

**Untersuchungen zur
deterministischen
und probabilistischen
Bewertung von Einwir-
kungen von außen
(EVA-Ereignisse)**

Untersuchungen zur deterministischen und probabilistischen Bewertung von Einwirkungen von außen (EVA-Ereignisse)

Deterministische Untersuchung der
Widerstandsfähigkeit deutscher
Kernkraftwerke gegen
Einwirkungen von außen, unter
Berücksichtigung aktueller
Erkenntnisse hinsichtlich der
anzusetzenden Einwirkungen

Dr. Silvio Sperbeck
Christian Strack
Dr. Gernot Thuma

November 2013

Auftrags-Nr.: 813050

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben 3609R01350 wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Kurzfassung

Ziel der hier dargestellten Untersuchungen ist es, festzustellen, ob die heute verfügbaren Methoden zur Ermittlung der Standortgefährdung im Hinblick auf naturbedingte Einwirkungen von außen (insbesondere Erdbeben, Hochwasser und Windeinwirkungen) gegenüber den bisher üblichen Verfahren zusätzliche aus sicherheitstechnischer Sicht relevante Erkenntnisse liefern und daher in die Praxis der Standortgefährdungsermittlung Eingang finden sollten oder ob die in der kerntechnischen Praxis etablierten Verfahren ausreichen, um den sicherheitstechnischen Erfordernissen auch nach heutigem Maßstab Rechnung zu tragen.

Insgesamt haben sich im Rahmen dieser Arbeiten keine Hinweise darauf ergeben, dass die bisherigen nach Regelwerk geforderten und in der Praxis angewandten Vorgehensweisen zur Ermittlung der Standortgefährdung im Hinblick auf die betrachteten Einwirkungen grundsätzliche Defizite aufweisen, die zu einer deutlichen Unterschätzung der Standortgefährdung führen könnten. Nichts desto trotz ist mit den heute verfügbaren Methoden in einigen Bereichen eine genauere (Reduzierung der Unsicherheiten) oder umfassendere (Berücksichtigung zusätzlicher Aspekte) Ermittlung der Standortgefährdung möglich. Daher erscheint einwirkungsabhängig eine Erweiterung der derzeit üblichen Standortgefährdungsanalysen um einzelne zusätzliche Untersuchungen empfehlenswert. Allerdings sind als Grundlage hierfür teilweise erst noch weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

Abstract

The aim of the analyses on natural hazards described in this report was to evaluate the advantages of innovative hazard assessment methods available today over the hazard assessment methods commonly applied for German nuclear power plant sites in the past. For each hazard under consideration (earthquake, flooding, and wind loads) it has been assessed whether the new methods provide additional insights that could call for their mandatory application in future site specific hazard assessments. If no additional insights are gained, the hitherto applied methods can be considered adequate according to today's standards.

In the context of this work, no areas could be identified where the hazard assessment methods stipulated in German (nuclear) regulations are generally inadequate. These methods that are commonly applied in practice do not seem to be prone to significantly underestimate the site specific hazard. Nevertheless, some newer methods allow for more precise (reduction of uncertainties) and more comprehensive (consideration of additional hazard characteristics) hazard assessments. Therefore, depending on the hazard under consideration, it could be advisable to supplement future site specific hazard assessments by some additional analyses. As the methods for some of these additional analyses are not yet fully developed, further research will be necessary to enable these amendments.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Erdbeben	3
2.1	Darstellung der Einwirkung Erdbeben.....	3
2.1.1	Grundlagen.....	3
2.1.2	Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch Erdbebeneinwirkung	9
2.1.3	Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland	11
2.2	Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu Erdbeben ..	15
2.3	Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung	17
2.3.1	Allgemeines und Regelwerk	17
2.3.2	Deterministische und probabilistische seismische Gefährdungsanalyse ..	22
2.3.3	Vorgehensweise zur Ermittlung der seismischen Standortgefährdung.....	26
2.4	Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse.....	29
2.4.1	Allgemeines	29
2.4.2	Anwendbarkeit von Ground-Motion Abnahmebeziehungen im Nahbereich	30
2.4.3	Bodendynamische Berechnungen zur Ermittlung standortbezogener Antwortspektren.....	33
2.5	Bewertung und Identifikation weiteren Entwicklungsbedarfs	35
2.5.1	Bewertung und Erkenntnisse	35
2.5.2	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	37
3	Extreme Wasserstände	41
3.1	Darstellung der Einwirkung extreme Wasserstände.....	41
3.1.1	Grundlagen.....	41
3.1.2	Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch Hochwassereinwirkung	43
3.1.3	Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland	43
3.2	Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu Hochwasser	43

3.2.1	Einleitung.....	43
3.2.2	Ausland	44
3.2.3	Inland.....	44
3.3	Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Gefährdung	44
3.3.1	Allgemeines	44
3.3.2	Tidestandorte.....	46
3.3.3	Binnenstandorte	49
3.4	Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse.....	53
3.4.1	Tidestandorte.....	53
3.4.2	Binnenstandorte	57
3.5	Vergleich und Bewertung der Methoden	59
3.5.1	Tidestandorte.....	59
3.5.2	Binnenstandorte	60
3.5.3	Eishochwasser	61
3.5.4	Niedrigwasser.....	61
4	Großräumige Windeinwirkungen.....	63
4.1	Darstellung der großräumigen Windeinwirkung	63
4.1.1	Grundlagen.....	63
4.1.2	Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch großräumige Windeinwirkung	66
4.1.3	Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland	68
4.2	Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu großräumigen Windereignissen	70
4.3	Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung	75
4.4	Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse.....	79
4.4.1	Einleitung.....	79
4.4.2	Meteorologische Grundlagen zur Bestimmung standortbezogener Windklimatologien.....	80
4.4.3	Ausgangsdaten für die Analyse standortbezogener Windklimatologien ...	81
4.4.4	Methode zur Analyse standortbezogener Windklimatologien	85

4.4.5	Ergebnisse der Analysen zur standortbezogenen Windklimatologie am Referenzstandort	87
4.5	Vergleich und Bewertung der Methoden	90
5	Tornado	93
5.1	Darstellung der Einwirkung Tornado	93
5.1.1	Grundlagen.....	93
5.1.2	Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch Tornadoeinwirkung	96
5.1.3	Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland	96
5.2	Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu Tornado.....	97
5.3	Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung	97
5.4	Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse.....	98
5.5	Bewertung	100
6	Zusammenfassung	103
7	Literaturverzeichnis.....	109
8	Verteiler	121

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1:	Weltweit registierte Erdbeben seit 1954 mit einer Magnitude größer 4,0 und deren Tiefen /BGR 11/	3
Abb. 2-2:	Plattenrandmechanismen /USG 99/	4
Abb. 2-3:	Übersicht zum Zusammenhang zwischen Magnitude und Intensität	5
Abb. 2-4:	Raumwellen /LMU 08/	8
Abb. 2-5:	Oberflächenwellen /LMU 08/	9
Abb. 2-6:	Karte der Epizentren der Erdbeben zwischen 800 und 2004 sowie seismotektonische Regionen (I_0 ist die Epizentralintensität; $I_0 < 0,45$ enthält auch nicht spürbare Erdbeben) /LEY 08/	10
Abb. 2-7:	Herdgebiet des Albstadt-Erdbebens /KWU 80/	13
Abb. 2-8:	Makroseismisches Schüttergebiet des Roermond-Erdbebens, Intensität nach MSK-Skala (Isoseisten) /AHO 92/	14
Abb. 2-9:	Erdbebenzonen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland /DIN 11a/	21
Abb. 2-10:	Die vier grundlegenden Schritte einer deterministischen seismischen Gefährdungsanalyse /REI 90/	23
Abb. 2-11:	Die grundlegenden Schritte einer probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse /REI 90/	25
Abb. 2-12:	Vergleich von Antwortspektren (Horizontalkomponente) für den Beispielstandort /SDA 11/	32
Abb. 2-13:	Ergebnisse der linear-äquivalenten Berechnungen für Hoch- und Tiefscholle bei Ausgabe der Antwortspektren für verschiedene Teufen und bei Ansatz eines auf 1 m/s^2 skalierten Fels-Eingangszeitverlauf an der Modellbasis (Halbraum) /SDA 11/	34

Abb. 3-1:	Zeitreihen der Pegel A, B und C, jeweils für das mittlere Tidehochwasser und das Höchste Tidehochwasser. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.....	46
Abb. 3-2:	Korrelation zwischen den Pegeln A und B. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.....	47
Abb. 3-3:	Korrelation zwischen den Pegeln B und C. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.....	48
Abb. 3-4:	Anpassung verschiedener nach DVWK-Merkblatt 251 zulässiger Verteilungen an die Zeitreihe des Pegels E /JEN 11/.....	51
Abb. 3-5:	Wasserstand am Pegel E in Abhängigkeit von der Abflussmenge. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.....	52
Abb. 3-6:	Zerlegung des Sturmflutscheitelwasserstandes in Windstaukurve und mittlere Tidekurve. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.....	54
Abb. 3-7:	Definition der Sturmflutfülle F nach /JEN 11/.....	55
Abb. 3-8:	Ansatz zur Wahl der Parameter nach /JEN 11/.....	56
Abb. 3-9:	Kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten der beiden Parameter Fülle und Scheitel /JEN 11/. Schwarz durchgezogen sind die Linien gleicher Überschreitenswahrscheinlichkeit für die Kombination aus Scheitelwasserstand und Sturmflutfülle dargestellt.	57
Abb. 3-10:	Ergebnis des ProGumbel-Ansatzes für den Pegel E. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.....	58
Abb. 4-1:	Gefährdung durch Winterstürme in Deutschland, maximale Sturmböen für eine Wiederkehrperiode von 5 Jahren /CED 13/.....	67
Abb. 4-2:	Treibgutrückstände zeigen den Wasserstand am Zaun des Kernkraftwerkes Le Blayais /RIS 10/.....	74

Abb. 4-3:	Windzonenkarte für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, EC1 NA /DIN 10b/ (Werte gelten für Geländekategorie II)	77
Abb. 4-4:	Geländekategorien nach /DIN 10b/.....	78
Abb. 4-5:	Schematischer Nachweisgang nach DIN 1055-4 von 2005 /DIN 05a/.....	79
Abb. 4-6:	Relief in der Umgebung des Referenzstandortes (roter Kreis) /DWD 13a/84	
Abb. 4-7:	Ergebnisse der Modellberechnungen zur räumlichen Verteilung des Betrags und der Richtung der Grundwindgeschwindigkeit in der Umgebung des Referenzstandortes, dargestellt für den Sektor der maximalen Windgeschwindigkeit (Anströmrichtung 270°, 10 m über Grund) /DWD 13a/	88
Abb. 4-8:	Extremwindklimatologien für verschiedene mittlere Wiederkehrintervalle am Referenzstandort (10 m Höhe über Grund) ermittelt auf Basis der Windmessdaten von vier umliegenden DWD-Stationen /DWD 13a/.....	89
Abb. 5-1:	Gemessener Druckabfall im Zentrum eines F4-Tornados /LEE 04/	94
Abb. 5-2:	Tornadohäufigkeit aller Kategorien pro Jahr und 10000 km ² /TDD 13/...	99
Abb. 5-3:	Häufigkeitsverteilung einzelner Tornado-Kategorien /TDD 13/.....	100

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1:	European Macroseismic Scale 1998 (European Seismological Commission) /GRU 98/	6
Tab. 2-2:	Teile der KTA 2201 „Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen“ und Überarbeitungsstand	18
Tab. 2-3:	Geschichtliche Entwicklung wichtiger Teile der Deutschen Erdbebennormung im Bauwesen.....	20
Tab. 3-1:	Abflussmengen am Pegel E nach /JEN 11/.....	60
Tab. 4-1:	Windstärke gemäß Beaufort-Skala /DWD 13/, /MGD 13/	64
Tab. 4-2:	Vereinfachte Klassifizierung zur Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung in Anlehnung an /KRA 08/.....	71
Tab. 4-3:	Meldepflichtige Ereignisse in Deutschland infolge großräumiger Windeinwirkung	71
Tab. 4-4:	Internationale Ereignisse infolge großräumiger Windeinwirkung.....	73
Tab. 4-5:	Geschichtliche Entwicklung der Deutschen Windnorm	76
Tab. 5-1:	Vergleich der Fujita- und Torro-Skala. Die beschriebenen Schadensbilder sind /TOR 13/ entnommen und exemplarisch zu verstehen.	95

1 Einleitung

Die deutschen Kernkraftwerke wurden entsprechend dem zum Zeitpunkt ihrer Errichtung jeweils gültigen Stand des kerntechnischen und konventionellen Regelwerks gegen Einwirkungen von außen (EVA) ausgelegt /BMU 04/. Diese Auslegung erfolgte im Allgemeinen auf deterministischer Basis. Ein erneuter Nachweis hinsichtlich des Schutzes gegen EVA ist grundsätzlich auch im Rahmen der (periodischen) Sicherheitsüberprüfungen (SÜ) /BMU 96/ und /BMU 05/ zu erbringen. Allerdings wurden hierzu nicht immer neue Gefährdungsanalysen für die Standorte erstellt. In Anbetracht der Tatsache, dass sich der internationale Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich EVA seit der Errichtung der deutschen Kernkraftwerke erheblich weiter entwickelt hat, stellt sich die Frage, ob die Standortgefährdungsanalysen, die für die deutschen Kernkraftwerke hinsichtlich solcher Einwirkungen durchgeführt wurden, methodisch dem heutigen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Sofern dies gewährleistet ist, kann davon ausgegangen werden, dass eine sachgerechte Auslegung auf Basis der so ermittelten Bemessungswerte auch in Zukunft einen hinreichenden Schutz gegen Einwirkungen von außen gewährleistet.

Da anlagenspezifische Untersuchungen für alle deutschen Kernkraftwerke mit einem unverhältnismäßig hohen Aufwand verbunden wären, beschränken sich die hier vorgestellten Betrachtungen auf eine generische Bewertung der heute verfügbaren Methoden zur Ermittlung der Standortgefährdung (im Folgenden „Gefährdungsermittlung“ genannt) im Hinblick auf EVA. Die aktuellen methodischen Ansätze zur Gefährdungsermittlung wurden jeweils anhand von Referenzstandorten demonstriert. Diese Referenzstandorte wurden so ausgewählt, dass einerseits die Verfügbarkeit aller für die Gefährdungsermittlung benötigten Informationen gewährleistet war und andererseits die Standorte als für die jeweils zu untersuchende Einwirkung repräsentativ betrachtet werden können. Da das Ziel der Arbeiten nicht eine standortspezifische Überprüfung der Auslegung gegen EVA war, sondern die generische Bewertung der heute verfügbaren Methoden der Gefährdungsermittlung im Vergleich zu den bisher angewandten, wurden die Referenzstandorte weitgehend anonymisiert.

Der Schwerpunkt der hier vorgestellten Untersuchungen lag auf naturbedingten Einwirkungen. Zivilisatorische Einwirkungen, die ebenfalls Gegenstand des Forschungsvorhabens 3609R01350 waren, werden in /TOM 13/ und /FOR 13/ behandelt.

Aus dem breiten Spektrum naturbedingter Einwirkungen wurden für diese Untersuchungen die drei führenden Einwirkungsarten ausgewählt:

- Erdbeben,
- extreme Wasserstände und
- Wind (großflächige Windeinwirkungen und Tornados).

Diese Einwirkungen werden in den folgenden Kapiteln jeweils separat behandelt. Um einen Eindruck von der Bedeutung der Einwirkungen für deutsche Standorte zu vermitteln werden neben einigen grundlegenden Informationen zunächst die allgemeine Gefährdungssituation hinsichtlich der jeweiligen Einwirkung sowie in Deutschland aufgetretene markante Extremereignisse dargestellt. Danach folgen einige Beispiele aus der internationalen Betriebserfahrung von Kernkraftwerken mit derartigen Einwirkungen, welche die möglichen sicherheitstechnischen Auswirkungen auf Kernkraftwerke veranschaulichen.

Die eigentliche Behandlung der Methodik zur Ermittlung der Standortgefährdung gliedert sich dann in zwei Hauptteile: die Beschreibung der bisher üblichen Vorgehensweise (meist in Anlehnung an die einschlägigen Regelwerksanforderungen) und die Darstellung der heutigen Möglichkeiten zur Gefährdungsermittlung. Auf dieser Grundlage wird anschließend bewertet, ob die neuen Methoden aus sicherheitstechnischer Sicht relevante zusätzliche Erkenntnisse liefern und daher in die Praxis der Standortgefährdungsermittlung Eingang finden sollten oder ob die bisher üblichen Verfahren ausreichen, um den sicherheitstechnischen Erfordernissen Rechnung zu tragen. Sofern die Notwendigkeit zusätzlicher Untersuchungen hinsichtlich bestimmter methodischer Aspekte der Gefährdungsermittlung gesehen wird, wird auf diesen weitergehenden Forschungsbedarf hingewiesen.

Aufgrund der deutlich unterschiedlichen sicherheitstechnischen Bedeutung der Einwirkungen Hochwasser und Niedrigwasser, liegt der Schwerpunkt des Kapitels zu extremen Wasserständen klar auf der Einwirkung Hochwasser. Die Einwirkung Niedrigwasser wird jedoch der Vollständigkeit halber ebenfalls angesprochen.

Um dem unterschiedlichen Charakteristik von großflächigen Windeinwirkungen (also Windereignissen, die im Allgemeinen als Stürme bezeichnet werden) und Tornados Rechnung zu tragen, werden diese beiden Einwirkungen in jeweils separaten Kapiteln behandelt.

2 Erdbeben

2.1 Darstellung der Einwirkung Erdbeben

2.1.1 Grundlagen

Erdbeben gehören zu den naturbedingten Einwirkungen, obgleich sie auch durch menschliches Eingreifen induziert werden können (Kaverneneinsturz, Explosionen etc.). In der Fachliteratur finden sich verschiedene Definitionen für die Einwirkung Erdbeben. Gemein hin lässt sich zusammenfassen, dass darunter Erschütterungen in der Erdkruste zu verstehen sind. Diese Erschütterungen können durch einen plötzlichen Spannungsabbau ausgelöst werden, also durch Bruchvorgänge an geologischen Verwerfungen. Nach dem Verständnis des USGS erweitern sich die Ursachen gemäß folgender Definition:

“Earthquake is a term used to describe both sudden slip on a fault, and the resulting ground shaking and radiated seismic energy caused by the slip, or by volcanic or magmatic activity, or other sudden stress changes in the earth.” /USG 13/

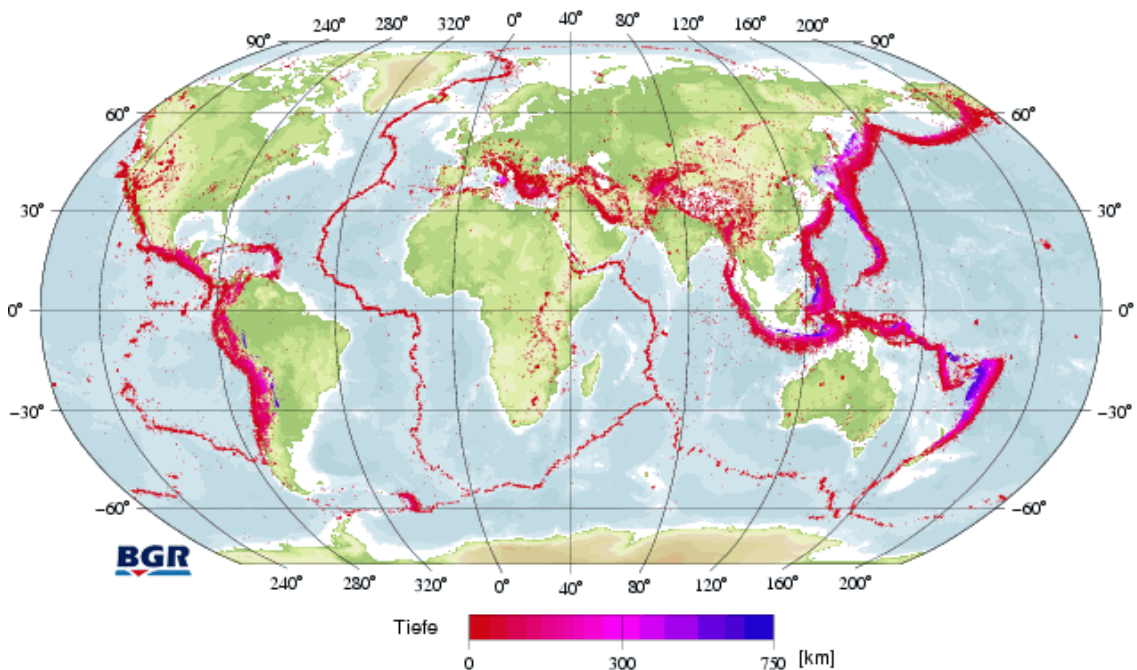


Abb. 2-1: Weltweit registrierte Erdbeben seit 1954 mit einer Magnitude größer 4,0 und deren Tiefen /BGR 11/

Mit dieser Definition werden auch vulkanische und Magmaaktivitäten sowie diverse Gründe, die zu plötzlichen Spannungsänderungen in der Erde führen und Bodenerstürterungen zur Folge haben, berücksichtigt.

Die meisten Erdbeben werden jedoch durch die Plattentektonik verursacht. Man spricht dann von sogenannten „tektonischen Erdbeben“. Diese ereignen sich vorrangig an den Grenzen der tektonischen Platten, was in **Abb. 2-1** deutlich sichtbar wird.

Die Plattenbewegung findet aufgrund der Mantelkonvektion, das sind langsam ablaufende Umwälzungen (Konvektionsströme) im Erdmantel, statt. Durch seine geringe Dichte steigt dabei warmes Magma auf, und kühleres Magma mit größerer Dichte sinkt nach unten ab, ebenso die schwere sich an den Plattenrändern unterschiebende Erdkruste (vergl. **Abb. 2-2**). Dort kommt es zu Spannungen und Brüchen, somit zur Freisetzung von Energie.

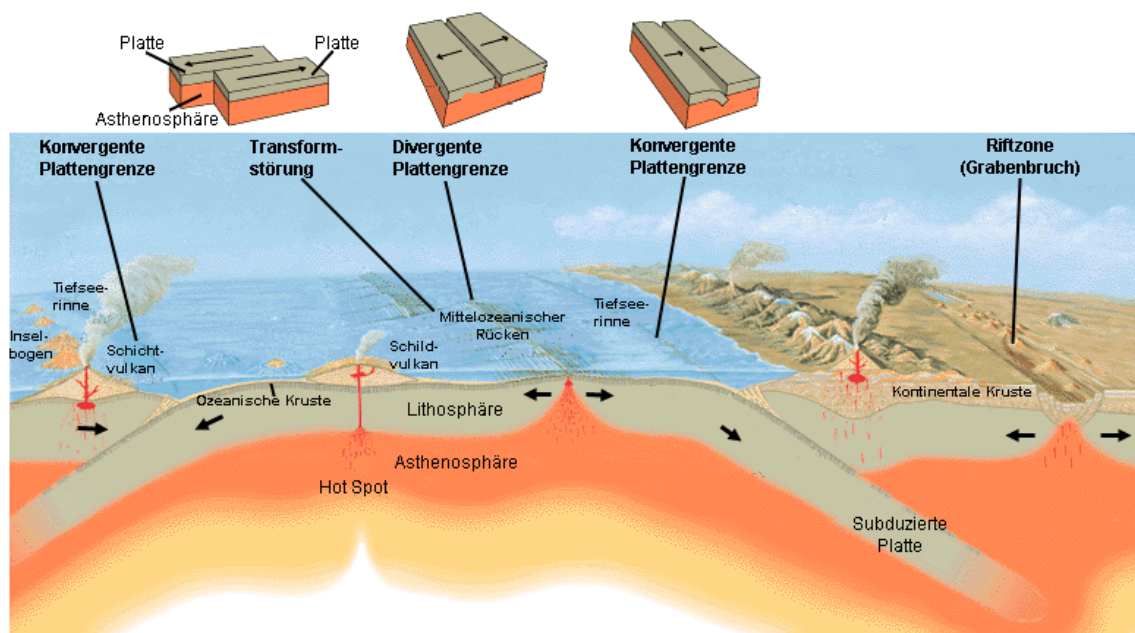


Abb. 2-2: Plattenrandmechanismen /USG 99/

Die in einem Erdbeben freiwerdende Energie breitet sich in Form von Wellen ausgehend vom Erdbebenherd aus. Auf diesen Prozess wird im Folgenden noch eingegangen, zunächst sollen jedoch wichtige Begrifflichkeiten behandelt werden, zu deren Erläuterung **Abb. 2-3** dient.

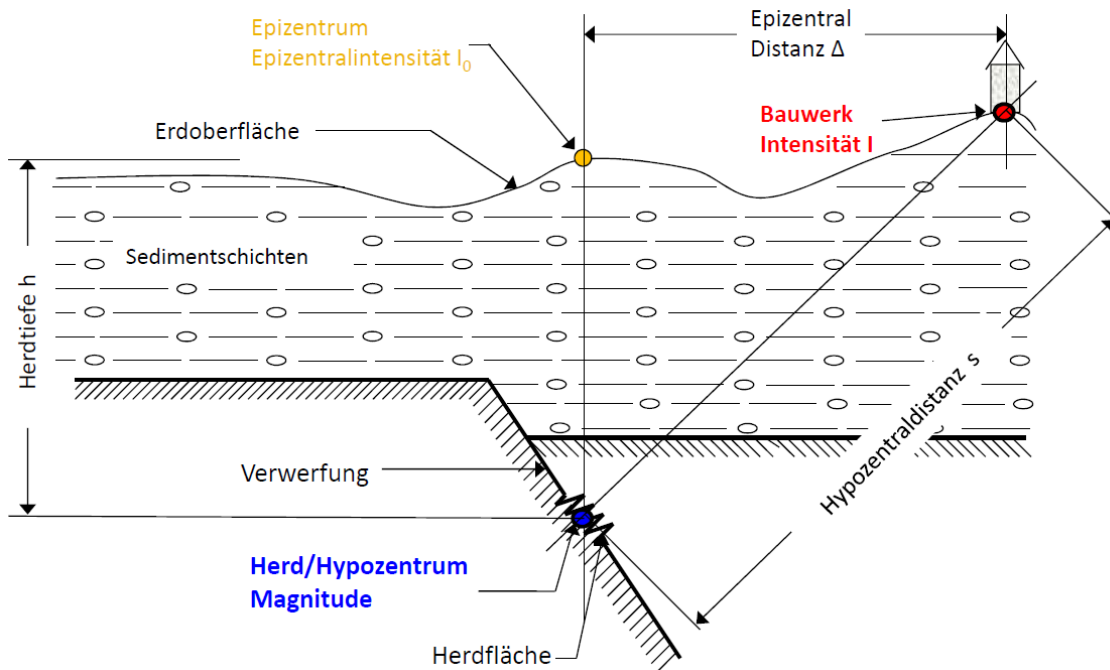


Abb. 2-3: Übersicht zum Zusammenhang zwischen Magnitude und Intensität

Erdbeben werden vorrangig durch zwei Größen beschrieben: Dies ist zum einen die Magnitude, welche als Maß der bei einem Erdbeben im Herd in Form elastischer Wellen abgestrahlten Energie („Erdbebenenergie“) die Stärke des Bebens an sich beschreibt. Es existiert eine Vielzahl von Magnitudenskalen. Die durch die Medien bekannteste Skala ist die Richterskala M_L . Sie wird auch als Lokalbeben-Magnitude bezeichnet. Allerdings kann sie als wissenschaftlich überholt betrachtet werden und gilt nur für Epizentraldistanzen bis zu 500 km. Weitere modernere Skalen sind:

- die Momenten-Magnituden-Skala M_W (Skalenende liegt bei einem Wert von 10,6; $M_W = 2/3 \log (M_0) - 6.0$) und
- das Seismische Herdmoment M_0 , das die Energiefreisetzung im Erdbebenherd beschreibt.

