

**Untersuchungen zu
neuen Entwicklungen
auf den Gebieten
EVA und EVI**

**Neue Entwicklungen bei
Einwirkungen von außen
und Quantifizierung von
Windeinwirkungen**

Untersuchungen zu neuen Entwicklungen auf den Gebieten EVA und EVI

Neue Entwicklungen bei Einwirkungen von außen und Quantifizierung von Windeinwirkungen

Christian Strack
Gernot Thuma

November 2024

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende Eigenforschungsvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) unter dem Förderkennzeichen 4721R01350 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der GRS.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der GRS wieder und muss nicht mit der Meinung des BMUV übereinstimmen.

Deskriptoren

Einwirkungen von außen, Erdbebenserien, geringe Eintrittswahrscheinlichkeit, Nachbeben, neue Entwicklungen, Starkwind, Tornado, Windlasten

Kurzfassung

In diesem Bericht wird einerseits ein Überblick über aktuelle Entwicklungen im Bereich Einwirkungen von außen auf kerntechnische Anlagen gegeben, wobei insbesondere Erdbebenserien näher beleuchtet werden. Andererseits werden eigene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Windeinwirkungen auf Kernkraftwerke vorgestellt. Letztere umfassen sowohl eine probabilistische Analyse der aus linearen Winden (Sturmsystemen) für Referenzstandorte im Flachland bzw. an der Küste und im Mittelgebirge resultierenden Windgeschwindigkeiten mit Überschreitenswahrscheinlichkeiten von 10^{-4} pro Jahr als auch eine generische Ermittlung der Tornadogefährdung in Deutschland unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeitsverteilung innerhalb eines Tornados.

Erdbeben treten häufig als Serien, bestehend aus Vor-, Haupt- und Nachbeben, auf. Nicht selten gibt es auch innerhalb der Serie zwei oder mehr ähnlich starke Erdbeben. Dieses Verhalten wurde in seismischen Sicherheitsanalysen für Kernkraftwerke bisher nicht explizit betrachtet. In den letzten Jahren wurden jedoch methodische Ansätze für eine mögliche Berücksichtigung von (starken) Nachbeben in seismischen Sicherheitsanalysen (z. B. im Rahmen des METIS-Projekts) entwickelt.

In den Untersuchungen der GRS zu linearen Windeinwirkungen wurde ein Weg aufgezeigt, wie eine probabilistische Windgefährdungsanalyse für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr durchgeführt werden könnte. Dabei wurden sowohl aleatorische als teilweise auch epistemische Unsicherheiten berücksichtigt. Hierbei zeigte sich, dass – zumindest für die betrachteten meteorologischen Referenzstationen – die Unsicherheiten des Median- bzw. Mittelwertes der Windgeschwindigkeit hauptsächlich durch die Wahl der Extrapolationsmethode und damit durch epistemische Unsicherheiten bestimmt sind. Höhere Fraktile wie das 95 % oder das 99 %-Fraktile unterscheiden sich zwischen den einzelnen Methoden jedoch nicht wesentlich, so dass hier epistemische Unsicherheiten eine geringere Rolle spielen.

Für die Ermittlung der Tornado-Gefährdung in Deutschland wurden Daten des ESWD zu beobachteten Tornados hinsichtlich Häufigkeit und betroffener Fläche ausgewertet. Da die Windgeschwindigkeiten innerhalb eines Tornados deutlich variieren, wurde diese Windverteilung zusätzlich mittels eines einfachen Modells analysiert und in die Gefährdungsermittlung mit einbezogen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Tornado-Windstärken von F0 und ggf. auch F1 nach der Fujita-Skala im Bereich von Eintrittswahrscheinlichkeiten der Größenordnung 10^{-4} pro Jahr liegen. Diese Windge-

schwindigkeiten dürften jedoch nicht ausreichend sein, um in einem Kernkraftwerk zu sicherheitstechnisch relevanten Schäden zu führen. Stärkere Tornado-Windgeschwindigkeiten im Bereich F2 bis F5 sind jedoch in Deutschland sehr selten, so dass es gerechtfertigt erscheint, sie mittels Robustheitsbetrachtungen, bei denen von der Auslegung gegen die Notstandsfälle Flugzeugabsturz und Explosionsdruckwelle Kredit genommen wird, zu behandeln. Neben dieser generischen Gefährdungsanalyse werden auch mögliche Auswirkungen von (insbesondere starken) Tornados auf Kernkraftwerke diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

	Kurzfassung	I
1	Einleitung	1
2	Neue Entwicklungen bei Einwirkungen von außen	3
2.1	Allgemeine Erkenntnisse aus Konferenzen und Workshops.....	4
2.1.1	Probabilistic Flood Hazard Assessment Research Workshop 2022	4
2.1.2	Workshop on High Winds and Tornadoes	7
2.1.3	VdS-Fachtagung Naturgefahren und Elementarschäden	12
2.1.4	Probabilistic Flood Hazard Assessment Research Workshop 2023	16
2.1.5	ExtremWetterKongress 2023	19
2.1.6	Zusammenfassende Schlussfolgerungen aus Konferenzen und Workshops	25
2.2	Erdbebenserien	29
2.2.1	Schadenspotenzial von Erdbebenserien.....	30
2.2.2	Berücksichtigung von Erdbebenserien in seismischen Sicherheitsanalysen	36
2.2.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der Befassung mit Erdbebenserien	42
3	Analysen zur Quantifizierung von Windlasten	43
3.1	Methoden und Daten.....	45
3.1.1	Datenbeschaffung und -aufbereitung	45
3.1.2	Extrapolationsmethoden	46
3.1.3	Parameter-Fitting	47
3.2	Probabilistische Windgefährdungsanalyse.....	48
3.2.1	Blockmaxima und Peak-Over-Threshold	49
3.2.2	Bestimmung der statistischen Beziehung zwischen Stundenmittelwert und 10-Minuten-Mittelwert.....	50
3.2.3	Bootstrapping und Monte-Carlo-Simulation	51
3.2.4	Extremwertanalyse.....	51
3.2.5	Kombination der Einzelergebnisse mittels logischen Baums	52

3.3	Ergebnisse	54
4	Tornados	57
4.1	Tornadogefährdung.....	58
4.1.1	Datenbeschaffung	59
4.1.2	Datenaufbereitung.....	59
4.1.3	Überschreitenswahrscheinlichkeiten für Tornados unterschiedlicher Stärke	59
4.1.4	Von Tornados unterschiedlicher Stärke im Mittel betroffene Flächen.....	61
4.1.5	Betroffene Fläche je Jahr und Tornadokategorie	62
4.1.6	Regionale Variabilität der Tornadohäufigkeiten	64
4.1.7	Vortex-Struktur von Tornados	64
4.1.8	Wirbelmodell	66
4.1.9	Pfadlänge und -breite.....	66
4.1.10	Zuggeschwindigkeit des Tornados.....	68
4.1.11	Monte-Carlo-Simulation	69
4.1.12	Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation	69
4.1.13	Eintrittswahrscheinlichkeiten von Windgeschwindigkeitskategorien	70
4.2	Mögliche sicherheitstechnische Auswirkungen von Tornados.....	71
4.2.1	Schäden aufgrund hoher Windgeschwindigkeiten	72
4.2.2	Effekte aufgrund des Unterdrucks im Zentrum des Tornados.....	76
4.2.3	Sogeffekt durch die aufwärtsgerichtete Luftströmung	77
4.2.4	Auswirkungen auf weit auseinanderliegende Anlagenbereiche	79
4.3	Sicherheitstechnische Bewertung	81
5	Zusammenfassung	83
	Literaturverzeichnis	89
	Abbildungsverzeichnis	97
	Tabellenverzeichnis	99

1 Einleitung

Aufgrund ihres Gefährdungspotenzials werden Kernkraftwerke und andere kerntechnische Anlagen weltweit gegen Einwirkungen von außen (EVA) ausgelegt. Grundlage für diese Auslegung und sicherheitstechnische Bewertungen bestehender Anlagen sind Analysen zur Häufigkeit und zu den Charakteristika der für den Standort relevanten Einwirkungen sowie zu deren möglichen Auswirkungen.

Während es für einige Einwirkungen bereits sehr weit entwickelte Methoden zur Gefährdungsermittlung gibt, ist bei anderen Einwirkungen noch Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten. Zu den gut untersuchten Einwirkungen gehören insbesondere Erdbeben und Hochwasser (an Flüssen und an der Küste). Der Auslegung von Kernkraftwerken gegen diese Einwirkungen werden international schon seit langem Ereignisse mit Überschreitenswahrscheinlichkeiten von weniger als 10^{-4} pro Jahr (entsprechend einer mittleren Wiederkehrperiode von 10.000 oder mehr Jahren) zugrunde gelegt. KTA 2201.1 /KTA 11/ legt die Überschreitenswahrscheinlichkeit des Bemessungserdbebens mit 10^{-5} pro Jahr fest und KTA 2207 /KTA 21/ diejenige des Bemessungshochwassers mit 10^{-4} pro Jahr. Die potenzielle sicherheitstechnische Bedeutung anderer naturbedingter Einwirkungen wurde erst später erkannt. Dementsprechend sind die Methoden der Gefährdungsermittlung für diese Einwirkungen noch nicht so ausgereift wie für Erdbeben und Hochwasser. Nichtsdestotrotz wurden die entsprechenden Regelwerksanforderungen in den letzten Jahren konkretisiert und oft auch angehoben. Ein Beispiel hierfür ist die Forderung der Western European Nuclear Regulators Association (WENRA), naturbedingte Einwirkungen mit Überschreitenswahrscheinlichkeiten von 10^{-4} pro Jahr auch bei bestehenden Kernkraftwerken zu berücksichtigen /WEN 14/¹. In Deutschland sind – entsprechend dem Verständnis der Sicherheitsphilosophie der Reaktorsicherheitskommission (RSK) /RSK 13/ – naturbedingte Einwirkungen mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-5} pro Jahr dem Auslegungsbereich (Sicherheitsebene 3) zuzuordnen; eine Ausnahme gilt für wetterbedingte Einwirkungen, für die aufgrund der angenommenen Vorwarnzeit eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von

¹ In der Fassung aus dem Jahr 2021 /WEN 21/ wurde diese Anforderung auf alle Einwirkungen von außen (einschließlich zivilisatorischer Einwirkungen) ausgeweitet. Hinsichtlich naturbedingter Einwirkungen blieben die Anforderungen gegenüber der früheren Fassung /WEN 14/ unverändert. Für Einwirkungen, bei denen ein Ereignis mit dieser Überschreitenswahrscheinlichkeit nicht sinnvoll ermittelt werden kann, ist eine Einwirkung mit äquivalentem Schadenspotenzial zu wählen.

10^{-4} pro Jahr angesetzt wird. Um die sich hieraus ergebenden Lücken zwischen Regelwerksanforderungen und Praxis zu schließen und generell zu einem besseren Verständnis naturbedingter Einwirkungen auf Kernkraftwerke zu gelangen, finden international umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten statt.

Ziel dieses Berichts ist es, einerseits einen Eindruck von den aktuellen Entwicklungen zu vermitteln² und andererseits selbst einen Beitrag zu diesen Entwicklungen zu leisten. Hierfür werden im Kapitel 2 zunächst allgemeine Informationen zu neuen Entwicklungen auf dem Gebiet EVA zusammengestellt, die im Rahmen von Fachkonferenzen und der Mitwirkung in internationalen Arbeitsgruppen gewonnen wurden (Abschnitt 2.1). Anschließend wird etwas genauer auf die Problematik von Erdbebenserien, d. h. die Kombination aus einem Hauptbeben mit Vor- bzw. Nachbeben eingegangen (Abschnitt 2.2). Die beiden darauffolgenden Kapitel sind den Ergebnissen eigener Analysen zu Windeinwirkungen gewidmet. Letztere umfassen sowohl eine exemplarische Quantifizierung der aus linearen Winden aufgrund von Tiefdrucksystemen resultierenden extremen Windgeschwindigkeiten für zwei Referenzstandorten einschließlich einer Quantifizierung der aleatorischen und epistemischen Unsicherheiten (Kapitel 3) als auch eine Diskussion der sich aus Tornados ergebenden generischen Gefährdung in Deutschland (Kapitel 4).

² Einen vollständigen Überblick über die aktuellen Entwicklungen zu geben, ist aufgrund der Vielzahl von Forschungsprojekten nicht möglich.

2 Neue Entwicklungen bei Einwirkungen von außen

Im Bereich der Kerntechnik werden neue Entwicklungen zu Einwirkungen von außen oft nicht durch Veröffentlichung in wissenschaftlich-technischen Journalen beschrieben, sondern durch Beiträge zu Fachkonferenzen und Workshops. Um den Aufwand einer breit angelegten Literaturrecherche zu vermeiden, erfolgte daher die Ermittlung von Informationen zu aktuellen Entwicklungen auf diesem Gebiet durch die Teilnahme an solchen Veranstaltungen und deren Auswertung. In Abschnitt 2.1 wird dementsprechend über die Erkenntnisse aus den folgenden Veranstaltungen berichtet:

- 7th Probabilistic Flood Hazard Assessment (PFHA) Research Workshop der U.S. NRC, 15. – 18. Februar 2022, virtuell,
- OECD/NEA/CSNI/WGEV Workshop on High Winds and Tornadoes – Hazard Assessment and Protection of Nuclear Installations, 22. – 25. März 2022, virtuell,
- VdS-Fachtagung Naturgefahren und Elementarschäden, 23. August 2022, Köln, Deutschland,
- 8th Probabilistic Flood Hazard Assessment (PFHA) Research Workshop der U.S. NRC, 21. – 24. März 2023, virtuell,
- 13. ExtremWetterKongress, 27. – 29. September 2023, Hamburg, Deutschland.

Weitere Informationen wurden auch durch die Mitwirkung in internationalen Arbeitsgruppen bzw. bei internationalen Projekten gewonnen. Hierzu zählen im Zusammenhang mit diesem Bericht insbesondere

- die Working Group on External Events (WGEV) der Nuclear Energy Agency (NEA),
- die Seismic Engineering Sub-Group der Working Group on Integrity and Ageing of Components and Structures (WGIAGE) der NEA und
- das Horizon 2020 Projekt METIS (Methodologies and Tools Innovation for Seismic Risk Assessment).

Insbesondere die Diskussionen im Rahmen von METIS führten dazu, dass die Problematik von Erdbebenserien in dem diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhaben nochmals genauer betrachtet wurde (vgl. Abschnitt 2.2).

2.1 Allgemeine Erkenntnisse aus Konferenzen und Workshops

Die sicherheitstechnische Bewertung von naturbedingten Einwirkungen setzt nicht nur Kenntnis über die Auslegung kerntechnischer Anlagen voraus, sondern insbesondere auch ein umfassendes Wissen über die Einwirkungen selbst. Daher wurden im Rahmen des diesem Bericht zugrundeliegenden Vorhabens auch Veranstaltungen besucht, die ihren Fokus nicht auf kerntechnischen Anlagen hatten. Die wichtigsten Erkenntnisse werden in den folgenden Abschnitten stichpunktartig zusammengefasst, wobei sich die Unterstruktur an den Sessions der jeweiligen Konferenzen bzw. Workshops orientiert.

2.1.1 Probabilistic Flood Hazard Assessment Research Workshop 2022

Der Probabilistic Flood Hazard Assessment Research Workshop der US-amerikanischen Nuclear Regulatory Commission (U.S. NRC) findet seit dem Jahr 2015 statt und ist als jährlich stattfindende Veranstaltung konzipiert. Allerdings gab es kurze Unterbrechungen, so dass der Workshop im Jahr 2022 die siebte Veranstaltung der Reihe war. Die Proceedings des Workshops /NRC 22/ können unter <https://www.nrc.gov/docs/ML2225/ML22257A136.pdf> abgerufen werden.

Messtechnik (Sensoren)

- In den USA fördert das Department of Homeland Security die Entwicklung und Erprobung von billigen und weitgehend automatisierten Sensoren für Internetanwendungen, die geeignet sind, an kleinen Gewässern ohne Pegelmessstellen rasche Flutwarnungen zu generieren und unabhängig von Gewässern natürliche Brände zeitnah zu erkennen.
- Das U.S. Army Corps of Engineers (USACE) entwickelt eine Datenbank, in die Daten aller Sensoren an Staudämmen und Deichen eingehen sollen. Dies soll dem Risk-Informed Decision Making³ dienen, das in den letzten Jahren in den USA bei der Aufsicht über kerntechnische Anlagen vermehrt genutzt wird.

³ Risk-Informed Decision Making ist (nach Definition der U.S. NRC) ein Ansatz für die regulatorische Entscheidungsfindung, bei dem Erkenntnisse aus der probabilistischen Risikobewertung mit anderen technischen Erkenntnissen kombiniert werden.

Unwetter

- Eine ursprünglich von der Federal Emergency Management Agency (FEMA) in den USA entwickelte Datenbank zu Verwundbarkeiten durch Naturkatastrophen wird nun von der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) weiterentwickelt.

Starkregen

- An der University of Maryland wird künstliche Intelligenz (KI) genutzt, um Niederschläge auf lokaler Ebene aus globalen Niederschlagssimulationen abzuleiten. Für dieses Downscaling wird eine KI mit entsprechenden Daten auf beiden Skalen trainiert.
- An der Arizona State University werden Untersuchungen dazu durchgeführt, wie sich stationäre Extremwertanalysen mittels Wettertypisierung aus Klimamodellen verbessern lassen. Der Ansatz basiert auf der Überlegung, dass nur bestimmte großräumige Wetterlagen für Starkniederschläge verantwortlich sind. Diese Großwetterlagen und deren Trends können in Klimamodellen durch ein Downscaling in Verbindung mit einer geeigneten Mustererkennung identifiziert werden.
- Das Pacific Northwest National Laboratory hat exemplarisch eine PFHA (probabilistische Überflutungsgefährdungsanalyse) für Starkregenereignisse für eine reale Anlage durchgeführt. Auf Basis einer Parameterstudie für verschiedene Gitterpunkte kam man zu dem Schluss, dass der wichtigste Faktor für den Ablauf des Überflutungsgeschehens die Bodenrauhigkeit ist. Andere (untergrundbezogene) Faktoren sind aufgrund der weitgehenden Versiegelung des Bodens eher als nachrangig zu betrachten.

Flusshochwasser

- Ein Flusshochwasser kann auch in Kombination mit anderen Überflutungsursachen auf einen Standort einwirken. Daher arbeitet der U.S. Geological Survey (USGS) an einer Extremwertanalyse für gemischte Populationen von Überflutungsursachen.
- Aterra Solutions nutzt einen stochastischen Wettergenerator in Verbindung mit kontinuierlichen hydrologischen Simulationen zur Bemessung kritischer Infrastrukturen.

Probabilistische Risikoanalyse

- An der University of Maryland wurde an generischen Gebäudemodellen eine Methode entwickelt, um Flood Fragilities zu ermitteln. Unter Fragilities ist in diesem Fall die Überflutungshöhe in den jeweiligen Gebäuden zu verstehen.
- Am Electric Power Research Institute (EPRI) wird derzeit eine External Flooding PRA Guidance entwickelt, bei der korrelierte und kombinierte Einwirkungen mit in das Screening einbezogen werden.
- Da das USACE mehr als 700 Staudämme betreibt, wird dort an Modellen für das Versagen von Staudämmen gearbeitet.

Sturmfluten

- Mehrere Institutionen arbeiten gemeinsam mit der U.S. NRC an der Beschreibung korrelierter Überflutungsereignisse mittels eines Bayesschen Ansatzes. Dabei sollen Sturmfluten, Tide, Niederschläge und Abflüsse in Binnengewässern berücksichtigt werden. Tropische Stürme (als Ursache von Sturmfluten und Niederschlägen) werden dabei modelliert, während für die Tide eine statistische Analyse erfolgt.
- Die gleichen korrelierten Überflutungseffekte betrachtet auch das USACE in einer exemplarischen PFHA für Sturmflut für einen fiktiven Standort.
- In Korea befasst sich das Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) mit der probabilistischen Berechnung von Wellenhöhen bei Sturmfluten.

Duane Arnold-Ereignis

- Im August 2020 traf eine Unwetterfront auf den Kernkraftwerkstandort Duane Arnold (Iowa, USA). Bei diesem Ereignis wurden am Standort Windgeschwindigkeiten von mehr als 160 km/h erreicht, im Umland sogar bis zu 210 km/h. Durch Sturmschäden sind alle sechs Netzanbindungen ausgefallen und die Stromversorgung erfolgte über die Notstromdiesel, da der Lastabwurf auf Eigenbedarf nicht erfolgreich war. Zusätzlich gab es durch eingetragenen Schmutz Probleme mit der Kühlwasserreinigung. Obwohl das gesicherte Nebenkühlwasser mit einer Bypass-Schaltung weiterbetrieben werden konnte, fiel dennoch die Kühlung des Brennelementlagerbeckens aus. Später konnten alle sicherheitstechnisch wichtigen Systemfunktionen wieder hergestellt werden. Durch die Windeinwirkung wurden die Zellenkühler zerstört sowie eines der beiden Gebäude mit Notfallequipment beschädigt. Außerdem wurden im

Nachgang kleine Risse im Reaktorgebäude festgestellt (Zusammenhang mit dem Sturmereignis unklar). Da die Anlage im Oktober ohnehin endgültig abgeschaltet werden sollte, beschloss der Betreiber, die Anlage schon vorzeitig stillzulegen. Die bedingte Kernschadenswahrscheinlichkeit aufgrund der Sturmschäden wurde von der U.S. NRC noch während des Ereignisses mit $2 \cdot 10^{-4}$ bis $2 \cdot 10^{-3}$ abgeschätzt.

Tornado-Lasten

- Das National Institute of Standards and Technology (NIST) hat den Standard ASCE 7-22 (Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures) überarbeitet und um Tornado-Lasten ergänzt. Hierfür wurden neue Windfeldberechnungen und Simulationen durchgeführt. In Verbindung mit regionalen Statistiken und einer räumlichen Glättung wurde in diesem Rahmen eine neue Tornado-Gefährdungskarte für die USA erstellt (vgl. Abb. 2.1).

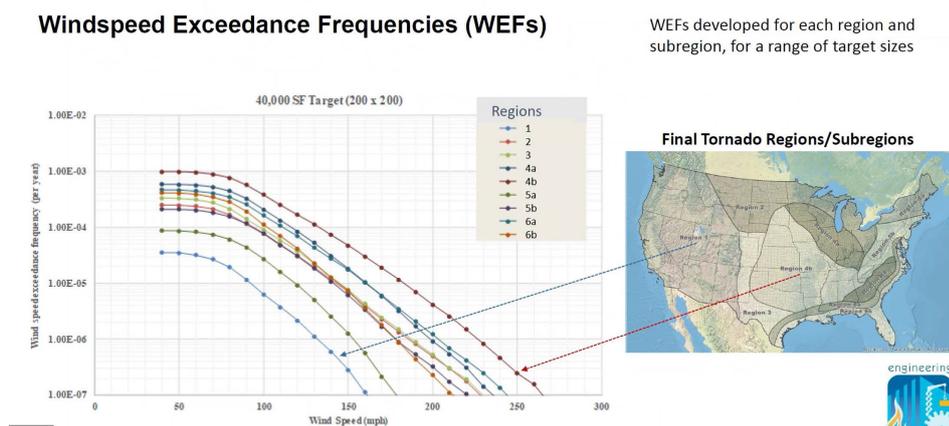


Abb. 2.1 Tornadogefährdung in den USA entsprechend dem neuen Standard ASCE 7-22 nach /LEV 22/

2.1.2 Workshop on High Winds and Tornadoes

Der Workshop on High Winds and Tornadoes – Hazard Assessment and Protection of Nuclear Installations stellte die Abschlussveranstaltung zu einer Aktivität der WGEV dar, in deren Rahmen zuvor ein Survey zu den regulatorischen Anforderungen, den Methoden der Standortgefährdungsanalyse und den Auslegungskonzepten in Bezug auf Starkwindeinwirkungen in den NEA-Mitgliedsstaaten durchgeführt wurde.

Phänomenologische Aspekte

- Starkwind kann in sehr unterschiedlichen Formen auftreten: tropische/extratropische Stürme (Sturmtiefs), Derechos, Fallböen, Tornados, topographisch bedingte Winde (z. B. Fallwinde) etc. Je nach Ort und betrachteter Überschreitenswahrscheinlichkeit werden die maximalen Windgeschwindigkeiten dabei durch unterschiedliche Arten von Starkwind bestimmt. Daher passt eine statistische Verteilung, die häufige schwache Windereignisse gut beschreibt, nicht unbedingt auch für seltene Starkwindereignisse.
- Tornados sind auch in Europa keine seltenen Ereignisse; selbst starke Tornados treten gelegentlich auf. Da die Erfahrung gezeigt hat, dass die Enhanced Fujita Scale (EF) in Europa nicht gut anwendbar ist, wird eine International Fujita (IF) Scale entwickelt, die durch die Berücksichtigung eines breiten Spektrums von Bauwerkskonstruktionen auf die unterschiedlichsten Regionen anwendbar sein soll.
- Windgeschwindigkeitsdaten stellen eine wesentliche Grundlage für Gefährdungsanalysen und Vorhersagen dar. Die derzeit verfügbare Datenbasis zu Extremereignissen ist jedoch unvollständig, daher ist eine Verbesserung dieser Datenbasis anzustreben. Windgeschwindigkeitsmessungen sind jedoch schwierig – insbesondere für kleinskalige extreme Windereignisse (richtiger Ort, Beschädigung/Zerstörung der Instrumente). Direkte Windgeschwindigkeitsmessungen können ggf. durch Doppler-Radar-Messungen, Simulationen, meteorologische Modelle und nachträgliche Auswertung von Schadensbildern ergänzt werden. Für Simulationen und die Modellbildung ist allerdings ein gutes Verständnis der zugrundeliegenden atmosphärischen Prozesse erforderlich.
- Der Klimawandel kann Einfluss auf Häufigkeit und Stärke von Starkwindereignissen haben. Je nach Art der betrachteten Starkwindeinwirkung und dem Ort können die Auswirkungen jedoch sehr unterschiedlich sein. Z.B. scheinen sich die Eigenschaften und Zugbahnen von Taifunen im NW-Pazifik zu verändern, was zu einer stärkeren Gefährdung insbesondere der koreanischen Küstenregionen führt. Für Kanada ist die prognostizierte Zunahme des max. Winddrucks bei 100-jährlichen Sturmereignissen selbst unter Annahme des sehr pessimistischen Representative Concentration Pathways 8.5 eher gering (kleiner als 10 %). Insgesamt fehlen bisher noch geeignete Methoden zur realistischen Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Gefährdung durch extreme Starkwindereignisse wie sie nach kerntechnischem Regelwerk zu berücksichtigen sind.

Daten

- Die wichtigsten Datengrundlagen für die Gefährdungsermittlung in Bezug auf Starkwind stellen derzeit Ereignis-Kataloge, historische Berichte, Beobachtungen (z. B. Satelliten, Radar, Beobachtungsberichte, soziale Medien, boden-/luftgestützte Surveys), direkte Messungen und modellierte/simulierte Daten dar.
- Eine saisonal aufgelöste Auswertung von Windereignissen und die Analyse der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse ermöglicht eine verlässlichere Gefährdungsermittlung.
- Die Auswertung einer großen Anzahl von Wettervorhersagen (und Klimaprojektionen) erlaubt es, Wetter-/Windszenarien zu untersuchen, die zwar nicht real aufgetreten sind, aber hätten auftreten können (Unprecedented Simulated Extremes using Ensembles, UNSEEN). Hierdurch ist eine Erweiterung der Datenbasis für die Ermittlung von Extremereignissen möglich.
- Bei der Modellierung und Simulation von Starkwindereignissen resultieren teils erhebliche Unsicherheiten aus den folgenden Faktoren:
 - Wetter- und Klimamodelle haben eine begrenzte räumliche Auflösung, so dass kleinskalige Ereignisse (z. B. Tornados) nicht vorhergesagt werden können.
 - Da die Atmosphäre ein weitgehend chaotisches System ist, führen schon kleine Fehler bei der Festlegung der Anfangsbedingungen zu großen Vorhersagefehlern.
- Für Tornados gibt es kaum direkte Windgeschwindigkeitsmessungen. Und auch Radar-daten liefern leider keine Informationen zu Tornado-Windgeschwindigkeiten in bautechnisch relevanten Höhen.
- In Kanada wird das Auftreten von Tornados systematisch überwacht und detailliert ausgewertet, um bessere Vorhersagen zu ermöglichen (The Northern Tornadoes Project).
- Neben der Standortgefährdung müssen auch die zu erwartenden Auswirkungen am Standort untersucht werden. Dies ist insbesondere für Tornados immer noch schwierig, da standortspezifische Effekte wie z. B. die lokale Topographie, die Bodenbeschaffenheit und die Gebäudeanordnung eine wichtige Rolle spielen. Außerdem kann die Kombination von Windeinwirkungen mit korrelierten Einwirkungen oder Folgeeinwirkungen zu einer erhöhten Schadenswirkung führen.

Auslegung und Betrieb

- Die Auslegung gegen Windlasten erfolgt meist nach konventionellem Regelwerk. Insbesondere die Widerstands-/ bzw. Formbeiwerte stellen dabei vorrangig auf reguläre Strukturen und einheitliche Bodenrauigkeit ab. Außerdem werden windbedingte Torsionslasten und Verwirbelungen i. A. nicht berücksichtigt. Ob die entsprechenden Annahmen auch für Kernkraftwerke zutreffen, ist unklar.
- Eine Alternative zur Nutzung von Widerstands- und Formbeiwerten sind Windkanaluntersuchungen und Computational Fluid Dynamics-Modelle (CFD-Modelle). Windkanaluntersuchungen erlauben die Berücksichtigung komplexer Geometrien und der Topografie am Standort. Außerdem können Sogeffekte und Aufwinde in Tornados simuliert werden. Eine Verifizierung der Experimente kann durch den Vergleich mit realen Schadensbildern nach Starkwindereignissen erfolgen. Bei CFD-Modellen ergeben sich Probleme hinsichtlich des Turbulenzprofils, der Kontrolle der Geschwindigkeit und der Aerodynamik in der Umgebung scharfer Kanten.
- Generell stellt sich die Windlastkette (Analysekette für die Auslegung) wie folgt dar: Windklimatologie \Rightarrow Gelände \Rightarrow aerodynamische Effekte (z. B. Auswirkungen vorgelagerter Strukturen) \Rightarrow dynamische Effekte (Winddruck aufgrund der Gebäudegeometrie) \Rightarrow Auslegungskriterien.
- Tornadoeinwirkungen unterscheiden sich insbesondere durch ihre kurze Dauer, den starken Aufwind und die Luftdruckänderung deutlich von linearen Windeinwirkungen. Wenn Tornados eine relevante Standortgefährdung darstellen, wird die Auslegung oft durch Tornado-Lasten bestimmt. Dabei spielen dann neben den genannten Charakteristika auch windgetragene Trümmer eine wichtige Rolle.
- Aufgrund der auf kleinen Skalen wechselnden Windrichtung in Tornados ergeben sich diverse Probleme bei der Nachweisführung insbesondere für nicht-rechteckige Bauwerke.
- Aus kerntechnischer Sicht ist das Abschalten und Überführen der Anlage in einen sicheren Zustand eine zweckmäßige Vorgehensweise bei Starkwind-Einwirkungen. Bei holistischer Betrachtung ist dies nicht unbedingt wünschenswert, da das Kernkraftwerk zur Deckung des Strombedarfs in der Umgebung nach einem solchen Katastrophenfall beitragen könnte. Aber radiologische Sicherheitsüberlegungen haben im Zweifelsfall Priorität.

