit sind diese Bauteile von einer Lasterhöhung aufgrund der vorgesehenen Anforderungen der Entwurfsfassung der TRAS direkt betroffen. Hier müssen die Auslegungen gegenüber der erhöhten Last erfolgen.

Bei Kugeltanks, in denen verflüssigte Gase gelagert werden, ist wiederum der Innendruck der maßgebende Lastfall und bestimmt wesentlich die Berechnung der Wandstärke. Zudem ist bei der Kugelform die Gefahr einer zusätzlichen Schnee- und Eislast sehr gering. Die äußere Standsicherheit wird hier allerdings von der auftretenden Windlast beeinflusst.

6.4 Kostenanteile von Fundamenten und Verankerungen im Vergleich zu den Gesamtkosten einer Anlage bei Neubauten

Zur Abschätzung der Mehrkosten aufgrund einer Verschärfung der Sicherheiten gegenüber Wind-, Schnee- und Eislasten sind zunächst die Kostenanteile der wesentlichen Einflussgrößen, die die Investitionen einer Anlage bestimmen, einzugrenzen. Größenordnungen hierzu lassen sich aus Untersuchungen von Lang (1948) ableiten, die von Prinzing et. al. (1985) auf der Grundlage von abgewickelten Projekten im Chemieanlagenbau der BASF verifiziert und stärker aufgeklärt wurden (Prinzing et. al. 1985). Auf der Grundlage dieser Untersuchungen lassen sich im Chemieanlagenbau folgende Kostenanteile pauschal abschätzen (Abbildung 120):

Abbildung 120: Kostenanteile im Chemieanlagenbau



nach Prinzing et. al. (1985)

Unabhängig von diesen veröffentlichten Angaben wurden von den Anlagenbauern, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens befragt wurden, folgende prozentualen Ansätze gegeben:

Für den Bau und die Montage einer Neuanlage können ca. 40 - 60 % der Gesamtkosten veranschlagt werden. Diese wiederum teilen sich noch einmal hälftig zwischen Bau und Montage auf. So verbleiben ca. 25 % der Gesamtkosten für die reine Baukonstruktion.

Diese Angaben stimmen folglich mit den Literaturangaben näherungsweise überein. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bedeutsamen Kosten für Fundamente und Verankerungen belaufen sich nach Angabe der Anlagenplaner auf ca. 10 – 20 % der Baukosten. Dies bedeutet, dass diese beiden Positionen, die von einer Laständerung betroffen wären, einen Anteil von unter 5 % an den Gesamtkosten haben.

Nach Aussage der Tragwerksplaner von Chemieanlagen kann zudem davon ausgegangen werden, dass sich die Gesamtkosten um ca. 0,5 % erhöhen, wenn eine 10%ige Steigerung der Last angesetzt wird.

6.5 Einzelbetrachtung von Kolonnen im Chemieanlagenbau (Neubauten) bei extremen Windlasten

Bei dieser Betrachtung von Trennkolonnen, wie sie sehr häufig innerhalb der Gesamtanlagen der chemischen Industrie in unterschiedlichster Prägung und Anordnung vorkommen, wird eine Unterscheidung der einzelnen Baukomponenten wie folgt vorgenommen:

1. Trennkolonne als zylindrisches Stahlbauwerk
2. Fundamente
3. Verankerungen

Diese Aufteilung ist notwendig, da die Auswirkungen infolge Windlasten in unterschiedlicher Stärke in den einzelnen Anlagenkomponenten auftreten.

6.5.1 Mehrkosten durch größere Windlasten bei Kolonnen

In den folgenden Abschnitten werden die oben genannten Anlagenkomponenten einer Kolonne diskutiert und die möglichen Mehrkosten infolge größerer Windlasten abgeschätzt.

6.5.1.1 Trennkolonne

Wie schon zuvor verdeutlicht wurde, wirken sich Windlasten nur dann auf die Dimensionierung der Wandstärken aus, wenn die Innendrucke der Kolonnen gering sind. Darüber hinaus sind viele Kolonnen in Tragwerkskonstruktionen mit Gerüstkomponenten eingebunden, so dass die Standsicherheit über derartige Anlagenkomponenten verstärkt wird (Abbildung 121). Besonders gefährdet erscheinen allerdings solche Kolonnen, die freistehend aufgestellt werden und nur über einen Fußflansch mit einer entsprechenden Verschraubung auf dem Fundament gesichert werden (Abbildung 122).

Abbildung 121: Eingerüsteter Reaktor einer Ammoniaksyntheseanlage

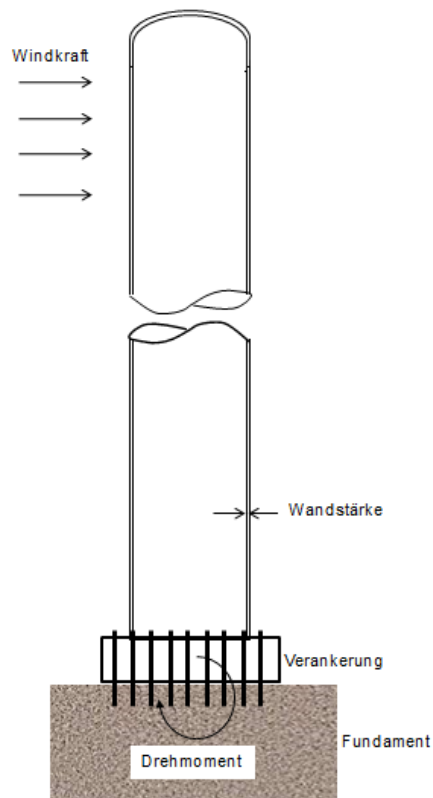


Abbildung 122: Freistehende Kolonnen in einer Raffinerie



Auswirkungen infolge der Windbeanspruchung zeigen sich, wie die Beispielbetrachtungen gezeigt haben, in erster Linie in den Bauteilen der Verankerung und Fundamentierung und bei den Wandstärken im unteren Bereich der Kolonnen.

Abbildung 123: Zu betrachtende Bereiche bei erhöhten Windlasten am Beispiel einer freistehenden Kolonne



Wenn sich im Einzelfall ergibt, dass eine Kolonne bis zu einem Drittel der Gesamthöhe um 5 mm verstärkt werden muss, erhöht sich der Materialkostenanteil für Stahl um ca. 3,5 – 4 %. Dieses ist lediglich eine stark vereinfachte Berechnung, führt aber zu einem Eindruck und einer Größenvorstellung der zu erwartenden Änderungen.

Dies lässt sich leicht wie folgt einfach nachrechnen:

Das Volumen der Stahlwandung einer Kolonne kann wie folgt berechnet werden:

$$V_{\text{Ring}} = \pi \times (r_{\text{außen}}^2 - r_{\text{innen}}^2) \times H$$

Wenn man für $t = 0,05$ m (Annahme: Wanddicke 50 mm) ansetzt und anschließend das Verhältnis bildet zu einer Kolonne mit einer Wanddicke von $t = 0,055$ m bildet, dann ergibt sich:

$$(117) \quad \frac{\pi * ((ri + 0,055)^2 - (ri)^2) * \frac{H}{3} + \pi * ((ri + 0,05)^2 - (ri)^2) * 2 * \frac{H}{3}}{\pi * ((ri + 0,05)^2 - (ri)^2) * H} = \frac{\frac{(0,11ri + 0,00303)}{3} + (0,1ri + 0,0025) * \frac{2}{3}}{0,1ri + 0,0025}$$

Wird beispielsweise der Radius mit $ri = 3,0$ m angesetzt, so ergibt sich daraus ein Faktor für die Zunahme des Materialaufwands von:

$$(118) \quad \frac{\frac{(0,11 * 3,0 + 0,00303)}{3} + (0,1 * 3,0 + 0,0025) * \frac{2}{3}}{0,1 * 3,0 + 0,0025} = 1,03364$$

Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Höhe und nur gering von dem Radius beeinflusst. Da die Volumensteigerung auch gleichzeitig proportional zur Masse und zum Materialpreis ist, bleibt es bei einer Erhöhung der Materialkosten um 3,5 – 4 %.

6.5.1.2 Fundamente/Verankerungen

Bei der Auslegung der Verankerung und der Fundamente ist der entscheidende Auslegungslastfall neben dem Eigengewicht und der Gesamtlast der Einbauten die horizontale Komponente der Windbeanspruchung. Geht man also von einer 10%igen Laststeigerung für den Wind aus, so kann man in einem ersten Ansatz auch von etwa 10 % höheren Kosten für die Fundamente und die Verankerungen bei Neubauten ausgehen. Dies führt bei einer Investitionssumme für die Gesamtanlage von z.B. 10 Mio. € zu Mehrkosten von 25.000 – 50.000 €.

6.5.2 Mehrkosten durch größere Windlasten bei Tanks

Nach Aussagen der Anlagenbauer muss bei einer Auslegung von Tankanlagen auf Windgeschwindigkeiten bis max. 250 km/h von Mehrkosten von 5 – 10 % für den Einzeltank ausgegangen werden.

Ähnlich wie bei den Kolonnen hat eine Steigerung der Windlast auch bei Tankbauwerken Einflüsse auf die Auslegung der Komponenten Fundament, Verankerungen und Wanddicke am Fußbereich. Hinzu kommt bei Tankbauwerken, dass auch die Gesamtstabilität in den Fokus rutscht, da für den Fall des Leerstandes hier die Windlast ebenfalls auslegungsrelevant werden kann. Dies wird durch entsprechende Wandaussteifungen berücksichtigt.

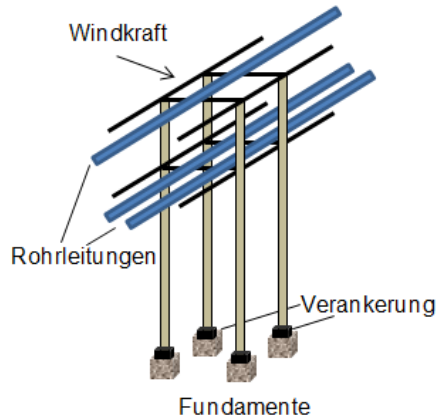
Mehrkosten für die Gesamtanlage entstehen vor allem auch dadurch, weil zur Sicherstellung der Standsicherheit bei extremen Winden die Abstände zwischen den einzelnen Tanks vergrößert werden müssen. Dies ergibt sich aus dem Venturi-Effekt, bei dem zusätzliche Lasten durch die lokale Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeiten und die damit einhergehenden Druckunterschiede zwischen den Tanks auftreten. Auch mögliche Interferenzeffekte müssen bei der Aufstellung von Tanks berücksichtigt werden. Auch sie können eine Abstandsvergrößerung zwischen den Tanks erforderlich machen. Dies führt letztlich zu höheren Baugrund- und Erschließungskosten aufgrund des erhöhten Flächenbedarfs.

6.5.3 Mehrkosten durch größere Windlasten bei Rohrleitungsbrücken

Rohrleitungsbrücken sind in nahezu jedem größeren Chemiestandort sichtbare Zeichen der Vernetzung und Versorgung zahlreicher Produktionsanlagen. Auf ihnen werden meist mehrere Rohrleitungen verlegt, die die unterschiedlichsten

Stoffe von einem Ort zum anderen leiten. Im Rahmen dieser Kostenbetrachtung werden nur die Mehrkosten einer Rohrleitungsbrücke ohne Berücksichtigung der jeweiligen Rohrleitungen abgeschätzt.

Abbildung 124: Ausschnitt einer Rohrleitungsbrücke



Wie die Abbildung 124 verdeutlicht, entfallen die Kosten auf die eigentliche Brückenkonstruktion, die Verankerung sowie die Fundamente. Eine grobe Aufteilung der Kosten kann bezogen auf die genannten Bauteile wie folgt angesetzt werden:

- 70 % für die Rohrleitungsbrückenkonstruktion als herkömmlicher Stahlbau
- 10 % für die Verankerung
- 20 % für die Einzelfundamente

Für alle Positionen kann eine Kostensteigerung von 10 % angenommen werden. Zusätzliche Befestigungen für die einzelnen Rohre, die auf den Brücken lagern, sind gegenüber den anderen Kostenpositionen vernachlässigbar gering.

6.5.4 Mehrkosten durch größere Schnee- und Eislasten bei Kolonnen

Aufgrund der geringen Oberflächen der Kolonnen müssen Schnee- und Eislasten bei derartigen Bauwerken nicht betrachtet werden. Hinzu kommt, dass bei den meisten Kolonnen eine Schneebelastung des Kolonnenkopfes aufgrund der Wölbung und den meist hohen Prozesstemperaturen sich nicht einstellen kann.

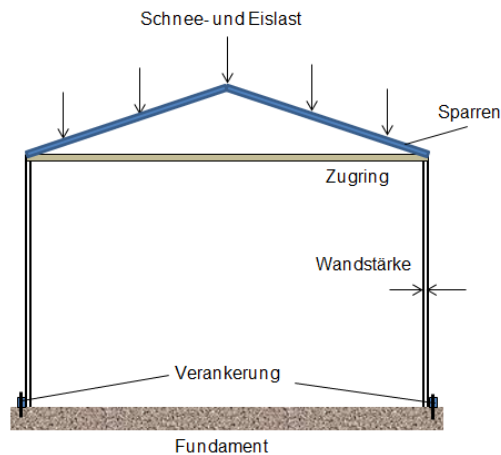
Allenfalls können auf Gerüsten oder Bühnen, welche entweder an die Kolonnen angeschlossen sind oder aber als Aussteifungskonstruktionen von Kolonnengruppen genutzt werden, lokal höhere Schneelasten auftreten. Hierdurch können vereinzelt höhere Kosten entstehen, welche sich aber alle in einem geringen Bereich abspielen und nicht näher bezifferbar sind.

6.5.5 Mehrkosten durch größere Schnee- und Eislasten bei Tanks

Die Betrachtung von Schneelasten ist vor allen dann erforderlich, wenn die Tanks durch flach geneigte Dachkonstruktionen abgedeckt sind. Dies gilt umso mehr, wenn diese sich durch große Spannweiten auszeichnen. Dächer mit großen Neigungswinkeln sind durch Schneelasten weit weniger betroffen, weil der Schnee zu einem frühen Zeitpunkt abrutscht. Auch sind Tanklager mit warmen Medien ebenfalls kaum von der Gefahr großer Schneelasten betroffen.

Der kritische Bereich von Tanks sind weit gespannte Teile der Dachkonstruktionen, wie beispielsweise die Sparren und die aussteifenden Elemente, wie beispielsweise der äußere Zugring. Für höhere Lasten sind entweder mehr Sparren oder stärkere Sparren erforderlich. Darüber hinaus ist der Zugring im oberen Teil eines Tanks verstärkt auszubilden (Abbildung 125).

Abbildung 125: Zu betrachtende Bereiche von Tankanlagen mit großen Spannweiten aufgrund von Schnee- und Eislasten



Die Kostensteigerung für die Dachkonstruktion inklusive dem Zugring liegt im Bereich von 5 – 10 %, wobei der Kostenanteil des Daches bei schätzungsweise ca. 20 % der Investitionen für den Tank insgesamt liegt. Das Fundament ist durch die höheren Schnee- und Eislasten nicht betroffen, da die vertikalen Zusatzlasten am Tankfuß gegenüber den anderen Beanspruchungen kaum ins Gewicht fallen.

6.5.6 Mehrkosten durch größere Schnee- und Eislasten bei Rohrleitungen

Eisansatz wird nach Aussage der befragten Planungsabteilungen in der Anlagenplanung eigentlich nicht berücksichtigt bzw. ist nicht maßgebend. Das hat folgende Gründe:

1. Die Rohrleitungen sind in der Regel dicker (minimal 2 Zoll), so dass die Querschnittserhöhung durch Eis nicht ins Gewicht fällt.
2. Die Spannweiten sind bei dünnen Rohren gering. Die Rohrleitungen werden meist nur über kurze Stücke an den Kolonnen hochgeführt.

Wie bereits unter Abschnitt 6.2 erläutert, werden Schnee- und Eislasten bei Rohrleitungen nur auf "kalten" Leitungen berücksichtigt. Bei horizontalen Rohrleitungen könnte daher eine Schneelasterhöhung eine Verstärkung der Rohre bzw. der Verankerungen bedeuten, ist in der Realität aber eher nicht zu erwarten. Bei isolierten Rohrleitungen wird vorausgesetzt, dass genug Wärme entweicht, um den Schnee abzuschmelzen.

Mögliche Mehrkosten, die eventuell bei der Auslegung der gesamten Rohrleitungssysteme gegen erhöhte Schneelasten entstehen könnten, sind daher als sehr gering anzusetzen. Diese Mehrkosten werden gegenüber den Gesamtinvestitionskosten kaum darstellbar sein.

6.6 Nachrüstung von Anlagen

6.6.1 Grundsätzliches

Kolonnen, die vor dem Jahr 2000 in Betrieb gingen, wurden nach einem anderen Regelwerk konzipiert als jüngere Anlagen. Im Jahr 2000 wurde das neue AD 2000-Regelwerk in Kraft gesetzt. Es konkretisiert alle wesentlichen Sicherheitsanforderungen, die nach der europäischen Druckgeräte-Richtlinie (97/23/EG) erfüllt werden müssen.

Die Einführung des neuen AD-Regelwerkes bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass die Anlagen, die diesem Regelwerk unterliegen, nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen. Es ist jedoch meist davon auszugehen, dass bei den statischen Berechnungen Reserven eingeplant wurden und nur ca. 85 % der maximal zulässigen Last tatsächlich auf das Anlagenteil wirkt. Dies bedeutet, dass eine Lasterhöhung nicht automatisch zu einer Nachrüstung führen muss. Es ist anzu-

merken, dass diese Einschätzung auf der Annahme beruht, dass bei der Auslegung bereits hinsichtlich späterer Normenverschärfung mit Weitsicht eine Lastreserve eingeplant wurde. In der Realität werden sich auch Anlagenteile und -komponenten finden, die in der ursprünglichen Auslegung keine Reserven vorhalten.

Die Standsicherheit müsste jedoch entsprechend dem neuen Regelwerk nachgerechnet werden, um diesen Nachweis zu erbringen. Allerdings kann dies im Einzelfall mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden sein. Nach Einschätzung eines Anlagenbauers ist bei Kolonnen vor 2000 eine Nachrechnung nach Eurocodes schon jetzt meist nicht möglich, weil mit der Einführung des neuen Regelwerkes nicht nur die Belastungen verändert wurden, sondern es wurde auch auf das Teilsicherheitskonzept umgestellt, was einen gänzlich neuen Ansatz zur Berechnung der Standsicherheit darstellt. Auch wurden in vielen weiteren Vorschriften erhöhte Anforderungen gestellt. Vor diesem Hintergrund ist den Anlagenbauern auch nicht bekannt, dass Anlagen nachgerechnet bzw. infolge geänderter Anforderungen im Nachhinein verstärkt wurden.

Grundsätzlich gilt jedoch im Stahlbau, dass Reserven zwischen Streckgrenze und Bruchgrenze vorhanden sind. Dies gilt auch für die Aktivierung von plastischen Verformungen. Hier könnten ebenfalls Laststeigerungen aufgenommen werden.

Bei Tankanlagen ist nach Aussage der Anlagenbauer davon auszugehen, dass Tankanlagen, die 20 oder 30 Jahre alt sind, nicht mehr den heutigen Normen entsprechen. Ähnlich wie bei den Kolonnen müssten diese Altanlagen nach den heutigen Normen nachgerechnet und deren Standsicherheit vor dem Hintergrund zusätzlicher Lastannahmen bewertet werden. Gleichwohl ist wie bei den Kolonnen eine Nachrechnung mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden.

Im Gegensatz zu diesen Anlagenteilen, wurden nach den Angaben der Anlagenbauer die Normen zur Rohrleitungsauslegung in den letzten Jahrzehnten kaum verändert. Hier wäre eine Nachrechnung mit zusätzlichen Lastannahmen möglich.

6.6.2 Nachrüstung der Anlagenteile und die daraus entstehenden Mehrkosten

6.6.2.1 Allgemein

Im Gegensatz zu der Betrachtung für Neuanlagen wird bei den Altanlagen nicht für die einzelnen Einwirkungsquellen Wind-, Schnee und Eisbelastung unterschieden. Eine Unterscheidung erfolgt nur für die drei wesentlichen Anlagenteile Kolonne, Tank und Rohrleitungssystem. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Beispielanalysen, die in Abschnitt 7 und 8 des Forschungsberichtes beigefügt sind, werden als Grundlage dieser Betrachtung herangezogen. Konkret wurde eine Destillationskolonne hinsichtlich der Windbeanspruchung und ein Tank bezüglich der Schneebelastung untersucht. In den Beispielbetrachtungen die einzelnen Komponenten wurden auch die Folgen, die sich aus der neuen Normung sowie der weiteren Steigerung durch die Vorgaben der TRAS 320 ergeben, untersucht.

Im Gegensatz zu den Neubauten können die Laststeigerungen bzw. Belastungen bei bestehenden Anlagen nicht in Form von erhöhten Dimensionierungen, z.B. durch höhere Wanddicken, aufgenommen werden. Vielmehr muss zuerst eine Analyse zeigen, inwiefern das bereits bestehende Bauteil noch genug Reserven besitzt. Diese sind anschließend mit den Berechnungsvorgaben der neuen Norm sowie mit den Vorgaben der TRAS 320 zu vergleichen. Hieraus können dann Schlussfolgerungen abgeleitet werden, ob die Anlage dem Stand der Sicherheitstechnik entspricht oder ob eine Nachrüstung notwendig wird. Diese Tatsache macht eine pauschale Aussage zu dem zu erwartenden Aufwand bei Bestandsanlagen auch nahezu unmöglich.

Dennoch lässt sich als Resultat der Beispielbetrachtung festhalten, dass der Einfluss der Laststeigerung der TRAS 320 gegenüber den für den allgemeinen Hochbau gültigen Annahmen des Eurocodes geringer ausfällt, als die Laststeigerung, die sich durch die Änderung der Normung gegenüber dem Zeitraum vor 2005 ergab. Die durchgeführten Beispielbetrachtungen haben darüber hinaus gezeigt, dass die Einflüsse auf die einzelnen Bauteile der Kolonnen und Tanks unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Im Folgenden ist eine kurze Zusammenfassung der Einflüsse dargestellt. Zugleich werden mögliche Nachrüstungen beschrieben.

Hierzu sei kritisch anzumerken, dass den Anlagenbauern, die sich an der Diskussion im Vorfeld beteiligt haben, keine behördlichen Auflagen oder betriebliche Erfordernisse bekannt geworden sind, die eine Nachrechnungen der Statik notwendig gemacht hätten. Das mag zum einen daran liegen, dass mögliche Verstärkungen erst zu einem späteren Zeitpunkt

seitens des Betreibers durchgeführt wurden aber auch, und dieses ist unter dem Stichwort des falsch verstandenen Bestandsschutzes wahrscheinlicher, die Vorstellung herrscht, dass die Anlagen nicht für neue Normen nachgerechnet werden müssten. Da es aber offensichtlich kaum Nachrüstungen der im Folgenden beschriebenen Form gibt, ist an dieser Stelle auch eine Kostenschätzung nahezu unmöglich vorzunehmen.

6.6.2.2 Nachrüstung von Fundamenten

Sollte die Betrachtung ergeben, dass in einem Bestandsbauteil das Fundament nicht mehr ausreichend gegen Kippen gesichert ist oder die Bodenpressungen lokal überschritten werden könnten, so kann man eine Ertüchtigung der Fundamentierung nur schwerlich vornehmen.

Sollte sich der Boden für die erhöhte Belastung als nicht ausreichend tragfähig herausstellen, so könnte über eine Bodenverfestigung mittels Injektionsverfahren eine Verbesserung der Situation herbeigeführt werden.

Auch ist es denkbar, eine mögliche Fundamentverschiebung mittels eines Monitoringprogramms zu beobachten. Ähnliche Verfahren werden bereits in weiten Teilen der Industrie angewendet. Meistens werden solche Verfahren seitens der Baubehörden gefordert, wenn es aufgrund der Bodenbeschaffenheit zu stärkeren ungleichmäßigen Setzungen kommen kann. Ein Austausch eines Fundaments ist aus Kostengründen in der Regel kaum ausführbar.

6.6.2.3 Nachrüstung von Verankerungen

Sicherlich sind hinsichtlich einer höheren Windbeanspruchung die Verankerungen von Kolonnen und Tankbauwerken am stärksten von notwendigen Verstärkungsmaßnahmen betroffen.

Je nach Bestandsplanung können diese Verankerungselemente durch höherwertige (höhere Schraubengüte) ersetzt werden oder es müssen zusätzliche Elemente angeordnet werden. Der Aufwand hierzu kann nicht abgeschätzt werden, da es je nach Bestand entweder zu einem einfachen Austausch, zu neu anzuordnenden Bohrungen oder zu gänzlich neu zu konzipierenden Verankerungsringen kommen kann. Auch hier wird man sicherlich mittels Nachbemessungen und der Annahme von plastischen Materialausnutzungen nur einen geringen Anteil der Bestandsanlagen nachrüsten müssen.

6.6.2.4 Nachrüstung von Wandungen von Kolonnen und Tanks

Grundsätzlich können Wandstärken bei Tanks und Kolonnen nicht erhöht werden, ohne die komplette Anlage zu demontieren. Somit wäre nur ein Komplettaustausch bei einem zu hohen Defizit denkbar.

Dieses Defizit ist aber allein aufgrund der Laststeigerung der Einwirkungen Wind und Schnee kaum realistisch. Sollte es, wie es die Beispielanalyse der Kolonne auch gezeigt hat, zu lokalen Defiziten der Wandstärke im Fußbereich kommen, so ist eine Verstärkung mittels außenliegender Steifen möglich. Diese lassen sich von außen auf die Wandung schweißen und verstärken den unmittelbaren Fußbereich in hohem Maße.

Eine Dopplung der Wandstärke durch außen aufgeschweißte Bleche ist sicherlich auch denkbar, technisch aber kaum umsetzbar, da eine flächige Verbindung zwischen neuem und altem Blech hergestellt werden müsste.

6.6.2.5 Nachrüstung von Dachtragwerken

Die Beispielsbetrachtung für eine Tankanlage aus Rostock, welche zu Zeiten der gültigen DDR-Normen geplant und errichtet wurde, ergab, dass Teile der Dachkonstruktion bei einer Verschärfung der Normung zumindest überprüft werden sollten. Reserven innerhalb der Konstruktion wurden teils gänzlich von den geänderten Vorschriften aufgebraucht und teils, wenn auch geringfügig, überschritten. Dieses Erkenntnis ist nur im geringen Maß auf andere Bestandstanks aus anderen Errichtungszeiträumen zu übertragen, wenngleich eine Tendenz zu erkennen ist. Sollte das Dachtragwerk bereits im Rahmen der Originalauslegung an den Grenzen der Standsicherheit liegen, so führt die zusätzliche Lasterhöhung dazu, dass das Tragwerk nicht mehr dem Stand der Sicherheitstechnik entspricht.

Da eine nachträgliche Ertüchtigung eines Dachtragwerks mit hohen Kosten verbunden ist, empfiehlt sich für eine höhere Schneebelastung das rechtzeitige Räumen des Daches ergänzt durch eine Ausrüstung mit Schneesensoren (Gewichtsmessung).

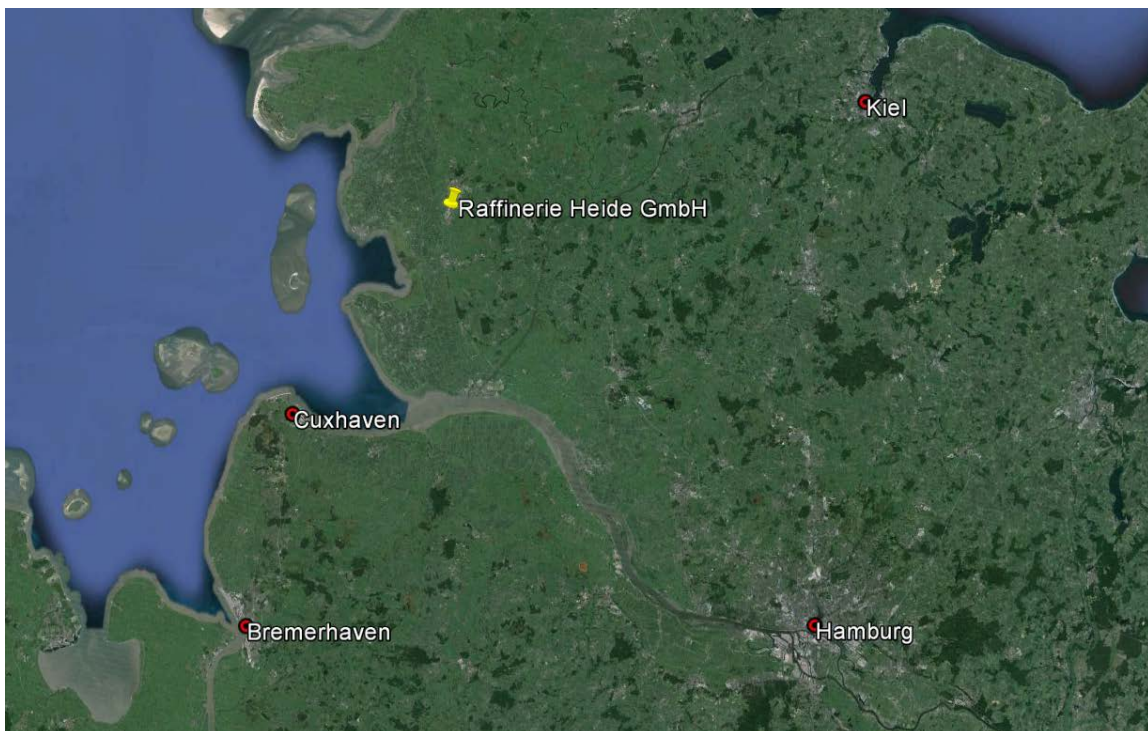
7 Anlage 1: Anwendungsbeispiel der TRAS 320 für die Gefahrenquelle Wind und Projektilflug am Standort Raffinerie Heide

7.1 Standortbeschreibung der Raffinerie Heide GmbH

Im Rahmen und zur Erweiterung des Forschungsvorhabens UBA 3711 68 331 wird die Anwendung der TRAS Wind-Schnee-Eis für die Gefahrenquelle Wind anhand einer Beispielbetrachtung in Anlehnung an das AP 4 der Leistungsbeschreibung durchgeführt. Kriterien für die Wahl eines geeigneten Anlagenteils sind zum einen die Lage in einem für Windlasten maßgebenden Bereich, vorzugsweise in der Windzone 4. Zum anderen sollte die Anlage einen Anlagenteil mit einer ausreichend hohen Kolonne besitzen, da diese den Windlasten in besonderem Maß ausgesetzt ist. Besonders interessant wird die Beispielbetrachtung bei einer Kolonne aus einem Altbestand, um die Entwicklungen in der Ermittlung und Analyse der Windwirkungen aufzuzeigen. Als geeigneter Standort hat sich die Raffinerie Heide erwiesen. Diese liegt etwa 90 km nordwestlich von Hamburg, rd. 10 km vor der Nordseeküste in Schleswig-Holstein, s. Abbildung 126.

Der Raffinerie Heide GmbH gehört ein Betriebsbereich mit erweiterten Pflichten, welcher somit der StörfallV unterliegt. Für die Beispielbetrachtung wurden die Xylolkolonnen im Süden der Raffinerie ausgewählt. Die zylindrischen, 76 m hohen Kolonnen sind als Quartett auf einem nahezu quadratischen Grundriss angeordnet und stehen sehr eng beieinander. Sie wurden 1962 geplant und aus Stahl gebaut. Drei dieser Kolonnen sind in identischer Bauweise ausgeführt. Die vierte Kolonne ist im Durchmesser etwas schlanker. Ähnliche Kolonnen, wenn auch jüngeren Alters finden sich in sämtlichen Bereichen des Betriebsbereichs und generell in Betriebsbereichen der verwandten Industrie. Aufgrund des jahrelangen Investitionsstaus für Neubauten in der Raffinerieindustrie sind auch die hier ausgewählten Altanlagen als typische Anlagenteile zu bewerten.

Abbildung 126: Lage der Raffinerie Heide GmbH



(Quelle: google earth)

Die zylindrischen, 76 m hohen Kolonnen sind als Quartett auf einem nahezu quadratischen Grundriss angeordnet und stehen sehr eng beieinander. Sie wurden 1962 geplant und aus Stahl gebaut. Drei dieser Kolonnen sind in identischer

Bauweise ausgeführt. Die vierte Kolonne ist im Durchmesser etwas schlanker. Ähnliche Kolonnen, wenn auch jüngeren Alters finden sich in sämtlichen Bereichen des Betriebsbereichs und generell in Betriebsbereichen der verwandten Industrie. Aufgrund des jahrelangen Investitionsstaus für Neubauten in der Raffinerieindustrie sind auch die hier ausgewählten Altanlagen als typische Anlagenteile zu bewerten.

Eine letzte Änderung der Anlage erfolgte im Jahr 2000. Hierbei wurde der Treppenturm zwischen den einzelnen Kolonnen erneuert. Diese Änderung hatte keinen direkten Einfluss auf die Auslegung der eigentlichen Kolonnen, da die erhöhte Windangriffsfläche bereits bei der Gesamtauslegung der Anlage im Jahr 1962 berücksichtigt wurde.

Abbildung 127: Gesamtansicht des Betriebsstandortes mit der Xylol-Destillation

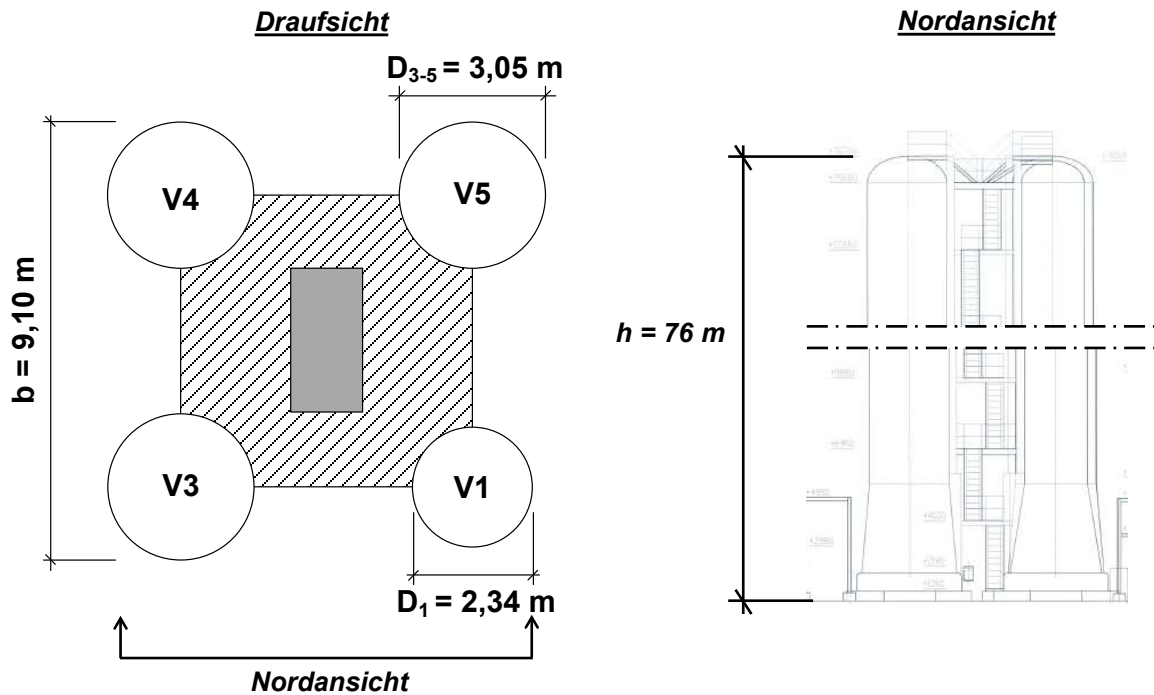


Abbildung 128: Gesamtansicht der Xylol-Destillation



Abbildung 129 zeigt den Grundriss der Xylolkolonnen in einer schematischen Darstellung. Die größeren Kolonnen haben einen Durchmesser von 3,06 m, die schmalere einen Durchmesser von 2,34 m. Der Abstand der Kolonnen zueinander beträgt in etwa einen Kolonnendurchmesser mit ca. 3 m. Zwischen den Kolonnen befinden sich über die gesamte Bauhöhe der erwähnte Treppenturm und verschiedenste Rohrleitungen. Zusätzlich sorgen einige Plattformen und Stahlkonstruktionen für eine deutliche Versperrung des durchströmbaren Raums zwischen den Kolonnen, siehe schraffierter Bereich in Abbildung 129. Die Xylolkolonnen sind in der Gesamtanlage in eine Vielzahl von weiteren Tanks, Rohrleitungen und Industriegebäuden eingebettet.

Abbildung 129: Xylokolonnen



in der Draufsicht in schematischer Darstellung (links) und in der geschnittenen Nordansicht (rechts)

In der vorliegenden Beispielanwendung der TRAS wird zunächst die in der Bestandsstatik angesetzte Windwirkung auf die Xylokolonnen zusammengefasst. Dabei wird zwischen den Windwirkungen auf eine Einzelkolonne und den Windwirkungen auf die Gesamtanlage differenziert. Im Weiteren wird eine detaillierte windklimatische Standortanalyse durchgeführt. Sie dient zur besseren Beurteilung der tatsächlich wirkenden Windlasten auf die Xylokolonnen. Zu diesem Zweck wird auf Grundlage von extremwertstatistisch ausgewerteten Winddaten von relevanten DWD-Wetterstationen beurteilt, welche Windgeschwindigkeiten tatsächlich am Bauwerksstandort wirken. Zusätzlich wird eine Rauigkeitsanalyse der Umgebung mit dem Ziel durchgeführt, ein geeignetes Geschwindigkeitsprofil für den Standort festzulegen. Die Ergebnisse der Standortanalyse werden wiederum für die Betrachtung der Windwirkungen auf die Xylokolonnen nach aktueller Normung und der Erweiterung der TRAS verwendet. In einem letzten Schritt werden die Windwirkungen und die daraus resultierenden Momente aus der Bestandsstatik mit den Ergebnissen der Untersuchung nach aktuellem Stand der Technik verglichen, um letztendlich aufzuzeigen, welche Unterschiede sich durch die Weiterentwicklung der Erkenntnisse und Vorschriften in der Windlastberechnung ergeben.

7.2 Angesetzte Windeinwirkung für den Nachweis der Xylokolonnen in der Bestandsstatik

Die Xylokolonnen aus Stahl wurden 1962 geplant. Voneinander getrennt aufgestellte statische Berechnungen führen zu einem den Nachweis der Wanddicken und zum anderen die Nachweise der Fundamente. Beide Berechnungen verwenden für die Ermittlung der Windlast die zu dem Zeitpunkt der Planung gültige Windlastnorm DIN 1055-4, 1938.

Der dort angesetzte Windlastansatz ist wie folgt definiert:

$$(119) \quad W(z) = cf \cdot q(z) \cdot A \text{ in kN}$$

mit:

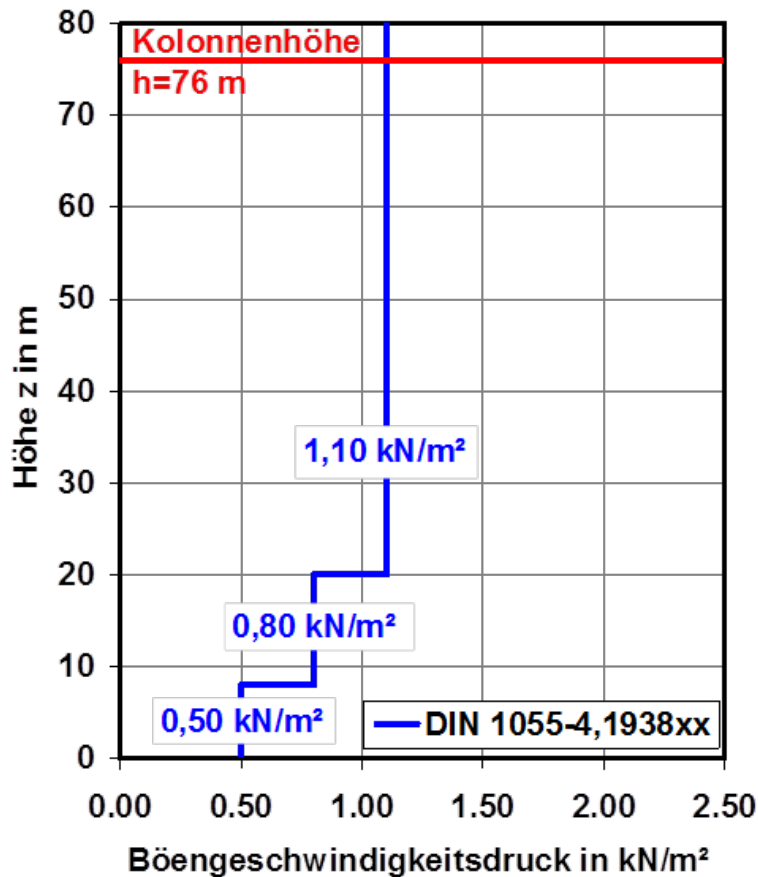
cf Kraftbeiwert

q(z) höhenabhängiger Staudruck in kN/m², vgl. Abbildung 130

A Referenzfläche in m²

Die statischen Berechnungen unterscheiden sich jedoch in der Herangehensweise. Bei der Ermittlung der Wanddicken werden explizit nur die einzelnen Kolonnen betrachtet. Anteilig werden die Lasten der Stahlkonstruktionen und Rohrleitungen auf die Einzelkolonnen verteilt. Der Staudruck $q(76\text{m}) = 1,10 \text{ kN/m}^2$ auf Höhe der Kolonnenoberkante bei $z = 76 \text{ m}$ wird dabei über die gesamte Höhe voll angesetzt. Die verwendeten Kraftbeiwerte gelten für zylindrische Bauwerke. Für die Kolonne wird dieser Kraftbeiwert um einen Schlankheitsfaktor zusätzlich abgemindert. Die Referenzfläche beträgt „angeströmte Breite mal Höhe der Kolonne“, $A = D \cdot h$, bzw. die Flächen der Stahlkonstruktion und der Rohre.