Zum anderen wird die (makroseismische) Intensität verwendet, um die Auswirkungen eines Erdbebens an einem beliebigen Punkt der Erdoberfläche phänomenologisch zu beschreiben. Intensitätsskalen sind Ordinalskalen mit oftmals 12 Stufen, welche die örtliche Schadenswirkung bzw. die Wahrnehmung durch den Menschen ausdrücken.

Tab. 2-1: European Macroseismic Scale 1998 (European Seismological Commission)

/GRU 98/

EMS-98 Intensität	Definition	Beschreibung der maximalen Wirkungen (stark verkürzt)
I	nicht fühlbar	Nicht fühlbar.
II	kaum bemerkbar	Nur sehr vereinzelt von ruhenden Personen wahrgenommen.
III	schwach	Von wenigen Personen in Gebäuden wahrgenommen. Ruhende Personen fühlen ein leichtes Schwingen oder Erschüttern.
IV	deutlich	Im Freien vereinzelt, in Gebäuden von vielen Personen wahrgenommen. Einige Schlafende erwachen. Geschirr und Fenster klirren, Türen klappern.
V	stark	Im Freien von wenigen, in Gebäuden von den meisten Personen wahrgenommen. Viele Schlafende erwachen. Wenige werden verängstigt. Gebäude werden insgesamt erschüttert. Hängende Gegenstände pendeln stark, kleine Gegenstände werden verschoben. Türen und Fenster schlagen auf oder zu.
VI	leichte Gebäudeschäden	Viele Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Einige Gegenstände fallen um. An vielen Häusern, vornehmlich in schlechterem Zustand, entstehen leichte Schäden wie feine Mauerrisse und das Abfallen von z. B. kleinen Verputzteilen.
VII	Gebäudeschäden	Die meisten Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Möbel werden verschoben. Gegenstände fallen in großen Mengen aus Regalen. An vielen Häusern solider Bauart treten mäßige Schäden auf (kleine Mauerrisse, Abfall von Putz, Herabfallen von Schornsteinteilen). Vornehmlich Gebäude in schlechterem Zustand zeigen größere Mauerrisse und Einsturz von Zwischenwänden.
VIII	schwere Gebäudeschäden	Viele Personen verlieren das Gleichgewicht. An vielen Gebäuden einfacher Bausubstanz treten schwere Schäden auf d.h. Giebelteile und Dachgesimse stürzen ein. Einige Gebäude sehr einfacher Bauart stürzen ein.
IX	zerstörend	Allgemeine Panik unter den Betroffenen. Sogar gut gebaute gewöhnliche Bauten zeigen sehr schwere Schäden und teilweisen Einsturz tragender Bauteile. Viele schwächere Bauten stürzen ein.
X	sehr zerstörend	Viele gut gebaute Häuser werden zerstört oder erleiden schwere Beschädigungen.
XI	verwüstend	Die meisten Bauwerke, selbst einige mit gutem erdbebengerechtem Konstruktionsentwurf und -ausführung, werden zerstört.
XII	vollständig verwüstend	Nahezu alle Konstruktionen werden zerstört.

Häufig verwendete Intensitätsskalen sind z.B. die Medwedew-Sponheuer-Kárník-Skala (MSK) von 1964, oder die weitgehend gleichartige jedoch neuere European Macro-seismic Scale (EMS) von 1998 /GRU 98/. Letztere enthält einige Ergänzungen, insbesondere eine Aufschlüsselung der Schadensbilder nach Vulnerabilitätsklassen der betroffenen Gebäude. Die Kurzform ist nachfolgend in **Tab. 2-1** dargestellt.

Über dem Hypozentrum sind die Intensitäten am größten und werden daher maximale oder Epizentralintensität I_0 genannt. Die Intensitäten nehmen mit zunehmender Entfernung vom Epizentrum in Abhängigkeit von der Tiefe des Bebenherdes und der Untergrundbeschaffenheit ab.

Hinsichtlich der Erdbebenausbreitung ist anzumerken, dass durch ein Erdbeben unmittelbar zunächst P-Wellen und S-Wellen erzeugt werden. Sie breiten sich vom Hypozentrum kugelförmig in alle Richtungen aus und werden daher auch Raumwellen (vergl. **Abb. 2-4**) genannt. Diese regen die sogenannten Oberflächenwellen (vergl. **Abb. 2-5**) an, welche sich nicht kugelförmig ausbreiten, sondern an der Erdoberfläche geführt verlaufen.

Die P-Wellen, oder auch Primärwellen, sind die schnellsten Wellen. Bei dieser Wellenart handelt es sich um Longitudinalwellen, oder auch sogenannte Kompressionswellen. Sie breiten sich in festen und flüssigen Medien aus und können so auch den quasi flüssigen Erdkern durchdringen. Ihre Energie wird von Bodenteilchen zu Bodenteilchen übertragen, indem diese sich anstoßen. Die Teilchen werden dabei gedrückt und gezogen. Ihre Bewegung erfolgt also in Ausbreitungsrichtung der Welle (vergl. **Abb. 2-4**).

Die S-Wellen oder Scherwellen haben ihren Namen davon, dass sie das Medium schieben und die Bodenteilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Aufgrund ihrer geringeren Ausbreitungsgeschwindigkeit gegenüber den P-Wellen werden sie auch als Sekundärwellen bezeichnet. Sie sind die zweiten Wellen, die bei einem Erdbeben an einem Standort eintreffen. Da S-Wellen Scherwellen sind, können sie sich nur in einem festen Medium mit entsprechendem Scherwiderstand ausbreiten. Folglich können sie den flüssigen Erdkern nicht durchdringen. In der Vulkanologie kann das Fehlen dieser Wellen auf einen Magmakörper hindeuten. Diese Wellen bewegen den Boden quer zur Ausbreitungsrichtung, wie in **Abb. 2-4** dargestellt.

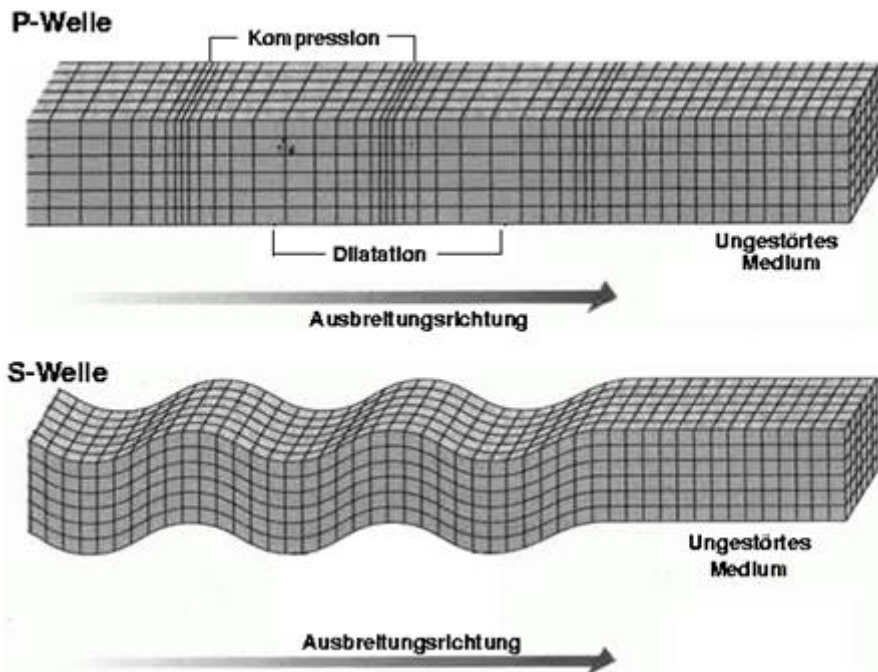


Abb. 2-4: Raumwellen /LMU 08/

Die Oberflächenwellen ähneln den Wellen, die man auf Wasseroberflächen beobachten kann. Sie schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Die Amplitude dieser Wellen nimmt mit der Tiefe stark ab. Da sie aber an der Oberfläche laufen, sind sie für die meisten Zerstörungen an Gebäuden verantwortlich.

Love-Wellen, sind nach dem Britischen Mathematiker Love benannt, welcher 1911 als Erster ein mathematisches Modell für die Ausbreitung dieser Wellen aufstellte. Sie sind die schnellsten Oberflächenwellen, breiten sich jedoch langsamer als die S-Wellen aus. Die Bodenbewegung erfolgt in horizontaler Richtung gemäß **Abb. 2-5**.

Die zweite wichtige Form der Oberflächenwellen sind die Rayleigh-Wellen, benannt nach Lord Rayleigh. Er sagte bereits 1855 die Existenz dieser Wellen mathematisch vorher. Bei Rayleigh-Wellen rollt der Boden in einer elliptischen Bewegung ähnlich wie Meereswellen. Die Bodenteilchen werden sowohl nach oben und unten, als auch in Ausbreitungsrichtung der Welle hin und her bewegt. Die meisten gespürten Erschütterungen sind in der Regel Rayleigh-Wellen. Ihre Amplitude kann wesentlich größer werden als die der anderen Wellenarten.

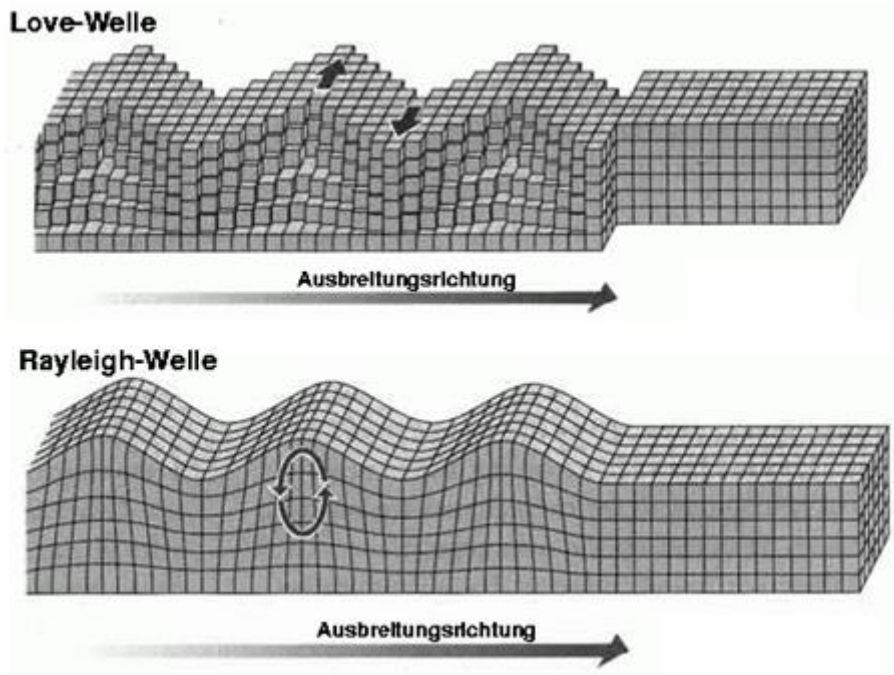


Abb. 2-5: Oberflächenwellen /LMU 08/

2.1.2 Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch Erdbeben- einwirkung

Die Karte in **Abb. 2-6** zeigt die seismotektonischen Regionen Deutschlands, sowie Epizentren bekannter Erdbeben im Zeitraum von 800 AD bis 2004. Hierbei sei angemerkt, dass die Klasse der Erdbeben mit Epizentralintensitäten I_0 kleiner als 4,5 auch nicht fühlbare Erdbeben einschließt. Die Darstellung verdeutlicht, dass die Erdbebenaktivität in Deutschland nicht gleichmäßig verteilt ist, sondern sich grob auf die folgenden vier Zonen konzentriert:

- Rheingebiet (Niederrheinische Bucht, Mittelrheingebiet und Oberrheingraben),
- Schwäbische Alb,
- Ostthüringen und Westsachsen mit dem Vogtländischen Schwarmbebengebiet und
- die Alpen.

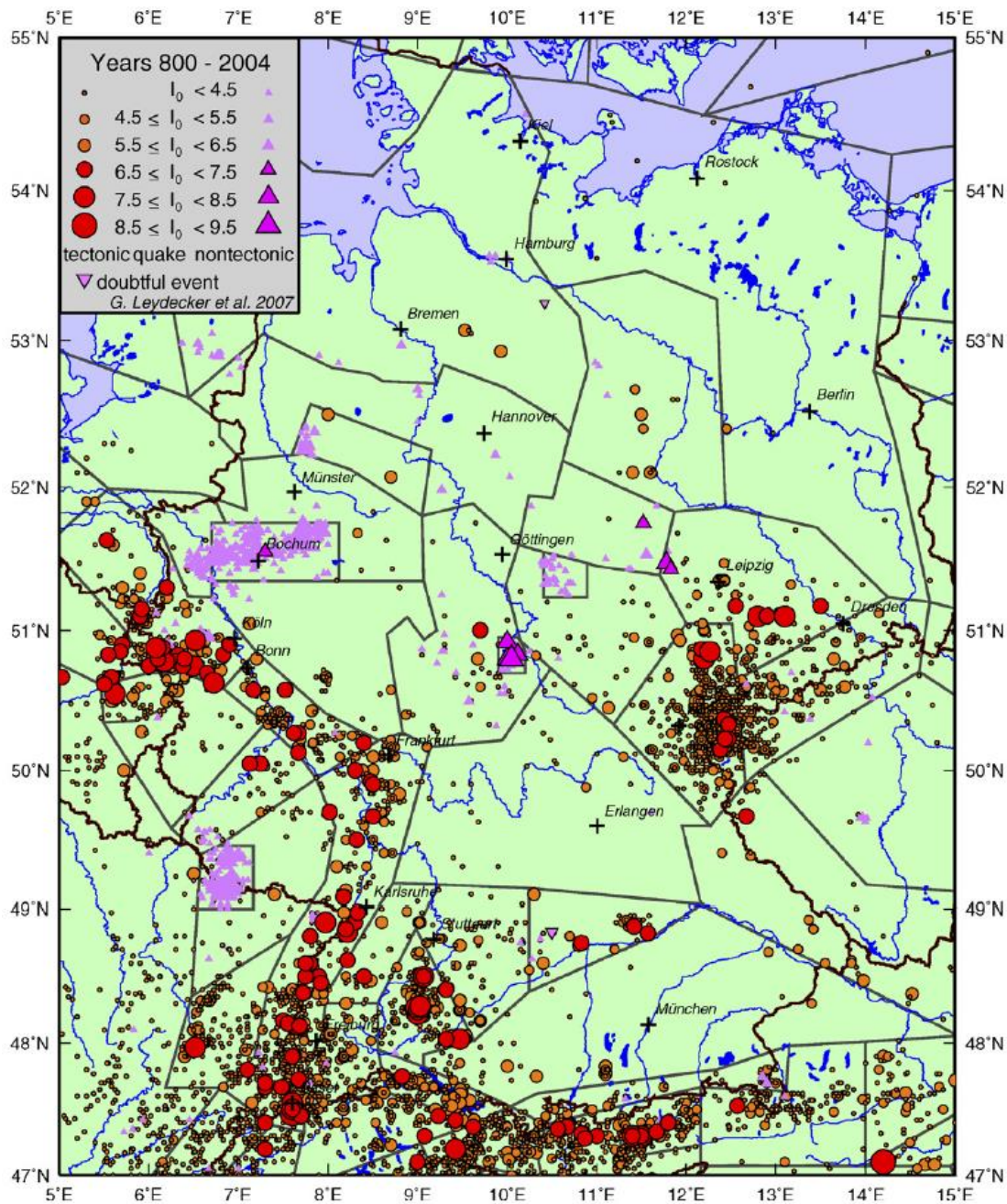


Abb. 2-6: Karte der Epizentren der Erdbeben zwischen 800 und 2004 sowie seismotektonische Regionen (I_0 ist die Epizentralintensität; $I_0 < 0,45$ enthält auch nicht spürbare Erdbeben) /LEY 08/

Gemäß /GRU 04/ ergibt sich aus den Beobachtungen die nachstehende Charakterisierung der seismisch aktiven Regionen: Die Seismizitätszone des Rheingebietes weist die höchste Erdbebenaktivität auf, die sich im Norden bis in den Raum Köln erstreckt und sich von dort weiter westlich bis in das niederländische Limburg und nach Belgien reicht. Darüber hinaus stellt der Raum Aachen-Düren einen Seismizitätsschwerpunkt im Niederrheingebiet dar. Im Mittelrheingebiet zeigt die Region um Koblenz die höchste

Bebenaktivität. Vom Raum Karlsruhe bis Mainz weist das nördliche Oberrheingebiet (d. h. im Gebiet Rheinstetten-Rastatt) einen weiteren Seismizitätsschwerpunkt auf. Auch zeigt der südliche Teil des Oberrheingrabens erhöhte Bebenaktivität im Gebiet Strasbourg und in seinem südlichen Teil. Schwerpunkt der Seismizitätszone der Schwäbischen Alb ist der Raum Albstadt. Diese Seismizitätszone setzt sich nördlich bis Tübingen fort. Das bebenaktivste Bundesland ist Baden-Württemberg mit Herdgebieten im Saulgau, im Südwesten von Donaueschingen und im Schwarzwald. Über Ostthüringen und den westlichen Teilen Sachsens erstreckt sich ein weiteres Bebengebiet vom Vogtland über den Raum Gera bis nach Leipzig. Obgleich die übrigen Gebiete Deutschlands nicht völlig frei von Erdbeben sind, weisen sie aber nur eine äußerst geringe Bebenaktivität auf.

In Deutschland liegen die Erdbebenherde vorrangig in einem Tiefenbereich von 5 bis 20 km. Erdbeben im Bereich der historisch größten Magnituden ($M_L=6,1$; $M_w=5,8$) besitzen hierzulande eine mittlere Wiederholungsperiode von ca. 100 Jahren /GRU 04/. Mitunter sind sehr weitreichende Erschütterungswirkungen von Erdbeben außerhalb Deutschlands festzustellen. Als ein Beispiel ist hier das Roermond-Erdbeben zu nennen, auf welches im nachfolgenden Kapitel u.a. eingegangen wird.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass hinsichtlich internationaler Vergleiche in Deutschland eine geringe bis mittlere Erbebengefährdung vorliegt, welche standortbezogen variiert.

2.1.3 Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland

2.1.3.1 Basel 1356

Am 18. Oktober 1356 erreichten gegen 4 Uhr nachmittags erste zerstörende Erdbebenstöße (M_w 6,2 /SSS 04/) Basel, welche in Kombination mit den bis Mitternacht folgenden Serien von Erschütterungen und den resultierenden Feuern die Stadt zum Großteil zerstörten. Die maximale Intensität I_0 wird zumeist mit IX (MSK) angenommen. Für das Hauptbeben wurde die Magnitude M_L nachträglich auf ca. 6,3 /GRU 04/ bis 6,6 /AHO 92/ abgeschätzt. Das Epizentrum lag einige Kilometer südlich von Basel unter dem Dorf Rheinach. Der Herd ist die s.g. Rheinach-Spalte /SSS 04/.

Die Schätzung der Todesopfer des Basel-Erdbebens kann durchschnittlich mit 300 angenommen werden. Diese recht geringe Zahl ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass viele nach dem Vorbeben am Nachmittag aus der Stadt geflüchtet waren. Es resultierten zahlreichen eingestürzte Häusern und Kirchen in Basel /GRU 04/. Gebäudeschäden entsprechend einer Intensität VI (MSK) wurde bis zu mehreren hundert Kilometern Epizentraldistanz berichtet /SSS 04/.

Nach /AHO 92/ handelt es sich somit um das stärkste Erdbeben, was in den letzten 1000 Jahren in Mitteleuropa nördlich der Alpen beobachtet wurde.

2.1.3.2 Albstadt 1978

Am 03.09.1978 um 06:09 Uhr (MEZ) erschütterte das Hauptbeben den Raum Albstadt in Baden-Württemberg mit einer maximalen Intensität von VII bis VIII (MSK) und einer Magnitude M_L von 5,7 /GRU 04/. Der oberflächennahe Herd lag unterhalb des Raichbergs, welcher 1,5 km von Onstmettingen, einem Ort des Stadtverbandes Albstadt, entfernt liegt /KWU 80/. Der Stadtverband besteht u. a. aus den Orten Onstmettingen, Tailfingen und Ebingen. In **Abb. 2-7** ist eine Projektion der Herdfläche auf das Stadtgebiet dargestellt. Die ungefähr süd-südwestlich verlaufende Herdfläche hatte eine Länge von 4,5 km und eine Tiefenstreckung von 3,2 km /KWU 80/. Bei dieser linkslateralen Verschiebung bewegten sich die westliche Scholle nach Süden und die östliche nach Norden. Bedingt durch den nach Süden gerichteten Bruchvorgang wurde ein erheblicher Teil der Bebenenergie nach Süden abgestrahlt, weshalb es dort zu größeren Schäden kam.

Die in **Abb. 2-7** dargestellte Herdfläche stellt somit gleichzeitig die Längsachse der Schadenszone dar, da sich die Schäden auf ein 1 km breites Band konzentrieren. Außerhalb dieses Bereichs war ein schneller Abfall der Intensität zu beobachten.

Obgleich keine Todesopfer zu beklagen waren, hatte das Erdbeben 6850 beschädigte Gebäude zur Folge, sowie einen Gesamtschaden, der auf ca. 275 Mio. DM beziffert wurde /GRU 04/. Etwa drei Viertel der Gebäudeschäden wurden an Nachkriegsbauten festgestellt, während an gut konstruierten Gebäuden neuerer Bauart keine oder nur geringe Schäden entstanden. Fast alle Gebäudeschäden wurden an Mauerwerk beobachtet.

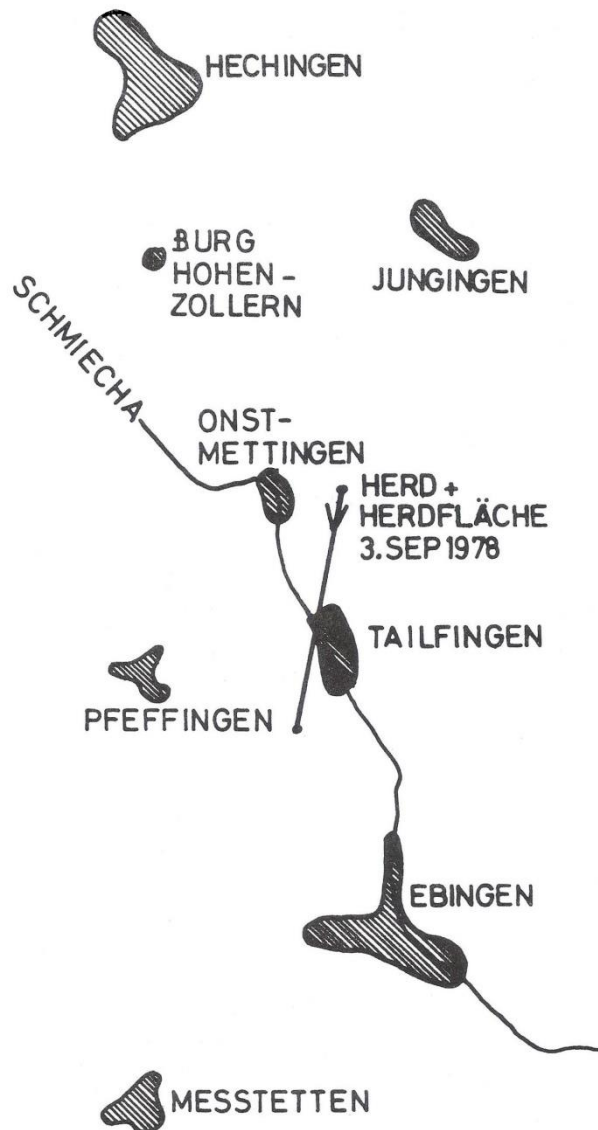


Abb. 2-7: Herdgebiet des Albstadt-Erdbebens /KWU 80/

2.1.3.3 Roermond 1992

Am 13. April 1992 um 03:20 Uhr ereignete sich im Nordwesten der Niederrheinischen Bucht das Roermond-Erdbeben /DGE 92/. Das Epizentrum lag ca. 4 bis 5 km südwestlich der Grenzstadt Roermond und das Hypozentrum befand sich in ca. 18 km Tiefe. Das Erdbeben dauerte 15 Sekunden, erreichte einen Magnitudenwert M_L von 5,9 auf der Richterskala und stellt damit das energiereichste Erdbeben der Niederrheinischen Bucht seit 200 Jahren dar /AHO 92/. Wesentlicher Entstehungsgrund war der Abbau einer Zugspannung in Südwest-Nordost-Richtung, d.h. quer zum Verlauf des Rurtalgrabens, welcher heute noch unter Einfluss dieses tektonischen Spannungsfeldes absinkt /AHO 92/. Die Niederrheinische Bucht ist eines der aktivsten Erdbebengebiete

Mitteleuropas und liegt auf einer Trennfuge, die ganz Europa von Norden nach Süden durchzieht.

Das Erdbeben hatte eine Epizentralintensität von VII (MSK). Wie in **Abb. 2-8** dargestellt, wurden schwache Erschütterungen bis Berlin, London, München und Zürich verspürt.

Aufgrund des Erdbebens kam es zu einem Todesopfer und mehr als 30 Verletzten allein in Nordrhein-Westfalen und 7200 beschädigten Gebäuden. Der finanzielle Schaden belief sich gemäß /GRU 04/ auf ca. 250 Mio. DM, und verteilte sich zu etwa gleichen Teilen zwischen Deutschland und den Niederlanden. Aufgrund der relativ großen Herdtiefe blieben die Schäden somit insgesamt moderat.