- Wind- und Tornadolasten werden oft auf Basis der sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten für entsprechende extreme Ereignisse ausgescreent. In Anbetracht von PSA⁴-Ergebnissen aus den USA sollte diese Vorgehensweise evtl. überdacht werden, denn dort haben sich bei einer Muster-PSA zur Regelwerksfortschreibung höhere Beiträge zur Kernschadenshäufigkeit und zu Freisetzungen ergeben als vorher erwartet. Relevante Beiträge zum Gesamtrisiko ergaben sich dabei aus Windgeschwindigkeiten (deutlich) unterhalb der Auslegung sowie durch „horizontale“ Regeneinwirkung.

Sicherheitsnachweise

- In Ländern die „klassischerweise“ von tropischen Stürmen und/oder Tornados betroffen sind, existieren meist etablierte Vorgehensweisen für Sicherheitsanalysen und -nachweise im Zusammenhang mit solchen Einwirkungen: In den USA finden sich z. B. Regelungen zu Starkwind z. B. im Standard Review Plan (NUREG-0800), Abschnitt 2.3.1 (Regional Climatology) und im Regulatory Guide RG 1.76 (Design-Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants). Und in Korea wurde eine probabilistische Methodik zur Behandlung der Einwirkung Taifun entwickelt, bei der die standortspezifische Gefährdung anhand eines Windfeld-Modells und der erwarteten Zugbahnen ermittelt wird. Die Behandlung der Widerstandsseite erfolgt dann analog zur Einwirkung Erdbeben, d. h. es wird eine Wind Equipment List erstellt, für deren Elemente Versagenswahrscheinlichkeiten (Fragilities) ermittelt werden.
- In Ländern mit geringerem Wind-Risiko wurde zunächst meist auf konventionelle Auslegungsanforderungen zurückgegriffen. Vertiefte Betrachtungen und ggf. eine Ergänzung der Regelwerksanforderungen erfolgten erst später. In Schweden spiegelt sich dies z. B. in zusätzlichen Anforderungen an das unabhängige Kernkühlsystem wider. Dieses ist gegen Einwirkungen von außen mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-6} pro Jahr auszulegen, wobei das Einwirkungsspektrum auch Wind, Tornado und Tornado-Trümmer miteinschließt. Als weiteres Beispiel ist Tschechien zu nennen, dort wurde eine Neubewertung der Tornadogefährdung für den Standort Temelin durchgeführt. Nach US-amerikanischem Regelwerk (RG 1.76) würde der Standort in die Region III, also die niedrigste Kategorie mit maximalen

⁴ PSA = Probabilistic Safety Assessment = Probabilistische Sicherheitsanalyse

Windgeschwindigkeiten von 72 m/s, einem maximalen Radius für diese Windgeschwindigkeit von 50 m sowie einem Luftdruckabfall von 41 hPa mit einem Gradienten von 14 hPa/s fallen. Diese Werte entsprechen einem Tornado im Bereich der Stärke F2 bis F3 nach der Fujita-Skala.

2.1.3 VdS-Fachtagung Naturgefahren und Elementarschäden

Die VdS Schadenverhütung GmbH bietet regelmäßig Fachtagungen zur Weiterbildung von Versicherungsmitarbeitern an, die auch anderen Interessenten offenstehen. Zu den regelmäßig angebotenen Fachtagungen gehört auch eine, die dem Thema „Naturgefahren und Elementarschäden“, also nach dem in der Kerntechnik üblichen Sprachgebrauch „Einwirkungen von außen“ gewidmet ist. Aufgrund des eigentlichen Zwecks der Veranstaltungsreihe lag der Fokus dieser Fachtagung auf dem konventionellen Bereich und versicherungsrelevanten Aspekten. Als kommerzieller Anbieter von Weiterbildungen stellt der VdS die Tagungsunterlagen nicht öffentlich zur Verfügung, so dass hier nicht auf Proceedings oder eine Internetadresse mit den Foliensätzen verwiesen werden kann. Aus demselben Grund können die Erkenntnisse aus der Veranstaltung hier nur sehr verkürzt wiedergegeben werden⁵.

Klimaanpassung in Deutschland

- Aufgrund des Klimawandels wurden bisher u. a. die folgenden Veränderungen beobachtet:
 - Temperaturanstieg von 1881 bis 2018 (137 Jahre): global +1 °C, in Deutschland +1,5 °C,
 - Meeresspiegelanstieg (Cuxhaven) von 1981 bis 2016 (35 Jahre): 8,9 cm.
- Vor dem Hintergrund der Klimaveränderungen und der dadurch ggf. zunehmenden Naturgefahren sieht das Umweltbundesamt (UBA) die Notwendigkeit, für den Umgang mit dem Klimawandel einen rechtlichen Rahmen zu setzen, die Finanzierung diesbezüglicher Maßnahmen zu stärken, standortbasierte Risikoanalysen zu etablieren und Restrisiken zu versichern.

⁵ Eine ausführlichere Darstellung der Erkenntnisse aus dieser Fachtagung erfolgte anhand eines Foliensatzes im Rahmen des Projektinformationsgesprächs am 26. August 2022.

- Für Unternehmen resultieren aus dem Klimawandel u. a. die folgenden Risiken:
 - Beeinträchtigungen auf internationaler Ebene in Bezug auf Rohstoffe, Zwischenprodukte, Warenverkehr und Tourismus,
 - Wassermangel und Beeinträchtigungen der Wasserqualität mit entsprechenden Auswirkungen auf die Ernährung, Bauwirtschaft und Binnenschifffahrt,
 - Temporärer Wasserüberschuss mit entsprechenden Überflutungsrisiken sowie
 - Gesundheitsschäden durch Hitzebelastung, Hauterkrankungen und Allergien.

ZÜRS 2022

- Das Zonierungssystem für Überschwemmung, Rückstau und Starkregen (ZÜRS) weist Gefährdungsklassen/-zonen für Starkregen (SGK 1 bis 3) und Hochwasser (HGK 1 bis 4) aus. Für klassische Flusshochwasserereignisse, wie sie im Mai/Juni 2013 in weiten Teilen Mitteleuropas auftraten, passen die Hochwassergefährdungszonen bis auf vereinzelte Ausnahmen gut. Bei den Überflutungsereignissen an der Ahr und anderen Flüssen im weiteren Umfeld der Eifel im Juli 2021 zeigt sich jedoch ein differenziertes Bild: Die Hochwasser- und Starkregengefährdungsklassen 3 waren besonders stark betroffen; die wenigsten Schäden gab es in der Starkregengefährdungsklasse 1.
- Die neue Hochwassergefährdungsklasse 3 im Ahrtal wird sich am neuen amtlichen HQ100 (Wasserstand des 100-jährlichen Hochwassers) orientieren. Die im Jahr 2021 tatsächlich überschwemmten Gebiete entsprechen jedoch eher dem neuen HQextrem (1,5-mal Abflussmenge des HQ100), also der Hochwassergefährdungsklasse 2.
- ZÜRS soll in Zukunft mit Meteo-Info zum Geoinformationssystem GeoVeris zusammengeführt werden. Das Ziel von GeoVeris ist es, Schadenregulierern, Immobilienbewertern und Risikoverantwortlichen einen umfassenden Überblick über naturbedingte Standortrisiken und relevante Wetterereignisse zu geben.

Flutkatastrophe „Bernd“ 2021

- Infolge des Tiefdruckgebiets Bernd kam es im Juli 2021 zu Überflutungsereignissen im Westen Deutschlands und im angrenzenden Ausland mit erheblichen Schäden, die eine erhebliche operative Herausforderung für die Versicherungswirtschaft darstellten. Viele Versicherungsagenturen waren bereits vor Eintritt des Ereignisses

durch Schäden aus vorangegangenen Naturereignissen ausgelastet. Außerdem waren aufgrund der großräumigen Zerstörung viele Agenturen vor Ort nicht mehr existent. Die begrenzte Verfügbarkeit von Sachverständigen, Handwerkern und Material verschärfte die Situation zusätzlich.

Schutz vor Überschwemmungen (VdS 3521)

Der VdS hat einen Leitfaden zum Schutz vor Überschwemmungen erarbeitet (VdS 3521 /VDS 22/), der inzwischen auch veröffentlicht wurde. Dieser behandelt die Themenbereiche

- Risikopotenzial: Hochwasser, Starkregen, Rückstau,
- Schutzkonzepte: Gefahren, vereinfachte und detaillierte Gefährdungsanalyse, Risikoanalyse, Qualitätskriterien (für die Analysen),
- Schutzmaßnahmen: vor der Überschwemmung, wenn eine Überschwemmung droht, nach der Überschwemmung,
- Praxisbeispiele: Krankenhaus, Erlebnisbad, Schulzentrum, Schutz in der Fläche,
- Anhang: Muster-Notfallplan, Hinweise zu Vorsorgemaßnahmen.

Vegetationsbrände

- In Deutschland beeinflussen insbesondere die folgenden Faktoren die Vegetationsbrandgefahr:
 - Vegetation und Bewuchs (alle Waldformen, brennbare Böden, landwirtschaftliche Flächen),
 - Meteorologie (heiße und trockene Phasen, starker Wind – auch im Sommer),
 - Topografie (Ebenen, hügelige Regionen – mit zum Teil steilem Relief).
- Bisher fehlt den meisten deutschen Feuerwehren die Erfahrung mit Vegetationsbränden. Daraus resultieren oft eine falsche Lagebeurteilung, eine falsche Einsatztaktik, die Verwendung ungeeigneten Materials, eine Unterschätzung des Logistik- und Führungsaufwands sowie eine Unterschätzung der Gefahren.

- Der Einsatz von Luftfahrzeugen bei großen Vegetationsbränden ist unverzichtbar. Dies gilt allerdings weniger für die direkte Brandbekämpfung als vielmehr für die Führungsunterstützung, den Löschwasser-, Material- und Personaltransport sowie den Schutz- und die Rettung von Einsatzkräften. Beim Einsatz von Luftfahrzeugen ist eine gute Koordination der Boden- und Lufteinsatzkräfte zwingend erforderlich.
- In Deutschland (Referenzjahr 2019) sind für 56 % der Vegetationsbrände die Ursachen bekannt: Nur etwa 6 % der Brände können auf natürliche Ursachen zurückgeführt werden; knapp 50 % stehen im Zusammenhang mit menschlichen Handlungen (16 % Brandstiftung, der Rest Fahrlässigkeit etc.).

Georisiken

- Setzungsschäden sind üblicherweise nicht versichert. Als Ursache für solche Schäden kommen z. B. Absenkungen des Grundwasserspiegels, Austrocknung und Schrumpfung des Untergrunds (z. B. bei Tonböden), ungenügende Verdichtung des Baugrunds und ungeeignete Gründungsvarianten in Frage.
- Georisiken können durch den Klimawandel verstärkt werden. Dies gilt z. B. für Gravitative Massenbewegungen und Setzungen. Diese können sowohl durch extreme Niederschlagsereignisse als auch durch Trockenheit zunehmen.

Hagelschäden an Gebäuden

- Gebäudeschäden durch Hagel betreffen zu 56 % das Dach, zu 27 % Mauerwerk und Kamine sowie zu 6,5 % die Fassade.
- Hagelkörner können in sehr unterschiedlicher Form auftreten, von sehr klaren Kugeln bis hin zu komplexen trüben Formen.
- Bei den Hagelereignissen im Juni 2021 in Oberösterreich wurden regional 50 bis 80 Körner mit Größen über 4 cm pro Quadratmeter gezählt. Die größten Körner hatten Durchmesser von bis zu 6 cm.
- Neben dem technischen Schadenspotenzial ist bei Hagel auch die Gesundheitsgefährdung von Menschen im Freien zu beachten. Ab einem Hagelkorndurchmesser von 4 cm (ca. Tischtennisballgröße) besteht sogar Lebensgefahr. Hagelkörner dieser Größe wiegen 29 g und haben typische Geschwindigkeiten von 99 km/h, was einer kinetischen Energie von 11 J entspricht.

10-Punkte Arbeitsplan „Hochwasserschutz in Zeiten des Klimawandels“

- Vom Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen wurde ein Arbeitsplan entwickelt, der folgende Punkte umfasst:
 - Hochwasservorhersagesystemen für so viele Gewässer wie möglich,
 - Vereinheitlichung des Hochwasserinformationsdiensts (Landesverordnung),
 - Einbeziehung kleinerer Gewässer in die Hochwasserrisikomanagementplanung,
 - Verbesserung des Hochwasserschutzes vor Ort,
 - Überprüfung der Überschwemmungsgebiete und Prüfung eines Klimazuschlags,
 - Verbesserung des Talsperren-Managements und der Sicherheit von Talsperren,
 - Stärkung der Resilienz von Kommunen (Starkregenereignisse & Hochwasser),
 - Zusammenarbeit von Raumplanung, Stadtentwicklung und Wasserwirtschaft,
 - Stärkung der Selbsthilfefähigkeit und des Risikobewusstseins,
 - Einrichtung eines Hochwasserschutzbeirats.
- Die Versicherer befürworten diesen Arbeitsplan grundsätzlich, bemängeln aber, dass es keine klare Absage an zukünftige finanzielle Unterstützungen im Katastrophenfall gibt, was den Anreiz zur eigenverantwortlichen Vorsorge reduziert. Außerdem ist die konkrete Ausgestaltung von Bauverboten und Bauvorschriften noch unklar.

2.1.4 Probabilistic Flood Hazard Assessment Research Workshop 2023

Bei dem Workshop im Jahr 2023 /NRC 23/ handelte es sich um die achte Veranstaltung der Reihe (vgl. Abschnitt 2.1.1). Die Proceedings wurden bisher noch nicht veröffentlicht; die einzelnen Beiträge können jedoch unter <https://adamswebsearch2.nrc.gov/webSearch2/main.jsp?AccessionNumber=ML22061A095> abgerufen werden.

Notfallmanagement

- Die FEMA entwickelt ein frei zugängliches Resilienzanalyse- und -planungswerkzeug als webbasiertes Geoinformationssystem (GIS). Der Schwerpunkt des Werkzeugs liegt (naturgemäß) auf den USA.
- Die NOAA hat Untersuchungen zur Gefährdung der US-amerikanischen Küsten durchgeführt. Auf Grundlage dieser Untersuchungen wurden, die in einem Bericht

aus dem Jahr 2017 enthaltenen Informationen zu Überschreitenswahrscheinlichkeiten für Extremwasserstände aktualisiert und um Vulnerabilitätsangaben für küstennahe Siedlungen ergänzt.

Starkregen

- Die Auslegung gegen Starkregen orientiert sich in den USA bisher an der sogenannten Probable Maximum Precipitation (PMP), also dem deterministisch bestimmten, vermutlich größten möglichen Niederschlag. Da die hierfür ermittelten Werte bereits recht alt sind, arbeitet die NOAA an einem Update der PMP-Werte. In eine ähnliche Richtung gehen Arbeiten der University of California, die sich mit der Umsetzung von Luftfeuchtigkeit in Niederschlag befassen.
- An der Arizona State University werden Untersuchungen zur stochastischen Modellierung von Niederschlägen kurzer Zeitdauer durchgeführt. Dabei wurde insgesamt eine gute Übereinstimmung in der räumlichen und zeitlichen Korrelation mit realen Regenfallereignissen erzielt.

Hochwasser

- An der University of Wisconsin-Madison werden korrelierte hydrologische Prozesse (Regenfall, Bodenfeuchte, Schneebedeckung u. a.) modelliert. Hierdurch können Schätzungen für 100-jährliche Hochwasserereignisse verbessert und Erkenntnisse zu den kombinierten Einflüssen gewonnen werden. Dies ist insbesondere unter den Randbedingungen eines instationären Klimas relevant.
- Die University of Alabama hat Paleoflood-Untersuchung am Tennessee River durchgeführt. Sedimentbasierte Überflutungsdaten wurden dabei in Überflutungsgefährdungsanalysen integriert.
- Das USACE befasst sich ebenfalls mit Paleoflood-Untersuchungen und nutzt diese für Gefährdungsanalysen von Staudämmen. Konventionelle Analysen führen fallbezogen zu Über- oder Unterschätzung relativ zu den um Paleoflood-Daten ergänzten Untersuchungen.

PRA⁶

- An der University of Maryland und beim USACE versucht man, korrelierte Überflutungsereignisse (Sturmflut, Niederschlag, Tiden und Abflüsse der Binnengewässer) mittels eines Bayesschen Ansatzes zu beschreiben und in PSAs zu integrieren.
- Weitere Aktivität der University of Maryland betreffen Unsicherheitsanalysen von Hurrikan-Vorhersagen und Niederschlagsintensität-Zeitdauer-Kurven unter Berücksichtigung des Klimawandels.
- Das USGS untersucht kombinierte Überflutungsereignisse aus Grundwasserspiegel, starken Regenfällen und Küstenwasserständen am Beispiel von Long Island.
- Ein Bayesscher Ansatz wird auch vom Ministry of Energy and Natural Resources Turkey bei der probabilistischen Überflutungsgefährdungsanalyse für einen potenziellen Standort verfolgt.

Verschiedenes

- PSA-Modelle wurden von der U.S. NRC um die nach den Reaktorunfällen am japanischen Kernkraftwerkstandort Standort Fukushima Daiichi entwickelten Diverse and Flexible Coping Strategies (FLEX) und deren Einfluss bei Einwirkungen von außen erweitert.
- Bei der Überprüfung der temporären Maßnahmen zum Überflutungsschutz hat die U.S. NRC festgestellt, dass die Strategien mancher Betreiber Mängel aufweisen, da einzelne Maßnahmen absehbar mehr Zeit erfordern als Vorwarnzeit vorhanden ist.
- Bei einer Seiche im Eriesee unterschritt der Seespiegel am Standort Davis Besse den zulässigen Grenzwert. Die U.S. NRC erteilte auf Grundlage von Abwägungen des Risikos eine Ausnahmegenehmigung zum Weiterbetrieb. Während des Ereignisses wurden durch den Betreiber FLEX-Maßnahmen erprobt.

⁶ PRA = Probabilistic Risk Assessment. PRA ist der im angelsächsischen Raum übliche Begriff für PSA.

2.1.5 ExtremWetterKongress 2023

Der ExtremWetterKongress wurde im Jahr 2006 vom Institut für Wetter- und Klimakommunikation (IWK) ins Leben gerufen und fand bis 2014 jährlich statt. Nach einer Unterbrechung von fünf Jahren und der Liquidierung des Unternehmens IWK fanden ab 2020 wieder ExtremWetterKongresse, nun veranstaltet von Boettcher Science, statt. Der Veranstaltungsort des 13. ExtremWetterKongresses /EWK 23/ war, wie in den Jahren zuvor, Hamburg. Ein Teil der Vorträge ist auf dem Youtube-Kanal des ExtremWetterKongresses (<https://www.youtube.com/extremwetterkongress>) abrufbar.

Hitze in Deutschland – Sommerbilanz 2023

- Hitzewellen werden in Deutschland häufiger, dabei entwickeln Städte ihr eigenes Mikroklima. Tropennächte mit Temperaturen über 20 °C sind dort etwa doppelt so häufig wie im Umland. Um diese Effekte besser zu erfassen, betreibt der Deutsche Wetterdienst (DWD) seit einigen Jahren auch Wetterstationen in Städten.
- Die Temperaturrekorde der letzten Jahre ereigneten sich in einer La Niña-Phase der El Niño-Southern Oscillation (ENSO). Die Vorhersagen für die beginnende El Niño-Phase streuen um ca. 2 °C. Insgesamt sind die Auswirkungen der ENSO für Deutschland eher unbedeutend.
- Die marinen Hitzewellen im Jahr 2023 sind vermutlich auf eine Kombination des Klimawandels mit dem Ausbruch des Unterwasservulkans Hunga Tonga-Hunga Ha'api zurückzuführen.
- Das Mittelmeer erwärmt sich in den letzten Jahren stärker als die anderen Ozeane.
- Der DWD arbeitet an Klimavorhersagemodellen, mit denen Wochenmittel-, Dreimonatsmittel- und Dekadenvorhersagen für Temperaturen und Niederschläge in Deutschland möglich sein sollen. Die simulierten Ergebnisse des Dreimonatsmittels wichen für den letzten Sommer um ca. 0,5 °C von den Beobachtungswerten ab.

Waldbrandgefahr in Deutschland

- Der DWD berechnet Waldbrandindices zur Einleitung von Präventionsmaßnahmen. Derzeit finden tägliche Berechnungen von März bis Oktober statt. In Zukunft sollen über das gesamte Jahr täglich Waldbrandindizes berechnet werden.

- Die berechnete Waldbrandgefahr steigt zwar linear an, die Anzahl von Waldbränden und die betroffenen Flächen nehmen jedoch real ab. Ausnahmen waren die Jahre 2018, 2020 und 2022, in denen größere Flächen betroffen waren als in den Jahren zuvor (und danach).
- Die Auslöser von Waldbränden sind in Deutschland hauptsächlich zivilisatorische Effekte, wie z. B. Unachtsamkeit, technische Defekte etc.
- Aufgrund der zunehmenden Waldbrandgefahr und der schlecht kontrollierbaren Auslösemechanismen sind Vegetationsbrände in Deutschland keine Frage des ob, sondern eine Frage des wann und in welchem Ausmaß. Als besonders problematisch sind dabei die Übergangszonen zwischen dem urbanen Raum und dem ländlichen Umland anzusehen.
- Von Breeze Technologies wurde mit Unterstützung des U.S. Department of Homeland Security ein KI-basiertes Waldbranddetektionssystem entwickelt. Das System stützt sich auf Emissions- bzw. Immissionsmessungen. Die Detektionszeit beträgt ca. 15 Minuten bei einem Abstand der Messstation von 3 km bis 5 km zum Brand, ist jedoch auch von den Windverhältnissen abhängig. Die Sensitivität des Systems ist so hoch, dass mit Sensoren in Hamburg ein Moorbrand bei Bremen detektiert werden konnte. Gleichzeitig ist die Rate von Fehllarmen sehr gering. Bisher konnte jedoch noch nicht ermittelt werden, wie die Reaktion auf Kaminöfen im Winter ausfällt.

Forum Risikomanagement – Klimaanpassung wird immer wichtiger

- Durch die Bevölkerungszunahme steigt in Deutschland das Überflutungsrisiko im urbanen Raum (z. B. aufgrund der Bodenversiegelung).
- Die Gefährdung des Trinkwassers durch Legionellen und andere Krankheitserreger nimmt zu, da der Boden sich einerseits bis in größere Tiefen erwärmt und andererseits Leitungen aus Kostengründen weniger tief verlegt werden.

Forum Wirtschaft und Energie – Auswirkungen für Wirtschaft und Energie

- Die EU-Taxonomie fordert von Unternehmen ab einer gewissen Größe Klimarisikoplanungen. Von dieser Anforderung werden voraussichtlich ca. 70.000 Unternehmen betroffen sein. Für die entsprechenden Analysen werden lokale Klimaprojektionen

benötigt, d. h. es wäre ein Downscaling auf ein Gitter mit 1 km oder besser noch bisher nicht erreichte 10 m Auflösung erforderlich.

- Für Zeitreihenprognosen, wie sie für wetterbeeinflusste Infrastrukturen (z. B. Reservewärmeleistungwerke oder Stromtrassen) benötigt werden, kann eine KI genutzt werden. Seltene Extremereignisse müssen jedoch künstlich in die Trainingsdatensätze eingebaut werden.

El Niño/Kippelemente im Klimasystem (Live Ringschaltung)

- Das aktuelle El Niño-Ereignis ist als relativ normal einzustufen. Ob der Klimawandel Auswirkungen auf die ENSO hat und wenn ja, in welcher Form, ist derzeit völlig unklar.
- Die Wälder des Amazonasgebiets stellen normalerweise eine Kohlenstoffs Senke dar. In den Trockenjahren 2015/2016 war dies jedoch umgekehrt, in diesen Jahren waren sie eine Kohlenstoffquelle.
- Es gibt einen deutlichen Eismassenverlust in der West-Antarktis. Bei vollständigem Abschmelzen des Festlandeises der West-Antarktis würde der globale Meeresspiegel vermutlich um 3 m ansteigen.

Extremwetter auf hoher See – Ozean im Klimawandel

- Mit zwei Sturmfluten war die Saison 2022/23 an der Nordsee sehr ruhig. Allerdings gab es eine Sommersturmflut (erstes Ereignis seit 16 Jahren). Aufgrund der Randbedingungen, wie z. B. der Beweidung vor dem Deich und dem Tourismus, sind solche Sommersturmfluten besonders kritisch.
- Bei Sturmfluten über mittlerem Tidehochwasser (also Meeresspiegelanstiegsbereinigt) gibt es in Nord- und Ostsee keinen erkennbaren Trend. In sehr konservativen Emissionsszenarien wird es in Zukunft eine geringfügige Zunahme von Sturmflutwetterlagen geben.
- Der derzeitige Meeresspiegelanstieg an der Nordseeküste beträgt ca. 24 cm pro 100 Jahre. In Klimaprojektionen wird bis zum Jahr 2100 ein Meeresspiegelanstieg von ca. 1 m erreicht. Unter der Annahme von extremen Szenarien mit sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit wäre bis zum Jahr 2150 mit einem Anstieg von ca. 5 m zu rechnen.

- Es findet bereits eine Anpassung des Küstenschutzes an das (sehr konservative) Treibhausgasszenario RCP 8.5 statt. Die Möglichkeit eines weiteren Ausbaus bis 1,5 m bzw. 2 m Meeresspiegelanstieg wird mit eingeplant. Ab ca. 2 m wird es schwierig, den Küstenschutz im gewohnten Umfang zu gewährleisten.
- Bei der letzten Expedition des Forschungsschiffs Polarstern wurde zum ersten Mal ein Tornado (in diesem Fall eine Wasserhose) in der Antarktis beobachtet.

Starkregen – Die immer noch zu oft unterschätzte Gefahr

- Seit 2002 existiert in Deutschland ein flächendeckendes Wetterradarnetz.
- Hinsichtlich der klimawandelbedingten Veränderung von Niederschlägen in Europa ist ein deutlicher Unterschied zwischen Nord- und Südeuropa zu erkennen. In Nordeuropa nehmen die Niederschläge eher zu, in Südeuropa ab. Für Deutschland ist kein klarer Trend zu erkennen.
- In den Hochwassergefahrenkarten für das Ahrtal waren historische Ereignisse nicht berücksichtigt. Diese führte zu einer Unterschätzung des Risikos. Das Deutsche GeoForschungsZentrum (GFZ) konnte mit dem Hochwasserberechnungsmodell RIM2D das Ahrhochwasser aus dem Jahr 2021 auf einem 10 m x 10 m-Gitter in knapp sechs Minuten nachrechnen (Berechnungszeitraum 15 Stunden). Ein Modul zur Schadensabschätzung ist in Arbeit.
- Es gibt bisher keine systematische, umfassende Erfassung von klimabezogenen Schäden. Bisher gibt es nur ein „Extremwetterschadenskataster“. Grund hierfür sind die Probleme/Unsicherheiten bei der Beantwortung der Frage, ob ein individuelles Ereignis eine Folge des Klimawandels ist (Attribution).

Forum Klimamanagement – Kommunen und Städte zwischen Klimaschutz und Anpassung

- Der DWD betreibt in acht Städten je eine Stadtklimastation. In Hannover wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts zusätzliche innerstädtische Messstationen eingerichtet. Auf dieser Grundlage konnte festgestellt werden, dass die Nachttemperaturminima im Sommer innerstädtisch um ca. 2 °C höher liegen als im Umland. Innerstädtische Seen wirken nur tagsüber kühlend, nachts haben sie einen wärmenden Effekt.

- Bäume in Städten haben durch Verdunstung und Beschattung eine kühlende Wirkung. In Städten sollten Bäume aus wärmeren Regionen gepflanzt werden. Im Freiland hingegen ist jedoch heimischer Mischwald zu bevorzugen.

Bildungsforum Wetter und Klima – Communitynetzwerke und Bildungseinrichtungen

- Pro Jahr ereignen sich in Deutschland etwa 30 bis 60 bestätigte Tornados. Zur Charakterisierung von Tornados sind Waldschäden am besten geeignet, da aus ihnen sowohl auf die lokale Windrichtung als auch die Windstärke geschlossen werden kann. Dadurch können Tornados insbesondere auch von Fallböen und ähnlichen kleinräumigen Starkwindereignissen unterschieden werden.

Auswirkungen von Extremwetter und Klimawandel auf unsere Gesundheit

- Akklimatisierung ist ein wichtiger Faktor zur Entwicklung von Resilienz gegenüber thermischen Belastungen. In warmen Regionen ist die Bevölkerung stärker durch Kältewellen belastet als in generell kälteren Regionen und umgekehrt.
- Bislang dominiert Kälte immer noch die Mortalitätsrate. Eine Quantifizierung der zukünftigen Folgen zunehmender Hitzeereignisse auf die Mortalität und Morbidität ist sehr komplex. Bislang können dazu noch keine verlässlichen Aussagen getroffen werden.

Superzellen in Mitteleuropa – Entstehung, Auswirkung und Vorhersagbarkeit

- Die Warnmeteorologie⁷ hat wegen uneindeutiger Radarechos kaum eine Chance, tornadische Zellen⁸ zu erkennen. Daher werden zusätzliche Informationen, wie z. B. Beobachtungen aus der Bevölkerung, benötigt, um vor Tornados warnen zu können. Auch eine KI könnte geeignet sein, um tornadische Zellen zu erkennen und Warnungen zu generieren. Allerdings sind hierfür umfangreiche Trainingsdatensätze erforderlich.
- Bei Gewittern wurde früher zwischen Frontgewittern und Luftmassengewittern unterschieden. Diese Klassifizierung ist jedoch als überholt zu betrachten. Heute teilt man

⁷ Zweig der Meteorologie, der sich mit der Erstellung von Wetter-Warnungen befasst.

⁸ Gewitterzellen, die geeignete Bedingungen für die Entstehung von Tornados bieten.

Gewitter in Einzelzellen (alle Parameter zeigen einen starken Beginn mit nachfolgendem Abfall), Multizellen (Parameter oszillieren stark) und Superzelle (Parameter zeigen ein Schwingungsverhalten auf hohem Niveau) ein. Die Detektion von Superzellen erfolgt anhand von deren Dipolstruktur, Hakenechos (hakenförmige Struktur im Radarbild) und einer sogenannten Bounded Weak Echo Region⁹.

- Der DWD arbeitet derzeit daran, sein deterministisches Nowcasting-Modell mit einem probabilistischen Langfristvorhersagemodell (d. h. einem Vorhersagemodell mit Unsicherheitsangabe) zu kombinieren. Mit dem Seamless Integrated Forecasting System (SINFONY) sollen in Zukunft Vorwarnzeiten für Superzellen von mehr als zwei Stunden erreicht werden.