Abbildung 130: Höhenabhängiger Staudruck $q(z)$ nach DIN 1055-4, 1938



Die Windeinwirkungen auf die Gesamtkolonne für die Lastermittlung auf das Fundament wurden mit einem anderen Ansatz ermittelt. Das Kolonnenbauwerk, bestehend aus 4 Einzelkolonnen, Rohrsystemen, Stahlkonstruktionen und einer Treppe wird aerodynamisch als ein Bauwerk angesehen. Es wird auf der sicheren Seite liegend davon ausgegangen, dass die Versperrungen so groß sind, dass eine bestehende Durchströmbarkeit des Gebäudes keine maßgebende Lastminderung auf das Fundament bewirkt. Demzufolge wurde ein Kraftbeiwert für ein hoch aufragendes Gebäude, ohne Abminderungen verwendet. Darüber hinaus wird als Referenzfläche die gesamte Fläche des Quaders verwendet, mit $A = b \cdot h$. Bei der Ermittlung des Staudrucks wird jedoch die in Abb. 1.3 gezeigte Höhenabhängigkeit der Treppenkurve in Anspruch genommen. Tabelle 57 fasst die verwendeten Parameter zur Lastermittlung zusammen.

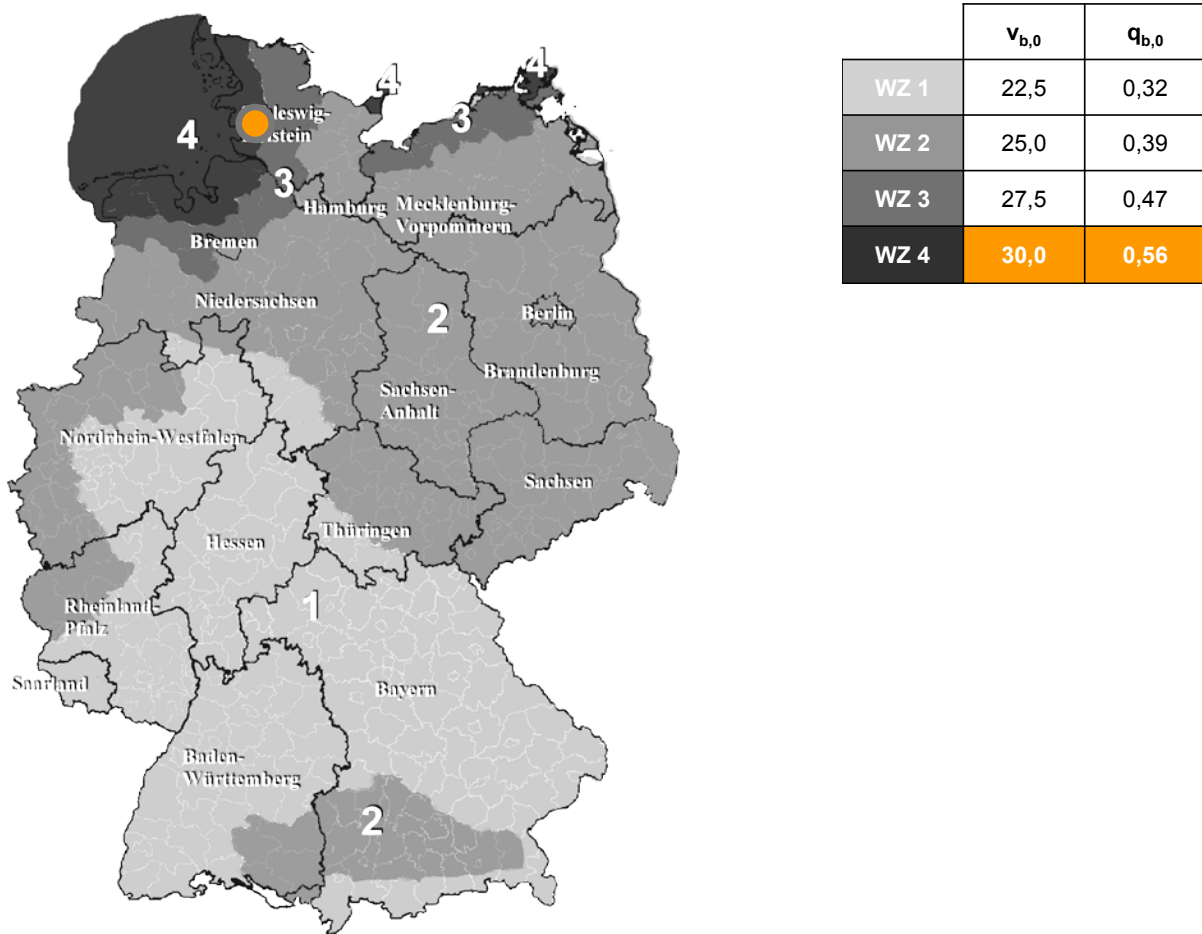
Tabelle 57: Zusammenstellung der verwendeten Parameter zur Ermittlung der Windeinwirkungen auf die Xylokolonne in den Bestandsstatiken

Parameter	Wanddickennachweis	Fundamentnachweis
Kraftbeiwert c_f	0,7	1,6
Staudruck $q(z)$ in kN/m^2	1,10 (0 - 76 m)	0,5 (0 - 8 m)
		0,80 (9 - 20 m)
		1,10 (21 - 76 m)
Referenzfläche A in m^2	$D1 \cdot h = 175,5$ (V1)	$b \cdot h = 682,5$
	$D3-5 \cdot h = 229,5$ (V3 - V5)	

7.3 Standortgutachten zur Beurteilung des Windklimas vor Ort

Im Hinblick auf eine ausreichende Sicherheit werden Tragstrukturen gegen besonders seltene Sturmereignisse ausgelegt. Gemäß des Sicherheitskonzeptes der Windlastnorm DIN EN 1991-1-4 ist für den Tragwerksentwurf ein Ereignis heranzuziehen, das in 50 Jahren nur einmal überschritten wird bzw. zu einer jährlichen Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit von 0,98 korrespondiert. Die zugehörige, rechnerische Stärke eines solchen Bemessungssturms wird durch einen Bezugswert der Windgeschwindigkeit, der so genannten Basiswindgeschwindigkeit v_b charakterisiert. Sie gibt als Grundwert $v_{b,0}$ den maximalen 10-Minuten-Mittelwert des Ereignisses in 10 m Höhe über Grund in ebenem, offenem Gelände (Geländekategorie II) unabhängig von Windrichtung und Jahreszeit wieder.

Abbildung 131: Windzonenkarte Deutschland mit Bauwerksstandort Raffinerie Heide (links), anzusetzende Referenzgeschwindigkeit und –geschwindigkeitsdruck (rechts)



Standort Raffinerie Heide GmbH
 (R;H) = (3504899;6002736)

Die Stärke der extremen Sturmereignisse und folglich auch die Bezugswindgeschwindigkeit hängen von der jeweiligen klimatologischen Region ab. DIN EN 1991-1-4 in Verbindung mit DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 trägt diesem Umstand durch eine Windzonenkarte Rechnung, in der die Grundwerte der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}$ in Abhängigkeit ihrer geographischen Lage im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland ausgewiesen werden, s. Abbildung 131. Der Standort der Raffinerie Heide liegt nach dieser Zonierung in Windzone WZ4, für die eine Basiswindgeschwindigkeit von $v_{b,0} = 30,0$ m/s und ein Basisgeschwindigkeitsdruck $q_{b,0} = 0,56$ kN/m² festgelegt sind.

Nachfolgende extremwertstatistische Auswertungen führen den Nachweis, dass das Windklima am Standort der Raffinerie Heide zuverlässig und mit normgemäßer Sicherheit mit einem standortspezifischen Wert der Basiswindgeschwindigkeit erfasst.

Ein solches Vorgehen ist insbesondere dann zulässig, wenn für einen Standort ausreichend gesicherte statistische Werte vorliegen. In Ergänzung zu den normativen Angaben werden daher die Grundwerte der Basiswindgeschwindigkeit zum Starkwindgeschehen an der Raffinerie auf der Grundlage von Windmessdaten der den Standort umschließenden Wetterstationen extremwert-statistisch abgeleitet. Die Abbildung rechts in Tabelle 59 zeigt den Standort der Raffinerie Heide und die ausgewerteten DWD-Wetterstationen. Diese liegen in einem Abstand von 14 bis etwa 50 km Entfernung

zur Raffinerie, zum Teil im Küstengebiet in Windzone WZ4 und zum Teil im Hinterland in Windzone WZ3. Die Lage der Wetterstationen ist durch folgende Gauß-Krüger-Koordinaten definiert.

Tabelle 58: Lage der ausgewerteten DWD-Wetterstationen

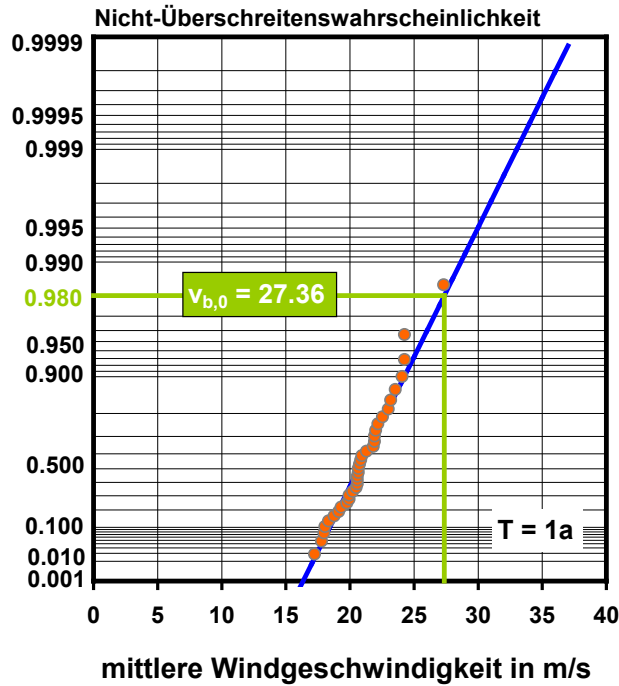
Station	Rechtswert	Hochwert	Höhe über N.N.
Brunsbüttel	3509863 m	5972324 m	5 m
Büsum	3491282 m	5998290 m	7 m
Cuxhaven	3480267 m	5970501 m	5 m
Hohn	3534703 m	6020672 m	10 m
Jagel	3533497 m	6037359 m	22 m
Nordholz	3478022 m	5959382 m	25 m
Schleswig	3535600 m	6044795 m	43 m
Schwesing	3509713 m	6042812 m	26 m
St. Peter Ording	3473983 m	6022469 m	11 m

Die Windbeobachtungen stehen als Jahresextremwerten von 10-Minuten-Mittelwerten der Windgeschwindigkeit mit zugehöriger Windrichtung zur Verfügung. Die Windmessungen liegen im Schnitt für einen Zeitraum von 1966 bis 1999 vor.

Die Stationen liegen teilweise unmittelbar an der Westküste. Im Vergleich zum normgemäßen Referenzgelände ist besonders in den Hauptwindrichtungen aus Südwesten die Geländerauigkeit deutlich verringert. Durch die glatte Anströmung über die Nordsee werden somit deutlich höhere Windgeschwindigkeiten erreicht. Die diesbezüglichen Auswirkungen auf das örtliche Windgeschehen sind bei den Windmessdaten zu bereinigen, um ein von lokalen Effekten befreites und für die Region repräsentatives Ergebnis zu erhalten. Hierzu wird die an der Station vorliegende Gelände- und Oberflächenstruktur analysiert und die zugehörigen Windmessdaten mittels geeignet abgeleiteter Korrekturfaktoren rechnerisch auf die Referenzbedingungen überführt. Die in dieser Weise korrigierten Jahreshöchstwerte werden im Weiteren einer extremwertstatistischen Analyse zugeführt. Hierbei wird aus der Stichprobe der Jahresextremwerte die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilung biasfrei geschätzt, die schließlich eine Extrapolation über den Beobachtungszeitraum hinaus auf das 50-jährige Ereignis ermöglicht. Als theoretischer Verteilungsansatz kommt, wie in der TRAS erwähnt, eine normgemäße Gumbelverteilung vom Typ I zur Anwendung. Die Schätzung der Gumbelparameter aus den jeweiligen Stichproben erfolgt mittels eines statistisch verfeinerten Verfahrens.

Abbildung I32 stellt beispielhaft die Analyseergebnisse der Station in Büsum dar. In der Darstellung ist die ermittelte theoretische Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit in doppeltlogarithmischer Form über der zugehörigen Windgeschwindigkeit aufgetragen. Ihr sind die empirischen Werte der Beobachtung gegenübergestellt. Tabelle 59 gibt die auf diese Weise ermittelten, zum 50-jährigen Ereignis korrespondierenden Geschwindigkeiten der ausgewerteten Stationen an.

Abbildung 132: Extremwertverteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten (10-Min Mittelwerte) der Windmessstation Büsum im Untersuchungsgebiet der Raffinerie



Die Abbildung rechts in Tabelle 59 greift diese Geschwindigkeiten auf, um eine anschaulichere Übersicht über das Windgeschehen am Standort Heide zu bieten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die ermittelten Geschwindigkeiten an den Wetterstationen in Windzone WZ4 höher sind als im Hinterland. Einen Ausreißer bietet die vom Standort Heide ausreichend weit entfernte, in der Elbmündung liegende Wetterstation Brunsbüttel. Besonders im Zustrom zu der Wetterstation über die starke Hauptwindrichtung aus West und Südwest hat der Wind eine sehr weite Anlaufstrecke über das glatte Gewässer der Elbe und der Nordsee. Dies bewirkt sehr hohe Windgeschwindigkeiten, welche als nicht repräsentativ für den Standort gelten. Die Ergebnisse der ermittelten Basiswindgeschwindigkeiten an den übrigen Wetterstationen im Küstengebiet liegen leicht unterhalb der Normvorgabe von 30 m/s. Richtung Hinterland nehmen die Windgeschwindigkeiten nur marginal ab. Die Auswertung der Wetterstation in Schwesing ergibt eine 50-Jahreswindgeschwindigkeit, die der Vorgabe der Norm entspricht. Nach Analyse des Windklimas und seiner Entwicklung über das großräumig betrachtete Gebiet, empfehlen wir für die Erfassung der maßgebenden Windeinwirkung für die Raffinerie Heide auf sicherer Seite liegend die normgemäßen Basiswerte von

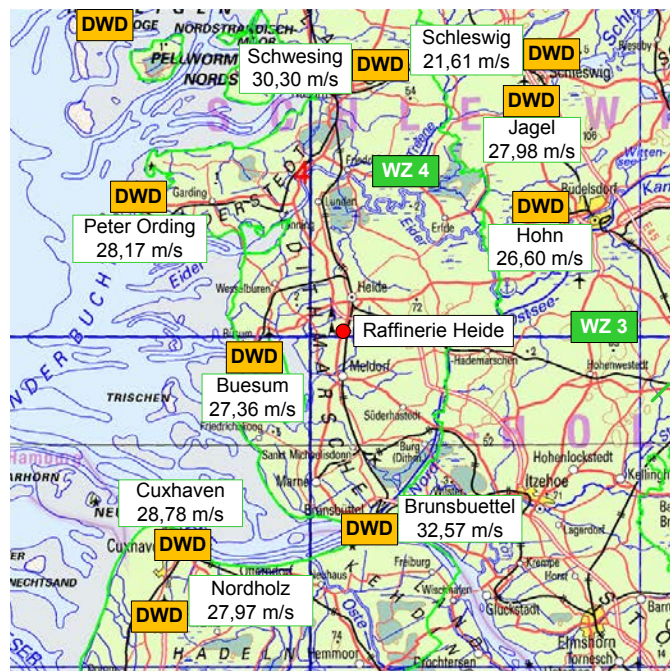
$$(120) \quad v_b = v_{b,0} = 30,0 \text{ m/s} \quad \text{mittlere Windgeschwindigkeit}$$

$$(121) \quad q_b = q_{b,0} = 0,56 \text{ kN/m}^2 \text{ mittlerer Geschwindigkeitsdruck}$$

zur Verwendung. Sie werden hier unabhängig von Windrichtung und Jahreszeit mit konstanter Höhe zur Lastermittlung herangezogen.

Tabelle 59: Ermittelte Basiswindgeschwindigkeiten an relevanten DWD-Wetterstationen

Station	$V_{b,0}$
Brunsbüttel	32,57 m/s
Büsum	27,36 m/s
Cuxhaven	28,78 m/s
Hohn	26,60 m/s
Jagel	27,98 m/s
Nordholz	27,97 m/s
Schleswig	21,61 m/s
Schwesing	30,30 m/s
St. Peter Ording	28,17 m/s



Ausgehend von dem durch die Basiswindwerte charakterisierten, regional wirksamen Windgeschehen legen die örtlichen topographischen Gegebenheiten sowie Geländerauigkeiten die speziellen Windverhältnisse am Bauwerksstandort fest. Sie bestimmen in Abhängigkeit der Windrichtung dabei sowohl die Windstärke als auch deren Verteilung über die Höhe. Ihre Wirkung auf das örtliche Windprofil ist in geeigneter Weise zu berücksichtigen. Zur Erfassung des Einflusses der Oberflächen- und Bewuchsstruktur sind zunächst die in der nahen Bauwerksumgebung vorliegenden Flächennutzungen windrichtungsscharf zu analysieren und über den Rauigkeitsparameter z_0 zu bewerten. Abbildung 133 stellt die Flächennutzungskarte für den Standort der Raffinerie Heide dar. Sie zeigt in unmittelbarer Nähe das Industriegebiet der Raffinerie. Im Nordosten sind, in braun dargestellt, Teilgebiete der Kreisstadt Heide zu erkennen. Das übrige Gebiet ist geprägt durch Flächen mit spärlicher Vegetation, Wiesen, Weiden, Gewässerläufen und nichtbewässertem Ackerland und Abbaufächen. Abbildung 134 zeigt links die sich daraus ergebenden Ergebnisse der Analyse in einer Luftbildaufnahme. Die Stadtgebiete haben mit $z_0 = 0,09$ bis $z_0 = 0,11$ m eine etwas größere Rauigkeit als das übrige, durch Wiesen und Weiden, geprägte Gebiet, welches moderate Rauigkeiten von $z_0 = 0,05$ bis $0,07$ m aufweist. Die örtlichen Windverhältnisse lassen sich richtungsspezifisch durch zwei Profile beschreiben, die in der in Abbildung 134 rechts angeordneten Grafik in Form des Böengeschwindigkeitsdrucks gegenübergestellt sind. Der Vergleich verdeutlicht, dass das Profil 2 die Verhältnisse vor Ort über alle Windrichtungen abdeckend beschreibt. Es stimmt mit dem Normprofil der Geländekategorie GKII überein. Das dargestellte Profil Binnenland wird nach DIN EN 1991-1-4, Abschnitt NA.B.3.3 ab 5 km landeinwärts der Küste als Regelfall empfohlen. Die Grafik verdeutlicht jedoch, dass bei Verwendung des Profils Binnenland die bodennahen Geschwindigkeiten zu gering ausfallen. Besonders bei schützenswerten Anlagen, wie die der Raffinerie Heide, ist in solch kritischen Gebieten unweit der Küste oder anderen Standorten mit Rauigkeitswechseln eine genauere Rauigkeitsanalyse sehr sinnvoll. Die Empfehlung der Verwendung der Geländekategorie Binnenland der Norm ist in dem vorliegenden Fall nicht auf der sicheren Seite, weswegen das Normprofil der Geländekategorie GKII dieses Standortgutachtens in diesem Fall zur Anwendung empfohlen wird.

Eine gesonderte Betrachtung der topographischen Verhältnisse am Standort kann aufgrund des äußerst flachen Lands entfallen.

Abbildung 133: Flächennutzungskarte für den Standort Raffinerie Heide

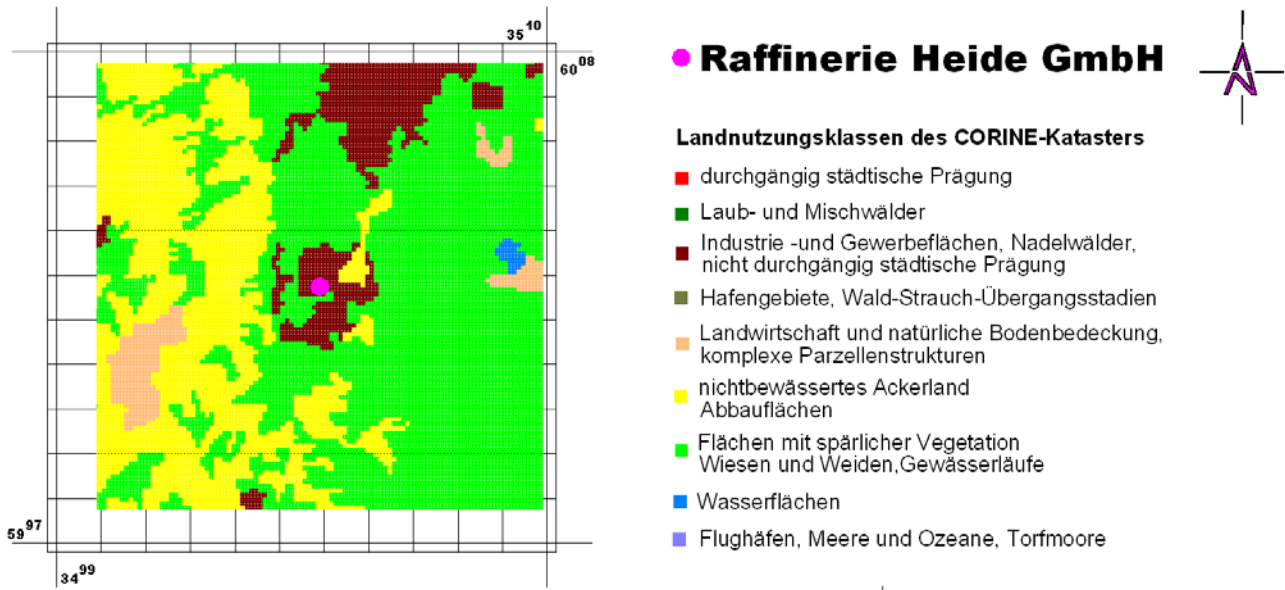
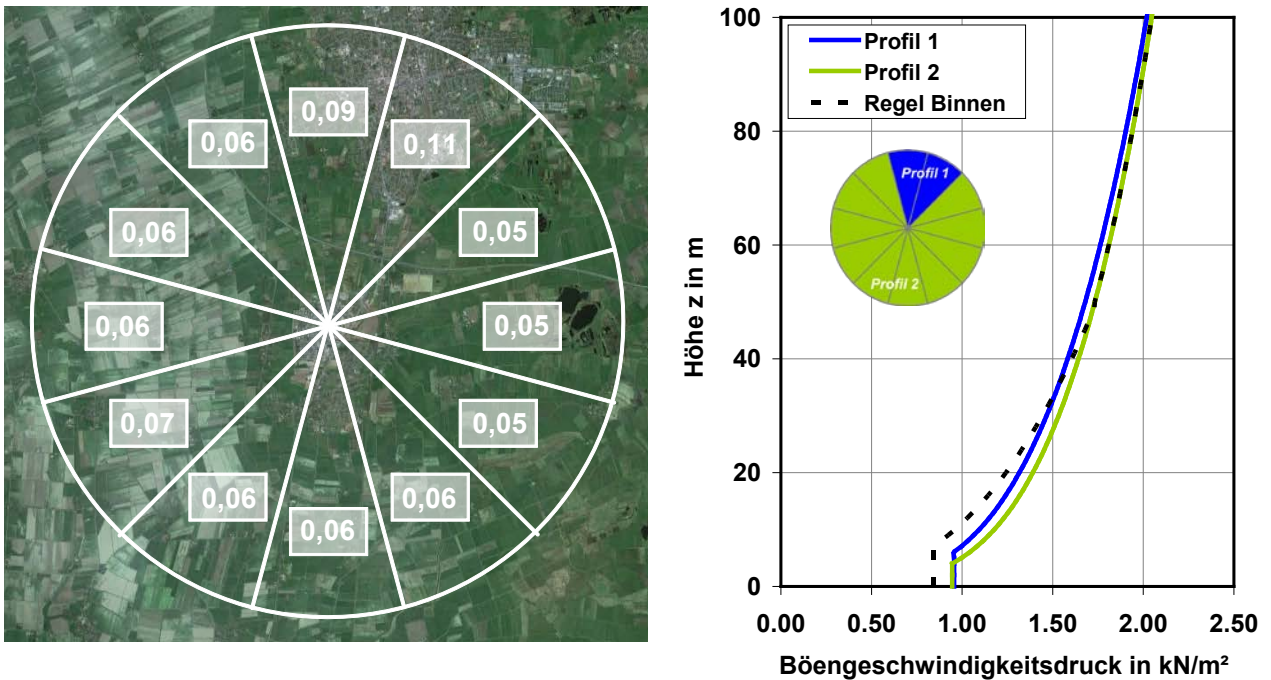
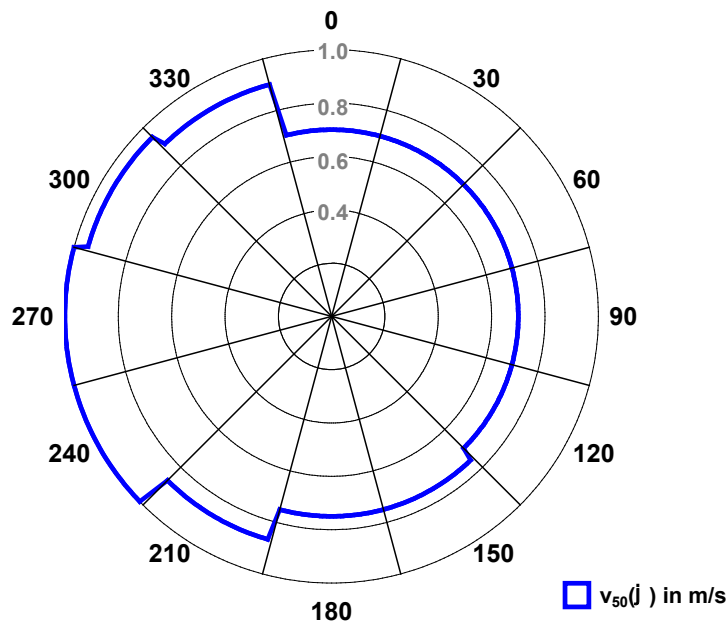


Abbildung 134: Windrichtungsscharfe Windprofile an der Raffinerie Heide



Für die Einschätzung einer Windrichtungsabhängigkeit, kann die etwa 14 km entfernte DWD-Wetterstation Büsum herangezogen werden. Abbildung 135 zeigt die aus den Wetterdaten der Station Büsum abgeleiteten Basiswindgeschwindigkeiten je Richtungssektor bezogen auf den Größtwert aller Windrichtungen. Als Hauptwindrichtungen resultieren die für das mitteleuropäische Starkwindklima typischen Windrichtungen Südwest bis West. Die Stärkewindrose berücksichtigt bereits den Umstand, dass Gewitterstürme mit beliebiger Windrichtung auftreten können. Die zugehörige Windgeschwindigkeit kann in Deutschland näherungsweise zu 70% des 50-Jahreswind abgeschätzt werden.

Abbildung 135: Stärkewindrose zu den Extremwindgeschwindigkeiten an der Raffinerie Heide



In Tabelle 60 sind abschließend alle zur Erfassung der Windeinwirkungen an der Raffinerie Heide benötigten Windprofile zusammengestellt. Sie entsprechen den normgemäßen Verteilungen zur Geländekategorie II in Verbindung mit der Windzone WZ4.

Tabelle 60: Windprofile zur Erfassung der Windwirkungen an der Raffinerie Heide

	Windwirkung	
(I22)	mittlere Windgeschwindigkeit	$v_m(z) = 30,0 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,16}$
(I23)	Böengeschwindigkeit	$v_p(z) = 43,5 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,12}$
(I24)	Böengeschwindigkeitsdruck	$q_p(z) = 1,18 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0,24}$
(I25)	Turbulenzintensität	$I_v(z) = 0,19 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{-0,16}$

7.4 Anzusetzende Windeinwirkungen für den Nachweis der Xylokolonnen nach TRAS

Die in der TRAS formulierten konkretisierten Schutzziele besagen unter 10 B), Punkt 3, dass die „Auslegung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile (SRA) und sicherheitsrelevanten Teilen eines Betriebsbereichs (SRB) und baulichen Anlagen, in denen sicherheitsrelevante Anlagen betrieben werden, gegen Böen, Windspitzen und Schwingungen entsprechend DIN EN 1991-1-4/NA mit den erhöhten Anforderungen gemäß Nr. 1.“ erfolgen soll. Die Norm deckt Windlasten mit einem 50-jährlichem Ereignis ab. Die TRAS fordert unter 10 B), Punkt 1) eine demgegenüber erhöhte Last. „Auslegung der sicherheitsrelevanten Anlagenteile (SRA) und sicherheitsrelevante Teile eines Betriebsbereichs (SRB) und Anlagen, in denen sicherheitsrelevante Anlagen betrieben werden, entsprechend der Zuverlässigkeitsklasse RC 3 nach DIN

EN 1990 und damit gegen ein 100-jährliches Ereignis.“ Diese erhöhte Anforderung wird mit dem Einwirkungsfaktor KFI für die erhöhte Zuverlässigkeitsklasse RC 3 erreicht.

Der sich so zusammensetzende Windlastansatz drückt sich wie folgt aus:

$$(126) \quad F_w(z) = K_{FI} \cdot c_s \cdot c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \text{ in kN}$$

mit:

K_{FI} 1,1 (DIN EN 1990, Tabelle B.3)

$c_s \cdot c_d$ Strukturbeiwert, hier: 0,9

c_f Kraftbeiwert

$q_p(z)$ höhenabhängiger Böengeschwindigkeitsdruck in kN/m²

A Referenzfläche in m²

Die detaillierte Standortanalyse in Abschnitt 1.3 bestätigt die nach Norm für Windzone WZ4 anzusetzende Basisgeschwindigkeit von $v_{b,0} = 30$ m/s. Die außerdem dort durchgeführte Rauigkeitsanalyse empfiehlt das Geschwindigkeitsprofil nach der normgemäßen Geländekategorie GKII zur Verwendung.

In Anlehnung an die Bestandsstatik werden die Windlasten auf die Kolonnen auf zwei Arten ermittelt; zum einen die Lastermittlung auf die Einzelkolonnen und zum anderen die Lastermittlung auf das Gesamtbauwerk. Tabelle 61 listet die verwendeten Parameter zur Ermittlung der Windeinwirkungen auf die Xylolkolonne gemäß TRAS auf.

Tabelle 61: Zusammenstellung der verwendeten Parameter zur Ermittlung der Windeinwirkungen auf die Xylolkolonne gemäß TRAS

Parameter	Wanddickennachweis	Fundamentnachweis
KFI	1,1	1,1
Strukturbeiwert $c_s \cdot c_d$	0,9	0,9
Kraftbeiwert c_f	0,68	1,06
Böendruck $q_p(z)$ in kN/m ²	GKII, WZ 4	GKII, WZ 4
Referenzfläche A_{ref} in m ²	D1 · h = 175,5 (V1) D3-5 · h = 229,5 (V3 - V5)	b · h = 682,5

7.5 Windkräfte und Biegemomente gemäß TRAS im Vergleich mit der Bestandsstatik

7.5.1 Wanddickennachweis

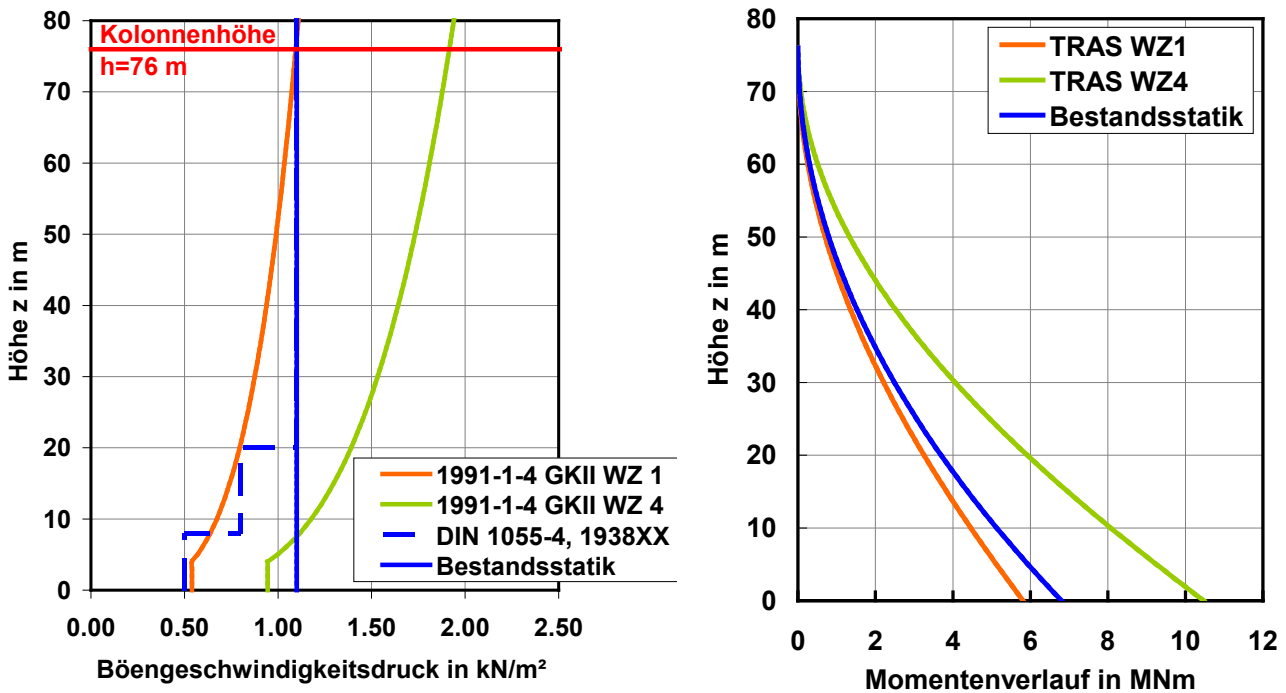
In Tabelle 62 werden die Windlastansätze und verwendeten Parameter der TRAS mit denen der Bestandsstatik des Wanddickennachweises verglichen. Für die Berechnung der Windeinwirkungen werden nahezu identische Kraftbeiwerte herangezogen. Der deutliche Unterschied in den Windlasten ergibt sich durch die Annahme bzw. Berechnung des Böendrucks. Die Bestandsstatik nimmt zwar auf, für damaligen Stand, sicherer Seite den Staudruck an Kolonnenoberkante über die gesamte Höhe an. Wie in Abbildung 136 jedoch zu erkennen ist, liegt der Böengeschwindigkeitsdruck in der Windzone WZ4 in Verbindung mit der Geländekategorie GKII deutlich über diesem Staudruck.

Tabelle 62: Vergleich der verwendeten Parameter der Windeinwirkung nach Bestandsstatik (links) und der TRAS (rechts)

Parameter	Bestand (1055-4:1938)	DIN EN 1991-1-4/NA	DIN EN 1991-1-4/NA + TRAS
Windlast in kN	$W = c_f \cdot q(76\text{ m}) \cdot A$	$F_w = K_{FI} \cdot c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$	$F_w = K_{FI} \cdot c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$
	-	WZ 4 $v_{b,0} = 30,0\text{ m/s}$ $q_{b,0} = 0,56\text{ kN/m}^2$	WZ 4 $v_{b,0} = 30,0\text{ m/s}$ $q_{b,0} = 0,56\text{ kN/m}^2$
Geschwindigkeitsdruck in kN/m^2	$q(76\text{ m}) = 1,10$	$q_p(z) = 2,1 \cdot q_b \cdot (z/10)^{0,24}$	$q_p(z) = 2,1 \cdot q_b \cdot (z/10)^{0,24}$
K_{FI}	-	-	1,1
Strukturbeiwert $c_s c_d$	-	0,9	0,9
Kraftbeiwert c_f	0,70	0,68	0,68
Referenzfläche A_{ref} in m^2	$D_1 \cdot h = 175,5\text{ (V1)}$ $D_{3-5} \cdot h = 229,5\text{ (V3-V5)}$	$D_1 \cdot h = 175,5\text{ (V1)}$ $D_{3-5} \cdot h = 229,5\text{ (V3-V5)}$	$D_1 \cdot h = 175,5\text{ (V1)}$ $D_{3-5} \cdot h = 229,5\text{ (V3-V5)}$

Die sich daraus ergebenden Momente werden in Abbildung 136 am Beispiel der Kolonnen V3-V5 über die Kolonnenhöhe dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Lastannahmen für den Wanddickennachweis nicht mehr den heutigen Standards genügen. Dies liegt vor allem an der hohen Windlastzone WZ4. Eine beispielhafte Berechnung in der Windzone WZI nach heutigen Standards ergibt ein Moment auf ähnlichem Niveau mit der Bestandsstatik.

Abbildung 136: Vergleich des Böengeschwindigkeitsdrucks (links) und der sich daraus ergebenden Momente



7.5.2 Fundament

Die Berechnung der Fundamentlasten aus Wind stellt sich demgegenüber solider dar. Die Annahme der Bestandsstatik, die Xylolkolonne als Gesamtbauwerk zu betrachten, führt zu einem Kraftbeiwert, der deutlich höher liegt als ein nach dem aktuellen Stand der Norm ermittelter Wert. Dieser erhöhte Kraftbeiwert gleicht das zuvor aufgezeigte Defizit in der Annahme des Staudrucks aus. Als Folge dessen ergeben sich Fußeinspannmomente, die für beide Herangehensweisen auf ähnlichem Niveau liegen. Die Bestandsstatik hält somit dank sehr konservativer Annahmen, für den damaligen Stand der Technik, die aktuellen Forderungen an die Windlast ein.

Tabelle 63: Vergleich der verwendeten Parameter der Windeinwirkung nach Bestandsstatik (links) und der TRAS (rechts)

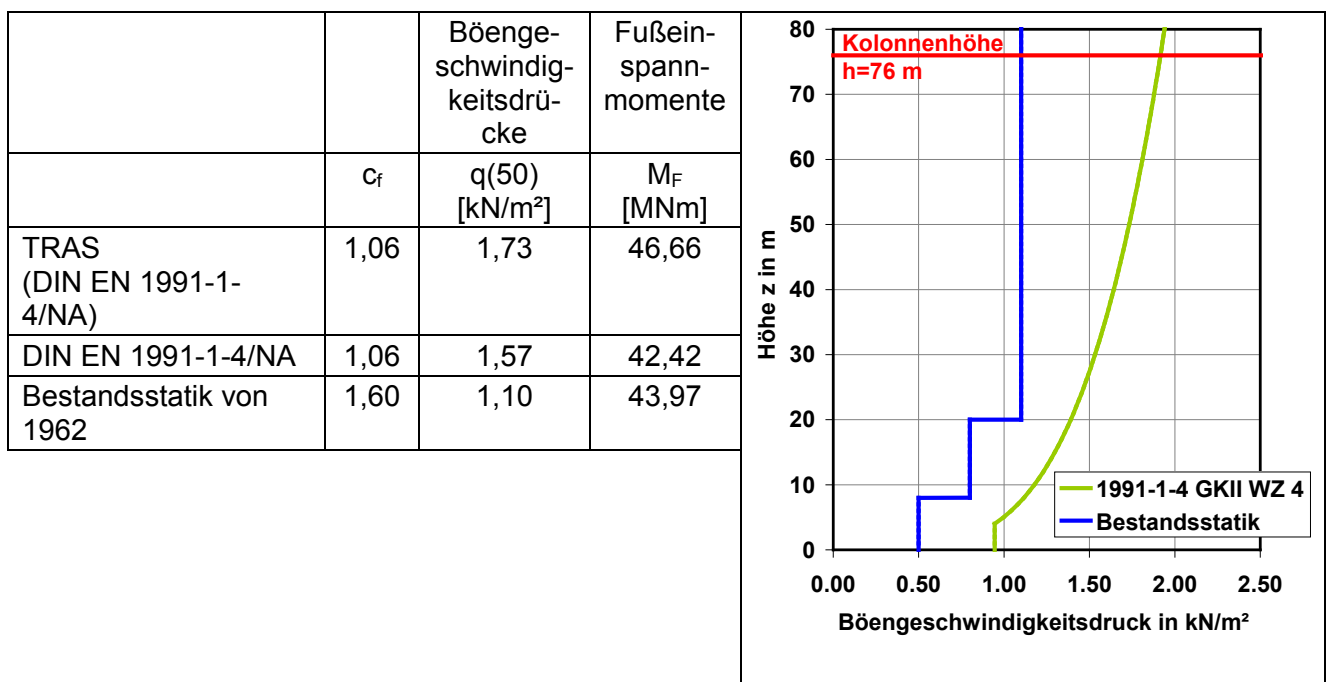
Parameter	DIN 1055-4:1938 (Bestand)	DIN EN 1991-1-4	DIN EN 1991-1-4 + TRAS
Windlast in kN	$W = c_f \cdot q(76 \text{ m}) \cdot A$	$F_w = K_{FI} \cdot C_s C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$	$F_w = K_{FI} \cdot C_s C_d \cdot C_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$
	-	WZ 4 $v_{b,0} = 30,0 \text{ m/s}$ $q_{b,0} = 0,56 \text{ kN/m}^2$	WZ 4 $v_{b,0} = 30,0 \text{ m/s}$ $q_{b,0} = 0,56 \text{ kN/m}^2$
Geschwindigkeitsdruck in kN/m^2	$q(0 - 8 \text{ m}) = 0,50$ $q(9 - 20 \text{ m}) = 0,80$ $q(21 - 76 \text{ m}) = 1,10$	$q_p(z) = 2,1 \cdot q_b \cdot (z/10)^{0,24}$	$q_p(z) = 2,1 \cdot q_b \cdot (z/10)^{0,24}$
K_{FI}	-	-	1,1
Strukturbeiwert $C_s C_d$	-	0,9	0,9
Kraftbeiwert C_f	1,60	1,06	1,06

Parameter	DIN 1055-4:1938 (Bestand)	DIN EN 1991-1-4	DIN EN 1991-1-4 + TRAS
Referenzfläche Aref in m²	b • h = 682,5	b • h = 682,5	b • h = 682,5

Tabellenunterschrift, z.B. für Quellenangabe und Anmerkungen

Abbildung 137 zeigt das Fußeinspannmoment für die Betrachtung nach DIN EN 1991-1-4 in Kombination mit der TRAS anzusetzender Windlast (Tabelle 63). Auf eine Darstellung des um den Quotienten I,I (K_F) nach DIN EN 1991-1-4 ohne TRAS verringerten Wertes für den Böengeschwindigkeitsdruck wird aufgrund der Parallelverschiebung und gleichen Form der Kurve verzichtet.