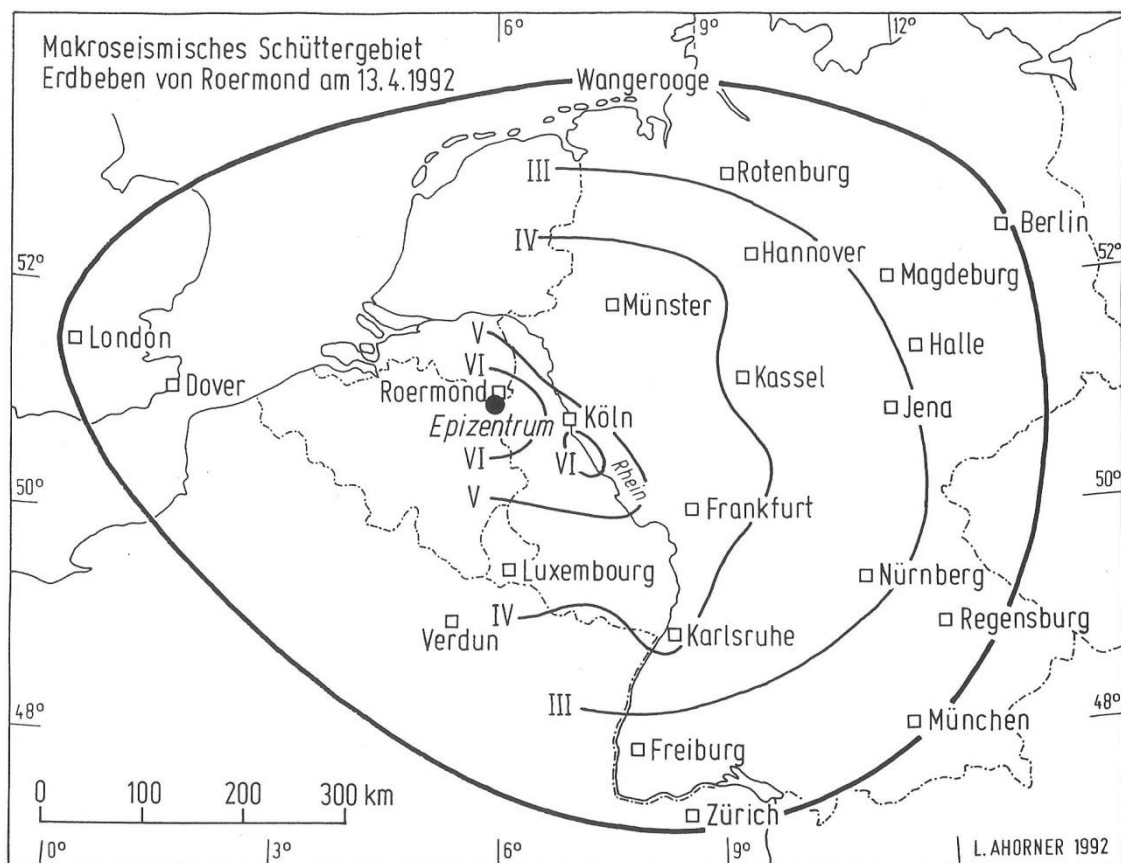


Abb. 2-8: Makroseismisches Schüttergebiet des Roermond-Erdbebens, Intensität nach MSK-Skala (Isoseisten) /AHO 92/

2.2 **Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu Erdbeben**

Innerhalb der vergangen 20 Jahre hat es in Deutschland lediglich ein meldepflichtiges Ereignis gegeben, bei dem ein Erdbeben eine essentielle Rolle spielte. Dabei handelte es sich um Nr. 1992/059 vom 13.4.1992, KWB-A (Biblis), „Frühes Ansprechen der seismischen Grenzwertmelder bei einem Erdbeben“ /BMU 93/, das sich im Zusammenhang mit dem vorstehend beschriebenen Roermond-Erdbeben ereignete:

Zwei von vier Grenzwertmeldern, mit einem Einstellwert von 45 cm/sec^2 , sprachen um 03:21 Uhr an. Die Anlage wurde daraufhin gemäß Betriebshandbuch abgefahren. Alle weiteren Grenzwertmelder und Trigger der Blöcke A und B sprachen korrekterweise nicht an. Die Ursache für das Fehlansprechen des einen Grenzwertmelders lag in der stark frequenzabhängigen Arbeitsweise des betroffenen Bautyps. So sinkt der Ansprechwert bei abnehmender Frequenz. Die ursprüngliche Einstellung von 45 cm/sec^2 erfolgte bei einer Frequenz von 3 Hz. Bei der aufgetretenen Beschleunigung am 13.04.92 war eine Frequenz von 2 Hz dominierend. Bei der Überprüfung wurde ein Alterungseffekt festgestellt, der ebenfalls zur Reduzierung des Ansprechwertes führte. Schlussendlich war die Fehlanregung durch die Überlagerung beider Effekte bedingt. Die Sicherheit der Anlage wurde durch das Ereignis nicht beeinflusst.

Aus dem Nachbarland Frankreich sind keine erdbebenbedingten Ereignisse in Kernkraftwerken bekannt /RIS 10/.

Hinsichtlich starker Erdbeben ist aus Japan das Ereignis vom 16.07.2007 im Kernkraftwerk Kashiwasaki-Kariwa zu nennen, bei welchem folgende nennenswerte Schäden auftraten: Erdverlegte Feuerlöschleitungen, die nicht erdbebensicher ausgelegt waren, brachen infolge des Erdbebens, insbesondere an Gebäudedurchführungen. Das austretende Wasser führte zu einer Überflutung, da es über das Erdreich und eine Gebäudedurchführung in ein Betriebsgebäude gelangte und sich dort sammelte (ca. 2000 m^3). Diese Schäden an den Feuerlöschleitungen führten auch zu einer stark eingeschränkten Löschwasserversorgung. Ein Eigenbedarfstransformator geriet durch Ölaustritt und Kurzschluss in Brand. Öl trat auch an weiteren Transformatoren aus. Es sammelte sich dort in den Auffangwannen. Bei drei Transformatoren gelangte es dann aber über erdbebenbedingte Risse in den Ölauffangwannen ins Erdreich.

In allen sieben Blöcken schwappte Wasser aus den Brennelementlagerbecken über den Beckenrand. Im Block 6 gelangte das übergelaufene Wasser ($1,6 \text{ m}^3$) über eine

undichte Durchführung in einen Kabelschacht, aus dem Kontrollbereich ins Meer. Im Maschinenhaus von Block 4 wurde ein Gummikompensator am Kondensator undicht. Meerwasser floss von dort in die unteren Stockwerke. Infolge des Erdbebens fiel die (inaktive) Wellendichtdampfversorgung der Turbine aus. Da der Lüfter jedoch weiter lief, wurde aktiver Dampf aus der Turbine angesaugt und zum Kamin gefördert.

Verankerungen von betrieblichen Komponenten in allen Blöcken waren locker oder zerstört. Einige dieser Anker wiesen Korrosion auf, was möglicherweise mit den Schäden in Zusammenhang steht. Am Brückenlaufkran im Reaktorgebäude von Block 6 wurden drei von vier Kardan-Antriebswellen beschädigt. Die Feuerschutztür im Zugang zum Notfallraum konnte zunächst nicht geöffnet werden, da diese nicht erdbebensicher ausgeführt war und sich verklemmt hatte.

Eine Überdruckentlastungsklappe zwischen Reaktorgebäude und Maschinenhaus des Blocks 3 öffnete fehlerhaft, so dass die Unterdruckhaltung im Reaktorgebäude beeinträchtigt war. Zwei weitere Überdruckentlastungsklappen in Maschinenhäusern funktionierten nicht mehr. Ein Brennelement des Blocks 5 (in Revision) wurde beim Entladen in einer 25 mm erhöhten Position vorgefunden. In einer Lagereinrichtung für feste Abfälle fielen mehrere hundert Fässer mit kontaminierten Betriebsabfällen um, was teilweise zum Austritt von Flüssigkeit aus den Fässern führte (insgesamt ca. 16 Liter). In zwei Blöcken fielen die Pumpen der Einlaufbauwerke für die Siebreinigung aus. Bei 63 von 67 installierten älteren Seismographen gingen Aufzeichnungen verloren, weil diese bei Nachbeben überschrieben wurden.

Insgesamt konzentrierten sich die Schäden im Kernkraftwerk Kashiwazaki-Kariwa jedoch auf nicht sicherheitstechnisch wichtige Komponenten, so dass das Erdbeben auch nicht zu einem Störfall führte. Ähnliches gilt auch für andere Erdbebenereignisse, die Kernkraftwerkstandorte betrafen. So führten z. B. die seismischen Erschütterungen durch das Tōhoku-Erdbeben vom 11. März 2011 in den betroffenen japanischen Kernkraftwerken (Tokai, Fukushima Diichi, Fukushima Daini und Onagawa) nach derzeitigem Kenntnisstand nicht zu relevanten Schäden an sicherheitstechnisch wichtigen Anlagenteilen und baulichen Anlagen, obwohl die registrierten Bodenbeschleunigung teilweise höher waren als die Bemessungswerte. Auch durch das Erdbeben vom 23. August 2011 im amerikanischen Bundesstaat Virginia, bei dem die Erdbebenauslegungswerte am Kernkraftwerksstandort North Anna überschritten wurden, kam es nur zu geringen Schäden an sicherheitstechnischen Einrichtungen.

Sofern man die nicht durch die seismischen Erschütterungen selbst sondern durch das Erdbebenfolgeereignis Tsunami bedingten Reaktorunfälle am japanischen Kernkraftwerkstandort Fukushima Daiichi außen vor lässt, kann man zusammenfassend feststellen, dass bisher keine schwerwiegenden sicherheitstechnischen Folgen an kern-technischen Anlagen aufgrund seismischer Erschütterungen zu beobachten waren. Dies gilt insbesondere für die gegen Erdbeben ausgelegten baulichen Strukturen. Bei diesen zeigen sich bedingt durch die Konservativitäten in der Bemessungskette im Allgemeinen nur geringe Schäden.

2.3 Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung

2.3.1 Allgemeines und Regelwerk

Heutzutage werden in Deutschland seismische Aktivitäten an über hundert Registrierorten erfasst. Historische Quellen, die teilweise aus detaillierten Berichten über Erdbebenwahrnehmungen und beobachtete Schäden in zumeist städtischen Chroniken bestehen, erlauben jedoch eine Erweiterung des Erdbebenkatalogs über den messtechnisch erfassten Zeitraum hinaus bis zu den Anfängen historischer Aufzeichnungen zu Beginn des 20. Jahrhunderts /GRU 04/. Informationen über die seismische Aktivität in noch früherer Zeit können aus paläoseismologischen Untersuchungen gewonnen werden, die bisher allerdings nur in geringem Umfang zur Verfügung stehen.

Als übergeordnetes Regelwerk im Hinblick auf Einwirkungen von außen waren in Deutschland früher die Sicherheitskriterien des BMI /BMI 77/ maßgebend, welche mittlerweile durch die Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke des BMU /BMU 12/ abgelöst wurden. Detailliertere Hilfestellung gibt der Kerntechnische Ausschuss (KTA) mit der Sicherheitstechnischen Regel KTA 2201 „Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen“, welche unter Federführung des Unterausschusses „Anlagen- und Bautechnik“ erarbeitet wurde.

Die KTA 2201 besteht aus 6 Teilen, von denen sich gegenwärtig noch 3 Teile in Überarbeitung befinden (vergl. **Tab. 2-2**). Für die Ermittlung der Standortgefährdung ist nur Teil 1 „Grundsätze“ von Relevanz. In der Fassung von 1990 /KTA 90/ wurde diese bislang in Abschnitt 2 „Festlegung des Bemessungserdbebens“ eingeordnet. Die neue Fassung von 2011 /KTA 11/ regelt die Ermittlung der Standortgefährdung im Abschnitt 3 „Festlegung der Erdbebeneinwirkung“.

Tab. 2-2: Teile der KTA 2201 „Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen“ und Überarbeitungsstand

KTA-Nr.	Titel	Status	Fassung	BAnz. Nr.	frühere Fassung	Best. Weitergültigkeit	Beginn (Änderungs-) Verfahren
2201.1	Teil 1: Grundsätze	R	2011-11	11 - 19.01.12	1975-06 1990-06	-	-
2201.2	Teil 2: Baugrund	R	2012-11	23.01.13	1982-11 1990-06	-	-
2201.3	Teil 3: Baulichen Anlagen	RE	2012-11	03.12.12	-	-	-
2201.4	Teil 4: Anlagenteile	R	2012-11	23.01.13	1990-06	-	-
2201.5	Teil 5: Seismische Instrumentierung	R	1996-06	216 a - 19.11.96	1977-06; 1990-06	19.06.01 07.11.06	10.11.09
2201.6	Teil 6: Maßnahmen nach Erdbeben	R	1992-06	36 a - 23.02.93	-	10.06.97 18.06.02	13.11.07

R – Regel

RE – Regelentwurf

ÄE – Regeländerungsentwurf

BAnz. - Bundesanzeiger

Stand: 09.03.13

Im Gegensatz zu den Normen im konventionellen Bauwesen, die sich bei der Ermittlung der Erdbebeneinwirkung auf vorab festgelegte Gefährdungskarten stützen, wird in KTA 2201 eine standortspezifische Ermittlung der Erdbebeneinwirkung gefordert, da nur mit dieser lokale Effekte ausreichend erfasst und somit das in der Kerntechnik erforderliche Sicherheitsniveau erreicht werden kann. Die Ermittlung der Erdbebeneinwirkung erfolgt dementsprechend für jeden Standort individuell durch seismologische Standortgutachten. Details zum Vorgehen nach KTA 2201.1 finden sich im Abschnitt 2.3.3.

Beim Vergleich mit internationalen Normen gibt es gelegentlich Unklarheiten hinsichtlich der Definition des Bemessungserdbebens, das im Englischen als Design Basis Earthquake (DBE) bezeichnet wird. In der aktuellen Version der KTA 2201.1 (Fassung 2011-11) wird das Bemessungserdbeben begrifflich wie folgt definiert:

„Das Bemessungserdbeben ist das für die Auslegung gegen seismische Einwirkungen maßgebende Erdbeben. Auf der Grundlage des Bemessungserdbebens werden die ingenieurseismologischen Kenngrößen festgelegt. Unter Bemessungserdbeben können auch mehrere maßgebliche Erdbeben oder die für die Auslegung maßgeblichen Bodenbewegungen am Standort der Anlage verstanden werden.“ /KTA 11/

Bis zum Jahr 1990 basierte die KTA 2201 auf zwei unterschiedlichen Erdbebenniveaus, dem „Auslegungserdbeben“ und dem „Sicherheitserdbeben“. Beim „Auslegungserdbeben“ sollte ein Weiterbetrieb der Anlage möglich sein. Dies entsprach dem heute international verwendeten „Operation Basis Earthquake“ (OBE). Beim „Sicherheitserdbeben“ war das Ziel die sichere Abschaltung der Anlage und das Halten in einem sicheren Zustand, was international mit dem „Safe Shutdown Earthquake“ vergleichbar ist.

In der Fassung der KTA 2201 von 1990 /KTA 90/ gab man das Konzept des „Auslegungserdbebens“ auf, da aus sicherheitstechnischer Sicht nur das „Sicherheitserdbeben“ relevant ist bzw. war. Das „Sicherheitserdbeben“ wurde in „Bemessungserdbeben“ umbenannt, und das „Inspektionsniveau“ eingeführt. Letzteres entspricht in etwa dem Niveau des „Auslegungserdbebens“, und ist nur noch hinsichtlich der nach einem Erdbeben durchzuführenden Maßnahmen (geregelt in KTA 2201.6) relevant. In der aktuellen Version der KTA 2201 wurde dieses Konzept beibehalten.

Die deterministische und probabilistische seismische Gefährdungsanalyse, die in der aktuell gültigen Version der KTA 2201.1 gefordert werden, werden im nachfolgenden Unterkapitel beschrieben. Zunächst wird auf die wichtigsten in Deutschland geltenden konventionellen Baunormen eingegangen, da sie auch für bauliche Anlagen in Kernkraftwerken zur Anwendung kommen, die nicht nach KTA 2201 ausgelegt werden müssen (bauliche Anlagen der Erdbebenklasse IIb).

Die Erdbebenbaunormen dienen zur Ermittlung der Erdbebenlasten für konventionelle Bauwerke (z. B. mittels Erdbebenzonen) und gleichzeitig zu deren Auslegung. Sie wurden im Laufe der Jahre geändert, um den Stand von Wissenschaft und Technik zu berücksichtigen. Mit Einführung der harmonisierten europäischen Baunormen, der sogenannten Eurocodes, wurde eine weitere Anpassungen der einschlägigen DIN-Normen erforderlich, da die Übernahme der Eurocodes in das nationale Normenwerk verpflichtend war. In der folgenden **Tab. 2-3** sind einige wichtige Normen chronologisch aufgelistet, die in Deutschland gültig sind bzw. waren.

Tab. 2-3: Geschichtliche Entwicklung wichtiger Teile der Deutschen Erdbebennormung im Bauwesen

Veröffent-licht	Norm	Referenz
07.2011	DIN EN 1998-5/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 5: Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte	/DIN 11b/
12.2010	DIN EN 1998-5: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 5: Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte; Deutsche Fassung EN 1998-5:2004	/DIN 10c/
01.2011	DIN EN 1998-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau	/DIN 11a/
12.2010	DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten	/DIN 10a/
04.2006	DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004	/DIN 06/
04.2005	DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten	/DIN 05/
04.1981	DIN 4149-1: Bauten in deutschen Erdbebengebieten; Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten	/DIN 81/
07.2004	DIN /DIN19700-10: Stauanlagen - Teil 10: Gemeinsame Festlegungen	/DIN 04/

Die neue deutsche Erdbebennormung zur Einwirkungsermittlung im allgemeinen Bauwesens setzt sich zusammen aus der DIN EN 1998-1:2010-12 „Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten“ (Eurocode 8) und der DIN EN 1998-1/NA:2011-01, dem s.g. Nationalen Anhang. Ihre bauaufsichtliche Einführung befindet sich gegenwärtig zwar noch im der Umsetzung, jedoch sind sie seit 2010-12 bzw. 2011-01 veröffentlicht. Im Nationalen Anhang findet sich beispielsweise auch die Karte der deutschen Erdbebenzonen (vergl. **Abb. 2-9**).

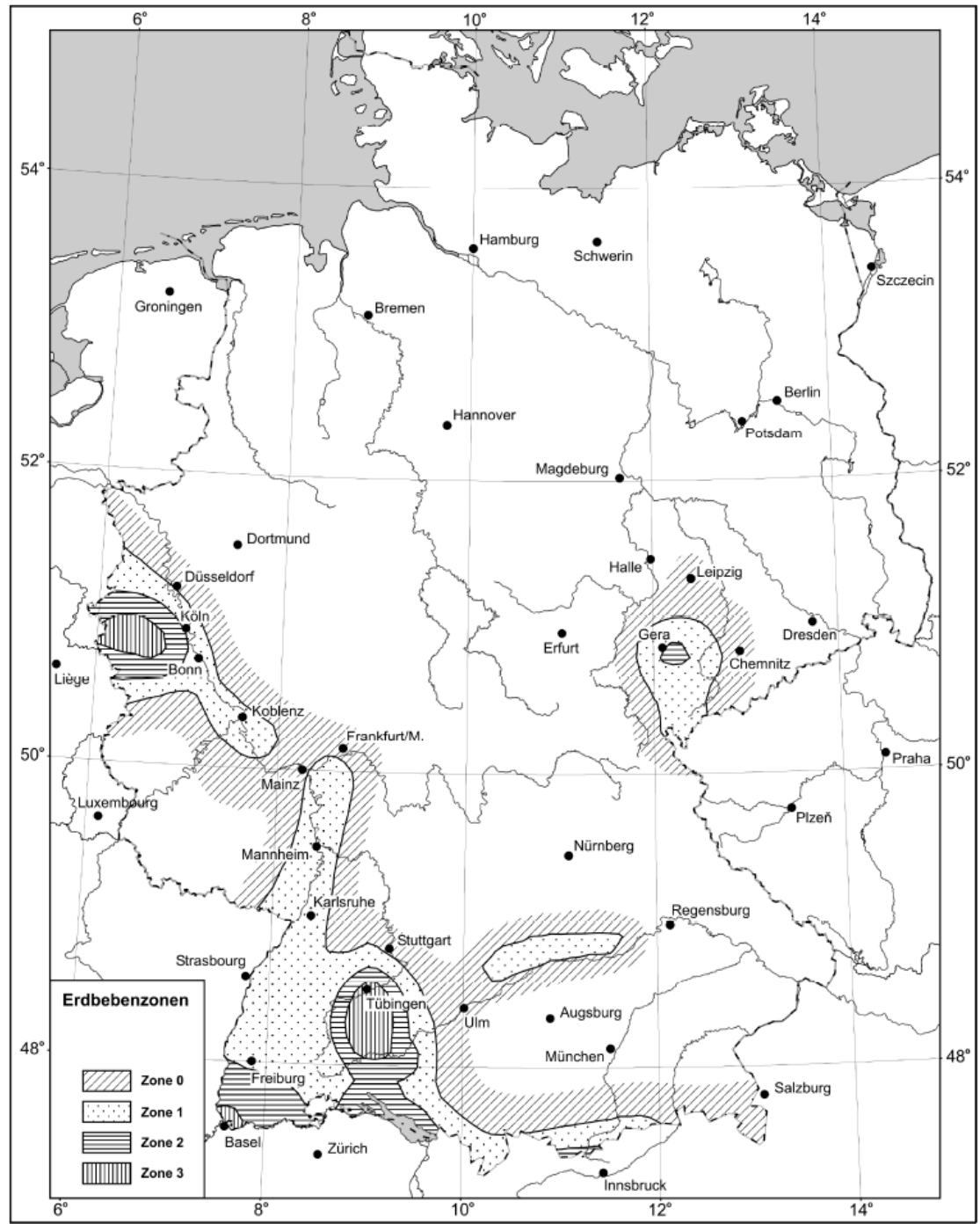


Abb. 2-9: Erdbebenzonen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland /DIN 11a/

Die Erdbebenzone eines Standorts ist überdies detailliert in verschiedenen Tabellenwerken zu finden. Die aktuell neueste Fassung der Erdbebenzonentabelle ist vom 16.06.2011.

Die DIN 4149 bzw. DIN EN 1998 verfolgen primär das Ziel des Personenschutzes und nehmen Anlagen, von denen im Erdbebenfall besondere Gefahren ausgehen könnten, ausdrücklich aus. Dennoch stellt diese Erdbebennorm eine wichtige und wesentliche Normungsgrundlage dar, aus der auch Informationen in die neue KTA 2201 eingeflossen sind.

2.3.2 Deterministische und probabilistische seismische Gefährdungsanalyse

2.3.2.1 Deterministische seismischen Gefährdungsanalyse (DSHA)

Nachstehend wird gemäß /REI 90/, /MES 03/ und /SDA 11/ die deterministische seismische Gefährdungsanalyse - international als Deterministic Seismic Hazard Analysis (DSHA) bezeichnet - hinsichtlich ihres allgemeinen Ablaufs erläutert und in **Abb. 2-10** dargestellt. Ziel der DSHA ist es mit ingenieurseismologischen Parametern ein ‚relevantes‘ Bebens für einen konkreten Standort zu ermitteln. Die Problematik besteht in der Definition, des ‚relevanten‘ Erdbebens. In Deutschland definiert die /KTA 11/: „Für die deterministische Bestimmung des Bemessungserdbebens ist auf Grundlage aufgetretener Ereignisse ein Erdbeben mit den für den Standort größten anzunehmenden seismischen Einwirkungen zu Grunde zu legen, das nach wissenschaftlichen Erkenntnissen zu erwarten ist.“ Weiterhin ist dabei gemäß gültiger KTA „die Umgebung des Standortes bis mindestens 200 km Entfernung zu berücksichtigen, wobei zu prüfen ist, ob Erkenntnisse vorliegen, die eine Einbeziehung darüber hinausgehender Entfernungen standortabhängig erforderlich macht“.

Definitionsunabhängig sind die Hauptschritte bei einer Ermittlung der ingenieurseismologischen Parameter im Wesentlichen gleich und gemäß /REI 90/ wie folgt separiert:

- Schritt 1: Identifikation und Charakterisierung aller Erdbebenquellen, die am Standort signifikante Bodenbewegungen erzeugen können. Erdbebenquellen können dabei Punktquellen (Quelle 1 in **Abb. 2-10**), Linienquellen mit einer oder mehreren Einzelverwerfungen (Quellen 2 in **Abb. 2-10**) oder Volumenquellregion sein. Seismizität aus weiter entfernten Bereichen kann auch eine Rolle spielen und wird als Hintergrundaktivität berücksichtigt.

- Schritt 2: Für jede Quellregion wird eine charakteristische Entfernung festgelegt. Oft ist das die Minimalentfernung vom Standort zu einem Punkt auf dem Rand einer Quellregion bzw. einer Verwerfungslinie. Je nach den geometrischen Verhältnissen kommen Epizentral- und Hypozentralentfernungen in Frage. Die Wahl hängt auch davon ab, ob für eine Region charakteristische Herdtiefen festlegbar sind und welche Verfahren im Schritt 3 angewandt werden.
- Schritt 3: Die bestimmenden (relevanten) Erdbeben jeder Quelle sind festzulegen. Das sind jeweils die Erdbeben einer Quelle, die am Standort die voraussichtlich größten Bodenbewegungen hervorrufen. Die relevanten Erdbeben werden durch ihre Stärke beschrieben; wofür meist die Magnitude als Maß verwendet wird.
- Schritt 4: Die Gefährdung des Standortes wird in der Regel über Parameter der Bodenbewegung festgelegt. Im einfachsten Fall kann das die Standortintensität sein, aber auch frequenzabhängige Amplituden eines Antwortspektrums sind möglich.