Extremer Hagel

- Die Rekorde für Hagelkorngrößen liegen in Deutschland bei 14cm Durchmesser und europaweit bei 19 cm Durchmesser.
- Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hat die Zugbahn von Hagelkörnern in einer Gewitterwolke simuliert: Zunächst gelangt ein Graupelkorn von hinten in den Aufwind und die Wachstumszone einer Gewitterzelle. An dieses lagern sich unterkühlte Wassertropfen an – umso mehr, je länger das Graupelkorn in der Wachstumszone ist. Superzellen sind hierbei sehr effektiv, 90 % aller Hagelkörner mit mehr als 10 cm Durchmesser stammen aus Superzellen. Grund hierfür sind der starke Aufwind, der in einem breiten Aufwindkanal weht, und die hohe Feuchtigkeit in der Wachstumszone.
- Auch wenn es statistisch gesehen eine Zunahme von Hagelereignissen zu geben scheint, ist noch unklar, wie sich Gewitter in Zukunft unter dem Einfluss des Klimawandels entwickeln werden.

⁹ Radarsignatur, bei der sich eine schwach reflektierende Zone von unten in einen stärker reflektierenden Bereich ausdehnt. Als Ursache für diese Struktur nimmt man starke Aufwinde an.

2.1.6 Zusammenfassende Schlussfolgerungen aus Konferenzen und Workshops

Die Teilnahme an den Konferenzen und Workshops hat zu sehr vielen neuen Erkenntnissen geführt, die einen wesentlichen Beitrag zum besseren Verständnis der unterschiedlichen naturbedingten Einwirkungen leisten. Oft betrafen die Informationen jedoch Detailspekte der Charakteristika von Einwirkungen und der Gefährdungsanalyse, die für sich keine generellen Schlussfolgerungen zulassen. Aus der Aggregation der Informationen können dennoch die folgenden Punkte als Orientierung für zukünftige sicherheitstechnische Bewertungen sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten abgeleitet werden:

Starkregen

- Für viele meteorologische Einwirkungen wie z. B. Starkregen liegen Messdaten an manchen Standorten nur für wenige Jahrzehnte vor. Um eine halbwegs verlässliche Extrapolation zu sehr seltenen Ereignissen zu ermöglichen, kann in diesen Fällen auf alternative Möglichkeiten der Prognose zurückgegriffen werden. Eine der Möglichkeiten ist die Nutzung stochastischer Wettergeneratoren, mit denen synthetische Daten erzeugt werden können. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung großskaliger/globaler Simulationen/Modelle und die Ableitung lokaler Informationen durch Downscaling mit Mustererkennung, ggf. unterstützt durch KI.

Überflutung

- Bisher wurden vornehmlich Sturmfluten, Tsunamis und Flusshochwasser (an größeren Flüssen) als relevante Überflutungsursache für kerntechnische Anlagen betrachtet. Neben diesen „klassischen“ Überflutungsursachen können auch starke Regenfälle in den Einzugsgebieten kleiner Flüsse und Bäche zu Ereignissen mit großem Schadenspotenzial führen. Dieser Tatsache wurde von der GRS z. B. durch das Forschungsvorhaben SAGA-F „Erarbeitung von Methoden zur Durchführung von Standortgefährdungsanalysen für Überflutungen aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten (Phase I)“ /STR 23/ Rechnung getragen. Breite Beachtung in der Öffentlichkeit fand es jedoch erst durch die Hochwasserereignisse im Juli 2021.
- Neben hydrologischen und hydraulischen Modellen zur Ermittlung von Wasserständen im Bereich einer kerntechnischen Anlage sind insbesondere bei durch lokalen

Starkregen bedingten Überflutungen ggf. auch die Bodenverhältnisse und Gebäudeanordnungen am Standort selbst zu berücksichtigen, da diese einen entscheidenden Einfluss auf lokale Wasserstände und Fließgeschwindigkeiten (mit den daraus resultierenden Drücken) haben.

- Bisher wurden Überflutungsereignisse meist isoliert für einzelne Überflutungsursachen betrachtet. In der Praxis ist es jedoch so, dass Überflutungen oft (wenn auch nicht immer) aus einer Kombination mehrerer Beiträge resultieren, z. B. aus einer Kombination von Flusshochwasser mit gleichzeitig hohem Grundwasserspiegel oder einer Sturmflut mit gleichzeitigem Starkregen. Solchen kombinierten Ereignissen, wie sie z. B. in Absatz 4.2 (1) von /BMU 15/ grundsätzlich angesprochen werden, sollte in Zukunft – sofern sie standortspezifisch relevant sind – mehr Beachtung geschenkt werden, zumal es Hinweise darauf gibt, dass sie im Zuge des Klimawandels häufiger werden könnten /BEV 19/.
- Im Bereich der Seismik sind paläologische Untersuchungen bereits ein übliches Mittel zur Verbesserung von Standortgefährdungsanalysen. Für Überflutungen wurden solche Untersuchungen bisher hauptsächlich im Zusammenhang mit Tsunamis durchgeführt. Wie die Arbeiten der University of Alabama und des USACE gezeigt haben, können sie jedoch auch für Überflutungsanalysen an Flüssen genutzt werden. Dieser Ansatz sollte in Zukunft weiterentwickelt werden, um zeitlich begrenzte Pegelmessdaten zu ergänzen.

Starkwind

- Zur standortspezifischen Gefährdung tragen oft unterschiedliche Arten von Starkwind bei. Da den jeweiligen Starkwindarten unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugrunde liegen können, ist nicht sichergestellt, dass eine Extrapolation von Messdaten, die naturgemäß nur für relativ häufige Ereignisse vorliegen, auch verlässliche Aussagen zu sehr seltenen Ereignissen liefert. Letztere können von einer anderen Population von Starkwinden dominiert werden, die durch die Messungen nicht oder nicht ausreichend erfasst ist. Dieser Effekt könnte einer der Gründe für sogenannte Black Swans sein, also Ereignisse, deren Auftreten man auf Basis der allgemeinen Erfahrung für unmöglich halten würde. Das Thema Black Swans wird von der GRS in einem in diesem Jahr begonnenen Forschungsvorhaben („*Quantitative Untersuchungen zu naturbedingten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen im europäischen Ausland*“) adressiert.

- Neben Sturmtiefs, die lokal als lineare Starkwinde betrachtet werden können, stellen Tornados eine zweite wichtige Gefahrenquelle dar. Während Tornados in einigen Ländern wie z. B. den USA schon lange in Standortgefährdungsanalysen einbezogen werden, wird ihnen in Europa erst in jüngerer Zeit Aufmerksamkeit gewidmet. Aufgrund der Erkenntnis, dass auch in Europa starke Tornados auftreten können, wurde das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungsvorhaben um einen Punkt zur Gefährdung von Kernkraftwerken durch diese Einwirkung ergänzt (vgl. Kapitel 4).
- Grundsätzlich zeichnet sich international eine Tendenz ab, Tornados und andere kleinskalige Windphänomene nicht aufgrund ihrer geringen ortsbezogenen Eintrittswahrscheinlichkeit bereits im Screening auszuschließen, da es Hinweise darauf gibt, dass sie einen relevanten Beitrag zur Gesamtgefährdung einer Anlage liefern können.
- In vielen Bereichen ist die Kenntnis physikalischer Prozesse in der Natur noch sehr begrenzt. Dies trifft auch für die atmosphärischen Bedingungen zu, die zu Starkwinden führen. Um verlässliche Gefährdungsanalysen für Windeinwirkungen durchführen zu können ist daher ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse anzustreben. In dieser Hinsicht besteht also weiterer Forschungsbedarf.
- Lokale Windgeschwindigkeiten bzw. Winddrücke werden oft erheblich durch die Bodenbeschaffenheit, Topografie und bauliche Strukturen am Standort und in der unmittelbaren Umgebung eines Standorts bestimmt. Bei der Auslegung kerntechnischer Anlagen sollte der Berücksichtigung dieser Randbedingungen entsprechend Abschnitt 4 des Eurocodes 1 (deutsche Fassung /DIN 10a/) besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Hagel

- Bei extremen Hagelereignissen ist ggf. mit einer großen Menge Hagelkörnern zu rechnen. Diese können auch erhebliche Größe erreichen. Ob solche Extremereignisse eine relevante Gefährdung für kerntechnische Anlagen darstellen können und inwieweit sie bei der Auslegung berücksichtigt wurden, wäre weiter zu untersuchen. Hierbei sollten aktuelle Informationen zur Hagelklimatologie berücksichtigt werden.

Klimawandel

- Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels stützen sich auf Annahmen zur Entwicklung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre und darauf aufbauende Klimaprojektionen. Solche Projektionen sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Gründe hierfür sind u. a. die Tatsache, dass die Atmosphäre ein weitgehend chaotisches System ist, so dass kleine Fehler bei der Festlegung der Anfangsbedingungen zu großen Vorhersagefehlern führen können, und die begrenzte räumliche Auflösung von Klimamodellen, aufgrund derer konvektive Prozesse kaum simuliert werden können.
- In unterschiedlichen Regionen kann sich der Klimawandel auch sehr unterschiedlich auswirken. Während sich z. B. für Korea eine neue Gefährdungssituation im Hinblick auf Taifune ergibt, sind die erwarteten Veränderungen bei Starkwinden in Kanada und Mitteleuropa eher gering.
- Klimaprojektionen liefern bisher meist nur Aussagen zu Mittelwerten und – in Einzelfällen – Ereignissen mit Eintrittswahrscheinlichkeiten im Bereich von 10^{-1} bis 10^{-2} pro Jahr. Für sicherheitstechnische Bewertungen in der Kerntechnik sind jedoch Ereignisse mit Eintrittswahrscheinlichkeiten von höchstens 10^{-4} pro Jahr maßgebend. Diese Lücke in Verbindung mit den großen Unsicherheiten bei Klimaprojektionen und der hohen regionalen Variabilität der zu erwartenden Auswirkungen führt dazu, dass es bisher keine etablierte Methode zur Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels auf Extremereignisse, wie sie in der Kerntechnik zu berücksichtigen sind, gibt.
- Als sekundärer Effekt einer regionalen und saisonalen Zunahme von Niederschlägen könnten auch Massenbewegungen wie z. B. Hangrutsche zunehmen. Inwieweit dies für die Sicherheit kerntechnischer Anlagen eine Rolle spielt, kann generisch nicht beurteilt werden, da die konkreten Bedingungen am Standort eine wichtige Rolle spielen.
- Da zukünftig mit vermehrten Hitze- und Dürre-Perioden zu rechnen ist, werden auch Vegetationsbrände an Bedeutung gewinnen. Um die Relevanz dieser Entwicklung für die Sicherheit kerntechnischer Anlagen besser einschätzen zu können, wird das Thema von der GRS in einem in diesem Jahr begonnenen Forschungsvorhaben („*Quantitative Untersuchungen zu naturbedingten Einwirkungen und Einwirkungskombinationen im europäischen Ausland*“) aufgegriffen.

- Für die deutschen Küstenregionen kann der Küstenschutz an die zu erwartenden Veränderungen angepasst werden, so dass aus Sturmfluten wohl keine nennenswert höhere Gefährdung resultieren wird.

Schutz Kerntechnischer Anlagen

- Die bisher angesprochenen Punkte betrafen hauptsächlich die Einwirkungsseite, d. h. die Ermittlung der Standortgefährdung. Für die Sicherheit kerntechnischer Anlagen ist deren bauliche und systemtechnische Auslegung jedoch genauso wichtig. Ein wesentlicher Aspekt bei der Bewertung der Widerstandsseite, d. h. des Vermögens einer Anlage naturbedingte Einwirkungen ohne Beeinträchtigung der Sicherheit zu überstehen, sind die Versagenswahrscheinlichkeiten von Anlagenteilen und baulichen Anlagen. Für Erdbebeneinwirkungen gibt es zu deren Ermittlung etablierte Methoden und umfangreiche Daten aus der Betriebserfahrung. Für andere Einwirkungen ist das nicht im gleichen Umfang der Fall. Daher ist auf diesem Gebiet noch umfangreiche Entwicklungsarbeit zu leisten.
- Seit den Reaktorunfällen am japanischen Kernkraftwerkstandort Fukushima Daiichi wurden in vielen Ländern Maßnahmen ergriffen, um die Sicherheit der Anlagen auch unter extremen Bedingungen unter Zuhilfenahme mobiler Einrichtungen und zusätzlicher Maßnahmen zu gewährleisten (in den USA läuft dies z. B. unter der Bezeichnung FLEX). Bei zukünftigen Sicherheitsanalysen sollten diese Maßnahmen berücksichtigt werden, um ihre Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau der Anlagen besser einschätzen zu können. Ggf. könnten auch dedizierte Untersuchungen hierzu durchgeführt werden.

2.2 Erdbebenserien

Erdbeben stellen eine der wichtigsten Einwirkungen von außen dar, da sie durch die ausgelösten Erschütterungen und ihren Einfluss auf den Baugrund (z. B. Bodenverflüssigung, Setzungen und andere Bodenverformungen) mit einem hohen Schädigungspotenzial einhergehen. Daher werden kerntechnische Anlagen, insbesondere Kernkraftwerke, weltweit gegen seismische Einwirkungen ausgelegt. Als Grundlage der Auslegung dienen dabei die ingenieurseismischen Parameter (z. B. maximale horizontale Bodenbeschleunigung, Freifeldantwortspektrum und Starkbewegungsdauer) eines sogenannten Bemessungserdbebens (international oft als design basis earthquake oder

safe shutdown earthquake bezeichnet). Auch bei der Nachbewertung bestehender Anlagen wird auf ein einzelnes Erdbebenereignis Bezug genommen. Auch wenn sich diese Vorgehensweise bisher bewährt hat, ignoriert sie die Tatsache, dass Erdbeben meist nicht als Einzelereignisse, sondern als Serien auftreten. Vor allem starken Erdbeben folgen zahlreiche Nachbeben, die schwächer sind als das Hauptbeben. Sofern das Hauptbeben, also das Erdbeben mit der größten Magnitude der Serie, nicht das erste Ereignis ist, werden die vorausgehenden Erdbeben als Vorbeben bezeichnet. In seltenen Fällen ereignen sich in einer Erdbebenserie auch zwei „Hauptbeben“ mit ähnlicher Magnitude. Erdbebenschwärme, also Cluster sehr schwacher Erdbeben, die der Mikroseismizität zuzuordnen sind, haben sicherheitstechnisch keine Relevanz und sind daher nicht Gegenstand dieses Dossiers.

Die sicherheitstechnischen Implikationen der Tatsache, dass Erdbeben meist als Serien auftreten, soll in diesem Abschnitt näher beleuchtet werden.

2.2.1 Schadenspotenzial von Erdbebenserien

Wie bereits in der Einleitung erläutert, treten Erdbeben meist als Cluster auf. Ob sie als mehrere Erdbeben wahrgenommen werden, hängt von der Stärke der Vor- bzw. Nachbeben ab. Aus sicherheitstechnischer Sicht sind insbesondere Erdbebenserien von Relevanz, die zumindest zwei Schadensbeben umfassen. Als Schadensbeben werden Erdbeben bezeichnet, deren Epizentralintensität mindestens $I_0 = VI^{10}$ beträgt. Bei niedrigeren Intensitäten treten an robusten Hochbauten und typischen Industrieanlagen keine nennenswerten Schäden auf. Dies gilt erst recht für Kernkraftwerke. Nach drei Beispielen für Erdbebenserien im Abschnitt 2.2.1.1 werden in Abschnitt 2.2.1.2 die sich aus zwei aufeinanderfolgenden Schadensbeben ergebenden möglichen sicherheitstechnischen Konsequenzen diskutiert.

2.2.1.1 Beispiele für Erdbebenserien

Basel-Erdbeben, 1356

Eine für den deutschsprachigen Raum wichtige Erdbebenserie ereignete sich im Jahr 1356 bei Basel. Am 18. Oktober begann diese Serie um die Mittagszeit mit zunächst

¹⁰ Von manchen Autoren werden auch nur Erdbeben mit $I_0 \geq VII$ als Schadensbeben bezeichnet.

schwächeren Erdbeben. Um etwa 16 Uhr kam es dann zu einem ersten deutlich stärkeren Erdbeben, dem nach heutigem Kenntnisstand eine Epizentralintensität von $I_0 = VII$ zuzuordnen ist. Um etwa 22 Uhr folgte dann das Hauptbeben mit einer Epizentralintensität von $I_0 = IX$ /LEY 11/. Aus der Intensitätsverteilung und der angenommenen Herdtiefe (auf Grundlage der geologischen Verhältnisse) von etwa 12 km lässt sich für dieses Erdbeben eine vermutliche Magnitude von etwa 6,6 ableiten. In der Folge des Hauptbebens kam es dann noch zu zahlreichen Nachbeben. Ursache dieser Erdbebenserie, die zu einer weitgehenden Zerstörung der Stadt Basel (durch die Erschütterungen selbst und durch Folgebrände) und deren Umgebung führte, waren die tektonischen Vorgänge im Rheingraben (Abschiebungsprozesse im Westeuropäischen Riftsystem) /SED 22/. Aus Abb. 2.2 wird deutlich, dass diese Erdbebenserie noch in mehr als 100 km Entfernung vom Epizentrum nennenswerte Schäden verursachte (repräsentiert durch Intensitäten $I \geq VI$). Bemerkenswert ist, dass die schadensrelevante Erdbebenkombination hier aus einem Vorbeben und einem Hauptbeben bestand. Die Nachbeben trugen zum Gesamtschaden nur bedingt bei, sodass sie im Deutschen Erdbebenkatalog /LEY 11/ nicht als separate Einträge geführt werden.

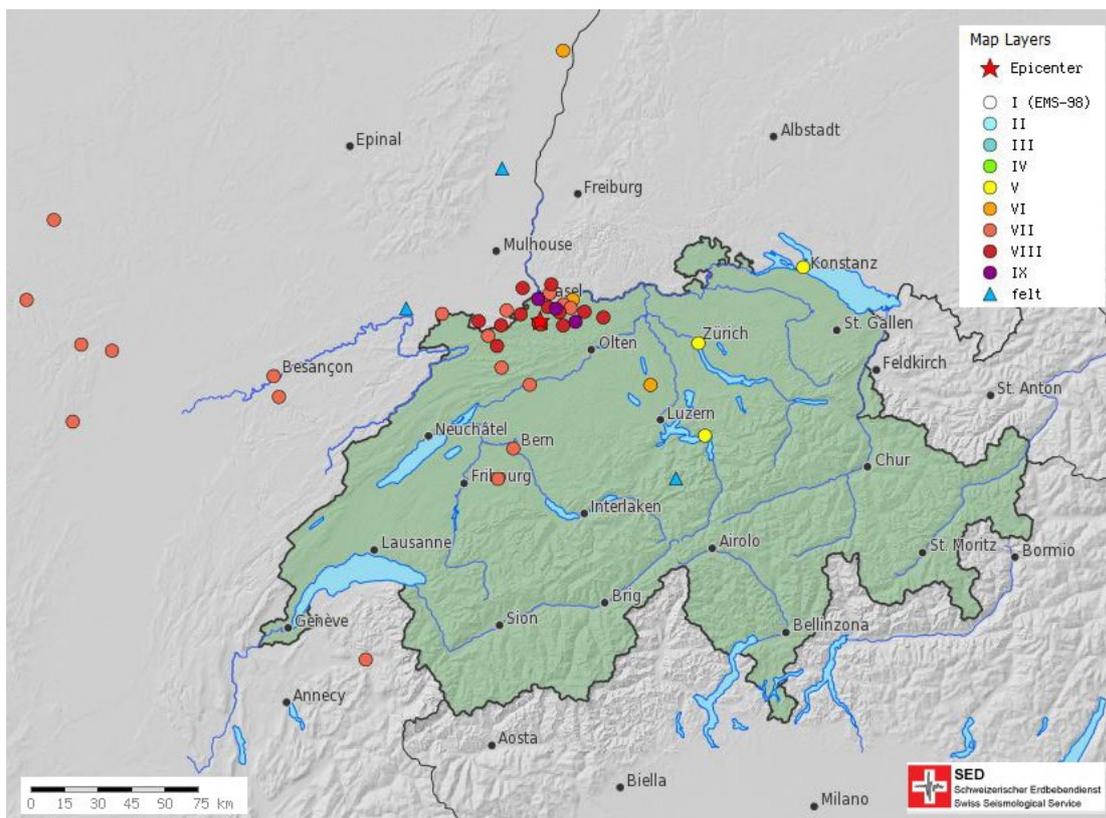


Abb. 2.2 Vermutetes Epizentrum und überlieferte Schäden des Basler Erdbebens von 1356 nach /BER 19/

Kahramanmaras-Erdbeben, 2023

Die Erdbebenserie vom 6. Februar 2023 im Südosten der Türkei zeichnet sich dadurch aus, dass sie neben vielen schwächeren Erdbeben zwei Erdbeben mit Magnituden über 7 umfasste, die sich in etwa 100 km Abstand voneinander an zwei unterschiedlichen Verwerfungen, die zur Ostanatolischen Verwerfungszone gehören, ereigneten. Dem ersten Erdbeben mit Magnitude $M = 7,8$ um 4:17 Uhr Ortszeit folgte etwa neun Stunden später ein Erdbeben mit Magnitude $M = 7,5$. In Abb. 2.3 ist die Verteilung der Erdbeben innerhalb der ersten zwölf Stunden nach Registrierung des ersten Hauptbebens wiedergegeben. Die Lage der Erdbeben zeichnet die räumliche Anordnung der beiden in spitzen Winkel zueinander verlaufenden Verwerfungen nach, die im Rahmen dieses Ereignisses aktiviert wurden. Die beiden Hauptbeben, die zusammen 60.000 Todesopfer forderten und 300.000 Gebäude beschädigten oder zerstörten, waren bis in ca. 2.000 km Entfernung zu spüren /EMS 23/, /GFZ 23/. Dementsprechend wurden sie auch am etwa 250 km entfernten Standort des in Bau befindlichen Kernkraftwerks Akkuyu wahrgenommen. Schäden an Bauwerken, Kränen oder sonstigen Anlagen der Baustelle wurden jedoch nicht berichtet /WNN 23/.

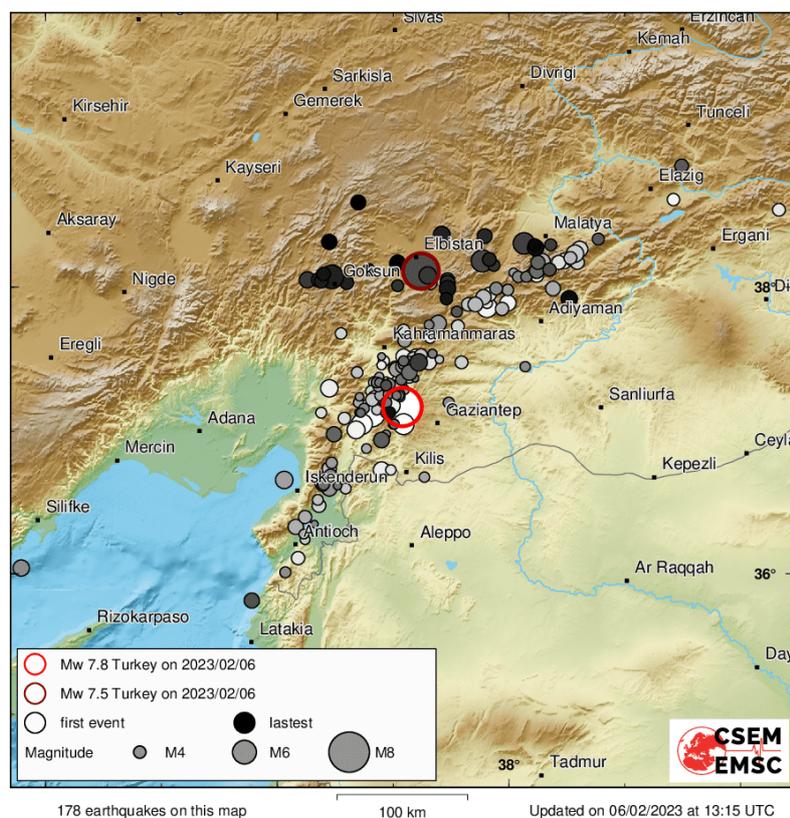


Abb. 2.3 Lage der Einzelereignisse der Erdbebenserie vom 6. Februar 2023 innerhalb von zwölf Stunden nach dem ersten Hauptbeben nach /EMS 23/

Bandasee-Erdbeben, 2023

Eine weitere Erdbebenserie, die zwar aus sicherheitstechnischer Sicht nicht relevant ist, da es sich um unterseeische Erdbeben ohne das Potenzial für eine Tsunami-Auslösung handelte, ereignete sich am 8. und 9. November 2023 in der Bandasee. Diese Erdbebenserie ist dennoch erwähnenswert, da hierbei gleich drei starke Erdbeben auftraten: Um 9:52 Uhr Lokalzeit ereignete sich das erste Erdbeben mit einer Magnitude von 6,7. Diesem folgte nur eine Minute später ein weiteres Erdbeben mit Magnitude 7,1. In der Nacht zum 9. November (0:02 Uhr) ereignete sich dann noch ein weiteres Erdbeben das ebenfalls Magnitude 6,7 erreichte /USG 23/, /USG 23a/, /USG 23b/. Man kann hier also von einer Abfolge aus Vor-, Haupt- und Nachbeben sprechen, bei der sich die Stärke der Einzelereignisse lediglich um 0,4 Magnituden unterschied.

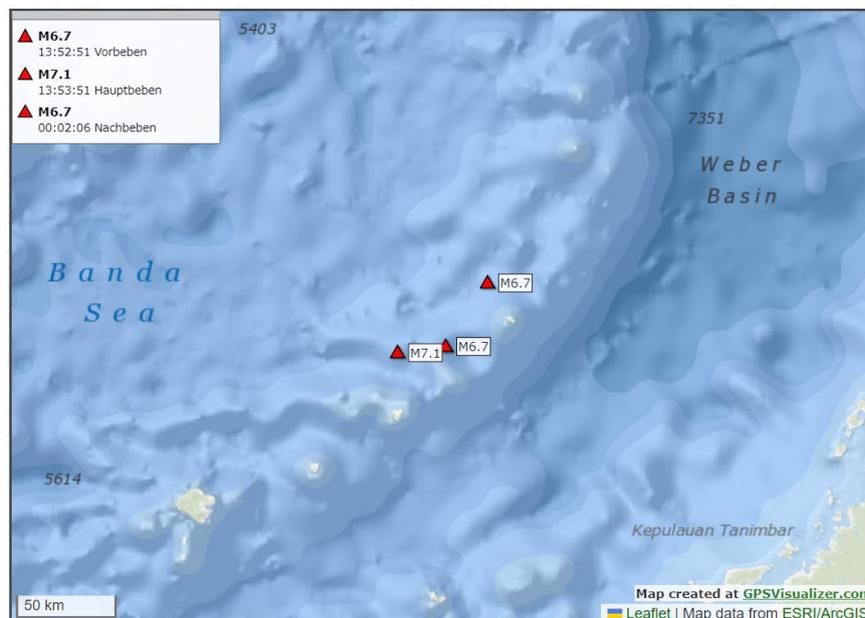


Abb. 2.4 Lage der Epizentren der Erdbebenserie vom 8./9. November 2023

2.2.1.2 Sicherheitstechnische Auswirkungen aufeinanderfolgender Erdbeben

Das Beispiel des Kahramanmaras-Erdbeben im vorigen Abschnitt hat gezeigt, dass in einer Erdbebenserie auch zwei ähnlich starke Erdbeben in kurzer Folge auftreten können. Dies stellt – im Vergleich zu einem starken Hauptbeben und einem schwächeren Nachbeben – ein konservatives Szenario dar. Daher konzentriert sich die nachfolgende Diskussion der möglichen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf diesen Fall. Eine Abfolge dreier oder noch mehr ähnlich starker Schadensbeben, wie im Beispiel des Ban-

dasee-Erdbebens ist sehr selten und wird deshalb hier nicht explizit behandelt. Grundsätzlich unterscheidet sich die Problematik eines solchen Mehrfachereignisses jedoch nicht von dem hier diskutierten Szenario.

Ein entscheidender Faktor für die sicherheitstechnische Relevanz einer Erdbebenserie ist die Stärke der beteiligten Erdbeben, insbesondere des ersten Erdbebens, relativ zur Auslegung der betrachteten Anlage. Aus deterministischer Sicht sind bei einem Erdbeben unterhalb des Inspektionsniveaus¹¹ keine Schäden zu erwarten und die Strukturen und Komponenten verhalten sich elastisch¹². Auch beim Bemessungserdbeben sollte es noch nicht zu sicherheitstechnisch relevanten Schäden kommen. Aus diesen Überlegungen ergeben sich mehrere vereinfachte Szenarien, die in Tab. 2.1 zusammengestellt sind.

Tab. 2.1 Vereinfachte Zusammenstellung deterministischer Szenarien bei zwei aufeinanderfolgenden Erdbeben an einem Kernkraftwerkstandort

	Relative Stärke (I) des ersten Erdbebens	Zustand der Anlage bei Auftreten des zweiten Erdbebens
(1)	$I < \text{Inspektionsniveau}$	Anlage in völlig unbeeinträchtigtem Zustand
(2)	$\text{Inspektionsniveau} < I < \text{Bemessungserdbeben}$	Anlage mit geringen Schäden, insbesondere mit Schäden an nicht gegen das Bemessungserdbeben ausgelegten Anlagenteilen und baulichen Anlagen
(3)	$I > \text{Bemessungserdbeben}$	Anlage mit Schäden, ggf. sogar sicherheitstechnisch relevanten Schäden

¹¹ International wird zwischen einem Auslegungserdbeben (operation basis earthquake) und einem Sicherheitserdbeben (safe shutdown earthquake) unterschieden. Beim Auslegungserdbeben kann die betroffene Anlage unverändert weiterbetrieben werden, während beim Sicherheitserdbeben kein Weiterbetrieb mehr möglich ist, die Anlage jedoch abgefahren und in einem sicheren Zustand gehalten werden kann. Eine ähnliche zweistufige Definition war früher auch in Deutschland üblich. Mit der Fassung aus dem Jahr 1990 der KTA 2201.1 „Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil 1: Grundsätze“ /KTA 90/ wurde dieses Konzept durch die Kombination aus einem Bemessungserdbeben, das dem früheren Sicherheitserdbeben entspricht, und dem sogenannten Inspektionsniveau ersetzt. Letzteres entspricht hinsichtlich der Erdbebeneinwirkungen weitgehend dem früheren Auslegungserdbeben, erlaubt aber nicht per se den Weiterbetrieb der Anlage.

¹² Dass aus probabilistischer Sicht Schäden, wenn auch mit geringer Wahrscheinlichkeit, dennoch auftreten können, spielt für die grundsätzlichen Überlegungen in diesem Dossier keine Rolle. In diesem Fall wäre das resultierende Szenario äquivalent zu dem eines auslegungsüberschreitenden Erdbebens.

In Fall (1) hat das erste Erdbeben keine Auswirkungen auf den Anlagenzustand. Der Zustand der Anlage bei Eintritt des zweiten Erdbebens unterscheidet sich also nicht von dem vor Eintritt des ersten Erdbebens. Die Erdbeben können somit als unabhängig betrachtet werden und die Tatsache, dass beide Erdbeben zu einer Serie gehören, spielt keine Rolle.