Abbildung 137: Vergleich des Böengeschwindigkeitsdrucks und die sich daraus ergebenden Fußeinspannmomente



7.5.3 Schlussfolgerung

Windlasten für den originalen Wanddickennachweis aus dem Jahr 1962, Zeitpunkt der Original-Auslegung, wurden auf dem Niveau der Windzone WZ1 berechnet und sind somit nach heute gültigen Normen für den Standort Raffinerie Heide in Windzone WZ4 deutlich zu gering. Die Windlastberechnung für das Fundament hält den aktuellen Forderungen der DIN EN 1991-1-4 und der weiteren Erhöhung durch die TRAS stand, da sehr konservative Annahmen die geringeren Werte im Geschwindigkeitsdruck ausgleichen.

Eine genauere Analyse wird in dem folgenden Abschnitt 7.6 durchgeführt.

7.6 Überschlägiger Nachweis der maßgeblichen Haupttragelemente für die nach TRAS anzusetzenden Lasten

7.6.1 Allgemeines

Die in Abschnitt 7.5 durchgeführten Betrachtungen zeigen bereits deutlich, dass die betrachtete Kolonnenkonstruktion als Ganzes nicht den durch die DIN EN 1991-1-4 und der TRAS geforderten Standard bezüglich der anzusetzenden Windlasten erfüllt, auch wenn sich die Situation für die verschiedenen Anlagenteile teilweise deutlich unterschiedlich darstellt.

Als Konsequenz wäre die Konstruktion innerhalb von 5 Jahren nach Bekanntgabe der TRAS für das in der TRAS geforderte 100-jährige Windereignis nachzuweisen. Dabei ist es jedoch zulässig die Bemessung nach den Regelwerken vorzunehmen, die zum Zeitpunkt der letzten Erteilung einer Genehmigung Gültigkeit besaßen. Falls ein Nachweis nicht möglich ist, muss spätestens zehn Jahre nach Bekanntgabe der TRAS eine Sanierung durchgeführt werden, um die Anlage an den Stand der Technik bzw. Sicherheitstechnik anzupassen. Laut Betreiberangaben ist die Anlage seit fünf Jahren aus unternehmerischen Erwägungen nicht mehr in Betrieb, und eine Wiederinbetriebnahme nicht geplant. Im Zuge dieser Beispielbetrachtung wird dennoch durch einen überschlägigen Nachweis geprüft mit welchem tendenziellen Ergebnis bei einer entsprechenden Nachrechnung der Anlage zu rechnen wäre.

Für die betrachteten Kolonnen liegt eine originale statische Berechnung aus dem Jahr 1962 vor, welche für die Auslegung der Kolonnen weiterhin ihre Gültigkeit hat, da diese im Laufe der vergangenen Jahre nicht angepasst wurden. Zur Vereinfachung wird diese statische Berechnung im weiteren Verlauf „Bestandsstatik“ bzw. „Auslegung 1962“ genannt. Da die dort geführten Nachweise gegenüber den aktuellen Regelwerken eine deutlich vereinfachte Bemessung darstellen, wird von der oben genannten Möglichkeit Gebrauch gemacht, die Konstruktion auf Grundlage der in der Bestandsstatik verwendeten technischen Regeln nachzuweisen. Dies gilt auch im Hinblick darauf, dass einige der in der Bestandsstatik angesetzten Materialgüten und -festigkeiten nicht zweifelsfrei zugeordnet und in das aktuelle Sicherheitskonzept übertragen werden können.

Die Bestandsstatik dient daher als Grundlage für den Nachweis der erhöhten Windlasten nach DIN EN 1991-1-4/NA in Kombination mit der TRAS und wird darüber hinaus als richtig und vollständig vorausgesetzt. Zusätzlich wird eine Überprüfung der Auswirkungen infolge der reinen Lastansätze der DIN EN 1991-1-4/NA durchgeführt um den Einfluss der Erhöhung nach TRAS darzustellen.

Ausführungspläne konnten für die Kolonnen nicht vorgelegt werden, daher stützt sich die Betrachtung allein auf die statische Berechnung aus dem Errichtungszeitraum. Die Identität der tatsächlich ausgeführten Konstruktion mit den Angaben der statischen Berechnung konnte demzufolge nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden. Auch sind nicht alle für einen vollständigen Nachweis erforderlichen konstruktiven Details direkt aus der statischen Berechnung ableitbar.

Neben zusätzlichen, durch eine Ortsbegehung und Betreiberangaben, gewonnenen Informationen müssen daher vielfach sinnvolle Annahmen zur Vervollständigung der Datenlage herangezogen werden. Aus einer solchen Vorgehensweise leiten sich zwangsläufig Unsicherheiten im Hinblick auf die Bemessungsergebnisse ab, sodass die folgenden Inhalte lediglich als überschlägige Nachweise bezeichnet und verstanden werden können.

Formal liegt damit der in Kapitel 10 B)d) der TRAS beschriebene Fall vor, dass ein Nachweis (zunächst) nicht geführt werden kann, da nur unzureichende Unterlagen vorgefunden werden. Gemäß TRAS wäre in einem solchen Fall dem rechnerischen Nachweis eine Überprüfung der Konstruktion durch eine besonders fachkundige Person gemäß VDI 6200 vorzuschalten. Inhalt dieser Überprüfung muss neben der Ermittlung fehlender Informationen auch eine Bewertung der Integrität der tragenden Bauteile sein.

Für die überschlägige Nachrechnung wird die Konstruktion in Übereinstimmung mit der Bestandsstatik in drei Haupttraglieder und sechs Einzelnachweisen unterteilt:

Haupttragglied I: Behälterwand aus Stahl

Nachweis 1 der Wand für Tangentialzug aus Innendruck

Nachweis 2 der Wand für Längskraft aus ständigen Lasten, Wind und Innendruck

Haupttragglied II: Fußpunktanschluss der Behälterwand an die Stahlbetongründung

Nachweis 3 der gewählten Schrauben auf Zug

Nachweis 4 der Zugverankerung in der Gründung

Haupttragglied III: Gründung als pfahlgestützte Bodenplatte aus Stahlbeton

Nachweis 5 der Stahlbetonpfähle

Nachweis 6 der Stahlbetonbodenplatte

Aufgrund des geringeren Durchmessers von Kolonne VI gegenüber V3-V5 werden die Nachweise für die Behälterwände einmal unter Berücksichtigung der Geometrie von Kolonne VI und einmal unter Berücksichtigung der Geometrie der Kolonnen V3-V5 geführt. Zudem wird für die Nachweisführung angenommen, dass sich die Bauteile nicht in einem schadhafte Zustand befinden und demzufolge ihre volle Tragfähigkeit angesetzt werden kann.

Zu Vergleichszwecken wird die Konstruktion nicht nur für die gemäß TRAS erhöhten anzusetzenden Windlasten nachgewiesen, sondern auch für die aktuell gemäß DIN EN 1991-1-4/NA zu berücksichtigenden Lasten, ohne die aus der TRAS resultierende Lasterhöhung für ein 100-jähriges Windereignis.

7.6.2 Behälterwand

Der Nachweis der Behälterwand für Tangentialzug aus Innendruck erfolgt in der Bestandsstatik unter Verwendung der Kesselformel (vgl. Abbildung 138). Die gewählte Wanddicke sowie die zulässige Spannung können der Bestandsstatik entnommen werden. Die Ausnutzung der Tragfähigkeit für diesen Belastungszustand beträgt dabei lediglich etwa 20 % für Kolonne VI und 30 % für die Kolonnen V3-V5. Da die resultierende Zugkraft ausschließlich vom Betriebsdruck abhängig und damit unbeeinflusst von der Windlast ist, ergeben sich durch die Regelungen der TRAS keine Änderungen.

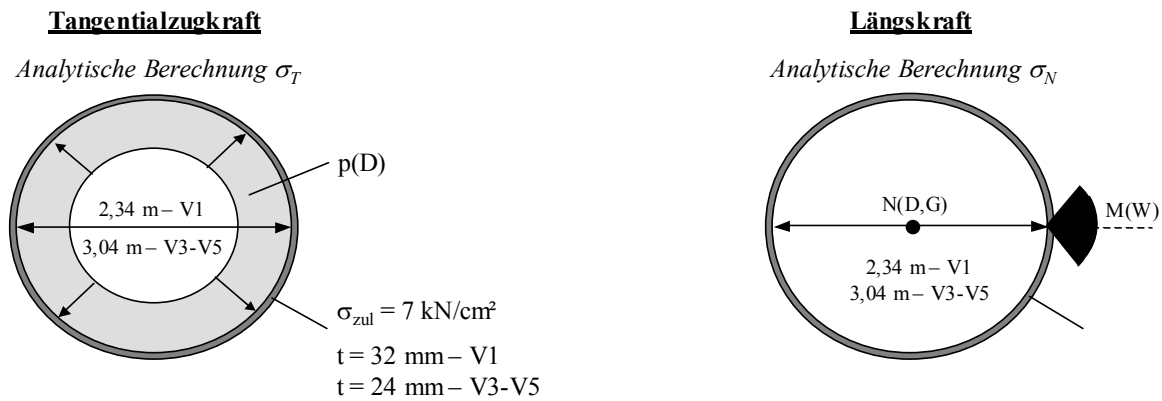
Maßgebend für die Wahl der erforderlichen Wanddicken ist gemäß der Bestandsstatik die maximale Längskraft aus ständigen Lasten (G - Betriebslasten inkl. Füllung), Wind (W) und Innendruck (D). Schneelasten werden nicht angesetzt. Dies lässt sich einerseits mit deren geringer Größe im Vergleich zu den ständigen Lasten sowie der Tatsache erklären, dass die hohe Betriebstemperatur der Kolonnen Schneeanlagerungen verhindert.

Die Spannungsermittlung erfolgt linear-elastisch unter Ansatz der Bernoulli-Hypothese. Die aus dem Wind resultierende Momentenbeanspruchung führt im Querschnitt entsprechend zu einer linearen Spannungsverteilung mit identischen Zug- und Druckspannungswerten an den Querschnittsrändern. Ständige Lasten und Innendruck führen zu einer über den Umfang konstanten Druck- respektive Zugspannung (Abbildung 138). Die aus der Windbeanspruchung bestimmte Randspannung weist dabei betragsmäßig etwa die dreifache Größe der Spannungen aus ständigen Lasten und Betriebsdruck auf, womit die Windlast die maßgebende Beanspruchung für den Wandnachweis darstellt.

Es werden zwei Lastfälle untersucht welche die maximale Druckkraft ($G + W$) bzw. die maximale Zugkraft ($G + W + D$) liefern. Der Nachweis wird dabei nur für die maximale Beanspruchung am Kolonnenfuß geführt; eine mögliche Abstufung der erforderlichen Wanddicken über die Kolonnenhöhe wird nicht untersucht.

In der Bestandsstatik beträgt die maximale Spannungsausnutzung für alle Kolonnen etwa 75 %, wobei für Kolonne VI eine Wanddicke von 32 mm und für die Kolonnen V3-5 eine Wanddicke von 24 mm gewählt wird.

Abbildung 138: Statische Systeme für den Nachweis der Behälterwand



Bei Anwendung der DIN EN 1991-1-4/NA und TRAS bleiben die Beanspruchungen aus ständigen Lasten und Betriebsdruck unverändert. Das für die Bemessung maßgebende Windmoment erhöht sich jedoch erheblich um etwa 50 % (vgl. Abschnitt 7.5, besonders Abbildung 136). Das für den Nachweis herangezogene Windmoment ist dabei - sowohl für die Bestandslasten als auch für die neuen Lastansätze - noch etwa 15 % größer als das in Abbildung 136 ausgewiesene. Dies ist darin begründet, dass in Abbildung 136 lediglich die (maßgebende) Windlast auf die zylindrischen Kolonnen zusammengestellt ist. In der Bestandsstatik ist zusätzlich noch ein Windlastanteil berücksichtigt, welcher sich durch Anströmung der außenliegenden Treppen, Bühnen und Rohrleitungen ergibt.

Aufgrund der Dominanz der Windlast in Verbindung mit der linear-elastischen Nachweisführung entspricht die Erhöhung der maßgeblichen Nachweisspannung fast der Erhöhung der Windlast (vgl. Tabelle 64). Aufgrund der vorhandenen Reserven im Wanddickennachweis ist die rechnerische Tragfähigkeit unter den Lasten gemäß DIN EN 1991-1-4/NA und TRAS aber nur zu etwa 10 % überschritten. Für die zu Vergleichszwecken ebenfalls nachgewiesene Windlast gemäß DIN EN 1991-1-4/NA, ohne den Lasterhöhungsfaktor $K_{F1} = 1,1$ aus der TRAS ist die Überschreitung sogar vertretbar klein.

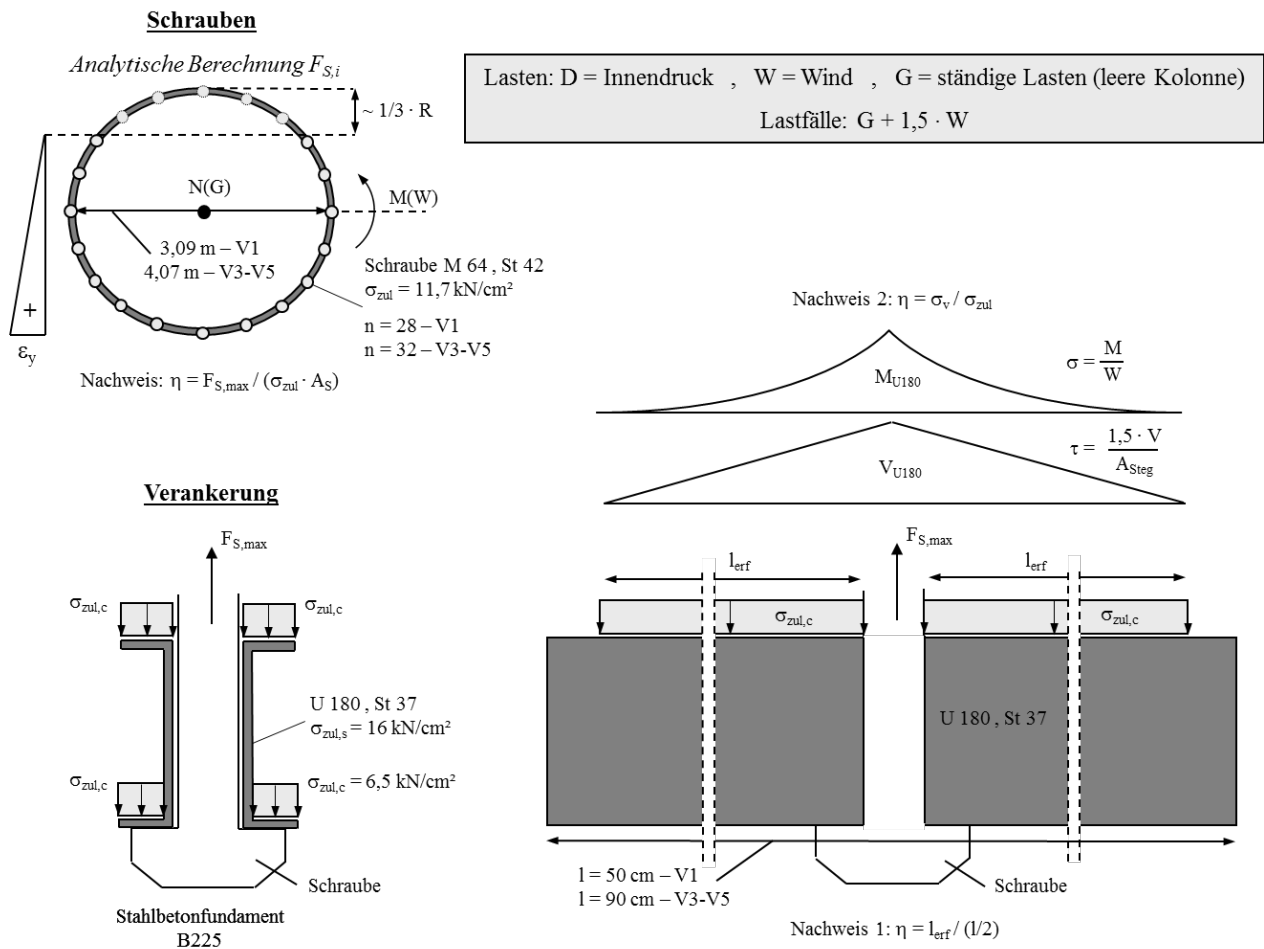
Während die Behälterwand für die in der Bestandsstatik gewählte Nachweisführung gerade noch die Anforderungen der DIN EN 1991-1-4/NA bezüglich der anzusetzenden Windlasten erfüllen würde, führt der zusätzliche Ansatz einer Windlasterhöhung gemäß TRAS zu einer Überschreitung der rechnerischen Tragfähigkeit. Aufgrund der moderaten Größe der Überschreitung wäre im Falle einer Wiederaufnahme des Betriebs eine genauere Berechnung (z.B. eine räumliche Finite-Elemente-Berechnung ggf. unter Ansatz plastischer Reserven) nach aktuellen Regelwerken sinnvoll, um den Standsicherheitsnachweis der Wand ggf. noch nachträglich führen zu können.

Zusammenfassend muss die Behälterwand zunächst als kritisch eingestuft werden.

7.6.3 Fußpunktanschluss

Der zugfeste Anschluss der Kolonne an die Stahlbetongründung erfolgt mittels umlaufender, gleichmäßig über den Umfang verteilter Schrauben. Der Durchmesser des Schraubenkreises ist, durch eine Aufweitung der Kolonne im Bereich des Fußpunkts, größer als der Kolonnendurchmesser im Normalbereich. Im Fundament werden oberseitig der Schraubenhammerköpfe Stahl-U-Profile als Anker Elemente angeordnet und einbetoniert (Abbildung 139).

Abbildung 139: Statische Systeme für den Nachweis der Fußpunktverankerung



Der rechnerische Nachweis des Fußpunktes erfolgt in der Bestandsstatik lediglich für die Schrauben unter Zugbeanspruchung. Ein Nachweis für die einbetonierte Verankerung liegt nicht vor. Es wird daher angenommen, dass diese lediglich konstruktiv gewählt wurde.

Der Nachweis der Schrauben wird formal als Nachweis der Lagesicherheit geführt. Als maßgebende Beanspruchung wird daher die Differenz aus dem 1,5-fachen Wert des destabilisierenden Windmoments und dem 1,0-fachen Wert des stabilisierenden Moments aus ständigen Lasten angesetzt. Für den ständigen Momentenanteil wird dabei lediglich das Kolonneneigengewicht angesetzt. So beträgt die Größe des stabilisierenden Moments nur etwa ein Siebtel des destabilisierenden Moments. Die Lage der Spannungsnulllinie im Querschnitt vereinfacht bei etwa einem Drittel des Kolonnenradius, von der Außenkante aus gemessen, angenommen. Die Bestimmung der Schraubenkräfte $F_{S,i}$ erfolgt dann, unter Annahme einer linearen Zugdehnungsverteilung, in Abhängigkeit des Schraubenabstands zur Spannungsnulllinie (Abbildung 139). Die zulässige Spannung der laut Statik in St 42 ausgeführten Schrauben ist in den Bestandsunterlagen nicht explizit angegeben. Auch durch eine Literaturrecherche konnte sie nicht zweifelsfrei bestimmt werden. Für die Nachrechnung wurde die zulässige Spannung daher vereinfacht aus den in der Fachliteratur dokumentierten Werten für Schrauben aus den Werkstoffen St 37 und St 52 interpoliert.

Auf diese Weise ergibt sich unter Bestandslasten für die gewählten Schrauben von Kolonne VI eine Ausnutzung von etwa 90%. Für die Kolonnen V3-V5 ergibt sich unter der Belastung nach DIN 1055-4 1938, welche der Auslegung im Jahr 1962 zugrunde lag, eine Überschreitung von etwa 15%. Diese hier ermittelte Überschreitung ist ggf. auf die nicht zu erkennenden, in der Originalauslegung angesetzten, zulässigen Spannungen der Schrauben zurückzuführen. Es wird vermutet, dass bereits in der Originalauslegung der Nachweis formal mit der Schraubenanzahl von 28 nicht erfüllt wer-

den konnte. Dieser Umstand wurde seinerzeit „konstruktiv“ dadurch ausgeglichen, dass anstelle der im Nachweis angesetzten 28 Schrauben vier weitere Schrauben, also 32 Stück zur Ausführungen kamen. Diese Wahl wurde allerdings nicht erneut nachgewiesen. Dieses kann man als ein Defizit in der damaligen statischen Berechnung bezeichnen. Es ist dennoch zu vermuten, dass die Standsicherheit seinerzeit dadurch gegeben war.

Aufgrund der Dominanz des destabilisierenden Moments führt die Erhöhung der Windlast durch die TRAS zu einer Erhöhung der Schraubkraft von praktisch gleicher Größe. Die Schraubentragfähigkeit ist daher erheblich überschritten; um etwa 40 % bei Kolonne VI und sogar um etwa 75 % bei den Kolonnen V3-V5. Selbst bei Vernachlässigung des Erhöhungsfaktors $K_{FI} = 1,1$ liefern die, damit zur DIN EN 1991-1-4/NA konformen, Lasten mit 25 bzw. 60 % eine signifikante Überschreitung der rechnerischen Tragfähigkeit.

Während die konstruktiv gewählte Verankerung für die Bestandslasten ggf. noch ohne weiteren Nachweis als hinreichend angenommen werden könnte, ist dies für die deutlich erhöhten Lasten nach DIN EN 1991-1-4/NA und TRAS nicht mehr zielführend. Für einen überschlägigen Nachweis wird daher das in Abbildung 139 dargestellte, einfache statische System angenommen. Der Nachweis erfolgt zweiteilig, für die zulässigen Betonpressungen an den Ankerprofilen und für die zulässigen Spannungen der Ankerprofile selbst. Der Nachweis der Ankerprofile erfolgt elastisch-elastisch ohne die Berücksichtigung plastischer Reserven auf Querschnitts- oder Systemebene. Ein Versagen durch einen kegelförmigen Betonausbruch wird aufgrund der großen Einbindetiefe von etwa 1 m und der in der tragenden Stahlbetonplatte vorhandenen Bewehrung als nicht maßgebend angenommen.

Auf diese Weise ergibt sich für die Bestandslasten eine Ausnutzung von nur etwa 60 % für Kolonne VI und nur etwa 75 % für die Kolonnen V3-V5, was für die Annahme einer konservativ gewählten Konstruktion spricht. Für die erhöhten Lasten gemäß DIN EN 1991-1-4/NA und TRAS ist die Verankerung für Kolonne VI mit einer Ausnutzung von 90% ebenfalls noch nachweisbar, für die Kolonnen V3-V5 dagegen ergibt sich eine rechnerische Überschreitung der Tragfähigkeit des Stahlprofils, unter Annahme eines St 37, von etwa 20%. Aufgrund der einfachen Nachweisführung sind ggf. noch rechnerische Reserven vorhanden. Da jedoch bereits für die Schrauben der Tragfähigkeitsnachweis deutlich misslingt und sich die angenommene Profilstärke aus den vorliegenden Bestandsunterlagen nicht verifizieren lässt, wird im Rahmen dieses Beispiels auf weitere Nachweise verzichtet.

Konkludierend ist die Fußpunktverankerung, speziell im Hinblick auf die Schraubentragfähigkeit, als äußerst kritisch einzustufen. Aufgrund der Größe der Traglastüberschreitung erscheint auch eine ggf. genauere Nachrechnung nach aktuell gültigen Regelwerken als wenig erfolgversprechend und eine, bei Wiederinbetriebnahme der Anlage gemäß TRAS, erforderliche Sanierung entsprechend als wahrscheinlich.

7.6.4 Gründung

Die Gründung ist in der Bestandsstatik als pfahlgestützte Bodenplatte aus Stahlbeton beschrieben und nachgewiesen. Da zum Zeitpunkt der damaligen Nachweisführung die Statik der Kolonnen noch nicht vorlag, wurden sowohl für den Nachweis der Platte als auch für den Nachweis der Pfähle sehr konservative Lastannahmen getroffen. Wie in Abschnitt 7.5 dargelegt, entspricht daher das für den Nachweis angesetzte Windmoment annähernd dem nach DIN EN 1991-1-4/NA und TRAS geforderten Niveau. Der geringfügige Unterschied von etwa 5 % kann ohne weiteren Nachweis durch in der Konstruktion vorhandene Traglastreserven, wie z.B. Nacherhärtung des Betons und Differenz zwischen gewählter und erforderlicher Bewehrung als abgedeckt angesehen werden.

Die Gründung ist daher als unkritisch zu betrachten.

7.6.5 Zusammenfassung

Das Ergebnis der überschlägigen Nachrechnung, stellt sich für die einzelnen Bauteile der Kolonne deutlich unterschiedlich dar (Tabelle 64):

Tabelle 64: Ergebnis der Bauteilnachrechnung und Beurteilung der einzelnen Bauteile

Ausnutzung der Tragfähigkeit für	Auslegung im Jahr 1962	Lasten gemäß DIN EN 1991-1-4/NA	Lasten gemäß DIN EN 1991-1-4/NA + TRAS	Beurteilung
Kolonne V1				
Behälterwand Tangentialzug	~ 20%	~ 20%	~ 20%	unkritisch
Behälterwand Längskraft	~ 75%	~ 100%	~ 110%	kritisch
Fußpunkt Schrauben	~ 90%	~ 125%	~ 140%	äußerst kritisch
Fußpunkt Verankerung	~ 60%	~ 85%+	~ 95%	kritisch*
Gründung	≤ 100%	≤ 100%	≤ 100%	unkritisch
Kolonnen V3-V5				
Behälterwand Tangentialzug	~ 30%	~ 30%	~ 30%	unkritisch
Behälterwand Längskraft	~ 75%	~ 100%	~ 110%	kritisch
Fußpunkt Schrauben	~ 115%	~ 160%	~ 175%	äußerst kritisch
Fußpunkt Verankerung	~ 75%	~ 110%+	~ 120%	kritisch
Gründung	≤ 100%	≤ 100%	≤ 100%	unkritisch

*aufgrund der unsicheren Annahmen in den Nachweisen als kritisch einzustufen

In Tabelle 64 ist die Fußpunkt Verankerung der Kolonne VI mit kritisch eingestuft obwohl der maximale Wert mit 95% unterhalb der maßgebenden 100% liegt. Dieses hat seinen Grund in der mit Unsicherheiten behafteten Nachrechnung aufgrund von fehlenden Informationen zur Originalkonstruktion.

Für den Behälter führt der Ansatz der erhöhten Windlasten gemäß DIN EN 1991-1-4/NA und TRAS zu einem etwa 50% größeren Biegemoment und, aufgrund dessen Dominanz gegenüber den weiteren Lasten, zu einer Erhöhung der maßgebenden Beanspruchungen in fast derselben Größe. Aufgrund vorhandener Reserven führt der Nachweis der Behälterwand dennoch nur zu einer moderaten Überschreitung der rechnerischen Tragfähigkeit. Im Falle einer Wiederinbetriebnahme der Anlage besteht hier gegebenenfalls die Möglichkeit die Tragfähigkeit der Behälterwand durch genauere Nachweise (z.B. räumliche Finite-Elemente-Berechnung) und durch Ausnutzung plastischer Reserven noch nachzuweisen und ggf. auf bauliche Maßnahmen zu verzichten. Zudem ist offensichtlich keine Abstufung der Behälterwanddicke über die Höhe vorgenommen worden, sodass sich erforderliche Verstärkungsmaßnahmen möglicherweise auf die unteren Kolonnenbereiche beschränken könnten. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Behälterwand keine nennenswerten Schädigungen aufweist.

Die über einbetonierte Schrauben realisierte Verankerung weist dagegen keine nennenswerten Tragreserven auf. Folglich führt der Ansatz der erhöhten Lasten nach DIN EN 1991-1-4/NA und TRAS zu einer signifikanten Überschreitung der Tragfähigkeit die bei Wiederinbetriebnahme der Anlage eine Verstärkung oder einen Ersatz der Verankerungskonstruktion erforderlich macht.

Die Gründung schließlich genügt, aufgrund eines konservativ gewählten Ansatzes der Windlasten in der Bestandsstatik, dem in der DIN EN 1991-1-4/NA und TRAS geforderten Lastniveau, sodass hier bei Wiederinbetriebnahme der Anlage vermutlich kein Handlungsbedarf besteht.

Die ebenfalls durchgeführte Vergleichsrechnung mit den Lasten gemäß DIN EN 1991-1-4/NA liefert grundsätzlich ähnliche Ergebnisse wie die Berechnung mit zusätzlicher Erhöhung der TRAS. Wie in Abschnitt 1.6 bereits dargelegt, sind die Beanspruchungserhöhungen gegenüber der Bestandsstatik weniger auf die in der TRAS geforderte Berücksichtigung eines 100-jährigen Windereignisses zurückzuführen. Vielmehr ergeben sich die Lasterhöhungen im Wesentlichen

aus der aktuell gültigen Einstufung in die hohe Windzone 4, wodurch der resultierende Böengeschwindigkeitsdruck signifikant über den in der Bestandsstatik angesetzten Werten liegt.

Es ist zu beachten, dass bei einer Neuerrichtung der Anlage eine Erhöhung der Lasten infolge der zusätzlichen Regelung der TRAS lediglich 10% höhere Lasten in den führenden Nachweisen zur Folge hätte. Dieses ist zumeist durch die Reserven infolge der Wahl der Konstruktion im Vergleich zum rechnerischen Nachweis abgedeckt.

7.7 Nachbesserungsbedarf

In den vorangegangenen Abschnitten wurde unter der aktuellen Windlast (gemäß DIN EN 1991-1-4) und der zusätzlichen Erhöhung nach TRAS ein Vergleich der Lasten und auch die Konsequenzen für die jeweiligen Bauteilgruppen der Kolonnenkonstruktion durchgeführt. Hierbei wurden die Resultate wie folgt differenziert ausgewiesen: infolge der Erhöhung durch Aktualisierung der Normung und infolge zusätzlicher Erhöhung durch die TRAS.

Die Analyse des hier betrachteten Anlagenteils zeigte in drei Bereichen Defizite. Diese sollten bei Wiederinbetriebnahme der Anlage, welche allerdings laut Betreiber nicht geplant ist, durch Nachbesserungen behoben werden.

Für alle vier Einzelkolonnen zeigen die Ergebnisse, dass die Anlagenteile Fußpunktverschraubung, Verankerung in der Bodenplatte und Wandstärke im unteren Kolonnenabschnitt Defizite aufweisen.

Es bleibt folgendes festzuhalten:

Während die Wandstärkedefizite und die Defizite im Nachweis der Verankerung in der Bodenplatte bei der reinen Betrachtung der Lasten gemäß DIN 1991-1-4/NA nur sehr gering sind und ggf. durch genauere Nachweise als akzeptabel ohne Nachbesserung bewertet werden können, sind die Defizite bei dem Nachweis der Verschraubung bereits ohne die zusätzliche Erhöhung gemäß TRAS signifikant vorhanden und bedürfen einer Nachbesserung.

Bei zusätzlichem Ansatz der Erhöhung gemäß TRAS steigen auch die Defizite in der Wandstärkenberechnung und in der Verankerung an, so dass diese voraussichtlich nur mit erhöhtem Aufwand nachweisbar werden. Eventuell gelingt hier der Nachweis auch nicht mehr, so dass zusätzlich eine Verstärkung der beiden Bauteile erfolgen müsste.

Aufgrund der in der Ursprungsauslegung groben Lastannahme für die Fundamentierung waren ausreichend Reserven im System enthalten, so dass der Fundamentkörper als ausreichend dimensioniert angesehen werden kann.

Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf ähnliche Anlagen kann nur bedingt erfolgen. Die Resultate sind neben den Standortfaktoren und der tatsächlichen Steigerung der Windlasten gegenüber der Ursprungsauslegung auch stark von der bereits vorhandenen Ausnutzung der Anlagen abhängig. Grundsätzlich lässt sich aber feststellen, dass tendenziell die Verankerung der Kolonnen bei einer Überprüfung von Altanlagen hinsichtlich der aktualisierten Baunormen und der TRAS Probleme verursachen werden. Eventuell wird es bei anderen Anlagen auch Probleme mit dem Nachweis der Fundamentierung geben, wenn die Ursprungsberechnung nicht entsprechend hohe Reserven vorhält.

Grundsätzlich sind Anlagen des hier untersuchten Typs kritisch zu untersuchen. Besonders vergleichbare Anlagen mit einem Baujahr vor dem Jahr 2005 und einem exponierten Standort hinsichtlich der Windlasten könnten in einer Überprüfung einen ähnlichen Nachbesserungsbedarf haben. Anlagen, welche bereits nach der Windlastnorm DIN 1055-4 aus dem Jahr 2005 ausgelegt wurden, werden bei einer Überprüfung voraussichtlich nur vereinzelt Probleme an den ausgewiesenen Punkten erhalten.

Die zusätzliche Erhöhung der Windlasten gemäß TRAS von 10% gegenüber den Lasten nach DIN EN 1991-1-4/NA hat nur noch einen geringen steigernden Einfluss. Dieser kann mitunter durch Tragreserven, welche durch den Unterschied der tatsächlichen Konstruktion mit den berechneten Mindestwerten entstehen können, kompensiert werden.

7.8 Nachbesserungsaufwand

Der im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Nachbesserungsbedarf bei der hier untersuchten Anlage beschränkt sich auf die Bereiche Wandstärke im unteren Bereich, Fußpunktverschraubung und Fußpunktverankerung im Fundamentkörper.

Der Aufwand hierzu lässt sich nur bedingt abschätzen. Sollte sich durch eine genauere Nachweisführung herausstellen, dass sowohl die Wandstärke als auch die Verankerung im Fundament nicht ausreichend bemessen sind, so sind die folgenden Maßnahmen denkbar:

Wandstärke im unteren Bereich:

Die Wandstärke kann im Nachhinein an den geschlossenen Kolonnen nicht verändert werden. Ein Austausch der Kolonnen wäre aufgrund der nur geringfügigen Überschreitung nicht gerechtfertigt. Eine Verstärkung des betroffenen Bereichs mittels außenliegenden Steifen, welche auch direkt Einfluss auf die Wandstärkenauslegung hätten, wäre hier eine aus unserer Sicht vernünftige und machbare Nachbesserungsmaßnahme.

Verschraubung des Fußpunktes:

Die Verschraubung kann aufgrund der Tatsache das die Schrauben im Fundament einbetoniert wurden nicht ausgetauscht und durch höherwertige Stahlgüten ersetzt werden. Als Nachbesserungsmaßnahme kann ein zusätzlicher nach außen geführter Verankerungskranz mit Schrauben bzw. Dübeln zur Anwendung kommen. Dieser könnte auch mit der Steifenkonstruktion der Verbesserung des Wandstärkedefizits kombiniert werden.

Verankerung im Fundamentkörper:

Die Nachbesserung der Verschraubung durch einen zusätzlichen Verankerungskranz hat direkt zur Folge, dass die derzeit vorhandene Verankerung im Fundament entlastet wird und somit höchstwahrscheinlich der Nachweis weiterhin gelingt. Hier ist bei Umsetzung der Nachbesserung bei den Verschraubungen höchstwahrscheinlich kein weiterer Nachbesserungsbedarf vorhanden.

Eine monetäre Einschätzung dieser Maßnahme kann derzeit nicht erfolgen. Der Aufwand kann aber im Gegensatz zu einem kompletten Neubau der Anlage als sehr gering eingestuft werden.

Für Neuanlagen bedeutet die Erhöhung der Windlast nach TRAS nur eine geringfügige Steigerung der aufzunehmenden und abzutragenden Lasten, welche ohne weiteres mit den herkömmlichen Konstruktionsprinzipien erzielt werden kann. Der zusätzliche Aufwand kann daher bei dem hier untersuchten Anlagentyp als minimal eingestuft werden.

7.9 Gefahrenquelle windbedingte Projektile

7.9.1 Umgebung der Destillationskolonne

Für die Untersuchungen der Gefährdung von Anlagenteilen durch z.B. Metallteile, die sich durch Starkwinde von der Destillationskolonne lösen können, wurde zu Beginn der Untersuchungen die nähere Umgebung betrachtet, in die ein Projektil nieder gehen könnte.

Die Destillationsanlage befindet sich inmitten der Produktionsanlagen verschiedener Produktionsanlagen (Abbildung I40 bis Abbildung I43). Abbildung I42 zeigt einen Ausschnitt einer Kolonne der Aromatenextraktion, an der außen ein Temperaturfühler erkennbar ist. Damit wird deutlich, dass derartige Anlagenteile potenziell von windgetragenen Projektilen gefährdet werden können. Zwischen diesen Anlagenteilen befinden sich zahlreiche Rohrbrücken.

Abbildung 140: Aromatenextraktion



Abbildung 141: Aromatentanklager unterhalb der Destillationskolonne



Abbildung 142: Temperaturmessung an der benachbarten Extraktionskolonne

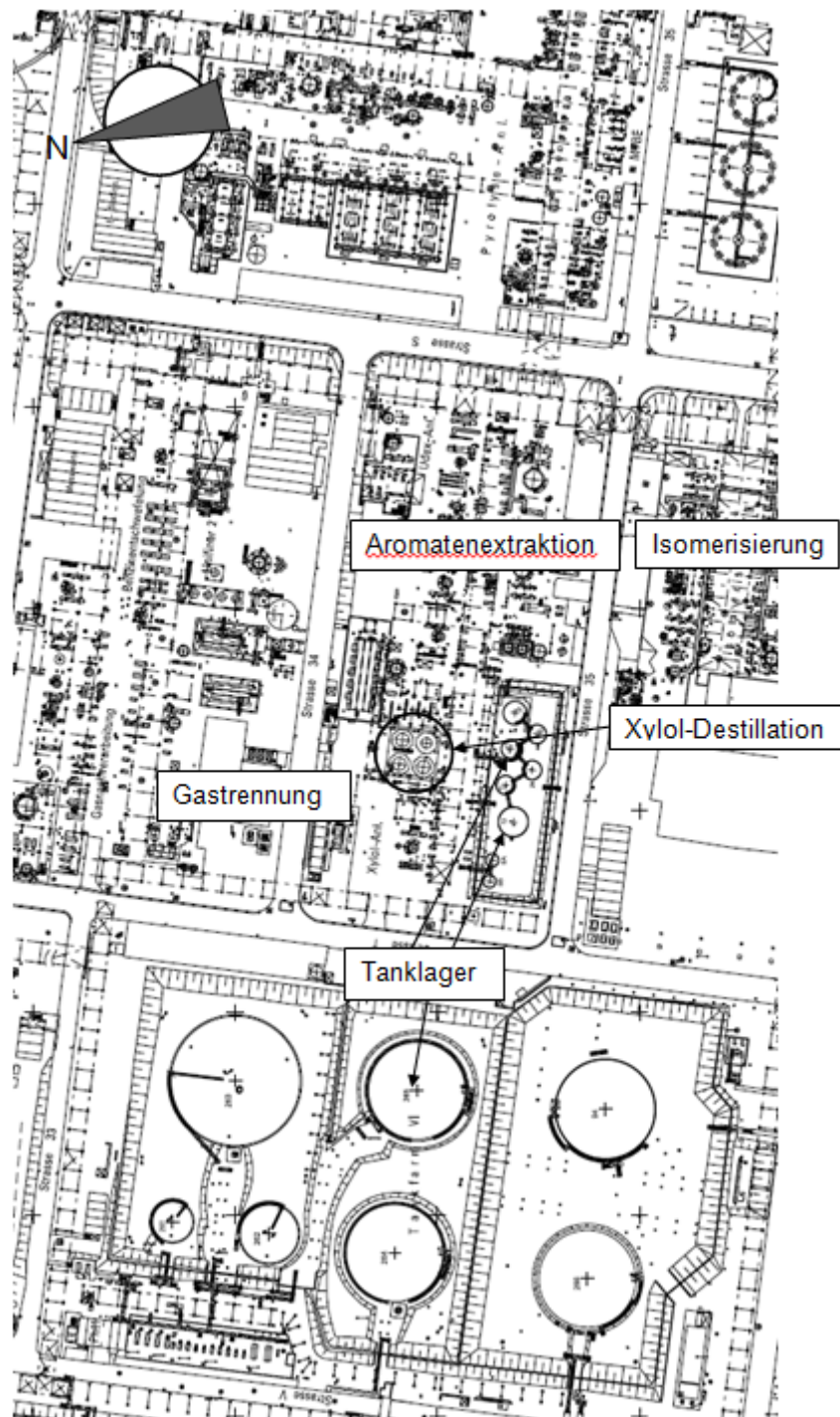


Abbildung 143: Gastrennung (Vordergrund) mit Platformer (Hintergrund) g



Einen Ausschnitt aus dem Lageplan zeigt die Abbildung I44. Alle Anlagen unterliegen den erweiterten Pflichten der Störfallverordnung.