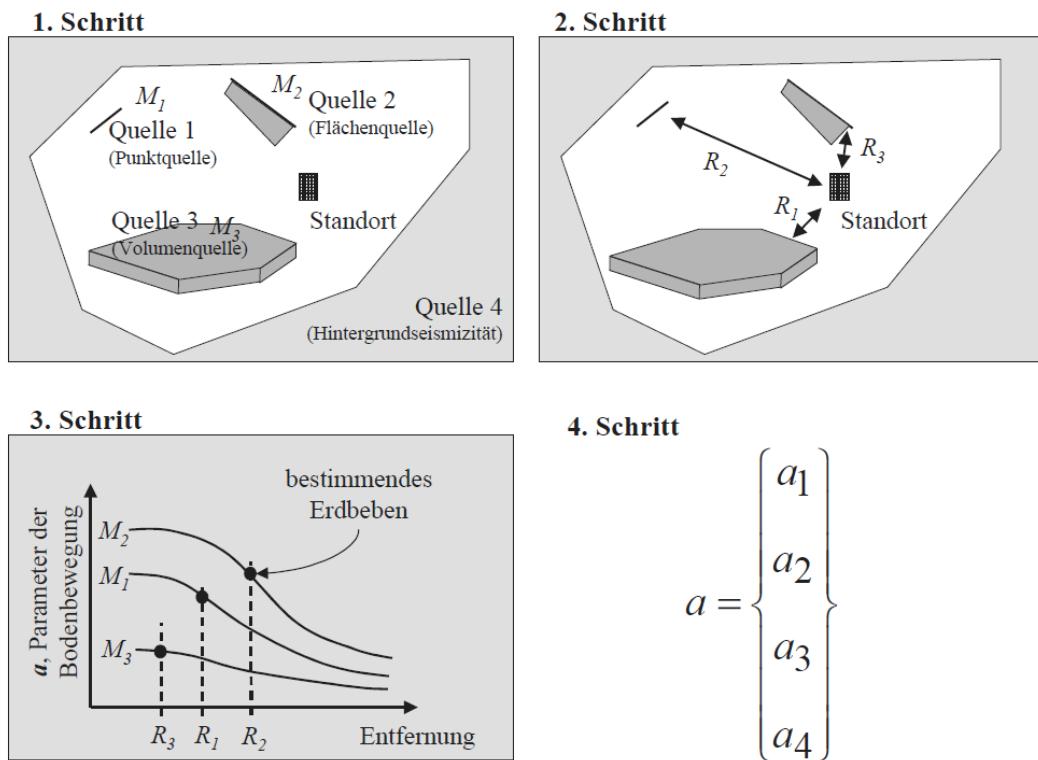


Abb. 2-10: Die vier grundlegenden Schritte einer deterministischen seismischen Gefährdungsanalyse /REI 90/

Für kerntechnische Anlagen schreibt die /KTA 11/ hinsichtlich des Schrittes 2 folgende besondere Grundsätze vor:

- „Befindet sich das Epizentrum eines maßgebenden Erdbebens ... in der gleichen seismotektonischen Einheit wie der Standort, so ist anzunehmen, dass dieses Erdbeben in der Nähe des Standorts, Epizentralentfernung bis maximal 10 km, eintritt und am Standort die gleiche Intensität hervorruft.“
- „Befindet sich das Epizentrum eines maßgebenden Erdbebens ... in einer anderen seismotektonischen Einheit als der Standort, so ist anzunehmen, dass das Epizentrum eines gleichartigen Erdbebens an dem standortnächsten Punkt auf der Grenze der seismotektonischen Einheit liegt, in der es aufgetreten ist.“

Es wird also die Annahme gemacht, dass beim wiederholten Auftreten der stärksten historischen Erdbeben in einer Region, diese in kürzester Entfernung zum Standort auftreten können; wobei die Erdbeben an ihre tektonischen Einheiten (Quellregionen) gebunden sind.

In jedem Schritt ist auf die Größe der Unsicherheiten der verwendeten Eingangsparameter und der benutzten Beziehungen zu achten. Alternativ können aus Gründen der Konservativität Zuschläge für die einzelnen Größen angesetzt werden. Darin liegt jedoch ein wesentlicher Nachteil des deterministischen Verfahrens, denn viele Entscheidungsschritte beruhen auf subjektiven Annahmen.

2.3.2.2 Probabilistische seismische Gefährdungsanalyse (PSHA)

Die probabilistische seismische Gefährdungsanalyse, Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) hat eine Reihe von Parallelen zur DSHA. Nachstehend wird gemäß /REI 90/ und /MES 03/ die PSHA beschrieben, welche zur Abschätzung der seismischen Gefährdung für unterschiedliche Überschreitenswahrscheinlichkeiten dient. Gemäß /REI 90/ ergeben sich auch hier vier Hauptschritte um das allgemeine Vorgehen zu beschreiben:

- Schritt 1: Die Identifikation und Charakterisierung der seismischen Quellen, die den Standort betreffen, erfolgt wie bei der DSHA. Davon abweichend muss hier allerdings auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Erdbeben innerhalb einer Quelle bestimmt werden. Die Erdbebenverteilung wird mit der jeweiligen Entfernung zum Standort kombiniert, um Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Herd-Standort-

Entfernungen zu erhalten. Bei der DSHA hingegen, wird immer von der Wahrscheinlichkeit 1 eines Herdes bei der kleinstmöglichen Entfernung einer Quellregion zum Standort ausgegangen.

- Schritt 2: Anschließend wird die zeitliche Verteilung der Erdbeben beschrieben. Für jede Quellregion wird die Häufigkeit (Rate) ermittelt, mit der Erdbeben einer bestimmten Stärke auftreten.
- Schritt 3: Auch bei der PSHA müssen die Parameter der Bodenbewegung ermittelt werden, welche von Erdbeben der Quellregionen am Standort hervorgerufen werden können. Die Bewegungen sind hier allerdings für jedes mögliche Erdbeben an jedem möglichen Quellorten zu bestimmen.
- Schritt 4: Schlussendlich werden die Unsicherheiten der Erdbebenstärke, des Erdbebenortes und der Ableitung der Schütterwirkung am Standort kombiniert, um die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, dass eine Bodenbewegung einer bestimmten Stärke am Standort in einem festgelegten Zeitraum eintritt oder überschritten wird.

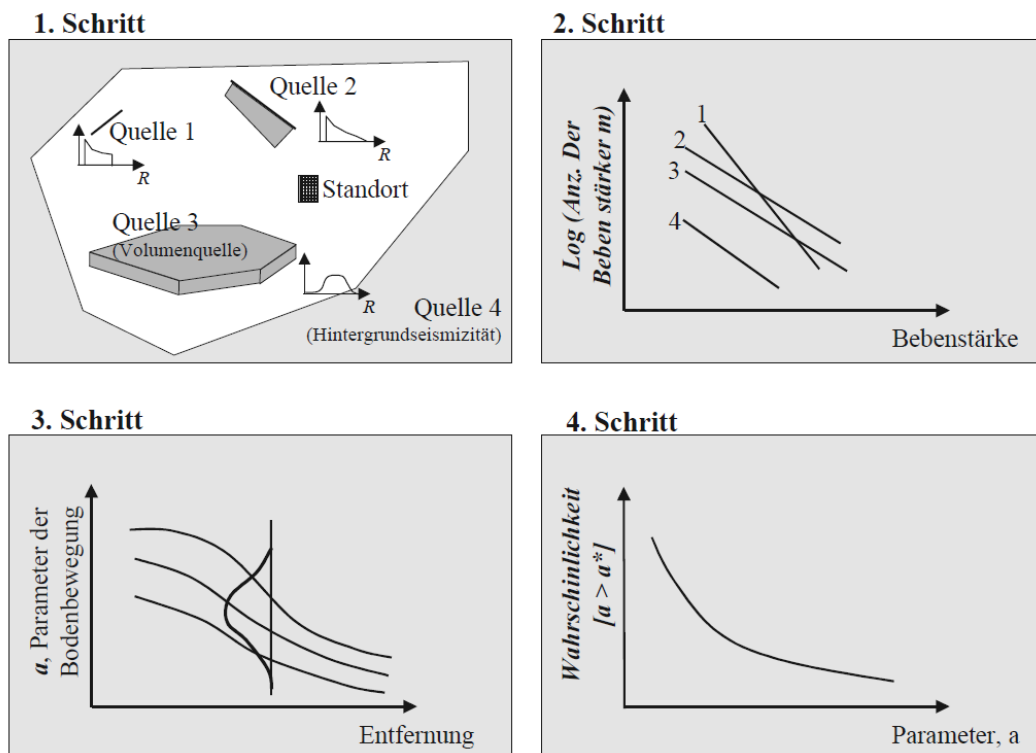


Abb. 2-11: Die grundlegenden Schritte einer probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse /REI 90/

Bei der probabilistischen Analyse werden die Unsicherheiten normalerweise über das Gefährdungsintegral in die Berechnungen integriert. Hinsichtlich der Unsicherheiten kann zwischen zwei Arten unterschieden werden. Im Folgenden werden hierzu die Begriffe „aleatorisch“ und „epistemisch“ gebraucht. Unter der epistemischen Unsicherheit versteht man die wissenschaftliche Unsicherheit bei der Bestimmung einer Größe infolge zu geringer Informationen und Daten, daher wird sie häufig auch als Modellunsicherheit bezeichnet. Die aleatorische Variabilität hingegen ist die Zufälligkeit einer Größe (z. B. der Bodenbeschleunigung), welche durch die Standardabweichung ausgedrückt werden kann.

2.3.3 Vorgehensweise zur Ermittlung der seismischen Standortgefährdung

Nachdem vorstehend die Grundlagen erläutert wurden, wird im Folgenden die aktuelle Vorgehensweise zur Ermittlung der Standortgefährdung an sich zusammengefasst. Hierbei ist anzumerken, dass zwischen dem Stand nach bisher gültigem Regelwerk /KTA 90/ und dem Stand der Praxis bei der Erstellung von seismischen Gefährdungsgutachten unterschieden werden muss. Der Stand der Praxis eilte dabei deutlich den Forderungen der /KTA 90/ voraus, was nicht zuletzt einen wichtigen Grund zur Überarbeitung der KTA 2201.1 darstellte und zur neuen Version führte. Dieser die Gefährdungsanalyse behandelnde Teil 1 /KTA 11/ wurde bereits fertiggestellt und ist seit 2011 gültig. Er enthält einige wesentliche Neuerungen im Vergleich zur Fassung von 1990 /KTA 90/, welche nachfolgend aufgeführt sind:

1. Eine wesentliche Methode, die in der /KTA 90/ noch nicht Eingang fand, ist die probabilistische seismische Gefährdungsanalyse. Sie wird jedoch seit vielen Jahren bereits in der Praxis angewendet. Das Bemessungserdbeben ist nach der neuen Fassung der KTA 2201.1 nun basierend auf einer deterministischen und einer probabilistischen Standortgefährdungsanalyse festzulegen. Im Anschluss an die probabilistische Analyse ist eine Deaggregation durchzuführen, was zur Untersuchung des jeweiligen Beitrages der einzelnen Regionen zur Gesamtgefährdung des Standortes dient. Auf diese Weise können maßgebende Erdbebenszenarien ermittelt werden. Auch wird so eine Überschaubarkeit und Nachvollziehbarkeit von probabilistischen Berechnungen - die eine Vielzahl von Varianten beinhalten - ermöglicht.
2. Die probabilistische Bestimmung der Kenngrößen des Bemessungserdbebens erfolgt für eine jährliche Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-5} pro Jahr, für wel-

che die seismischen Einwirkungen als 50%-Fraktilwert angegeben werden dürfen. Dies war bereits Praxis bei der seismologischen Begutachtung der deutschen Kernkraftwerkstandorte als die /KTA 90/ noch Gültigkeit besaß. Für kerntechnische Anlagen sind international Überschreitenswahrscheinlichkeiten zwischen 10^{-4} und 10^{-5} pro Jahr üblich, wobei bei ersterer Überschreitenswahrscheinlichkeit in der Regel 84%-Fraktilwerte oder Erwartungswerte (Mean-Werte) genutzt werden.

3. Unsicherheiten sind laut /KTA 11/ explizit zu berücksichtigen. Für deutsche Standorte erfolgte die Berücksichtigung von Unsicherheiten unterschiedlich umfangreich. Es wurden z. B. Sensitivitätsanalysen durchgeführt bei denen einzelne Parameter variiert wurden, um deren Einfluss auf das Gesamtergebnis zu untersuchen. Obgleich für einige Kernkraftwerksstandorte zahlreiche Varianten berechnet wurden, besteht bei der Quantifizierung von Unsicherheiten insgesamt aber noch ein gewisser Nachholbedarf im internationalen Vergleich /SDA 11/.
4. Das Bemessungserdbeben ist gemäß /KTA 11/ mit einer Mindestintensität von VI (EMS-98) festzulegen. In der Vorgängerfassung war die Mindestauslegung in Form einer maximalen horizontalen Bodenbeschleunigung von $0,5 \text{ m/s}^2$ angegeben.
5. Paläoseismologische Befunde (vorgeschichtliche Erdbeben) sind zu berücksichtigen. Bei Vorliegen paläoseismologischer Untersuchungsergebnisse können sie zur Bestimmung maximaler Erdbebenstärken einer Verwerfung beitragen.
6. Die Vorgabe, das maßgebende Erdbeben der seismotektonischen Einheit, in der sich der Standort befindet, „in der Nähe des Standortes“ anzusetzen, wird in /KTA 11/ mit der Formulierung „bis maximal 10 km“ konkretisiert. In der Vergangenheit wurde die alte Vorgabe teilweise so interpretiert, dass das Erdbeben direkt unter dem Standort anzusetzen sei (Entfernung 0 km), was bei Anwendung von empirischen Ground-Motion-Abnahmebeziehungen zu numerischen Schwierigkeiten führen kann.
7. Für das Bodenantwortspektrum ist gemäß /KTA 11/ der Bezugshorizont anzugeben. Die Kenntnis des Bezugshorizontes ist erforderlich, um das Bodenantwortspektrum erforderlichenfalls auf einen anderen Bezugshorizont (z. B. das Fundament eines Gebäudes) umrechnen zu können. Insbesondere für die Durchführung bodendynamischer Berechnungen ist eine eindeutige Angabe des Bezugshorizontes des Antwortspektrums wichtig.

8. Die Ermittlung der resultierenden Beschleunigung darf durch Multiplikation der horizontalen Beschleunigungskomponenten mit dem Faktor 1,2 durchgeführt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass dies bei Tragwerken mit unregelmäßigem Grundriss zu nicht-konservativen Ergebnissen führen kann. Die Zulässigkeit dieser vereinfachten Vorgehensweise ist daher jeweils zu prüfen.
9. Neben dem Antwortspektrum für die Horizontalkomponente ist gemäß /KTA 11/ auch eines für die Vertikalkomponente festzulegen. Liegt kein vertikales Antwortspektrum vor, sind zwei Drittel der Horizontalkomponente für die vertikale Richtung anzusetzen, statt wie bisher die Hälfte.
10. Hinsichtlich der Definition der Starkbewegungsdauer ist das verwendete Energiekriterium anzugeben. Zudem ist eine Zeitverlaufs-Hüllfunktion zur Generierung von synthetischen Beschleunigungen anzugeben.
11. Es sind registrierte Beschleunigungszeitverläufe anzugeben, deren charakteristische Kenngrößen wie Antwortspektrum, Starkbebendauer und Energieinhalt denen des Bemessungserdbebens ähneln. Für Strukturberechnungen stellen registrierte Beschleunigungszeitverläufe eine gute Ergänzung zur Verwendung synthetischer Zeitverläufe dar, da letztere in der Regel einen unrealistisch hohen Energieinhalte aufweisen.

Die Änderungen von /KTA 11/ gegenüber /KTA 90/, das Vorgehen nach alter und neuer Fassung, sowie auch das internationale Vorgehen werden ausführlich in /SDA 11/ dargestellt. Im Folgenden wird nur kurz auf einzelne wesentliche Aspekte eingegangen.

Die Berücksichtigung der beiden Unsicherheitsarten (vergl. 2.3.2.2) kann in der PSHA auf unterschiedliche Weise erfolgen. Während über aleatorische Variabilitäten zu integrieren ist, sind epistemische Unsicherheiten z. B. durch verschiedene Zweige von Entscheidungsbäumen zu behandeln. Bei der Weiterentwicklung der Elemente und Modelle der PSHA in den letzten Jahren hat die Berücksichtigung von epistemischen (Modell-) Unsicherheiten stark an Bedeutung gewonnen, was zum einen mit der Logischen-Baum-Methode, die bereits vielfach Anwendung gefunden hat, oder mit der Monte-Carlo-Methode erfolgen kann.

Die Erdbebengefährdung wird international meist mit Magnituden als Eingabeparameter berechnet, sowie unter Verwendung empirischer spektraler Ground-Motion-

Abnahmebeziehungen, welche international als Ground-Motion Prediction Equations (GMPE) bezeichnet werden. Hierzulande werden zwar zur Ermittlung der Gefährdung seit über zehn Jahren auch zunehmend GMPE eingesetzt, jedoch wird immer noch primär auf Basis von Intensitätsabnahmebeziehungen gearbeitet. Von GMPE wurde bislang nur zusätzlich bei der deterministischen Gefährdungsanalyse Gebrauch gemacht, beispielsweise bei den Begutachten von Zwischenlagern. Als Folge der Einführung der neuen KTA 2201.1 /KTA 11/ ist die Anwendung von GMPE nahezu unvermeidbar; zumindest eine parallele Nutzung zu den Intensitätsabnahmebeziehung ist erforderlich.

Resultat jeder Erdbebengefährdungsberechnung sind Bemessungsantwortspektren. Es ergeben sich zwei prinzipielle Möglichkeiten zur Angabe der Ergebnisse hinsichtlich der weiteren Verwendung der Antwortspektren für baodynamische Berechnungen und ggf. seismische PSA. So können einerseits Berechnungen eines einhüllenden Bemessungs-Antwortspektrums (engl. Uniform Hazard Spektrum) durchgeführt werden. Grundsätzlich ist hier kein Bezug zu einem bestimmten Erdbebenszenario gegeben, weil sich jenes Antwortspektrum aus der maximalen Erschütterungseinwirkung verschiedener Erdbeben aus unterschiedlichen Quellregionen zusammensetzt. Dieses umhüllende Antwortspektrum ist die konservative und einfachste Methode für Bauwerksberechnungen mittels Antwortspektren, da es nur ein Bemessungsantwortspektrum gibt. Andererseits können die für die Gefährdung des Standortes maßgeblichen Erdbebenszenarien ermittelt werden. Bei der DSHA werden nur „worst case“-Szenarien untersucht, während sich bei der PSHA die Erdbeben, welche die Hauptbeiträge zur Gefährdung liefern, erst aus der Deaggregation ergeben. Bei fortschrittlicheren voll-dynamischen Bauwerksberechnung mittel Zeitverlaufsberechnungen, für welche synthetische Zeitverläufe kompatibel zum Antwortspektrum generiert werden, ist es sinnvoll, einzelne Erdbebenszenarien heranzuziehen.

2.4 Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse

2.4.1 Allgemeines

Nachstehend wird die Ermittlung standortspezifischer Antwortspektren einerseits unter Anwendung von empirischen spektralen Ground-Motion-Abnahmebeziehungen, sowie

andererseits unter Einsatz bodendynamischer, linear-äquivalenter Berechnungen behandelt. Diese Methoden sind für Kernkraftwerkstandorte bisher nur teilweise eingesetzt worden. Die Vorgehensweisen werden anhand zweier Beispiele für zwei unterschiedliche Kernkraftwerksstandorte kurz erläutert. Mittels Ground-Motion-Abnahmebeziehungen wurden zusätzliche Antwortspektren berechnet und Schwierigkeiten bei deren Anwendung im standortnahen Bereich aufgezeigt. Zur genaueren Ermittlung von standortspezifischen Antwortspektren unter Berücksichtigung der lokalen Bodenschichtung und ihrer dynamischen Eigenschaften wurde für einen mitteldeutschen Standort die bodendynamische, linear-äquivalente Berechnungen durchgeführt.

2.4.2 Anwendbarkeit von Ground-Motion Abnahmebeziehungen im Nahbereich

Die hier zusammengefassten Betrachtungen und Berechnungen aus /SDA 11/ zielen auf die Untersuchung der Anwendbarkeit von GMPE im Entfernungsbereich seismischer Quellen von wenigen Kilometern zum Standort und dabei auftretenden Schwierigkeiten ab. Es wurde ein im nördlichen Teil Deutschlands gelegenes Kernkraftwerk ausgewählt, um beispielhaft horizontale Antwortspektren auf Basis von empirisch-spektralen Ground-Motion-Abnahmebeziehungen zu berechnen.

Eingangsparameter wie Magnitude, Entfernungen, Bodenklasse, die zur Berechnung der Antwortspektren benötigt werden, sind von den im seismologischen Gutachten zum Standortzwischenlager enthaltenen Informationen und dem dort ermittelten Bemessungserdbebens abgeleitet. So sind die Intensität des Bemessungserdbebens mit $I_0 = VI$ (MSK) und eine zugehörige jährliche Überschreitenswahrscheinlichkeit von weniger als 10^{-5} angegeben. Die minimale Entfernung zum Standort wird auf 10 km beziffert. Die Untergrundverhältnisse werden als Lockersedimente klassifiziert. Für die Ableitung von Magnitude und Entfernung für die Standortgefährdung sind Erdbeben in unmittelbarer Standortnähe maßgebend, da der Standort in einer schwachseismischen Region liegt.

Da viele Ground-Motion Abnahmebeziehungen die Moment-Magnitude M_w als Eingangsparameter verwenden, ist diese für das Bemessungserdbeben aus den anderen Magnituden umzurechnen.

Problematisch kann die Festlegung der Entfernungswerte sein, was insbesondere für die Joyner-Boore-Entfernung gilt. Sie beschreibt die kürzeste Entfernung zur vertikalen Projektion der Bruchfläche. Da in diesem Fall keine Informationen zur Bruchfläche gegeben sind, wurde die Joyner-Boore-Entfernung gleich der Epizentralentfernung von 10 km gesetzt. Für standortnahe Erdbeben, deren Bruchfläche nicht bis nahe an die Erdoberfläche geht oder diese durchbricht, ist die Joyner-Boore-Entfernung kaum sinnvoll, da sie die Herdtiefe nicht berücksichtigt. Die „Entfernung bis zur seismogenen Bruchfläche“ ist als größer oder gleich der Joyner-Boore-Entfernung definiert. Auch diese Entfernung ist nicht exakt bestimmbar, wenn keine genaue Kenntnis zur der Lage der Bruchfläche vorhanden ist.

Aus den Vorbetrachtungen wurden gemäß /SDA 11/ für die Berechnung der vergleichender Antwortspektren am Beispielstandort folgende Werte angesetzt:

- Lokalbeben-Magnitude (nach Richter) $M_L = 4,8$
- Oberflächenwellen-Magnituden $M_S = 4,7$
- Momenten-Magnitude $M_W = 4,7$
- Herdtiefe: 10 km
- Epizentraldistanz: 10 km
- Hypozentraldistanz: 14 km
- Joyner-Boore-Entfernung: 10 km
- Entfernung zur seismogenen Bruchfläche: 12 km
- Entfernung zur Bruchfläche: 12 km

Mit Kenntnis von Magnitude und Entfernung lassen sich mittels der in der Literatur zahlreichen empirischen spektralen GMPE untergrundbezogene Antwortspektren berechnen. Allerdings ist vor ihrer Anwendung zu klären, welche Ground-Motion-Abnahmebeziehungen für den Standort geeignet sind. Ein häufiges Problem bei der Auswahl geeigneter Antwortspektren in Gebieten geringer seismischer Aktivität ist, dass die betrachteten Magnituden oft im Randbereich oder außerhalb des Datenbereiches der Abnahmebeziehungen liegen. Die für diese Untersuchung verwendeten Abnahmebeziehungen von

- Berge-Thierry et al. /BER 03/,
- Ambraseys et al. /AMB 05/,
- Abrahamson & Silva /ABR 97/,
- Campbell & Bozorgnia /CAM 03/,
- SEA /SPU 99/ und
- Sabetta & Pugliese /SAB 96/

sind bezüglich der zugrundeliegenden Magnitudenbereiche akzeptabel.

Die hieraus berechneten Antwortspektren sind in **Abb. 2-12** dargestellt, ebenso das Bemessungsspektrum des Referenzkernkraftwerks (in schwarz) und ein intensitätsbasiertes Antwortspektrum gemäß /HOS 87/ (in blau), welches im Zwischenlagergutachten zur Überprüfung der seismischen Lastannahmen herangezogen wurde.

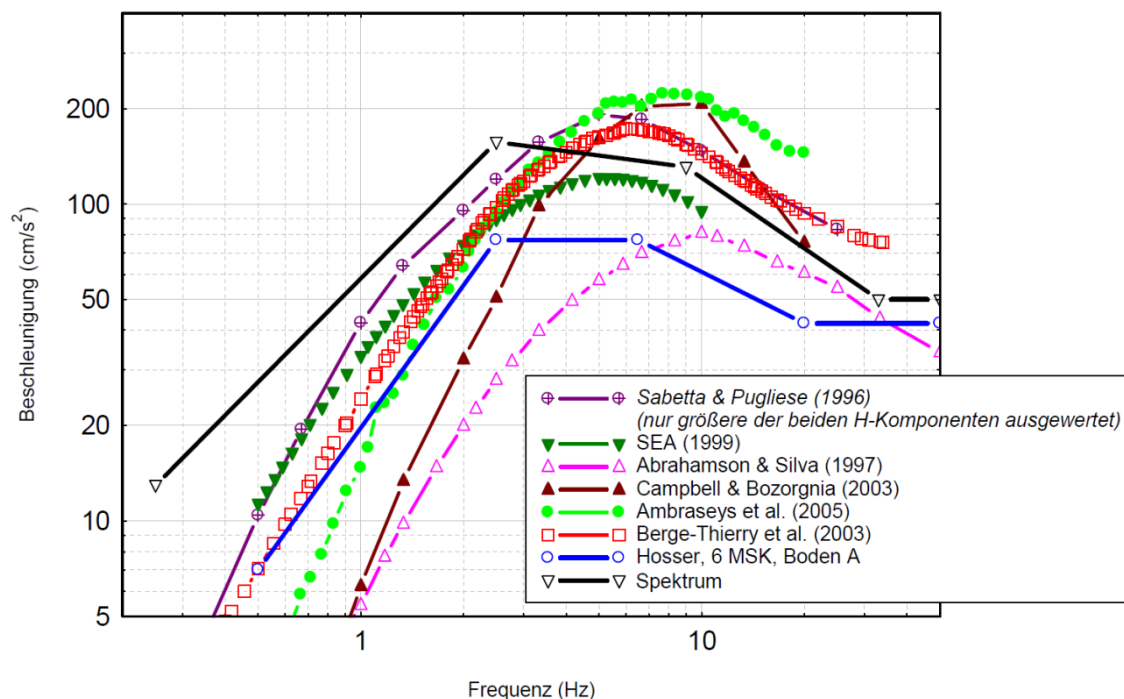


Abb. 2-12: Vergleich von Antwortspektren (Horizontalkomponente) für den Beispielstandort /SDA 11/

Abb. 2-12 lässt einen erheblichen Unterscheid in den Antwortspektren der verschiedenen Ground-Motion-Abnahmebeziehungen erkennen, was die Schwierigkeit der Anwendung empirischer spektraler Abnahmebeziehungen auf Basis von Magnitude und Ent-

fernung im Nahbereich von wenigen Kilometern zum Standort deutlich macht. Allerdings sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Beziehungen für große Entfernungen wesentlich kleiner.

Die Ursachen der großen Abweichungen der Spektralbeschleunigungen für den Nahbereich sind in den geringen Entfernungen, die im Randbereich oder sogar außerhalb des Geltungsbereichs der Abnahmebeziehungen liegen, und in der nur ungenauen Bestimmbarkeit einiger als Eingabeparameter für die GMPE benötigter Entfernungen zu suchen.