Im Fall (2) sind nach dem ersten Erdbeben zwar keine Schäden zu erwarten, die die Sicherheit der Anlage unmittelbar gefährden. Schäden im konventionellen Teil (bzw. dem nicht nach KTA 2201 gegen das Bemessungserdbeben ausgelegten Teil) der Anlage und an der Infrastruktur auf dem Anlagengelände und in deren Umgebung sind jedoch nicht auszuschließen. Zumindest aus probabilistischer Sicht können auch geringfügige inelastische Effekte (z. B. permanente Verformungen oder Änderungen der Duktilität) an Bauwerken und Komponenten mit sicherheitstechnischer Bedeutung nicht ausgeschlossen werden. Bei Eintritt des zweiten Erdbebens kann die Anlage also vorgeschädigt sein. Interessant sind in diesem Fall insbesondere die angesprochenen möglichen inelastischen Effekte. Diese führen u. a. zu einer Änderung der Versagenskurven (fragility curves) der betroffenen Anlagenteile und baulichen Anlagen, so dass die ursprünglichen Auslegungsrechnungen nicht mehr unverändert gültig sind. Die Reaktion der Anlage auf das zweite Erdbeben lässt sich somit auf Basis der vorliegenden Sicherheitsnachweise nicht vorhersagen. Hierfür wären zusätzliche Berechnungen erforderlich, die die veränderten Versagenskurven berücksichtigen. Ansätze, wie eine Berücksichtigung solcher Vorschäden erfolgen kann, werden in Abschnitt 2.2.2 vorgestellt.

Im Fall (3) müssen nach dem ersten Erdbeben potenziell sicherheitstechnisch relevante Schäden bis hin zum Vorliegen eines Kernschadens in Betracht gezogen werden. Wenn – im günstigsten Fall – nur geringe Schäden wie in Fall (2) vorliegen, lassen sich die dortigen Betrachtungen auch auf dieses Szenario übertragen. Sofern es zu gravierenden Schäden gekommen ist, hat das zweite Erdbeben insbesondere Auswirkungen auf die Durchführung von Maßnahmen des anlageninternen (und ggf. auch anlagenexternen) Notfallschutzes. Da für das Bemessungserdbeben üblicherweise sehr geringe Überschreitenswahrscheinlichkeiten angesetzt werden und auch im Falle eines Bemessungserdbebens nicht zwangsweise mit größeren Schäden zu rechnen ist, ist das Extrem-Szenario, dass ein zweites starkes Erdbeben auf eine bereits erheblich vorgeschädigte Anlage trifft, sehr unwahrscheinlich und wird daher in diesem Dossier nicht weiter betrachtet.

Aus der Betrachtung der drei unterschiedlichen Fälle für aufeinanderfolgende Erdbeben ist zu erkennen, dass für seismische Sicherheitsanalysen insbesondere der Fall (2) und hier wiederum die Variante mit inelastischen Effekten (d. h. geringfügigen Schäden) an sicherheitstechnisch relevanten Anlagenteilen und baulichen Anlagen interessant ist. Dementsprechend stellt dieses Szenario die Grundlage für die Überlegungen in Abschnitt 2.2.2 dar.

2.2.2 Berücksichtigung von Erdbebenserien in seismischen Sicherheitsanalysen

Bereits auf dem NEA/CSNI Specialist Meeting on the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Facilities im Jahr 2006 wurde die Problematik von Nachbeben in einem Vortrag von Herrn Tsutsumi adressiert /TSU 07/. In diesem Vortrag wurde die folgende Vorgehensweise zur Berücksichtigung starker Nachbeben im Rahmen einer Erdbeben-PSA vorgeschlagen:

1. Seismische Gefährdungsanalyse für Nachbeben

Hierfür ist ein stochastisches Modell der Nachbebenaktivität zu entwickeln, das die folgenden Informationen liefert: (i) die Anzahl der Nachbeben während des Betrachtungszeitraums der Erdbeben-PSA (mission time) mittels der modifizierten Omori-Formel¹³, (ii) die Häufigkeit von Nachbeben einer bestimmten Magnitude entsprechend der Gutenberg-Richter-Beziehung für die betrachtete Region, (iii) die Magnitude des stärksten Nachbebens (auf Basis einer statistischen Auswertung von Hauptbeben-Nachbeben-Beobachtungen) und (iv) die räumliche Verteilung der Erdbebenherde der Nachbeben (vereinfacht kann eine Gleichverteilung in der von Nachbeben betroffenen Region angenommen werden).

2. Versagensanalyse für Anlagenteile und bauliche Anlagen

Auf Grundlage des ersten Analyseschritts werden kombinierte synthetische Erdbebenzeitverläufe generiert. Diese werden dann für die Ermittlung der Versagenskurven (bedingte Versagenswahrscheinlichkeiten) herangezogen. Ansonsten entspricht das Vorgehen dem bei ausschließlicher Berücksichtigung eines Hauptbebens.

¹³ Die modifizierte Omori-Formel $n(t)=K(t+c)^{-P}$ (mit n – Anzahl der Nachbeben in einem vorgegebenen Zeitintervall, t – Abstand des Zeitintervalls zum Hauptbeben, K , c und P empirisch festzulegende Konstanten) ist eine empirische Beziehung, die – insbesondere in Japan – seit über hundert Jahren zur Abschätzung der Häufigkeit von Nachbeben verwendet wird.

3. Quantifizierung der Ereignisabläufe

In der Erdbeben-PSA werden die Versagenswahrscheinlichkeiten in den Fehlerbäumen entsprechend den Ergebnissen des zweiten Schritts angepasst. Die gilt jedoch nur für Fehlerbäume in jenen Pfaden, die nach der erfolgreichen Reaktorschnellabschaltung aufgrund des Hauptbebens bei der normalen Erdbeben-PSA zu einem sicheren abgeschalteten Anlagenzustand führen. Pfade, die bereits durch das Hauptbeben zu einem Kernschaden führen, bleiben unverändert.

Das Vorgehen in Schritt 2 wird aus der Beschreibung in /TSU 07/ leider nicht eindeutig klar. Es sieht jedoch so aus, als ob der Ansatz sich auf eine nachbebenbedingte Erhöhung der Versagenswahrscheinlichkeiten stützt. Dabei scheint aber kein unmittelbarer Zusammenhang mit einer konkreten Vorschädigung von Anlagenteilen und baulichen Anlagen durch das Hauptbeben zu bestehen. Der zeitlichen Abfolge (Nachbeben nach dem Hauptbeben) wird dabei durch die ausschließliche Modifizierung der Fehlerbäume in den Erfolgspfaden nach Reaktorschnellabschaltung während des Hauptbebens Rechnung getragen.

Auf dem NEA/CSNI International Workshop on Safety Assessment of Nuclear Installations for Combinations of External Hazards im Herbst 2023 stellte Herr Song ein gemeinsam mit Herrn Mun entwickeltes Konzept zur Berücksichtigung von Nachbeben auf Basis eines Bayesian Networks /MUN 22/ vor. Die Struktur des Bayesian Networks ist in Abb. 2.5 dargestellt. $EQ^{(x)}$ bezeichnet das Haupt- und Nachbeben, $\Theta^{(x)}$ sind die Eigenschaften der resultierenden Bodenbewegungen, $IM^{(x)}$ die Intensitätsmaße (als Beschreibung der Schadenswirkung; z. B. die makroseismische Intensität), $EDP^{(x)}$ das Strukturverhalten als Folge der Bodenbewegung (engineering demand parameter) und DS (als zusätzlicher Knoten im Zweig des Nachbebens) der Schadenszustand nach dem Hauptbeben.

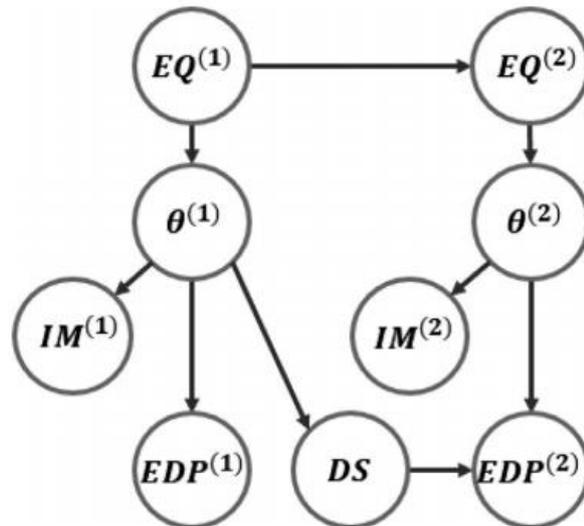


Abb. 2.5 Struktur des von Mun und Song vorgeschlagenen Bayesian Networks nach /MUN 22/

Für die Auswertung des Gefährdungsteils, $EQ^{(1)} \rightarrow EQ^{(2)}$, $EQ^{(1)} \rightarrow \theta^{(1)}$ und $EQ^{(2)} \rightarrow \theta^{(2)}$, werden übliche empirische Vorhersagemodelle verwendet. Die Bauwerksantwort, $\theta^{(1)} \rightarrow EDP^{(1)}$ und $\theta^{(2)} \rightarrow EDP^{(2)} \leftarrow DS$, wird mit Hilfe (nicht-linearer) dynamischer Analysen ermittelt.

Auch in diesem Ansatz werden im Wesentlichen die Versagenswahrscheinlichkeiten durch eine (vertikale) Verschiebung der Versagenskurven erhöht. Allerdings besteht in diesem Fall ein direkter Zusammenhang mit der Vorschädigung von Anlagenteilen und baulichen Anlagen durch das Hauptbeben (Zweig $\theta^{(1)} \rightarrow DS \rightarrow EDP^{(2)}$ in Abb. 2.5). Der resultierende Effekt hängt dabei deutlich vom Szenario ab; je stärker das Hauptbeben ist, desto größer ist die Verschiebung der Kurven durch das Nachbeben (vgl. Abb. 2.6). Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Stärke des Hauptbebens auch immer stärkere Nachbeben auftreten können.

Die weiteren Schritte einer probabilistischen Sicherheitsanalyse (z. B. Quantifizierung der Kernschadenshäufigkeit mittels Ereignisbäumen) werden in /MUN 22/ nicht adressiert.

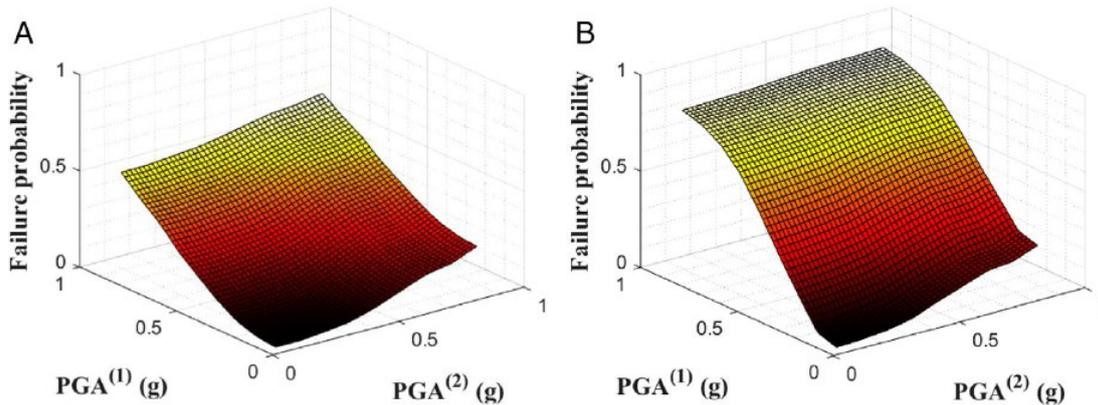


Abb. 2.6 Versagenswahrscheinlichkeitsflächen für zwei unterschiedliche Szenarien: links Hauptbeben der Magnitude 6 und rechts Hauptbeben der Magnitude 8 /MUN 22/

Im Rahmen des Horizon 2020 Projekts METIS (Methodologies and Tools Innovation for Seismic Risk Assessment) /MET 24/ wird an der Weiterentwicklung und europäischen Vereinheitlichung der Methoden zur seismischen Sicherheitsanalyse gearbeitet. Hierbei werden auch die Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Nachbeben intensiv diskutiert. U. a. gab es zu diesem Thema im Februar 2023 auch einen eigenen Workshop. Ziel des Projektes ist es jedoch nicht, eine vollständige Erdbeben-PSA mit Berücksichtigung von Nachbeben durchzuführen; es soll lediglich untersucht werden, wie eine solche methodisch durchgeführt werden könnte und ob von Nachbeben überhaupt ein signifikanter Beitrag zur Kernschadenshäufigkeit zu erwarten ist.

Zu Beginn des Projekts wurden zwei unterschiedliche Ansätze zum Umgang mit Nachbeben (im Rahmen von METIS unter dem Stichwort clustered seismicity behandelt) diskutiert:

- Im ersten Ansatz wird der Tatsache, dass eine weitere Schädigung durch ein Nachbeben auftreten kann, durch eine Erhöhung der seismischen Gefährdung Rechnung getragen. Diese Erhöhung ergibt sich aus seismologischen Überlegungen zur Häufigkeit und Stärke von Nachbeben. Die Betrachtung der Widerstandsseite (Versagenskurven und Ereignis- bzw. Fehlerbäume) erfolgt dann genau wie in der normalen Erdbeben-PSA, d. h. so, als ob nur ein Erdbeben (jedoch mit höherer Intensität) aufgetreten wäre. Nach Diskussion in der Projektgruppe und mit dem External Advisory Board wurde dieser Ansatz jedoch verworfen, da er keinen Bezug zu konkreten Vorschäden aufgrund des Hauptbebens hat.

- Der zweite Ansatz beinhaltet ein zweistufiges Vorgehen. Im ersten Schritt werden auf Basis einer üblichen Gefährdungs- und Versagenswahrscheinlichkeitsanalyse die aufgrund des Hauptbebens zu erwartenden Schäden ermittelt. Im zweiten Schritt werden dann auf dieser Grundlage modifizierte Versagenskurven für die vorgeschädigten Anlagenteile und baulichen Anlagen ermittelt und mit den Ergebnissen einer Gefährdungsanalyse für das bedingte Auftreten von Nachbeben kombiniert. Dieses Vorgehen ähnelt somit demjenigen in /MUN 22/.

Bei dem in METIS verfolgten Ansatz zur Berücksichtigung von Nachbeben werden auf Basis des modellierten Verhaltens der Anlagenteile und baulichen Anlagen nach dem ersten Erdbeben vier abgestufte Schadenszustände (damage states, DS) festgelegt (vgl. Abb. 2.7). Aus diesen resultiert eine Schar neuer Versagenskurven (vgl. Abb. 2.8) die in den Fehlerbäumen der Erdbeben-PSA dann mit der Bodenbewegung der möglichen Nachbeben kombiniert werden. In welchen Fehlerbäumen diese neuen Versagenskurven zur Anwendung kommen und wie ggf. der Ereignisbaum zu modifizieren ist, um die zeitliche Abfolge von Haupt- und Nachbeben angemessen abzubilden, ist noch in der Diskussion.

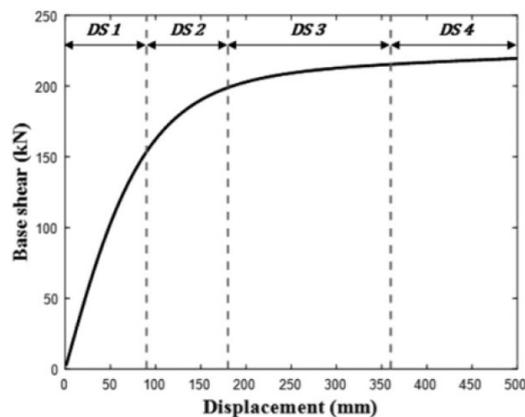


Abb. 2.7 Beispiel für die Festlegung der Schadenszustände (damage states, DS) nach dem Hauptbeben auf Grundlage der modellierten Verschiebung (displacement) /FAT 23/

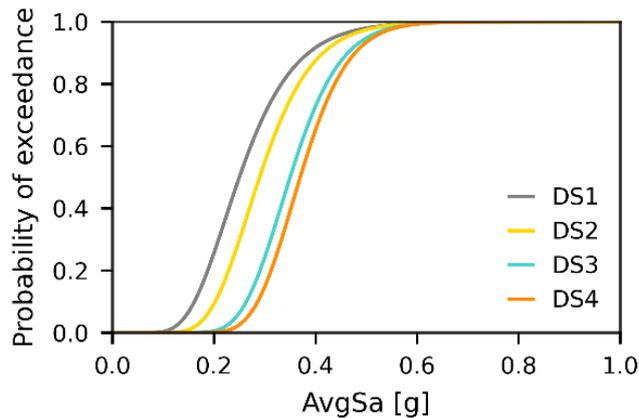


Abb. 2.8 Beispiel für eine Schar von Versagenskurven resultierend aus den unterschiedlichen Schadenszuständen (DS1 bis DS4) nach dem Hauptbeben /BAZ 23/

Um den Aufwand im Rahmen des Projekts in vertretbaren Grenzen zu halten, wurden für die Analyse die folgenden Eckpunkte festgelegt /FAT 23/:

- Es werden maximal ein bis zwei Nachbeben betrachtet.
- Der zeitliche Abstand zwischen Haupt- und Nachbeben wird mit maximal fünf Tagen angesetzt.
- Als Hauptbeben wird das Bemessungserdbeben der Anlage angesetzt.
- Es werden nur ausgewählte Anlagenteile und bauliche Anlagen mit besonders großer sicherheitstechnischer Bedeutung betrachtet.

Fachliche Fragen, die bis zum Ende des Projekts im Frühjahr 2025 noch geklärt werden sollen, betreffen u. a. die Voraussetzungen für die Modellierung (Wie viele Erdbebenzeitverläufe werden benötigt?) und die Berücksichtigung der Schadenszustände (Welche Schadenszustände sollen betrachtet werden, nur DS1 mit den geringsten Schäden oder DS4 mit den größten Schäden oder alle Schadenszustände?).

Die derzeit vorliegenden Informationen deuten darauf hin, dass in METIS nur die Abfolge Hauptbeben-Nachbeben betrachtet wird. D. h. das erste Erdbeben wird als das stärkere angesetzt. Ob sich dies aus seismologischen Überlegungen für den betrachteten Referenzstandort ergibt und ob dieser Fall konservativ gegenüber einem Vorbeben mit nachfolgendem stärkeren Hauptbeben ist, ist der GRS nicht bekannt.

2.2.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der Befassung mit Erdbebenserien

Erdbeben treten meist nicht einzeln, sondern in Serien, bestehend aus einem oder mehreren Vor-, Haupt- und Nachbeben, auf. Diesem Verhalten wurde in seismischen Sicherheitsanalysen für Kernkraftwerke bisher jedoch nicht Rechnung getragen. Die Gründe hierfür liegen vermutlich in den methodischen Herausforderungen einer systematischen Berücksichtigung von Nachbeben, dem erheblichen damit verbundenen Aufwand und der Überlegung, dass aufgrund der robusten Auslegung von Kernkraftwerken nicht mit nennenswerten zusätzlichen Schäden durch Nachbeben zu rechnen ist.

Die Einschätzung, dass Nachbeben keinen relevanten Beitrag zur Gesamtgefährdung liefern, wird auch durch die Erfahrung gestützt, dass selbst bei auslegungsüberschreitenden Erdbeben (wie sie in Japan wiederholt aufgetreten sind) und den damit verbundenen Nachbeben bisher keine Schäden beobachtet wurden, die eine ernste sicherheitstechnische Gefährdung dargestellt hätten. Nichtsdestotrotz bedarf die Annahme – insbesondere vor dem Hintergrund, dass in den letzten Jahren Erdbebenserien beobachtet wurden, in denen mehrere ähnlich starke Erdbeben aufgetreten sind – einer Verifizierung durch entsprechende Analysen.

In den letzten Jahren wurden unterschiedliche methodische Ansätze für eine Berücksichtigung von Nachbeben in seismischen probabilistischen Sicherheitsanalysen entwickelt. Insbesondere im Rahmen des METIS-Projekts fanden und finden umfangreiche diesbezügliche Arbeiten statt. Neben der grundsätzlichen Methodenentwicklung wird in METIS auch eine generische Abschätzung der sicherheitstechnischen Relevanz von Nachbeben durch die Anwendung der Methodik auf ein vereinfachtes Anlagenmodell angestrebt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten dürften im Laufe des Jahres 2025 vorliegen und veröffentlicht werden.

3 Analysen zur Quantifizierung von Windlasten

Die WENRA Reference Levels für existierende Reaktoren /WEN 14/ bzw. /WEN 21/ fordern einen Schutz gegen naturbedingte Einwirkungen mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr. Eine entsprechende Empfehlung wurde auch von der RSK in ihrer 457. Sitzung mit Blick auf meteorologische Einwirkungen ausgesprochen /RSK 13a/. Für viele meteorologische Einwirkungen wurden Ereignisse mit sehr geringen Überschreitenswahrscheinlichkeiten bisher jedoch nicht betrachtet, so dass für deren Ermittlung keine etablierten Methoden aus dem meteorologischen Bereich zur Verfügung stehen. Im kerntechnischen Bereich wurden für die Auslegung gegen meteorologische Einwirkungen entweder anzusetzende Lasten postuliert (z. B. für extreme Luft- oder Wassertemperaturen) oder es wurde das jeweilige konventionelle Regelwerk herangezogen (z. B. für Wind- und Schneelasten). Zudem kann für einzelne meteorologische Einwirkungen auch vom Schutz gegen Notstandsfälle Kredit genommen werden. Gleichwohl sind methodische Weiterentwicklungen anzustreben, um die tatsächliche Stärke meteorologischer Einwirkungen mit Überschreitenswahrscheinlichkeiten von 10^{-4} pro Jahr für meteorologische Einwirkungen quantifizieren zu können.

Darüber hinaus besteht die Notwendigkeit, für die Zwecke der PSA auch seltenere Ereignisse und deren Unsicherheiten zu quantifizieren. Da auch methodische Unsicherheiten bestehen, werden bei einer probabilistischen Gefährdungsanalyse mehrere verschiedene Methoden zur Gefährdungsanalyse inklusive ihrer Unsicherheiten untersucht. Bei probabilistischen Untersuchungen ist es zudem a priori unklar, wie die Ergebnisse der einzelnen Methoden zum Gesamtergebnis kombiniert werden. Bei probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen wird dazu zumeist ein Vertrauenswürdigkeitsranking der einzelnen Methoden – z. B. durch eine Expertenbefragung – erstellt und die Einzelmethoden werden dementsprechend gewichtet.

Im deutschen kerntechnischen Regelwerk existieren keine zusätzlichen quantitativen Anforderungen, wie Kernkraftwerke oder andere kerntechnische Einrichtungen gegen Windlasten auszulegen sind. Daher erfolgte die Auslegung entsprechend des zum Zeitpunkt der Errichtung jeweils gültigen konventionellen Regelwerks. Ausgangspunkt für die Bemessung entsprechend den einschlägigen Normen (insbesondere Eurocode 0 /DIN 10/ und Eurocode 1 Teil 1 – 4 /DIN 10a/ bzw. die deutschen Vorgängerversionen DIN 1055-100 und DIN 1055-4) sind sogenannte „charakteristische Ereignisse“ mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von einmal in 50 Jahren, die dann mit Sicherheitsfaktoren multipliziert werden. Zusätzlichen Schutz gegen Windlasten bietet die Auslegung

gegen Druckwellen aus chemischen Explosionen /BMI 76/, so dass aufgrund von Windlasten an sich keine Gefährdung der deutschen Kernkraftwerke zu erwarten ist. Die Auslegung gegen Flugzeugabsturz nach /BMU 15/ bietet zudem Schutz gegen windgetragene Trümmer. Vor dem Hintergrund, dass von der RSK /RSK 13a/ und in Issu eT der WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors /WEN 14/ bzw. /WEN 21/ der Schutz von Kernkraftwerken gegen meteorologische bzw. naturbedingte Einwirkungen mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr gefordert wird, sollten die entsprechenden Windlasten nichtsdestotrotz für zwei repräsentative meteorologische Messstationen quantifiziert werden. Auch wenn beispielsweise in den USA die standortspezifische Ermittlung seltener Windereignisse im Regelwerk verankert ist (/DOE 16/ und dort referenzierte Dokumente), existiert hierfür bisher keine Vorgehensweise, die als Stand von Wissenschaft und Technik anzusehen wäre. Im Rahmen eines Eigenforschungsvorhabens der GRS /SPE 13/ wurde vom Deutschen Wetterdienst (DWD) die Windklimatologie an einem Referenzstandort untersucht /DWD 13/. Hierbei bestätigte sich die in der wissenschaftlichen Gemeinde verbreitete Erwartung, dass die Ermittlung seltener Windeinwirkungen mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Diese resultieren einerseits aus den Eingangsdaten selbst (z. B. Übertragung der Daten von meteorologischen Messstationen auf einen gegebenen Standort) und andererseits aus den statistischen Verfahren zur Extrapolation. Letztere wurden in der Untersuchung des DWD nicht im Einzelnen diskutiert. Im Jahr 2018 hat sich die GRS im Rahmen eines Vergleichs mit den Anforderungen der konventionellen europäischen Normen (Eurocode 0 und Eurocode 1) erneut mit dem Thema befasst und eine Extrapolation von Windmessdaten für vier Messstationen in den Niederlanden durchgeführt /STR 18/. In dieser Studie wurde das Verfahren zur Anpassung der statistischen Verteilungsfunktion (als Gumbel-Verteilung fest vorgegeben) an die Daten variiert. Dabei zeigte sich, dass die Wahl des Anpassungsverfahrens (Maximum-Likelihood-Methode und Methode der kleinsten Fehlerquadrate mit unterschiedlicher Gewichtung der Fehler) für die untersuchte Wetterstation keinen nennenswerten Einfluss auf die ermittelten Windgeschwindigkeiten mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr hat.

In Anlehnung an /WEN 14/ bzw. /WEN 21/ und /RSK 13a/ wurden in diesem Vorhaben Häufigkeit und Stärke seltener Starkwindereignisse für Referenzorte, die als repräsentativ für die Standorte kerntechnischer Anlagen in Deutschland angesehen werden können, untersucht. Hierzu wurden Messdaten von exemplarisch ausgewählten meteorologischen Stationen ausgewertet und Windgeschwindigkeiten (10-Minuten-Mittelwert) mit

einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr ermittelt. Da die hierfür erforderliche Extrapolation deutlich über den im konventionellen Bereich geforderten Rahmen hinausgeht, wurden bei der Untersuchung insbesondere auch die Analyseunsicherheiten berücksichtigt, um die Aussagesicherheit der Ergebnisse bewerten zu können. Ähnliche Unsicherheiten ergeben sich auch bei der Ermittlung anderer naturbedingter Einwirkungen mit geringer Überschreitenswahrscheinlichkeit, so dass die in diesem Bericht dargestellten Methoden auch für die Bewertung der Aussagesicherheit von Standortgefährdungsanalysen für weitere naturbedingte Einwirkungen herangezogen werden können.

Die Arbeiten gliederten sich in folgende Arbeitsschritte:

- Methoden und Daten (Abschnitt 3.1)
Hierbei wurden die notwendigen Daten beschafft und aufbereitet. Ein wesentlicher Punkt war es, für die Untersuchungen geeignete Datensätze zu identifizieren. Zudem wurde eine Literaturrecherche zu verwendeten Methoden zur Ermittlung extremer Windereignisse durchgeführt sowie ein Vergleich verschiedener Fitting-Methoden zur Ermittlung der Extrapolationsfunktionsparameter.
- Probabilistische Windgefährdungsanalyse (Abschnitt 3.2).

3.1 Methoden und Daten

3.1.1 Datenbeschaffung und -aufbereitung

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellt kostenlos eine Vielzahl von meteorologischen Datensätzen in seinem „Climate Data Center“ zur Verfügung. Der Abruf der Daten erfolgt über das Internet.

Die erste Aufgabe dieser Untersuchungen war es, Wetterstationen mit geeigneten Datensätzen für diese Untersuchungen zu identifizieren. Die Recherchen ergaben, dass die Datensätze für Cuxhaven (Flachland) und für Bad Marienberg (Mittelgebirge) geeignet sind. Diese enthalten sowohl eine hinreichend lange Zeitreihe von den erforderlichen 10-Minuten-Mittelwerten für die Mittelwindgeschwindigkeiten als auch längere Zeitreihen von Stundenmittelwerten der Windgeschwindigkeiten.

Eine Vorabanalyse der Daten auf Grundlage von mehrjährigen Mittelwerten und Standardabweichungen ergibt, dass die in den Metadaten angegebenen Geber- bzw. Höhenwechsel rechnerisch ausgeglichen wurden (vgl. für Cuxhaven Abb. 3.1). Die Zeitreihen sind sowohl für Cuxhaven als auch Bad Marienberg für die Analysen direkt verwendbar.

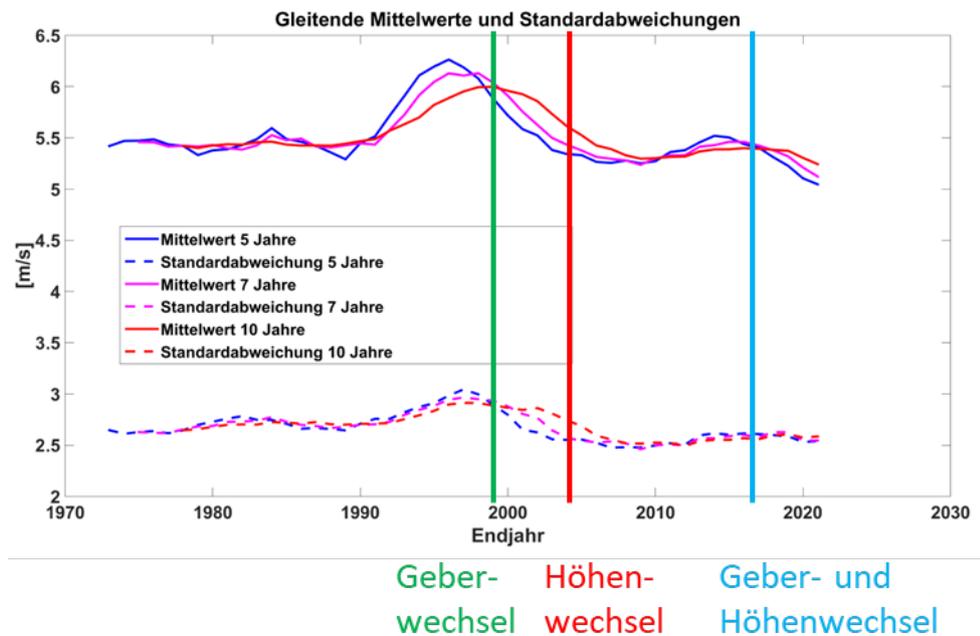


Abb. 3.1 Untersuchung der Abhängigkeiten von mehrjährigen Mittelwerten und Standardabweichungen der Windgeschwindigkeiten für die Station Cuxhaven.

Die Positionen der Geber- bzw. Höhenwechsel beeinflussen diese Verläufe nicht direkt; auftretende Schwankungen sind natürlich bedingt.