Abbildung 144: Ausschnitt aus dem Lageplan



7.9.2 Prüfung der Sicherung von Anlagenteilen durch Ortsbegehung

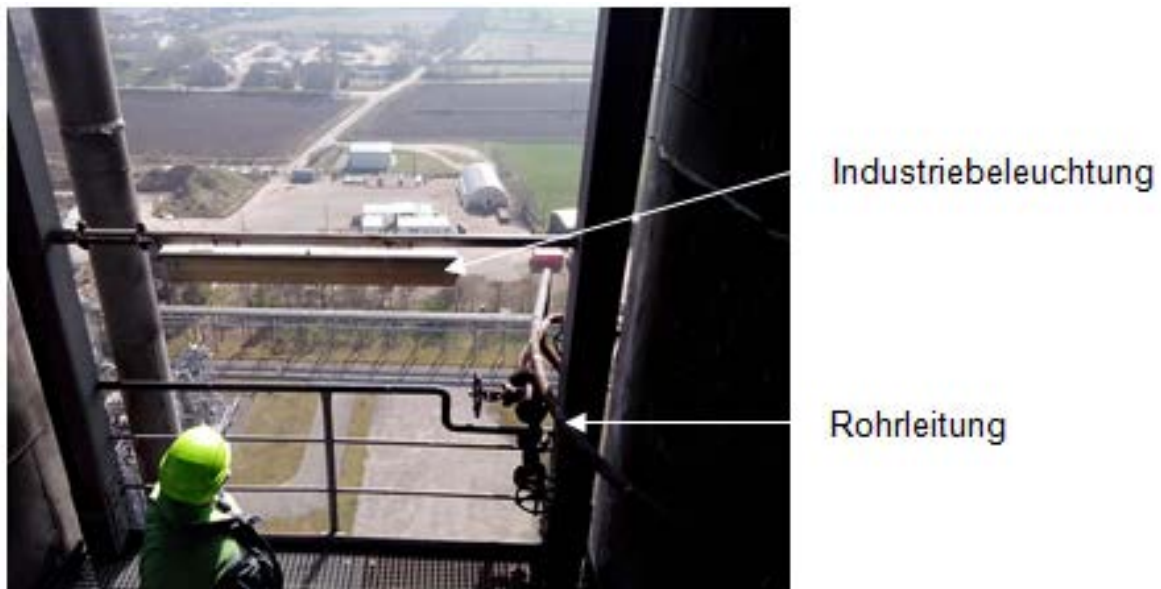
Die Ortsbegehung ergab, dass alle Anlagenteile verschraubt oder verschweißt sind. Hierzu zählen der Treppenaufgang sowie die zahlreichen Gitterroste, die z. T. mehrfach gesichert sind. Allerdings kann das Lösen von Anlagenteilen, wie in der Abbildung 145 zu sehen ist, nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Korrosion oder Materialermüdung durch Schwingungen können bei unzureichender Wartung der Anlagenteile dazu führen, dass Halterungen den Windkräften nicht mehr widerstehen können.

Abbildung 145: Sicherung von Gitterrosten



Einfache Verschraubungen bzw. Halterungen sind auch bei den Beleuchtungen erkennbar (Abbildung 146).

Abbildung 146: Beleuchtungen in der Destillation



7.9.3 Auswahl von Modellkörpern

Um die mögliche Flugweite potenzieller Projektile einzugrenzen, ist die Festlegung von Modellkörpern erforderlich. Dies stellt eine erhebliche aber notwendige Vereinfachung für die Abschätzung von Flugweiten von Anlagenteilen dar. Grundsätzlich sind zylindrische Modellkörper sinnvoll, weil deren Widerstandsbeiwerte näherungsweise abgeschätzt werden können. Dies ist bei unregelmäßig geformten Körpern nicht möglich. Auch der Widerstandsbeiwert einer Platte kann wegen der Rotation kaum abgeschätzt werden.

Gewählt wird für die Betrachtung daher als Modellrohr I ein Rohr mit folgenden Maßen:

Länge 2 m	}	Modellrohr 1
Durchmesser 5 cm		
Gewicht 3,85 kg		

Darüber hinaus wird ein Rohr mit folgenden Abmessungen in die Betrachtung ausgenommen, wengleich dieses nicht in der Xylol-Destillation verbaut wurde:

Länge 2 m	}	Modellrohr 2
Durchmesser 10 cm		
Gewicht 10 kg		

Dieses Rohr wird als Projektil nur deshalb mit betrachtet, um einen Vergleich zwischen den gewählten Modellkörpern zu ermöglichen. Die Berechnung wird iterativ entsprechend dem angegebenen Berechnungsalgorithmus mit Hilfe eines Computerprogramms durchgeführt. Die Eingangsdaten sind in Abbildung 147 als Screenshot zusammengefasst.

Abbildung 147: Eingangsdaten der Flugweitenberechnung des Modellrohrs I

Projektflug - Trümmerflug

- Eingaben zur Berechnung

Starthöhe	70 m	Angriffsfläche	0,1 m ²	Projektildurchmesser	0,05 m
Zeitintervall	0,03 s	cw-Wert	1,2	Windschatten	0 m
Projektilmasse	3,8 kg	Anströmwinkel	15 Grad	Anfangsgeschw.	0 m/s

- Eingaben zur Luftdichteberechnung

Temperatur	25 °C
Luftfeuchtigkeit	70 %
Umgebungsdruck	985 mbar

Sonstige Angaben

Windzone	4
Geländekategorie	2

- Berechnete Werte

Windgeschwindigkeit in Starthöhe	_____ m/s	max. Projektilgeschwindigkeit im Ziel	_____ km/h
Luftdichte	_____ kg/m ³		

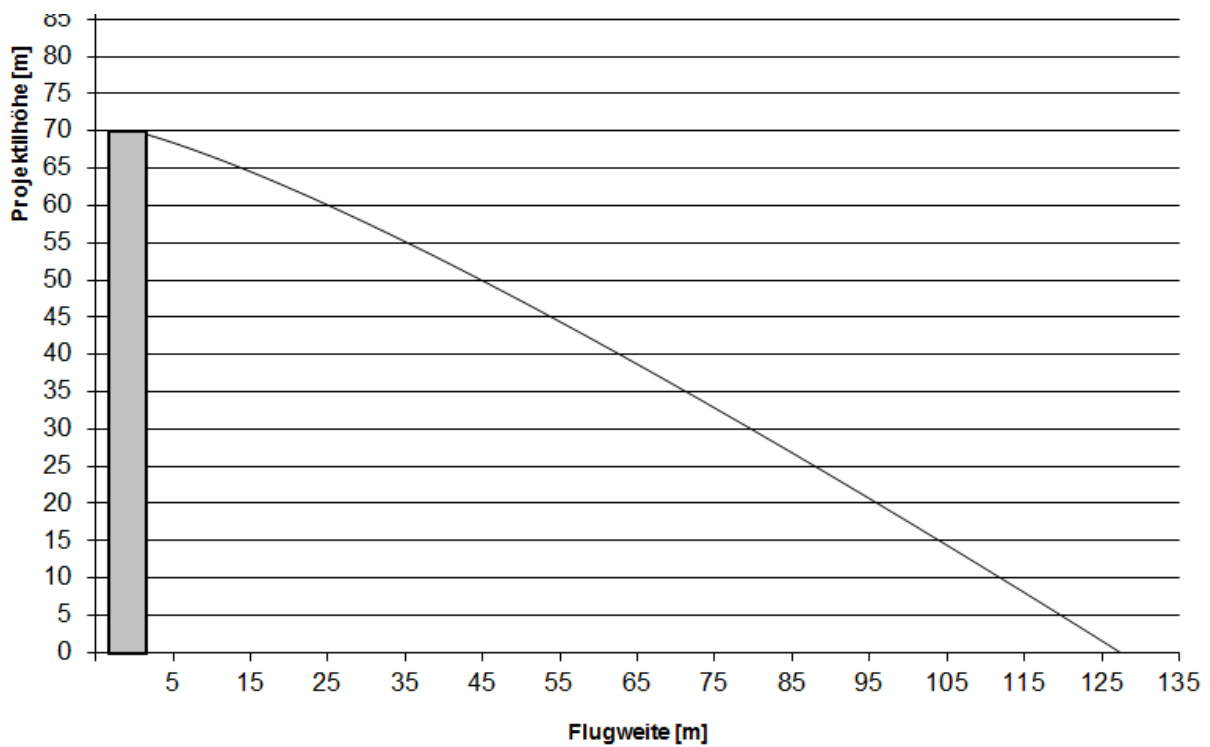
Für die in diesem Programm verwendeten Berechnungen gelten folgende Randbedingungen:

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

Buttons: **Daten übernehmen**, **Formular schließen**

Mit diesen Eingangsdaten errechnet das Programm zunächst die maximale Flugweite des Modellrohrs I. Das Ergebnis dieser Berechnung ist grafisch in Abbildung 148 dargestellt. Wie zu erkennen ist, kann das Rohr bei einer Starthöhe von 70 m in der Windzone 4 bei Geländekategorie II ca. 127 m weit getragen werden.

Abbildung 148: Maximale Flugweite des Modellrohrs I



Nach dieser Berechnung wird nunmehr ein Radius von 127 m um die Destillationsanlage gelegt, um die Anlagenteile zu erfassen, die potenziell von dem Modellkörper I getroffen werden können (Abbildung 149). Wie in Abbildung 149 schnell zu erkennen ist, können nicht alle Anlagenteile, die potenziell getroffen werden können, untersucht werden. Daher werden einzelne Anlagenteile exemplarisch für die nachfolgenden Untersuchungen ausgewählt. Aufgrund der hohen Schadstoffmengen wurden die Tanks Nr. 11 und Nr. 263 (Abbildung 150) ausgewählt (in Abbildung 149 blau gekennzeichnet). Bei der Wahl des Tanks 263 wurde die Hauptwindrichtung (Nordwestwind) nicht berücksichtigt.

Abbildung 149: Lage der ausgewählten Tanks



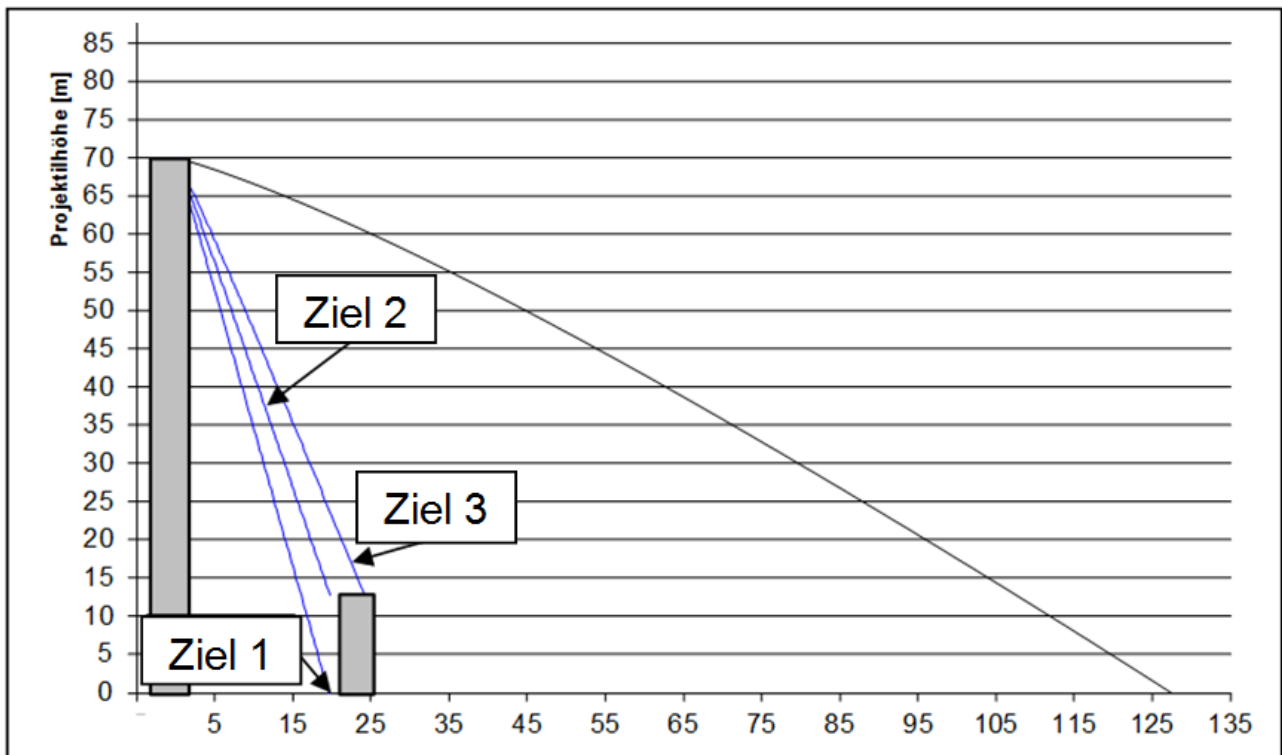
Lage von Tank Nummer 11 und Tank Nummer 263

Abbildung 150: Ansicht des Tanks Nr. 263



Das Programm berechnet, wie die Abbildung 151 verdeutlicht, die Projektilgeschwindigkeit an drei Punkten des Tanks (hier: Tank Nr. 11), sofern diese innerhalb der maximalen Flugweite des Projektils liegen. Darüber hinaus werden an den Aufprallpunkten die Penetrationstiefen berechnet.

Abbildung 151: Berechnung der Flugbahnen, der Projektilgeschwindigkeit sowie der Penetrationstiefe für 3 Aufprallpunkte am Beispiel des Tanks Nr. 11.



Wenn Ziel 3 außerhalb der maximalen Flugweite liegt, wird das Ziel in die Berechnung aufgenommen, bei dem der Aufprallpunkt genau auf der maximalen Flugbahn liegt.

7.9.4 Untersuchungsergebnisse

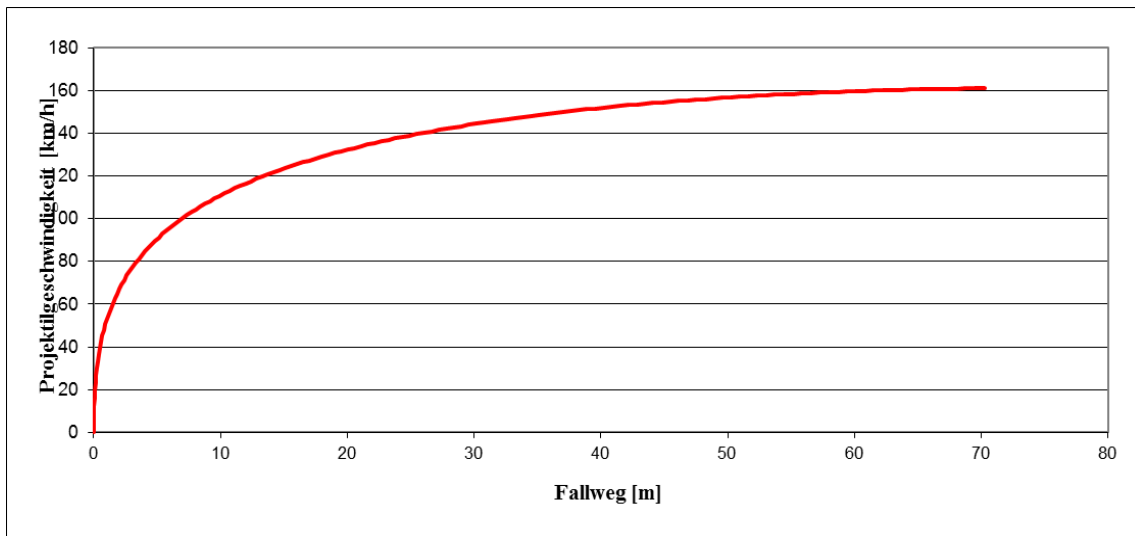
Als erstes wurden die Berechnungen für das ausgewählte Modellrohr 1 mit einer Länge von 2 m, einem Gewicht von 3,8 kg sowie einem Durchmesser von 0,05 m durchgeführt. Neben der Geländekategorie II wurde auch die Geländekategorie I in die Berechnung einbezogen. Darüber hinaus wurde noch das Modellrohr 2 mit einer Länge von 2 m, 10 kg Gewicht und einem Durchmesser von 0,1 m angenommen, um die Größenordnung der Ergebnisveränderung besser einschätzen zu können (Tabelle 65).

Tabelle 65: Ergebnisse der Untersuchungen mit verschiedenen Modellrohren und unterschiedlichen Geländekategorien

	Ziel-ID	Entfernung (m)	Höhe (m)	Breite (m)	Projektilegeschwindigkeit Km/h			Penetrationstiefe (mm)		
					Ziel 1	Ziel 2	Ziel 3	Ziel 1	Ziel 2	Ziel 3
Rechenlauf 1										
Modellrohr 1 Länge 2 m Gewicht 3,85 Kg Ø 0,05 m	Tank Nr. 11	22	13	4,5	91,5	89,8	91,9	18,0	1,76	1,82
Windzone 4 GK II Maximale Reichweite 127 m	Tank Nr. 263	102	13	35	127,8	137,4	161,0	2,82	3,10	3,83
Rechenlauf 2										
Modellrohr 1 Länge 2 m Gewicht 3,85 Kg Ø 0,05 m	Tank Nr. 11	22	13	4,5	91,65	89,9	92	1,81	1,77	1,82
Windzone 4 GK I Maximale Reichweite 127 m	Tank Nr. 263	102	13	35	128,6	138,4	171,5	2,84	3,13	4,17
Rechenlauf 3										
Modellrohr 2 Länge 2 m Gewicht 10 Kg Ø 0,1 m	Tank Nr. 11	22	13	4,5	99,71	96,65	988	1,93	1,86	1,91
Windzone 4, GK II Maximale Reichweite: 107 m	Tank Nr. 263	102	13	35	137,6	146,8	156,5	297	3,24	3,53

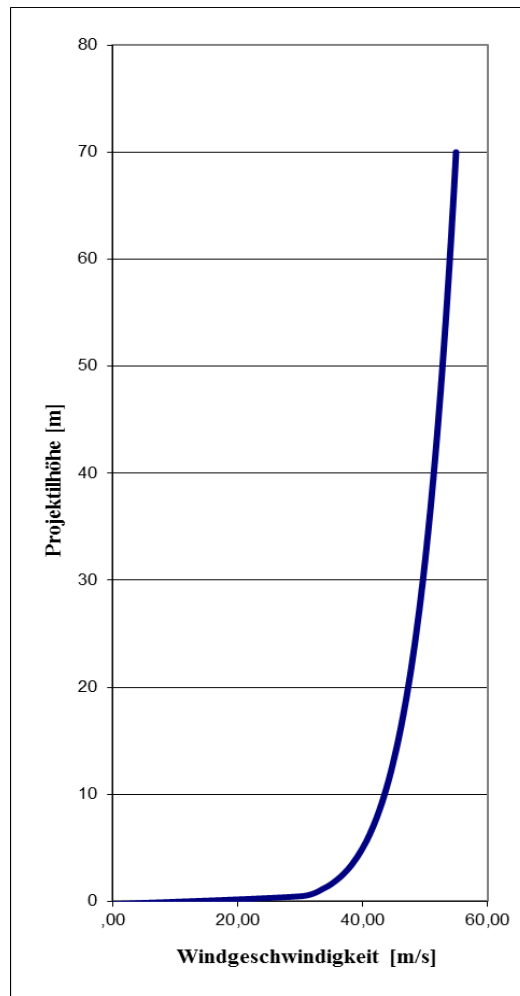
Die Ergebnisse werden durch das Programm nicht nur tabellarisch sondern auch grafisch wiedergegeben. In Abbildung 152 ist die Entwicklung der Projektilegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Fallweg am Beispiel von Rechenlauf I dargestellt.

Abbildung 152: Projektilgeschwindigkeit in Anhängigkeit vom Fallweg



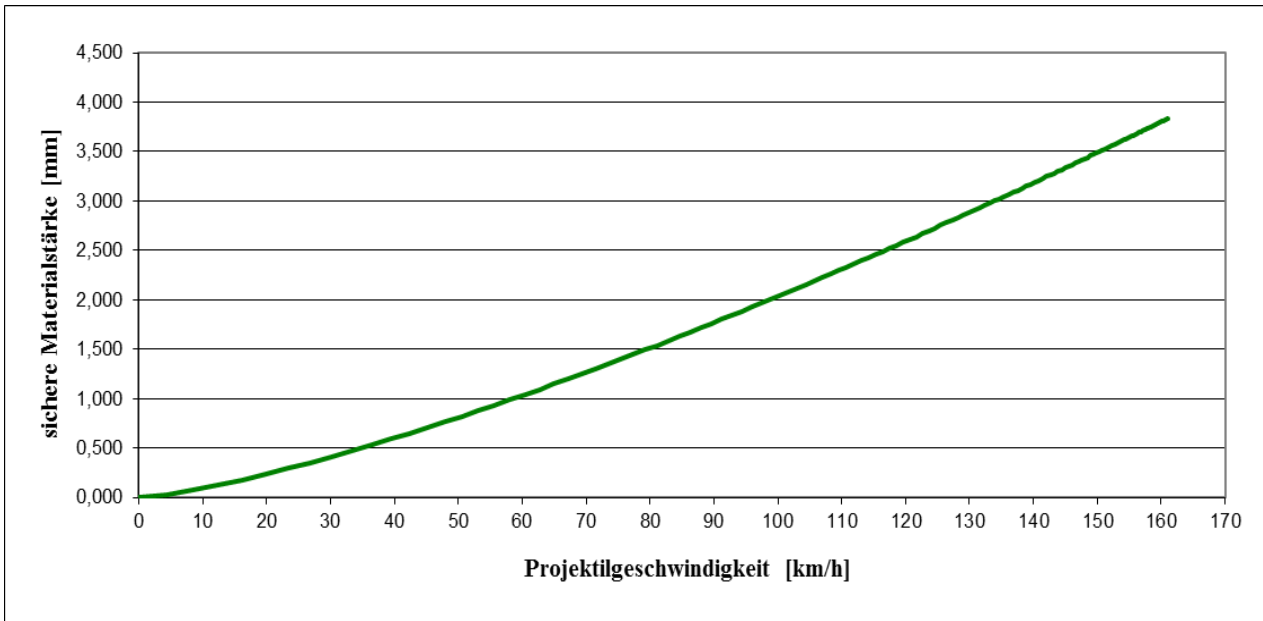
Zu Beginn erfährt das Projektil die größte Beschleunigung, weil die Differenz zwischen Windgeschwindigkeit einerseits und Projektilgeschwindigkeit andererseits am größten ist. (Die Beschleunigung ist die Tangente an die dargestellte Kurve an einem betrachteten Punkt). Diese Differenz wird im weiteren Verlauf zunehmend kleiner und damit auch die Beschleunigung. Darüber hinaus wird auch das Wind- bzw. Böenprofil abgebildet (Abbildung 153).

Abbildung 153: Windgeschwindigkeitsprofil g



Mit Hilfe der berechneten Projektilgeschwindigkeiten, der Entfernung zum Aufprallpunkt sowie der Geometrie der potenziellen Aufprallkörper (Tanks) werden die Penetrationstiefen in Stahl berechnet (Abbildung 154).

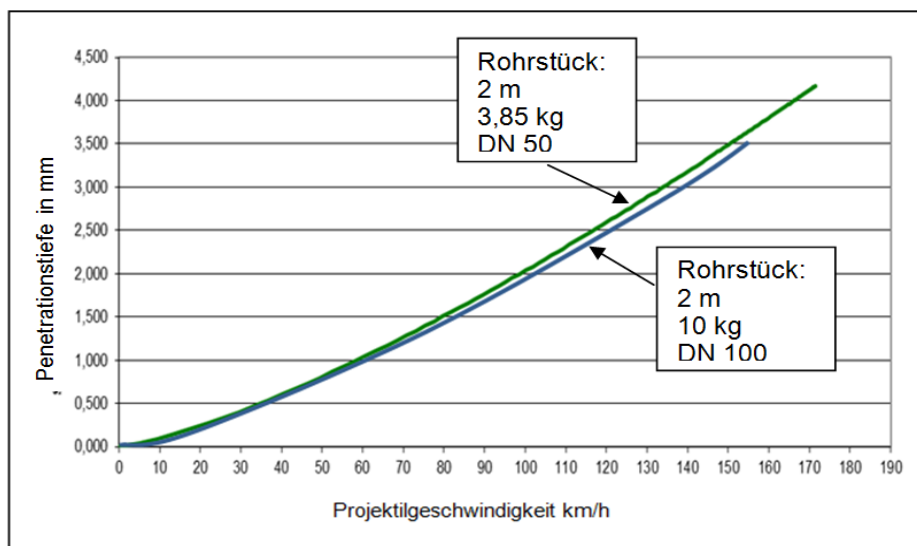
Abbildung 154: Penetrationstiefen in Abhängigkeit von der Projektilgeschwindigkeit



Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen sich wie folgt interpretieren:

1. Wie der Vergleich zwischen den Tanks Nr. 11 und 263 bei allen Untersuchungen verdeutlicht, gewinnt bei der Berechnung der Projektilgeschwindigkeit v_p die x-Komponente mit zunehmendem Abstand vom Emissionspunkt an Bedeutung (vgl. Tank Nr. 263). Bei kürzeren Abständen dominiert die z-Komponente (Tank. Nr. 11). (Vgl. Projektilgeschwindigkeiten der Ziele 1, 2 und 3).
2. Je geringer das Gewicht des Modellrohrs ist, umso größer ist seine Endgeschwindigkeit, weil die Flugzeit länger ist (vgl. Rechenläufe 2 und 3). Welche Auswirkungen dies hat verdeutlicht Abbildung 155. Während bei vergleichsweise niedrigen Projektilgeschwindigkeiten kaum Unterschiede bei den Penetrationstiefen bestehen, wirkt sich vor allem die längere Beschleunigungszeit auf leichtere Rohrstücke aus. Während das schwerere Rohrstück beim Aufprall auf den Tank Nr. 263 eine Projektilgeschwindigkeit von 156 km/h erreichen kann, erreicht das leichtere Rohrstück eine Geschwindigkeit von 171 km/h. Hieraus resultiert eine höhere Penetrationstiefe.

Abbildung 155: Penetrationstiefen in Abhängigkeit von der Projektilgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Rohrstücken g



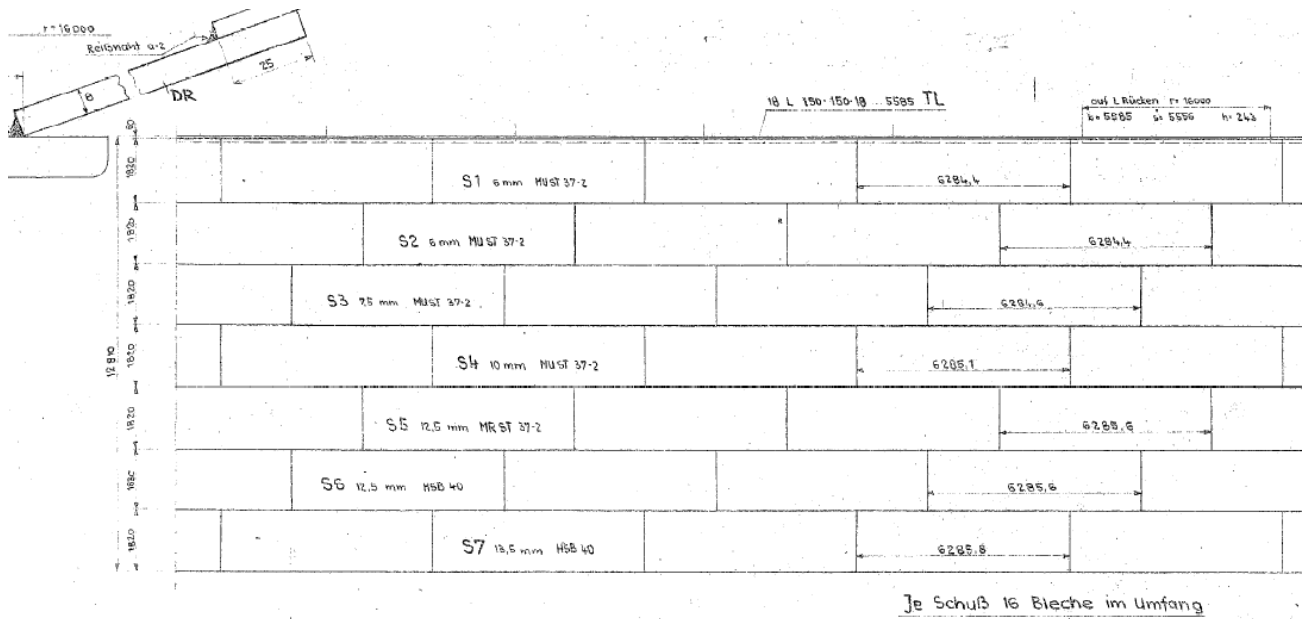
Dieser Zusammenhang wird deutlich, wenn man die Gleichung zur Berechnung der Penetrationstiefe in Stahl noch einmal näher betrachtet:

$$(127) \quad t_{\text{stahl}} = K_{\text{stahl}} \frac{m^{0,67}}{d} \left(\frac{v_p}{100}\right)^{1,33}$$

Wie die Exponenten für die Quotienten m/d und $v_p/100$ zeigen, ist bei höheren Projektilgeschwindigkeiten der Einfluss von v_p größer auf die Penetrationstiefe als derjenige der Masse. So sind Anlagenteile in größeren Entfernungen vom Emissionsort von leichten Projektilen stärker gefährdet als Anlagenteile mit geringeren Abständen vom Emissionsort.

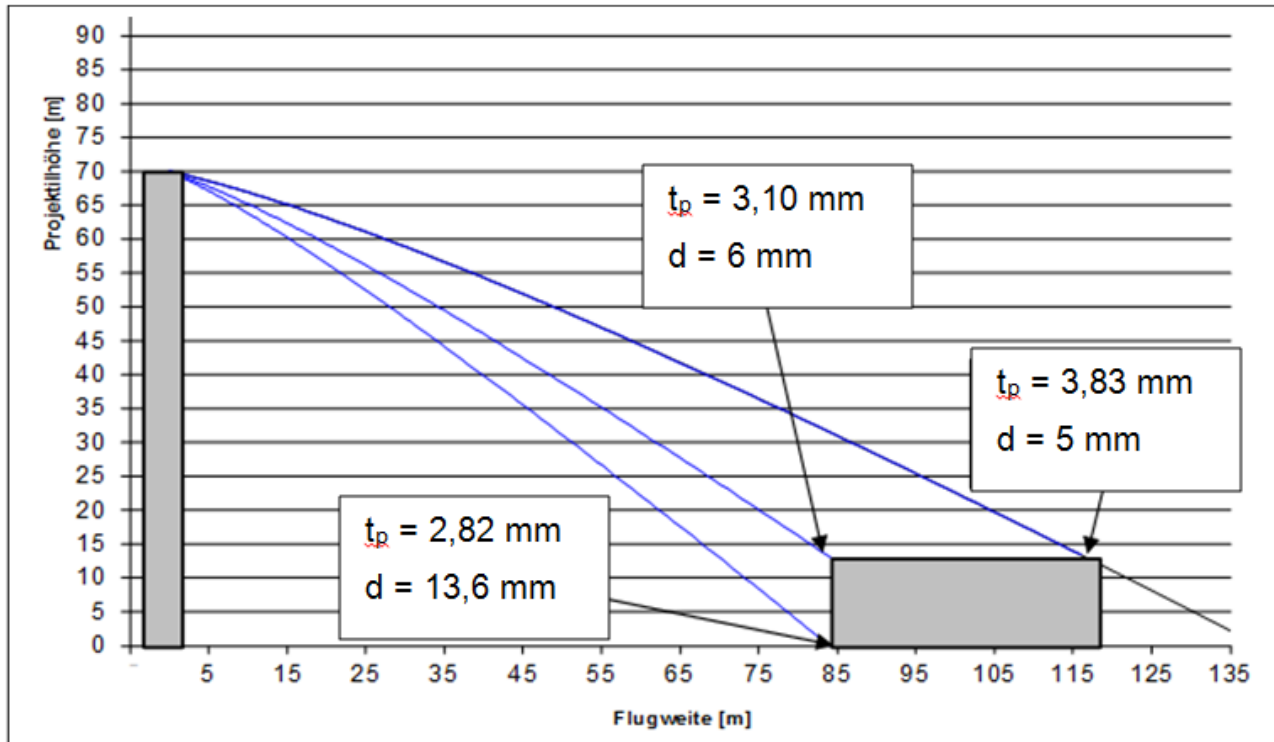
Die berechneten Penetrationstiefen wurden anschließend mit den tatsächlichen Wandstärken der Behälter verglichen. In Abbildung 156 ist der Profilaufbau des Tanks Nr. 263 dargestellt. Die untersten Stahlplatten haben eine Dicke von 13,6 mm, die oberste Reihe von 6 mm.

Abbildung 156: Wandstärkenaufbau von Tank Nr. 263



Die Tankdecke weist eine Blechdicke von 5 mm auf. Auch die Tankdecke von Tank Nr. 11 besteht aus Blechen mit einer Stärke von 5 mm. Der Wandstärkenaufbau ist vergleichbar mit dem von Tank Nr. 263. Um das Gefährdungspotential des Tanks 263 zu bewerten, müssen den errechneten Penetrationstiefen die tatsächlich vorhandenen Wanddicken des Tanks 263 gegenübergestellt werden. In Abbildung 157 sind die berechneten Penetrationstiefen t_p für das Modellrohr I (Rechenlauf I mit GK II) sowie die Wandstärken an den Zielorten I, 2 und 3 zusammengestellt.

Abbildung 157: Gegenüberstellung von Wandstärken des Tanks Nr. 263 und den berechneten Penetrationstiefen für das Modellrohr 1 (Gewicht 3,84 kg, Länge 2 m, Durchmesser 0,05 m)



Es wird deutlich, dass der am wenigsten gefährdete Bereich des Tanks sich in Bodennähe befindet, weil dort die größten Wanddicken vorliegen. Dagegen ist der am stärksten gefährdete Bereich das Dach des Behälters, das mit einer Wandstärke von $d = 5$ mm am schwächsten ausgeführt wurde. Die Gegenüberstellung von Penetrationstiefen t_p und Wandstärken d zeigt, dass der ausgewählte Modellkörper die Behälterwand offensichtlich nicht durchschlagen kann.

Die Untersuchungsergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Die Ortsbesichtigung ergab, dass alle Anlagenteile verschweißt oder verschraubt sind. Potenzielle Anlagenteile, die sich lösen können, konnten nicht identifiziert werden. Einzig die Beleuchtungslampen erschienen vergleichsweise einfach befestigt zu sein. Trotz der an der Nordseeküste auftretenden zahlreichen Orkane ist es innerhalb der Raffinerie bislang zu keinem Abriss von Anlagenteilen gekommen.
2. Ungeachtet der Tatsache, dass keine potenziellen Anlagenteile identifiziert werden konnten, die zu einem windgetragenen Projektil werden können, wurde eine Rohrleitung als Modellkörper gewählt, die auf der Destillationskolonne tatsächlich vorhanden ist. In der Windzone 4 mit der Geländekategorie II kann ein Rohrstück von 2 m Länge, einer Masse von 3,8 kg sowie einem Durchmesser von DN 50 (Modellrohr 1) aus einer Höhe von 70 m maximal 127 m weit fortgetragen werden.
3. Innerhalb dieses Radius können potenziell alle Anlagenteile von diesem Modellkörper getroffen werden. Ungeachtet der Hauptwindrichtung wurden die Tanks mit den Nummern II und 263 als mögliche Aufprallorte ausgewählt, um die Wirkung eines Projektilaufpralls zu ermitteln.
4. Die Berechnungen ergaben, dass Modellrohr 1 aufgrund des geringeren Gewichtes trotz der geringeren Angriffsfläche weiter getragen wird als Modellrohr 2. Weil die Flugzeit länger ist, erreicht Modellrohr 1 auch die größere Projektilgeschwindigkeit als Modellrohr 2.
5. Aufgrund der höheren Projektilgeschwindigkeit ist die Penetrationstiefe t_p am Zielort 3 am größten.
6. Wie der Vergleich der Penetrationstiefen an den Zielpunkten 1, 2 und 3 (Aufprallorte) mit den Wandstärken der ausgewählten Tanks zeigt, ist das Dach potenziell am stärksten gefährdet. Der bodennahe Bereich der Tanks ist aufgrund der großen Wandstärken am geringsten gefährdet.

7. Die errechneten Penetrationstiefen für beide Modellrohre liegen unterhalb der Wandstärken, so dass die Gefahr eines Durchschlagens einer Behälterwandung nahezu ausgeschlossen werden kann.
8. Bei ganz extremen Bedingungen (Windzone 4 und Geländekategorie I) erreicht die Penetrationstiefe mit 4,17 mm nahezu die Dachwandstärke von 5 mm.

8 Anlage 2: Anwendungsbeispiel der TRAS 320 für die Gefahrenquellen Schnee und Eis am Standort Ölhafen Rostock

8.1 Standortbeschreibung der Großtanklager Ölhafen Rostock GmbH

Im Rahmen des Forschungsvorhabens UBA 3711 68 331 wird die Anwendung der TRAS Wind-Schnee-Eis für die Gefahrenquellen Schnee und Eis anhand einer Beispielbetrachtung in Anlehnung an den AP 4 der Leistungsbeschreibung durchgeführt. Maßgebliches Auswahlkriterium für ein exemplarisch zu untersuchendes Anlagenteil ist die Lage in einem für Schneelasten maßgebenden Bereich der Bundesrepublik Deutschland, vorzugsweise in der Schneelastzone 3 oder in der Schneelastzone 2 im Bereich des norddeutschen Tieflands (vgl. Abbildung 162). Als geeigneter Standort hat sich der Großtanklager-Ölhafen Rostock (GÖR) erwiesen. Dieser ist Teil des Rostocker Überseehafens an der Ostseeküste in Mecklenburg-Vorpommern, s. Abbildung 158. Er verfügt über drei Tanklager, die der Lagerung und dem Umschlag von u.a. Mineralölen und vegetabilen Ölen dienen. Für die Beispielbetrachtung wurde im Speziellen der Festdachtank Nr. 11 des Großtanklagers ausgewählt.

Abbildung 158: Lage des Großtanklagers-Ölhafen Rostock GmbH

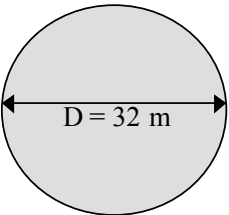
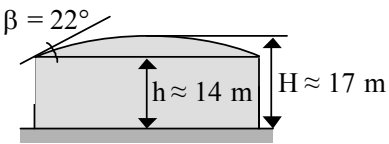


Quelle: Google Earth

Die Anlage der Großtanklager-Ölhafen Rostock GmbH fällt unter die Betriebsbereiche mit erweiterten Pflichten nach StörfallV. Der ausgewählte Festdachtank ist aufgrund des flachen Kuppeldaches der Einwirkung Schnee in besonderem Maße ausgesetzt. Hinzu kommt die Tatsache, dass der gelagerte Stoff geringe Temperaturen besitzt, so dass der Schnee auf dem Dach nicht sofort weggeschmolzen wird. Der ausgewählte Festdachtank ist ein typisches Tankbauwerk, welches in vielen Betriebsbereichen Verwendung findet.

Abbildung I60 zeigt den Lageplan des Großtanklagers mit dem für die Beispielbetrachtung ausgewählten Tank Nr. 11. Darüber hinaus gibt Abbildung I60 eine Ansicht sowie ein Foto des Festdachtanks aus den Bestandsunterlagen wieder. Die Eckdaten des Tanks sind in Abbildung I59 dargestellt.

Abbildung 159: Eckdaten "Tank 11"

<p>Baujahr: 1975 (Tank) 1997 (neue Dachhaut)</p> <p>Standort: Rostock-Peez</p> <p>max. Tankvolumen: 10.000 m³</p> <p>Höhe über Normalnull: 5 m</p>	<p><u><i>Draufsicht</i></u></p>  <p>D = 32 m</p>	<p><u><i>Ansicht</i></u></p>  <p>$\beta = 22^\circ$</p> <p>$h \approx 14 \text{ m}$</p> <p>$H \approx 17 \text{ m}$</p>
---	---	--

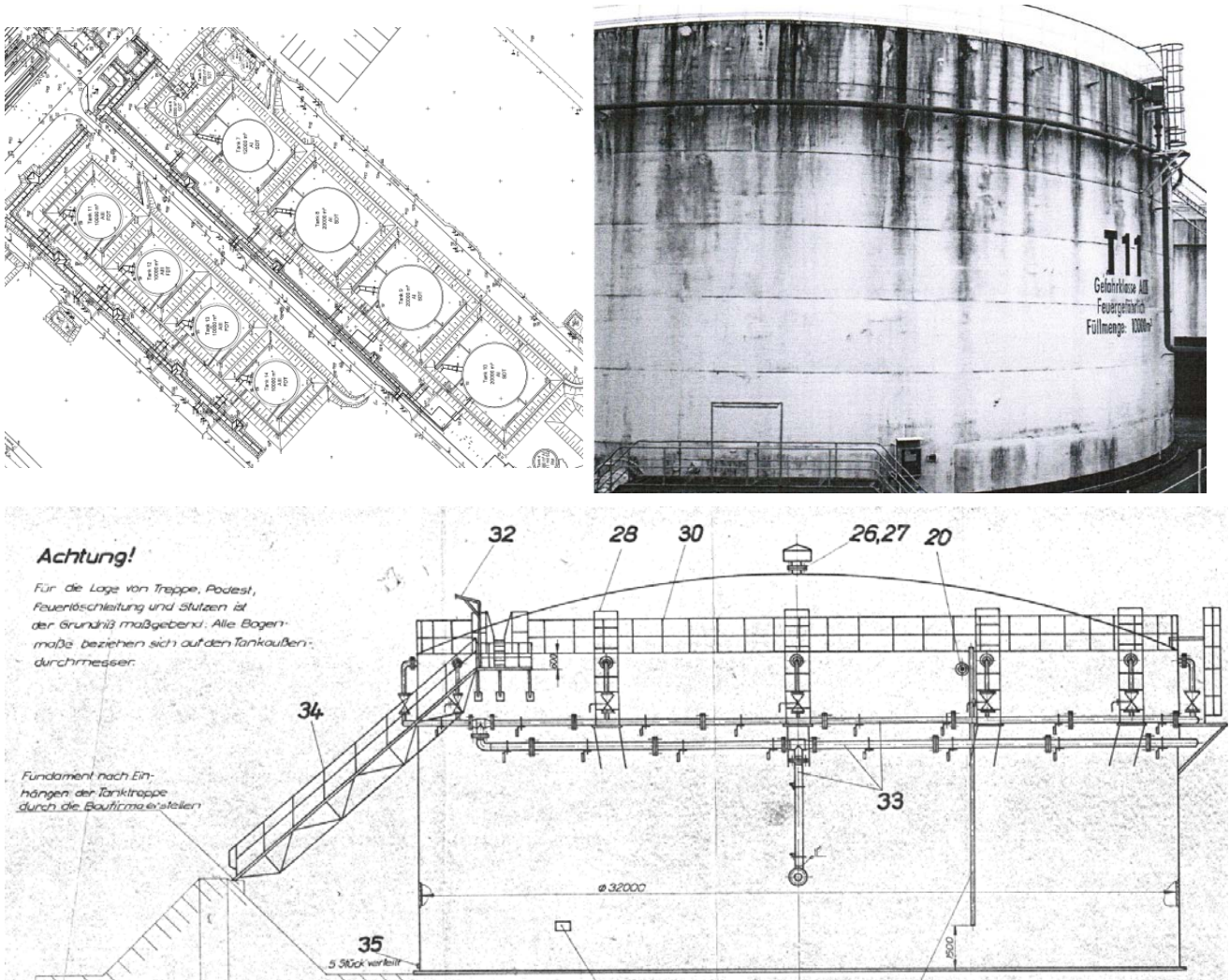
Der als Stahlkonstruktion ausgeführte Tank weist demnach einen Durchmesser von 32 m sowie eine Traufhöhe von etwa 14 m und eine Gesamthöhe von etwa 17 m auf. Das Kuppeldach des Tanks besitzt eine maximale Neigung von 22° und ist mit einem umlaufenden offenen Geländer mit 1,55 m Höhe versehen. Eine Attika bzw. Schneefangkonstruktionen sind laut den Bestandsunterlagen nicht vorhanden. Zur Befüllung und Entleerung bzw. zur Sicherstellung der Begehbarkeit sind am Tank außenliegende Rohrleitungen bzw. eine Treppenanlage installiert.