2.4.3 Bodendynamische Berechnungen zur Ermittlung standortbezogener Antwortspektren

Im Folgenden wird die Vorgehensweise bei linear-äquivalenten Berechnungen im Rahmen seismischer Standortanalysen von Kernkraftwerken zusammenfassend erläutert. Diese Methode dient zur Ermittlung eines standortspezifischen Antwortspektrums unter Berücksichtigung lokaler Bodenschichten und deren dynamischen Eigenschaften. Beispielhaft wurde hierzu in /SDA 11/ ein mitteldeutscher Standort betrachtet, der sich wegen der verfügbaren detaillierten Untergrunduntersuchungen besonders eignet. Obgleich schon seit langem Berechnungen zu Übertragungseigenschaften von Schichten im Untergrund durchgeführt werden, wurden sie im Rahmen von seismischen Gefährdungsanalysen erst in den letzten Jahren verstärkt angewendet.

Für die Beispieluntersuchungen wurden linear-äquivalente Berechnungen im Frequenzbereich mit dem Programm EERA an einem eindimensionalen Schichtenmodell durchgeführt. Im Rechenmodell wird der Untergrund am Standort von der Felsbasis bis zur Geländeoberkante abgebildet. Eine horizontal polarisierte Scherwelle wird an der Felsbasis eingeleitet. Die Beschleunigungen sind in beliebigen Teufen bis an die Geländeoberkante berechenbar. In /SDA 11/ wurden die Teufen -4 m unter Geländeoberkante und -31 m bzw. -32 m betrachtet.

Die bodendynamischen Berechnungen wurden beispielhaft für zwei generalisierte Standortprofile für die Hoch- und Tiefscholle (Das Bodenprofil weist zwei deutlich unterschiedliche durch eine Diskontinuität getrennte Bereiche auf.) des Standortes durchgeführt. Als Eingangserregung an der Basis des Untergrundmodells (in 80 m bzw. 140 m Tiefe) wird ein Zeitverlauf für felsigen Untergrund (kompatibel zum Fels-

spektrum für den Standort) verwendet, der zuvor künstlich generierter und skaliertes wurde.

Die Ergebnisse der Berechnung sind in **Abb. 2-13** in Form des Antwortspektrums für den an der Felsbasis angesetzten Zeitverlauf und der Antwortspektren für die Hoch- und Tiefscholle in den betrachteten Teufen dargestellt.

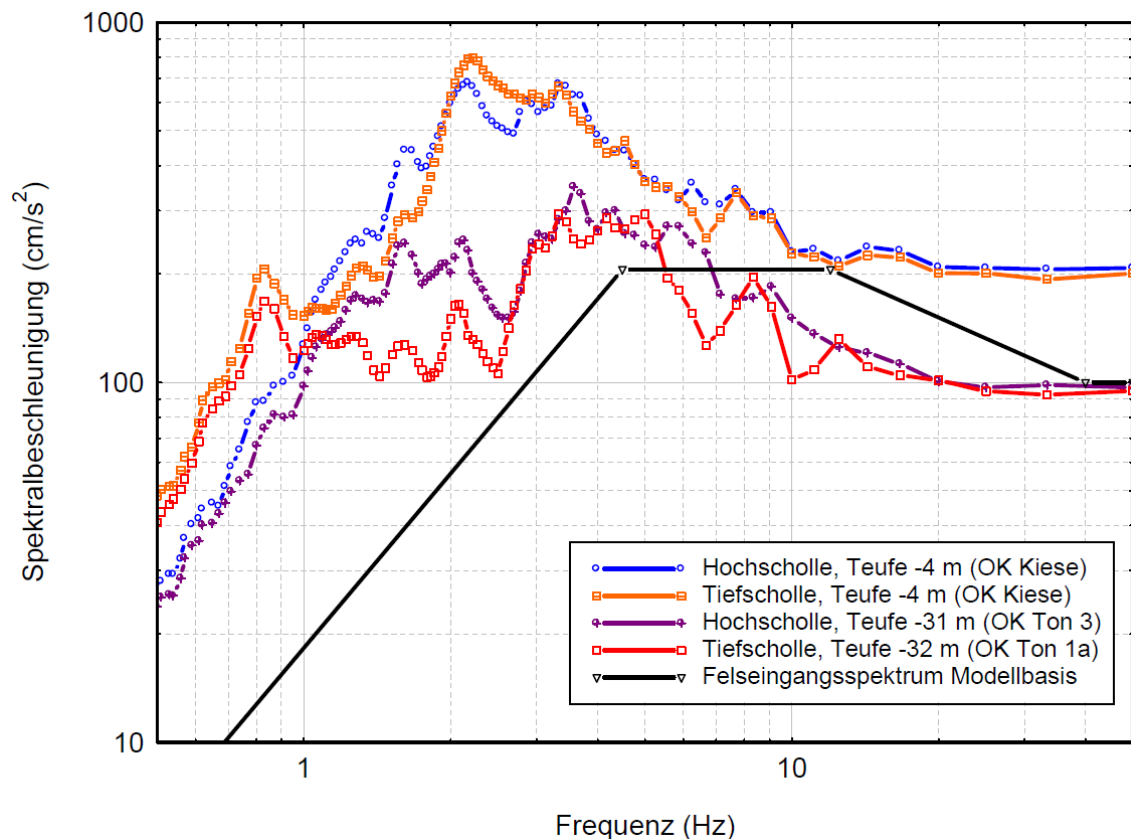


Abb. 2-13: Ergebnisse der linear-äquivalenten Berechnungen für Hoch- und Tiefscholle bei Ausgabe der Antwortspektren für verschiedene Teufen und bei Ansatz eines auf 1 m/s² skalierten Fels-Eingangszeitverlauf an der Modellbasis (Halbraum) /SDA 11/

Die berechneten Antwortspektren für die verschiedenen Teufen unterscheiden sich deutlich. Je nach Position auf dem Gelände des Referenzstandorts ergeben sich aufgrund der unterschiedlich mächtigen Sedimentüberdeckung dementsprechend unterschiedliche Antwortspektren. Die Gründungstiefe hat in diesem Fall nennenswerten Einfluss auf die Amplituden, was im Vergleich der Ergebnisse der Teufe -4 m und -31 m bzw. -32 m Tiefe erkennbar wird. Insbesondere an Standorten mit wenigen Metern Sedimentüberdeckung über der Felschicht kann es zu deutlichen Amplitudener-

höhungen in relevanten Frequenzbereichen kommen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass detaillierte bodendynamische Berechnungen eine Möglichkeit zur Präzisierung von standortbezogenen Antwortspektren darstellen.

2.5 Bewertung und Identifikation weiteren Entwicklungsbedarfs

2.5.1 Bewertung und Erkenntnisse

Bei der Weiterentwicklung der Elemente und Modelle der PSHA in den letzten Jahren hat die Berücksichtigung von epistemischen (Modell-) Unsicherheiten stark an Bedeutung gewonnen, was zum einen mit der logischen-Baum-Methode, die bereits vielfach Anwendung gefunden hat, oder mit der Monte-Carlo-Methode erfolgen kann. Bei Anwendung der logischen-Baum-Methode ist immer noch die oftmals willkürliche Gewichtung der einzelnen Äste und die damit einhergehende subjektive Beeinflussung der Ergebnisse problematisch. Für deutsche Standorte wurden alternativ auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt (Variation der Eingabeparameter). Unabhängig von der gewählten Vorgehensweise hat jedoch die Wahl geeigneter Modelle in der PSHA eine große Bedeutung /SDA 11/.

Die ausdrückliche Parallelität von Intensität und Magnitude nach /KTA 11/ in der Gefährdungsberechnung stellt eine Besonderheit im internationalen Vergleich des kerntechnischen Regelwerks dar. Sowohl die Nutzen von Magnituden als auch die von Intensitäten hat Vor- und Nachteile. Idealerweise sollten daher beide Informationen zur Ermittlung der Erdbebengefährdung Verwendung finden. Das Festhalten an der Bemessungsintensität als integralem Parameter ermöglicht auch zukünftig ein Vergleichen mit älteren Standortgutachten.

Bei Anwendung von GMPE in der Gefährdungsberechnung zeigen die Erfahrungen, dass wesentliche Unsicherheiten bei der Ermittlung von Standortbeschleunigungen in der Wahl adäquater, empirischer Abnahmebeziehungen und im lokalen Bodenverhalten liegen. Eine Kalibrierung der GMPE auf deutsche Verhältnisse ist zwar wünschenswert, aber nach aktuellem Kenntnisstand kaum möglich. Für die Anwendung wäre z. B. eine Mittelung der Ergebnisse vieler Abnahmebeziehungen denkbar. Das Bilden einer Einhüllenden über alle Antwortspektren würde aufgrund der erheblichen Unterschiede zwischen den Ground-Motion-Abnahmebeziehungen eine extrem kon-

servative Vorgehensweise darstellen. In der Intensität sind die Informationen über Magnitude und Entfernung vermischt, was die Anwendung intensitätsbasierter Antwortspektren zwar leichter macht, allerdings nicht über die Tatsache hinwegtäuschen darf, dass Magnitude und Entfernung die Form des Antwortspektrums stark beeinflussen können.

Bodendynamische Berechnungen sind zur besseren Quantifizierung der seismischen Einwirkungsgrößen und zur Reduzierung von Unsicherheiten geeignet. Sie setzen jedoch gute Kenntnisse des lokalen Untergrundes voraus. Die linear-äquivalente Berechnungsmethode liefert bei bodendynamischen Berechnungen vorteilhafterweise die exakte analytische Lösung für das elastische Verhalten des Untergrundes. Darüber hinaus sind die zur Berechnung erforderlichen bodendynamischen Eigenschaften der Bodenschichten gut bestimmbar. Bei der Durchführung der bodendynamischen Berechnungen sollte überdies die Streubreite der bodendynamischen Eingangsparameter berücksichtigt werden. Sind zur Ermittlung standortbezogener Antwortspektren oberflächennahe, nichttragfähige Weichschichten vorhanden, sollten diese zwar mitmodelliert werden, eine Ausgabe des Antwortspektrums oberhalb der Weichschichten hat allerdings keine Aussagekraft für bemessungsrelevante Einwirkung, weil die Erdoberfläche nicht dem Gründungsniveau entspricht und oberflächennahe Schichten durch die Wechselwirkung mit dem Bauwerk beeinflusst werden. Das Antwortspektrum sollte daher für eine ausreichend steife Bodenschicht angegeben werden. Im allgemeinen versteht man darunter eine Schicht mit einer Scherwellengeschwindigkeit von mindestens 300 m/s.

Der Vergleich von empirisch ermittelten Freifeldspektren auf Basis von Strong-Motion-Auswertungen mit bodendynamisch berechneten Antwortspektren kann bei anstehenden oberflächennahen Weichschichten aufgrund oben genannter Gründe sinnvoll nur für einen Vergleichshorizont an einer ausreichend steifen Bodenschicht erfolgen. Das Freifeldspektrum müsste dann mit einem Antwortspektrum aus der bodendynamischen Berechnung verglichen werden, das für eine Schicht mit vergleichbarer Scherwellengeschwindigkeit berechnet wurde.

2.5.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

2.5.2.1 Einleitung

In den nachstehenden Abschnitten werden einige Punkte behandelt, die sich u. a. aus der Überarbeitung der KTA 2201.1 ergeben haben. Die Behandlung dieser Themen soll zur Schaffung einer solideren Grundlage für die Ermittlung der Standortgefährdung führen. Die Reihenfolge spiegelt ihre Priorität und die Größe ihres Einfluss auf die Genauigkeit der Standortgefährdung wieder.

2.5.2.2 Ground-Motion Prediction Equations (GMPE)

Wie bereits in 2.3 erwähnt wird die Erdbebengefährdung international meist mit der Magnitude als Eingabeparameter sowie unter Verwendung von empirisch-spektralen Ground-Motion Prediction Equations berechnet. In der Vergangenheit wurden hierzu-lande vorrangig Intensitätsabnahmebeziehungen genutzt. Bei zukünftiger Anwendung von GMPE im Rahmen der Gefährdungsanalyse in Deutschland, vor allem auch bei der PSHA, besteht allerdings im Vorfeld noch Forschungsbedarf.

In Deutschland gibt es kaum instrumentelle Registrierungen von Starkbeben. Daher muss bei Anwendung von GMPE auf Registrierungen anderer Regionen zurückgegriffen werden. Bei der Nutzung von GMPE für die seismische Gefährdungsanalyse ist die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit auf Deutschland zu berücksichtigen. Bezüglich der Anwendbarkeit ist z. B. darauf zu achten, dass der für Deutschland interessierende Magnitudenbereich abgedeckt wird und die Übertragbarkeit der Untergrundbedingungen gegeben ist. Sind die Scherwellengeschwindigkeiten im tieferen Untergrund (bis einige Kilometer) von Quell- und Zielregion der GMPE nicht übertragbar, so kann eine Anpassung der GMPE erfolgen. Mögliche Anpassungen von GMPE auf deutsche Verhältnisse wurden bislang noch nicht betrachtet und sollten Gegenstand zukünftiger verbesserter Gefährdungsanalysen sein.

- **Kriterien zur Auswahl von GMPE**

Zunächst sollten Kriterien erarbeitet werden, auf deren Basis eine geeignete Auswahl von Ground-Motion-Abnahmebeziehungen für Regionen in Deutschland möglich ist. Dabei sollten beispielsweise folgende Randbedingungen beachtet werden:

- Passender Magnituden- und Entfernungsbereich:
GMPE, deren Datensätze nur stärkere Erdbeben enthalten, können z. B. zu einer Überschätzung der Gefährdung führen.
- Adäquate Entfernungsdefinition:
Insbesondere für Standorte in Deutschland besteht ein wesentlicher Anteil der Gefährdung aus Erdbeben in Entfernungen von wenigen Kilometern. Daher ist bei der Entfernungsdefinition der jeweiligen GMPE darauf zu achten, dass die Herdtiefe, bzw. die Entfernung zur Bruchfläche des Erdbebens entsprechend berücksichtigt wird.
- Beachtung von Konversionen zwischen verschiedenen Magnitudenarten und den verschiedenen Arten der Ermittlung der Horizontalkomponente (Mittelwert, größere Komponente etc.)

Zu prüfen wäre also beispielsweise, ob in den Abnahmebeziehungen die Joyner-Boore-Entfernung (o. ä.) genutzt wird, bei der die tatsächliche Herdtiefe nicht direkt eingeht, sondern eine mittlere Herdtiefe angesetzt wurde, welche meist nicht bekannt ist. Der Wert dieser zugrunde gelegten mittleren Herdtiefe müsste zunächst recherchiert werden. Andererseits resultiert aus derartigen Entfernungsannahmen ein Problem für Standorte, die sich dicht am Erdbebenherd befinden. Aus dem Fehlen der Herdtiefe können große Fehler in der Berechnung resultieren. Empfehlenswert wären Entfernungsmaße, bei denen die Herdtiefe berücksichtigt wird. Alternativ müsste über die besagte Recherche zur angenommenen mittleren Herdtiefe der Fehler ermittelt und korrigiert werden, damit für herdnahe Standorte nicht evtl. zu geringe Erdbebeneinwirkungen ermittelt werden.

- **Übertragbarkeit von GMPE auf Regionen in Deutschland**

Bei der Anwendung einer GMPE auf eine Region in Deutschland, sollte die Übertragbarkeit von Quell- und Zielregion beachtet werden. Sind die Geschwindigkeiten im geo-logischen Untergrund (bis einige Kilometer) deutlich unterschiedlich, so kann es aufgrund der damit einhergehenden Dämpfungsunterschiede zu einer Über- oder Unterschätzung der Amplituden im hochfrequenten Bereich des Antwortspektrums kommen.

2.5.2.3 Zonierung

Als Zonierung wird im Folgenden die Einteilung in seismische Quellregionen, welche eine sehr wichtige Grundlage der Standortgutachten darstellt, bezeichnet. Nach der Neufassung der KTA 2201.1 ist die Wahl der Zonierung in künftigen Gutachten zu begründen. Für Deutschland existieren mehrere verschiedene Zonierungsmodelle unterschiedlicher Autoren (z. B. Leydecker & Aichele, Grünthal et al., Ahorner). Da die damaligen Festlegungsprozesse der seismotektonischen Regionen nicht ausreichend dokumentiert wurden, finden sich oftmals keine oder nur wenige, rudimentäre Begründungen. Durch die Erarbeitung einer Liste mehrerer Zonierungsvarianten, jeweils mit Begründung der Festlegungen, unter Beteiligung erfahrener Seismologen und Geologen, sowie unter Einbeziehung der verfügbaren Literatur, ließe sich dieses Problem systematisch und nachvollziehbar lösen. Dabei könnten die existierenden Zonierungen eine erste Arbeitsgrundlage darstellen. Mittels möglicher unterschiedlicher Zonierungsvarianten könnte dann auch der Einfluss der Zonierung auf die Bemessungsbeben der Standorte ermittelt werden. Damit wäre der Forderung der KTA 2201.1 Rechnung getragen, dass epistemische Unsicherheiten (Modellunsicherheiten), zu denen die Zonierungsvarianten zählen, zu betrachten sind.

2.5.2.4 Magnitudenermittlung

Der Erdbebenkatalog sollte einheitlich auf Moment-Magnituden umgerechnet werden. Dabei sind sowohl für die Umrechnung aus anderen Magnituden, als auch für die Ermittlung von Magnituden aus historischen Erdbeben, für welche nur Intensitätsangaben aber keine Registrierungen vorliegen, spezielle Formeln für Deutschland zu entwickeln oder bereits existierende Formeln auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen.

2.5.2.5 Lokaler Untergrund

Die Bandbreite der an den Kernkraftwerksstandorten tatsächlich vorliegenden lokalen Untergründe wird durch die sehr grobe Einteilung in Bodenklassen für eine Standortanalyse nur unzureichend abgebildet. Zur genaueren Bestimmung der seismischen Standortgefährdung in Form eines standortspezifischen Antwortspektrums, welches lokale Verstärkungseffekte des Baugrundes berücksichtigt, sollten bodendynamische Berechnungen durchgeführt werden. Zur Erlangung eines standortspezifischen Antwortspektrums wäre die Erarbeitung eines Dokuments mit Anleitung zur Berücksichti-

gung des lokalen Untergrundes bei der seismischen Gefährdungsermittlung („kurzer Leitfaden“) für die Standorte wünschenswert. Hierin sollten beispielsweise folgende Fragestellungen geklärt werden:

- Wie kann man die lokalen Bodenverhältnisse in die Ermittlung der Standort-spektren einbeziehen?
- Welche etablierten Methoden für bodendynamische Berechnungen gibt es, und wann sind diese in Abhängigkeit von der Erdbebenstärke zu empfehlen (z. B. linear-äquivalente Methode, nichtlineare Methode)?
- Was muss bei Konvolutionsberechnungen (z. B. vom Freifeld in tiefer liegende Schichten) beachtet werden? (Diese Frage stellt sich auch im Zusammenhang mit bestehenden Anlagen, z. B., wenn auf dem Anlagengelände zusätzliche Gebäude errichtet werden sollen.

3 Extreme Wasserstände

3.1 Darstellung der Einwirkung extreme Wasserstände

3.1.1 Grundlagen

Extreme Wasserstände umfassen sowohl Hoch- als auch Niedrigwasserstände. Den Schutz deutscher Kernkraftwerke gegen Hochwasser regelt die KTA 2207 /KTA 04/. Eine entsprechende Regel für den Schutz gegen Niedrigwasserstände liegt nicht vor.

Sowohl Hoch- als auch Niedrigwasser sind mit den heutigen Analysewerkzeugen und Wettervorhersagen zumindest einige Stunden meist sogar Tage im Voraus absehbar, nicht unbedingt immer in ihrem vollen Ausmaß, jedoch in der Tendenz. Ausnahmen davon stellen Flusshochwasser in Folge eines katastrophalen Dammbrochs flussaufwärts oder ein Eishochwasser dar. Diese Ereignisse sind statistisch nicht ausreichend erfasst und müssten abgeschätzt werden. Im Folgenden wird auf diese Sonderformen von Flusshochwassern getrennt eingegangen

3.1.1.1 Sturmfluten und Flusshochwasser

Die Einwirkung Hochwasser wird in Deutschland im Wesentlichen durch zwei zu unterscheidende Ursachen bestimmt. Bei Küstenstandorten bzw. Standorten, deren Wasserstand stark tidebeeinflusst ist, ist eine Sturmflut die bestimmende Ursache für ein Hochwasser. Bei Flusstandorten (Standorte an Binnenseen existieren in Deutschland nicht mehr) ist die bestimmende Ursache die Abflussmenge am Standort.

Sturmfluten sind charakterisiert durch die Überlagerung von erhöhten Wasserständen auf Grund des Windstaus eines Sturmtiefs und der Tide. Sturmfluten umfassen in der Regel drei bis vier Tidezyklen und sind damit von relativ kurzer Zeitdauer.

Bei Flusshochwassern ist der Wasserstand am Standort bestimmt durch die Abflussmengen im Fluss. Die Abflussmenge am Standort kann durch zahlreiche Faktoren bestimmt sein. Besonders zu erwähnen sind Niederschläge und der Einfluss aus Schneeschmelzen. Charakteristika des Einzugsgebiets wie Landnutzung, Bewaldung und Bodenversiegelung spielen eine Rolle, werden jedoch bei sehr seltenen Ereignis-

sen wie den Hochwassern mit 10000 Jahren Wiederkehrzeit zunehmend unwichtig. Bei diesen Ereignissen hat das Einzugsgebiet kaum noch Retentionswirkung und Niederschläge laufen somit als Oberflächenwasser in die Gewässer ab. Im Gegensatz zu Sturmfluten können Flusshochwasser wochenlang sehr hohe Wasserstände am Kraftwerksstandort bewirken.

3.1.1.2 Eishochwasser und Versagen von Staudämmen

Eishochwasser entstehen, wenn im Fluss treibende Eisschollen sich an Hindernissen (Staustufen, Brückenpfeilern, etc.) oder Flussbiegungen ansammeln und den zur Verfügung stehenden Querschnitt des Flusses verkleinern und schließlich ganz oder größtenteils blockieren. Dadurch kommt es flussaufwärts zu sehr schnell steigenden Wasserständen. Flussabwärts kann es zu einer starken Hochwasserwelle kommen, wenn der Eisstau vom Fluss umflossen wird oder zusammenbricht.

Das Auftreten von Eisschollen ist meist mit einigen Tagen Vorlaufzeit vorhersagbar.

Versagen von Staudämmen (Talsperren) oder Staustufen sind andere mögliche Ursachen für Hochwasser. Sie treten plötzlich und sehr selten auf. Eine Kombination mit normalem Flusshochwasser ist nicht auszuschließen. Die Auswirkung von Staustufenversagen wird als gering eingeschätzt aufgrund der vergleichsweise geringen Volumina und Höhenunterschiede. An den Flüssen mit Kernkraftwerksstandorten gibt es in Deutschland keine Talsperren mit ausreichendem Wasserinventar, um Überflutungen in der Größenordnung des 10000jährigen Hochwassers hervorzurufen. Das Versagen solcher Strukturen wird deswegen im Folgenden nicht weiter betrachtet.

3.1.1.3 Niedrigwasser

Extreme Niedrigwasserstände treten an Flusstandorten als Folge von extremen Trockenperioden oder aufgrund langer Frostperioden auf. Die zeitliche Entwicklung verläuft langsam und ist in der Regel gut absehbar.

3.1.2 Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch Hochwassereinwirkung

In Deutschland treten jährlich mehrere Flusshochwasser und Sturmfluten auf. Während Flusshochwasser mehr oder minder zufällig über den Jahresverlauf verteilt sind (nur die Monate September und Oktober sind in den historischen Berichten unterrepräsentiert), treten Sturmfluten zumeist im Herbst und Winter auf.

3.1.3 Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland

Hinsichtlich der Sturmfluten sind die Sturmfluten 1962 und 1976 mit erheblichen Sach- und Personenschäden und zum Teil noch nie zuvor beobachteten Pegelständen an der Nordseeküste, den Flüssen Weser und Elbe sowie ihren Nebenflüssen aus jüngerer Zeit zu erwähnen.

Hinsichtlich der Flusshochwasser sind die Rheinhochwasser von 1993 und 1995 sowie das Oderhochwasser 1997 die Fluten an Elbe und Nebenflüssen (Mulde, Saale, etc.) in den Jahren 2002 und 2013 zu erwähnen.

3.2 Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu Hochwasser

3.2.1 Einleitung

Die nachfolgende Darstellung der Betriebserfahrung dient der Verdeutlichung der möglichen übergreifenden Auswirkungen von Überflutungen. Es wird dabei exemplarisch auf je ein Ereignis bezüglich Sturmflut und Flusshochwasser eingegangen. Insbesondere wird nicht auf Überflutungen durch lokale Starkregenereignisse, Tsunamieinwirkungen und mögliche Begleiterscheinungen von Hochwassern, wie z. B. erhöhten Treibgutanteil im Kühlwasserzulauf, eingegangen. Weitere Beispiele einschließlich lokaler Überflutungsereignisse finden sich in /RIS 10/ und /KRA 08/.

3.2.2 Ausland

Zu einer Überflutung auf Grund einer Sturmflut kam es in der Nacht vom 27.12. auf den 28.12.1999 in der Anlage Le Blayais in Frankreich /IAE 00/, /KRA 08/. Zu diesem Zeitpunkt war der dritte Reaktorblock zur routinemäßigen Wartung abgeschaltet. Der Sturm hatte zunächst zu Störungen im 400-kV-Netz geführt, was zu einer automatischen Abschaltung der Reaktorblöcke 2 und 4 geführt hatte. Anschließend wurde durch den Sturm das Wasser der Gironde über die Schutzdeiche hinweg auf das Gelände des Kernkraftwerkes gedrückt. Das Wasser überflutete unterirdisch gelegene Bereiche der Reaktorgebäude von Block 1 und 2. Es wurden auch Teile des Kühlsystems und der Notkühlung sowie weitere Sicherheitseinrichtungen überflutet.

Aufgrund starker Regenfälle und eines Anstieges des Missouri-River, der zu einem Dambruch führte, wurde für die Anlage Fort Calhoun am 6. Juni 2011 der Notstand ausgerufen /NRC 11/. Einen Tag später wurde das Gelände wegen eines Feuers evakuiert. Das Feuer führte zum Ausfall einer Kühlpumpe für das Abklingbecken für abgebrannte Brennstäbe /NRC 11a/. Spätestens ab dem 10. Juni 2011 war das Kraftwerk von dem Hochwasser direkt betroffen und eingeschlossen. Das Kraftwerk und die Anlagen waren nur noch durch eine mit Wasser gefüllte Schlauch-Barriere und mit Sandsäcken vor einer Überflutung geschützt. Am 26. Juni 2011 wurde die Schlauchbarriere durch ein Fahrzeug zerstört /NRC 11b/ und die Transformatoren, die den Anschluss ans Stromnetz sicherstellten, wurden umspült, so dass die Stromversorgung der Kühlung auf die Notstromdieselaggregate umgeschaltet werden musste /WNA 11/. Bis Anfang Juli war das Kraftwerk noch immer von Wasser eingeschlossen.