3.1.2 Extrapolationsmethoden

Eine umfangreiche Literaturrecherche ergab, dass im Wesentlichen zwei verschiedene Methoden für die Ableitung von Windgeschwindigkeiten kleiner Überschreitenswahrscheinlichkeiten verwendet werden:

- **Blockmaxima und generalisierte Extremwertverteilungen**

Dieses Verfahren beruht auf der Bestimmung der jährlichen Extremwerte einer Zeitreihe in Verbindung mit einer generalisierten Extremwertverteilung, in der Regel einer Gumbelverteilung (zweiparametrig), zur Extremwertextrapolation.

- **Peak-Over-Threshold-Verfahren und generalisierte Paretoverteilungen**

Dieses Verfahren beruht auf der Bestimmung aller unabhängigen Maximalwerte

einer Zeitreihe über einem Schwellwert in Verbindung mit generalisierten Paretoverteilung zur Extremwertextrapolation.

Bei den Untersuchungen zu Windgeschwindigkeiten wurden deswegen diese beiden Verteilungen herangezogen. Um noch einen zusätzlichen Vergleich zu haben, wurde zudem auch die Pearson-III-Verteilung verwendet, die bei der Bestimmung von Hochwassern geringer Überschreitenswahrscheinlichkeit vielfach benutzt wird. Die ebenfalls bei Hochwassern verbreitet genutzte Log-Pearson-III-Verteilung erwies sich bei Voruntersuchungen als ungeeignet um Winddaten – zumindest der ausgewählten Standorte – zu extrapolieren, da auch Windgeschwindigkeiten weit jenseits der Schallgeschwindigkeit errechnet wurden.

3.1.3 Parameter-Fitting

Grundsätzlich ist zu unterscheiden zwischen Fitting-Methoden, die Parameter direkt bestimmen können und solchen, die einen optimalen Fit der Funktionsparameter im Sinne eines Least-Square-Verfahrens erzwingen. Voruntersuchungen zeigen, dass die Fitergebnisse sich nicht grundsätzlich unterscheiden, nur manche Fitting-Methoden einfacher mit bestimmten Verteilungsfunktionen anwendbar sind oder statistisch robuster gegen Ausreißer in den Eingangsdaten.

Bei der Direktbestimmung von Funktionsparametern gibt es eine Vielzahl von Methoden und Methodenvarianten, die eingesetzt werden. Beispiele von Methoden zur direkten Bestimmung von Fitparametern sind die Maximum-Likelihood-Methode und die Momenten-Methode. Diesen Methoden ist gemeinsam, dass die Funktionsparameter der Extrapolationsfunktionen allein durch die beobachteten Werte bestimmt werden.

Im Gegensatz dazu erfordern Fitting-Methoden, die auf Varianten der Least-Square-Methode aufbauen, die Bestimmung jeweils einer empirischen Eintrittswahrscheinlichkeit für jeden beobachteten Wert. Zur Bestimmung empirischer Eintrittswahrscheinlichkeiten existieren Formeln, die im Wesentlichen auf zwei Parameter abstellen: (i) die Gesamtzahl der Beobachtungswerte und (ii) den Rang des jeweiligen Beobachtungswertes. Der

Rang ist dadurch bestimmt, an welcher Position der jeweilige Wert in einer nach der Größe geordneten Reihe der Beobachtungswerte steht¹⁴.

Angesichts der Tatsache, dass durch die Ermittlung von empirischen Eintrittswahrscheinlichkeiten eine zusätzliche potenzielle Fehlerquelle (unterschiedliche Methoden sind möglich, mit variierenden Ergebnissen) in die Ermittlung der Fitparameter eingebracht wird, alternative Methoden zur Verfügung stehen, die diese Fehlerquelle nicht beinhalten, und die Ergebnisse sich durch unterschiedliche Fitting-Methoden in der Regel nicht wesentlich ändern – sofern bei Verwendung von Least-Square-Methoden die konservativste Methode zur Ermittlung der empirischen Eintrittswahrscheinlichkeiten verwendet wurde – wurde auf weitere Untersuchungen hierzu verzichtet und generell nur jeweils eine Fitting-Methode für die Parameter verwendet, die ohne die Ermittlung von empirischen Überschreitenswahrscheinlichkeiten auskommt.

3.2 Probabilistische Windgefährdungsanalyse

Die durchgeführte probabilistische Windgefährdungsanalyse gliedert sich entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 3.1 und den erforderlichen weiteren Arbeiten in folgende Schritte:

- Bestimmung der Jahreshöchstwerte der Stundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit (Blockmaxima, Verwendung für die Gumbelverteilung bzw. die Pearson-III-Verteilung),
- Bestimmung der Stundenmittelwerte über einer bestimmten Schwelle (Peak-Over-Threshold, Verwendung für die Paretoverteilung),
- Bestimmung der statistischen Beziehung zwischen Stundenmittelwerten und 10-Minuten-Mittelwerten,
- Erweiterung der längeren Stundenmittelwert-Zeitreihen zu synthetischen 10-Minuten-Mittelwert-Zeitreihen durch Bootstrapping der Messwerte und Monte-Carlo-Methoden zur Umrechnung von Stundenmittelwerten auf 10-Minuten-Mittelwerte,
- Extremwertanalyse an den durch Bootstrapping ermittelten synthetischen Zeitreihen mittels der gewählten Verfahren,

¹⁴ In einer Reihe von 50 beobachteten jährlichen Maxima wird dem größten Wert beispielsweise eine Eintrittswahrscheinlichkeit von $1/51 \text{ a}^{-1}$ und dem kleinsten Wert eine Eintrittswahrscheinlichkeit von $50/51 \text{ a}^{-1}$ zugeordnet.

- Kombination der ermittelten Werte mit Hilfe eines logischen Baums.

Alle Arbeitsschritte werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

3.2.1 Blockmaxima und Peak-Over-Threshold

Aus den Datensätzen der Stundenmittelwerte für die Wetterstationen Cuxhaven und Bad Marienberg wurden die jährlichen Maximalwerte ermittelt. Hierfür wurde das Kalenderjahr zu Grunde gelegt. Dabei wurde geprüft, ob an der Abschneidegrenze (Silvester/Neujahr) ein jährliches Maximum auftrat, um eine Doppelzählung von Ereignissen in zwei Jahren zu vermeiden. Für die Stationen Cuxhaven und Bad Marienberg wurden so jeweils 53 Jahresmaximalwerte erhalten.

Ebenso wurden aus den Stundenmittelwert-Zeitreihen voneinander unabhängige Maximalwerte oberhalb einer stationsabhängig zu bestimmenden Schwelle ausgewählt. Die Schwelle wurde für die Station Cuxhaven mit 15 m/s bestimmt. Eine höhere Wahl der Schwelle führt zu numerisch schlechteren Anpassungen an die verbleibenden Werte, eine niedrigere Wahl ebenso. Zudem erscheint diese Schwelle auch plausibel in der Hinsicht, dass zwei Jahresmaximalwerte für die Station unterhalb dieser Schwelle liegen und diese somit als Extremwert anzusehen ist (vgl. Abb. 3.2). Für die Station Bad Marienberg wurde die Schwelle mit 11 m/s niedriger gewählt.

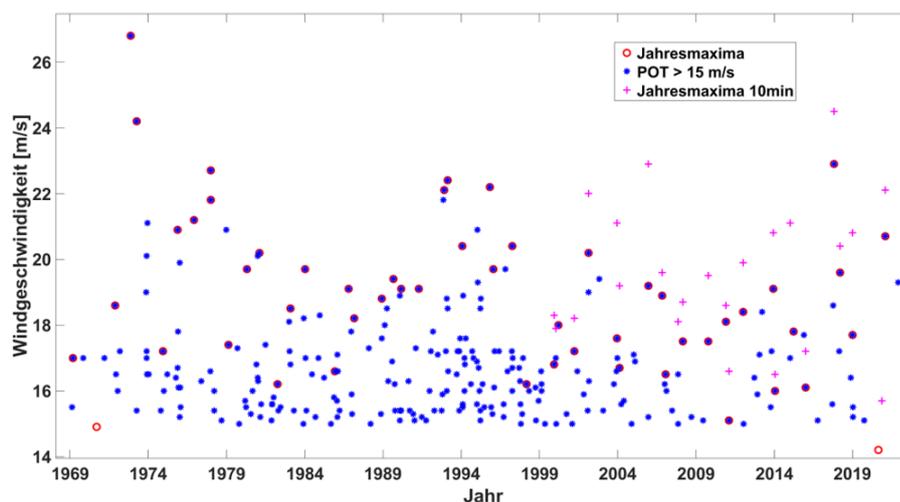


Abb. 3.2 Jahresmaxima und Peak-Over-Threshold Werte für die Stundenmittelwerte der Station Cuxhaven. Ebenso Jahresmaxima für die 10-Minuten-Mittelwerte als Vergleich.

3.2.2 Bestimmung der statistischen Beziehung zwischen Stundenmittelwert und 10-Minuten-Mittelwert

Die Bestimmung der statistischen Beziehung erfolgt durch die Ermittlung von Faktoren zwischen Stundenmittelwerten und extremen 10-Minuten-Mittelwerten der Windgeschwindigkeit aus dem Blockmaxima-Verfahren und dem Peak-Over-Threshold-Verfahren. Dabei wird der extreme 10-Minuten-Mittelwert in zeitlicher Nähe zum Stundenmittelwert ermittelt und das Verhältnis gebildet. Diese Ermittlung trägt der Tatsache Rechnung, dass ermittelte Stundenwerte und extreme 10-Minuten-Mittelwerte nicht notwendigerweise in derselben Messstunde auftreten müssen, dennoch aber zum selben Windfeld gehören.

Abb. 3.3 stellt die Ergebnisse für die Ermittlung der empirischen Beziehung für die Station Cuxhaven dar. Für diese Station liegen etwa 75 % der Umrechnungsfaktoren im Bereich zwischen 1 und etwa 1,1, weit über 90 % sind kleiner als 1,2, aber es treten auch vereinzelt Faktoren von 1,5 und höher auf. Für die Station Bad Marienberg ist das Verhalten qualitativ vergleichbar, jedoch liegen nur etwa 60 % der Umrechnungsfaktoren unter 1,1 und mehr als 95 % unter 1,2. Werte im Bereich bis 1,3 treten hier nur vereinzelt auf.

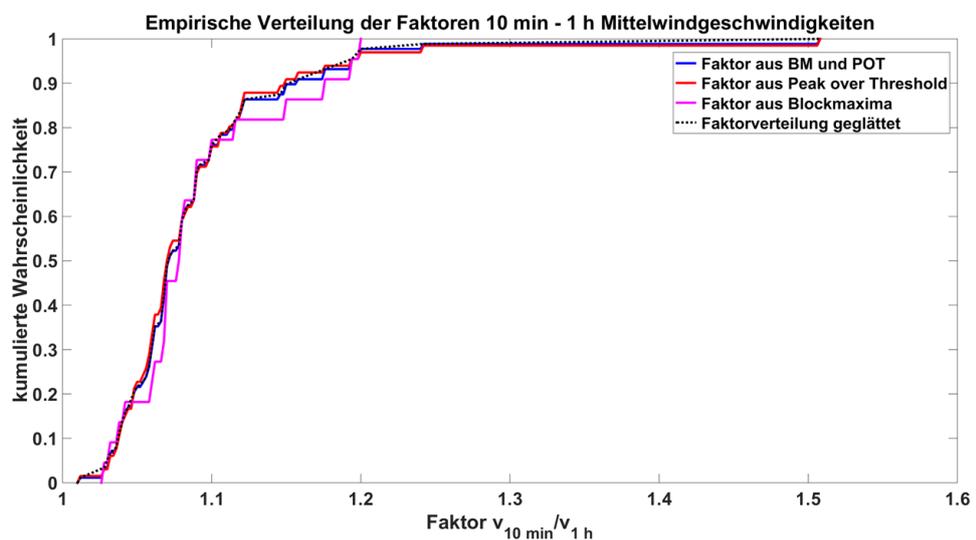


Abb. 3.3 Statistische Beziehung zwischen Stundenmittelwerten und korrelierten 10-Minuten-Mittelwerten am Beispiel der Station Cuxhaven

Die Auswertung aus Blockmaxima und Peak-Over-Threshold liefern qualitativ vergleichbare Ergebnisse.

3.2.3 Bootstrapping und Monte-Carlo-Simulation

Aus den Blockmaxima- bzw. Peak-Over-Threshold-Zeitreihen der Stundenmittelwerte werden mittels Bootstrapping 5.000 synthetische Stundenmittelwert-Zeitreihen erzeugt. Für diese synthetischen Zeitreihen werden jeweils auf Grundlage der gemäß Abschnitt 3.2.2 abgeleiteten statistischen Beziehungen zwischen Stundenmittelwerten und 10-Minuten-Mittelwerten mittels Monte-Carlo-Simulation Umrechnungsfaktoren zufällig ausgewählt und so synthetische 10-Minuten-Mittelwert-Zeitreihen erzeugt.

3.2.4 Extremwertanalyse

Zur Durchführung der Extremwertanalyse wird für die Gumbel- und Pearson-III-Verteilung auf das Blockmaximaverfahren zurückgegriffen und diese Verteilungen werden für jeweils 5.000 synthetische 10-Minuten-Mittelwert-Zeitreihen gefittet. Die Extrapolation erfolgt für jede synthetische Zeitreihe für Wiederkehrperioden von 100 bis 100.000 Jahren. Analog wird für die generalisierten Paretoverteilungen auf das Peak-Over-Threshold-Verfahren zurückgegriffen und diese an 5.000 synthetische erzeugte 10-Minuten-Mittelwert-Zeitreihen gefittet. Die Extrapolation erfolgt auch hier für jede synthetische Zeitreihe für Wiederkehrperioden zwischen 100 und 100.000 Jahren.

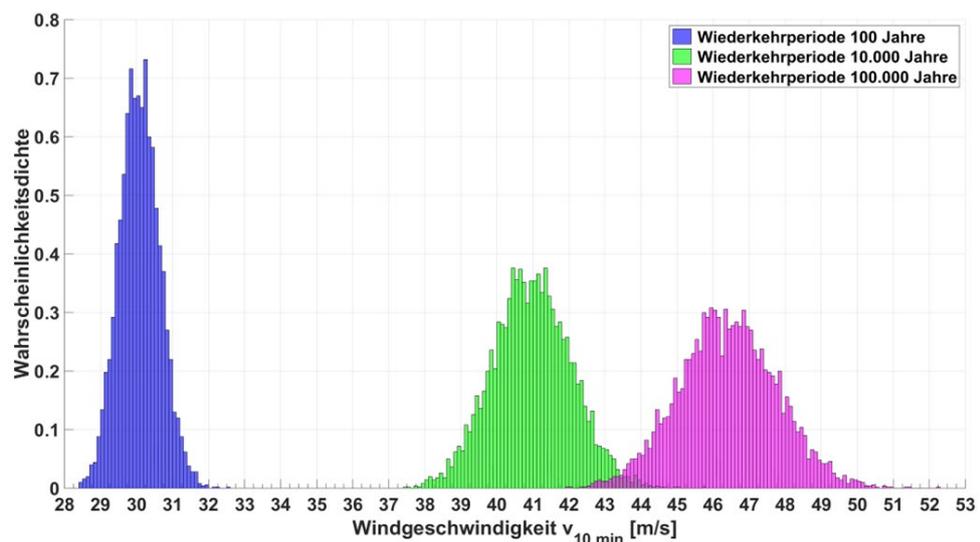


Abb. 3.4 Beispiel für Verteilungsfunktionen der ermittelten Werte bei Verwendung der Gumbelfunktion für die Wiederkehrperioden 100, 10.000 und 100.000 Jahre

Durch die Verwendung von jeweils 5.000 synthetischen Zeitreihen werden die aleatorischen Unsicherheitsbandbreiten der jeweiligen Methoden und damit für die ausgewerteten Wiederkehrperioden die Verteilungen der möglichen Extrapolationsergebnisse bei der jeweiligen Wiederkehrperiode recht genau erfasst (vgl. Abb. 3.4).

3.2.5 Kombination der Einzelergebnisse mittels logischen Baums

Die je Wiederkehrperiode und Extrapolationsmethode (Gumbel-, Pearson-III- bzw. Paretoverteilung) ermittelten Verteilungsfunktionen der Unsicherheiten bilden die aleatorische Unsicherheit innerhalb einer Wiederkehrperiode und für die jeweilige verwendete Extrapolationsmethode ab (vgl. Abb. 3.5). Zur Erfassung von epistemischen Unsicherheiten sind diese Verteilungsfunktionen zu einer Gesamtverteilung zusammenzufassen.

Die Verwendung von logischen Bäumen bei der Kombination von Einzelergebnissen zu einem Gesamtergebnis ist weit verbreitet, vor allem im Rahmen probabilistischer seismischer Gefährdungsanalysen. Durch die Kombination in einem logischen Baum werden die Einzelergebnisse gewichtet in das Gesamtergebnis übernommen. Allerdings stellt die Gewichtung der Einzelergebnisse zum Gesamtergebnis ohne objektive Gewichtungskriterien selbst eine subjektiv geprägte Unsicherheit dar (vgl. z. B. /STR 23/). Bei probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen wird regelmäßig eine Expertenurfrage durchgeführt, um zu möglichst objektiven Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Methoden zu kommen. Dies war im Rahmen dieser Untersuchungen nicht möglich.

Da keine objektiven Kriterien zu unterschiedlichen Gewichtungen der einzelnen Extrapolationsmethoden abgeleitet wurden (und den Rahmen dieser Untersuchung deutlich gesprengt hätten), werden die Einzelergebnisse ausschließlich gleich gewichtet (vgl. Abb. 3.6).

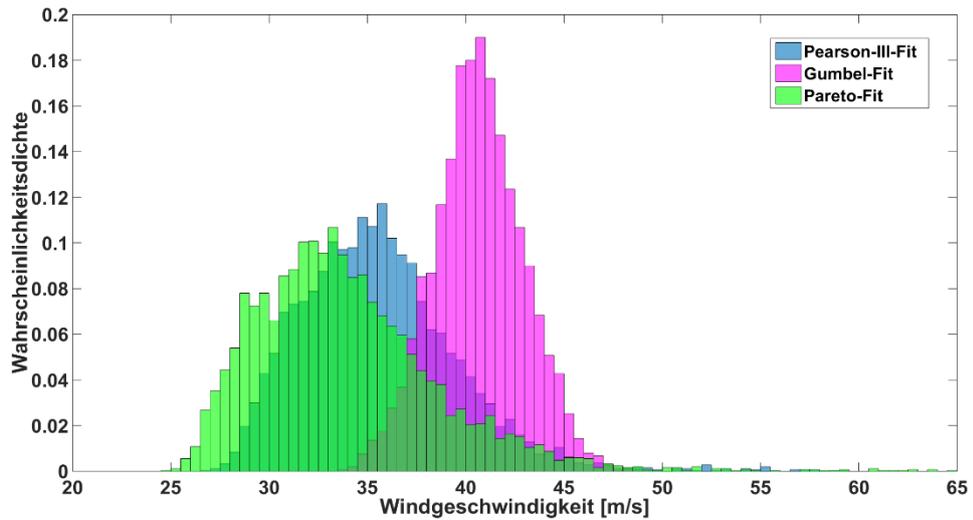


Abb. 3.5 Darstellung der Einzelverteilungen für eine Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren für Gumbel- (pink), Pearson-III- (blau) bzw. Pareto-Verteilung (grün) am Beispiel der Station Cuxhaven

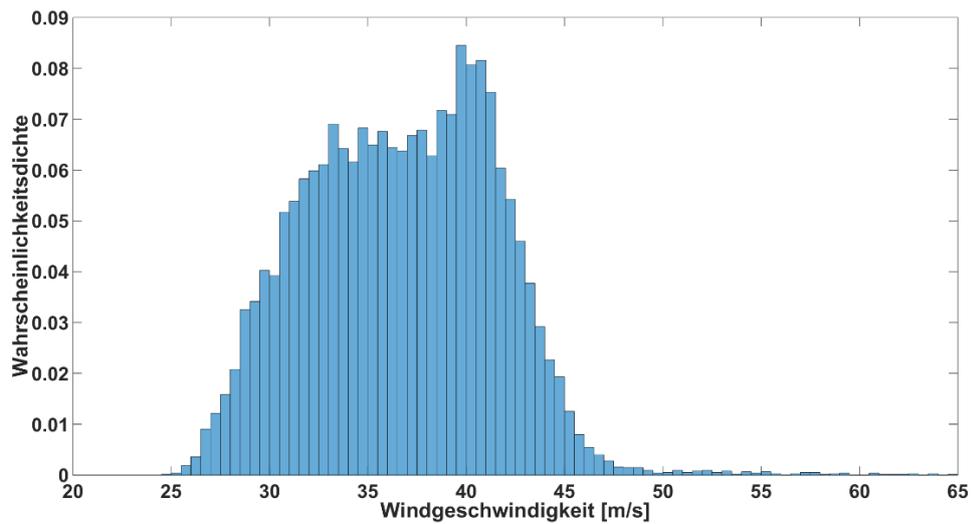


Abb. 3.6 Gesamtverteilung für eine Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren am Beispiel der Station Cuxhaven

In Tab. 3.1 sind die Ergebnisse der probabilistischen Untersuchungen für die Stationen Cuxhaven und Bad Marienberg zusammenfassend dargestellt. Für beide Standorte liefert die Gumbelverteilung die jeweils höchsten Median- bzw. Mittelwerte und die Paretoverteilung die jeweils kleinsten. Bei beiden Stationen ist zudem die Verteilung um diese Werte bei der Gumbelverteilung am schmalsten in dem Sinne, dass die Spannweite vom 1 %-Fraktilewert bis zum 99 %-Fraktilewert am kleinsten ist.

Die deutlich kleineren Werte für die Station Bad Marienberg im Vergleich mit der Station Cuxhaven ergeben sich vor allem aus den Unterschieden in der Lage. Bad Marienberg liegt weit im Binnenland und das bodennahe Windfeld wird dadurch auf Grund der Reibung merklich gedämpft, während in Cuxhaven für die meisten Windereignisse keine nennenswerte Dämpfung zu erwarten ist. Zudem liegt die Station Bad Marienberg etwas hinter einer Hügelkuppe, so dass hier für die Windrichtungen Nord und West mit einer deutlichen Abschattung zu rechnen ist.

Tab. 3.1 Gesamt- und Einzelergebnisse für die Stationen Cuxhaven und Bad Marienberg. Prozentwerte (linke Spalte) geben Fraktile der Verteilungen an.

Station	Cuxhaven [m/s]				Bad Marienberg [m/s]			
	Gesamt	Gumbel	Pearson III	Pareto	Gesamt	Gumbel	Pearson III	Pareto
Median	36,87	40,63	35,25	33,25	26,12	28,26	25,35	24,13
Mittelwert	36,73	40,67	35,58	33,93	25,96	28,27	25,36	24,25
1 % – 99 %	27,24 46,91	35,41 46,15	28,66 48,12	26,53 48,58	19,79 31,98	24,43 32,33	20,42 31,14	19,24 32,01
5 % – 95 %	29,06 43,84	36,91 44,56	29,93 42,37	27,75 42,45	21,04 30,46	25,48 31,19	21,41 29,64	20,20 28,96
10 % – 90 %	30,37 42,55	37,72 43,67	30,80 40,51	28,62 39,91	21,90 29,65	26,07 30,49	22,05 28,67	20,84 27,69
25 % – 75 %	33,03 40,35	39,17 42,15	32,77 37,77	30,65 36,29	23,84 28,11	27,05 29,45	23,54 27,03	22,25 25,94

3.3 Ergebnisse

Ziel der vorliegenden Untersuchung war die Durchführbarkeit einer probabilistischen Windgefährdungsanalyse für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr zu untersuchen. Die vorliegende Untersuchung zeigt dabei einen Weg auf, wie eine probabilistische Windgefährdungsanalyse für einen Standort durchgeführt werden könnte. Die Methoden sind auf andere Standorte übertragbar.

Zur Durchführung wurden Zeitreihen mit verschiedenen zeitlichen Auflösungen ausgewertet und mittels statistischer Beziehungen zu Zeitreihen mit 10-Minuten-Mittelwerten

zusammengefasst, um möglichst lange Zeitreihen für die Extrapolation zu geringen Überschreitenswahrscheinlichkeiten nutzen zu können. Zur Abbildung der aleatorischen Unsicherheiten der Extrapolation mit einer Einzelmethode wurde auf ein Bootstrapping-Verfahren zurückgegriffen und dies mit der verwendeten Monte-Carlo-Methode zur Erweiterung der Zeitreihen verknüpft. Um auch epistemische Unsicherheiten abbilden zu können, wurden mehrere Methoden zur Extrapolation der Zeitreihen verwendet. Diese Abbildung epistemischer Unsicherheiten muss notwendigerweise unvollständig bleiben, da es unzählige theoretische Möglichkeiten zur Extrapolation gibt und immer nur ein Teil der möglichen Extrapolationsmethoden auch wirklich ausgewählt und durchgeführt werden kann.

Die Kombination der Einzelergebnisse mittels eines logischen Baums erfolgte gleichgewichtet unter der Annahme, dass dies die einzig mögliche Wahl ist, sofern keine weiteren Informationen zur Zuverlässigkeit der verwendeten Extrapolationsmethoden vorliegen. Weitere Informationen könnten zum Beispiel Informationen zum mittleren quadratischen Fehler der Einzel-Fits sein, allerdings sind auch die Methoden zur Ermittlung dieses mittleren quadratischen Fehlers wieder mit Unsicherheiten verknüpft, denn für diese müssen Annahmen über die empirischen Überschreitenswahrscheinlichkeiten der beobachteten Werte getroffen werden, die wiederum zu Unsicherheiten führen und diese Metrik unpräzise machen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sowohl aleatorische als auch epistemische Unsicherheitsbandbreiten (teilweise) durch die durchgeführten Untersuchungen abgebildet werden können. Dies kann der informierten Festlegung von Bemessungsereignissen dienen, aber ebenso für die Zwecke einer probabilistischen Sicherheitsanalyse verwendet werden.

Für die untersuchten Wetterstationen Cuxhaven und Bad Marienberg ist zu beobachten, dass die Unsicherheiten des Median- bzw. Mittelwertes hauptsächlich durch die Wahl der Extrapolationsmethode und damit durch epistemische Unsicherheiten bestimmt sind. Höhere Fraktile wie das 95 % oder das 99 %-Fraktile unterscheiden sich zwischen den einzelnen Methoden jedoch nicht wesentlich für beide Wetterstationen, so dass hier epistemische Unsicherheiten nicht die Hauptrolle spielen.

4 Tornados

Tornados sind kleinräumige Luftwirbel in der Erdatmosphäre mit annähernd senkrechter Drehachse. Der Wirbel erstreckt sich dabei durchgehend vom Boden bis zur Wolkenuntergrenze. Tornados treten immer im Zusammenhang mit konvektiven Phänomenen (meist Gewitterzellen) auf, auch wenn es im Detail unterschiedliche Bildungsmechanismen für Tornados gibt, je nachdem ob es aufgrund vertikaler oder zerfallender horizontaler Windscherung zur Ausbildung der senkrechten Wirbel kommt. Das Zentrum des Tornados ist durch starke Aufwinde, die in konvektiver Bewölkung entstanden sind, geprägt. Diese Aufwinde führen dazu, dass bodennah Luft in den Wirbel gesaugt wird und verursacht so die starken Bodenwinde.

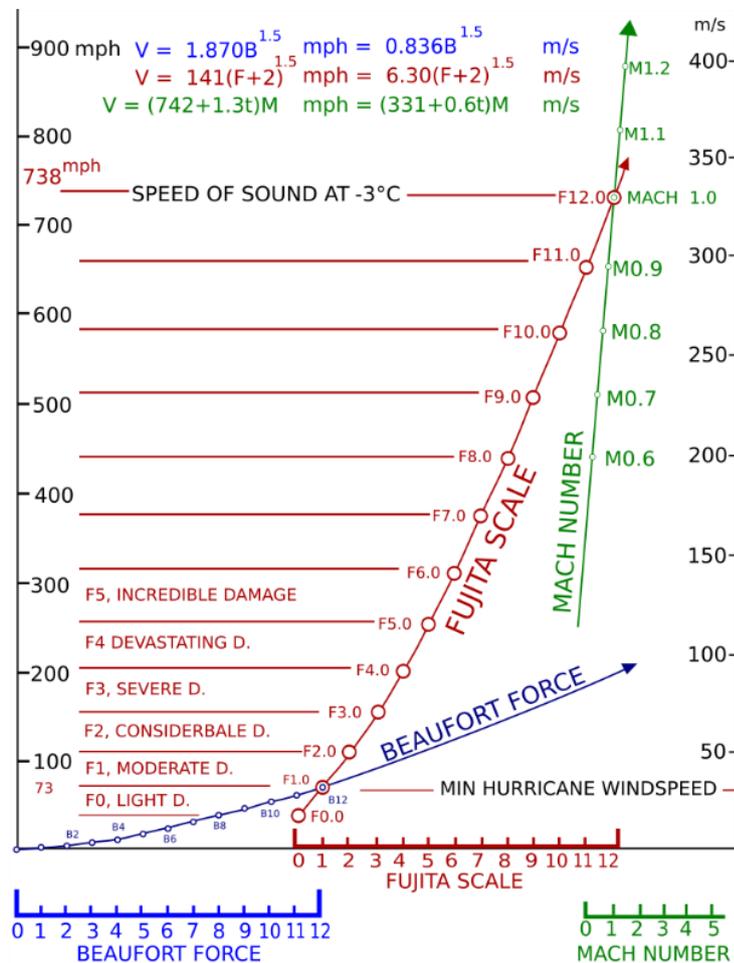


Abb. 4.1 Fujita-Skala zur Klassifizierung von Tornados nach /FUJ 71/

Die Fujita-Skala interpoliert zwischen der Beaufort-Skala und der Schallgeschwindigkeit.

Die Fujita-Skala /FUJ 71/ zur Klassifizierung von Tornados schließt die Lücke zwischen der Windstärke 12 nach der Beaufort-Skala für lineare Stürme und der Schallgeschwindigkeit in Luft mit wiederum zwölf Stufen F1 – F12 (vgl. Abb. 4.1). Unterhalb der Stufe F1 wurde eine zusätzliche Stufe F0 eingeführt, um auch schwache Tornados mit Windgeschwindigkeiten, die noch im Bereich der Beaufort-Skala liegen, konsistent beschreiben zu können. Die Stufen der Fujita-Skala sind primär – ähnlich wie die makroseismische Intensität für Erdbeben – über typische Schadensbilder definiert, denen sich jedoch Windgeschwindigkeitsbereiche zuordnen lassen.

Da sich auf Basis neuerer Untersuchungen eine veränderte Zuordnung von Schadensbildern zu Windgeschwindigkeiten ergeben hat, wurde die ursprüngliche Fujita-Skala zur Enhanced-Fujita-Skala /WIN 06/ weiterentwickelt. Die Enhanced-Fujita-Skala beinhaltet insbesondere detailliertere Vorgaben zur Schadenbeurteilung und zur Zuordnung entsprechender Windgeschwindigkeiten. Sie unterscheidet sich ansonsten jedoch nicht wesentlich von der ursprünglichen Fujita-Skala. Unter anderem aus Gründen der Konsistenz mit der für die Gefährdungsanalyse verwendeten ESWD-Datenbank wird in diesem Bericht mit der in Europa immer noch vorwiegend genutzten Fujita-Skala gearbeitet.