Die auf den ursprünglichen Bestandsplänen angegebene Dachhaut wurde 1997 durch eine neue Festdachkonstruktion aus Stahlblechen ersetzt. Der ursprünglich vorhandene Dachaufbau (Isolierung) wurde seinerzeit ersatzlos entfernt.

Für die Anlage liegen aus der Errichtungszeit keine statischen Berechnungen vor. Es konnten lediglich einige Konstruktionspläne vorgelegt werden. Anhand dieser Pläne kann auf die vorliegende Konstruktion geschlossen werden und eine Nachrechnung der wesentlichen Bestandteile des Tanks erfolgen.

Die im Jahr 1997 neu verlegte Dachhaut ist für den Teil der Konstruktion (flächige Dacheindeckung) eine wesentliche Änderung, so dass hier ein Vergleich mit der 1997 gültigen Fassung der DIN 1055 herbeigeführt werden könnte. Allerdings liegen hierzu ebenfalls keine statischen Unterlagen vor. Auch ist nicht bekannt, ob die Dachhaut seinerzeit neu ausgelegt wurde oder aber die alte Dachhaut in konstruktiver Hinsicht nur ersetzt wurde (ohne weiteren Nachweis). Daher wird auch bei der Dachhaut mit den zum Errichtungszeitraum 1975 gültigen Regelungen der Vergleich zur heute gültigen DIN EN 1991-1-3/NA und TRAS geführt.

Abbildung 160: "Tank 11" in den Bestandsunterlagen



8.2 Angesetzte Schnee- und Eislast im Bestandsnachweis

Eine statische Berechnung der Bestandskonstruktion liegt nicht vor und damit auch keine Angaben zu den ursprünglich bei der Bemessung angesetzten Schnee- und Eislasten.

Es wird daher angenommen, dass die Lasten gemäß den zu der Bauzeit in der ehemaligen DDR gültigen Regelwerken ermittelt worden sind. Bezüglich der Lastannahmen war seinerzeit die TGL 20167 gültig.

8.2.1 Schneelasten

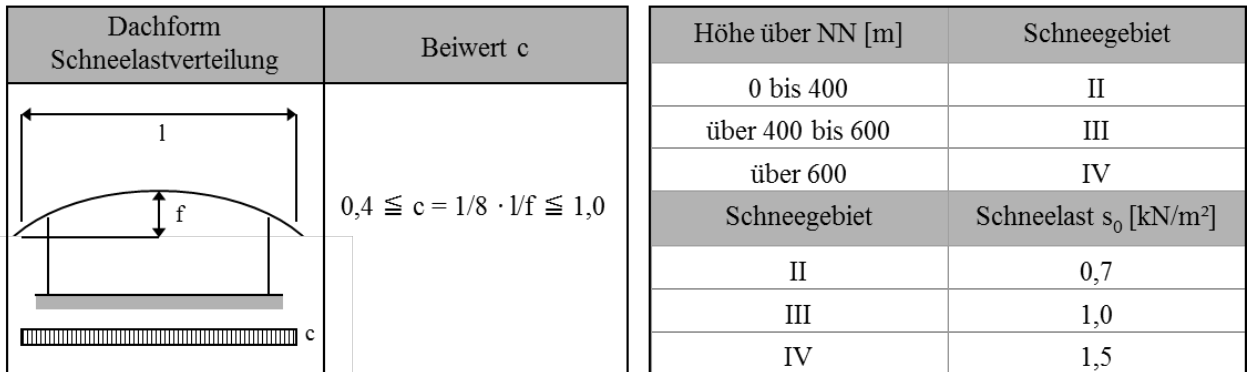
Für den Ansatz der Schneelasten unterscheidet die TGL drei von der NN-Höhe des betrachteten Standorts abhängige Schneegebiete. Ausgehend vom maßgebenden Schneegebiet erfolgt dann die Zuordnung einer Last s_0 welche sich aus einer Schneedecke auf einer waagerechten Fläche ergibt. Eine weitere Differenzierung in Abhängigkeit der geographischen Lage des Standorts im Staatsgebiet der ehemaligen DDR erfolgt nicht.

Die sogenannte Normlast aus Schnee für die horizontale Projektion der Dachfläche ergibt sich, indem s_0 mit einem von der Dachform abhängigen Beiwert multipliziert wird. Dabei findet sowohl eine Abminderung von s_0 in Abhängigkeit der Dachneigung Berücksichtigung, als auch eine eventuelle Erhöhung durch Schneeanhäufungen an Höhenversprüngen.

Die für den betrachteten Tank relevanten Regelungen der TGL sind in Abbildung I61 dargestellt.

Der Tank ist wegen $HNN < 400$ m dem Schneegebiet II zuzuordnen, welches einer Schneelast auf der waagerechten Fläche von $s_0 = 0,7 \text{ kN/m}^2$ entspricht. Aus der Dachform ergibt sich mit $l/f \sim 10$ ein Formbeiwert von $c = 1,0$.

Abbildung 161: Schneelasten gemäß TGL 20167



Die Normlast aus Schnee für die horizontale Projektion der Dachfläche ergibt sich somit zu:

$$(128) \quad s = c \cdot s_0 = 1,0 \cdot 0,7 = 0,7 \text{ kN/m}^2$$

Diese Normlast wird schließlich für die Bemessung über einen Grenzfaktor von 1,4 in eine Rechenlast umgerechnet.

Die TGL 20167 schreibt vor, dass auch eine einseitige Schneelast zu berücksichtigen ist, macht jedoch keine Angaben für einen konkreten Ansatz. In Anlehnung an die DIN 1055-5 wird für einen Schnitt durch den Dachmittelpunkt der Ansatz einer einseitig halb so großen Schneelast gewählt (vgl. Abbildung 163). Im Hinblick auf die Dachkonstruktion ("Sparrendach" siehe Abschnitt 8.7) ist eine solche eindimensionale Betrachtung der Schneelastverteilung hinreichend und es kann auf Überlegungen bezüglich einer ungleichmäßigen Verteilung über die gesamte Dachfläche verzichtet werden.

8.2.2 Eislasten

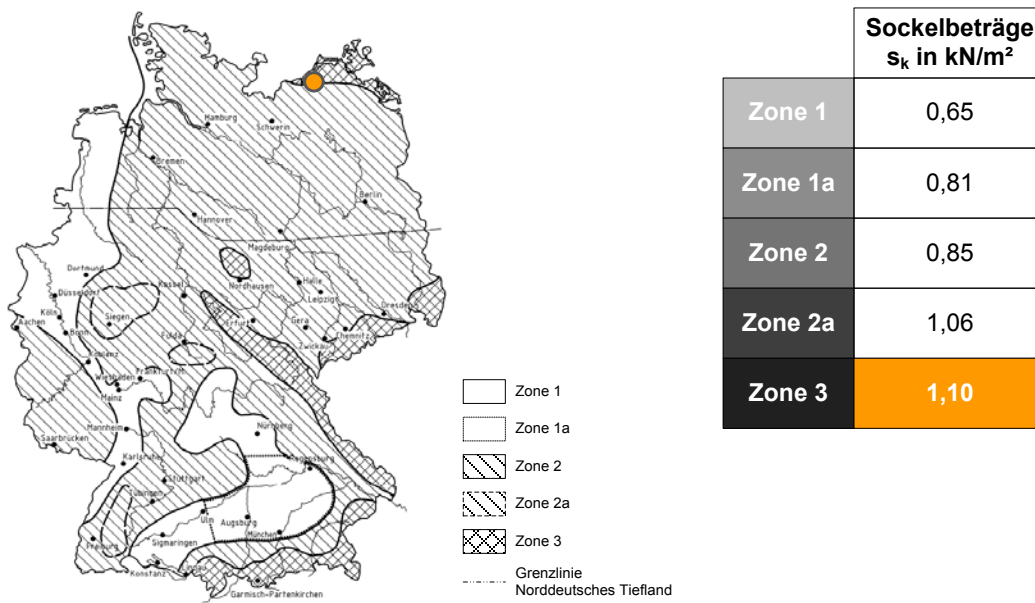
Die TGL 20167 enthält keine Angaben bezüglich Eislasten. Es wird daher angenommen, dass Eislasten bei der Bemessung nicht berücksichtigt worden sind.

8.3 Anzusetzende Schnee- und Eislasten nach den aktuellen allgemein anerkannten Regeln der Technik

8.3.1 Schneelast

Für die Ermittlung von Schneelasten in der Bundesrepublik Deutschland ist die DIN EN 1991-I-3/NA als eingeführte technische Baubestimmung maßgebend. Grundlage für die Größe der anzusetzenden Schneelast ist dabei die Einstufung des Bauwerks in eine Schneelastzone in Abhängigkeit seiner geographischen Lage innerhalb der Bundesrepublik Deutschland. Die Zuordnung der Schneelastzonen kann über die im NA zur DIN EN 1991-I-3 angegebene Schneelastzonenkarte erfolgen.

Abbildung 162: Schneelastzonenkarte gemäß dem NA zu DIN EN 1991-1-3



● Standort Grosstanklager-Ölhafen Rostock GmbH
(Rechts: 3706344, Hoch: 6005950)

Diese Karte stellt eine einfach auszuwertende aber auch eine sehr grobe Zuordnung der Schneelastzonen dar, welche besonders in Übergangsbereichen der Schneelastzonen nur bedingt anwendbar ist. Speziell in den Übergangsbereichen ist es daher gemäß DIN EN 1991-1-3/NA erforderlich, die genaue Zuordnung von Verwaltungseinheiten zu den Schneelastzonen bei den zuständigen Behörden zu erfragen. Von diesen können auch örtlich außergewöhnliche Schneelasten festgelegt werden.

Rostock liegt im Übergangsbereich der Schneelastzonen 2 und 3. Maßgebend für die Einstufung ist die vom Ministerium für Wirtschaft Bau und Tourismus Mecklenburg-Vorpommerns herausgegebene Liste der technischen Baubestimmungen (LTB). Demzufolge ist die Standortgemeinde Rostock-Peez zu Rostock-Stadt und damit in Schneelastzone 3 einzustufen. Gemäß LTB wären bei einer Einstufung in Schneelastzone 2 gleichzeitig die Regelungen für das norddeutsche Tiefland zu berücksichtigen. Dies würde bedeuten, dass zusätzlich zur ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation auch die Bemessungssituation mit Schnee als einer außergewöhnlichen Einwirkung zu überprüfen wäre. Dabei wäre der charakteristische Wert der Schneelast gegenüber der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation mit dem Faktor 2,3 zu vergrößern. Bei einer Zuordnung zu Schneelastzone 3, wie beim Tankstandort, ist dies jedoch nicht erforderlich.

Diese Zuordnung führt zum Ansatz der folgenden Schneelast s_k auf dem Boden, wobei für die vorliegende Standorthöhe von 5m über NN der Sockelbetrag maßgebend wird:

$$(129) \quad s_{k,SLZ3} = 0,31 + 2,91 \cdot \left[\frac{h_{NN} + 140}{760} \right]^2 \geq 1,1 = 1,1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Da sich der Tankstandort im Übergangsbereich zur Schneelastzone 2 befindet wird zu Vergleichszwecken auch die Schneelast bestimmt, welche sich in Schneelastzone 2 unter Berücksichtigung der Regelungen für das norddeutsche Tiefland ergeben würde.

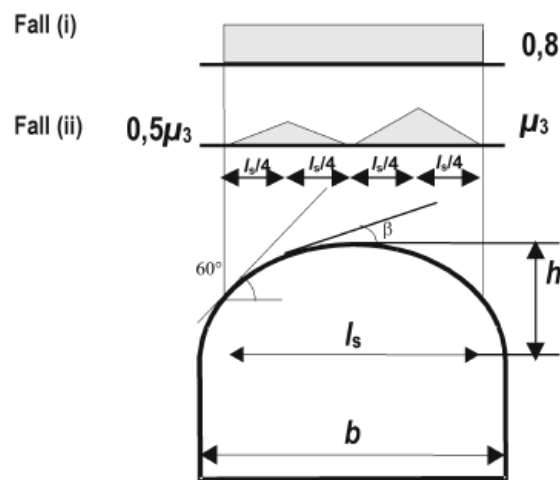
Dies ist

$$(130) \quad s_{k,SLZ2,NDT} = 2,3 \cdot \left(0,25 + 1,91 \cdot \left[\frac{h_{NN} + 140}{760} \right]^2 \right) \geq 2,3 \cdot 0,85 = 1,96 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

als außergewöhnliche Einwirkung.

Auch in der DIN EN 1991-1-3/NA findet eine Anpassung der Schneelast s_k in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie über sogenannte Formbeiwerte μ_i Anwendung. Bezüglich der Formbeiwerte für Dächer enthält die DIN EN 1991-1-3/NA jedoch keine expliziten Angaben für kuppelförmige Dächer. Wie bereits in Abschnitt 2.1 angegeben, kann aufgrund der Ausbildung der Dachkonstruktion als Sparrendach auf eine genaue Ermittlung der Schneeverteilung über die gesamte Dachfläche verzichtet werden. Es ist vielmehr hinreichend die Schneelast ungünstig für einen Schnitt durch den Dachmittelpunkt zu ermitteln. Hierbei werden die in DIN EN 1991-1-3/NA hinterlegten Angaben für Tonnendächer herangezogen. Hier sind zwei Lastanordnungen zu untersuchen (vgl. Abbildung 163).

Abbildung 163: Schneelasten auf Tonnendächer nach DIN EN 1991-1-3/NA



Dies sind eine gleichmäßig verteilte sowie eine, durch Verwehungs- und Abtaueinflüsse bedingte, ungleichmäßig verteilte Schneelast. Die jeweils für einen Nachweis ungünstigste Lastanordnung ist maßgebend. Der Formbeiwert für die ungleichmäßig verteilte Schneelast ergibt sich in Abhängigkeit der Dachgeometrie nach DIN EN 1991-1-3/NA (5.5) zu:

$$(131) \quad \mu_3 = 0,2 + 10 \cdot h/b = 0,2 + 10 \cdot \sim 0,1 = 1,2$$

Da der maximale Dachneigungswinkel β mit 22° kleiner als 60° ist, sind die Schneelasten in beiden Lastanordnungen bis zum Dachrand anzusetzen.

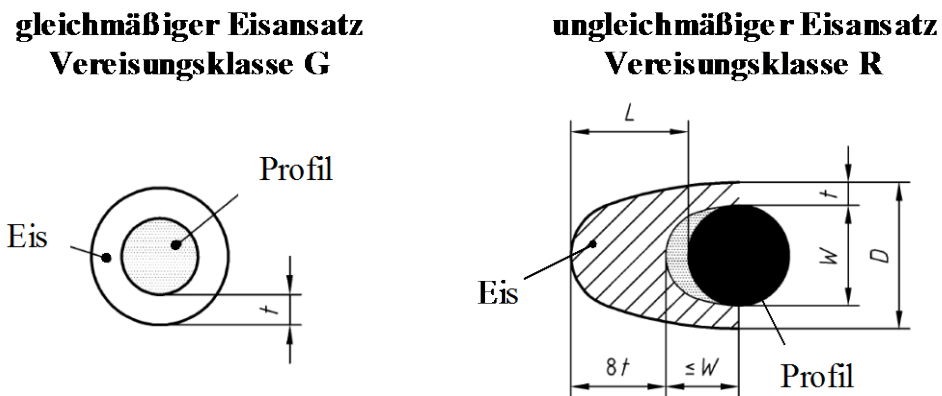
Der Ansatz einer Schneeanhäufung bedingt durch Verwehungen an Aufbauten erfolgt nicht. Gemäß der vorliegenden Fotodokumentation einer Tanküberprüfung sind im Randbereich des Daches keine Schneefangeinrichtungen installiert. Zwar ist im Randbereich des Tankdaches ein Geländer vorhanden, da es sich jedoch um ein offenes Geländer mit sehr geringem Völligkeitsgrad handelt, wird davon ausgegangen, dass nennenswerte Schneeanhäufungen hier nicht auftreten können.

8.3.2 Eislast

In der derzeit gültigen DIN EN 1991-1-3/NA finden sich keine Angaben bezüglich des Ansatzes von Eislasten. Der Anhang A der DIN 1055-5 sollte daher weiterhin als allgemein anerkannte Regel der Technik angesehen werden.

Klassifiziert sind dort zwei typische Fälle von Eisbelastungen (vgl. Abbildung 164): Eine allseitige Ummantelung der Bauteile mit einer Eisschicht konstanter Dicke (erfasst in der Vereisungsklasse GI-G2) sowie die Ausbildung einer windrichtungsabhängigen, einseitigen Raueisfahne (erfasst in der Vereisungsklasse RI-R3).

Abbildung 164: Schematische Darstellung der Eislasten nach DIN 1055-4



Gemäß DIN 1055-5 Bild A.3 ist der Tankstandort in die Eiszone I ($Z=1$) und die Region Küste einzuordnen. Dies führt nach Tabelle A.4 zu einer Einstufung in die Vereisungsklassen GI und RI und entspricht damit der geographisch bedingt geringsten Eisbelastung.

Konkret bedeutet die Einstufung in Vereisungsklasse GI den Ansatz einer 1 cm dicken allseitigen Eisschicht mit einer Wichte von 5 kN/m^3 . Die Einstufung in Vereisungsklasse RI bedingt für Stäbe mit einem Durchmesser $< 300 \text{ mm}$ den Ansatz einer Eislast von $0,005 \text{ kN/m}$. Zusätzlich ist bei gleichzeitigem Ansatz von Eis- und Windlasten zu berücksichtigen, dass die durch die Vereisung herbeigeführte Änderung der Querschnittsform auch die Größe der Windlast beeinflusst (für Details sei auf DIN 1055-5 A.4 verwiesen).

8.4 Standortgutachten zur Beurteilung des Schneeklimas vor Ort

Im Hinblick auf eine ausreichende Sicherheit werden Tragstrukturen für besonders seltene Schneereignisse ausgelegt. Gemäß des Sicherheitskonzeptes der Schneelastnorm DIN EN 1991-1-3/NA ist für den Tragwerksentwurf ein Ereignis heranzuziehen, das in 50 Jahren nur einmal überschritten wird bzw. zu einer jährlichen Nicht-Überschreitenswahrscheinlichkeit von 0,98 korrespondiert. Die zugehörige, rechnerische Stärke eines solchen Bemessungsereignisses wird durch den charakteristischen Wert der Schneelast s_k am Boden beschrieben.

Vor dem Hintergrund der Zonengrenzlage des untersuchten Standorts wird im Folgenden im Sinne einer Verifizierung der Normvorgaben der charakteristische Schneelastwert s_k zusätzlich auf Grundlage von Schneemessdaten an den Wetterstationen Rostock, Greifswald, Arkona und Schwerin extremwertstatistisch abgeleitet. Die Stationen liegen in einer hinlänglich kleinen Entfernung zum Tanklager, so dass sie als ausreichend repräsentativ für den Standort verstanden werden können. Während sich die Station Schwerin dabei in der Schneelastzone 2 befindet, sind alle weiteren Stationen entsprechend der Schneelastzonenkarte in die höchste Schneelastzone 3 eingeordnet. Ihre Lage ist durch folgende Gauß-Krüger-Koordinaten definiert:

Tabelle 66: Lage der ausgewerteten DWD-Wetterstationen

Station	Rechtswert	Hochwert	Höhe über N.N.
Arkona	3785807 m	6070381 m	42 m
Greifswald	3787717 m	6005383 m	2 m
Rostock	3701247 m	6010094 m	4 m
Schwerin	3657564 m	5948986 m	59 m

Die Wetterstation Rostock liegt dabei mit einer Entfernung von nur ca. 6 km in unmittelbarer Bauwerksnähe und ist insofern im besonderen Maße zur Charakterisierung des örtlichen Schneeklimas geeignet. Die Station Greifswald ist in östlicher Richtung in einer Distanz von ca. 70 km zum Tanklager positioniert. Die Station Schwerin befindet sich in

einem Abstand von 81 km südwestlich zum Bauwerk. Die insgesamt größte Entfernung mit 94 km weist die Station Arkona auf, die sich auf der nördlichsten Zunge der Insel Rügen befindet. Tabelle 66 veranschaulicht die Lage der Wetterstationen in Bezug auf den Bauwerksstandort.

Die Schneebeobachtungen an den einzelnen Stationen stehen als Jahrestremwerte des Wasseräquivalents der Gesamtschneedecke zur Verfügung, die über einen konstanten Umrechnungsfaktor (1mm Wasseräquivalent entspricht 0,01 kN/m²) unmittelbar in entsprechende Extremwerte der Schneelast *s* am Boden überführt werden können. Die Schneeregistrierungen umfassen je nach Station Beobachtungszeiträume von 30 bis 40 Jahren.

Die Jahreshöchstwerte der Schneelast *s* werden im Weiteren einer extremwertstatistischen Analyse zugeführt. Hierbei wird aus der Stichprobe der Jahrestremwerte die zugehörige Wahrscheinlichkeitsverteilung biasfrei geschätzt, die schließlich eine Extrapolation über den Beobachtungszeitraum hinaus auf das 50-jährige Ereignis ermöglicht. Als theoretischer Verteilungsansatz kommt in Übereinstimmung mit der Schneelastnorm DIN EN 1991-1-3/NA eine Gumbelverteilung vom Typ I zur Anwendung. Die Schätzung der Gumbelparameter aus den jeweiligen Stichproben erfolgt mittels eines statistisch verfeinerten Verfahrens, das insbesondere starke Schneereignisse mit geringen Überschreitenswahrscheinlichkeiten in geeigneter Weise berücksichtigt.

Abbildung 165 stellt die resultierenden Analyseergebnisse der betrachteten Stationen in der Übersicht zusammen. In der Darstellung sind die aus den Schneemessdaten abgeleiteten theoretischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen in doppeltlogarithmischer Form über den Schneelastwerten aufgetragen. Die empirischen Werte der Beobachtung sind diesen Werten als Punktgrafiken gegenübergestellt. Tabelle 67 gibt zudem die zum 50-jährigen Ereignis korrespondierende Schneelast *s_k* stationsweise wieder.

Abbildung 165: Extremwertverteilung der Schneelast am Boden

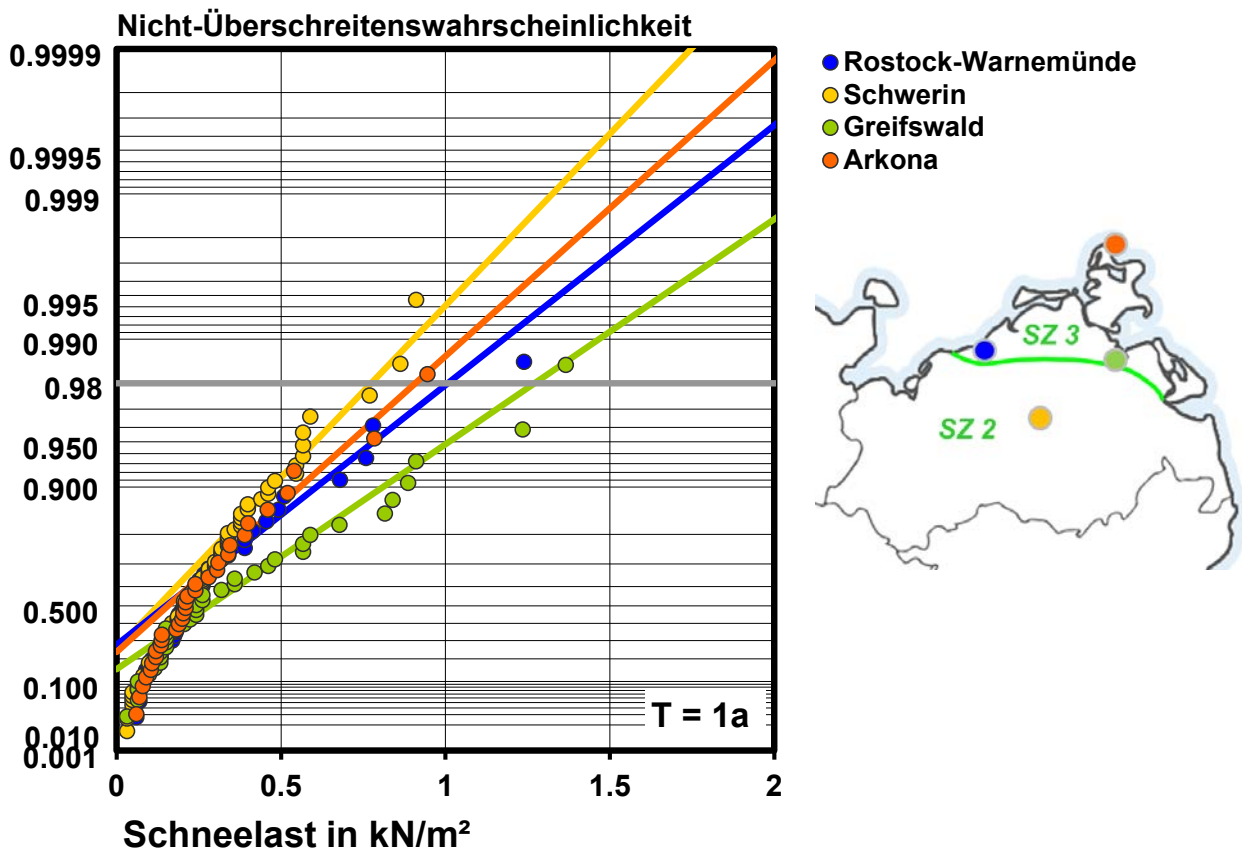


Tabelle 67: Ermittelte charakteristische Werte s_k der Schneelast an den betrachteten Klimastationen

Station	s_k
Arkona	0,91 kN/m ²
Greifswald	1,20 kN/m ²
Rostock	1,01 kN/m ²
Schwerin	0,77 kN/m ²

Tabellenunterschrift, z.B. für Quellenangabe und Anmerkungen

Erwartungsgemäß stellt sich die kleinste charakteristische Schneelast mit $s_k = 0,77 \text{ kN/m}^2$ für die in Schneelastzone 2 liegende Station Schwerin ein. Die maximale Schneelast von $s_k = 1,20 \text{ kN/m}^2$ ergibt sich aus den Daten zur Station Greifswald. Sie überschreitet die Normvorgabe von $1,10 \text{ kN/m}^2$ zur hier relevanten Schneezone 3 mit ca. 10% deutlich. Die weiteren Einzelergebnisse liegen dagegen ausnahmslos unterhalb der zugehörigen Normwerte von $0,85 \text{ kN/m}^2$ bzw. $1,10 \text{ kN/m}^2$. Durch die geographische Nähe ist ein charakteristischer Schneelastwert am Bauwerksstandort gemäß der Station Rostock von $1,01 \text{ kN/m}^2$ zu erwarten, der die Normvorgabe zur Zone 3 vom Grundsatz her bestätigt. Auf der sicheren Seite liegend wird daher zur Erfassung der maßgebenden Schneelasteffekte auf den Tank II die normgemäße charakteristische Schneelast am Boden von $s_k = 1,10 \text{ kN/m}^2$ zur Verwendung empfohlen.

8.5 Anzusetzende Lasten aus Schnee und Eis nach TRAS

Die Ermittlung der anzusetzenden Schnee- und Eislasten entspricht der in Abschnitt 6 und 7 der TRAS geforderten Gefahrenquellenanalyse.

Im Zuge der vereinfachten Gefahrenquellenanalyse nach Abschnitt 6 sind nur diejenigen Gefahrenquellen zu berücksichtigen, die nicht vernünftigerweise auszuschließen sind.

Da es sich bei dem vorliegenden Tank um eine direkt bewittertes Bauteil handelt und zudem für die außenliegenden Bauteile keine dauerhafte Betriebstemperatur $> 0^\circ$ gewährleistet ist, können Scheelasten als Gefahrenquelle nicht vernünftigerweise ausgeschlossen werden.

Die detaillierte Gefahrenquellenanalyse nach Abschnitt 7 der TRAS fordert nun eine Bestimmung der bei der Bemessung anzusetzenden Schnee- und Eislastenlasten. Grundlage hierfür sind die in Abschnitt 8.3 spezifizierten Lasten gemäß der aktuell gültigen Regelwerke, welche auch durch die in Abschnitt 8.4 durchgeführte Standortanalyse bestätigt wurden.

Gegenüber den Spezifikationen von DIN EN 1991-1-3/NA und DIN 1055-4, denen ein Wetterereignis mit 50-jähriger Wiederholungsperiode zugrunde liegt, wird durch die TRAS jedoch die Berücksichtigung eines 100-jähriges Wetterereignisses gefordert. Diese Forderung korrespondiert mit der Einstufung in die Zuverlässigkeitsklasse RC3 und die Versagensfolgeklasse CC3 gemäß DIN EN 1990/NA, wodurch eine Einbettung der erweiterten Regelungen der TRAS in den Kanon der eingeführten technischen Baubestimmungen gelingt.

Umsetzen lässt sich die erhöhte Zuverlässigkeit, indem die nach DIN EN 1991-1-3/NA 3 und DIN 1055-4 (und damit RC2 und CC2) ermittelten Lasten mit einem Erhöhungsfaktor $K_{FI} = 1,1$ belegt werden. Für die Schneelast ist zudem ein möglicher Einfluss des Klimawandels durch eine weitere Lasterhöhung zu berücksichtigen. Dies gilt jedoch nur für den Fall, dass für die betrachtete Anlage eine Nutzung über das Jahr 2050 hinaus vorgesehen ist.

8.5.1 Schneelasten

Die nach der DIN EN 1991-1-3/NA und TRAS anzusetzende Schneelast auf dem Boden ergibt sich somit zu:

$$(132) \quad s_{k,SLZ3,TRAS} = K_{FI} \cdot s_{k,SV} = 1,1 \cdot 1,1 = 1,21 \text{ kN/m}^2$$

Die zu Vergleichszwecken bestimmte Schneelast für Schneelastzone 2 in dem norddeutschen Tiefland ergibt sich zu:

$$(133) \quad s_{k,Auß,TRAS} = K_{FI} \cdot s_{k,Auß} = 1,1 \cdot 1,96 = 2,16 \text{ kN/m}^2$$

als außergewöhnliche Einwirkung.

Da eine Nutzung der Anlage über das Jahr 2050 hinaus nicht vorgesehen ist, ist eine weitere Lasterhöhung zur Berücksichtigung des Klimawandels nicht erforderlich. Die in Abschnitt 8.3 dargestellten Formbeiwerte und Lastanordnungen gelten auch weiterhin.

8.5.2 Eislasten

Analog zu den Schneelasten sind auch die Eislasten mit dem Faktor $K_{FI} = 1,1$ zu erhöhen. Hierbei sollten nicht die Wichte des Eises sondern die Abmessungen des Eisansatzes mit dem Erhöhungsfaktor belegt werden.

8.6 Vergleich der Lasten aus Schnee und Eis gemäß TRAS mit den Bestandslasten

8.6.1 Schneelasten

Ausgehend von der vorangegangenen Lastermittlung erfolgt nun eine Beurteilung, ob die gemäß der DIN EN 1991-1-3/NA und TRAS anzusetzenden Lasten durch die in der Bestandsplanung vermutlich zugrunde gelegten Lasten abgedeckt sind.

Die Bestandsschneelasten gemäß TGL werden dabei vereinfacht als charakteristische Lasten im Sinne von DIN EN 1991-1-3/NA und TRAS betrachtet und einheitlich im Rahmen des Sicherheitskonzept der aktuellen Regelwerke mit den neuen Lasten verglichen. Dies stellt eine Vereinfachung dar, ist jedoch für eine Abschätzung des Einflusses der Schneelasten sowohl hinreichend als auch zweckmäßig. Um eine Vergleichbarkeit im Hinblick auf die Bemessungswerte zu gewährleisten, werden die erhöhten Schneelasten für das norddeutsche Tiefland durch den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_s = 1,5$ der ständigen und vorübergehenden Einwirkungskombination geteilt.

Abbildung 166: Vergleich der Schneelasten nach TGL 20167 und DIN EN 1991-1-3/NA plus TRAS für SLZ 3

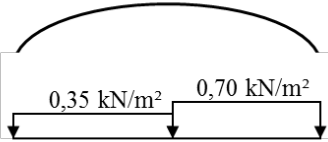
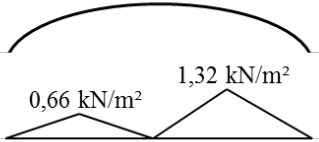
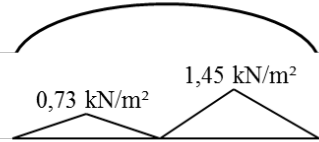
Schneelast s_k	TGL 20167	DIN EN 1991-1-3/NA SLZ 3	DIN EN 1991-1-3/NA + TRAS SLZ 3
gleichmäßig	0,70 kN/m ²	0,88 kN/m ²	0,97 kN/m ²
ungleichmäßig	 Annahme		

Abbildung 167: Vergleich der Schneelasten nach TGL 20167 und DIN EN 1991-1-3/NA plus TRAS für SLZ 2 plus norddeutsches Tiefland

Schneelast s_k	TGL 20167	DIN EN 1991-1-3/NA SLZ 2 + nordt TL	DIN EN 1991-1-3/NA + TRAS SLZ 2 + nordt TL
gleichmäßig	0,70 kN/m ²	1,05 kN/m ²	1,15 kN/m ²
ungleichmäßig	<p>Annahme</p>	<p>$/\gamma_s = 1,5$</p>	<p>$/\gamma_s = 1,5$</p>

SLZ: Schneelastzone

Nordt. TL.: Besondere Anforderungen für das norddeutsche Tiefland nach DIN EN 1991-1-3 nationaler Anhang

Aus Abbildung 166 und Abbildung 167 ist ersichtlich, dass sich sowohl für die am Standort anzusetzende Schneelastzone 3, als auch für eine vergleichsweise Einstufung in Schneelastzone 2 in dem norddeutschen Tiefland die Schneelasten signifikant erhöhen. Maßgebend für die Beurteilung der Bestandskonstruktion ist jedoch nicht die Erhöhung der Schneelast alleine, sondern vielmehr die Erhöhung der jeweils maßgebenden Bemessungslast als Kombination aus ständigen Lasten, Windlasten, Eis- und Schneelasten und ggf. weiteren veränderlichen Einwirkungen (vgl. Tabelle 68 und Tabelle 69).

Die Beurteilung des Einflusses erhöhter Schneelasten erfolgt sinnvoller Weise im Zuge einer Identifizierung von gefährdeten Bauteilen bei deren Versagen das Austreten gefährlicher Stoffe und damit das Eintreten eines Störfalls im Sinne der TRAS zu befürchten ist. Dies entspricht sinngemäß der in der TRAS Kapitel 8 (Ermittlung der sicherheitsrelevanten, gefährdeten Teile des Betriebs und der Anlagen) und Kapitel 9 (Ermittlung der Störfalleintrittsvoraussetzungen) geforderten Vorgehensweise.

Der Einfluss der erhöhten Schneelasten auf die Gründungskonstruktion kann ohne weiteres als vernachlässigbar eingestuft werden. Darüber hinaus kann angenommen werden, dass die erhöhten Vertikallasten für die Bemessung der Tankwand gegenüber den horizontalen Lasten aus Wind, Füllung und Temperatur nur eine untergeordnete Rolle spielen. Im Rahmen dieses Beispiels wird daher auf eine genauere Untersuchung der Gründung und der Tankwand verzichtet.

8.6.2 Weitere Lasten für die Dachkonstruktion

Die Beurteilung der Gefährdung der Dachkonstruktion erfordert die Ermittlung weiterer relevanter Lasten, wie im Folgenden dargestellt:

Dachhaut:

$g_{1,k} = 0,4 \text{ kN/m}^2$ aus Bestandsplänen abgeschätzt

Dachkonstruktion (Sparren, Verbände, Zug-, Druckring):

$g_{2,k} = 0,35 \text{ kN/m}^2$ aus Bestandsplänen abgeschätzt

8.6.3 Winddruck auf Dachhaut

Für Betrachtung der Dachkonstruktion wird eine ungünstig wirkende Winddruckkraft angesetzt. Aufgrund des relativ geringen Einfluss der Windlast auf die Dachbemessung erfolgt eine vereinfachte Abschätzung mit folgenden Kenndaten:

Standort :	Windlastzone 3 und Küste	gemäß DIN EN 1991-1-3/NA
Böengeschwindigkeitsdruck:	$q_p = 1,2 \text{ kN/m}^2$	gemäß DIN EN 1991-1-3/NA, vereinfachtes Verfahren
Druckbeiwert:	$c_{pe,10} \approx 0,18$	gemäß DIN EN 1991-1-3/NA, abgeschätzt für ein kreiszylindrisches Dach
Erhöhungsfaktor:	$K_{FE} = 1,1$ gemäß TRAS	
Windlast:	$w_k = 1,2 \cdot 0,18 \cdot 1,1 = 0,24 \text{ kN/m}^2$	

8.6.4 Verkehrslasten

Es wird angenommen, dass die Dachkonstruktion nur zu Wartungszwecken begangen wird. Da diese Verkehrslasten eine geringere Größe aufweisen als die Schneelasten und auch nicht gleichzeitig mit diesen angenommen werden müssen, kann auf eine weitere Berücksichtigung verzichtet werden.

8.6.5 Temperaturbeanspruchung

Eine Temperaturbeanspruchung durch Betrieb oder Sonneneinstrahlung wird im vorliegenden Beispiel nicht betrachtet, da angenommen werden kann, dass eine solche nicht mit der hier zu untersuchenden Schneebelastung zusammenwirkt.

8.6.6 Beanspruchung aus Innendruck

Eine zusätzliche Beanspruchung aus Innendruck bei Tankentleerung wird zunächst nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass das Zusammenwirken von Schnee und Innendruck durch betriebliche (keine Tankentleerung unter Schneelasten/Räumung) oder konstruktive Maßnahmen (z. B. Entlastungsventile) vermieden wird (siehe Abschnitt 8.7).

8.6.7 Maßgebende Einwirkungskombinationen

Aufgrund der zu berücksichtigenden Schneelastregelung für das norddeutsche Tiefland sind zwei Einwirkungskombinationen zu berücksichtigen. Der Schnee ist in beiden Kombinationen als maßgebende Leiteinwirkung erfasst.

Ständige und vorübergehende Einwirkungskombination:

$$(134) \quad q_d = 1,35 \cdot g_k + 1,5 \cdot s_k + 1,5 \cdot 0,6 \cdot w_k$$

Außergewöhnliche Einwirkungskombination:

$$(135) \quad q_d = 1,0 \cdot g_k + 1,0 \cdot s_k + 1,0 \cdot 0 \cdot w_k$$

8.6.8 Lastvergleich für die Gefahrenquelle Schnee

Alle Haupttragelemente d.h. Dach, Wände und Gründung sind als sicherheitsrelevant einzustufen. Die Auswirkung der erhöhten Schneelast auf die für die Bemessung maßgebende Beanspruchung stellt sich bei den verschiedenen Bauteilen jedoch deutlich unterschiedlich dar.

Tabelle 68: Bauteilabhängige Erhöhung der bemessungsrelevanten Beanspruchung und Gefahren durch Schneelasten für SLZ 2 und norddeutsches Tiefland

Steigerung der Beanspruchung	Bestand (TGL 20167)	Lasten DIN EN 1991-1-3/NA (SLZ 3)	Lasten DIN EN 1991-1-3/NA und TRAS (SLZ 3)	Gefahr
Schneelasten	-	26%	39%	-
Dachhaut	-	29%	39%	möglich
Dachkonstruktion	-	23%	30%	möglich
Wand	-	gering ^{a)}	gering ^{a)}	gering
Gründung	-	vernachlässigbar	vernachlässigbar	keine

a) Beanspruchung aus Wind, Temperatur und Füllung maßgebend

Tabelle 69: Bauteilabhängige Erhöhung der bemessungsrelevanten Beanspruchung und Gefahren durch Schneelasten für SLZ 3

Steigerung der Beanspruchung	Bestand (TGL 20167)	Lasten DIN EN 1991-1-3/NA (SLZ 2 und norddeutsches Tiefland)	Lasten DIN EN 1991-1-3/NA und TRAS (SLZ 2 und norddeutsches Tiefland)	Gefahr
Schneelasten	-	49%	64%	-
Dachhaut	-	24%	33%	möglich
Dachkonstruktion	-	12%	20%	möglich
Wand	-	gering ^{a)}	gering ^{a)}	gering
Gründung	-	vernachlässigbar	vernachlässigbar	keine

a) Beanspruchung aus Wind, Temperatur und Füllung maßgebend

Die Kategorisierung der Gefahren erfolgt in Übereinstimmung mit Abschnitt 8.1.2 der TRAS zunächst nur im Hinblick auf die Lasterhöhung durch Schnee und unabhängig von der konstruktiven Durchbildung der Bauteile und ggf. vorhandener Tragreserven. Die Höhe der Gefahr ist nicht nur abhängig von der Höhe der Laststeigerung am einzelnen Bauteil sondern muss auch hinsichtlich der Anlagensicherheit (Ereignis-, Szenarien- und Auslegungsbetrachtungen) erfolgen.

Aus Tabelle 68 und Tabelle 69 ist ersichtlich, dass sich sowohl für die Dachhaut als auch für die anderen Teile der Dachkonstruktion eine signifikante Erhöhung der Beanspruchungen ergibt. Die Erhöhung fällt zudem in Schneelastzone 3 und Schneelastzone 2 in dem norddeutschen Tiefland ähnlich aus, da der Einfluss der höheren charakteristischen Schneelast in der Schneelastzone 2 durch die Anwendung der außergewöhnlichen Einwirkungskombination bei der Bestimmung der Bemessungslasten ausgeglichen wird.