3.2.3 Inland

In deutschen Kernkraftwerken kam es bisher noch nicht zu Überflutungen aus Flusshochwassern oder Sturmfluten.

3.3 Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Gefährdung

3.3.1 Allgemeines

Für die Auslegung deutscher Kernkraftwerke gegen Hochwasser ist KTA 2207 /KTA 04/ die maßgebende kerntechnische Regel. Die derzeit gültige Fassung dieser KTA

2207 stammt aus dem Jahr 2004 und enthält gegenüber der Vorgängerversion im Wesentlichen Präzisierungen hinsichtlich der Jährlichkeit des Bemessungshochwassers und der Ausgestaltung von Schutzmaßnahmen.

Hinsichtlich der Ermittlung des Bemessungshochwassers und des Bemessungswasserstandes wird in KTA 2207 zwischen Flusstandorten und Standorten mit Tideeinfluss unterschieden. Die Verfahren für die beiden Standorttypen unterscheiden sich insbesondere deshalb, weil für Flusstandorte die maßgebende Einflussgröße der Hochwasserabfluss im Vorfluter (Fluss) ist, während Hochwasserereignisse an Tidestandorten durch die Auswirkungen von Sturmfluten dominiert werden. In beiden Fällen wird der Bemessungshochwasserstand, gegen welchen die Anlage auszulegen ist, durch Ereignisse einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $10^{-4}/a$ festgelegt. Allgemein ist zwischen den im Folgenden beschriebenen Verfahren zur Quantifizierung der Hochwassergefährdung zu unterscheiden. Standortspezifisch können die angewendeten Verfahren jedoch voneinander abweichen.

In der Regel liegen für die Kraftwerksstandorte selbst keine Pegelmessungen/Abflussmengenmessungen vor oder die verfügbaren Zeitreihen sind sehr kurz. In diesen Fällen muss zur Bestimmungen der Pegelstände am Kraftwerksstandort auf umliegende Pegel zurückgegriffen werden aus denen dann auf die Pegelstände am Kraftwerksstandort geschlossen werden kann.

Die KTA 2207 gibt in den Anhängen A2 und A3 jeweils ein Verfahren zur Ableitung von Abflussmengen bei Flusshochwassern und für Sturmflutscheitelstände an. Grundsätzlich ist nach diesen Verfahren vorzugehen, die KTA 2207 lässt jedoch Abweichungen davon im Einzelfall zu, wenn diese begründet sind. Im Folgenden werden die Vorgehensweisen nach KTA 2207 Anhänge A2 und A3 dargestellt, ohne dass auf ermittelte Werte eingegangen wird.

Die ermittelten Werte aus den Vorgehensweisen gemäß KTA 2207 werden im Abschnitt 3.5 aufgeführt und mit den Werten, die sich nach den in Abschnitt 3.4 vorgestellten Methoden ergeben, verglichen und bewertet.

3.3.2 Tidestandorte

Zur Ermittlung des Bemessungshochwassers an einem Tidestandort gibt die KTA 2207 /KTA 04/ in Anhang A (Abschnitt A3) vor, dass der Sturmflutscheitelwasserstand $SFWH_{10000}$ für die Sturmflut mit 10000 Jahren Wiederkehrzeit aus einem Basiswasserstand BWH_{100} für das Hochwasser mit 100 Jahren Wiederkehrzeit und der Extrapolationsdifferenz ED ermittelt werden soll.

$$SFWH_{10000} = BWH_{100} + ED \quad (3.1)$$

Zur Ermittlung der Extrapolationsdifferenz wird seitens der KTA keine Vorgabe gemacht und beispielhaft auf zwei Veröffentlichungen /JEN 00/ und /JEN 03/ verwiesen, die diese Extrapolationsdifferenz für norddeutsche Tidestandorte mittels statistischer Verfahren ermittelt haben. Die so ermittelte Extrapolationsdifferenz liegt im Bereich 100-150 cm.

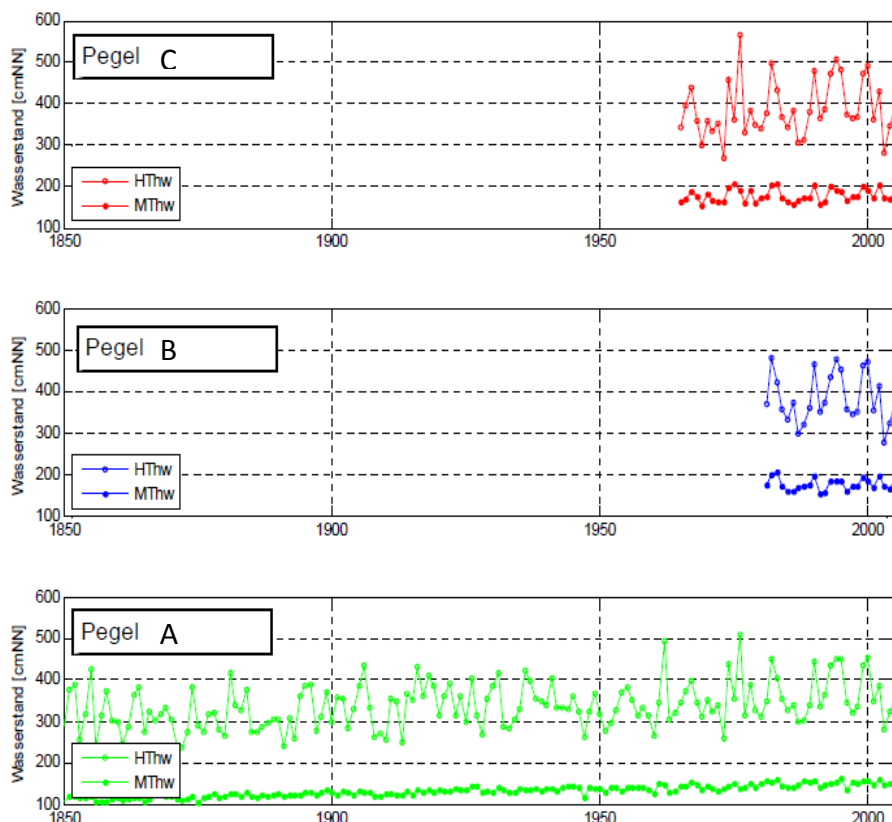


Abb. 3-1: Zeitreihen der Pegel A, B und C, jeweils für das mittlere Tidehochwasser und das Höchste Tidehochwasser. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.

Der betrachtete Tidestandort liegt im Ästuar eines Flusses. Sein Wasserstand wird wesentlich durch die Gezeiten bestimmt, Abflussmengen des Flusses spielen eine untergeordnete Rolle. Zur Bestimmung des Bemessungshochwassers am Kraftwerksstandort wurden drei umliegende Pegel (A, B, und C) herangezogen. Davon befinden sich zwei Pegel (A und B) seewärts des Standortes und einer (C) flussaufwärts. Die zur Ermittlung des Bemessungshochwassers verwendeten Datenreihen sind wegen ihrer ungleichen Zeitreihenlängen von unterschiedlicher Qualität. Die Zeitreihen sind in **Abb. 3-1** dargestellt.

Auf Grund der guten Korrelation zwischen den Pegeln A und B (vergl. **Abb. 3-2**) kann eine belastbare Übertragung des Hochwassers mit 100 Jahren Wiederkehrzeit vom Pegelstandort A auf Pegelstandort B vorgenommen werden.

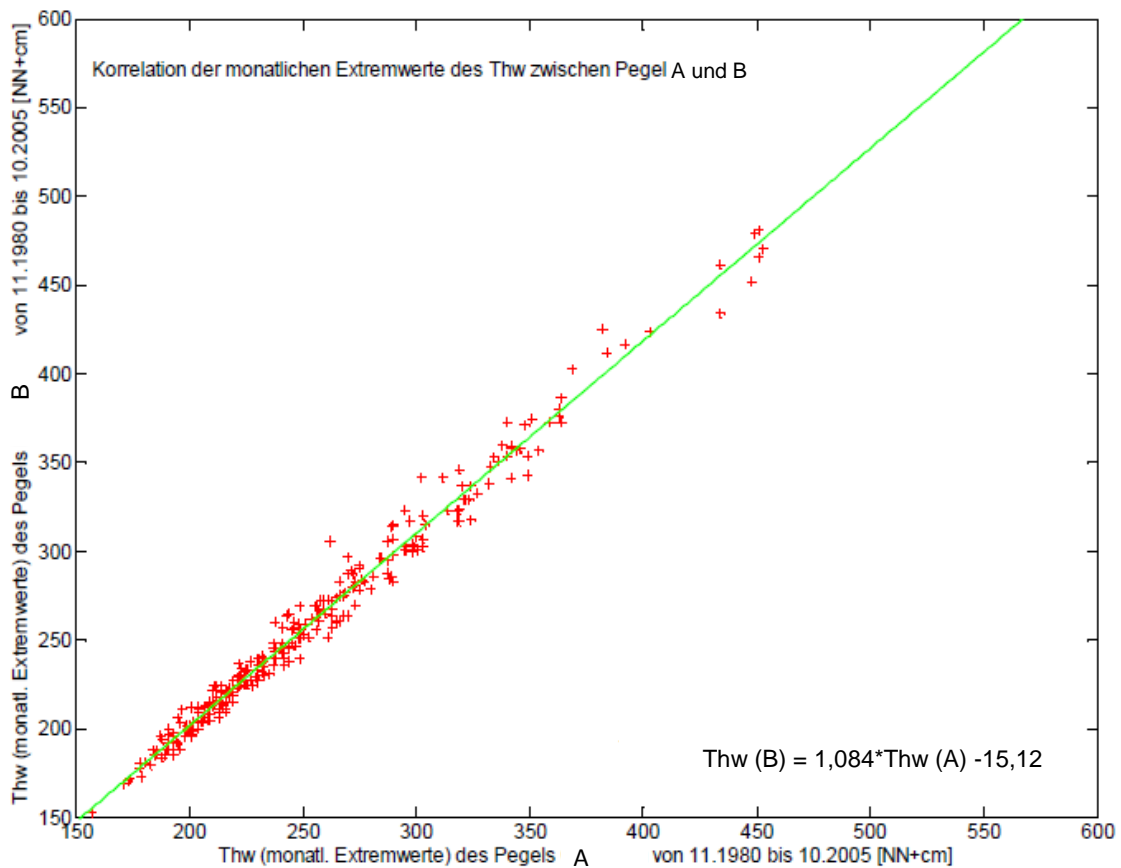


Abb. 3-2: Korrelation zwischen den Pegeln A und B. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.

Zur Ermittlung des Pegels mit 100 Jahren Wiederkehrzeit am Kraftwerksstandort wird, wie vorher beschrieben, das ermittelte hundertjährige Hochwasser des Pegels B und das hundertjährige Hochwasser für den Pegel C, das im nahen Extrapolationsbereich liegt, herangezogen. Die Korrelation zwischen den Pegeln B und C ist in **Abb. 3-3** dargestellt. Auf Grund dieser sehr guten Korrelation lässt sich der zu erwartenden Pegel am Kraftwerkstandort mittels einer linearen Interpolation zwischen den Pegeln B und C entsprechend der Flusskilometer zwischen den Pegeln ableiten.

Auf den so abgeleiteten Pegelstand am Kraftwerksstandort mit 100 Jahren Wiederkehrzeit wird die Extrapolationsdifferenz addiert, die sich wie oben beschrieben ergibt.

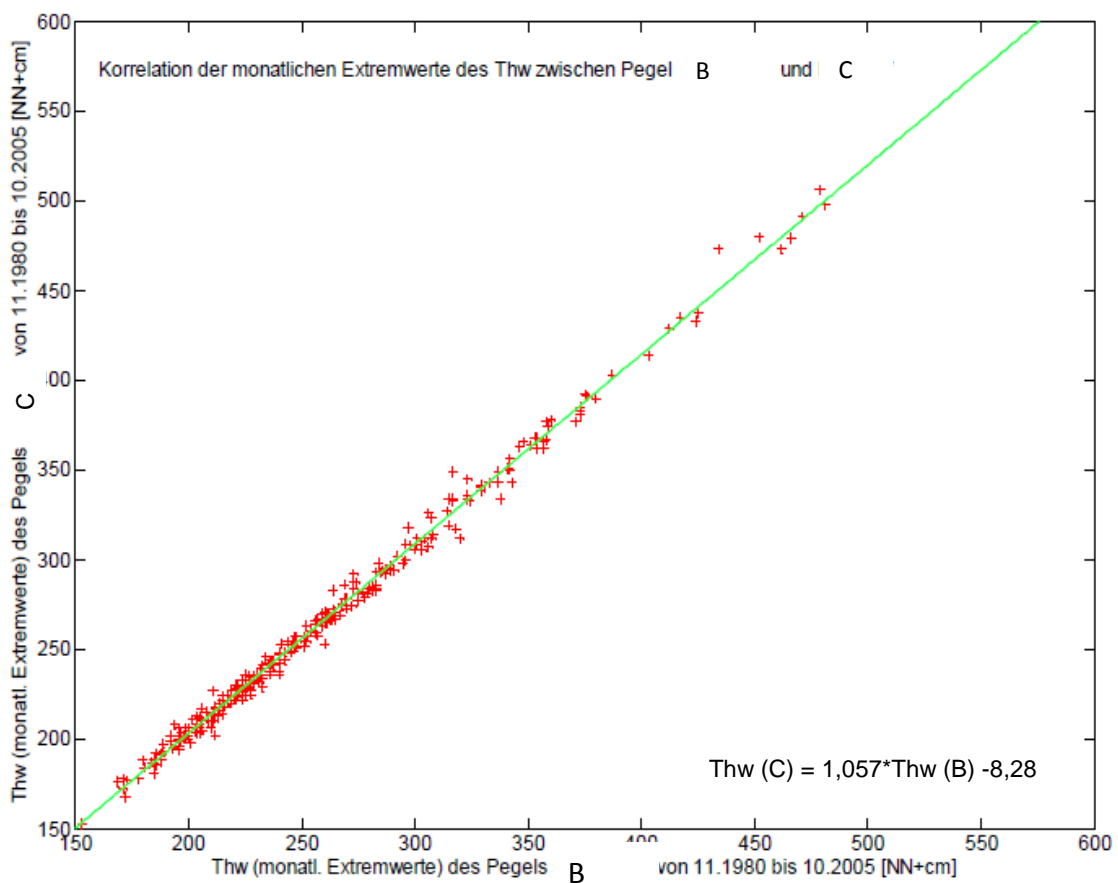


Abb. 3-3: Korrelation zwischen den Pegeln B und C. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.

3.3.3 Binnenstandorte

3.3.3.1 Abflussmengenbestimmung nach KTA 2207 Anhang A, Abschnitt A2

Zur Ermittlung des Bemessungshochwassers an Binnenstandorten gibt die KTA 2207 /KTA 04/ im Anhang A2 eine Methode vor, die auf der Extrapolation einer beobachteten Zeitreihe von Hochwasserabflussmengen beruht. Hierzu wird aus der beobachteten Zeitreihe zunächst die Hochwasserabflussmenge eines Hochwassers mit 100 Jahren Wiederkehrzeit (HQ_{100}) bestimmt. Dies erfolgt gemäß KTA 2207 Anhang A2 nach einem üblichen statistischen Verfahren wie im DVWK-Merkblatt 251 beschrieben. Für die darüber hinausgehende Extrapolation wird die Pearson-III-Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde gelegt. Hierzu wird die Schiefe der Verteilung per Konvention auf 4 festgelegt. Dies bewirkt, dass auftretende Hochwasserabflussmengen überschätzt werden, da in gemessenen Zeitreihen vorkommende Schiefen nach Stand der Wissenschaft unterhalb des Wertes 4 sind.

Es wird von der normalisierten Form der Zufallsvariable Hochwasserabflussmenge HQ

$$k = \frac{HQ - MHQ}{s_{HQ}} \quad (3.2)$$

ausgegangen, wobei MHQ der Mittelwert der (gemessenen) Hochwasserabflussmengen und s_{HQ} die Standardabweichung der (gemessenen) Hochwasserabflussmengen ist. Dies ergibt für ein Hochwasser mit 100 Jahren Wiederkehrzeit

$$HQ_{100} - MHQ = s_{HQ} k_{100} \quad (3.3)$$

und für ein Hochwasser mit 10000 Jahren Wiederkehrzeit

$$HQ_{10000} - MHQ = s_{HQ} k_{10000} \quad (3.4)$$

Das Verfahren nach KTA 2207 gibt vor, dass zur Ermittlung der Hochwasserabflussmenge für ein Hochwasser mit 10000 Jahren Wiederkehrzeit der Faktor k_{10000} wie folgt ermittelt wird

$$k_{10000} = k_{100} f = k_{100} \frac{k_{10000max}}{k_{100max}} = 2,8 k_{100} \quad (3.5)$$

Die Faktoren $k_{100\max}$ und $k_{10000\max}$ ergeben sich hierbei aus der Pearson-III-Wahrscheinlichkeitsverteilung bei einer Schiefe von $c = 4$ und sind unabhängig von den ortsspezifischen Daten, so dass sich der ortsunabhängige Wert $f = 2,8$ ergibt. Der Faktor k_{100} ergibt sich aus der gemessenen Schiefe c der Hochwasserabflussmengen mittels Tabelle A-1 der KTA 2207. Die Hochwasserabflussmenge für ein Hochwasser mit 10000 Jahren Wiederkehrzeit ergibt sich dann zu

$$\begin{aligned} HQ_{10000} &= MHQ + s_{HQ}k_{10000} = MHQ + s_{HQ}k_{100}f \\ &= MHQ + 2,8(HQ_{100} - MHQ) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Hierbei wird MHQ aus den gemessenen Zeitreihen der Hochwasserabflussmengen ermittelt.

3.3.3.2 Abflussmengenbestimmung am Kraftwerksstandort

Der betrachtete Binnenstandort liegt an einem Fluss. Sein Wasserstand wird durch die Abflussmengen des Flusses bestimmt. In unmittelbarer Nähe zum Kraftwerksstandort befindet sich flussabwärts eine Staustufe (S). Zur Bestimmung des Bemessungshochwassers am Kraftwerksstandort wurden zwei umliegende Pegel (D und E) herangezogen. Dabei befindet sich Pegel D flussabwärts des Standortes und Pegel E flussaufwärts. Der maßgebliche Pegel zur Bestimmung der Hochwasserabflussmenge ist Pegel E. Zwischen Pegel E und dem Kraftwerksstandort befinden sich keine maßgeblichen Einmündungen weiterer Gewässer. Die Qualität der Ergebnisse wird durch die Analyse der Hochwasserabflussmengen bei Pegel D abgesichert /JEN 11/.

Der nachfolgenden Ermittlung des Bemessungshochwassers liegen Zeitreihen für den Pegel D von 1824 bis 2004, für den Pegel E von 1845 bis 2004 zugrunde. Hierbei ist anzumerken, dass auf Grund großer Unsicherheiten in der Ermittlung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung, die häufigeren Änderungen unterworfen ist, die Zeitreihe vor 1905 mit Vorsicht zu sehen ist. Deswegen wurde die Analyse auch mit Zeitreihen 1905-2004 durchgeführt.

Gemäß KTA 2207 soll ein geeignetes Verfahren nach DVWK-Merkblatt 251 gewählt werden, um das Hochwasser mit 100 Jahren Wiederkehrzeit zu ermitteln. Dazu werden

die Zeitreihen der Pegel mittels verschiedener statistischer Verfahren ausgewertet. Exemplarisch ist das in **Abb. 3-4** dargestellt.

Ein wesentliches Kriterium zur Auswahl der Verteilungsfunktion, mit der das hundertjährige Hochwasser ermittelt wird, ist die Anpassungsgüte (mittlerer Fehler der Anpassung an die gemessene Zeitreihe). Dies führt im vorliegenden Fall unter Würdigung von vier betrachteten Zeitreihen (Pegel D 1824-2004 und 1905-2004, sowie Pegel E 1845-2004 und 1905-2004) zur Auswahl der Pearson-III-Verteilung.

Mittels der so erhaltenen HQ_{100} und MHQ wird, wie oben beschrieben, auf die Abflussmenge des 10000jährigen Hochwassers extrapoliert. Aus dieser Abflussmenge wird mittels einer Wasserstands-Abfluss-Beziehung auf den Wasserstand am Kraftwerksstandort geschlossen.

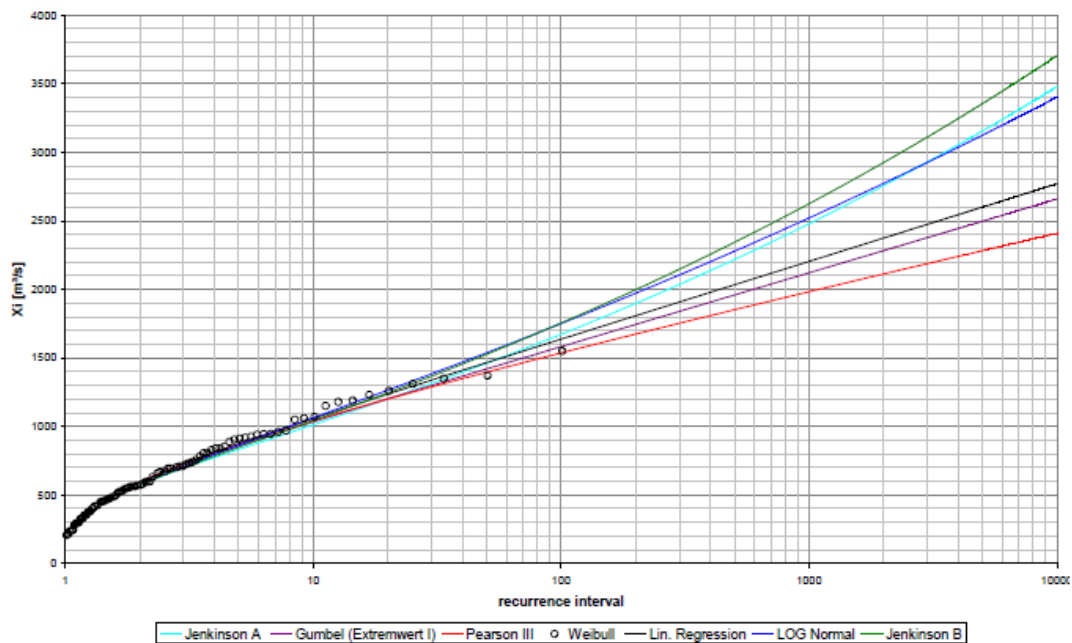


Abb. 3-4: Anpassung verschiedener nach DVWK-Merkblatt 251 zulässiger Verteilungen an die Zeitreihe des Pegels E /JEN 11/.

Aus den Anpassungen verschiedener hydrologischer Verteilungsfunktionen an die Zeitreihen wurde die Pearson-III-Verteilung aufgrund der besten Anpassungsgüte ausgewählt. In Abweichung von KTA 2207 /KTA 04/ kann daraus ebenfalls das 10000jährige Hochwasser direkt ermittelt werden. Die sich so ergebenden Werte sind in **Tab. 3-1** (Abschnitt 3.5.2) zum Vergleich mit aufgeführt.

3.3.3.3 Ableitung der Wasserstands-Abflussbeziehung

Zur Ableitung der Wasserstands-Abfluss-Beziehung muss der Pegelstand am Pegel E bei der zu unterstellenden Abflussmenge HQ_{10000} ermittelt werden. Diese ergibt sich aus der Extrapolation von Werten die bei Messungen auftraten und bei bisher noch nicht aufgetretenen Pegelständen auf Grundlage von umfangreichen hydraulischen Modellierungen. Die Beziehung zwischen Wasserstand W und Abflussmenge Q am Pegel E ist in **Abb. 3-5** dargestellt, wobei gemessene Werte bis $1260 \text{ m}^3/\text{s}$ und berechnete Werte bis $2300 \text{ m}^3/\text{s}$ vorliegen. Aus dem Wasserstand am Pegel E muss dann auf den Wasserstand am Kraftwerksstandort geschlossen werden. Hierzu zieht /JEN 11/ umfangreiche Wasserlagenberechnungen für den betrachteten Fluss heran. Aus diesen Berechnungen ist ersichtlich, dass zwischen Pegel E und Staustufe S das Gefälle mit zunehmender Abflussmenge größer wird. Die Zunahme des Gefälles ist dabei nichtlinear und geht mit zunehmender Abflussmenge zurück.

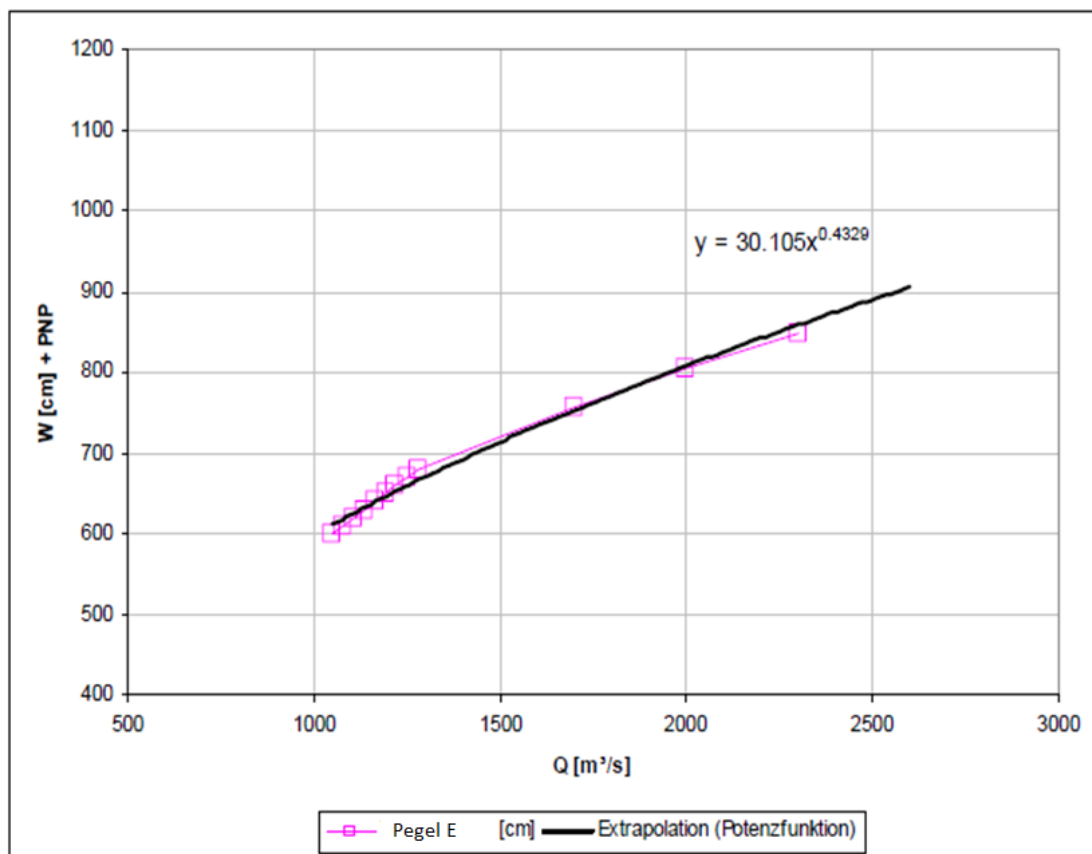


Abb. 3-5: Wasserstand am Pegel E in Abhängigkeit von der Abflussmenge. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.