Für die praktische Einstufung von Tornados spielen nur die Stufen F0 bis F5 (und ggf. F6, die allerdings noch nie beobachtet wurden) eine Rolle, da Tornados mit höheren Windgeschwindigkeiten bisher nicht dokumentiert sind. Die obere Grenze der Windgeschwindigkeiten in Bodennähe liegt für starke Tornados bei ca. 320 bis 560 km/h /FEM 09/.

4.1 Tornadogefährdung

Für die generische Ermittlung der Tornado-Standortgefährdung in Deutschland wurden die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt:

- Datenbeschaffung,
- Datenaufbereitung,
- Ableitung der Überschreitenswahrscheinlichkeit verschiedener Tornadowindstärken mit den folgenden Teilschritten:
 - Ermittlung der Häufigkeiten von Tornados in Deutschland (Anzahl pro Jahr),

- Ermittlung von relativen Häufigkeiten der einzelnen Tornadokategorien (F0 bis F5),
- Ermittlung der von Tornados unterschiedlicher Kategorien im Mittel betroffenen Flächen,
- Simulation zu Windgeschwindigkeitsprofilen über die Pfadflächen der unterschiedlichen Tornadokategorien.

4.1.1 Datenbeschaffung

Daten zu Tornadoereignissen in Deutschland und den angrenzenden Regionen wurden vom European Severe Storms Laboratory (ESSL) bereitgestellt. Dort liegen solche Daten als Teil der European Severe Weather Database (ESWD) vor. Die Einbeziehung des grenznahen Auslands war wünschenswert, um die Datenbasis für die statistische Auswertung zu verbessern. Insgesamt wurden so 3.115 Einträge zu aufgetretenen Tornados bis ins Jahr 2021 erhalten.

4.1.2 Datenaufbereitung

Die vom ESSL bereitgestellten Daten wurden auf Konsistenz und Verwendbarkeit für die geplanten statistischen Auswertungen überprüft. Sofern erforderlich, wurden aus den in den Datensätzen enthaltenen Textbeschreibungen weitere Informationen zu Tornadostärke, Pfadlänge oder Pfadbreite extrahiert. Datensätze mit widersprüchlichen Angaben wurden von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen. Außerdem wurde eine Sichtung der Daten hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Tornados durchgeführt

4.1.3 Überschreitenswahrscheinlichkeiten für Tornados unterschiedlicher Stärke

Auf Basis der entsprechend aufbereiteten ESWD-Daten wurden die Überschreitenswahrscheinlichkeiten für Tornados unterschiedlicher Stärke (unterteilt nach Stufen auf der Fujita-Skala) ermittelt.

Im Zeitraum 2001 bis 2020 sind in Deutschland mindestens 990 Tornadoereignisse aufgetreten, von denen 540 nicht nach Tornadokategorie kategorisiert wurden. Unter der Annahme, dass stärkere Tornados (F2 bis F5) allein auf Grund der aufgetreten Schäden

sicher klassifiziert werden, wurden diese Tornados den Kategorien F0 und F1 zugerechnet. Es wurden verschiedene Varianten (2/3 zu 1/3 und 4/5 zu 1/5) der Zuteilung dieser nicht-kategorisierten Tornados zu den Kategorien untersucht.

Festzustellen ist zudem, dass in den Jahren 2001 bis 2020 keine Tornados der Stärken F4 bzw. F5 gemeldet wurden. Für den Zeitraum ab 1891 wurden jedoch neun F4-Tornados (der letzte 1979 in Brandenburg) und für den Zeitraum ab 1764 zwei F5-Tornados in der Datenbank eingetragen. Es liegt daher nahe, die Betrachtungen auf diesen Zeitraum zu verlängern.

Im Zeitraum 1997 bis 2020 wurden im Mittel 46,75 (Unsicherheiten: 34 bis 59) Tornados je Jahr gemeldet. Unter der Annahme, dass sich die Anzahl der Tornados im Mittel immer so verhält, kann auf die Gesamtzahl der im Zeitraum 1764 bis 2020 wahrscheinlich aufgetretenen Tornados geschlossen werden (12.015, Unsicherheiten: 8.838 bis 15.163). In diesem Zeitraum sind zwei F5-Tornados aufgetreten und es wären auf Grund der obigen Überlegungen (F4-Tornados seit 1891: 9) 18 F4-Tornados zu erwarten gewesen. Die Häufigkeiten der Tornadokategorien F0 bis F3 ergeben sich aus den beobachteten (F2 und F3) bzw. angenommenen Häufigkeiten (F0 und F1) im Zeitraum 2001 bis 2020. Die sich daraus ergebenden relativen Eintrittswahrscheinlichkeiten von Tornados der Kategorien F0 bis F5 sind in Tab. 4.1 dargestellt

Tab. 4.1 Anzahl (N) und relative Häufigkeit (rH) von Tornados im Zeitraum 1764 bis 2020 unter der Annahme unveränderlicher Eintrittswahrscheinlichkeit
(2:1) bzw. (4:1) markiert die unterschiedlichen Annahmen zur Aufteilung von nicht-kategorisierten Tornados auf die Kategorien F0 und F1.

Gesamtzahl 12.015	Tornadokategorie					
	F0	F1	F2	F3	F4	F5
N (2:1)	6010	4737	1066	182	18	2
N (4:1)	6882	3865	1066	182	18	2
rH (2:1)	5,002E-01	3,943E-01	8,872E-02	1,515E-02	1,498E-03	1,665E-04
rH (4:1)	5,728E-01	3,217E-01	8,872E-02	1,515E-02	1,498E-03	1,665E-04

4.1.4 Von Tornados unterschiedlicher Stärke im Mittel betroffene Flächen

Um die Größe der von einem Tornado gegebener maximaler Stärke im Mittel betroffenen Fläche zu ermitteln, wurden – soweit vorhanden – die Informationen zu Pfadlängen und -breiten ausgewertet. Das Ergebnis der Auswertung wurde anschließend mit Literaturdaten, die für andere Regionen gewonnen wurden, verglichen.

Die Auswertung der Informationen zur Pfadlänge musste teilweise händisch erfolgen, da die Datensätze hierzu teilweise unterschiedliche Angaben enthielten und die benötigte Information für einzelne Ereignisse in einigen Fällen nur aus der Textbeschreibung abgeleitet werden konnten.

Relevante Daten zur Ermittlung der Pfadflächen sind insbesondere die mittlere Pfadbreite, die maximale Pfadbreite und die Pfadlänge. Leider enthalten nicht alle Tornadoeinträge diese Angaben und teilweise gibt es zwar Angaben zur Pfadlänge aber nicht zur Pfadbreite oder umgekehrt. Ausgehend von den lückenhaften Daten und um keine angegebene Werte unberücksichtigt zu lassen, wurden verschiedene Abschätzungsmethoden für die Tornadoflächen je Tornadokategorie gewählt, die im Folgenden näher beschrieben werden:

- Abschätzung der maximalen Fläche (F_{\max})
Für Tornados, bei denen Angaben zu maximalen Pfadbreiten und Pfadlängen vorlagen, wurde daraus jeweils die maximalen Pfadflächen abgeschätzt und statistisch ausgewertet.
- Abschätzung der Fläche aus Mittelwerten (F_{Mw})
Für Tornados, bei denen Angaben zur mittleren Pfadbreite vorlagen, wurden diese statistisch ausgewertet. Ebenso wurden für Tornados, bei denen Angaben zur Pfadlänge vorlagen, statistisch ausgewertet. Die mittleren Flächen ergaben sich dann aus Multiplikation beider Mittelwerte.
- Abschätzung der mittleren Fläche (F_m)
Für Tornados, bei denen sowohl Angaben zur mittleren Breite als auch zur Pfadlänge vorlagen, wurden daraus jeweils Flächen berechnet und diese Flächen statistisch ausgewertet.

Als Vergleich wurden Literaturwerte zu mittleren Pfadbreiten bzw. Pfadlängen /BRO 04/, die am besten vergleichbar mit der Abschätzung aus Mittelwerten sind, herangezogen.

Für die Tornadokategorien F0 bis F3 ließen sich so alle Werte abschätzen, für die Tornadokategorie F4 ließ sich so nur die maximale Fläche (F_{\max}) abschätzen und für F5-Tornados war auf Grund fehlender Angaben keine der Varianten erfolgreich. Die Errechnung der je Tornado betroffenen Fläche in jeder Tornadokategorie aus Literaturwerten (/BRO 04/) ließ sich für alle Tornadokategorien durchführen (vgl. Tab. 4.2).

Tab. 4.2 Vergleich der ermittelten mittleren betroffenen Flächen je Tornadokategorien nach den verschiedenen im Text beschriebenen Verfahren

Als Referenz sind auch Literaturwerte nach /BRO 04/ angegeben.

Flächen in km ²	Tornadokategorie					
	F0	F1	F2	F3	F4	F5
F_{\max}	0,4164	1,9536	3,6617	15,5675	10,228	–
F_{Mw}	0,247	0,8129	1,5309	8,5016	–	–
F_m	0,1805	0,9464	2,7158	17,9011	–	–
Literatur	0,0398	0,3008	1,3471	5,931	20,0865	30,3303

4.1.5 Betroffene Fläche je Jahr und Tornadokategorie

Aus der Anzahl der pro Jahr im Mittel auftretenden Tornados (46,75 [34,59], den relativen Häufigkeiten je Tornadokategorie (vgl. Tab. 4.1) und den Flächen je Tornadokategorie lassen sich die durch eine bestimmte Tornadokategorie im Mittel je Jahr betroffenen Flächen ableiten.

Da die Literaturwerte als einzige Werte eine Flächenbestimmung für F5-Tornados zulassen und auch für F4-Tornados sicherlich zuverlässiger sind als die ermittelten Werte aus dem Rohdatensatz werden diese Daten in der weiteren Auswertung herangezogen.

Tab. 4.3 Im Mittel pro Jahr betroffenen Fläche je Tornadokategorie in km²

Werte in Klammern ergeben sich durch die geänderte Aufteilung der nicht-kategorisierten Tornados im Verhältnis 2:1 bzw. 4:1 (Werte in Klammern) auf die Tornadokategorien F0 bzw. F1.

Flächen in km ²	Tornadokategorie					
	F0	F1	F2	F3	F4	F5
F_{max}	9,7374 (11,1502)	36,0082 (29,38)	15,188	11,0242	0,7163	–
F_{Mw}	5,7767 (6,6149)	14,9839 (12,2256)	1,5309	8,5016	–	–
F_m	4,2209 (4,8334)	17,443 (14,232)	11,2644	12,6768	–	–
Literatur	0,93	5,5442	5,5876	4,2	1,4068	0,2360
2,7*Lit.	2,5104	14,9693	15,0865	11,3402	3,7984	0,6373

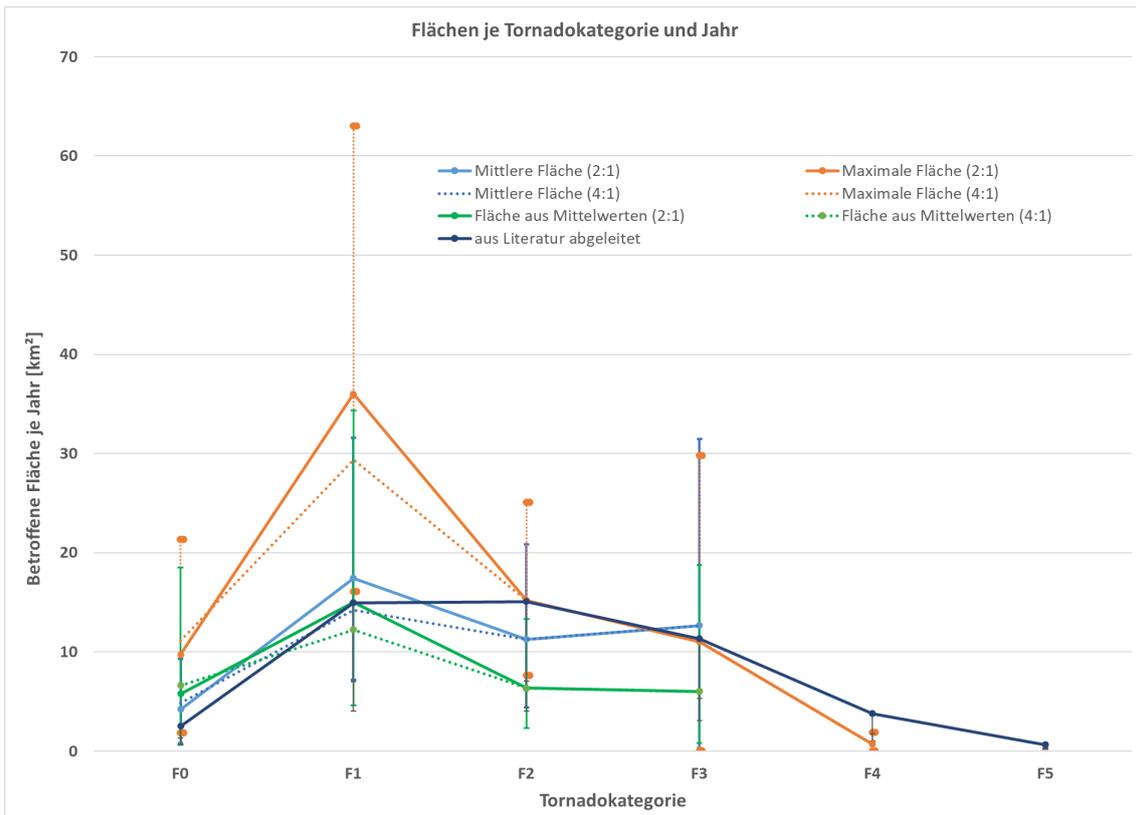


Abb. 4.2 Betroffene Flächen je Jahr in km² für die unterschiedlichen Auswertemethoden (und deren Unsicherheiten) im Vergleich mit den um den Faktor 2,7 erhöhten Literaturwerten

Um zu einer konservativen Abschätzung – vor allem bei Tornados der Kategorien F2 bis F5 – zu gelangen, werden die pro Jahr betroffenen Flächen je Tornadokategorie, die sich aus der Literaturstudie ergeben, mit dem Faktor 2,7 multipliziert. Der Faktor 2,7 ergibt sich aus dem Vergleich der Werte für F1-Tornados aus der Literatur mit dem Wert F_{Mw} der sich aus den Mittelwerten von Pfadlänge und Pfadbreite aus den empirischen Daten ergibt. Diese Umskalierung ergibt, dass die errechneten Werte (vgl. Tab. 4.3 und Abb. 4.2) für die Tornadokategorien F2 bis F5 als abdeckend angesehen werden können. Die Abweichung für die F0-Tornados erscheint hinnehmbar und sicherheitstechnisch nicht relevant.

4.1.6 Regionale Variabilität der Tornadohäufigkeiten

Eine grobe Halbierung des ausgewerteten Gebiets, einschließlich der Nachbarländer, deren Daten vorhanden waren, führte zu dem Ergebnis, dass in der norddeutschen Tiefebene Tornados etwa doppelt so häufig auftreten wie im Mittelgebirgsraum. Die geringe Anzahl von beobachteten starken Tornados lässt hier aber keine belastbaren Schlüsse zu, ob sich diese Variabilität auch auf diese starken Tornados anwenden lässt. Untersuchungen in den USA deuten darauf hin, dass auch in bergigem Gelände Tornados aller Kategorien auftreten können. Die folgenden Untersuchungen gehen auf die regionale Variabilität nicht weiter ein.

4.1.7 Vortex-Struktur von Tornados

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei Tornados um kleinräumige Luftwirbel handelt, deren höchste Rotationsgeschwindigkeit in der meist klar optisch abgrenzbaren Wirbelwand auftreten und von dort radial nach außen abnehmen, ist die Verteilung der Windgeschwindigkeiten über die Pfadfläche des auftretenden Tornados von Bedeutung.

In den bisherigen Betrachtungen wurde die gesamte Pfadfläche eines Tornados einer gegebenen Tornadokategorie eben dieser Kategorie und damit den höchsten Windgeschwindigkeiten im jeweiligen Tornado zugeordnet. Dies überschätzt bei starken Tornados deutlich die Fläche, auf der diese höchsten Windgeschwindigkeiten auftraten. Andererseits führt es bei der Betrachtung der Gesamtfläche, die von Tornadowindgeschwindigkeiten niedrigerer Kategorien betroffen werden, (möglicherweise) zu einer Unterschätzung der betroffenen Gesamtfläche. Betrachtet man beispielsweise einen F2-Tornado, so ist die gesamte Pfadfläche die Summe aus Flächen die F2-, F1- oder F0-

Windgeschwindigkeiten ausgesetzt waren, d. h. manche Teile des Tornadopfades (vornehmlich in den Randbereichen) waren nie von den höchsten aufgetretenen Windgeschwindigkeiten innerhalb der Pfadfläche betroffen, sondern nur von geringeren Windgeschwindigkeiten im Bereich von F1- oder F0-Windgeschwindigkeiten. Deswegen muss eine Betrachtung der von Tornadowindgeschwindigkeiten unterschiedlicher Tornadokategorien betroffenen Flächen auch eine Analyse des Windfeldes über die Tornadofläche enthalten, um zu belastbaren Aussagen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeiten des Auftretens bestimmter tornadobedingter Windgeschwindigkeiten zu kommen (vgl. Abb. 4.3).

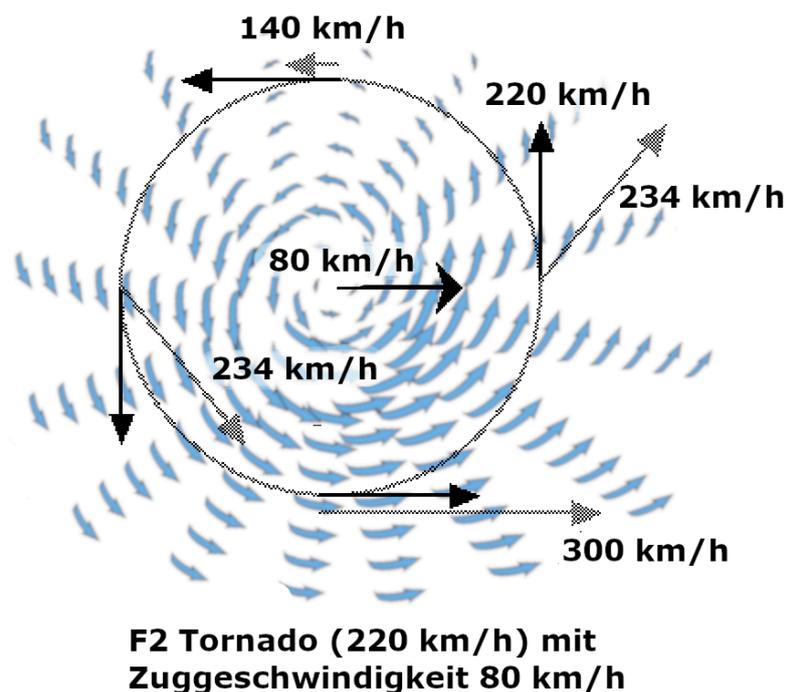


Abb. 4.3 Windfeld innerhalb eines Tornados nach /FEM 09/ und /NWS 03/

Die in radialer Richtung variierende Windgeschwindigkeit aufgrund der Rotation addiert sich mit der Zuggeschwindigkeit des Tornados.

Bei einer solchen Analyse ist allerdings zu beachten, dass die auftretenden Windgeschwindigkeiten innerhalb eines Tornadopfades sich selbst in den einfachsten Modellen aus mindestens zwei Komponenten zusammensetzen: (i) der horizontalen Rotationswindgeschwindigkeit des Wirbels (und deren räumlicher Verteilung) und (ii) der Translationswindgeschwindigkeit des Wirbels, die durch die Zuggeschwindigkeit des auslösenden Unwetters über das Land bestimmt ist. Diese Zuggeschwindigkeit darf nicht verwechselt werden mit einem bodennahen, horizontalen und gleichförmigen Windfeld.

In den folgenden Abschnitten werden die Grundlagen sowie Annahmen der erfolgten Simulationen zu den Windgeschwindigkeitsverteilungen über die Tornadopfadflächen erläutert.

4.1.8 Wirbelmodell

Ein vielfach verwendetes Modell zur Simulation der Tornadowirbelstruktur ist der Rankine-Vortex. Dieses Modell macht Aussagen über die radiale Windgeschwindigkeitsverteilung innerhalb des Tornadowirbels – sowohl innerhalb als auch außerhalb der Wirbelwand:

$$v_{rot}(r) = \begin{cases} \left(\frac{r}{R_{max}}\right)^\varphi & ; r \leq R_{max} \\ \left(\frac{R_{max}}{r}\right)^\varphi & ; r > R_{max} \end{cases} \quad (4.1)$$

Dabei ist $v_{rot}(r)$ die in der Entfernung r vom Wirbelzentrum auftretende normierte (dimensionslose) Wirbelgeschwindigkeit, R_{max} der Radius des Wirbels vom Zentrum bis zur Wirbelwand und φ ein Exponent zwischen 0,4 und 1.

Der Exponent φ ist theoretisch 1 (abgeleitet aus dem Impulserhaltungssatz), für viele Tornados wurde jedoch festgestellt, dass die auf Grund des Schadensbilds abgeleiteten Windgeschwindigkeitsbereiche besser mit Exponenten kleiner 1 übereinstimmen. Die in Tornados angenommenen Werte des Exponenten liegen eher im Bereich 0,5 bis 0,7 /KUL 14/.

4.1.9 Pfadlänge und -breite

Pfadlängen und -breiten sind erforderlich, um simulierte Pfadflächen mit realen Pfadflächen vergleichen zu können. Dennoch müssen hier auf Grund der spärlichen Datenlage Annahmen getroffen werden. Dies betrifft sowohl die Variabilität der Pfadbite als auch der maximalen Tornadointensität über die Pfadlänge. Reale Tornados haben keine konstante Pfadbite und auch die maximale Tornadointensität variiert oft über die Pfadlänge. In den folgenden Untersuchungen wurde jedoch vereinfachend sowohl eine konstante Pfadbite als auch eine konstante maximale Tornadointensität angenommen.

Die Annahme einer konstanten Pfadbreite sollte auf Grund der Skaleninvarianz des Rankine-Vortex eine nur untergeordnete Rolle für das Simulationsergebnis spielen. Die Annahme konstanter maximaler Tornadointensität über die Pfadlänge führt zu einem konservativen Überschätzen der tatsächlich von den höchsten Windgeschwindigkeiten betroffenen Bereiche innerhalb der einzelnen Pfade.

Für die Monte Carlo-Simulation wurden jeweils 400 zufällige Werte für Pfadlängen und Pfadbreiten für die unterschiedlichen Tornadokategorien F0 bis F5 gezogen. Die Zufallsauswahl erfolgte dabei mittels Weibullverteilungen (Formel 4.2) aus den von Brooks /BRO 04/ ermittelten statistischen Parametern α und β für die unterschiedlichen Tornadokategorien (siehe Tab. 4.4). Dies wurde als zuverlässiger eingeschätzt, als dies auf Grund der spärlich vorhandenen Daten zu Pfadlängen und -breiten innerhalb Deutschlands selbst abzuleiten. Die Tornados zu Grunde liegenden atmosphärischen Prozesse unterscheiden sich nicht und Einflüsse der lokalen Topografie scheinen eher eine untergeordnete Rolle zu spielen.

$$F(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (4.2)$$

Tab. 4.4 Parameter für die Weibullverteilungen für die Pfadlängen (in km) bzw. Pfadbreiten (in m) gemäß /BRO 04/

Tornado-kategorie	Pfadlängen [km]		Pfadbreiten [m]	
	α	β	α	β
F0	0,65	0,9	0,94	27,2
F1	0,62	3,1	0,85	57,7
F2	0,64	7,5	0,79	107,4
F3	0,83	20,4	0,84	240,2
F4	1,01	43,9	1,00	461,2
F5	1,2	57,7	1,71	620,5

4.1.10 Zuggeschwindigkeit des Tornados

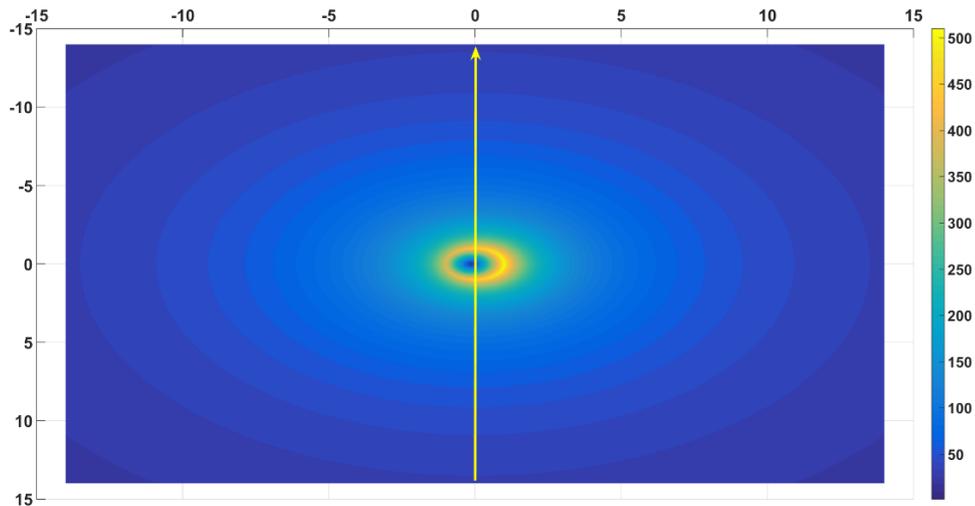


Abb. 4.4 Symbolische Darstellung der absoluten Windgeschwindigkeiten in einem Tornadowirbel überlagert mit der Zuggeschwindigkeit des Tornados

Der gelbe Pfeil zeigt die Richtung der Translation an. Die erwartete Asymmetrie auf Grund der Zuggeschwindigkeit ist insbesondere im Zentralbereich zu erkennen.

Die Zuggeschwindigkeit des Tornados spielt für die Ergebnisse der Tornadosimulationen insofern eine Rolle, als dass es bei positiver (negativer) Überlagerung der Rotation mit der Translation zu einer Zu- (Ab-)nahme der absoluten Windgeschwindigkeiten kommt, je nachdem auf welcher Seite der Zugachse des Tornados ausgewertet wird (vgl. Abb. 4.4) und es somit zu einer Asymmetrie bezüglich der Zugachse kommt.

Zudem muss weiter beachtet werden, dass – wie oben bereits erwähnt – die Translationsgeschwindigkeit des Tornadowirbels nicht mit einem real auftretenden homogenen bodennahen Windfeld verwechselt werden darf. Im Bereich des Wirbelkerns überlagert sich diese Translationsgeschwindigkeit 1:1 mit dem Windfeld, außerhalb des Wirbelkerns wird der Einfluss nach und nach abnehmen. Dieser Tatsache wurde Rechnung getragen, indem außerhalb des Wirbelkerns eine radiale Abnahme des Einflusses angenommen wurde. Da es hierzu nach Kenntnis der GRS kein allgemein akzeptiertes Modell gibt, wurde mit zwei unterschiedlichen Varianten gerechnet: eine außerhalb des Wirbelkerns radial nach außen verlaufende lineare Abnahme und eine radial nach außen verlaufende exponentielle Abnahme des Einflusses der Zuggeschwindigkeit.

Die Zuggeschwindigkeiten von Unwetterfronten liegen in der Regel in Mitteleuropa etwa im Bereich von 0 bis 100 km/h. Um diese Variabilität abbilden zu können, wurden zudem Doppel-Dreiecksverteilungen der Zuggeschwindigkeiten angenommen. Um die Unkenntnis über die wahrscheinlichste Zuggeschwindigkeit abbilden zu können, wurden außerdem vier verschiedene dieser Doppel-Dreiecksverteilungen untersucht, die ihre maximalen Werte an den Punkten 20, 40, 60 und 80 km/h annehmen.

Konservativ wurde zudem angenommen, dass die höchste simulierte Gesamtgeschwindigkeit in einem Tornadowirbel immer der Obergrenze der Tornadokategorie entspricht. Für einen F5-Tornado wird beispielsweise angenommen, dass die Summe aus Zuggeschwindigkeit und Rotationsgeschwindigkeit am Punkt der höchsten Windgeschwindigkeit exakt der Obergrenze dieser Tornadokategorie von 512 km/h entspricht. Dies vergrößert die Flächen hoher Windgeschwindigkeiten in den durchgeführten Simulationen.

4.1.11 Monte-Carlo-Simulation

Insgesamt wurden $2 \times 2 \times 4 \times 5 \times 400 = 16.000$ Simulationen durchgeführt. Diese ergaben sich aus zwei verschiedenen betrachteten Exponenten ($\varphi = 0,7$ bzw. 1) des Rankine-Vortex, zwei verschiedenen betrachteten radialen Abnahmen des Zuggeschwindigkeitsprofils, vier verschiedenen Zuggeschwindigkeitsverteilungen, fünf verschiedenen Tornadokategorien F1 bis F5 (der Flächenanteil von F0-Windgeschwindigkeiten in F0-Tornados ist definitionsgemäß immer 1) und schließlich jeweils 400 zufällig ausgewählte Kombinationen von Pfadlängen und -breiten.

4.1.12 Ergebnisse der Monte Carlo-Simulation

Generell sind die Schwankungsbreiten (Standardabweichung der Mittelwerte) der einzelnen Simulationen (jeweils 400) klein gegenüber den ermittelten Werten; typischerweise sind diese deutlich kleiner als 1% der ermittelten Flächenanteile. Die Schwankungen der Ergebnisse zwischen den unterschiedlichen Zuggeschwindigkeitsannahmen und zwischen den unterschiedlichen Zuggeschwindigkeitseinflussbereichen (lineare bzw. exponentielle Abnahme) sind eher klein; die Schwankungen zwischen den einzelnen Rankine-Vortices-Varianten ($= 0,7$ bzw. 1) sind eher groß. Der Exponent $\varphi = 1$ führt zu einer stärkeren Gewichtung der Flächenanteile der relativ stärkeren Winde im Tornadokernbereich, während der Exponent $\varphi = 0,7$ eher die Flächenanteile der relativ

schwächeren Winde im Tornado betont, weil die Randbereiche stärker gewichtet werden. Da der Exponent $\varphi = 0,7$ besser geeignet erscheint, real aufgetretene Tornados zu beschreiben, wird im Folgenden nur darauf Bezug genommen.

Tab. 4.5 Maximale Flächenanteile der Windstärken der Tornadokategorien F0 bis F5 in Tornados der Kategorien F0 bis F5

Flächen- anteile	F0 max	F1 max	F2 max	F3 max	F4 max	F5 max
F0	1	0	0	0	0	0
F1	0,5882	0,4448	0	0	0	0
F2	0,6061	0,2012	0,2273	0	0	0
F3	0,6050	0,1818	0,0873	0,1360	0	0
F4	0,6025	0,1849	0,0835	0,0443	0,0921	0
F5	0,5219	0,2340	0,1057	0,0544	0,0324	0,0830

Im Sinne einer konservativen Abschätzung werden nur die maximalen simulierten Flächenanteile der Tornadokategorien verwendet. Dies hat zur Folge, dass die Summe der Flächenanteile innerhalb einer Tornadokategorie größer als eins ist, die Gesamtsumme somit größer wird und damit konservativ ist.