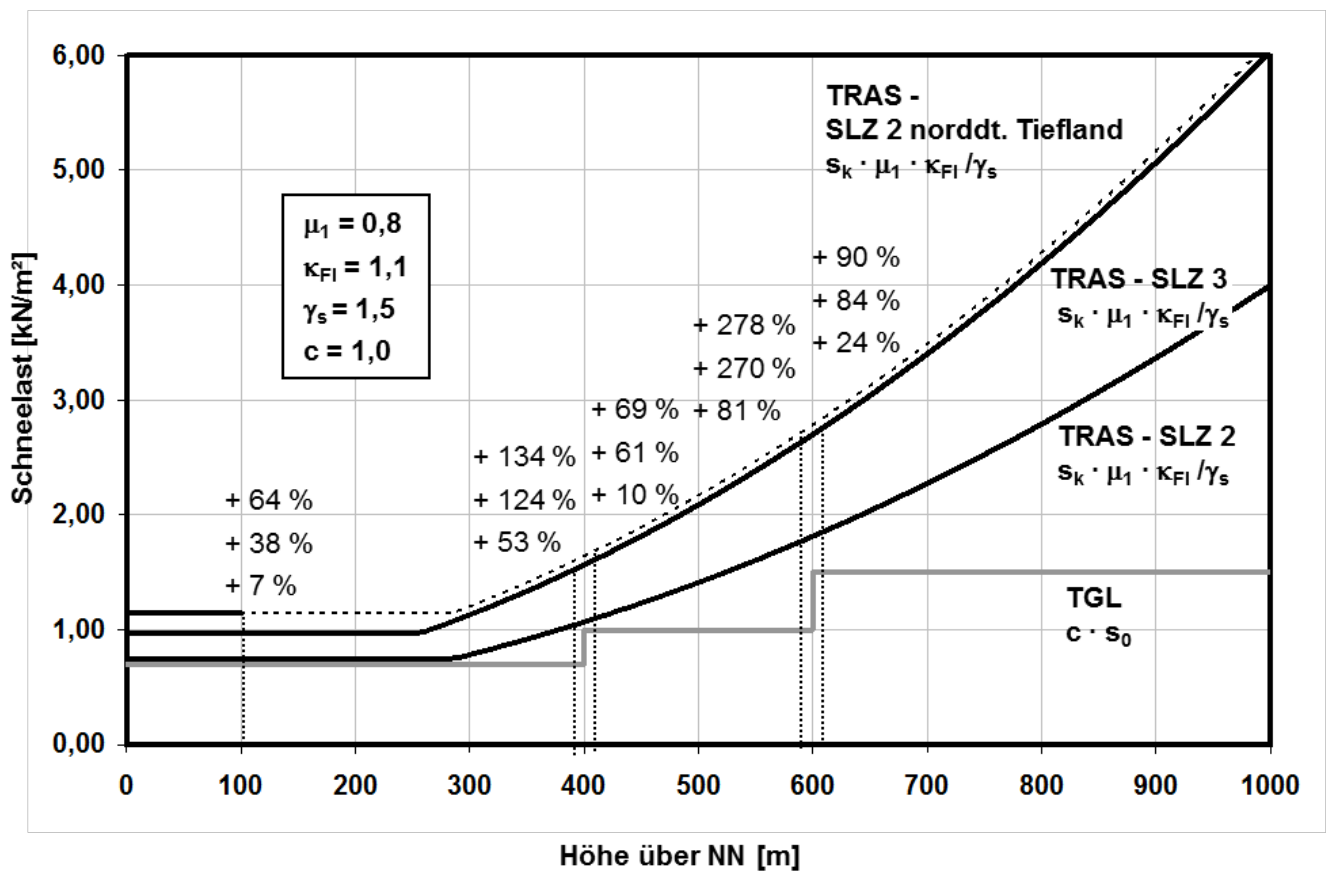
Die Gefährdung der Dachkonstruktion durch die Gefahrenquelle Schnee wird daher als gegeben eingestuft. Die Tatsache, dass in der ständigen und vorübergehenden Einwirkungskombination die Erhöhung der Bemessungslast größer ausfällt als die Erhöhung der Schneelast ist darin begründet, dass hier nach DIN EN 1991-1-3/NA auch eine gleichzeitig wirkende Winddruckkraft anzusetzen ist, welche gemäß TGL 20167 nicht anzusetzen ist.

Abbildung I68 zeigt informativ noch einen Überblick, wie sich die Schneelasterhöhung auf dem Tank in anderer geographischer Lage innerhalb des Staatsgebiets der ehemaligen DDR darstellen würde. Zur Vergleichbarkeit sind die tank-spezifischen Formbeiwerte bereits in die Schneelasten eingerechnet, ebenso wie der Teilsicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung der außergewöhnlichen Einwirkungskombination in dem norddeutschen Tiefland.

Es ist zu erkennen, dass die Schneelasterhöhung der DIN EN 1991-1-3/NA und TRAS gegenüber der TGL mit zunehmender NN-Höhe ebenfalls ansteigt. Besonders ausgeprägt stellt sich die Erhöhung im sprunghaften Übergangsbereich der Schneezonen der TGL dar.

Bei der Auswertung von Abbildung 168 ist jedoch zu beachten, dass lediglich die Erhöhung der, um die Teilsicherheitsbeiwerte bereinigten, Schneelast dargestellt ist. Für die bei der Bauteilbemessung maßgebende Bemessungslast als Kombination der Schneelasten mit weiteren ständigen und veränderlichen Einwirkungen stellt sich der Unterschied fallspezifisch anders da. Dies gilt besonders für die SLZ 2 in dem norddeutschen Tiefland, da hier der Ansatz des Schnees als außergewöhnliche Einwirkung auch die Anwendung der außergewöhnlichen Einwirkungskombination bedingt.

Abbildung 168: Vergleich der Schneelast auf flachen Dächern in den neuen Bundesländern gemäß TGL 20167 und TRAS Wind-Schnee-Eis



8.6.9 Lastvergleich für die Gefahrenquelle Eis

Für die Haupttragkonstruktion ergibt sich kein signifikanter Einfluss durch die Eislasten. Zu erwarten ist ein Einfluss lediglich für dünne, stabförmige Bauteile wie sie an den außen angebrachten Geländern, Treppen und Rohrleitungen vorzufinden sind. Da bei einem Versagen der Geländer- und Treppenkonstruktionen kein Störfalleintritt zu befürchten ist, sind nur die Rohrleitungen ggf. im Sinne der TRAS als gefährdet einzustufen.

Tabelle 70: Bauteilabhängige Erhöhung der bemessungsrelevanten Beanspruchung und Gefahren durch Eislasten

Steigerung der Beanspruchung	Bestand (TGL 20167)	Lasten DIN 1055-5	Gefahr
Rohrleitungen	-	vorhanden	möglich
Haupttragkonstruktion	-	-	keine

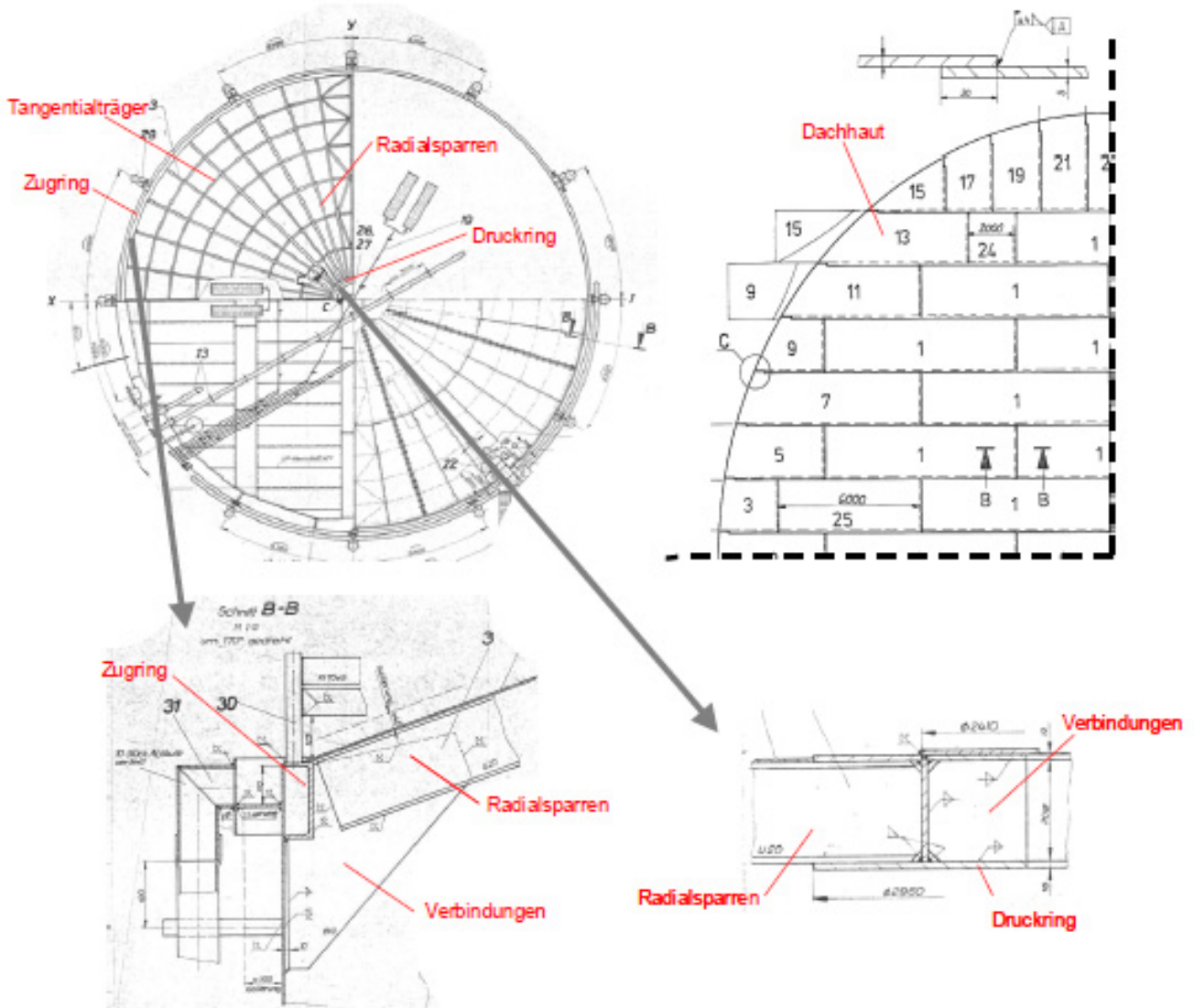
Eine Beurteilung der Gefährdung erfordert eine detailliertere Betrachtung der Rohrleitungen und deren Befestigungen unter kombiniertem Ansatz von Wind- und Schneelasten. Aufgrund des resultierenden großen Umfangs der Untersuchung in Verbindung mit den unzureichenden vorliegenden Informationen über die konstruktive Durchbildung der Rohrleitungen muss im Rahmen dieses Beispiels auf eine solche Betrachtung verzichtet werden.

8.7 Überschlägiger Nachweis der maßgeblichen Haupttragelemente für die nach DIN EN 1991-1-3/NA und TRAS anzusetzenden Lasten

8.7.1 Allgemeines

Aus den vorangegangenen Betrachtungen ist ersichtlich, dass nicht per se angenommen werden kann, dass der betrachtete Tank die Schutzziele der TRAS erfüllt. Als Konsequenz sind gemäß Kapitel 10 B)a) der TRAS innerhalb von 5 Jahren nach deren Bekanntgabe die maßgeblichen Konstruktionsteile für die in der TRAS vorgeschriebenen Lasten für 100-jährige Wind-, Schnee- und Eisereignisse nachzuweisen. Die Bemessung darf jedoch auch nach den Regelwerken erfolgen, die zum Zeitpunkt der letzten Erteilung einer Genehmigung galten. Kann der Nachweis nicht geführt werden, muss spätestens zehn Jahre nach Bekanntgabe der TRAS eine Sanierung durchgeführt werden, welche eine Anpassung an den Stand der Technik oder Sicherheitstechnik gewährleistet.

Abbildung 169: Haupttragglieder der Dachkonstruktion



Für den betrachteten Tank liegt der in Kapitel 10 B)d) der TRAS beschriebene Fall vor, dass ein Nachweis (zunächst) nicht geführt werden kann, da nur unzureichende Unterlagen vorgefunden wurden. So liegen beispielsweise weder eine statische Berechnung noch detaillierte Konstruktionspläne vor. Eine zweifelsfreie Identifizierung aller relevanten Trägerprofile, Materialgüten und konstruktiven Durchbildungen von Verbindungen ist daher nach aktuellem Informationsstand nicht möglich.

Laut der TRAS muss in einem solchen Fall einem rechnerischen Nachweis eine Überprüfung der Konstruktion vorausgehen, die durch eine besonders fachkundige Person gemäß VDI 6200 Kapitel II durchgeführt wird. Inhalt dieser Überprüfung muss neben der Ermittlung fehlenden wesentlicher Informationen auch eine Bewertung der Integrität der tragenden Bauteile sein.

Obwohl ein vollständiger statischer Nachweis der Konstruktion im Sinne der TRAS im Rahmen dieses Beispiels nicht geführt werden kann, soll dennoch eine überschlägige Bemessung der Tragwerksteile erfolgen, welche im Hinblick auf eine Schneebelastung gemäß TRAS als gefährdet einzustufen sind. Als im Wesentlichen kritischer Tragwerksteil konnte hier in Abschnitt 8.6 bereits die Dachkonstruktion bestimmt werden. Deren überschlägige Nachrechnung basiert nun auf den auf folgenden Grundlagen:

1. vorliegende Planunterlagen (Übersichts-/Positionsplan, Ausführungsplan der neuen Dachhaut)
2. Bericht einer internen Überprüfung des Tanks
3. zusätzliche Angaben seitens des Betreibers
4. in den Abschnitten 8.2 und 8.5 ermittelte Lasten
5. sinnvolle Annahmen

Für das maßgebende Dachtragwerk wird aus den vorliegenden Informationen nun die in Abbildung I69 dargestellte Konstruktion, bestehend aus 6 Haupttraggliedern, abgeleitet und nachgewiesen. Auf Basis des vom Betreiber vorgelegten Berichts einer internen Überprüfung wird angenommen, dass sich die Konstruktion in einem guten Erhaltungszustand befindet und keine nennenswerten Schäden aufweist und daher die Lastreserven der Bauteile in vollem Umfang ausgenutzt werden können. Da eine Bemessung auf Basis der zum Zeitpunkt der Bestandsauslegung gültigen Regelwerke für die vorliegende Konstruktion keine wesentlichen Vorteile erwarten lässt, erfolgt die Bemessung vollständig im Rahmen der bauaufsichtlich eingeführten Eurocodes. Gebrauchstauglichkeitsaspekte werden dabei nicht betrachtet.

Aufgrund der unvollständigen Datenlage ist eine solche "vorab" durchgeführte Überschlagsrechnung zwangsläufig mit gewissen Unsicherheiten behaftet und kann ggf. in Teilen durch eine später durchgeführte detaillierte Analyse revidiert werden.

Dennoch lassen sich - neben didaktischen Gründen im Rahmen des vorliegenden Beispiels - einige wesentliche Erkenntnisse gewinnen. Wie etwa:

Identifizierung kritischer Bauteile und fehlender wesentlicher Informationen, welche im Rahmen der örtlichen Überprüfung und der nachfolgenden detaillierten Nachrechnung gezielt zu untersuchen bzw. zu ermitteln sind.

Ableitung eines Trends bezüglich des zu erwartenden Ergebnisses der detaillierten Nachrechnung und möglicherweise erforderlicher konstruktiver und betrieblicher Maßnahmen zur Einhaltung der angestrebten Schutzziele, und damit eine erhöhte Planungssicherheit.

Zumindest Ableitung eines groben Trends bezüglich anderer Konstruktionen mit ähnlichen Randbedingungen.

Im Folgenden werden nun die Nachrechnungen der angegebenen Haupttragglieder und deren Ergebnisse beschrieben.

8.7.2 Dachhaut

Die Dachhaut wurde 1997 durch eine neue Konstruktion ersetzt. Ein statischer Nachweis der Dachhaut liegt nicht vor, es konnte jedoch ein Ausführungsplan eingesehen werden (siehe Abbildung I69). Die Dachhaut besteht aus rechteckigen 5 mm dicken Stahlplatten der Festigkeitsklasse S235. Die Platten sind orthogonal verlegt und mit 4 mm Kehlnähten an allen Rändern verbunden. Aus dem vorgelegten Plan ist nicht ersichtlich, ob die Dachhaut auch auf den Tangentialträgern aufgelagert ist. Die Aufteilung der Platten lassen eine solche Annahme jedoch sinnvoll erscheinen. Dies gilt speziell im Hinblick auf die Tatsache, dass die ausgeführten Kehlnähte lediglich über $(0,4/0,5)^2 \cdot (20,8/21,5) \cdot 100 = 62 \%$ der Momenten Tragfähigkeit der Bleche verfügen.

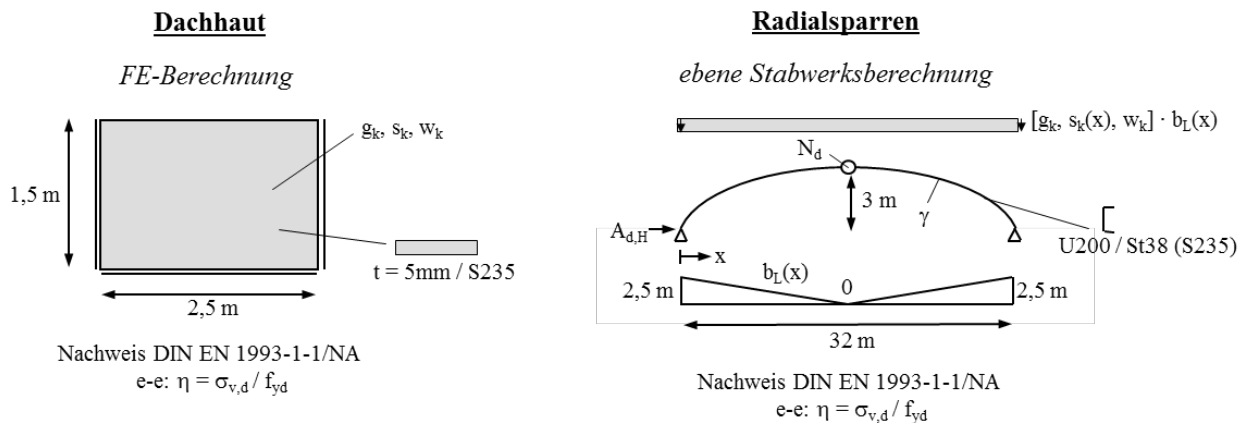
Der Nachweis erfolgt für eines der Außenfelder, da diese aufgrund ihrer Abmessungen maßgebend sind. Der Nachweis erfolgt elastisch-elastisch nach DIN EN 1993-1-1/NA mittels einer Finite-Elemente-Berechnung, wobei als statisches

System eine vierseitig gelagerte und dreiseitig eingespannte Platte angesetzt wird (Abbildung 170). Auf den günstig wirkenden Ansatz einer Durchlaufwirkung wird vereinfachend verzichtet. Diese Annahme liefert sehr konservative Ergebnisse, zumal die Dachhaut über erhebliche plastische Reserven sowohl auf Querschnitts- als auch auf Systemebene verfügt. Die Querschnittsschwächungen im Bereich der Schweißnähte werden allerdings vernachlässigt, da sich diese immer nur lokal im Bereich der größten Belastungen befinden, was durch örtliche Plastifizierungen ausgeglichen werden kann.

Selbst bei der gewählten konservativen Nachweisführung liegen die ermittelten Ausnutzungen der Dachhauttragfähigkeit nur bei etwa 45% für die Bestandslasten und etwa 55% für die erhöhten Lasten nach DIN EN 1991-1-3/NA und etwa 60% bei zusätzlicher Berücksichtigung der TRAS.

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen kann die Dachhaut zunächst als eher unkritisch zur Aufnahme der erhöhten Lasten eingestuft werden.

Abbildung 170: Statische Systeme für den Nachweis von Dachhaut und Radialsparren



8.7.3 Radialsparren

Für die Sparren liegen keine Konstruktionspläne oder statische Nachweise vor. Dem vorhandenen Übersichtsplan ist lediglich eine mit U200 ausgewiesene Profilbezeichnung zu entnehmen. Auf Grundlage eines Abgleichs mit historischen Bautabellen sollte dies der aktuellen Profilbezeichnung eines U200 entsprechen, dessen Querschnittswerte für den Nachweis angesetzt werden. Angaben zur Stahlgüte finden sich ebenfalls nicht. Es wird daher von einem St38 ausgegangen, welches einem heutigen S235 entspräche.

Als statisches System für die Sparren wird ein, aus jeweils zwei Sparren gebildetes, Bogentragwerk angenommen (Abbildung 170). Für die dem Übersichtsplan zu entnehmenden Ausbildungen von Trauf- und Firstpunkt ist von einer gelenkigen Sparrenausbildung auszugehen. Die in Abschnitt 8.6 ermittelten Flächenlasten werden mit der vom First zur Traufe veränderlichen Lasteinzugsbreite multipliziert. Das Eigengewicht der Sparren wird dabei aus den in Abschnitt 8.6 angegebenen Lasten ermittelt und konstant über die Trägerlänge angesetzt.

Der Nachweis erfolgt zunächst elastisch-elastisch gemäß DIN EN 1993-1-1/NA mittels eines Stabwerksprogramms. Dabei wird angenommen, dass durch die Radialsparren in Verbindung mit den vorhandenen Verbänden sowie durch den (nicht bekannten) Anschluss an die Dachhaut ein Stabilitätsversagen für die geringe verbleibende Knicklänge von weniger als 1,5 m nicht maßgebend wird. Auf Grundlage dieser Annahmen ergibt sich für die Bestandslasten eine Profilausnutzung von etwa 85 %. Die vorhandenen Tragreserven von etwa 15 % erscheinen im Hinblick auf die Abstufung der Walzprofile und ggf. vorhandene geometrische Randbedingungen bei der Profilwahl plausibel.

Bei Ansatz der Lasten gemäß DIN EN 1991-1-3/NA und ebenso bei der zusätzlichen Berücksichtigung der TRAS ergibt sich dagegen, dass die Tragfähigkeit geringfügig überschritten ist. Aufgrund der Einstufung des Profils in Querschnittsklasse I könnten über einen Nachweis nach dem Verfahren elastisch-plastisch gemäß DIN EN 1993-1-1/NA (geringfügige) Tragreserven auf Querschnittsebene berücksichtigt werden. Für $\alpha = W_{pl}/W_{el} = 1,05$ befindet sich die Ausnutzung der Sparren in einem vertretbaren Bereich.

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen müssen die Radialsparren zunächst als kritisch zur Aufnahme der erhöhten Lasten eingestuft werden.

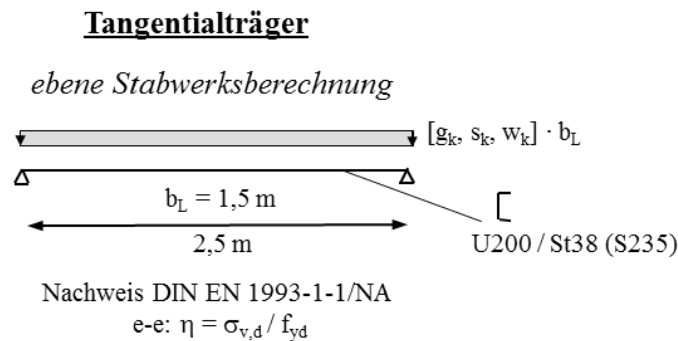
8.7.4 Tangentialträger

Bezüglich der Ausbildung der Tangentialträger liegen keine Angaben vor. Verwendete Profile, Materialgüte und Ausbildung der Anschlüsse sind nicht bekannt. Für eine erste Abschätzung wird daher angenommen, dass aus konstruktiven Gründen dieselben Profile wie für die Radialträger verwendet wurden, und diese gelenkig an die Radialsparren angeschlossen sind (Abbildung 171). Auf diese Weise ergibt sich für eine Nachweisführung elastisch-elastisch nach DIN EN 1993-1-1/NA selbst für die erhöhten Lasten nach DIN EN 1991-1-3/NA und bei einer zusätzlichen Berücksichtigung der TRAS eine vernachlässigbare Ausnutzung von unter 10%.

Selbst wenn man in Betracht zieht, dass die Profile ggf. eine geringere als die angenommene Tragfähigkeit aufweisen und dass die Träger noch durch Drucknormalkräfte aus der Aussteifung belastet werden, ist eine ausreichende Tragfähigkeit der Träger auch unter erhöhten Lasten anzunehmen. Eine solch geringe Ausnutzung erscheint durchaus plausibel, wenn man annimmt, dass der Trägerabstand und das Profil eher unter konstruktiven Gesichtspunkten (Anschlüsse) und im Hinblick auf eine hinreichende Reduzierung der Knicklänge der Radialsparren gewählt worden sind.

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen können die Tangentialträger zunächst als unkritisch zur Aufnahme der erhöhten Lasten eingestuft werden.

Abbildung 171: Statische Systeme für den Nachweis der Tangentialträger



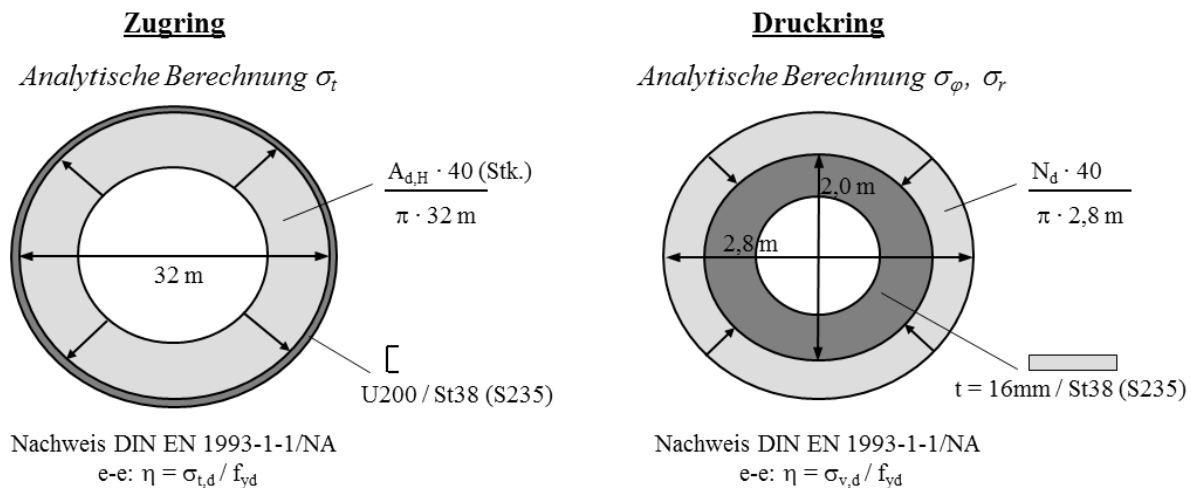
8.7.5 Zugring

Zur Aufnahme der "Kämpferkräfte" des angenommenen Bogensystems der Radialsparren ist ein umlaufender Zugring an der Traufe erforderlich. Das Vorhandensein eines entsprechenden Profils lässt sich dem Übersichtsplan entnehmen. Es findet sich zwar keine Profilbezeichnung, aufgrund der Maßstäblichkeit der Zeichnung kann jedoch davon ausgegangen werden, dass es sich auch hier um ein U20 (alte Bezeichnung) respektive U200 (neue Bezeichnung) handelt. Da sich zur Stahlgüte keine Angaben finden, wird auch hier ein St 38 (S 235) angenommen. Angaben zur Stoßausbildung des Zugrings liegen nicht vor.

Der Nachweis des Zugrings erfolgt auf Grundlage der Kesselformel. Die Kämpferkräfte der Sparren werden hierzu auf den Umfang des Kreisrings verschmiert (Abbildung 172). Dabei wird angenommen, dass geringfügige Biegebeanspruchungen durch die tatsächlich nicht kontinuierliche Lastenleitung aus den Sparren durch Querschnittsplastifizierungen abgebaut werden. Die so bestimmten Ausnutzungen liegen bei etwa 75% für die Bestandslasten. Für die erhöhten Lasten ist die Tragfähigkeit mit 85% bei Lasten nach DIN EN 1991-1-3 und mit 90% Ausnutzung bei zusätzlicher Berücksichtigung der TRAS noch nachweisbar. Es ist jedoch zu beachten, dass der Zugring gleichzeitig eine Steife auf dem oberen Rand der Tankwand darstellt, und als solche eine zusätzliche Beanspruchung erfährt. Eine realistische Ermittlung dieser zusätzlichen Belastung erfordert eine vollständige Berechnung des gesamten Tanks unter Berücksichtigung weiterer Lastfälle wie Wind auf die Tankwand, Füllung und Temperaturbeanspruchung.

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen muss der Zugring zunächst als kritisch zur Aufnahme der erhöhten Lasten eingestuft werden.

Abbildung 172: Statische Systeme für den Nachweis von Zug- und Druckring



8.7.6 Druckring

Die druckfeste, gelenkige Verbindung der Sparren am Firstpunkt wird über kreisringförmige, ausgesteifte Bleche gebildet (vgl. Abbildung 169). Dabei wird angenommen, dass die eigentliche Kraftübertragung nur über das durchgängige 16 mm starke untere Blech erfolgt. Ein Beulversagen des druckbeanspruchten Blechs wird aufgrund der umlaufend angeordneten Steifen als nicht maßgebend angenommen. Resultierend können die Spannungen im Blech durch in der Literatur angegebene analytische Beziehungen ermittelt werden. Die Vergleichsspannung für den Nachweis wird auf der sicheren Seite liegend mit den Maximalwerten der Spannungskomponenten gebildet, auch wenn diese an unterschiedlichen Stellen auftreten.

Die so ermittelte Ausnutzung liegt bei etwa 40% für die Bestandslasten, bei etwa 45% für die erhöhten Lasten nach DIN EN 1991-1-3/NA und bei etwa 50% bei der zusätzlichen Berücksichtigung der TRAS.

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen kann der Druckring zunächst als eher unkritisch zur Aufnahme der erhöhten Lasten eingestuft werden.

8.7.7 Verbindungen

Den Plänen ist lediglich die Bauart der - vollständig geschweißt ausgeführten - Verbindungen der Radialsparren an den Zugring und die Ausbildung des Firstpunktes zu entnehmen (Abbildung 169). Es finden sich in den Plänen jedoch keine Angaben zu Schweißnahtdicken und -werkstoffen. Ein Nachweis ist daher nicht möglich. Eine überschlägige Abschätzung zeigt jedoch, dass die Knotenpunkte für praxisübliche Schweißnahtdicken und Materialien nachweisbar wären.

Da darüber hinaus die grundsätzliche Ausführung der Knotenpunkte keinen Anlass für Bedenken liefert, können die Knotenpunkte zunächst als voraussichtlich nur gering kritisch eingestuft werden.

8.7.8 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des überschlägigen Dachnachweises lassen sich in die drei oben genannten Aspekte aufspalten.

Im Rahmen der örtlichen Überprüfung und der nachfolgenden detaillierten Nachrechnung ist bezüglich des Dachtragwerks folgendes gezielt zu untersuchen bzw. zu ermitteln:

1. stimmt die Konstruktion mit den vorliegenden Planungsunterlagen überein
2. erlaubt ein Zustand der Bauteile tatsächlich eine volle Ausnutzung der Tragreserven
3. Schweißnahtdicken der Knotenpunkte an Traufe und First
4. Durchbildung Anschlüsse der Tangentialträger an die Radialsparren
5. Materialgüte der Walzprofilträger
6. Einfluss der Wandbemessung auf die Tragfähigkeit der Ringsteife

Einen Trend bezüglich des zu erwartenden Ergebnisses der detaillierten Nachrechnung gibt Tabelle 71 und Tabelle 72 wieder, in welcher eine aus den Nachweisen abgeleitete Kategorisierung der Haupttragglieder angegeben ist. Im Gegensatz zur Kategorisierung in Tabelle 68 und Tabelle 69 sind hier nicht nur die Erhöhungen der Belastung berücksichtigt, sondern auch die Ausführung der Konstruktion und ggf. vorhandene Tragreserven.

Die vergleichsweise durchgeführte Bemessung für eine Einstufung des Standorts in Schneelastzone 2 in dem norddeutschen Tiefland liefert dabei vergleichbare Ergebnisse wie die für den Standort tatsächlich zutreffende Einstufung in Schneelastzone 3.

Tabelle 71: Ergebnis der Bauteilnachrechnung und Beurteilung der einzelnen Bauteile für SLZ 3

Ausnutzung der Tragfähigkeit	Bestand (TGL 20167)	DIN EN 1991-1-3/NA - SLZ 3	DIN EN 1991-1-3/NA plus TRAS - SLZ 3	Beurteilung
Dachhaut	~ 45%	~ 55%	~ 60%	unkritisch
Radialsparren	~ 85%	~ 100%	~ 105%	kritisch
Tangentialträger	< 10%	< 10%	< 10%	unkritisch
Zugring	~ 75%	~ 85%	~ 90%	kritisch^{a)}
Druckring	~ 40%	~ 45%	~ 50%	unkritisch
Verbindungen	unbekannt	unbekannt	unbekannt	voraussichtlich nur gering kritisch

a) aufgrund der zusätzlichen Belastung aus Funktion als Wandsteife kritisch einzustufen

Tabelle 72: Ergebnis der Bauteilnachrechnung und Beurteilung der einzelnen Bauteile für SLZ 2 plus Regelung für das norddeutsche Tiefland

Ausnutzung der Tragfähigkeit	Bestand (TGL 20167)	DIN EN 1991-1-3/NA – SLZ 2 + norddt. TL	DIN EN 1991-1-3/NA + TRAS - SLZ 2 + norddt. TL	Beurteilung
Dachhaut	~ 45%	~ 55%	~ 60%	unkritisch
Radialsparren	~ 85%	~ 95%	~ 105%	kritisch
Tangentialträger	< 10%	< 10%	< 10%	unkritisch
Zugring	~ 75%	~ 75%	~ 80%	kritisch^{a)}
Druckring	~ 40%	~ 45%	~ 45%	unkritisch
Verbindungen	Unbekannt	unbekannt	unbekannt	voraussichtlich nur gering kritisch

a) aufgrund der zusätzlichen Belastung aus Funktion als Wandsteife kritisch einzustufen

Bezüglich erforderlicher betrieblicher Maßnahmen ist anzumerken, dass ein bei Tankentleerung ggf. wirkender Innendruck bei der Nachrechnung nicht gleichzeitig mit den Schneelasten angesetzt wurde. Setzt man für den Innendruck die auf dem Übersichtsplan angegebene maximale Größe von 100 mm WS (1 kN/m²) an, so liegt der Innendruck in einer ähnlichen Größenordnung wie die Schneelast. Dies würde bei gleichzeitigem Ansatz mit den Schneelasten bereits für die Bestandslasten zu einer Überschreitung der rechnerischen Tragfähigkeit der Sparren und des Zugrings führen. Falls sich die oben getroffenen Berechnungsannahmen nicht als deutlich zu ungünstig erweisen, sollte ein gleichzeitiges Wirken

von Innendruck und Schneelasten durch betriebliche (keine Tankentleerung unter Schneelasten/Räumung) oder konstruktive Maßnahmen (z. B. Entlastungsventile, falls mit Anforderungen an den Explosionsschutz vereinbar) vermieden werden. Wegen der potentiell großen Gefährdung bei einer Dachräumung werden konstruktive Maßnahmen zur Verhinderung empfohlen.

Zusätzlich ist anzumerken, dass bei einer Anordnung von Schneefangeinrichtungen oder einer geschlossenen Geländerkonstruktion zusätzliche Lasten durch Schneeverwehungen zu berücksichtigen wären.

8.8 Nachbesserungsbedarf

In den vorangegangenen Abschnitten wurde unter der aktuellen Schneelast (gemäß DIN EN 1991-1-3/NA) und der zusätzlichen Erhöhung nach TRAS ein Vergleich der Lasten und auch der Konsequenzen für die jeweiligen Bauteilgruppen des Tankbauwerks durchgeführt. Hierbei wurden die Resultate wie folgt differenziert ausgewiesen: infolge der Erhöhung durch Aktualisierung der Normung und infolge zusätzlicher Erhöhung durch die TRAS.

Der eventuell vorhandene Nachbesserungsbedarf beschränkt sich nur auf einen kleinen Teil der gesamten Dachkonstruktion. Die überschlägigen Berechnungen zeigen das in erster Linie die Radialsparren und das stützende Bauteil (in diesem Fall der Zugring) betroffen sind.

In dem hier untersuchten Beispiel ist der Nachbesserungsbedarf allerdings auch in diesen Teilen sehr gering, da die Nachweise mit den getroffenen Annahmen nahezu erfüllt werden. Allerdings sei an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Informationen zu der tatsächlich vorhandenen Konstruktion nur in unzureichendem Maße vorliegen und die Berechnung daher auf einigen Annahmen basiert. Bevor diese als belastbare Ergebnisse Verwendung finden, müsste eine intensivere Untersuchung der Konstruktion (siehe Anmerkungen in den vorangegangenen Abschnitten) zur Verifikation der Annahmen stattfinden. Sollten sich die Annahmen bestätigen, kann in diesem Fall voraussichtlich auf eine Nachbesserung der Konstruktion verzichtet werden.

Sollte eine Nachbesserung erforderlich werden, so würde diese die Sparren und auch den Zugring betreffen.

Das Defizit ist in dem konkreten Fall aufgrund der relativ hohen Reserven im Bestand als durchaus gering einzustufen.

Daher kann auch eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf ähnliche Anlagen nur bedingt erfolgen. Die Resultate sind neben den Standortfaktoren und der tatsächlichen Steigerung der Schneelasten gegenüber der Ursprungsauslegung stark von der bereits vorhandenen Ausnutzung der Anlagen abhängig.

Grundsätzlich lässt sich aber feststellen, dass tendenziell die Auswirkung der erhöhten Schneelast in den meisten vergleichbaren Fällen auf die Dachkonstruktion beschränkt bleiben wird.

Grundsätzlich sind Anlagen des hier untersuchten Typs kritisch hinsichtlich der Dachkonstruktion zu untersuchen. Ein Errichtungsdatum vor 2005 ist Indikator dafür, dass die Regelungen der DIN 1055-5 aus dem Jahr 2005 noch nicht verwendet wurden. Solche Anlagen tragen ein höheres Risiko, dass die heute gültigen Vorgaben nicht mehr erfüllt werden können.

Es ist also erstrebenswert, die Dachkonstruktionen von Tankanlagen mittels eines Lastvergleichs zu überprüfen. Sollten hier signifikante, wie auch in diesem Beispiel festgestellt, Laststeigerungen herausgearbeitet werden, so ist die Konstruktion hinsichtlich der Tragreserven kritisch zu beleuchten.

Besonderes Augenmerk sollte auf Dachkonstruktionen gelegt werden, welche durch Schneeanhäufungen im Sinne der DIN EN 1991-1-3/NA betroffen sein könnten. Diese Regelungen waren zum Errichtungszeitraum einer Vielzahl von Anlagen noch nicht in den Normen verankert, so dass hier Zweifel herrschen müssen, ob diese durch die Konstruktion abgedeckt sind.

Die zusätzliche Erhöhung der Schneelasten gemäß TRAS von 10% gegenüber den Lasten nach DIN EN 1991-1-3/NA hat hier noch einen weiteren steigernden Einfluss, welcher direkt die vorhandenen Tragreserven mindert.

Bei Neukonstruktionen wäre zusätzlich noch der Klimafaktor von 1,2 zu berücksichtigen. Dieser steigert die Last um ein weiteres, so dass die Konstruktion daraufhin ausgelegt werden muss. Dieses lässt sich aber ohne weiteres durch die Anpassung von Profilgrößen erzielen.

8.9 Nachbesserungsaufwand

Der im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Nachbesserungsbedarf bei der hier untersuchten Anlage beschränkt sich auf die Bauteile Sparren und Zugring, sollten die verwendeten Berechnungsannahmen einer Überprüfung der tatsächlichen Konstruktion nicht standhalten.

8.9.1 Verstärkung der Radialsparren:

Eine Verstärkung der vorhandenen Radialsparren lässt sich nur schwer ausführen. Sollten sich die Defizite in einem größeren Bereich des Daches herausstellen und eventuell zusätzlich Schäden an der Konstruktion feststellbar sein, so könnte ein kompletter Austausch der Dachkonstruktion die wirtschaftlichere Lösung sein.

Ansonsten wäre eine Verstärkung durch die zusätzliche Anordnung von Sparren in den Zwischenräumen denkbar.

8.9.2 Verstärkung Zugring:

Das zuvor für die Radialsparren Festgestellte trifft ebenso auf die Verstärkung des Zugrings zu. Eventuell ist hier ein zusätzlicher Zugring einzuziehen.

Eine monetäre Einschätzung dieser Maßnahme kann derzeit nicht erfolgen. Der Aufwand einer Verstärkung kann aber im Gegensatz zu einem Austausch der Dachkonstruktion als aufwändig eingestuft werden, da hier an vielen Stellen die Anschlüsse zu überprüfen und neu zu konzipieren wären. Auch wäre eine nachträgliche Verstärkung bei einem bereits montierten Dach aufgrund der Arbeitsbedingungen und der Verträglichkeit von Schweißarbeiten äußerst fragwürdig und nur mit erhöhtem Aufwand möglich. Mitunter wäre ein Austausch der kompletten Dachkonstruktion wirtschaftlicher.

Für Neuanlagen bedeutet die Erhöhung der Schneelast nach TRAS nur eine moderate aber durchaus spürbare Steigerung der aufzunehmenden und abzutragenden Lasten, welche allerdings in den meisten Fällen ohne weiteres mit den herkömmlichen Konstruktionsprinzipien erzielt werden kann. Dieses hat seine Ursache in dem ebenfalls anzusetzenden Klimafaktor von 1,2, welches zu einer Laststeigerung von ca. 30% gegenüber der DIN EN 1991-1-3/NA bei Anwendung der TRAS für Neuanlagen führt. Der zusätzliche Aufwand kann daher bei dem hier untersuchten Anlagentyp kann somit als moderat eingestuft werden.