Als konservative Abschätzung der Wasserspiegelhöhendifferenz zwischen Pegel E und Staustufe S wird die berechnete Wasserspiegelhöhendifferenz für eine Abflussmenge von 2300 m³/s verwendet. Dies ist insofern konservativ, als durch das zunehmende Gefälle bei zunehmender Abflussmenge die Höhendifferenz größer wird und deswegen die Wasserspiegelhöhe an der Staustufe überschätzt wird. Der Rückschluss auf die Wasserspiegelhöhe am Kraftwerksstandort erfolgt dann mittels einer linearen Interpolation zwischen Staustufe S und Pegel E entsprechend der Entfernungen.

3.4 Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse

Im Folgenden werden für einen Tidestandort zwei weitere mögliche Verfahren vorgestellt. Die KTA 2207 /KTA 04/ fordert explizit, dass der zeitliche Verlauf eines Hochwasserereignisses zu berücksichtigen ist. Dies erfolgte mit dem Verfahren nach KTA 2207 Anhang A (Abschnitt A3) bisher nicht. Für den Tidestandort erfolgten daher statistische Untersuchungen, die den zeitlichen Verlauf einer Sturmflut mit einbeziehen.

Für den Binnenstandort wurde ein Vergleichsverfahren gewählt, mit dem man in Bezug auf andere äußere Einwirkungen (z.B. Erdbeben, Wind) bereits gute Erfahrungen gemacht hat, so dass es nahe lag eine Übertragbarkeit auf Flusshochwasser zu prüfen. Die ermittelten Werte aus der in Abschnitt 3.3.3.2 dargestellten Vorgehensweise gemäß KTA 2207 werden im Abschnitt 3.5 aufgeführt und mit den Werten, die sich nach der in Abschnitt 3.4.2 vorgestellten Methode ergeben, verglichen und bewertet.

3.4.1 Tidestandorte

3.4.1.1 Vereinfachtes Verfahren zur Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs

Die Methode basiert auf der Trennung der Einflüsse des deterministischen Anteils der Sturmflut, dem astronomisch bedingten Tidehochwasser, und des stochastischen Anteils, dem durch Wind hervorgerufenen Aufstau. Durch Subtraktion des gezeitenbedingten Anteils vom SFWH wird die sogenannte Windstaukurve erstellt. Hierfür greift die Studie /JEN 11/ auf die Ergebnisse vorangegangener Analysen zurück und verwendet die dort aus Daten extremer Sturmflutereignisse ermittelte relative Windstaukurve WS_{rel} . Basierend auf der mittleren Tidekurve $WH_{Tide,m}$ des dem Standort nächst-

gelegenen Pegels wird der maßgebliche Sturmflutverlauf, auf welchen WS_{rel} zu skalieren ist, ermittelt. Der endgültige Bemessungswasserstand $BWH_{(10^{-4})}$ ergibt sich mit dieser Methode durch die Formel

$$BWH_{(10^{-4})}(t) = WH_{Tide,m}(t) + WS_{rel}(t) \cdot (SFWH_{(10^{-4})\text{Standort}} - MThw) \quad (3.7)$$

als Superposition von mittlerer Tidekurve und standortbezogener Windstaukurve, mit dem mittleren jährlichen Tidehochwasserstand $MThw$, wie in **Abb. 3-6** dargestellt.

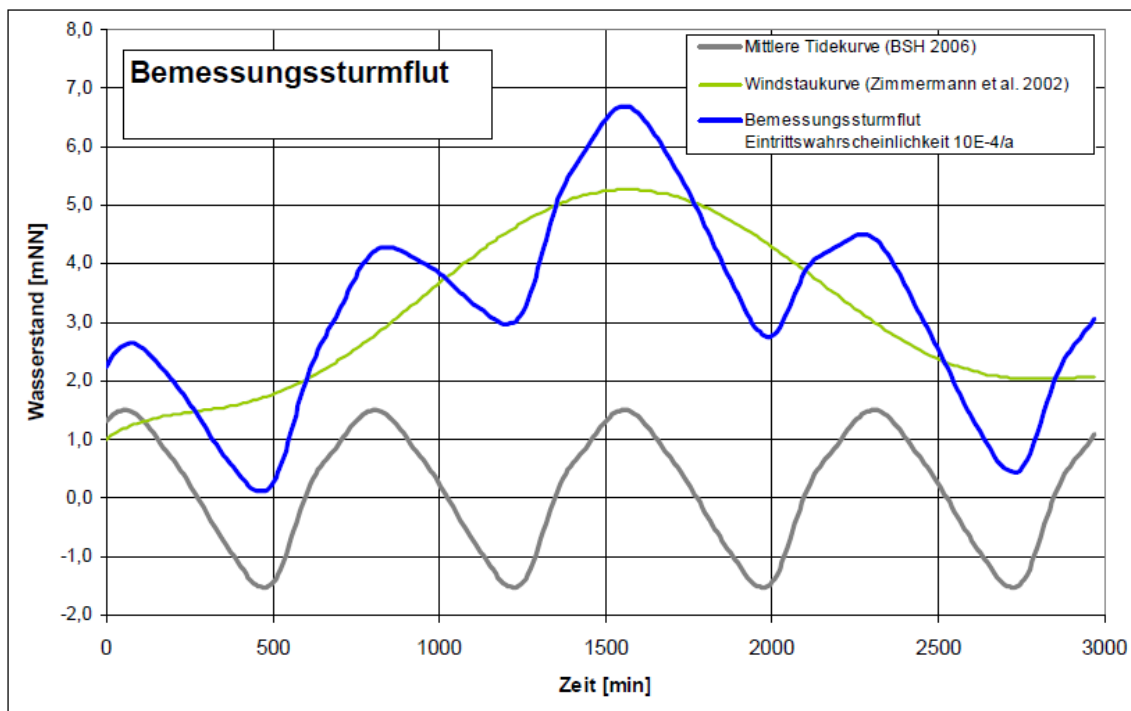


Abb. 3-6: Zerlegung des Sturmflutscheitelwasserstandes in Windstaukurve und mittlere Tidekurve. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/

3.4.1.2 Integrierte Betrachtung von Fülle und Scheitel zur Bestimmung der kombinierten Eintrittswahrscheinlichkeit

Im zweiten vorgestellten Verfahren wird der zeitliche Verlauf der Sturmfluttidekurve nicht nur bei der Bestimmung des Bemessungswasserstandes berücksichtigt, sondern fließt über eine zusammenfassende Betrachtung des Scheitelwasserstandes und der Sturmflutfülle auch in die Ermittlung der Überschreitungswahrscheinlichkeit mit ein. Die Sturmflutfülle ist definiert als das Zeitintegral über Vortide, Haupttide und Nachtide der

Wasserstände (vergl. **Abb. 3-7**). Die Sturmflutfülle ist ein Maß für die zeitliche Entwicklung der Sturmflut.

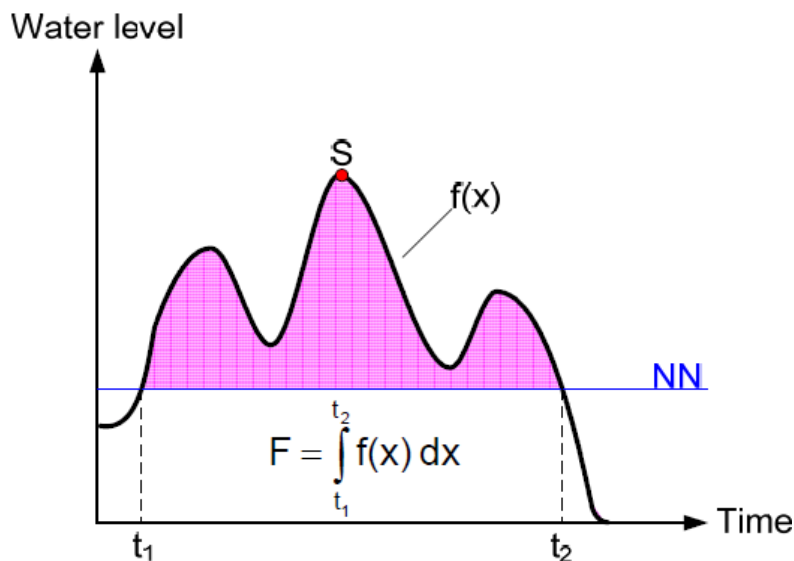


Abb. 3-7: Definition der Sturmflutfülle F nach /JEN 11/.

Mithilfe von Monte-Carlo-Simulationen und zweckmäßiger Parameterwahl zur eindeutigen zeitabhängigen Beschreibung der Sturmflut, inklusive Vortide, Hauptscheitel und Nachtide werden auf Grundlage der gemessenen Tidehochwasserscheitel des Pegels A zufällige Sturmflutkollektivdatensätze erstellt. Die Parametrisierung der Sturmflut umfasst 25 Parameter (vergl. **Abb. 3-8**), die zum Teil unterschiedlichen Verteilungsfunktionen folgen.

Die für jeden Parameter relevante Verteilungsfunktion wird aus den gemessenen Sturmflutverläufen, die im Rahmen einer Peak-over-threshold-Analyse des Pegels A gewonnen wurden, ermittelt. Als Kriterium für die Auswahl von Verteilungsfunktionen der einzelnen Parameter dient der mittlere Fehler der Anpassung.

Aufgrund der Beliebigkeit dieser künstlichen Sturmflutverläufe müssen zwangsläufig auftretende unrealistische Parametersätze unter Anwendung verschiedener Filter aussortiert werden. Diese Auswahl der realistischen Sturmflutverläufe wird anhand von automatisierten Vergleichen der Form und maximalen Scheitelhöhe der simulierten mit den gesammelten Sturmflutdaten durchgeführt. Aus diesen so ermittelten Sturmfluten werden dann jeweils die Sturmflutfülle und der Sturmflutscheitelwasserstand abgeleitet.

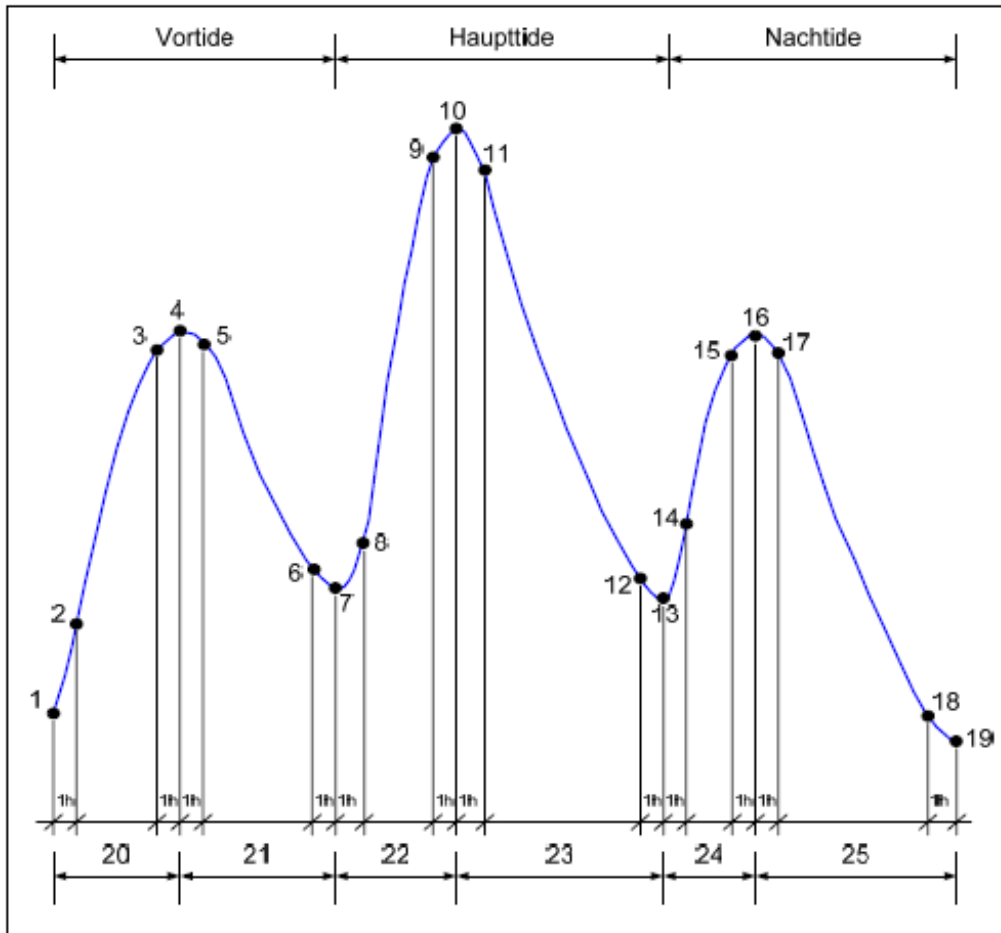


Abb. 3-8: Ansatz zur Wahl der Parameter nach /JEN 11/

Aus den Monte-Carlo-Simulationen wird eine empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Sturmflutfülle und den Scheitelwasserstand abgeleitet und anschließend diese empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung mittels Copulafunktionen möglichst gut beschrieben. Die Copulafunktionen ermöglichen eine präzise Erfassung der Wahrscheinlichkeitsverteilung, unter Beachtung der Korrelation der Parameter Sturmflutfülle und Scheitelwasserstand, der beobachteten Sturmfluten und der Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen.

In einem Hochwasserschutzkonzept können mit dieser Methode sowohl Ereignisse mit sehr hohen Scheiteln und steilen Verläufen als auch Ereignisse anhaltend hoher Belastung durch eine große Fülle berücksichtigt werden. Die Überschreitenswahrscheinlichkeit für solche Ereignisse ist in **Abb. 3-9** dargestellt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sowohl Ereignisse mit hohem Scheitelwasserstand aber kurzer Zeitdauer als auch Ereignisse mit relativ niedrigem Scheitelwasserstand und großer Zeitdauer geben kann.

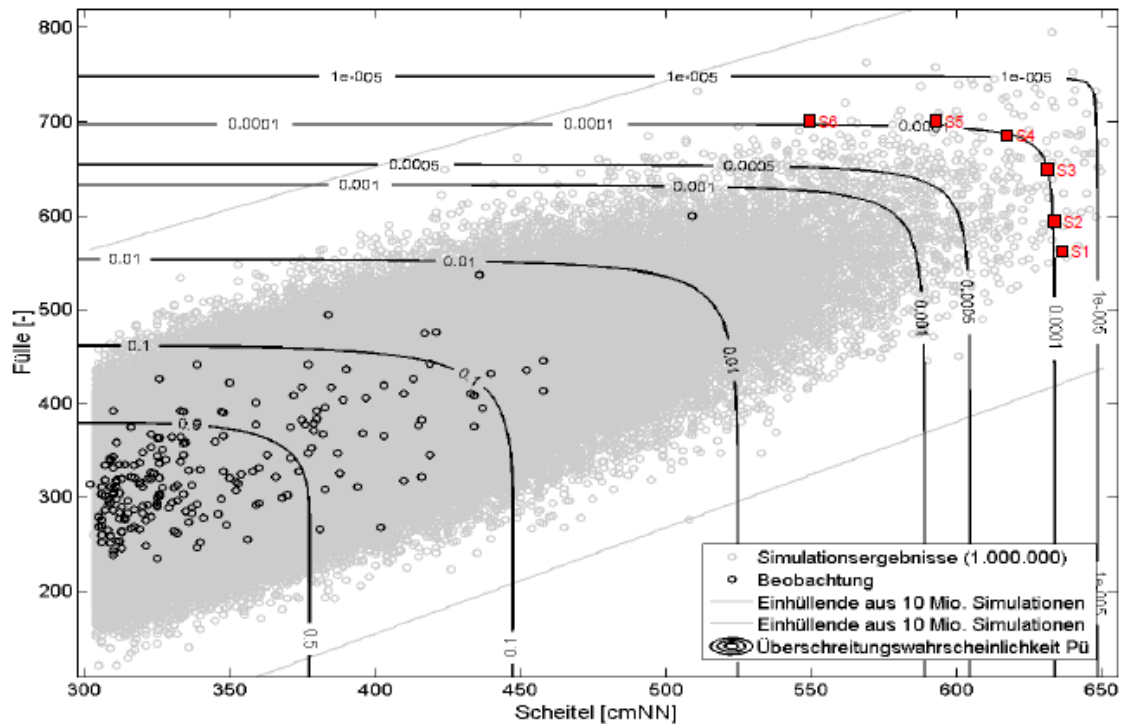


Abb. 3-9: Kombinierte Eintrittswahrscheinlichkeiten der beiden Parameter Fülle und Scheitel /JEN 11/. Schwarz durchgezogen sind die Linien gleicher Überschreitenswahrscheinlichkeit für die Kombination aus Scheitelwasserstand und Sturmflutfülle dargestellt.

3.4.2 Binnenstandorte

Der vorgestellte probabilistische Ansatz nach dem ProGumbel-Verfahren verfährt nach einem ähnlichen Muster wie das für seismische Analysen entwickelte ProGUMBEL-Programm /JEN 03/. Hochwasserstände mit Überschreitenswahrscheinlichkeiten von $10^{-3}/a$ bis $10^{-4}/a$ sind in der Hinsicht außerordentlich, dass aufgrund des Einflusses natürlicher Begrenzungen oder von Deichen nur selten Ereignisse auftreten können, die diese noch überschreiten. Bei ProGumbel wird angesetzt, dass es eine absolute Obergrenze für solche Ereignisse gibt bei denen die Eintrittsrate $\lambda(>x_{max}) = 0$ ist. Die Umgebung der Nullstelle wird mathematisch möglichst einfach mittels eines Polynoms beschrieben

$$\lambda(>x) = c \cdot (x_{max} - x)^k. \quad (3.8)$$

Die Auswertung aller verfügbaren Daten wird darauf konzentriert, diesen Verlauf der Eintrittsrate in der Nähe der Nullstelle zu bestimmen. Diesem Ziel wird die möglichst

genaue statistische Beschreibung im Bereich bestimmter vorliegender Extremwerte untergeordnet.

Eine solche Extremwertverteilung entspricht einer asymptotischen Verteilung vom Typ III, welche als Grenzfall für Extremwerte einer nach oben beschränkten Variablen auch als „Verallgemeinerte Gumbelfunktion“ bezeichnet wird.

In der Analyse /JEN 11/ wird unter diesen Rahmenbedingungen mit ProGumbel die Eintrittsrate eines Hochwasserabflusses „größer x“, welches einem Ereignis einer Eintrittswahrscheinlichkeit von $10^{-4}/a$ entspricht, für den maßgeblichen Pegel E berechnet. Dies ist beispielhaft für die Zeitreihe 1905-2004 in **Abb. 3-10** dargestellt.

Für 10000-jährliche Ereignisse wird anschließend analog dem in Abschnitt 3.3.3.3 beschriebenen Verfahren der Bemessungswasserstand ermittelt.

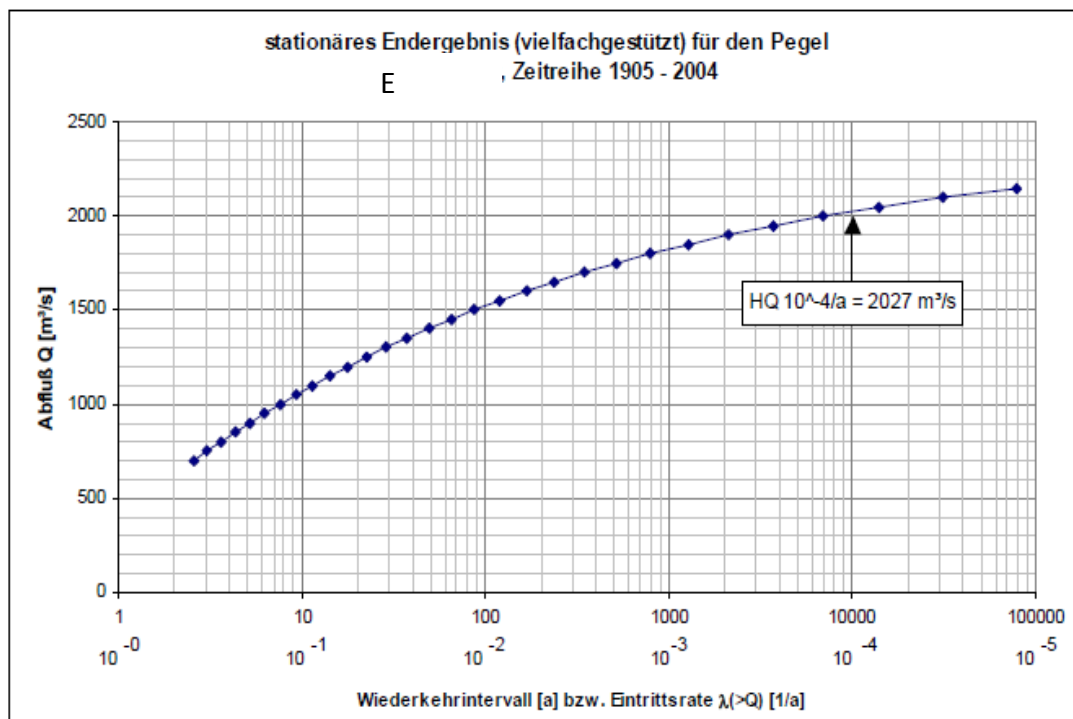


Abb. 3-10: Ergebnis des ProGumbel-Ansatzes für den Pegel E. Anonymisierte Darstellung nach /JEN 11/.

3.5 Vergleich und Bewertung der Methoden

3.5.1 Tidestandorte

Der zeitliche Verlauf einer Sturmflut wurde mit dem Verfahren nach Anhang A der KTA 2207 /KTA 04/ bisher nicht erfasst. Das Verfahren in Einklang mit der KTA 2207 ergibt für den Tidestandort einen Bemessungswasserstand von 670 cm über NN (Unsicherheitsbereich von 648 bis 698 cm NN). Dieser leitet sich, wie oben beschrieben, aus den 3 Zeitreihen der Pegel A, B und C ab. Für den Pegel A wurde das Sturmflutereignis mit 10000 Jahren Wiederkehrzeit zu 618 cm über NN ermittelt (Unsicherheitsbereich (Unsicherheitsbereich 584 bis 652 cm NN)).

Die in 3.4.1.1 vorgestellte Methode kann den zeitlichen Verlauf grob erfassen, stellt jedoch nur einen ungefähren Anhaltspunkt dar, da die Zerlegung in mittlere Tidekurve und Windstaukurve einer gewissen Willkür unterliegt. Insbesondere ist sie so konstruiert, dass das Maximum der Haupttide mit dem Maximum der Windstaukurve zusammenfällt. Neue Erkenntnisse hinsichtlich des Bemessungswasserstandes ergeben sich nicht, da der Sturmflutscheitelwasserstand auf den gemäß Anhang A der KTA 2207 ermittelten Scheitelwasserstand von 670 cm über NN normiert wurde.

Die in 3.4.1.2 vorgestellte Methode verwendet Monte-Carlo-Simulationen, um aus bisher beobachteten Sturmfluten am Pegel A mittels statistischer Simulationen ein größeres Sturmflutkollektiv zu erzeugen und dieses anschließend hinsichtlich der Parameter Sturmflutfülle und Scheitelwasserstand mittels Copula-Funktionen zu beschreiben. Der hieraus abgeleitete maximale Sturmflutscheitelwasserstand für ein 10000jähriges Ereignis beträgt 637 cm über NN und ist damit etwa 20 cm höher als der bisher ermittelte Wasserstand am Pegel A. Dies liegt allerdings noch im Unsicherheitsbereich der anderen Methode und ist damit nicht im Widerspruch zu dieser Methode. Unklar bleibt dabei, wie sich die Erkenntnisse aus der Monte-Carlo-Simulation für den Pegel A auf den Kraftwerksstandort übertragen lassen. Die Zeitreihen an den Pegeln B und C erscheinen zu kurz, um ein robustes Kollektiv von Wasserstands-Zeit-Verläufen als Basis für

eine Simulation abzuleiten. Wie die Deformierung der Sturmflut¹ zwischen den einzelnen Pegeln zu berücksichtigen wäre, bleibt ebenfalls unklar.

3.5.2 Binnenstandorte

Für den Flusst Standort ergeben sich aus den einzelnen Verfahren folgende Abflussmengen für den maßgeblichen Pegel E

Tab. 3-1: Abflussmengen am Pegel E nach /JEN 11/.

Verfahren	Abflussmenge (m ³ /s) Zeitreihe 1905-2004	Abflussmenge (m ³ /s) Zeitreihe 1845-2004
KTA 2207 Anhang A	3169	3650
Pearson III Verteilung	2409	2783
ProGumbel	2027	2213

Der ProGumbel-Ansatz erscheint aus folgenden Gründen nicht zweckmäßig zu sein: Der ermittelte Hochwasserabfluss erscheint zu gering, wenn man die Größe des Einzugsgebiets in Betracht zieht. Der Standort liegt an einem mittleren Fluss. Das Einzugsgebiet des Pegels E liegt bei etwa 12000 km². Für die Zwickauer Mulde mit einem Einzugsgebiet von etwa 2300 km² /KIR 02/ wurde am 13.08.2002 ein Hochwasserabfluss von 1000 m³/s ermittelt /LFU 12/. Vergleichbar wurde für die Freiburger Mulde mit einem Einzugsgebiet von etwa 3000 km² /KIR 02/ ebenfalls am 13.08.2002 ein Hochwasserabfluss von 1660 m³/s ermittelt /LFU 12/. Die Einzugsgebiete sind jedoch sehr unterschiedlich in ihren Charakteristiken, dies verliert aber, wie oben erwähnt, bei extremen Hochwassern zunehmend an Bedeutung, da kaum noch Retentionswirkung vorhanden ist.