4.1.13 Eintrittswahrscheinlichkeiten von Windgeschwindigkeitskategorien

Aus den in Abschnitt 4.1.12 ermittelten konservativen Pfadflächenanteilen und den in Abschnitt 4.1.5 ermittelten betroffenen Flächen je Jahr und Tornadokategorie lassen sich zusammen mit der Gesamtfläche Deutschlands ($\approx 357.000 \text{ km}^2$) die Eintrittswahrscheinlichkeiten für Tornadowindstärken der Kategorien F0 bis F5 ableiten.

Im Ergebnis (vgl. Tab. 4.6) ist festzuhalten, dass unter Betrachtung auch der ermittelten Unsicherheiten Windgeschwindigkeiten der Kategorien F0 und vielleicht auch F1 (vor allem in der norddeutschen Tiefebene) noch im Auslegungsbereich (meteorologische Einwirkungen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von etwa 10^{-4} pro Jahr) liegen könnten, Windgeschwindigkeiten der Klassen F2 bis F5 sind jedoch sicher dem auslegungsüberschreitenden Bereich (deutlich seltener als 10^{-4} pro Jahr) zuzuordnen.

Da sich die Argumentation in /RSK 13/ für den von anderen naturbedingten Einwirkungen abweichenden Ansatz einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} (statt 10^{-5}) pro Jahr für wetterbedingte Einwirkungen auf die vorhandene Vorwarnzeit stützt, ist zu diskutieren, inwieweit diese Annahme für Tornados gerechtfertigt ist: Auch wenn sich die für die Entstehung von Tornados notwendigen Wetterlagen vorhersagen lassen, erscheint es nicht realistisch, dass jedes Mal administrative oder organisatorische Maßnahmen ergriffen werden, da nicht notwendigerweise auch wirklich Tornados entstehen. Insofern ist eine Vorhersagbarkeit nur bedingt gegeben. Andererseits ist sie aber auch nicht erforderlich, da die deutschen Kernkraftwerke gegen die Notstandsfälle Explosionsdruckwelle und Flugzeugabsturz geschützt sind. Durch diesen Schutz wird die in /RSK 13/ formulierte Zielsetzung, dass „frühzeitig Maßnahmen auf der Sicherheitsebene 4 eingeleitet werden können oder das Schadenspotenzial eingegrenzt ist“ erfüllt, da die entsprechenden Schutzmaßnahmen sogar permanent vorhanden sind.

Tab. 4.6 Betroffene Flächen und Eintrittswahrscheinlichkeiten je Jahr von Windgeschwindigkeiten der Kategorien F0 bis F5

Kategorien	F0	F1	F2	F3	F4	F5
Windgeschwindigkeiten	63 – 117 km/h	118 – 180 km/h	181 – 253 km/h	254 – 332 km/h	333 – 418 km/h	419 – 512 km/h
Fläche je Jahr [km²]	29,94	12,61	4,80	1,75	0,37	0,05
Wahrscheinlichkeit [1/a]	8,39E-05	3,53E-05	1,35E-05	4,89E-06	1,04E-06	1,48E-07

4.2 Mögliche sicherheitstechnische Auswirkungen von Tornados

Um mögliche sicherheitstechnische Auswirkungen starker Tornados systematisch identifizieren zu können, wurden die plausibel erscheinenden Schadensszenarien in die folgenden vier Kategorien untergliedert:

- Schäden aufgrund hoher Windgeschwindigkeiten,
- Effekte aufgrund des Unterdrucks im Zentrum des Tornados,
- Sogeffekt durch die aufwärtsgerichtete Luftströmung und
- Auswirkungen auf weit auseinanderliegende Anlagenbereiche.

Diese Aufteilung ist zwar hilfreich, um keine Effekte zu übersehen, sie ist jedoch nicht immer eindeutig, da einzelne Auswirkungen u. U. auf die Kombination mehrerer Effekte zurückzuführen sind. Auf solche kombinierten Auswirkungen wird an den entsprechenden Stellen dann jeweils hingewiesen.

Im Anschluss an die Diskussion der unterschiedlichen Auswirkungen starker Tornados werden die plausiblen Schadensszenarien hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung bewertet.

4.2.1 Schäden aufgrund hoher Windgeschwindigkeiten

Die Tatsache, dass man es bei einem Tornado mit einem rotierenden Windfeld zu tun hat, führt auch dazu, dass Objekte (Gebäude oder technische Einrichtungen) im Laufe des Ereignisses aus unterschiedlichen Richtungen getroffen werden – dies gilt sowohl für die Windlast selbst als auch für etwaige windgetragene Trümmer. Inwieweit dieser Effekt von Bedeutung ist, hängt einerseits von der Ausdehnung des Tornados und seiner Zugbahn relativ zu dem betrachteten Objekt und andererseits von der Größe des Objekts selbst ab¹⁵.

Neben der Windgeschwindigkeit und -richtung spielt auch die Zugbahn des Tornados, bevor er die zu betrachtende Anlage trifft, eine Rolle: Zog der Tornado vorher über freie Fläche, z. B. Agrarland, ist die Trümmerlast eher gering, während die Windgeschwindigkeiten aufgrund der geringeren Bodenreibung eher höher sind. Umgekehrt verhält es sich bei einem Tornado, der zuvor über bebautes Gebiet zog. Hier ist von mehr windgetragenen Trümmern auszugehen, dafür ist die Windgeschwindigkeit aufgrund der Wechselwirkung mit den Hindernissen etwas reduziert /NWS 03/.

Da Winddruck und windgetragene Trümmer unterschiedliche Schadenswirkungen haben, werden sie im Folgenden separat behandelt.

Der direkte Winddruck (im Unterschied zur Sogwirkung durch den Bernoulli-Effekt senkrecht zur Windrichtung) führt bei Anlagenteilen und baulichen Anlagen zu ähnlichen Las-

¹⁵ Auf große Gebäude wirkt z. B. der Winddruck eines (relativ) kleinen Tornados gleichzeitig aus mehreren Richtungen, während für kleine Objekte am Rande der Zugbahn eines großen Tornados, z. B. einen Transformator auf dem Gelände, der Wind nur aus einer Richtung kommt.

ten wie Erdbebeneinwirkungen. Diese sind durch vorwiegend horizontale Kräfte charakterisiert, die von der Baustruktur dissipiert oder in den Boden abgeleitet werden müssen. Unterschiede bestehen lediglich hinsichtlich des Frequenzspektrums der zeitlich veränderlichen Kraftereinwirkung. Schäden an Anlagenteilen und baulichen Anlagen entstehen insbesondere dann, wenn auf dem Lastpfad vom Einwirkungspunkt zum Boden Bauelemente über den elastischen Bereich hinaus beansprucht werden oder die Anregung von ggf. resonanten Schwingungen zu Ermüdungsversagen führt. Dabei spielt u. U. auch die Richtung, aus der der Wind auf die Struktur einwirkt, eine Rolle. Bei Tornados ist somit wieder die oben angesprochene wechselnde Belastungsrichtung im Laufe des Ereignisses zu berücksichtigen /NWS 03/.

Da Bauwerke primär für den Abtrag des vertikal wirkenden Eigengewichts bemessen werden, können – bei fehlender oder unzureichender Auslegung gegen Wind- und Erdbebeneinwirkungen – bereits bei relativ schwachen Tornados (ggf. bereits ab F1) Schäden entstehen. Das Versagen des schwächsten Glieds im Lastpfad führt dann sukzessive zum Versagen weiterer Baustrukturen /NWS 03/.

Auch wenn spezielle Effekte aufgrund der Sogwirkung durch den Bernoulli-Effekt im Zusammenhang mit den Sogeffekten durch die aufwärtsgerichtete Windströmung in Abschnitt 4.2.3 behandelt werden, sei hier darauf hingewiesen, dass auch diese Kräfte der normalen Auslegung gegen vertikale (nach unten wirkende) Lasten entgegengerichtet sind und daher eine besondere Berücksichtigung erfordern. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der Verbindung von (relativ leichten) Dächern mit den Gebäudewänden /NWS 03/.

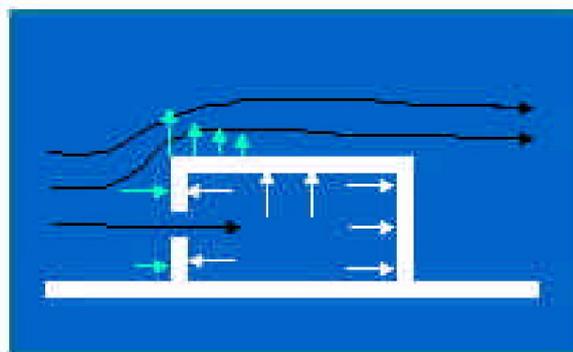


Abb. 4.5 Kräfte auf Baustrukturen durch Windlasten /NWS 03/

Neben der direkten Windlast wirkt auf Wände und Dächer auch der Bernoulli-Effekt und ggf. eine Druckerhöhung im Gebäudeinneren (falls Öffnungen in Windrichtung existieren).

Des Weiteren können von innen zusätzliche Kräfte auf Wände und Dächer wirken, wenn auslegungsgemäß oder aufgrund von Schäden durch windgetragene Trümmer Öffnungen in Windrichtung existieren, die zu einer Erhöhung des Drucks im Gebäudeinneren (Aufblähen) führen. Eine Verringerung des Innendrucks mit entsprechenden Kräften auf die Wände und Dächer ist zu berücksichtigen, wenn sich die Öffnungen (im Laufe des Ereignisses) auf einer nicht dem Wind zugewandten Seite befinden /DOE 17/.

Für Gebäude einer kerntechnischen Anlage, die gegen Einwirkungen von außen aus Explosionsdruckwellen ausgelegt sind, ist auch bei einem Tornado nicht von Schäden durch Windlasten auszugehen. Es erscheint plausibel, dass dies auch für gegen das Bemessungserdbeben ausgelegte Gebäude gilt. Von Bedeutung hinsichtlich möglicher Schäden sind somit nur Gebäude, die nicht gegen solche Einwirkungen ausgelegt sind, oder Anlagenteile, die nicht durch entsprechend ausgelegte Gebäude geschützt sind. Dies sind insbesondere Anlagenteile im Freien wie z. B. die Freiluftschaltanlage, Transformatoren auf dem Anlagengelände und Aufbauten auf Dächern (z. B. Abluftanlagen auf dem Maschinenhaus). Gebäude, die i. A. nicht gegen große horizontale Lasten ausgelegt werden, sind z. B. das Verwaltungsgebäude, die Kühltürme und ggf. auch der Fortluftkamin. Diese Anlagenteile und bauliche Anlagen haben selbst nur eine untergeordnete sicherheitstechnische Bedeutung, Schäden an ihnen können jedoch zu Trümmern führen, die durch den Tornado wieder als „Projektile“ auf andere, ggf. sicherheitstechnisch relevante Systeme oder Bauwerke einwirken können. Bei allen nicht gegen Explosionsdruckwellen ausgelegten Gebäuden ist eine mögliche Verstärkung der Windlasten durch eine Druckänderung im Inneren aufgrund von Lüftungsöffnungen zu berücksichtigen.

Neben dem Winddruck stellen windgetragene Trümmer eine Gefährdung für Anlagenteile und nicht gegen Flugzeugabsturz ausgelegte Gebäude dar. Typische Trümmerteile, die hierbei eine Rolle spielen können, sind Dachpfannen-/schindeln, Teile von Blechverkleidungen, Holzbretter, Rohre und andere Gegenstände mit einem großen Oberflächen-zu-Gewicht-Verhältnis. Tornados der Stärke F4 oder F5 können solche Gegenstände bis in Höhen von mehr als 50 m tragen. Stahlrohre, Pfosten, Balken und Stahlträger mit einem geringeren Verhältnis von Fläche zu Gewicht werden von Tornados ebenfalls mitgerissen. Dies kommt jedoch seltener vor und es werden normalerweise nur Höhen von bis zu 30 m erreicht /DOE 17/.

Selbst Autos können von Tornados über den Boden gerollt werden, wobei auch ein kurzzeitiges Abheben vorkommt. Ab welcher Tornadostärke Autos zu echten fliegenden

Trümmern werden, ist jedoch Gegenstand aktueller Diskussionen. Einzelne Studien deuten darauf hin, dass dies zumindest ab einer Tornadostärke von F4 möglich ist. F3-Tornados können Fahrzeuge kurzzeitig in die Luft schleudern, und F2-Tornados stürzen gelegentlich Fahrzeuge um /NWS 03/.

Die konkrete Art und Menge der windgetragenen Trümmer hängen – wie oben bereits angesprochen – von der Landnutzung auf der zuvor vom Tornado überstrichenen Fläche ab. Dementsprechend stellt die Vermeidung loser Gegenstände auf dem Anlagengelände keinen zuverlässigen Schutz gegen windgetragene Trümmer dar. Hinzu kommen lokal auf dem Anlagengelände erzeugte Trümmer durch Beschädigung nicht ausreichend gegen Tornadowindlasten ausgelegter Anlagenteile und baulicher Anlagen.

Neben der unmittelbaren mechanischen Beschädigung von Anlagenteilen können windgetragene Trümmer auch Öffnungen in Gebäuden schaffen (z. B. durch Zerstörung von Fenstern, Türen oder Dächern sowie von Absperrklappen an Lüftungsanlagen) und so die Schutzwirkung der Gebäudehülle beeinträchtigen. Dies führt in der Folge dann zu erhöhten Lasten auf Wände und Dächer durch die oben beschriebenen Druckeffekte /NWS 03/ (vgl. auch Abb. 4.5).

Durch windgetragene Trümmer können unterschiedliche Einrichtungen eines Kernkraftwerks mechanisch beschädigt werden. Im Folgenden werden einige Beispiele angeführt, die ggf. eine sicherheitstechnische Bedeutung haben können:

- Durch **Beschädigung der Blitzfangeinrichtungen** kann es zu auslegungsgemäß nicht vorgesehenen Blitzeinschlägen bei mit dem Tornado in zeitlichem Zusammenhang stehenden Gewittern kommen. Hieraus können sich wiederum unterschiedlichste Auswirkungen auf elektrische und leittechnische Systeme ergeben.
- Eine **Verformung der Schalldämpfer der Frischdampf- und Speisewasserarmaturenstation** durch Trümmer könnte im ungünstigsten Fall (sehr hoch getragene massive Trümmer bei gleichzeitiger Einwirkung auf mehrere Schalldämpfer) die Frischdampfabgabe an die Atmosphäre beeinträchtigen.
- Eine **Beschädigung von Absperrklappen an den Zu- und Abluftöffnungen der Lüftungsanlagen** kann zu nicht-auslegungsgemäßen Druckschwankungen im Lüftungssystem und damit in Innenräumen führen. In diesem Fall sind Folgeschäden an Anlagenteilen und baulichen Strukturen (z. B. Innenwände) nicht auszuschließen.

- Eine **Beschädigung der Luftansaugung oder des Abgassystems der Notstromdieselgeneratoren** kann in der Folge zu einem Ausfall der Notstromdieselgeneratoren und der von diesen versorgten Einrichtungen führen.
- **Elektrische Einrichtungen auf dem Anlagengelände** können durch windgetragene Trümmer ebenfalls beschädigt werden. Da diese (nicht baulich geschützten) Einrichtungen jedoch i. A. sicherheitstechnisch von untergeordneter Bedeutung sind, sind in diesem Fall auch keine relevanten Auswirkungen zu besorgen.

Sofern größere Mengen (leichterer) Trümmer oder biologischen Materials auf dem Anlagengelände abgelagert werden, ist mit weiteren negativen Auswirkungen zu rechnen:

- Durch die **Verstopfung von Lüftungsöffnungen** kann es zu ähnlichen Auswirkungen kommen, wie sie bereits im Zusammenhang mit der Beschädigung von Absperrklappen an den Zu- und Abluftöffnungen der Lüftungsanlagen und der Luftansaugung oder des Abgassystems der Notstromdieselgeneratoren angesprochen wurden.
- Ein verstärkter Treibgutaustritt kann zu einer **Verstopfung der Kühlwasserzuläufe** und damit zu einem Verlust der Hauptwärmesenke führen.
- Durch die **Beeinträchtigung der Zugänglichkeit von Gebäuden** können erforderliche Personalhandlungen (z. B. eine ggf. erforderliche Brandbekämpfung) behindert werden.

4.2.2 Effekte aufgrund des Unterdrucks im Zentrum des Tornados

Im Zentrum eines Tornados kann ein Unterdruck von mehr als 100 hPa gegenüber dem Umgebungsluftdruck bestehen /LEE 04/, /KAR 10/. Für einzelne Tornados werden sogar Unterdrücke von 170 hPa bis 194 hPa diskutiert /KAR 10/. Hierbei handelt es sich zunächst nur um den atmosphärischen (statischen) Unterdruck. In der Praxis können durch zusätzlich wirkende dynamische Effekte, wie den Bernoulli-Effekt (vgl. Abschnitt 4.2.1) und den Sogeffekt aufgrund der vertikalen Luftströmung (vgl. Abschnitt 4.2.3), lokal auch höhere Werte auftreten.

Hinsichtlich der möglichen Schadenswirkung ist zu beachten, dass der maximale (statische) Unterdruck nicht am gleichen Ort wie die maximale Windgeschwindigkeit wirkt. Während ersterer im Zentrum des Tornados vorliegt, wird letztere typischerweise bei einem Radius von ca. 45 m bis 150 m gemessen. Die atmosphärische Druckdifferenz

beträgt dort nur noch etwa die Hälfte des Wertes im Zentrum. Daher wird im amerikanischen Regelwerk die Kombination des halben maximalen Unterdrucks mit der maximalen Windgeschwindigkeit bzw. des maximalen Unterdrucks mit der halben maximalen Windgeschwindigkeit empfohlen /DOE 16/, /DOE 17/. Außerdem ist zu beachten, dass der Druck sich während des Durchzugs eines Tornados schnell ändert, was ebenfalls zu Schäden (z. B. an Lüftungssystemen) führen kann /DOE 16/.

In einem Kernkraftwerk kann der Unterdruck bzw. der Druckgradient ($\Delta p/\Delta t$) zu einer **Startverzögerung oder einem Startversagen¹⁶ der Notstromdieselaggregate** führen. Dies ist sicherheitstechnisch insofern von Relevanz, da aufgrund von zu erwartenden Schäden im externen Stromnetz und ggf. auch aufgrund der Beschädigung elektrischer Einrichtungen auf dem Anlagengelände mit der Anforderung der Notstromdiesel zu rechnen ist.

Wirkt der Unterdruck auf Lüftungsöffnungen, so kann es bei fehlenden Schutzeinrichtungen zu einer vorübergehenden Umkehrung des Luftstroms im Lüftungssystem kommen. Dies würde kurzfristig die Unterdruckhaltung beeinträchtigen und könnte auch zu einer **Beschädigung von Ventilatoren** führen. Letzteres wiederum hätte ggf. eine längerfristige Nicht-Verfügbarkeit des Lüftungssystems zur Folge.

4.2.3 Sogeffekt durch die aufwärtsgerichtete Luftströmung

Da der durch die Rotation erzeugte Unterdruck in einer gewissen Höhe über dem Boden am größten ist, entsteht im Zentrum des Tornados eine starke aufwärtsgerichtete Luftströmung. Die Beschleunigung durch diesen Aufwind kann die Schwerkraft übersteigen, sodass Gegenstände angehoben werden. Dies führt einerseits zum Eintrag von windgetragenen Trümmern in den Luftwirbel und andererseits zu einem Sogeffekt, der als solcher ebenfalls zu Schäden an Bauwerken (wie oben für den Bernoulli-Effekt, durch den der Sogeffekt zusätzlich verstärkt wird, beschrieben) und anderen Einrichtungen führen kann /NWS 03/.

¹⁶ Zu einem „Startversagen“ könnte es aufgrund zweier Szenarien kommen: (i) Durch den vorübergehenden Sauerstoffmangel verzögert sich das Anlaufen des Notstromdiesels, was – je nach Schaltlogik – zu einer automatischen Abschaltung führen kann. (ii) Durch die Druckdifferenz am Lagergehäuse kann der Notstromdiesel durch den Aggregateschutz (aufgrund der Annahme eines Lagerschadens) abgeschaltet werden, falls dieser Vorrang vor der Anforderung durch den Reaktorschutz hat.

Vereinzelt wurde bei starken Tornados auch ein „Abschälen“ von Bodenbelägen berichtet. Es ist jedoch bisher nicht klar, wie dieses „Abschälen“ erfolgt. Die bodennahe Windgeschwindigkeit dürfte dafür nur in sehr starken Tornados ausreichen. Als unterstützende Effekte werden eine Druckdifferenz zwischen unter dem Bodenbelag eingeschlossener Luft und dem Druck im Tornado, die (horizontale) Einwirkung von windgetragenen Trümmern und Erosion des an den Bodenbelag angrenzenden Bodens diskutiert. Bemerkenswert ist dabei, dass ein solches „Abschälen“ bisher nur bei Asphalt (und ähnlichen Bodenbelägen), nicht jedoch bei Beton beobachtet wurde. Eine genaue Zuordnung des Effekts zu Tornadostärken ist nicht möglich. Während man relativ sicher davon ausgehen kann, dass F4- und F5-Tornados zum „Abschälen“ von Bodenbelägen in der Lage sind, kann dies auch für die Tornadostärken F2 und F3 nicht komplett ausgeschlossen werden /NWS 03/.

An einem Kernkraftwerkstandort kann die Sogwirkung eines Tornados auf unterschiedliche Weise zu sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen führen. Wirkt der Sog auf die freie Oberfläche eines natürlichen oder künstlichen Wasserreservoirs wie z. B. die Kühlturmtasse, einen Kühlwasserzulaufkanal oder den Fluss im Bereich der Kühlwasser- bzw. Nebenkühlwasserentnahme, kann dies zu einer zeitweisen oder dauerhaften Entleerung des Wasserreservoirs bzw. zu einem lokalen und temporären starken Wasserstandabfall führen. Dies kann durch den (vorübergehenden) Wassermangel selbst, Kavitation von Pumpen oder eine automatische Abschaltung aufgrund geringen Wasserstandes/Drucks zum **Ausfall der (Neben-)Kühlwasserversorgung** führen.

Des Weiteren können **Abdeckungen von Kabel- und Rohrleitungskanälen auf dem Anlagengelände an- bzw. abgehoben** werden, sofern sie nicht – z. B. aus Gründen der Anlagensicherung – gegen ein solches Abheben gesichert sind. Hieraus ergeben sich zwar zunächst keine unmittelbaren sicherheitstechnischen Auswirkungen, Regenfälle während oder kurz nach dem Durchzug des Tornados können dann jedoch zu nicht vorgesehenen Überflutungsszenarien führen, da im Allgemeinen von einem wasserdichten Verschluss der Kabel- und Rohrleitungskanäle ausgegangen wird. Ob die entstandenen Öffnungen nach dem Tornado kurzfristig wieder verschlossen werden können, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab: (i) Wie weit wurden die Abdeckungen verfrachtet? (ii) Wurden sie dabei erheblich beschädigt? (iii) Ist Material für eine provisorische Abdeckung vorhanden? (iv) Erlauben die Schäden an der Infrastruktur des Anlagengeländes kurzfristige Maßnahmen?

Da zumindest bei stärkeren Tornados ein Abschälen von Asphaltbelägen auf Verkehrsflächen nicht auszuschließen ist, muss mit einer **Behinderung der Zugänglichkeit der Anlage bzw. einzelner Anlagenbereich/Gebäude** gerechnet werden. Durch die Beeinträchtigung der Zugänglichkeit von Gebäuden können erforderliche Personalhandlungen, z. B. eine ggf. erforderliche Brandbekämpfung, behindert werden (vgl. Abschnitt 4.2.1). Sofern die Verkehrsflächen über Betonbeläge verfügen, ist eine solche Beeinträchtigung durch den Sogeffekt weniger wahrscheinlich.

4.2.4 Auswirkungen auf weit auseinanderliegende Anlagenbereiche

Wie aus Abschnitt 4.1.4 und der einschlägigen Literatur (z. B. /BRO 04/ oder /ELS 14/) ersichtlich, können von einem einzelnen Tornado beträchtliche Flächen gleichzeitig oder in kurzer Folge betroffen sein. Auch wenn keine direkte Beziehung zwischen der Stärke und dem Durchmesser eines Tornados besteht, kann bei stärkeren Tornados von Zugbahnbreiten (bzw. Durchmessern) von mehreren hundert Metern ausgegangen werden. Dabei variiert sowohl der Durchmesser über die Dauer des Ereignisses als auch die Schadenswirkung bei einem gegebenen Radius.

Für die Auswirkung eines Tornados auf größere Flächen ist zudem zu berücksichtigen, dass Tornados von der einfachen Geometrie eines einzelnen Wirbels abweichen können. Insbesondere kommt es vor, dass sich innerhalb des Tornados Subwirbel bilden, die sich um das Zentrum des Hauptwirbels bewegen (vgl. Abb. 4.6). Diese Subwirbel sind in der Regel kurzlebig, d. h. sie umrunden den Hauptwirbel nur selten vollständig, tragen aber u. U. mit bis zu 50 m/s zur lokalen Windgeschwindigkeit bei. Für die Windgeschwindigkeit an einem Ort, der von einem Subwirbel getroffen wird, spielen in einem solchen Szenario vier Geschwindigkeitskomponenten eine Rolle: (i) die Zuggeschwindigkeit des Tornados, (ii) die rotatorische Windgeschwindigkeit des Hauptwirbels, (iii) die Bahngeschwindigkeit des Subwirbels um den Hauptwirbel und (iv) die rotatorische Geschwindigkeit des Subwirbels /NWS 03/.

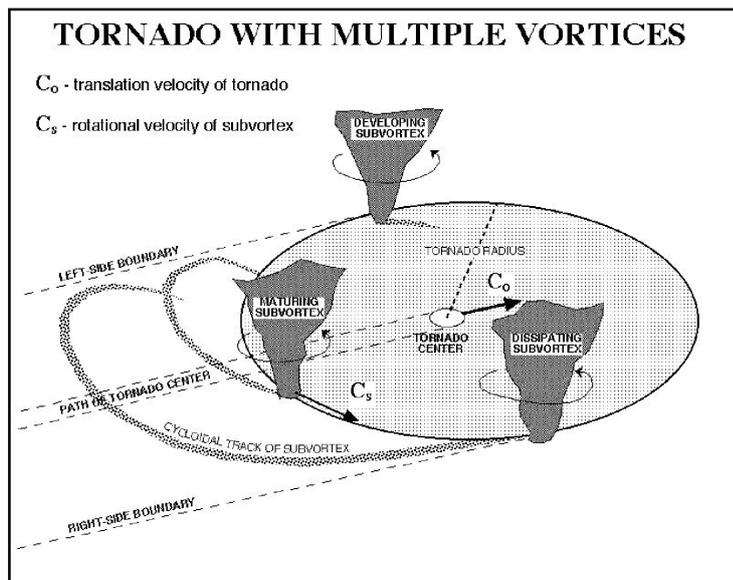


Abb. 4.6 Schematische Darstellung der Subwirbel eines Tornados nach /FUJ 71/

Aufgrund der ggf. großen räumlichen Ausdehnung eines Tornados ist zu unterstellen, dass er auch weit auseinander liegende Bereiche des Standorts einer kerntechnischen Anlage (annähernd) gleichzeitig trifft. Daraus resultiert, dass das Konzept „Schutz durch räumliche Trennung“ für Tornados nicht oder zumindest nur bedingt wirksam ist. Ebenso kann wegen der wechselnden Windrichtung innerhalb eines Tornados, insbesondere wenn sich zusätzlich Subwirbel ausbilden, nicht von Richtungseffekten oder Abschattungseffekten durch Bauwerke Kredit genommen werden. In dieser Hinsicht unterscheiden sich Tornados von den hinsichtlich einiger Aspekte als abdeckend zu betrachtenden Einwirkungen „Explosionsdruckwelle“ und „Flugzeugabsturz“. Sowohl für die Anlagenteile und baulichen Anlagen des Nebenkühlwassersystems (Zulaufkanal, Entnahmebauwerk, Pumpenbauwerk) als auch für das Notstromsystem muss von einer gleichzeitigen Beeinträchtigung aller redundanten Teilsysteme ausgegangen werden. Hieraus ergeben sich keine grundsätzlich neuen Einwirkungen, jedoch ist diese Randbedingung bei der Betrachtung der in den vorigen Abschnitten identifizierten Szenarien

- Verstopfung von Lüftungsöffnungen (vgl. Abschnitt 4.2.1),
- Verstopfung der Kühlwasserzuläufe (vgl. Abschnitt 4.2.1)/
Ausfall der (Neben-)Kühlwasserversorgung (vgl. Abschnitt 4.2.3),
- Startverzögerung oder Startversagen der Notstromdieselaggregate (vgl. Abschnitt 4.2.2) und
- Beschädigung von Ventilatoren (vgl. Abschnitt 4.2.2)

zu berücksichtigen. Das Gleiche gilt hinsichtlich einer möglichen Beschädigung der Infrastruktur auf dem Anlagengelände und in dessen Umgebung mit daraus resultierender Behinderung der Zugänglichkeit der Anlage bzw. einzelner Anlagenbereiche/Gebäude (vgl. Abschnitte 4.2.1 und 4.2.3).

4.3 Sicherheitstechnische Bewertung

Im Rahmen der Untersuchungen im Nachgang zu den Reaktorunfällen am japanischen Kernkraftwerkstandort Fukushima Daiichi kam die Reaktor-Sicherheitskommission zu dem Schluss, dass die bei einem Tornado zu erwartenden Über- und Unterdrücke nicht zu einem Ausfall von Vitalfunktionen führen /RSK 13a/, /RSK 17/. Nach Kenntnis der GRS stellten diese Betrachtungen im Wesentlichen auf die Abdeckung der Lasten aus Winddruck und Trümmern durch die Auslegung gegen Explosionsdruckwelle und Flugzeugabsturz und eine ausreichende Robustheit gegen Unterdrücke ab. Damit wurden die wesentlichen der in Abschnitt 4.2 identifizierten Effekte erfasst.

Wie in Abschnitt 4.2 dargestellt, können Tornados sehr unterschiedliche Auswirkungen auf kerntechnische Anlagen haben. Neben Auswirkungen mit eher geringer sicherheitstechnischer Bedeutung (wie z. B. der Beeinträchtigung des Lüftungssystems) und Auswirkungen, die nur in Verbindung mit anderen Einwirkungen eine Rolle spielen (wie z. B. der Beschädigung von Blitzfangeinrichtungen oder dem Abheben der Abdeckung von Kabel- und Rohrleitungskanälen) sind auch Szenarien denkbar, die zur Nicht-Verfügbarkeit der Hauptwärmesenke führen (wie z. B. die Verstopfung oder temporäre Entleerung von Nebenkühlwasserzuläufen). Letzteres könnte insbesondere dann ein Problem darstellen, wenn zusätzlich die Schalldämpfer der Frischdampfableitventile durch windgetragene Trümmer so weit verformt würden, dass auch die Energieabgabe an die Atmosphäre als alternative Wärmesenke behindert wäre. Aufgrund der Höhe der Schalldämpfer über dem Anlagengeländeneiveau und der vierfachen Redundanz ist eine sicherheitstechnisch relevante Beeinträchtigung der Wärmeabgabe an die Atmosphäre jedoch äußerst unwahrscheinlich.