9 Anlage 3: Berücksichtigung von Tornados nach Abschnitt 13 der TRAS 320

9.1 Vorbemerkungen

Entsprechend § 3 Abs. 3 der StörfallV (vgl. Abschnitt 13 der TRAS 320) sind Szenarien zu entwickeln, auf deren Grundlage Maßnahmen festzulegen sind, um die Auswirkungen von Störfällen aufgrund vernünftigerweise auszuschließender Gefahrenquellen („Dennoch-Störfällen“) so gering wie möglich zu halten. Derartige Szenarien dienen darüber hinaus der internen und externen Alarm- und Gefahrenabwehrplanung.

In Abschnitt 6 der TRAS 320 wird im Zusammenhang mit der vereinfachten Gefahrenquellenanalyse festgestellt, dass die Häufigkeit des Auftretens eines Tornados an einen Ort in Deutschland weit unterhalb einer Jährlichkeit von 100 Jahren liegt. Aus diesem Grunde wurden Tornados als vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquelle definiert, die für die Entwicklung von Schutzziele und Schutzkonzepten nicht zwingend betrachtet werden müssen.

Da das Auftreffen von Tornados auf Betriebe in Deutschland jedoch keinesfalls ganz ausgeschlossen werden kann, sind Tornados im Rahmen der Dennoch-Störfallbetrachtung bis zu der Stärke F4 – die in Deutschland belastbar berichtet wurde – für die Entwicklung von Szenarien im Rahmen der Alarm- und Gefahrenabwehrplanung zu berücksichtigen. Als Hilfestellung für das Erstellen derartiger Pläne soll daher nachfolgend eine Abschätzung der durch das Auftreffen eines Tornados auf einen Betriebsbereich ausgelösten Gefahrenpotenziale erfolgen.

Einen ersten Eindruck über die Zerstörungskraft von Tornados vermittelt die Abbildung I73. Zu sehen sind die Schäden in einem Chemieunternehmen in den USA, nachdem ein Tornado der Stärke F3 über das Gelände hinwegging.

Abbildung 173: Schäden von Anlagenteilen eines Chemieunternehmens in den USA nach einem F3 Tornado



<http://www.complexchemical.com/tornado.htm>

Wie zu erkennen ist, sind vor allem die Anlagenteile zerstört worden, die im unmittelbaren Einzugsbereich des Tornadorüssels lagen. Andere Anlagenteile haben den Tornado so überstanden, dass keine gefährlichen Stoffe ausgetreten sind.

Die folgenden Betrachtungen dienen dazu, die Frage zu beantworten, ab welcher Tornadostärke mit einer massiven Schädigung von Anlagenteilen zu rechnen ist. Weil Tornados immer einen erheblichen Trümmerflug auslösen, können darüber hinaus auch Schäden verursacht werden, die außerhalb des unmittelbaren Tornadorüssels liegen. Auch hierfür sind theoretische Überlegungen anzustellen, die für die Entwicklung von Szenarien hilfreich sein können.

9.2 Anforderungen der TRAS 320

Die folgenden Ausführungen sind als Ergänzung zu Abschnitt 7: Anwendungsbeispiel der TRAS 320 für die Gefahrenquelle Wind und Projektilflug am Standort Raffinerie Heide zu verstehen. Sie führen die dort für extreme Sturmereignisse (Tiefdruckstürme) durchgeführten Untersuchungen am Beispiel eines der Störfallverordnung unterliegenden Betriebsbereiches hinsichtlich der Einwirkungen infolge von Tornados fort. Bei dem betrachteten Betriebsbereich mit erweiterten Pflichten handelt es sich um 4 in enger quadratischer Anordnung stehende Xylol-Kolonnen von 76 m Höhe. Drei der als Stahlkonstruktion ausgeführten Kolonnen sind dabei baugleich mit einem Durchmesser von 3,05 m ausgebildet, die vierte Kolonne weist bei einem Durchmesser von 2,34 m eine etwas schlankere Struktur auf. Zwischen den

Kolonnen befindet sich ein über die gesamte Höhe aufgehender Treppenturm, der den Zugang zu den Kolonnen ermöglicht. Die Anlage ist im Jahr 1962 errichtet und vor etwa 5 Jahren dauerhaft außer Betrieb genommen worden. Weitergehende Informationen zu den Xylol-Kolonnen können dem Abschnitt 7 entnommen werden. Die dort dargelegte Nachweisführung zur baustatischen Tragsicherheit bildet im Weiteren die Grundlage, um die Tragfähigkeit der Xylol-Kolonnen gegenüber Tornadoeinwirkung zu bewerten.

Die TRAS 320 fordert in diesem Zusammenhang, die Auswirkungen von Tornados auf sicherheitsrelevante Anlagen und Anlagenteile in Abhängigkeit von der Tornadostärke wie folgt zu behandeln:

1. Entsprechend Abschnitt 3.5 der TRAS 320 gelten Tornados der Fujita-Stärke bis einschließlich FI durch die Tragsicherheitsnachweise der Anlagenteile gegenüber den Windeinwirkungen gemäß DIN EN 1991-1-4 unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeitsklasse RC3 nach DIN EN 1990 als abgedeckt.
2. Tornados der Fujita-Stärke >FI bis einschließlich F4 sind gemäß Abschnitt 13, 2. Aufzählung, Punkt 2., als vernünftigerweise auszuschließende Gefahrenquellen zu behandeln, die zu Dennoch-Störfällen führen können. Zur bestmöglichen Minimierung der Auswirkungen der Dennoch-Störfälle sind zusätzliche vorbeugende Maßnahmen zu treffen.
3. Tornados der Fujita-Stärke F5 gelten nach Abschnitt 13 als exzeptionelle Störfälle, da das Auftreten von Tornados dieser Stärke in Deutschland nicht sicher nachgewiesen ist. Für solche Störfälle sind keine anlagenbezogenen Vorkehrungen erforderlich.

Tiefdruckstürme und Tornados weisen eine grundsätzlich unterschiedliche Strömungscharakteristik auf. Während sich die Strömungsfelder in Winterstürmen für Bauwerke als Parallelströmung darstellen, sind Tornados überwiegend durch eine Wirbelströmung gekennzeichnet, die je nach Ausrichtung zu einer ungleichförmigen Zuströmung auf Bauwerke führt. Als Folge dessen können die von Tornados ausgelösten Winddruck- und Windkraftverteilungen bei typischen Anlagenteilen von denjenigen in Tiefdruckstürmen mehr oder weniger stark abweichen. Durch den Umstand bedingt, dass eine Datenbasis von aerodynamischen Beiwerten in Tornadoströmungen nicht vorliegt, wird im Folgenden im Sinne einer geeigneten Näherung auf die Angaben in den bautechnischen Normen zurückgegriffen.

Zur Klassifizierung von Tornados unterschiedlicher Intensität wird im Rahmen der TRAS 320 die Fujita-Skala herangezogen. Sie basiert auf einer Bewertung der an der Bausubstanz durch Tornados hervorgerufenen Schädigungen und stuft ausgehend hiervon deren Stärke in insgesamt 6 Klassen F0 bis F5 ein. Seit 2007 hat sich in den USA mit der so genannten EF-Skala (Enhanced Fujita-Skala) eine modifizierte Skala etabliert. Zur genaueren Bewertung der Schäden kommt eine diesbezügliche Differenzierung nach Bauwerkstypen in Form von insgesamt 28 Schadensindikatoren zur Anwendung. Darüber hinaus sind die zu den Tornadoklassen zugehörigen Windgeschwindigkeitsklassen im Vergleich zur ursprünglichen Fujita-Skala leicht nach unten verschoben. Beide Skalen weisen den Nachteil auf, dass die zur Einstufung herangezogenen Bauwerksschäden auf US-amerikanische Verhältnisse der Bauwerkssubstanz abgestellt und insofern nicht unmittelbar auf deutsche Baukonstruktionen und auch Industrieanlagen zu übertragen sind. Zudem gehen sie je Tornadoklasse mit großen Geschwindigkeitsbandbreiten einher, die sich mit der Potenz 2 in den aufgeprägten Lasten widerspiegeln. So ist beispielsweise die Last zur oberen Klassengrenze der Klasse FI 2,4-fach so groß wie diejenige zur unteren Klassengrenze.

Vor diesem Hintergrund findet im deutschsprachigen Raum eine Kombination der Fujita- und der so genannten Torro-Skala Verwendung. Die Torro-Skala differenziert Tornados anhand ihrer maximalen Geschwindigkeiten unabhängig vom Zerstörungsausmaß in die Stufen T0 -TII und nimmt damit eine doppelt so hoch aufgelöste Einstufung vor. Die auf dieser Grundlage entwickelte Fujita-Torro-Skala ist dabei zudem auf eine mittel- und westeuropäische Bausubstanz zugeschnitten.

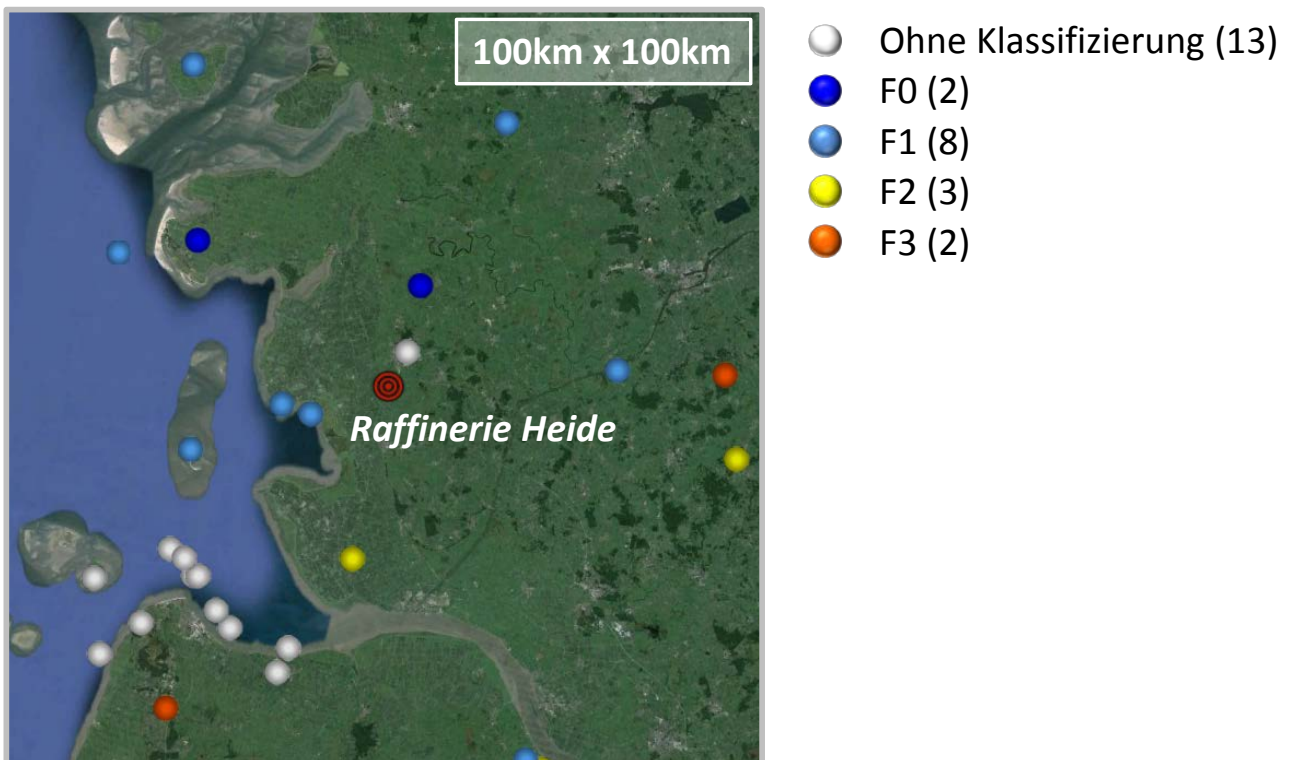
In den weiteren Ausführungen wird zunächst die grundsätzliche Tornadoaktivität der relevanten Standortumgebung anhand von in der Vergangenheit beobachteten Tornadoereignissen bewertet. Im Anschluss daran erfolgt die Ermittlung der von den Xylolkolonnen maximal aufnehmbaren Tornadostärke. Die diesbezüglichen Berechnungen orientieren sich dabei an der in Anlage I durchgeführten Nachweisführung. Letztlich wird die Schädigung bei Auftreten eines Tornados bis zur Stärke F4 im Sinne eines Dennoch-Störfalls betrachtet. Im Hinblick auf eine Erarbeitung auswirkungsbegrenzender Maßnahmen ist hierbei insbesondere der zu erwartende Schädigungsablauf von Bedeutung.

9.3 Beobachtete Tornados im Umkreis der Anlage

Zur Illustration der regionalen Tornadoaktivität stellt Abbildung 174 die seit 1950 im Umfeld der Raffinerie aufgetretenen Tornadoereignisse in einer Satellitenaufnahme dar. Als relevantes Einzugsgebiet wird in Anlehnung an die Pfadlänge eines Tornados der Stärke F3 bis F4 von etwa 50 km ein Untersuchungsgebiet von 100 km x 100 km um die Anlage herangezogen. Die Ereignisse entstammen der Datenbank der European Severe Weather Database (www.eswd.eu) und gelten als vollständig von Experten verifiziert (ESWD-Kennung QC2). Anhand unterschiedlicher Farbgebungen werden den Tornadobeobachtungen die zugehörigen Fujita-Klassen zugeordnet.

Mit insgesamt 28 Tornados in 65 Jahren weist das Untersuchungsgebiet im deutschlandweiten Vergleich eine grundsätzlich erhöhte Tornadoaktivität auf. Ursächlich hierfür dürfte die geographische Lage im Grenzbereich der naturräumlichen Haupteinheiten „Norddeutsche Geestlandschaft“ sowie „Schleswig-Holsteinische Marschen“ sein. Das zugehörige Gelände zeigt sich weiträumig glatt und eben und wird hauptsächlich zur Landwirtschaft genutzt. Die vorherrschende Gelände- und Oberflächenstruktur lässt eine großräumige Entwicklung der für Tornados erforderlichen Wetterlagen zu und begünstigt damit deren Entstehung. Die Mehrzahl der beobachteten Tornados von 13 Ereignissen geht mit keinen nennenswerten Schädigungen einher, so dass keine geeignete Klassifizierung vorgenommen werden kann. Diese nicht-klassifizierten Ereignisse sind ebenso wie die 2 F0- bzw. 8 F1-Tornados durch die Auslegung gegenüber Windeinwirkungen gemäß TRAS 320 abgedeckt. Nur die aufgetretenen 3 F2- sowie 2 F3-Tornados hätten zu einer Gefährdung der Anlage führen können.

Abbildung 174: Beobachtete Tornadoereignisse in einer Untersuchungsfläche von 100 km x 100 km um den Anlagenstandort (seit 1950)



9.4 Ermittlung der vom Anlagenteil aufnehmbaren Tornadostärke

Die maßgebenden Beanspruchungen durch einen Tornado gehen auf die mit hoher Geschwindigkeit v_{Tor} rotierenden Luftmassen im Nahbereich des Tornadozentrums zurück. Sie rufen einen extremen Geschwindigkeitsdruck q_{Tor} hervor, der sich auf einem Tragwerk in Abhängigkeit der Ausrichtung in extrem hohen Sog- und Drucklasten widerspiegelt. Die resultierende Windkraft F_{Tor} aus der Wirbelströmung auf einen Baukörper kann näherungsweise konstant über die Höhe angenommen werden und leitet sich wie folgt ab:

$$(136) \quad F_{Tor} = c_f \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{Tor}^2 \cdot A_{ref} = c_f \cdot q_{Tor} \cdot A_{ref}$$

Der eingehende dimensionslose aerodynamische Kraftbeiwert erfasst die Wechselwirkung zwischen dem Geschwindigkeitsdruck der Strömung und der dem Baukörper aufgeprägten Belastung. Für die allgemeine Windströmung in der atmosphärischen Bodengrenzschicht stellt die zuständige Windlastnorm DIN EN 1991-1-4 in Verbindung mit DIN EN 1991-1-4/NA im Abschnitt 7 aerodynamische Beiwerte für eine Vielzahl von Bauformen bereit. In Ermangelung entsprechender Angaben für die Tornadoströmung können sie im Sinne einer ersten Näherung gleichermaßen für F_{Tor} in Ansatz gebracht werden. Gleichwohl ist zu beachten, dass sich die unter den beiden Strömungsformen ausbildenden Druckverteilungen mehr oder weniger unterscheiden können.

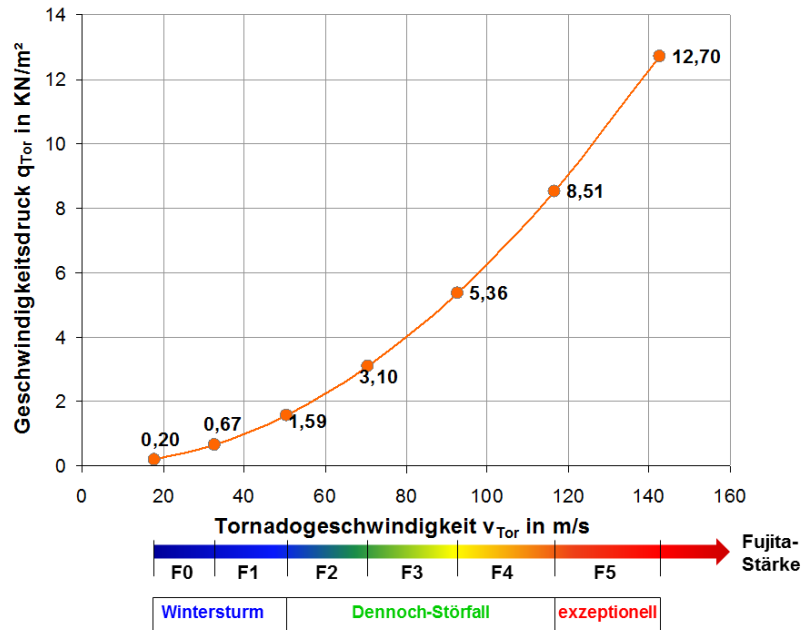
Abbildung 175 gibt den maximalen Geschwindigkeitsdruck q_{Tor} innerhalb eines Tornados in Abhängigkeit der maximalen Tornadogeschwindigkeit v_{Tor} wieder. Die sekundäre Abzissenachse ordnet die Tornadogeschwindigkeiten zudem in die zugehörige Fujita-Klasse ein.

Bei Anlagenbauten und -komponenten mit weitgehend luftdichter Hülle, die keinen oder nur einen zeitlich verzögerten Druckausgleich zulässt, kann ein im Tornadowirbel entstehender Druckabfall Δp zu zusätzlichen Beanspruchungen führen. Er ruft auf den Oberflächen eine gleichgroße, nach außen gerichtete Flächenlast q_0 hervor, es gilt:

$$(137) \quad q_0 = |\Delta p| = \left| \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{Tor}^2 \right|$$

Im vorliegenden Fall ist der Druckabfall Δp ausschließlich für den Nachweis der Behälterwand der Kolonnen relevant. Allerdings stellt sich dieser selbst bei einem Tornado der höchsten Stärke F5 mit ca. 12,7 kN/m² im Vergleich zum Innendruck p_i von 3,5 atü = 350 kN/m² so gering ein, dass dieser vernachlässigt werden darf.

Abbildung 175: Maximaler Geschwindigkeitsdruck der Tornadoströmung in Abhängigkeit von maximaler Tornadogeschwindigkeit und Fujita-Stärke



In Anlehnung an Abschnitt 7 sind zum Nachweis gegenüber Tornadoeinwirkungen folgende Lasten in Ansatz zu bringen:

Tabelle 73: Lastansätze für den Nachweis gegenüber Tornadoeinwirkungen

Tragfähigkeitsnachweis	Kolonne V1	Kolonnen V3-V5
Behälterwand Längszug, Fußpunkt Schrauben, Fußpunkt Verankerung	$F_{Tor} = c_f \cdot q_{Tor} \cdot A_{ref}$ $= 0,7 \cdot q_{Tor} \cdot 204,68m$ $= 143,27 \cdot q_{Tor}$	$F_{Tor} = c_f \cdot q_{Tor} \cdot A_{ref}$ $= 0,7 \cdot q_{Tor} \cdot 257,88m$ $= 180,51 \cdot q_{Tor}$
Gründung	$F_{Tor} = c_f \cdot q_{Tor} \cdot A_{ref} = 1,06 \cdot q_{Tor} \cdot 682,5 = 723,45 \cdot q_{Tor}$	

Es ist ersichtlich, dass bereits bei einem Tornado der mittleren Stärke F2 in etwa der Böengeschwindigkeitsdruck der Windzone 4 erreicht wird. Ab dort ist mit den Überschreitungen gemäß der Untersuchung in Abschnitt 7 zu rechnen.

9.5 Ermittlung der Schädigung des betrachteten Anlagenteils in einem Tornado bis zu einer Stärke F4

Die Kolonne versagt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit bei einem Tornado der Stärke F3. Bei einem Tornado bis zu der Stärke F2 ist mit einem plastischen Verhalten und lokalen Schädigungen zu rechnen. In erster Linie wird bei dem Versagen die Fußpunktverankerung als kritisch einzustufen sein. Je nach Ausbildung sind dort die höchsten Beanspruchungen zu erwarten. Ein Herausziehen der Verankerungen oder ein Materialversagen der Anker hätten zur Folge, dass die benachbarten Verankerungen ebenfalls versagen und somit das Umfallen der Kolonne ermöglichen. Spätestens zu diesem Zeitpunkt wäre mit einer Stofffreisetzung zu rechnen. Wahrscheinlich ist jedoch, dass bereits vor dem Umfallen die Wandung aufreißt und es zu Stofffreisetzungen kommt. Ein Totalverlust und eine eventuelle Beschädigung benachbarter Anlagenteile wären die Folge.

Es kann an dieser Stelle keine rechnerisch fundierte Aussage getroffen werden, da die Lastannahmen und Lastbilder mit zu vielen Unsicherheiten behaftet sind. Somit muss an dieser Stelle auf die zukünftige Forschung auf diesem Gebiet verwiesen werden.

9.6 Ermittlung des Gefährdungspotenzials durch Projektilflug

Grundlage für die folgenden Überlegungen ist die amerikanischen Richtlinie FEMA 361 „Design and Construction Guidance for Community Safe Rooms“. In dieser Richtlinie werden für die unterschiedlich starken Tornados Windgeschwindigkeiten angegeben, auf deren Basis die Projektilgeschwindigkeiten für einen Modellkörper abgeleitet werden. Als Modellkörper wurde ein Kantholz (Maße: 15 lbs 4 x 2 entspricht 6,8 kg, 5 cm x 10 cm mit einer Länge von ca. 2 m) gewählt, weil es in der amerikanischen Hausbautechnik oftmals verwendet wird. Für die Berechnung der Einwirkungen auf z.B. Behälter wurde in diesem Forschungsvorhaben allerdings ein Stahlrohr gewählt, wie es im Anlagenbau häufig eingesetzt wird.

Während die äußeren Dimensionen des Kantholzes mit denen des Rohres als Modellkörper näherungsweise übereinstimmen, so unterscheiden sich beide Körper im Gewicht (6,8 kg für das Kantholz; 10 kg für das Stahlrohr). Für das Stahlrohr als Modellkörper liegen jedoch keine Angaben in FEMA 361 vor. Wie in I.4 des Forschungsberichts schon angedeutet wurde, kann jedoch angenommen werden, dass die Beschleunigung des Stahlrohrs ca. 2/3 der Beschleunigung des Kantholzes entspricht. Somit ergeben sich die in Tabelle 74 zusammengestellten Projektilgeschwindigkeiten für unterschiedliche Tornadostärken.

Tabelle 74: Projektilgeschwindigkeiten eines Stahlrohrs als Modellkörper (10 kg, Durchmesser 10 cm)

max. Windgeschwindigkeit v_{max} [m/s]	horizontale Geschwindigkeit des Projektils v_x [m/s]	vertikale Geschwindigkeit des Projektils v_z [m/s]	Projektilgeschwindigkeit v_p [m/s] $v_p = \sqrt{v_x^2 + v_z^2}$	v_p [km/h]	Tornadostärke (Fujita)
71	25,3	16,6	30,25	108,7	~ F2
90	26,8	17,9	32,2	115,9	~ F3
103	29,8	20	35,9	129,2	~ F4

Mit Hilfe der Gleichung

$$(I38) \quad t_{Stahl} = K_{Stahl} \frac{m^{0,67}}{d} \left(\frac{v_p}{100}\right)^{1,33}$$

mit

t_{Stahl} = Stahlwanddicke [m]

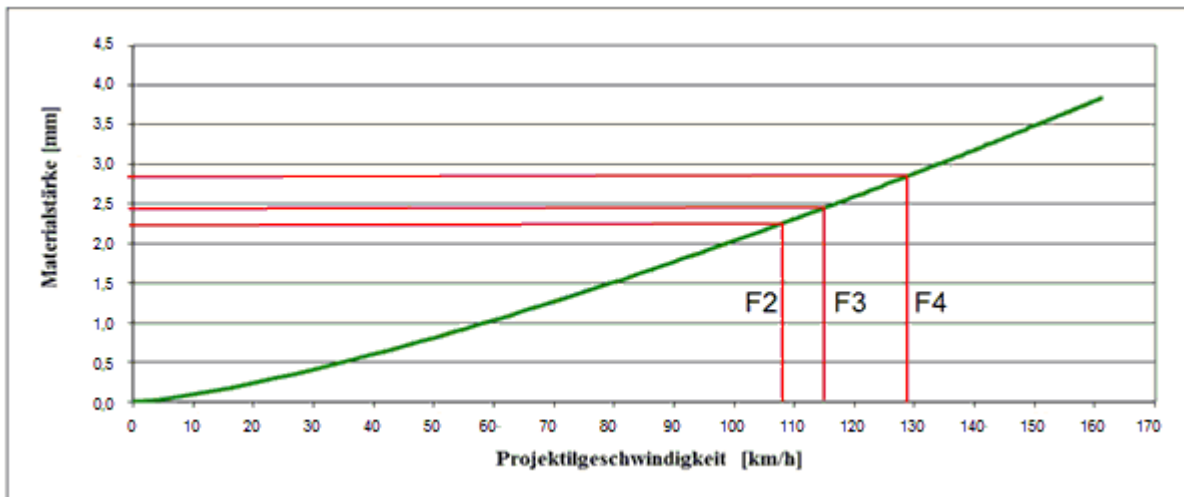
K_{BRL} = empirischer Projektilfaktor = $4,16 \times 10^{-5}$

- m = Projektilmasse [kg]
- d = Projektildurchmesser [m]
- v_p = Aufprallgeschwindigkeit [km/h]

lassen sich die Penetrationstiefen in Stahl berechnen.

Abbildung 176 zeigt die Ergebnisse der Penetrationstiefen für den ausgewählten Modellkörper bei den Tornadostärken F2 – F4.

Abbildung 176: Penetrationstiefen des als Modellkörper ausgewählten Stahlrohrs bei Tornadostärken von F2 bis F4



In der Tabelle 75 sind für einen Vergleich die Ergebnisse der Berechnungen für zwei Tanks der Raffinerie Heide für einen Orkan in Windzone 4 mit einer Geländekategorie II (GK) sowie die Ergebnisse für Tornados der Klassen F2 bis F4 zusammengefasst. Alle Berechnungen wurden für das gleiche Modellrohr (Länge 2 m, DN 100, Gewicht 10 kg) durchgeführt. Zunächst fällt auf, dass für den Tank Nr. 11, der nur 22 m von der Xylo1-Kolonne entfernt steht, die Projektilgeschwindigkeiten und damit auch die Penetrationstiefen in Stahl im Falle eines Tornados höher sind als bei einem Orkan. Dies stellt sich jedoch für den Tank Nr. 263 genau umgekehrt dar. Er befindet sich in 102 m von der Destillationskolonne. Das Rohr wird im Verlauf seines Flugweges bei einem Orkan auf der gesamten Flugbahn fortlaufend beschleunigt, so dass seine Endgeschwindigkeiten über den Projektilgeschwindigkeiten im Falle von Tornados liegen, da bei diesem das Rohr nur auf einem Teil der Flugbahn beschleunigt wird. Entsprechend größer sind die Penetrationstiefen in Stahl bei der Beschleunigung durch einen Orkan.

Tabelle 75: Projektilgeschwindigkeiten und Penetrationstiefen bei einem Orkan sowie bei Tornados F2 bis F4 für einen Modellkörper

Kopfzeile		Entfernung m	Projektilgeschwindigkeit [km/h]			Penetrationstiefe [mm]		
			Ziel 1	Ziel 2	Ziel 3	Ziel 1	Ziel 2	Ziel 3
Orkan Windzone 4 GK II	Anlagenteil							
	Tank Nr. 11	22	99,71	96,65	98,8	1,93	1,86	1,91
	Tank Nr. 263	102	137,6	146,8	156,5	2,97	3,24	3,53
Tornado F2		keine Angabe	108,7			2,25		
Tornado F3		keine Angabe	115,9			2,45		
Tornado F4		keine Angabe						

Das Ergebnis für den Tank Nr. 263 erscheint auf dem ersten Blick überraschend, weil die Windgeschwindigkeiten insbesondere von F4-Tornados deutlich über denen von Orkanen liegen. Plausibler werden die Ergebnisse jedoch dann, wenn man sich die Unterschiede in der Ermittlung der Projektilgeschwindigkeiten näher betrachtet. Das im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelte Rechenprogramm berechnet zu jedem Zeitpunkt die Flugbahn und die Projektilgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Wahl des Modellkörpers, der Fallhöhe, der Wind- bzw. Böengeschwindigkeit, der Geländekategorie sowie der Entfernung zwischen Emissions- und Immissionsort. Daher sind sehr differenzierte Betrachtungen möglich.

Die amerikanische Vorgabe nach FEMA 361 berücksichtigt solche differenzierten Betrachtungen nicht, sondern legt stark vereinfachend Projektilgeschwindigkeiten für Modellkörper fest, die letztlich Mittelwerte darstellen, ohne dass die Flugbahn berücksichtigt wird. Dies ist im Falle von Tornados allerdings auch kaum möglich, so dass auf solche Pauschalangaben zurückgegriffen werden muss.

Bzgl. der Raffinerie Heide zeigen die Ergebnisse, dass auf der Grundlage der Vorgaben der FEMA 361 ein Durchschlagen der Behälterwand der untersuchten Tanks für den zugrunde gelegten Modellkörper selbst für einen F4-Tornado nicht zu erwarten ist. Vergleicht man dieses Ergebnis mit der Chemieanlage in Abbildung 173, dann stellt man trotz der unzureichenden Auflösung der Aufnahme fest, dass die stehengebliebenen Tanks offenbar nicht durch Trümmerteile zerstört wurden. Tatsächlich wurden diese Tanks nach Wiederaufbau der zerstörten Anlagenteile ein Jahr später wieder in Betrieb genommen (Abbildung 177).

Abbildung 177: Chemieunternehmen in den USA nach einem F3 Tornado und Wiederaufbau



Die Ergebnisse in Tabelle 75 zeigen darüber hinaus, dass mit Hilfe des Rechenprogramms, sinnvolle Ergebnisse bzgl. Projektilgeschwindigkeit und Penetrationstiefe im Fall von Orkanen erhalten werden. Insbesondere bei weiter entfernt liegenden Anlagenteilen, wie z.B. Tanks, decken die Ergebnisse auch Tornados bis zu einer Stärke von F4 ab. Diese Aussage trifft jedoch nicht für nahe gelegene Anlagenteile zu.

10 Auflistung einiger relevanter Normen

Zur Auslegung der einzelnen Anlagenteile und Tragwerke sind im Wesentlichen die entsprechenden DIN – und DIN EN Normen anzuwenden.

Da innerhalb einer Anlage eine Vielzahl von Tragwerken und Anlagenteile angeordnet sind, ist eine vollständige Auflistung der entsprechenden Normen nicht zielführend. Im Wesentlichen kann aber festgestellt werden, dass es zum Teil unterschiedliche Auslegungsverfahren in den Normen gibt.

Zu unterscheiden ist beispielsweise zwischen dem Verfahren mit globalen Sicherheiten und dem Verfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten. Moderne Normung verwendet in der Regel das Teilsicherheitsverfahren, welches genauer die unterschiedlichen Einflüsse des verwendeten Materials und der Einwirkungen berücksichtigen kann. Hierbei werden die Einwirkungen und auch die Materialeigenschaften mit Teilsicherheiten erhöht bzw. reduziert um die gewünschte Gesamtsicherheit zu erreichen. Mittels einiger "Stellschrauben" lassen sich innerhalb des Konzepts eine Vielzahl von möglichen Sicherheitsniveaus erreichen, so dass auf besondere Anforderungen Einfluss genommen werden kann.

Generell gilt das Mischungsverbot von Normung unterschiedlicher Normenfamilie. Allerdings ist es durchaus vertretbar in begründeten Einzelfällen einige Anlagenteile mittels eines anderen Normenkonzepts nachzuweisen als die Gesamtanlage. Insbesondere gilt das dann wenn zu dem entsprechenden Anlagenteil keine Norm mit gleicher Sicherheitsphilosophie vorhanden ist. Dennoch ist darauf zu achten, dass auch bei Verwendung von anderer Normung ein vergleichbares Sicherheitsniveau erreicht wird. Dieses ist von Fall zu Fall durch den sachkundigen Fachplaner und die prüfende Stelle zu entscheiden.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Anlagenteile und der verwendeten Materialien sind eine große Anzahl von Normen zu berücksichtigen, welche teils eine unterschiedliche Sicherheitsphilosophie besitzen. Aufgrund der großen Anzahl können nicht alle maßgebenden Normen an dieser Stelle wiedergegeben werden. Eine Auswahl möglicher maßgebender Normen ist im Folgenden zu finden:

DIN 1045	Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton (alt)
DIN 1052	Herstellung und Ausführung von Holzbauwerke (alt)
DIN 1053	Mauerwerk (alt)
DIN 1054	Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau (alt)
DIN 1055	Einwirkungen auf Tragwerke (alt)
DIN 1072	Straßen- und Wegbrücken; Lastannahmen
DIN 1089	Feuerfeste Werkstoffe für Koksöfen
DIN 1249	Flachglas im Bauwesen
DIN 1259	Glas
DIN 4024	Maschinenfundamente
DIN 4033	Entwässerungskanäle und -leitungen , Richtlinien für die Ausführung
DIN 4034	Schächte aus Beton-, Stahlfaserbeton- und Stahlbetonfertigteilen
DIN 4040	Abscheideranlagen für Fette
DIN 4044	Hydromechanik im Wasserbau; Begriffe
DIN 4312	Industrieturbinen; Dampf- und Gasentspannungsturbinen; Grundlagen für den Bau von Industrieturbinen
DIN 4342	Gasturbinen; Normbezugsbedingungen, Normleistungen, Angaben über Betriebswerte
DIN 4420	Arbeits- und Schutzgerüste - Leitergerüste Sicherheitstechnische Anforderungen

DIN 4421	Traggerüste – Berechnung, Konstruktion und Ausführung
DIN 6600	Behälter (Tanks) aus Stahl für die Lagerung wassergefährdender Flüssigkeiten - Übereinstimmungsnachweis
DIN 6601	Beständigkeit der Werkstoffe von Behältern (Tanks) aus Stahl gegenüber Flüssigkeiten (Positiv-Flüssigkeitsliste)
DIN 6607	Korrosionsschutzbeschichtungen unterirdischer Lagerbehälter (Tanks); Anforderungen, Prüfung
DIN 6618	Stehende Behälter (Tanks) aus Stahl
DIN 6624	Liegende Behälter (Tanks) aus Stahl von 1000 bis 5000 Liter Volumen
DIN 6625	Eckige Behälter aus Stahl für die oberirdische Lagerung von Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt von mehr als 55 °C
DIN 6626	Domschächte aus Stahl für Behälter zur unterirdischen Lagerung wassergefährdender, brennbarer und nichtbrennbarer Flüssigkeiten
DIN 6627	Domschachtkragen für gemauerte Domschächte für Behälter zur unterirdischen Lagerung wassergefährdender, brennbarer und nichtbrennbarer Flüssigkeiten
DIN 8076	Druckrohrleitungen aus thermoplastischen Kunststoffen - Klemmverbinder aus Metallen und Kunststoffen für Rohre aus Polyethylen (PE) - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung (zurückgezogen)
DIN 15018	Krane; Grundsätze für Stahltragwerke
DIN 15019	Krane; Standsicherheit
DIN 15190	Frachtbehälter; Binnencontainer
DIN 18800	Stahlbau (alt)
DIN 18807	Trapezprofile im Hochbau
DIN 24567	Fluidtechnik - Runde Hydrobehälter aus Stahl - Maße, Anforderungen, Prüfung - Nenngrößen 1000 bis 20000
DIN 28015	Kolonnen; Boden- und Füllkörperkolonnen; Mittelteil, Kolonnenteil für Austausch Elemente; Konstruktionsmaße
DIN 28016	Kolonnen; Benennungen
DIN 28017	Ortsfeste Zugänge zu verfahrenstechnischen Apparaten
DIN 28018	Druckbehälter aus Stahl, emailliert - Behälter für Anlagen 0,063 m ³ bis 10 m ³
DIN 28019	Druckbehälter aus Stahl, emailliert - Behälter für Lagerung 12,5 m ³ bis 125 m ³
DIN 28020	Liegende Druckbehälter 0,63 m ³ bis 25 m ³ - Maße
DIN 28021	Stehende Druckbehälter - Behälter für Lagerung, 6,3 m ³ bis 100 m ³ - Maße
DIN 28022	Stehende Druckbehälter - Behälter für Prozessanlagen 0,063 m ³ bis 25 m ³ - Maße
DIN 28070	Chemieöfen mit Auskleidung; Grundsätze für die Konstruktion der Öfen
DIN 28071	Chemieöfen mit Auskleidung; Grundsätze für die Auskleidung
DIN 28084	Tragringe und Ringträger an Apparaten
DIN EN 448	Fernwärmerohre - Werkmäßig gedämmte Verbundmantelrohrsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Verbundformstücke, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, Polyurethan-Wärmedämmung und Außenmantel aus Polyethylen

- DIN EN 639 Allgemeine Anforderungen für Druckrohre aus Beton, einschließlich Rohrverbindungen und Formstücke
- DIN EN 640 Stahlbetondruckrohre und Betondruckrohre mit verteilter Bewehrung (ohne Blechmantel), einschließlich Rohrverbindungen und Formstücke
- DIN EN 641 Stahlbetondruckrohre mit Blechmantel, einschließlich Rohrverbindungen und Formstücke
- DIN EN 642 Spannbetondruckrohre, mit und ohne Blechmantel, einschließlich Rohrverbindungen, Formstücke und besondere Anforderungen an Spannstahl für Rohre
- DIN EN 1990 (Eurocode 0) Grundlagen der Tragwerksplanung
- DIN EN 1991 (Eurocode 1) Einwirkungen auf Tragwerke
- DIN EN 1992 (Eurocode 2) Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken
- DIN EN 1993 (Eurocode 3) Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
- DIN EN 1994 (Eurocode 4) Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton
- DIN EN 1995 (Eurocode 5) Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
- DIN EN 1996 (Eurocode 6) Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten
- DIN EN 1999 (Eurocode 9) Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken
- DIN EN 12952 Wasserrohrkessel und Anlagenkomponenten
- DIN EN 13001 Krane - Konstruktion allgemein

11 Literaturquellen

11.1 Quellenverzeichnis zu „I. Technische Regel für Anlagensicherheit: Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten“

In Form von Fußnoten in den Kapiteln enthalten.

11.2 Quellenverzeichnis zu „II. Hinweise und Erläuterungen zur TRAS 320“

In Form von Fußnoten in den Kapiteln enthalten.

11.3 Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 1, Umgebungsbedingte Gefahrenquellen“

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

Berz, G., 1980: Das Trombenrisiko in Europa nach Untersuchungen Alfred Wegeners. Ann. Meteor. 15, 74-76

Chay, M.T.; Letchford, C.W. (2002): Pressure distributions on a cube in a simulated thunderstorm downburst- Part A: stationary downburst observations, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 90, Issue 7, Pages 711-732.

Choi, E.C.C. (2000): Wind characteristics of tropical thunderstorms, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 84, Issue 2, Pages 215-226

Christoffer, J.; Ulbricht-Eissing, M. (1989): Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland, 2., vollständig neu bearbeitete Auflage, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main

Cook N.J (1986): The designer's guide to wind loading of building structures, Part I, Michigan

CIEG 407 (2007): Building Design, Chapter 10: Ice loads – Atmospheric Icing, Course at University of Delaware, Department of Civil and Environmental Engineering, 2007.

COST 727 (2006): Atmospheric Icing on Structures, Measurements and data collection on icing: State of the art, Publication of MeteoSwiss, 75, 110 pp.

Deutscher Wetterdienst (DWD), 2011: Tornado – unberechenbare Naturgewalt. 2.Auflage, 05.2011, 4 S.

Diburg S.; Hölscher N.; Niemann H.-J. (2011): Prognose seltener Sturmereignisse anhand meteorologischer Daten unter Verwendung probabilistischer Schätzverfahren, Niemann & Partner, Bochum, http://www.vgb.org/news_pro_gumbel.html

Dietrich, R. (1976): Structural analysis of aircraft impact on a nuclear powered ship. Nucl. Engin.Design 37, S. 333-346

DIN 1055-4, Ausgabe März (2005): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 1055-4, Berichtigung März (2006): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Berichtigung DIN 1055-4:2005-03, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN EN 1991-1-4:2010-12 (2010): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten in Verbindung mit DIN EN 1991-1-4/NA: Nationaler Anhang. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

DITB (2008): Deutsches Institut für Bautechnik, Technische Baubestimmungen: http://www.dibt.de/de/aktuelles_technische_baubestimmungen.html

- DIN 1055-5, Ausgabe Dezember (1936): Schneebelastung - DIN 1055, Blatt 5. Deutschland.
- DIN 1055-5, Ausgabe Dezember (1956): Schneebelastung - DIN 1055, Blatt 5. Deutschland.
- DIN 1055-5, Ausgabe Juni (1975): Lastannahmen für Bauten, Verkehrslasten, Schneelast und Eislast. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.
- DIN 1055-5 AI, Ausgabe April (1994): Lastannahmen für Bauten, Verkehrslasten, Schneelast und Eislast. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.
- DIN 1055-5, Ausgabe Juli (2005): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 5: Schnee- und Eislasten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.
- DIN EN 1990, Ausgabe Dezember (2010): Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002+AI:2005+AI:2005/AC:2010. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.
- DIN EN 1990/NA, Ausgabe Dezember (2010): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter –Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.
- DIN EN 1991-1-3, Ausgabe Dezember (2010): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten, Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003+AC:2009. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.
- DIN EN 1991-1-3/NA, Ausgabe Dezember (2010): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.
- DOE Standard 3014-96 (1996): Accident analysis for aircraft crash into hazardous facilities. U.S. Department of Energy, Washington D.C.
- Dotzek, N., 2001: Tornados in Deutschland. Symposium Naturkatastrophen in Mittelgebirgsregionen
- Dotzek, N., J. Grieser und H. E. Brooks, 2003: Statistical modeling of tornado intensity distributions. Atmos. Res., 67-68, 163-187
- Dotzek, N., 2005: Tornados und Gewitterböen in Deutschland. Klassifikation und Klimatologie. DLR – Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Fortbildungstag
- Dotzek, N., 2005: Tornado- und Downburstklimatologie. DWD Klimastatusbericht 2004, 10 S.
- Dotzek, N., Hubrig, M., Berz, G., 2005: TORRO- und Fujita-Skala Beschreibung, angepasst für Mitteleuropa. TorDach, MünchenerRück, European Skywarn, 8 S.
- Europäischer Windatlas, Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1990
- FEMA 36I Design and Construction Guidance for Community Safe Rooms FEMA 36I, Second Edition / August 2008
- FEMA P-36I, Safe Rooms for Tornadoes and Hurricanes: Guidance for Community and Residential Safe Rooms, Third Edition (2015)
- Feuerstein, B., N. Dotzek, und J. Grieser, 2005: Assessing a tornado climatology from global tornado intensity distributions. J. Climate, 18, 585-596
- Foder, M. H. (2001): ISO 12494 “Atmospheric Icing of Structures” and How to Use It, Proceedings of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger, Norway, June 17-22, 2001, pages 678-685.
- Foken, Th. (2004): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, Springer Verlag, Heidelberg
- Formichi, Paolo (2008): EN 1991-Eurocode 1: Actions on structures Part I-3 General actions – Snow loads. Dissemination of information workshop 18.-20.02.2008, Brüssel, Belgien.
- Gerth W.-P., Christoffer J., Windkarten von Deutschland, Meteorologische Zeitschrift, N.F. 3, 66-77, 1994

- Hubrig, M.: Tornado- und Downburstschadensskala für Holzgewächse, basierend auf der Skalierung nach TORRO angepasst für Mitteleuropa (TorDACH). 9 S.
- Hofherr Th.; Kunz M. (2010): Extreme wind climatology of winter storms in Germany, *Climate Research*, Vol. 41, pp. 105-123
- Holmes J.D. (2004): Trajectories of spheres in strong winds with application to wind-borne debris, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92, 9-22.
- Homola, M. C. (2005): Impacts and Causes of Icing on Wind Turbines, Interreg IIIB Project: Wind energy in the BSR, Narvik University College, Norwegen.
- ISO 12494:2001-08: Atmospheric icing of structures, International Organization for Standardization, ISO Copyright office, Genf, Schweiz, 2001
- Jurksch, G. u. A. Cappel, 1976: Gefährdung von Kernkraftwerken durch Tromben. *Ber. D. Deutschen Wetterd.*, 6S.
- Kasperski M.; Hölscher N.; Versen U.(2001): Extremwertanalyse der Windgeschwindigkeiten für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- Konersmann, R (2012): Risiken infolge naturbedingter Gefahrenquellen. *Technische Sicherheit* Bd. 2 Nr. 7/8
- Koschmieder, H., 1940: Über Tromben. *Wiss. Abh. Reichsamt Wetterd.* 6, 24 S.
- Kraus, Oliver; Butz, Christiane (2005): Chapter II – Snow load in „Development of skills facilitating implementation of Eurocodes, Handbook 3, Action effects for buildings, Leonardo Da Vinci pilot project CZ/02/B/FPP-134007“. Seite II-1 bis II-5, Institute for steel construction, University of Technology Aachen (RWTH).
- Letzmann, J.P., 1937: Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornados, Wasserhosen und Kleintromben. *Int. Meteor. Org., Klimatol. Komm., Salzburg, Publ. 38, Anlage XI, 91-110*
- Letchford, C.W.; Mans C.; Chay, M.T. (2002): Thunderstorms-their importance in wind engineering (a case for the next generation wind tunnel), *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 90, Issues 12-15, Pages 1415-1433
- Lin N., Letchford C. and Holmes J. (2006): Investigation of plate-type windborne debris. Part I. Experiments in wind tunnel and full scale, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94, 51-76.
- Lombardo, F.T (2009): Analysis and Interpretation of Thunderstorm Wind Flow and its Effects on a Bluff Body, Ph.D. Dissertation, Texas Tech University, 259 pp.
- Lorenz, D. (1996): Simulationsrechnung zum Trümmerflug bei Staubexplosionen. Projekt Nr. F-05-9305, Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten Bereich Prävention, Zentrallabor, Sept. 1996
- Martins, C., 1850: Anweisung zur Beobachtung der Windhosen oder Tromben. *Poggendorfs Ann. Phys.* 81, 444-467
- Moghim, F.; Caracoglia, L. (2012): A numerical model for wind-borne compact debris trajectory estimation: Part I – Probabilistic analysis of trajectory in the proximity of tall buildings. *Engineering Structures* 38, 153–162
- Niemann H.-J.; Hölscher N. (2004): Erfassung des Windrichtungseinflusses auf die Windlasteffekte an Tragwerken, *Stahlbau*, 73. Jahrgang, Heft 4, S. 246-253, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- Niemann H.-J. (2006): Windlasten für turmartige Bauwerke nach DIN 1055-4 neu, *Betonkalender*, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- Niemann, H.-J.; Peil, U. (2003): Windlasten auf Bauwerke, *Stahlbau-Kalender 2003*, S. 673-748, Verlag Ernst&Sohn, Berlin
- Niemann, H.-J.; Hölscher, N. (2011): Richtfunktturm Gänsehals, Windtechnologisches Gutachten, Prognostische Windfeldberechnungen zur Ermittlung richtungsscharfer Topographiebeiwerte der Böenwindlast, Niemann & Partner, Bochum

Nölle, Heinz; Peil, Udo (1990): Untersuchung der Auswirkung der Vereisung auf die Tragsicherheit abgespannter Maste. IRB-Verlag, Stuttgart.

Orton, R., 1970: Tornadoes associated with Hurricane Beulah on September 19-23, 1967. 7 S.

Panneerselvam, R.; Holmes, J.D. (1992): Numerical Simulation of Thunderstorm Downdrafts, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 44, Issues 1-3, Pages 2817-2825.

Peil U.; Nölle H. (1992): Ermittlung der Lebensdauer hoher windbeanspruchter Bauwerke, Bauingenieur, Ausgabe 70, Seite 21-23, Springer VDI Verlag, Düsseldorf

Reye, T., 1872: Die Wirbelstürme, Tornados und Wettersäulen in der Erdatmosphäre mit Berücksichtigung der Stürme in der Sonnen-Atmosphäre. Carl Rümpler, Hannover, 249 S.

Romberg, E., Hölscher; N. (1995): Reststoffdeponie Hagen Sudfeldstraße-Windkanaluntersuchung zum Windklima und zur Lüfthygiene, INFU-Technik, Bochum

Schönwiese, Chr.-D. (2008): Klimatologie, 3. Auflage, Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart

Schwind, Wolfgang (2009): Die neue Schneelastnorm DIN 1055-5, kritisch hinterfragt. Bautechnik 86, Heft 10, Seite 22-29, Ernst & Sohn Verlag GmbH & Co. KG, Berlin.

Statistisches Bundesamt (2001): Mittlere Rauheitslänge in Abhängigkeit von den Landnutzungsklassen des CO-RINE-Katasters, Daten zur Bodenbedeckung der Bundesrepublik Deutschland, Wiesbaden

Stuck J. (2008): Ein Jahr nach Kyrill: Analyse und Ausblick über Orkane in Europa, Vortrag zum Deutschen Versicherungstag, FH Hannover, 2008

Tachikawa M. (1983): Trajectories of flat plates in uniform flow with application to wind-generated missiles, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 14, 443-453.

Tachikawa M. (1988): A method for estimating the distribution range of trajectories of wind-borne missiles, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 29, 175-184

TRAS 310 (2011): Technische Regel für Anlagensicherheit 310, „Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Niederschläge und Hochwasser“ vom 15.12.2011, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin.

Traup, S.; Kruse, B. (1996): Winddaten für Windenergienutzer, Forschungsprojekt Wind und Windenergiepotentiale in Deutschland, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main

U.S. Nuclear Regulatory Commission: Regulatory Guide 1.76 (2007): Design Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants. März 2007, Rev. I

Wichura, B. (2009): Analyse standortbezogener Windklimatologien als Eingangsgröße für die Bemessung von Bauwerken nach der DIN 1055-4:2005-3, Windingenieurwesen in Forschung und Praxis, II. Dreiländertagung D-A-CH der Windtechnologischen Gesellschaft, Hrsg.: U. Peil, Braunschweig

Wegener, A., 1917: Wind- und Wasserhosen in Europa, Vieweg, Braunschweig, 301 S.

Wessels, H. R. A., 1968: De zware Windhozen van 25 Juni 1967. Übersetzung von Theo Tomberg und Uwe Bergholter aus dem niederländischen. Original: Zeitschrift Hemel en Dampkring, Band 66, 1968, 155-178

Wieringa J., Gust factors over open water and built-up country, Boundary-Layer Meteorology 3 (1973) 424-441

11.4 Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 2, Erkenntnisse über die Bedeutung des Klimawandels“

Albrecht, A., Schindler, D., Grebhan, K., Kohnle, U. und Mayer, H. (2008): Klimawandel und Stürme über Europa – eine. Literaturübersicht, FVA-einblick 1/2008, 20-23; http://www.waldwissen.net/wald/klima/wandel_co2/fva_sturm/fva_klima_sturm_artikel

- Alexandersson, H., et al. (2000): Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set. *Clim. Res.*, 14, 71–73.
- Beersma, J. J., Rider, K. M., Komen, G. J., Kaas, E., Kharin, V. V. (1997): An analysis of extratropical storms in the North Atlantic region as simulated in a control and 2 x CO₂ time slice experiment with a highresolution atmospheric model. *Tellus* 49A, 49A
- Bengtsson, L., Hodges, K. I., Roeckner, E. (2006a): Storm tracks and climate change. *Journal of Climate* 3518-3543
- Bengtsson, L., Hodges, K. I., Roeckner, E., Brokopf, R. (2006b): On the natural variability of the preindustrial European climate. *Climate Dynamics* 2006, 743-760
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K. (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* 2007, 71-95
- Donat, M.G. (2010) European wind storms, related loss potentials and changes in multi-model climate simulations, Dissertation, FU-Berlin, März 2010
- Donat, M.G., T. Pardowitz, G. C. Leckebusch, U. Ulbrich, and O. Burghoff (2011): High-resolution refinement of a storm loss model and estimation of return periods of loss-intensive storms over Germany; *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2821–2833, 2011
- Finnis, J., Holland, M. M., Serreze, M. C., Cassano, J. J. (2007): Response of Northern Hemisphere extratropical cyclone activity and associated precipitation to climate change, as represented by the Community Climate System Model. *Journal of Geophysical Research* 112, doi:10.1029/2006JG000286
- Gardiner, B. A., Quine, C. P. (2000): Management of forests to reduce the risk of abiotic damage - a review with particular reference to the effects of strong winds. *Forest Ecology and Management* 261-277
- Gerstengarbe, F.-W. (2011): Szenarien für Deutschland - Auswirkungen des Klimawandels auf die Schadenssituation in der Versicherungswirtschaft; in GDV 2011: Klimakonferenz der deutschen Versicherungswirtschaft, Berlin, 24.Mai 2011; <http://www.gdv.de/2011/11/schadenszenarien-bis-zum-jahr-2100/>
- Giorgi, F., Bi, X., Pal, J. (2004): Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071–2100). *Climate Dynamics* 2004, 839–858
- Hanson, C., Palutikof, J., Osborn, T., Davies, T., Holt, T., Quine, C. (2003): An integrated assessment of the potential for change in storm activity over Europe: Implications for forestry in the UK, in: Ruck, B., et al. (Hrsg.): *Wind Effects on Trees*, No. Hanson, C., Palutikof, J. P., Livermore, M. T. J., Barring, L., Bindi, M., Corte-Real, J., Durao, R., Giannakopoulos
- Hanson, C., Palutikof, J. P., Livermore, M. T. J., Barring, L., Bindi, M., Corte-Real, J., Durao, R., Giannakopoulos, C., Good, P., Holt, T., Kundzewicz, Z., Leckebusch, G. C., Moriondo, M., Radziejewski, M., Santos, J., Schlyter, P., Schwarb, M., Stjernquist, I., Ulbrich, U. (2007): Modelling the impact of climate extremes: an overview of the MICE project. *Climatic Change* 2007, 163-177
- IPCC, 2001: Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, N. Nakicenovic and R. Swart (Eds.), Cambridge 2000
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC, 2011: Special Report - Summary for Policymakers; Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX) Jacobeit, J., Wanner, H., Luterbacher, J., Beck, C., Phillip, A., Sturm, K.

- (2003): Atmospheric circulation variability in the North Atlantic-European area since the mid-seventeenth century. *Climate Dynamics* 341-352
- Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarski, S.; Lorenz, P.; Sieck, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland – Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 20441138, Umweltbundesamt Dessau (Hrsg.), August 2008.
- Jonas, M., Staeger, T., Schönwiese, C.-D. (2005): Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen -Schwerpunkt Deutschland- Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 204 4I 254 im Auftrag des Umweltbundesamtes
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W. (2000): Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *Journal of Climate* 3670-3688
- Knippertz, P., Ulbrich, U., Speth, P. (2000): Changing cyclones and surface wind speeds over the north Atlantic and Europe in a transient GHG experiment. *Climate Research* 109-122
- Lambert, S. J. (1995): The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths. *Journal of Climate* 1447-1452
- Lambert, S. J., Fyfe, J. C. (2006): Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Climate Dynamics* 2006, 713–728
- Leckebusch, G., Ulbrich, U. (2004): On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Global and Planetary Change* 2004, 181-193
- Leckebusch, G., Koffi, B., Ulbrich, U., Pinto, J. G., Spanghel, T., Zacharias, S. (2006): Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. *Climate Research* 2006, 59-74
- Leckebusch, G., Ulbrich, U., Fröhlich, L., Pinto, J. G. (2007): Property loss potentials for European midlatitude storms in a changing climate. *Geophysical Research Letters* 2007, L05703,doi:05710.01029/02006GL027663
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J. F., ... & van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1-2), 213-241.
- MeteoSchweiz (1999): Die Lawinenkatastrophen vom Februar 1999; <http://www.meteoschweiz.ch/web/de/wetter/wetterereignisse/lawinenwinter.html>
- MPI 2006: Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert; Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Januar 2006
- MunichRe (2000): Topics Geo – Naturkatastrophen 2000, 2001,20002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, Münchener Rück, <http://www.munichre.com>
- MunichRe (2011): Topics Geo – Naturkatastrophen 2000, 2001,2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, Münchener Rück, <http://www.munichre.com>
- Orlowsky, B.; Gerstengarbe, F.-W.; Werner, P.C. (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. In: *Theoretical and Applied Climatology* 92, 3-4, 209-223
- Petoukhov, V.; Semenov, V. A. (2010): A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents, *J. Geophys. Res.*, 115, D21111
- Pinto, J. G., Spanghel, T., Ulbrich, U., Speth, P. (2006): Assessment of winter cyclone activity in a transient ECHAM4-OPYC3 GHG experiment. *Meteorologische Zeitschrift* 279-291

- Pinto, J. G., Fröhlich, L., Leckebusch, G. C., Ulbrich, U. (2007a): Changing European storm loss potentials under modified climate conditions according to ensemble simulations of the ECHAM5/MPI-OMI GCM. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 2007, 165-175.
- Pinto, J. G., Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., Spanghel, T., Reyers, M., Zacharias, S. (2007b): Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OMI GCM. *Climate Dynamics* 2007, 195-210
- Smith, J.B. et al. (2009): Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) “reasons for concern”, *PNAS* 2009; http://www.pewclimate.org/docUploads/Smith_0.pdf
- Spekat, A.; Enke, W.; Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios BI, A1B und A2; Endbericht für das Umweltbundsamt.
- Stock M (2003): Chancen und Risiken im Klimawandel: Welche Strategien kann die Wissenschaft ableiten? Aus: Akademie für Raumforschung und Landesplanung (ARL), Karl Helmut Pohl Jürgen (Hrsg.), (2003): Raumorientiertes Risikomanagement in Technik und Umwelt - Katastrophenvorsorge durch Raumplanung, Hannover. S. 132-153.
- Stock, M. (2004): Klimafolgenforschung. Mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Gesellschaft – Fallstudien. *UWSF – Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie* 16, 2, 115-124.
- Stock, M. (Ed.) (2005): KLARA, Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung; PIK-Report No. 99. Potsdam
- Stock, M.; Kropp, J.; Walkenhorst, O. (2009): Risiken, Vulnerabilität und Anpassungserfordernisse für klima-verletzliche Regionen. In: *Raumforschung und Raumordnung*, Heft 2/2009.
- Stock M. (2010): Predictions, Projections, and Perspectives of Climate Change; *Nova Acta Leopoldina NF III*, Nr.381, 15-22 (2010)
- Strasser, U. (2007): Vortrag beim VKB Symposium Schnee – Risikovorsorge und Katastrophenmanagement, 18.01.2007; http://www.vkb.de/web/html/lw/ihre_vkb/unser_engagement/symposium_schnee/
- Strasser, U. (2008): Snow loads in a changing climate: new risks?, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 1-8, 2008
- Thaler, S. (1999): 8.Bericht über die Geschehnisse in Tirol vom 19.2.1999 bis einschließlich 1.3.1999; Landeswarnzentrale Tirol
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai, (2007): Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Von Storch, H. und R. Weisse (2008): Regional storm climate and related marine hazards in the Northeast Atlantic, in: Diaz, H.F. and Murnane, R.J. (eds.), *Climate Extremes and Society*, Cambridge: Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-87028-3, p. 54-73
- Ulbrich, U., Pinto, J. G., Kupfer, H., Leckebusch, G. C., Spanghel, T., & Reyers, M. (2008): Changing Northern Hemisphere storm tracks in an ensemble of IPCC climate change simulations. *Journal of climate*, 21(8), 1669-1679.
- Walter, A., Keuler, K., Jacob, D., Knoche, R., Block, A., Kotlarski, S., Müller-Westermeier, G., Rechid, D., Ahrens, W. (2006): A high resolution reference data set of German wind velocity 1951-2001 and comparison with regional climate model results. *Meteorologische Zeitschrift* 15, 585-596
- Woth, K. & H. von Storch (2008): Klima im Wandel: Mögliche Zukünfte des Norddeutschen Küstenklimas, *Dithmarschen Landeskunde – Kultur- Natur*, 1/2008, 20-31

Zhang, Y., Wang, W.-C. (1997): Model-simulated northern winter cyclone and anticyclone activity under a greenhouse warming scenario. *Journal of Climate* 1616-1634

11.5 Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 3, Berücksichtigung des Klimawandels“

Alexandersson H, Schmith T, Iden K, Tuomenvirta H. 1998. Long-term variations of the storm climate over NW Europe. *Global Atmos. Ocean Syst.* 6: 97–120.

Alexandersson H, Tuomenvirta H, Schmith T, Iden K. 2000. Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set. *Clim. Res.* 14: 71–73.

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

Birkmann, J., R. Licker, M. Oppenheimer, M. Campos, R. Warren, G. Luber, B.C. O'Neill, and K. Takahashi, 2014: Cross-chapter box on a selection of the hazards, key vulnerabilities, key risks, and emergent risks identified in the WGII contribution to the fifth assessment report. In: *Climate Change 2014a*, pp. 113-121.

Born, K., Ludwig, P., & Pinto, J. G. (2012). Wind gust estimation for Mid-European winter storms: towards a probabilistic view. *Tellus A*, 64.

Brooks, H. E. (2013). Severe thunderstorms and climate change. *Atmospheric Research*, 123, 129-138.

Coumou, D., Petoukhov, V., Rahmstorf, S., Petri, S., Schellnhuber, H.J. (2014): Quasi-resonant circulation regimes and hemispheric synchronization of extreme weather in boreal summer. *Proceedings of the US National Academy of Sciences (PNAS)* [DOI: 10.1073/pnas.1412797111]

Coumou, D., Lehmann, J., Beckmann, J. (2015): The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes. *Science (Express)*. [DOI: 10.1126/science.1261768]

Cullen, H. M. (2010, December). The Weather of the Future: Heat Waves, Extreme Storms, and Other Scenes from a Climate-Changed Planet. In *AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 1, p. 05)*.

Donat, M.G., G.C. Leckebusch, S. Wild, and U. Ulbrich, 2011: Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(5), 1351-1370.

Ducloux, H., & Nygaard, B. E. (2014). 50 years return period wet-snow load estimation based on weather station data for overhead line design purpose. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2(8), 5139-5170.

Feser, F., Barcikowska, M., Krueger, O., Schenk, F., Weisse, R., & Xia, L. (2014). Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe—A review. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

Gatzen, C., Púčík, T., & Ryva, D. (2011). Two cold-season derechos in Europe. *Atmospheric Research*, 100(4), 740-748.

Gerstengarbe, F. W., Werner, P. C., Österle, H., & Burghoff, O. (2013). Winter storm-and summer thunderstorm-related loss events with regard to climate change in Germany. *Theoretical and applied climatology*, 114(3-4), 715-724.

Grünwald, S., & Brooks, H. E. (2011). Relationship between sounding derived parameters and the strength of tornadoes in Europe and the USA from reanalysis data. *Atmospheric Research*, 100(4), 479-488.

Haerberli, W., & Whiteman, C. (2014). Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters: A General Framework. *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters*, I. Handmer, J., Y. Honda, Z.W. Kundzewicz, N. Arnell, G. Benito, J. Hatfield, I.F. Mohamed, P. Peduzzi, S. Wu, B. Sherstyukov, K. Takahashi, and Z. Yan, 2012: Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. In: *IPCC 2012*, pp. 231-290.

Handorf, D., Jaiser, R., Dethloff, K., Rinke, A., & Cohen, J. (2015). Impacts of Arctic sea ice and continental snow cover changes on atmospheric winter teleconnections. *Geophysical Research Letters*.

- Held, H, F-W Gerstengarbe, T. Pardowitz, J. G. Pinto, U Ulbrich, K Born, M. G. Donat, M. K. Karremann, G. C. Leckebusch, P. Ludwig, K. M. Nissen, H. Österle, B. F. Prah, P. C. Werner, D. J. Befort, and O. Burghoff (2013), Projections of global warming-induced impacts on winter storm losses in the German private household sector, *Climatic Change*,
- Hofherr, T., & Kunz, M. (2010). Extreme wind climatology of winter storms in Germany. *Climate research* (Open Access for articles 4 years old and older), 41(2), 105.
- IPCC 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- IPCC 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC 2014a: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132pp.
- IPCC 2014b: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp.
- IPCC 2014c: Summary for Policymakers, In: Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jäger, S. (2014). Untersuchung der Böengeschwindigkeit von Beobachtungen und GFS-Reanalysen während Starkwindereignissen. (http://www.imk-tro.kit.edu/download/Masterarbeit_SarahJaeger.pdf)
- Jaiser, R., Dethloff, K., Handorf, D., Rinke, A., & Cohen, J. (2012). Impact of sea ice cover changes on the Northern Hemisphere atmospheric winter circulation. *Tellus A*, 64. doi:10.3402/tellusa.v64i0.11595
- Karremann, M. K. (2015). Return periods and clustering of potential losses associated with European wind-storms in a changing climate (Doctoral dissertation, Universität zu Köln).
- Krasting, J. P., Broccoli, A. J., Dixon, K. W., & Lanzante, J. R. (2013). Future changes in northern hemisphere snowfall. *Journal of Climate*, 26(20), 7813-7828.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Enke, W. (2010). Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. Climate & Environment Consulting Potsdam on a contract of the Federal Environment Agency (UBA).
- Kunkel, K. E., Karl, T. R., Brooks, H., Kossin, J., Lawrimore, J. H., Arndt, D., ... & Wuebbles, D. (2013). Monitoring and understanding trends in extreme storms: State of knowledge. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94(4), 499-514.
- Lawrence, D. M., & Slater, A. G. (2010). The contribution of snow condition trends to future ground climate. *Clim Dyn*, 34, 969-981.

- Lehtonen, I., Hoppula, P., Pirinen, P., & Gregow, H. (2014). Modelling crown snow loads in Finland: a comparison of two methods. *SILVA FENNICA*, 48(3).
- Liu, J., Curry, J. A., Wang, H., Song, M., & Horton, R. M. (2012). Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(11), 4074-4079.
- Ludwig, P. (2015). European winter storms: Dynamical aspects and wind gust estimation based on results of regional climate model simulations (Doctoral dissertation, Universität zu Köln).
- Matulla, C., Schöner, W., Alexandersson, H., Von Storch, H., & Wang, X. L. (2008). European storminess: late nineteenth century to present. *Climate Dynamics*, 31(2-3), 125-130.
- Mohr, S. (2013). Änderung des Gewitter-und Hagelpotentials im Klimawandel (Vol. 58). KIT Scientific Publishing.
- Nissen, K. M., Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., & Kuhnel, I. (2014). Decadal windstorm activity in the North Atlantic-European sector and its relationship to the meridional overturning circulation in an ensemble of simulations with a coupled climate model. *Climate Dynamics*, 43(5-6), 1545-1555.
- Nissen, K. M., Leckebusch, G. C., Pinto, J. G., & Ulbrich, U. (2014). Mediterranean cyclones and windstorms in a changing climate. *Regional Environmental Change*, 14(5), 1873-1890.
- O’Gorman, P. A. (2014). Contrasting responses of mean and extreme snowfall to climate change. *Nature*, 512(7515), 416-418.
- Petoukhov, V., & Semenov, V. A. (2010). A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents. *Journal of Geophysical Research*, 115, 11 PP.
- Prahl, B. F., D. Rybski, O. Burghoff, J. P. Kropp (2015), Comparison of storm damage functions and their performance, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 769-788, doi:10.5194/nhess-15-769-2015 (pdf)
- Prahl, B. F., D. Rybski, J. P. Kropp, O. Burghoff, and H. Held (2012), Applying stochastic small-scale damage functions to German winter storms, *Geophys. Res. Lett.*, 39,
- Osinski, R. (2015). Untersuchungen zu Atlantisch-Europäischen Winterstürmen anhand des operationellen Ensemblevorhersagesystems des EZMW (Doctoral dissertation, Freie Universität Berlin, Germany).
- Räisänen, J. (2008). Warmer climate: less or more snow?. *Climate Dynamics*, 30(2-3), 307-319.
- Räisänen, J. (2015). Twenty-first century changes in snowfall climate in Northern Europe in ENSEMBLES regional climate models. *Climate Dynamics*, 1-15.
- Rauthe, M., Kunz, M., & Kottmeier, C. (2010). Changes in wind gust extremes over Central Europe derived from a small ensemble of high resolution regional climate models. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(3), 299-312.
- Riediger, U. (2012). Wetterlagen ändern sich mit dem Klimawandel. DWD (Deutscher Wetterdienst)(Ed.): Klimastatusbericht, 81-85.
- Rogers, T, Walsh JE, Leonawicz M, Lindgren M. (2015 In Press). Arctic sea ice: Use of observational data and model hindcasts to refine future projections of ice extent. *Polar Geography*.
- Sander, J. (2011). Extremwetterereignisse im Klimawandel (Doctoral dissertation, lmu).
- Sander, J., & Dotzek, N. (2010). The impact of climate change on severe convective storms over Europe. In 10th EMS Annual Meeting, 10th European Conference on Applications of Meteorology (ECAM) Abstracts, held Sept. 13-17, 2010 in Zürich, Switzerland. <http://meetings.copernicus.org/ems2010/>, id. EMS2010-532 (Vol. 1, p. 532).
- Schmitt, R. (2012). Schneelast an Stromleitungen - Heute und in Zukunft. CSC-Report 5; Climate Service Center, Hamburg. (http://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/csc_report5.pdf)
- Schwierz, C., P. Köllner-Heck, E.Z. Mutter, D.N. Bresch, P.L. Vidale, M. Wild, and C. Schär, 2010: Modelling European winter wind storm losses in current and future climate. *Climatic Change*, 101(3), 485-514.

- Seneviratne, S.I., N. Nicholls, D. Easterling, C.M. Goodess, S. Kanae, J. Kossin, Y. Luo, J. Marengo, K. McInnes, M. Rahimi, M. Reichstein, A. Sorteberg, C. Vera, and X. Zhang, 2012: Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: IPCC 2012, pp. 109-230.
- Stock, M. (2009) Hat der Klimawandel Auswirkungen auf die Anlagensicherheit? Chemie Ingenieur Technik – CIT 81(1–2):119–126
- Stock, M. (2015) „Gefahrenquellen Wind, Schnee- und Eislasten: Wissenschaftlicher Kenntnisstand zum möglichen Einfluss des Klimawandels“, Vortrag beim Fachgespräch des AK Umgebungsbedingte Gefahrenquellen Wind und Schnee der KAS, Bonn 17.04.2015
- Vihma, T. (2014). Effects of Arctic sea ice decline on weather and climate: A review. *Surveys in Geophysics*, 35(5), 1175-1214.
- Wesolek, E., & Mahieu, P. (2011). The F4 tornado of August 3, 2008, in Northern France: Case study of a tornadic storm in a low CAPE environment. *Atmospheric Research*, 100(4), 649-656.
- Wichura, B. (2015) „Fachlicher Kenntnisstand Schneelasten“, Vortrag beim Fachgespräch des AK Umgebungsbedingte Gefahrenquellen Wind und Schnee der KAS, Bonn 17.04.2015
- Woollings, T., Gregory, J. M., Pinto, J. G., Reyes, M., & Brayshaw, D. J. (2012). Response of the North Atlantic storm track to climate change shaped by ocean-atmosphere coupling. *Nature Geoscience*, 5(5), 313-317.
- Wright, D. M., Posselt, D. J., & Steiner, A. L. (2013). Sensitivity of lake-effect snowfall to lake ice cover and temperature in the Great Lakes region. *Monthly Weather Review*, 141(2), 670-689.
- Zappa, G., Shaffrey, L. C., Hodges, K. I., Sansom, P. G., & Stephenson, D. B. (2013). A multimodel assessment of future projections of north atlantic and european extratropical cyclones in the cmip5 climate models*. *Journal of Climate*, 26(16), 5846-5862.

11.6 Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 4, Bauliche Gefahrenabwehr“

- Andrä, H.-P. (2006): Bausicherheit darf nicht den Ökonomen überlassen werden. VDI-Nachrichten, Nr. 2 vom 13.01.2006.
- Ciupack, Y.; Paternak, H.(2012): Kalibrierung von Bemessungskonzepten gemäß Eurocode am Beispiel von Klebeverbindungen. *Bauingenieur* 87, Heft 3, 116-123.
- DIN 1055-100:2001-03 (2001): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN EN 1990:2010-12 (2010): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN EN 1990/NA, Ausgabe Dezember 2010: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter – Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.
- DIN EN 1991-1-4:2010-12 (2010): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten in Verbindung mit DIN EN 1991-1-4/NA: Nationaler Anhang. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN
- DIN 1055 Blatt 4 (1938): Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten; Windlasten. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN 1055 Teil 4 (1986): Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten; Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN 1055-4:2005-03 (2005): Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4: Windlasten. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

- DIN 1055-100:2001-03 (2001): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Freudenthal, A.M. (1956): Safety and probability of failure. Transactions of the ASME, Paper No. 2483, Vol. 121.
- Klingmüller, O.; Bourgund, U. (1992): Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau. Vieweg Verlag Braunschweig.
- König, G.; Tue, N. (1998): Grundlagen des Stahlbetonbaus. Verlag B.G. Teubner, Stuttgart.
- Kommission der EG (Hrsg.) (1984): Eurocode Nr. I – Gemeinsame einheitliche Regeln für verschiedenen Einheiten und Baustoffe. Entwurf EGKS-EWG-EAG, Generaldirektion Binnenmarkt und gewerbliche Wirtschaft, Brüssel.
- Krätzig, W.B. (2004): Schädigung, Dauerhaftigkeit und Lebensdauer von Tragwerken. Der Prüflingenieur, Heft 10, 26-37.
- Krätzig, W.B. (2006): Deutschlands Bausubstanz verkommt seit Jahren. VDI-Nachrichten Nr. 5 vom 05.02.2006.
- Mayer, M. (1926): Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkraften anstatt nach zulässigen Spannungen. Verlag J. Springer, Berlin.
- NABau im DIN (1977): Richtlinie zur Bestimmung der der Sicherheitsmaße im Ingenieurbau (Richtlinie GruSiBau). NABau-Arbeitsausschuss Sicherheit von Bauwerken, Berlin.
- Niemann, H.-J.; Diburg, S. (2012): The structural reliability of cooling towers under wind hazard considering extreme wind statistics with an upper limit. In: Harte, R.; Meiswinkel, R. (eds.), Proceedings ISCT 2012 6th International Symposium on Cooling Towers. Cologne/Germany.
- Niemann, H.-J., Peil, U. (2003): Windlasten auf Bauwerke, Stahlbaukalender 2003, Ernst & Sohn, Berlin
- Petersen, Ch. (1974): Zur Einführung des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes im Normenwesen. Arbeitsberichte zur Sicherheitstheorie der Bauwerke, Heft 5, 9-25. SFB 96 TU München.
- Rackwitz, R.; Zilch, K. (2012): Zuverlässigkeit von Tragwerken. Abschnitt 1.6 in: Zilch, K. et.al. (Hrsg.), Handbuch für Bauingenieure. Zweite, aktualisierte Auflage. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Rackwitz, R.; Fiessler, B. (1978): Structural Reliability under Combined Random Loads. Computers & Structures 9, 489-494.
- Rat der EG (1988): Richtlinie des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte (AZ 89/106/EWG), Fassung 2I.
- Rüsch, H.; Rackwitz, R. (1970): Die Grundlagen der Sicherheitstheorie. VDI-Berichte Nr. 142.
- Rüsch, H.; Kupfer, H. (1966): Bemessung von Spannbetonbauteilen. Beitrag im Betonkalender Band I, 470-547, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- Schneider, J. (2000): Safety – A Matter of Risk, Costs and Consensus. Structural Engineering International, 266-269.
- Schneider, J. (1994): Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen, Grundwissen für Ingenieure. VDF Hochschulverlag an der ETH und B.G. Teubner, Zürich und Stuttgart.
- Stangenberg, F.; Breitenbücher, R.; Bruhns, O.T.; Hartmann, D.; Höffer, R.; Kuhl, D.; Meschke, G. (Eds.) (2009): Lifetime-Oriented Structural Design Concepts. Springer Verlag, Berlin.
- Schuëller, G.I. (1981): Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin.
- TGL 32274/07 (1976): Lastannahmen für Bauwerke, Windlasten. Bauakademie der DDR, Institut für Projektierung und Standardisierung, Berlin

VDI 6200 (2010): Richtlinie: Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, Düsseldorf.

11.7 Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 5, Nachrüstungsmaßnahmen“

Andrä, H.-P. (2006): Bausicherheit darf nicht den Ökonomen überlassen werden. VDI-Nachrichten, Nr. 2 vom 13.01.2006.

DIN 1055, Blatt 4, Ausgabe Juni (1938): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 1055 Teil 4 (1986): Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten; Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken. Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 1055-4, Ausgabe März (2005): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 1055-4, Berichtigung März (2006): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Berichtigung DIN 1055-4:2005-03, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 1055-5, Ausgabe Dezember (1936): Schneebelastung - DIN 1055, Blatt 5. Deutschland.

DIN 1055-5, Ausgabe Dezember (1956): Schneebelastung - DIN 1055, Blatt 5. Deutschland.

DIN 1055-5, Ausgabe Juni (1975): Lastannahmen für Bauten, Verkehrslasten, Schneelast und Eislast. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.

DIN 1055-5 AI, Ausgabe April (1994): Lastannahmen für Bauten, Verkehrslasten, Schneelast und Eislast. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.

DIN 1055-5, Ausgabe Juli (2005): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 5: Schnee- und Eislasten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.

DIN 1055-100:2001-03 (2001): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN EN 1990:2010-12, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002 + AI:2005 + AI:2005/AC:2010, Deutsches Institut für Normung e.V., Dez. 2010

DIN EN 1991-1-3, Ausgabe Dezember (2010): Eurocode I: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil I-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten, Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003+AC:2009. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.

DIN EN 1991-1-3/NA, Ausgabe Dezember (2010): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode I: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil I-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.

DIN EN 1991-1-4:2010-12 (2010): Eurocode I: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil I-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten in Verbindung mit DIN EN 1991-1-4/NA: Nationaler Anhang. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

Krätzig, W.B. (2004): Schädigung, Dauerhaftigkeit und Lebensdauer von Tragwerken. Der Prüflingenieur, Heft 10, 26-37.

Krätzig, W.B. (2006): Deutschlands Bausubstanz verkommt seit Jahren. VDI-Nachrichten Nr. 5 vom 05.02.2006.

Landmann, Rohmer (2015): Umweltrecht Band IV; Bearbeiter: Hansmann: 12.BImSchV, 77. Ergänzungslieferung Stand 01.08.2015, Verlag C.H. Beck, München

Stangenberg, F.; Breitenbücher, R.; Bruhns, O.T.; Hartmann, D.; Höffer, R.; Kuhl, D.; Meschke, G. (Eds.) (2009): Lifetime-Oriented Structural Design Concepts. Springer Verlag, Berlin.

TGL 20167-I: II/1963: – Lastannahmen für Bauten, Grenzlasterfaktoren, Normlasten für Verkehrs-, Schnee- und TGL 32274/07 (1976): Lastannahmen für Bauwerke, Windlasten. Bauakademie der DDR, Institut für Projektierung und Standardisierung, Berlin

UFOPLAN 20348362 (2007): Schutz von neuen und bestehenden Anlagen und Betriebsbereichen gegen natürliche, umgebungsbedingte Gefahrenquellen, insbesondere Hochwasser (Untersuchung vor- und nachsorgender Maßnahmen), Umweltbundesamt, Dessau, ISSN 1862-4804

VDI 6200 (2010): Richtlinie: Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, Düsseldorf.

11.8 Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 6, Abschätzung der finanziellen Auswirkungen“

Lang, H.J. (1948): Simplified Approach to Preliminary Cost Estimates. Chemical Engineering, Nr.6, (S. 112 – 113)

Prinzing, P.; Rödl, R. und Aichert, D. (1985). Investitionskosten-Schätzung für Chemieanlagen. Chemie Ingenieur Technik (57), Nr. 1, (S. 8–14).

11.9 Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 7, Anlage 1, Anwendungsbeispiel Heide“

Keine zusätzlichen Quellenangaben notwendig

11.10 Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 8, Anlage 2, Anwendungsbeispiel Rostock“

Diburg S.; Hölscher N.; Niemann H.-J. (2011): Prognose seltener Sturmereignisse anhand meteorologischer Daten unter Verwendung probabilistischer Schätzverfahren, Niemann & Partner, Bochum, http://www.vgb.org/news_pro_gumbel.html

Diburg S., Hölscher N., Niemann H.-J., Rosenhauer W.: Optimierung des extremwertstatistischen Auswerteverfahrens GUMBEL, Bochum und Rösrath, Juni 2011, (http://www.vgb.org/news_pro_gumbel.html)

DIN 1055, Blatt 4, Ausgabe Juni (1938): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 1055-4, Ausgabe März (2005): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 1055-4, Berichtigung März (2006): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 4: Windlasten, Berichtigung DIN 1055-4:2005-03, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

DIN 1055-5, Ausgabe Juli (2005): Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 5: Schnee- und Eislasten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.

DIN EN 1990:2010-12, Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010, Deutsches Institut für Normung e.V., Dez. 2010

DIN EN 1991-1-3, Ausgabe Dezember (2010): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten, Deutsche Fassung EN 1991-1-3:2003+AC:2009. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.

DIN EN 1991-1-3/NA, Ausgabe Dezember (2010): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Deutschland.

DIN EN 1991-1-4:2010-12 (2010): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten in Verbindung mit DIN EN 1991-1-4/NA: Nationaler Anhang. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN

TGL 20167-I: 11/1963: – Lastannahmen für Bauten, Grenzlastfaktoren, Normlasten für Verkehrs-, Schnee- und Windbelastung

TRAS - Technische Regel für Anlagensicherheit (Vorentwurf), Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquelle Wind sowie Schnee- und Eislasten, Basis: 8. AK-UG2 am 18.12.2013

TRAS - Hinweise und Erläuterungen zum Vorentwurf der TRAS, Vorkehrungen und Maßnahmen wegen der Gefahrenquellen Wind sowie Schnee- und Eislasten, Krätzig, Wilfried B. u.a., Bochum, 19.07.2013

Niemann H.-J.; Hölscher N. (2004): Erfassung des Windrichtungseinflusses auf die Windlasteffekte an Tragwerken, Stahlbau, 73. Jahrgang, Heft 4, S. 246-253, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Niemann H.-J. (2006): Windlasten für turmartige Bauwerke nach DIN 1055-4 neu, Betonkalender, Ernst & Sohn Verlag, Berlin

Statische Berechnungen zum Standfestigkeits-, Verankerungs- und Wanddickennachweis der Xylolkolonnen der DEA, Raffinerie Heide GmbH – Xylolkolonnen, Projekt/Nr.: ABI082059WB000I; Datum, Ort: 26. Januar 1962, Sterkrade; GHH - Gutehoffnungshütte

Statische Berechnung der Fundamente der Xylolfraktionierung auf dem Werksgelände in Hemmingstedt, Raffinerie Heide GmbH – Xylolkolonnen, Projekt/Nr.: ABI082063WB000I, Datum: 9. April 1962, Strabag Bau AG

Statistisches Bundesamt (2001): Mittlere Rauigkeitslänge in Abhängigkeit von den Landnutzungsklassen des CO-RINE-Katasters, Daten zur Bodenbedeckung der Bundesrepublik Deutschland, Wiesbaden

11.11 Quellenverzeichnis zu „III. Forschungsbericht: Kapitel 9, Anlage 3, Berücksichtigung Tornado“

FEMA 361 Design and Construction Guidance for Community Safe Rooms FEMA 361, Second Edition / August 2008

FEMA P-361, Safe Rooms for Tornadoes and Hurricanes: Guidance for Community and Residential Safe Rooms, Third Edition (2015)