Da Tornados naturbedingte Einwirkungen von außen sind, müssten alle Sicherheitseinrichtungen so ausgelegt sein, dass sie ihre sicherheitstechnischen Aufgaben auch nach einem Tornado erfüllen. Nach Kenntnis der GRS wurden Tornados bei der Auslegung der deutschen Kernkraftwerke jedoch nicht explizit berücksichtigt, da davon ausgegangen wurde, dass starke Tornados sehr seltene Ereignisse sind.

Aus den Auswertungen des Abschnitts 4.1 wird ersichtlich, dass Tornados bzw. daraus resultierende Windgeschwindigkeiten der Stärken F0 (Windgeschwindigkeiten bis 118 km/h) und für die norddeutsche Tiefebene möglicherweise auch Tornados der Stärke F1 (bis 180 km/h) im Bereich der Auslegungsereignisse liegen. Diese Windgeschwindigkeiten bzw. Ereignisse sind jedoch nach Einschätzung der GRS nicht ausreichend, ernsthaften Schäden an den Bauwerken, die Sicherheitssysteme enthalten, zu verursachen (mögliche Auswirkungen auf Anlagen im Rückbau wurden in diesem Vorhaben nicht betrachtet). Windgeschwindigkeiten >180 km/h bis 512 km/h, wie sie sich aus Tornados der Stärken F2 bis F5 ergeben können, sind jedoch klar dem auslegungsüberschreitenden Bereich nach /WEN 14/ bzw. /WEN 21/ zuzuordnen. Dementsprechend erscheint es aus technischer Sicht gerechtfertigt, sie mittels Robustheitsbetrachtungen zu behandeln.

5 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurde einerseits ein Überblick über aktuelle Entwicklungen im Bereich Einwirkungen von außen auf kerntechnische Anlagen gegeben, wobei insbesondere Erdbebenserien näher beleuchtet wurden. Andererseits wurden eigene Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Windeinwirkungen vorgestellt. Letztere umfassen sowohl eine probabilistische Analyse der aus linearen Winden (Sturmsystemen) für zwei Referenzstandorte im Flachland bzw. an der Küste und im Mittelgebirge resultierenden Windgeschwindigkeiten mit Überschreitenswahrscheinlichkeiten von 10^{-4} pro Jahr als auch eine generische Ermittlung der Tornadogefährdung in Deutschland unter Berücksichtigung der Windgeschwindigkeitsverteilung innerhalb eines Tornados.

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den einzelnen Arbeiten stellen sich wie folgt dar:

Aktuelle Entwicklungen im Bereich Einwirkungen von außen

Durch die Teilnahme an Konferenzen und Workshops konnten viele Informationen zu Detailspekten der Analyse naturbedingter Einwirkungen von außen gewonnen werden. Für die unterschiedlichen Einwirkungen können daraus insbesondere die folgenden Erkenntnisse als Orientierung für zukünftige sicherheitstechnische Bewertungen sowie Forschungs- und Entwicklungsarbeiten abgeleitet werden:

Starkregen: Messdaten liegen meist nur für wenige Jahrzehnte vor. Um verlässlicher zu sehr seltenen Ereignissen zu extrapolieren, können alternative Möglichkeiten zur Verbesserung der Prognosemöglichkeiten wie z. B. stochastische Wettergeneratoren oder Downscaling mit Mustererkennung auf Basis großskaliger/globaler Simulationen/Modelle genutzt werden.

Überflutung: Neben den „klassischen“ Überflutungsursachen (Flusshochwasser, Sturmflut, Tsunami) können auch lokaler Starkregen und Regenfälle in den Einzugsgebieten kleiner Flüsse und Bäche zu Ereignissen mit großem Schadenspotenzial führen. Gerade bei diesen kleinräumigen Niederschlagsereignissen spielen die Bodenverhältnisse und Gebäudeanordnungen am Standort eine wesentliche Rolle. Inzwischen wurde die Methodik der Paläo-Überflutungsanalyse weiterentwickelt, sodass sie nicht nur für Tsunamis sondern auch für Flusshochwasser genutzt werden kann, um die Datenbasis zu verbessern. Da Überflutungen zudem oft aus einer Kombination mehrerer Beiträge

resultieren (z. B. Sturmflut mit gleichzeitigem Starkregen), sollte solchen kombinierten Ereignissen in Zukunft mehr Beachtung geschenkt werden.

Starkwind: Zur Starkwindgefährdung tragen oft mehrere Arten von Wind bei, denen unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugrunde liegen können. Dies ist bei der Extrapolation von Messdaten zu berücksichtigen, da seltene Ereignisse u. U. von einer anderen Windart dominiert werden als die häufigeren gemessenen Ereignisse. Bei der standortspezifischen Gefährdungsanalyse ist außerdem zu beachten, dass lokale Windgeschwindigkeiten bzw. Winddrücke oft erheblich durch die Bodenbeschaffenheit, Topografie und bauliche Strukturen am Standort und in dessen unmittelbarer Umgebung beeinflusst werden.

Hagel: Bei extremen Hagelereignissen ist mit einer nennenswerten Menge Hagelkörnern erheblicher Größe zu rechnen. Ob solche Extremereignisse eine relevante Gefährdung für kerntechnische Anlagen darstellen und inwieweit sie bei der Auslegung berücksichtigt wurden, wäre zu prüfen. Hierbei sollten aktuelle Informationen zur Hagelklimatologie berücksichtigt werden.

Klimawandel: Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels stützen sich auf Annahmen zur Entwicklung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre und darauf aufbauende Klimaprojektionen, die mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Außerdem liefern Klimaprojektionen bisher meist nur Aussagen zu Mittelwerten und – in Einzelfällen – Ereignissen mit Eintrittswahrscheinlichkeiten im Bereich von 10^{-1} bis 10^{-2} pro Jahr. Da dies für sicherheitstechnische Bewertungen in der Kerntechnik nicht ausreichend ist, gibt es bisher auch noch keine etablierte Methode zur Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels.

Schutz Kerntechnischer Anlagen: Ein wesentlicher Aspekt bei Sicherheitsbewertungen zu naturbedingten Einwirkungen sind die Versagenswahrscheinlichkeiten (Fragility Curves) von Anlagenteilen und baulichen Anlagen. Während es für Erdbeben zu deren Ermittlung etablierte Methoden und umfangreiche Daten gibt, ist dies für andere Einwirkungen bisher nicht der Fall. Daher ist auf diesem Gebiet noch methodische Forschungs- und Entwicklungsarbeit zu leisten. Im Zusammenhang mit Sicherheitsanalysen sollten in Zukunft auch die nach den Reaktorunfällen am japanischen Kernkraftwerkstandort Fukushima Daiichi in vielen Ländern ergriffenen Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit berücksichtigt werden, um deren Auswirkungen auf das Sicherheitsniveau der An-

lagen besser einschätzen zu können. Eine ausführlichere Zusammenfassung der Erkenntnisse aus der Teilnahme an Konferenzen und Workshops findet sich in Abschnitt 2.1.6.

Erdbebenserien

Erdbeben treten meist nicht einzeln, sondern in Serien, bestehend aus einem oder mehreren Vor-, Haupt- und Nachbeben, auf. Diesem Verhalten wurde in seismischen Sicherheitsanalysen für Kernkraftwerke bisher jedoch nicht Rechnung getragen. In den letzten Jahren wurden unterschiedliche methodische Ansätze für eine Berücksichtigung von Nachbeben in seismischen Sicherheitsanalysen entwickelt. Insbesondere im Rahmen des METIS-Projekts fanden und finden umfangreiche diesbezügliche Arbeiten statt. Neben der grundsätzlichen Methodenentwicklung wird in METIS auch eine generische Abschätzung der sicherheitstechnischen Relevanz von Nachbeben durch die Anwendung der Methodik auf ein vereinfachtes Anlagenmodell angestrebt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten dürften im Laufe des Jahres 2025 vorliegen und veröffentlicht werden.

Probabilistische Analyse linearer Windeinwirkungen

Die in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungen zeigen einen Weg auf, wie eine probabilistische Windgefährdungsanalyse für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr durchgeführt werden könnte.

Grundlage für die durchgeführte Analyse war eine Auswertung von Zeitreihen mit verschiedenen zeitlichen Auflösungen, die mittels statistischer Beziehungen zu Zeitreihen mit 10-Minuten-Mittelwerten zusammengefasst wurden. Zur Abbildung der aleatorischen Unsicherheiten der Extrapolation zu seltenen Ereignissen wurde auf ein Bootstrapping-Verfahren zurückgegriffen und dieses mit einer Monte-Carlo-Methode verknüpft. Um auch epistemische Unsicherheiten – zumindest partiell – erfassen zu können, wurden mehrere Methoden zur Extrapolation der Zeitreihen verwendet. Die Berücksichtigung aleatorischer und epistemischer Unsicherheitsbandbreiten kann sowohl der informierten Festlegung von Bemessungsereignissen dienen als auch für die Zwecke einer PSA verwendet werden. Da keine weiteren Informationen zur Zuverlässigkeit der verwendeten Extrapolationsmethoden vorlagen, erfolgte die Kombination der Einzelergebnisse im Rahmen des logischen Baums gleichgewichtet.

Für die untersuchten Referenzstandorte Cuxhaven (Flachland/Küste) und Bad Marienberg (Mittelgebirge) ist zu beobachten, dass die Unsicherheiten des Median- bzw. Mittelwertes der Windgeschwindigkeit hauptsächlich durch die Wahl der Extrapolationsmethode und damit durch epistemische Unsicherheiten bestimmt sind. Höhere Fraktilwerte wie das 95 % oder das 99 %-Fraktil unterscheiden sich zwischen den einzelnen Methoden jedoch nicht wesentlich, so dass hier epistemische Unsicherheiten nicht die Hauptrolle spielen.

Wie aufgrund der topographischen Lage zu erwarten, wurden für 10.000-jährliche Windereignisse an der Wetterstation Cuxhaven höhere Windgeschwindigkeiten (Median ca. 37 m/s) ermittelt als an der Station Bad Marienberg (Median ca. 26 m/s).

Tornados

Da Tornados naturbedingte Einwirkungen von außen sind, sollten alle Sicherheitseinrichtungen in einem Kernkraftwerk so ausgelegt sein, dass sie ihre sicherheitstechnischen Aufgaben auch während oder nach einem Tornado erfüllen. Allerdings wurden Tornados bei der Auslegung der deutschen Kernkraftwerke nicht explizit berücksichtigt, da davon ausgegangen wurde, dass starke Tornados sehr seltene Ereignisse sind. Ziel der in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungen war es daher, einerseits die Tornadogefährdung in Deutschland generisch abzuschätzen und andererseits mögliche Auswirkungen auf Kernkraftwerke zu identifizieren.

Zur Abschätzung der Tornado-Gefährdung wurden Daten des ESWD zu beobachteten Tornados unterschiedlicher Stärke (Fujita-Skala F0 bis F5) in Deutschland und angrenzenden Regionen hinsichtlich Häufigkeit und betroffener Fläche ausgewertet. Da die Windgeschwindigkeiten innerhalb eines Tornados deutlich variieren, wurde diese Windverteilung zusätzlich mittels eines einfachen Modells analysiert und in die Gefährdungsermittlung mit einbezogen.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass Tornados bzw. daraus resultierende Windgeschwindigkeiten der Stärken F0 (Windgeschwindigkeiten bis 118 km/h) – und für die norddeutsche Tiefebene möglicherweise auch Tornados der Stärke F1 (bis 180 km/h) – noch im Bereich von Eintrittswahrscheinlichkeiten der Größenordnung 10^{-4} pro Jahr liegen und somit entsprechend den WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors /WEN 14/ bzw. /WEN 21/ und dem RSK-Verständnis der Sicherheits-

philosophie /RSK 13/ dem Auslegungsbereich zuzuordnen wären. Diese Windgeschwindigkeiten bzw. Ereignisse sind jedoch nach Einschätzung der GRS nicht ausreichend, ernsthafte Schäden an den Bauwerken, die Sicherheitssysteme enthalten, zu verursachen. Ggf. wären jedoch noch im Hinblick auf mögliche Schäden an Anlagen im Rückbau spezifische Untersuchungen durchzuführen, z. B. zu Pufferflächen. Windgeschwindigkeiten > 180 km/h bis 512 km/h, wie sie sich aus Tornados der Stärken F2 bis F5 ergeben können, sind jedoch klar dem auslegungsüberschreitenden Bereich nach /WEN 14/ bzw. /WEN 21/ zuzuordnen. Dementsprechend erscheint es aus technischer Sicht gerechtfertigt, sie mittels Robustheitsbetrachtungen oder analog zu Notstandsfällen zu behandeln.

Abhängig von ihrer Stärke können Tornados sehr unterschiedliche Auswirkungen auf kerntechnische Anlagen haben. Neben Auswirkungen mit eher geringer sicherheitstechnischer Bedeutung (wie z. B. der Beeinträchtigung des Lüftungssystems) und Auswirkungen, die nur in Verbindung mit anderen Einwirkungen eine Rolle spielen (wie z. B. der Beschädigung von Blitzfangeinrichtungen oder dem Abheben der Abdeckung von Kabel- und Rohrleitungskanälen) sind bei starken Tornados, die wie oben dargestellt dem auslegungsüberschreitenden Bereich zuzuordnen sind, auch Szenarien denkbar, die zur Nicht-Verfügbarkeit der Hauptwärmesenke führen (wie z. B. die Verstopfung oder temporäre Entleerung von Nebenkühlwasserzuläufen). Letzteres könnte insbesondere dann ein Problem darstellen, wenn zusätzlich die Schalldämpfer der Frischdampfableiventile durch windgetragene Trümmer so weit verformt würden, dass auch die Energieabgabe an die Atmosphäre als alternative Wärmesenke behindert wäre. Aufgrund der Höhe der Schalldämpfer über dem Anlagengeländeniveau und der vierfachen Redundanz ist eine sicherheitstechnisch relevante Beeinträchtigung der Wärmeabgabe an die Atmosphäre jedoch selbst bei starken Tornados äußerst unwahrscheinlich.

Literaturverzeichnis

- /BAZ 23/ Bazzurro, P.: Strategy for consideration of aftershocks in seismic PSA. Presentation at the METIS Plenary Meeting, 16 – 17 November 2023, Bergamo, Italy, 2023.
- /BER 19/ Bernasconi, M., und Löbbbecke, F.: Das Basler Erdbeben von 1356 – Zerstörung und Wiederaufbau. Archäologische und bauhistorische Spuren. In Erdbeben, Feuer, Wasser und andere Katastrophen - Ihr Einfluss auf die Stadtentwicklung und Stadtgestalt im Spätmittelalter und in der Frühen Neuzeit - Beiträge der Tagung in Basel 1./2. Februar 2018, herausgegeben von Daniel Schneller und Guido Lassau, Gesellschaft für Schweizerische Kunstgeschichte, ISBN 978-3-03797-597-8, Bern, 2019.
- /BEV 19/ Bevacqua, E., et al.: Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. Science Advances, Vol. 5, Issue 9, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw5531>, September 2019.
- /BMI 76/ Bundesministerium des Innern (BMI): Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen durch Auslegung der Kernkraftwerke hinsichtlich ihrer Festigkeit und induzierter Schwingungen sowie durch Sicherheitsabstände (Druckwellenrichtlinie). Bekanntmachung vom 13. September 1976, Stand August 1976.
- /BMU 15/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke vom 3. März 2015, BAnz AT 30.03.2015 B2, März 2015.
- /BRO 04/ Brooks, H. E.: On the Relationship of Tornado Path Length and Width to Intensity. Weather and Forecasting, 19, pp. 310-319 American Meteorological Society, [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2004\)019<0310:OTROTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2004)019<0310:OTROTP>2.0.CO;2), 2004.

- /DIN 10/ Deutsches Institut für Normung e. V (DIN): Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010. DIN EN 1990:2010-12, Deutsche Norm, Dezember 2010.
- /DIN 10a/ Deutsches Institut für Normung e. V (DIN): Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten; Deutsche Fassung EN 1991-1-4:2005 + A1:2010 + AC:2010. DIN EN 1991-1-4:2010-12, Deutsche Norm, Dezember 2010.
- /DOE 16/ U.S. Department of Energy (DOE): Natural Phenomena Hazards Analysis and Design Criteria for DOE Facilities. DOE Standard, DOE-STD-1020-2016, Washington, D.C., December 2016.
- /DOE 17/ U.S. Department of Energy (DOE): Natural Phenomena Hazards Analysis and Design Handbook for DOE Facilities. DOE Handbook, DOE-HDBK-1220-2017, Washington, D.C., 2017.
- /DWD 13/ Deutscher Wetterdienst (DWD): Analyse standortbezogener Windklimatologien als Eingangsgröße für die Risikobewertung kerntechnischer Anlagen am Beispiel des Standortes KKW Grafenrheinfeld. Amtliches Gutachten, Potsdam, Mai 2013.
- /ELS 14/ Elsner, J. B. et al.: Tornado Intensity Estimated from Damage Path Dimensions, PLoS ONE 9(9): e107571, DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107571>, 17.9.2014.
- /EMS 23/ Euro-Mediterranean Seismological Centre (EMSC): Earthquake sequence in Turkey, February 6th 2023. [HTML] Stand vom 6. Februar 2023, erreichbar unter https://www.emsc-csem.org/Special_reports/?id=271, zuletzt aufgerufen am 06.02.2024.
- /EWK 23/ ExtremWetterKongress (EWK): ExtremWetterKongress13 – ewk.hamburg, 27. bis 29. September 2023. https://extremwetterkongress.org/wp-content/uploads/2023/09/EWK2023_Programm-2.pdf, September 2023.

- /FAT 23/ Fathabadi, S., and Sadegh-Azar, H.: Strategy for consideration of after-shocks in seismic PSA. Presentation at the METIS Plenary Meeting, 16 – 17 November 2023, Bergamo, Italy, 2023.
- /FEM 09/ Federal Emergency Management Agency (FEMA): Tornado Protection – Selecting Refuge Areas in Buildings. FEMA P-431, Second Edition, October 2009.
- /FUJ 71/ Fujita, T. T.: Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity. Satellite Mesometeorology Research Program Research Paper Number 91, 1971.
- /GFZ 23/ Deutsches Geoforschungszentrum (GFZ): Türkei-Beben 2023 – Die Analyse. Helmholtz-Zentrum Potsdam, [HTML] Stand vom 28.11.2023, erreichbar unter <https://www.gfz-potsdam.de/presse/meldungen/detailansicht/tuerkei-beben-2023-die-analyse>, zuletzt aufgerufen am 06.02.2024.
- /KAR 10/ Karstens, C. D., et al.: Near-Ground Pressure and Wind Measurements in Tornadoes. Monthly Weather Review, Volume 138, Issue 7, pp. 2570 – 2588, DOI: <https://doi.org/10.1175/2010MWR3201.1>, 01 July 2010.
- /KTA 90/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 2201.1 – Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen – Teil 1: Grundsätze. Sicherheitstechnische Regel des KTA, Fassung Juni 1990.
- /KTA 11/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 2201.1 – Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen – Teil 1: Grundsätze. Sicherheitstechnische Regel des KTA, Fassung November 2011.
- /KTA 21/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA): KTA 2207 – Schutz von Kernkraftwerken gegen Hochwasser. Sicherheitstechnische Regel des KTA, Fassung Dezember 2021.

- /KUL 14/ Kuligowski, E. et al.: Technical Investigation of the May 22, 2011, Tornado in Joplin, Missouri, Final Report, National Institute of Standards and Technology (NIST), März 2014, <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.NCSTAR.3>.
- /LEE 04/ Lee, J. J., Samaras, T. M., Young, C. R.: Pressure Measurements at the Ground in an F-4 Tornado. 22nd Conference on Severe Local Storms, 3 – 8 October 2004, American Meteorological Society, <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/81700.pdf>, zuletzt aufgerufen am 23.12.2021, October 2004.
- /LEV 22/ Levitan, M.: Introduction to Tornado Loads in the New ASCE 7-22 Standard – Including Long Return Period Tornado Hazards Maps with Applications to Nuclear Facilities. Presentation 4B-1 in Proceedings of the Seventh Annual Probabilistic Flood Hazard Assessment Research Workshop. February 15 – 18, 2022, RIL 2022-10, <https://www.nrc.gov/docs/ML2225/ML22257A136.pdf>, published September 2022.
- /LEY 11/ Leydecker, G.: Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 - 2008 (Earthquake catalogue for Germany and adjacent areas for the years 800 to 2008). Geol. Jb., E 59, BGR Hannover, Vertrieb durch E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2011.
- /MET 24/ METIS: Seismic Risk Assessment for Nuclear Safety – A Horizon 2020 Project. [HTML] Stand von 2024, erreichbar unter <https://metis-h2020.eu/>, zuletzt aufgerufen am 02.08.2024.
- /MUN 22/ Mun, C., and Song, J.: Bayesian-network-based risk modeling and inference for structures under a sequence of main and aftershocks. Earthquake Engng Struct Dyn. 2022; 51: 1058–1075. <https://doi.org/10.1002/eqe.3604>, 2022.

- /NRC 22/ United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC): Proceedings of the Seventh Annual Probabilistic Flood Hazard Assessment Research Workshop. February 15 – 18, 2022, RIL 2022-10, <https://www.nrc.gov/docs/ML2225/ML22257A136.pdf>, published September 2022.
- /NRC 23/ United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC): 8th Annual Probabilistic Flood Hazard Assessment Research Workshop – Abstracts. <https://www.nrc.gov/docs/ML2307/ML23076A076.pdf>, 2023.
- /NWS 03/ National Weather Service (NWS): A Guide to F-Scale Damage Assessment. U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Silver Spring, Maryland, April 2003.
- /RSK 13/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): RSK-Verständnis der Sicherheitsphilosophie. RSK-Stellungnahme 29.08.2013 (460. Sitzung), August 2013.
- /RSK 13a/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): Einschätzung der Abdeckung extremer Wetterbedingungen durch die bestehende Auslegung. RSK-Stellungnahme 06.11.2013 (462. Sitzung), November 2013.
- /RSK 17/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): Bewertung der Umsetzung von RSK-Empfehlungen im Nachgang zu Fukushima. RSK-Stellungnahme 06.09.2017 (496. Sitzung), September 2017.
- /SED 22/ Schweizerischer Erdbebendienst (SED): Historische Erdbeben – Basel 1356 – Was geschah 1356 in Basel? ETH Zürich, [HTML] Stand von 2022, erreichbar unter <http://www.seismo.ethz.ch/de/knowledge/e-arthquake-country-switzerland/historical-earthquakes/basel-1356/>, zuletzt aufgerufen am 06.02.2024.
- /SPE 13/ Sperbeck, S., Strack, C., Thuma, G.: Deterministische Untersuchung der Widerstandsfähigkeit deutscher Kernkraftwerke gegen Einwirkungen von außen, unter Berücksichtigung aktueller Erkenntnisse hinsichtlich der anzusetzenden Einwirkungen. GRS-A-3693, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, Köln, November 2013.

- /STR 18/ Strack, C., Thuma, G.:
Assessment of Extreme Wind Actions in the Netherlands – DRAFT. Report No.: ANVS/2018-WP4/T4-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, Köln, Dezember 2018.
- /STR 23/ Strack, C.: SAGA-F – Erarbeitung von Methoden zur Durchführung von Standortgefährdungsanalysen für Überflutungen aus kleinen und mittleren Einzugsgebieten (Phase I). Bericht zum Forschungsvorhaben RS1587, GRS – 693, ISBN 978-3-949088-84-1, August 2023.
- /TSU 07/ Tsutsumi, H., Nanba, H., Motohashi, S., and Ebisawa, K.: Development of Seismic PSA Methodology Considering Aftershock. In Proceedings of the Specialist Meeting on the Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Facilities held at Jeju Island, Republic of Korea, 6 - 8 November 2006, NEA/CSNI/R(2007)14, <https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2021-12/csni-r2007-14.pdf>, 2007.
- /USG 23/ U. S. Geological Survey (USGS): M 6.7 - Banda Sea. Earthquake Hazards Program, [HTML] Stand von 2023, erreichbar unter <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000l9h2/executive>, zuletzt aufgerufen am 07.02.2024.
- /USG 23a/ U. S. Geological Survey (USGS): M 6.7 - Banda Sea. Earthquake Hazards Program, [HTML] Stand von 2023, erreichbar unter <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000l9ku/executive>, zuletzt aufgerufen am 07.02.2024.
- /USG 23b/ U. S. Geological Survey (USGS): M 7.1 - Banda Sea. Earthquake Hazards Program, [HTML] Stand von 2023, erreichbar unter <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000l9h4/executive>, zuletzt aufgerufen am 07.02.2024.

- /VDS 22/ VdS Schadenverhütung GmbH: Schutz vor Überschwemmungen, Leitfa-
den für Schutzkonzepte und Schutzmaßnahmen bei Industrie- und Ge-
werbeunternehmen. VdS 3521, [https://www.gdv.de/re-
source/blob/136418/6fdaeb0061377f32decbb0d5671894fa/publikation-
schutz-vor-ueberschwemmungen-leitfaden-fuer-schutzkonzepte-und-
schutzmassnahmen-bei-industrie-und-gewerbeunternehmen-vds-3521-
data.pdf](https://www.gdv.de/resource/blob/136418/6fdaeb0061377f32decbb0d5671894fa/publikation-schutz-vor-ueberschwemmungen-leitfaden-fuer-schutzkonzepte-und-schutzmassnahmen-bei-industrie-und-gewerbeunternehmen-vds-3521-data.pdf), November 2022.
- /WEN 14/ Western European Nuclear Regulators Association (WENRA): WENRA
Safety Reference Levels for Existing Reactors – Update in Relation to
Lessons Learned from TEPCO Fukushima Dai-Ichi Accident. Report,
24th September 2014.
- /WEN 21/ Western European Nuclear Regulators Association (WENRA): WENRA
Safety Reference Levels for Existing Reactors 2020. Report, 17th Febru-
ary 2021.
- /WIN 06/ Wind Science and Engineering Center: A Recommendation for an En-
hanced Fujita Scale (EF-Scale) – Submitted to The National Weather
Service and Other Interested Users. Texas Tech University, Lubbock,
Texas, October 10, 2006.
- /WNN 23/ World Nuclear News (WNN): 'No damage' reported at Akkuyu site after-
Turkey earthquakes. [HTML] Stand vom 06.02.2023, erreichbar unter
[https://www.world-nuclear-news.org/Articles/No-damage-reported-at-Ak-
kuyu-site-after-Turkey-e](https://www.world-nuclear-news.org/Articles/No-damage-reported-at-Akkuyu-site-after-Turkey-e), zuletzt aufgerufen am 07.02.2024.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Tornadogefährdung in den USA entsprechend dem neuen Standard ASCE 7-22 nach /LEV 22/	7
Abb. 2.2	Vermutetes Epizentrum und überlieferte Schäden des Basler Erdbebens von 1356 nach /BER 19/	31
Abb. 2.3	Lage der Einzelereignisse der Erdbebenserie vom 6. Februar 2023 innerhalb von zwölf Stunden nach dem ersten Hauptbeben nach /EMS 23/	32
Abb. 2.4	Lage der Epizentren der Erdbebenserie vom 8./9. November 2023	33
Abb. 2.5	Struktur des von Mun und Song vorgeschlagenen Bayesian Networks nach /MUN 22/	38
Abb. 2.6	Versagenswahrscheinlichkeitsflächen für zwei unterschiedliche Szenarien: links Hauptbeben der Magnitude 6 und rechts Hauptbeben der Magnitude 8 /MUN 22/	39
Abb. 2.7	Beispiel für die Festlegung der Schadenszustände (damage states, DS) nach dem Hauptbeben auf Grundlage der modellierten Verschiebung (displacement) /FAT 23/	40
Abb. 2.8	Beispiel für eine Schar von Versagenskurven resultierend aus den unterschiedlichen Schadenszuständen (DS1 bis DS4) nach dem Hauptbeben /BAZ 23/	41
Abb. 3.1	Untersuchung der Abhängigkeiten von mehrjährigen Mittelwerten und Standardabweichungen der Windgeschwindigkeiten für die Station Cuxhaven	46
Abb. 3.2	Jahresmaxima und Peak-Over-Threshold Werte für die Stundenmittelwerte der Station Cuxhaven. Ebenso Jahresmaxima für die 10-Minuten-Mittelwerte als Vergleich.	49
Abb. 3.3	Statistische Beziehung zwischen Stundenmittelwerten und korrelierten 10-Minuten-Mittelwerten am Beispiel der Station Cuxhaven	50
Abb. 3.4	Beispiel für Verteilungsfunktionen der ermittelten Werte bei Verwendung der Gumbelfunktion für die Wiederkehrperioden 100, 10.000 und 100.000 Jahre	51
Abb. 3.5	Darstellung der Einzelverteilungen für eine Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren für Gumbel- (pink), Pearson-III- (blau) bzw. Pareto-Verteilung (grün) am Beispiel der Station Cuxhaven	53

Abb. 3.6	Gesamtverteilung für eine Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren am Beispiel der Station Cuxhaven	53
Abb. 4.1	Fujita-Skala zur Klassifizierung von Tornados nach /FUJ 71/	57
Abb. 4.2	Betroffene Flächen je Jahr in km ² für die unterschiedlichen Auswertemethoden (und deren Unsicherheiten) im Vergleich mit den um den Faktor 2,7 erhöhten Literaturwerten	63
Abb. 4.3	Windfeld innerhalb eines Tornados nach /FEM 09/ und /NWS 03/	65
Abb. 4.4	Symbolische Darstellung der absoluten Windgeschwindigkeiten in einem Tornadowirbel überlagert mit der Zuggeschwindigkeit des Tornados	68
Abb. 4.5	Kräfte auf Baustrukturen durch Windlasten /NWS 03/	73
Abb. 4.6	Schematische Darstellung der Subwirbel eines Tornados nach /FUJ 71/	80

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Vereinfachte Zusammenstellung deterministischer Szenarien bei zwei aufeinanderfolgenden Erdbeben an einem Kernkraftwerkstandort	34
Tab. 3.1	Gesamt- und Einzelergebnisse für die Stationen Cuxhaven und Bad Marienberg. Prozentwerte (linke Spalte) geben Fraktilwerte der Verteilungen an.	54
Tab. 4.1	Anzahl (N) und relative Häufigkeit (rH) von Tornados im Zeitraum 1764 bis 2020 unter der Annahme unveränderlicher Eintrittswahrscheinlichkeit	60
Tab. 4.2	Vergleich der ermittelten mittleren betroffenen Flächen je Tornadokategorien nach den verschiedenen im Text beschriebenen Verfahren	62
Tab. 4.3	Im Mittel pro Jahr betroffenen Fläche je Tornadokategorie in km ²	63
Tab. 4.4	Parameter für die Weibullverteilungen für die Pfadlängen (in km) bzw. Pfadbreiten (in m) gemäß /BRO 04/	67
Tab. 4.5	Maximale Flächenanteile der Windstärken der Tornadokategorien F0 bis F5 in Tornados der Kategorien F0 bis F5	70
Tab. 4.6	Betroffene Flächen und Eintrittswahrscheinlichkeiten je Jahr von Windgeschwindigkeiten der Kategorien F0 bis F5	71

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-910548-84-8