Ein weiterer Vergleich mit historischen Hochwasserereignissen führt zur sogenannten Magdalenenflut von 1342, die vor allem das Mainingebiet traf. Aus Chroniken lässt sich beispielsweise für Würzburg ein Pegelstand von 9,50 m bis 10,30 m ermitteln und dar-

¹ Der Begriff Deformierung bezieht sich hierbei darauf, dass die Sturmflut bei Eindringen in das Tideästuar ihre Form ändert. Normalerweise steilt sich die Flutwelle dabei auf.

aus Hochwasserabflüsse von etwa 3050 m³/s bis 3600 m³/s /WUE 13/. Das Einzugsgebiet des Mains oberhalb von Würzburg ist etwa 14000 km² groß und von seiner Charakteristik her gut vergleichbar mit dem betrachteten Standort. In den Jahrhunderten nach 1342 hat sich jedoch die Nutzung dieser Flächen bedeutend geändert, insbesondere existiert heutzutage wieder mehr Waldfläche.

Das Verfahren nach KTA 2207 stellt in dieser Hinsicht die konservativere und plausiblere Schätzung dar. Eine physikalische Begrenzung der Abflussmengen vor Ort kann sich zudem nur aus besonderen geografischen Eigenschaften des Standortes ergeben, wenn beispielsweise das Überströmen von Wasser in ein anderes Flusstal möglich wird.

3.5.3 Eishochwasser

Eishochwasser sind in Deutschland selten jedoch nicht ausgeschlossen. Sie lassen sich nach derzeitigem Kenntnisstand nicht statistisch erfassen und in ihrer Auswirkung nur schlecht beschreiben. Die Behandlung von Eishochwasser ist stark abhängig vom betrachteten Standort und muss individuell auf Plausibilität überprüft werden. Eine abschließende Bewertung hierzu ist nicht möglich.

3.5.4 Niedrigwasser

Niedrigwasserstände treten allmählich auf. Es gibt keine zuverlässigen statistischen Verfahren, um Niedrigwasserstände zu erfassen und auf ähnliche Zeiträume (10000 Jahre) zu extrapolieren wie Hochwasserstände. Auf Grund des langsamen Eintretens von Niedrigwasserständen, können betroffene Anlagen frühzeitig Maßnahmen wie das Herunterfahren der Anlage ergreifen, um die Niedrigwasserperiode zu beherrschen. Bei lang anhaltender Trockenheit müssen gegebenenfalls auch temporäre Maßnahmen durchgeführt werden, wie zum Beispiel der Einsatz von Feuerlöschpumpen um das notwendige Kühlwasser bereitzustellen. Damit diese Maßnahmen zeitgerecht durchgeführt werden können empfiehlt es sich entsprechende Prozeduren vorab zu entwickeln und das für deren Durchführung erforderliche Material vorzuhalten.

Ein völliges Austrocknen des Flusses ist nach Ansicht der GRS in Deutschland nicht zu erwarten.

4 Großräumige Windeinwirkungen

4.1 Darstellung der großräumigen Windeinwirkung

4.1.1 Grundlagen

Wind gehört zu den klimatisch bedingten Einwirkungen. In diesem Kapitel werden nur großräumige Windereignisse, jedoch keine Tornados behandelt. Letztere werden in einem eigenen Kapitel behandelt, da sie sich in vielerlei Hinsicht, beispielsweise der Erfassung, der Entstehung und dem Gefahrenpotential deutlich von großräumigen Windereignissen unterscheiden.

Winde hoher Geschwindigkeit (Stürme, Orkane) können bei hohen Druckgradienten entstehen. Sie sind als Sturmtief häufig im Einflussbereich starker Tiefdruckgebiete vorhanden. Aufgrund der Rotation der Erdkugel unterliegt der Wind zusätzlich auch der Corioliskraft, wodurch die Windströmung von der Richtung des Druckgradienten in die Isobarenrichtung umgelenkt wird. Diese in großer Höhe auftretenden Luftströmungen werden als Gradientenwinde bezeichnet. Weiterhin wirken thermische Effekte auf die Luftmassen. Durch den Ausgleich zwischen aufgrund von Erwärmung aufsteigenden und durch Abkühlen absinkenden Luftmassen, wird ein zusätzlicher resultierender Windvektor erzeugt. Überdies gibt es weitere lokale Ursachen, wie z. B. topographisch bedingte Kanalisierung, die zur Entstehung von lokalen Winden führen können. Aufgrund der geringen Bodenreibung entstehen Stürme häufig über dem Meer und können dort höhere Geschwindigkeiten erreichen als auf dem Festland.

Großräumige Winde werden hinsichtlich ihrer Stärke i. A. gemäß ihrer Auswirkungen und der Windgeschwindigkeit eingestuft. Eine häufig genutzte Einteilung ist die Beaufort-Skala, welche 1806 unter dem englischen Admiral Sir Francis Beaufort (1774 - 1857) erarbeitet wurde, und in **Tab. 4-1** dargestellt ist /DWD 13/, /MGD 13/. Sie reicht in ihrer Ursprungsform von Stärke 0, was Windstille entspricht, bis Stärke 12 (Orkan).

Tab. 4-1: Windstärke gemäß Beaufort-Skala /DWD 13/, /MGD 13/

Windstärke (Bft)	Bezeichnung	Wirkung an Land	Windgeschwindigkeit (m/s)
0	Windstille	keine Luftbewegung, Rauch steigt senkrecht empor	0,0 – 0,2
1	leiser Zug	kaum merklich, Rauch treibt leicht ab, Windflügel und Windfahnen unbewegt	0,3 – 1,5
2	leichte Brise	Blätter rascheln, Wind im Gesicht spürbar	1,6 - 3,3
3	schwache Brise	Anfänge der Schaumbildung	3,4 – 5,4
4	mäßige Brise	Zweige bewegen sich, loses Papier wird vom Boden gehoben	5,5 - 7,9
5	frische Brise	größere Zweige und Bäume bewegen sich, Wind deutlich hörbar	8,0 – 10,7
6	starker Wind	dicke Äste bewegen sich, hörbares Pfeifen an Drahtseilen	10,8 – 13,8
7	steifer Wind	Bäume schwanken, Widerstand beim Gehen gegen den Wind	13,9 – 17,1
8	stürmischer Wind	große Bäume werden bewegt, Fensterläden werden geöffnet, Zweige brechen von Bäumen, beim Gehen erhebliche Behinderung	17,2 - 20,7
9	Sturm	Äste brechen, kleinere Schäden an Häusern, Ziegel und Rauchhauben werden von Dächern gehoben, Gartenmöbel werden umgeworfen und verweht, beim Gehen erhebliche Behinderung	20,8 – 24,4
10	schwerer Sturm	Bäume werden entwurzelt, Baumstämme brechen, Gartenmöbel werden weggeweht, größere Schäden an Häusern; selten im Landesinneren	24,5 – 28,4
11	orkanartiger Sturm	heftige Böen, schwere Sturmschäden, schwere Schäden an Wäldern (Windbruch), Dächer werden abgedeckt, Autos werden aus der Spur geworfen, dicke Mauern werden beschädigt, Gehen ist unmöglich; sehr selten im Landesinneren	28,5 - 32,6
12	Orkan	schwerste Sturmschäden und Verwüstungen; sehr selten im Landesinneren	ab 32,7

Im Jahre 1946 wurde die Beaufort-Skala basierend auf einer Messhöhe der äquivalenten Windgeschwindigkeit von 10 m festgelegt und die Skala erweitert, um auch größere Windgeschwindigkeiten abzudecken /STE 08/. Dazu wird die nachstehende Gleichung 4.1 herangezogen:

$$U_{10} = 0,836 \cdot B^{3/2} \quad (4.1)$$

Dabei ist U_{10} die Windgeschwindigkeit in m/s in 10 m Höhe und B die Beaufort-Nummer. Somit ergibt sich die theoretische Möglichkeit unendlich viele Beaufort-Windstärken zu nutzen. In der Praxis wird dies jedoch meist nur bis Stärke 17 getan, wie in /PEI 03/ dargestellt. Winde werden als Sturm bezeichnet, wenn Windgeschwindigkeiten von mindestens 20,8 m/s (74,9 km/h) erreicht werden. Stürm mit Windgeschwindigkeiten ab 32,7 m/s (117,7 km/h), was der Stufe 12 auf der Beaufort-Skala entspricht, nennt man Orkan. Von Sturmböen wird gesprochen, wenn Winde nur kurzzeitig (für wenige Sekunden) Sturmstärke erreichen. Je nach dem vom Sturm mitgeführten Material spricht man darüber hinaus von Hagelstürmen, Schneestürmen, Staub- oder Sandstürmen. Auch jahreszeitliche Unterscheidungen werden gelegentlich genutzt, wie beispielsweise „Wintersturm“.

Es ist zu unterscheiden zwischen der Gefährdung am Standort und der Windlast, welche schlussendlich auf Bauwerke bzw. Bauteile einwirkt. Dieser Bericht beschränkt sich weitgehend auf die Standortgefährdung, da die ingenieurtechnische Bestimmung der Windlast z. B. nach Eurocode 1 (DIN EN 1991-1-4 /DIN 10/) bauwerksspezifisch ist.

Hinsichtlich der Standortgefährdung wird die Windströmung bzw. deren Geschwindigkeit selbst von den temporären meteorologischen Bedingungen, dem Geländeprofil und den lokalen Standortgegebenheiten (z. B. Bebauung) beeinflusst. Hierbei spielt in erster Line die Region des Standortes eine wesentliche Rolle, d. h. in welcher Windzone sich ein Standort befindet (vergl. **Abb. 4-3**). Weiterhin können lokale Faktoren, wie beispielsweise hügliges Gelände, starke Bebauung oder Bewaldung zu einer Reduzierung der anzusetzenden Windgeschwindigkeit führen. Andererseits sind Bauwerke, die in großer Höhe errichtet sind, insbesondere auf hohen vereinzelt Bergen, starker Windeinwirkung ausgesetzt. Bei sehr hohen Bauwerken ist darüber hinaus zu berücksichtigen, dass die Windgeschwindigkeit über die Höhe des Bauwerks zunimmt und dies entsprechend in die Bemessung einfließen muss.

Die daraus zu ermittelnden Windlasten auf Bauwerk (Verteilungen des Winddrucks, welcher auf die Außenfläche eines Bauwerks einwirkt, bzw. die Gesamtwindkraft als Resultierende) hängen von vielen Parametern ab. So ergibt sich aus einer meteorologisch verursachten Windströmung eine Druckverteilung um ein Bauwerk, das einer solchen Strömung ausgesetzt ist. Je nach Form, Ausrichtung und Größe eines Gebäudes können die Windlastwerte stark variieren. Zudem ist die Windlast nicht an jedem Bauwerksteil gleich. Die höchsten Windlasten wirken im Normalfall auf Gebäudeecken

und Kanten. Ferner kann sich die tatsächliche aus Wind resultierende Belastung eines Bauwerks noch durch die dynamische Antwort schwingungsanfälliger Bauwerke erhöhen. Im letzteren Fall ergibt sich schlussendlich eine dynamische Last, die bei der Bemessung zu berücksichtigen ist. Daher ist bei der Auslegung zwischen schwingungsanfälligen und nicht schwingungsanfälligen Bauwerken zu unterscheiden.

4.1.2 Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch großräumige Windeinwirkung

Atlantische Luftmassen werden über das ganze Kalenderjahr vorwiegend mit westlichen Winden nach Deutschland geführt. Dieser ozeanische Einfluss nimmt von Nordwest nach Südost ab. Über Wasserflächen, wie Meeren und Seen, sowie in küstennahen Gebieten herrschen wegen ihrer aerodynamischen Glätte höhere Windgeschwindigkeiten vor als im Binnenland, da sich die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Rauigkeit der Erdoberfläche reduziert. Somit nehmen die Windstärke und die Häufigkeit starker Winde mit wachsender Entfernung von der Küste ab. Daher wird beispielsweise auf der Hallig Hooge die mittlere Windgeschwindigkeit von 12 m/s (Starkwind) 158 Mal pro Jahr überschritten, während der gleiche Schwellwert in Stuttgart nur viermal überschritten wird /PEI 03/. Dieser Sachverhalt spiegelt sich in den Windverteilungskarten für Deutschland wieder. Ein einfaches Beispiel dafür ist **Abb. 4-3**, welche die Windzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland gemäß dem deutschen Nationalen Anhang DIN EN 1991-1-4/NA /DIN 10b/ des s. g. Eurocode 1 (EC1) zusammen mit dem zonenabhängigen Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit (mittleren Windgeschwindigkeit) und den zugehörigen Geschwindigkeitsdrücken darstellt. Ein dichtes Messnetz bildet die Grundlage dieser Windzonenkarte.

Windgefährdungskarten liefern Informationen mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Windgeschwindigkeit an welchen Orten auftritt. Die im Vergleich zur Windzonenkarte detaillierter aufgelöste Gefährdungskarte der **Abb. 4-1** des Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM) zeigt die Maximale Böengeschwindigkeiten für eine statistische Wiederkehrperiode von 5 Jahren. Aus extremwertstatistischen Analysen von Sturmfeldern über einen klimatologischen Zeitraum (zwischen 1971 und 2000) wurden Windgeschwindigkeiten für bestimmte Wahrscheinlichkeiten oder Wiederkehrperioden mittels des nicht-hydrostatischen Karlsruher Atmosphärischen Mesoskaligen Modells (KAMM) und den ERA-40 Reanalysedaten des Europäischen Zentrums für Mittelfristvorhersage (ECMWF) geschätzt /CED 13/.

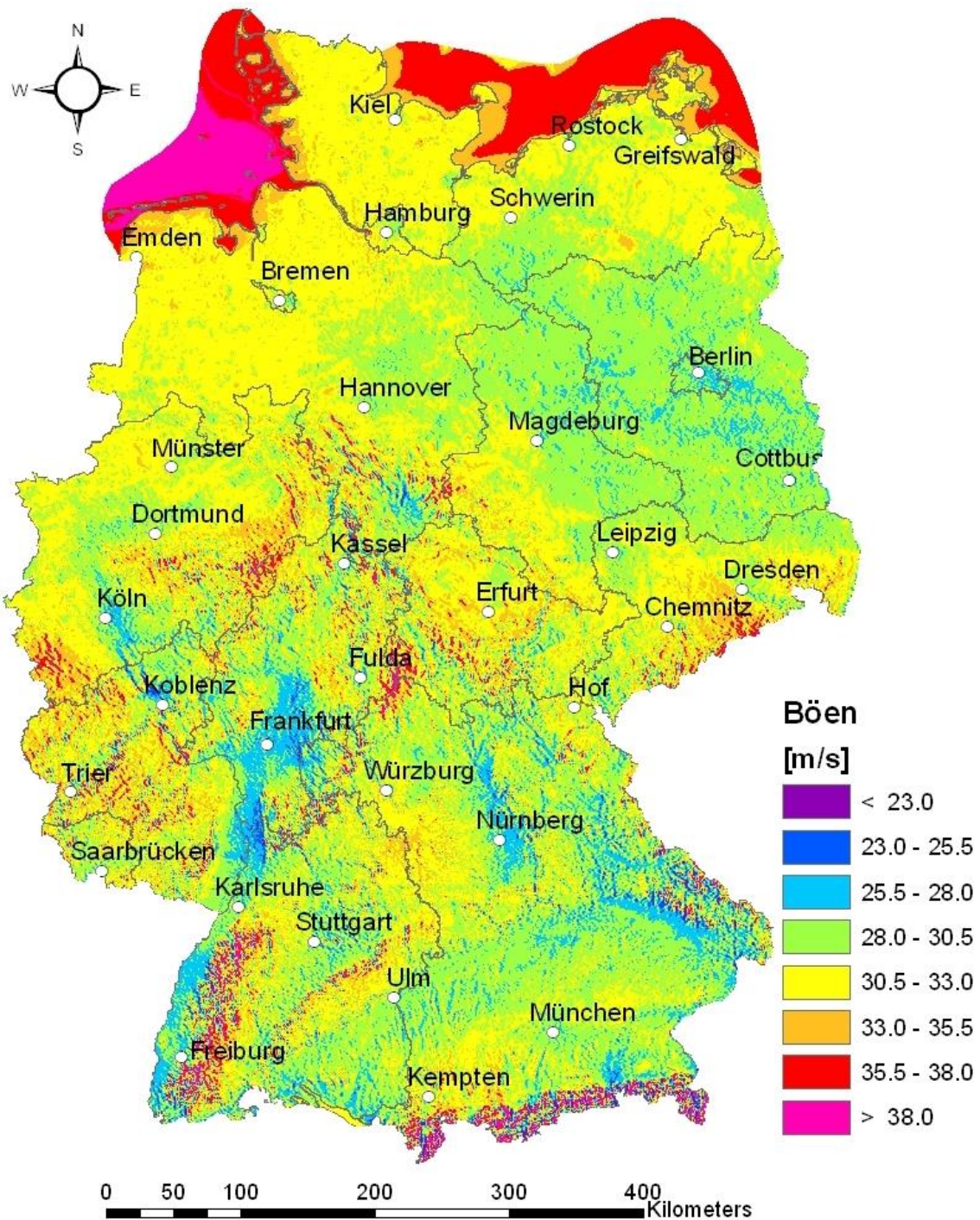


Abb. 4-1: Gefährdung durch Winterstürme in Deutschland, maximale Sturmböen für eine Wiederkehrperiode von 5 Jahren /CED 13/

Kritische Regionen mit erhöhten Windgeschwindigkeiten je nach Exposition, Geländehöhe und Landnutzung werden sichtbar. Beispielsweise betragen die berechneten Böenmaxima zwischen 23 m/s (in tiefen Tälern) und über 40 m/s (in Küstennähe bzw. auf den Gipfeln der Mittelgebirge). Vor allem Sättel, Kanten, Flanken und Berggipfel wei-

sen ein erhöhtes Gefährdungspotential durch extreme Windgeschwindigkeiten auf /CED 13/. Auch die Reliefs der Gebirge werden gut sichtbar.

Lokale Unterschiede werden aber nicht nur durch die Topographie sondern auch durch andere Effekte hervorgerufen. So können beispielsweise aus Gewittern, die ihr eigenes Windfeld aufbauen, sogenannte Downbursts bzw. Downdrafts entstehen. Hierbei handelt es sich um lokale starke Abwinde, die meist bei Gewittern auftreten und gefährliche Böen in Bodennähe erzeugen, welche sich konzentrisch nach allen Seiten ausbreiten und sogar das vorhandene Windfeld umkehren können. Eine wesentliche Ursache sind feuchte warme Luftmassen, die in Gewitterzellen aufsteigen und schnell abkühlen. Ein Gemisch aus Eis, Wasser und kalter Luft strömt dann mit hohen Geschwindigkeiten bis zu 240 km/h zur Erdoberfläche.

4.1.3 Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland

Auch wenn die Messbedingungen an verschiedenen Orten kaum miteinander vergleichbar sind, werden in diesem Kapitel zunächst einige gemessene extreme Windgeschwindigkeiten aufgeführt. So wirken sich die besonderen Strömungsverhältnisse (beispielsweise bei städtischen Messstellen durch Gebäude hervorgerufen oder topographische Gegebenheiten wie Gebirge) ganz unterschiedlich auf Windrichtung und -geschwindigkeit aus. Der Wind sollte normalerweise in 10 m Höhe über Boden gemessen werden, was nicht an allen Messstationen erfüllt werden kann. Auch sollte das Messprinzip einheitlich sein.

Die höchste bislang die in Deutschland gemessene Windgeschwindigkeit einer Böe im Bergland lag bei 335 km/h und wurde am 12. Juni 1985 auf der Zugspitze registriert /DWD 13b/. Das absolute Maximum der Windgeschwindigkeit einer Böe im Tiefland wurde am 3. Dezember 1999 in List auf Sylt mit 184 km/h (51 m/s) erfasst /DWD 13b/.

Aufgrund der großräumigen Ausdehnung ihrer Windfelder von über 1000 km verursachen Winterstürme in Deutschland mehr als die Hälfte der gesamten volkswirtschaftlichen Schäden durch Naturkatastrophen /CED 13/. In Deutschland sind einige Extremereignisse hinsichtlich der Schäden durch großräumige Windeinwirkung in den letzten Jahrzehnten aufgetreten von denen eine Auswahl im Folgenden beispielhaft aufgeführt wird.

Das Orkantief Lothar verursachte im 26. Dezember 1999 vor allem in Nordfrankreich, der Schweiz, Süddeutschland und Österreich die höchsten Sturmschäden in der jüngeren europäischen Geschichte. 110 Todesopfer /DWD 13c/ wurden erfasst und ein volkswirtschaftlicher Schaden von über 6 Mrd. USD abgeschätzt /HWW 12/, /SWI 02/. Die absolut höchste Windgeschwindigkeit während des Orkantiefs Lothar wurde in Deutschland auf dem Wendelstein vom DWD mit 259 km/h gemessen /DWD 00/. In der Schweiz wurden 20 % aller Gebäude des Kanton Nidwalden beschädigt. Zwischen Heimsheim und Karlsruhe war die Bundesautobahn A8 mehrere Tage durch umgefallene Bäume blockiert. In Frankreich und in der Schweiz sowie in vielen Teilen Süddeutschlands entstanden durch den Orkan große Waldschäden. Dieses Orkantief hatte auch eine Überflutung im französischen Kernkraftwerk Le Blayais zur Folge (vergl. Abschnitt 4.2).

Am 18./19. Januar des Jahr 2007 zog der Orkan Kyrill von der Nordsee mit heftigen Regenfällen, schweren Gewittern und Windspitzen bis 170 km/h über das nördliche Europa hinweg bis weit nach Osteuropa, was lokale Überschwemmungen zur Folge hatte /DWD 09/. Kyrill forderte mindestens 47 Todesopfer in Europa, davon 13 in Deutschland /BMI 13/ und führte zu erheblichen Sachschäden (geschätzter volkswirtschaftlicher Gesamtschaden: ca. 10 Mrd. USD /HWW 12/, /BMI 13/). Das öffentliche Leben in weiten Teilen Europas wurde durch zahlreiche Störungen im Energie- und Verkehrssektor erheblich beeinträchtigt; schätzungsweise eine Million Menschen waren zeitweilig ohne Strom. Der Orkan Kyrill verursachte in Deutschland auch große Schäden in den Waldbeständen, ganze Waldgebiete wurden verwüstet und der Verkehr auf den Straßen wurde durch umgestürzte Bäume stark in Mitleidenschaft gezogen /DWD 09/. Der Eisenbahnverkehr kam sogar völlig zum Erliegen, was bis dato noch nie vorkam, und die Dimension und Zerstörungskraft dieses Orkans zeigt. Dieser Orkan ist als ein Windereignis anzusehen, das nur alle 10 bis 20 Jahre einmal zu erwarten ist /DWD 09/.

Im Januar und Februar des Jahre 2010 forderten das Wintersturmtyf Daisy und der Orkan Xynthia viele Todesopfer. Das Sturmtyf Daisy, das sich vom 5. bis 11. Januar 2010 vom Mittelmeerraum über die Alpen nordostwärts verlagerte, fordere in Europa über 100 Menschenleben. Hierbei handelte es sich vorrangig um Kältetote (überwiegend in England). Die geschätzte volkswirtschaftliche Schadenshöhe wird auf 1,245 Mrd. Euro beziffert /BMI 13/. Weite Teile Mitteleuropas waren betroffen. In Deutschland kam es neben massivem Schneefall zu starken Schneeverwehungen und

an der Küste Schleswig-Holsteins bei kräftigem Ostwind zu einer Sturmflut, die mehrere Deiche und Strandpromenaden beschädigte /DWD 10/.

Xynthia ist der Name des Orkans, der sich vom 26. bis 28. Februar 2010 auf einer ungewöhnlichen Zugbahn entlang der Atlantikküste Portugals, Spaniens und Frankreichs und im weiteren über den Norden Frankreichs, der Beneluxstaaten und Deutschlands bis zur Ostsee verlagerte, wobei er ergiebige Regenfälle mit sich brachte. In den französischen Pyrenäen (auf dem Pic du Midi) wurde mit 238 km/h die höchste Windgeschwindigkeiten gemessen /MET 10/. Von den Schäden war vorrangig Westeuropa und das nördliche Mitteleuropa betroffen. Die größten Schäden richtete Xynthia in Frankreich an, wo allein beim Deichbruch bei L'Aiguillon-sur-Mer 51 Menschen starben /DWD 10/. Nach Angaben des französischen Zivilschutzes war Orkan Xynthia für Frankreich der folgenschwerste Sturm seit Orkan Lothar im Dezember 1999. Insgesamt hatte der Orkan ca. 65 Todesopfer zur Folge. Erste Schätzungen bezifferten den Versicherungsschaden auf 1,5 bis 3 Mrd. Euro. Zwischenzeitlich gibt /MUR 12/ an, dass der Orkan Xynthia versicherte Schäden von etwa 2 Mrd. Euro verursachte.

4.2 Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu großräumigen Windereignissen

Aufgrund der begrenzten Informationen zu Ereignissen im Ausland ist eine detaillierte sicherheitstechnische Bewertung aller Ereignisse unmöglich. Daher wird eine grobe Einteilung in drei Sicherheitsklassen (vergl. **Tab. 4-2**) genutzt. Die Klasse A bezeichnet Ereignisse, die keine nennenswerte sicherheitstechnische Bedeutung aufweisen. Sie sind typischerweise als INES 0 Ereignisse eingestuft. Bei den Ereignissen der Klasse B liegt eine Beeinträchtigung sicherheitsrelevanter Systeme vor (Ausfall von redundanten Sicherheitsteilsystemen oder Fehlanregung des Reaktorschutzes). Da bei den Ereignissen der Klasse B kein Sicherheitssystem angefordert wurde und die auslegungsgemäß erforderliche Anzahl von Sicherheitsteilsystemen verfügbar war, weisen diese Ereignisse eine (im Vergleich zu Klasse C) geringe sicherheitstechnische Bedeutung auf. Bei Letzteren führten die Ereignisse zu einem vollständigen Ausfall einer Sicherheitsfunktion (Ausfall aller Redundanzen) oder es wurden Reaktorschutzaktionen angefordert.

Tab. 4-2: Vereinfachte Klassifizierung zur Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung in Anlehnung an /KRA 08/

Klasse A	Klasse B	Klasse C
keine sicherheitstechnische Bedeutung	geringe sicherheitstechnische Bedeutung	mäßige bis hohe sicherheitstechnische Bedeutung
Auswirkungen auf betriebliche Systeme beschränkt	Ausfall von Sicherheitsteilsystemen	vollständiger Ausfall einer Sicherheitsfunktion (Ausfall aller Redundanten)
	<oder> Fehlanregung des Reaktorschutzes	<oder> Reaktorschutzaktionen angefordert (außer RESA)
<und> INES-Einstufung = 0	<und> INES-Einstufung ≤ 1	<oder> INES-Einstufung > 1

In den Jahren 1980 bis 2010 hat es in Deutschland insgesamt 10 meldepflichtige Ereignisse /BMU 01/ gegeben, bei denen Windeinwirkungen eine essentielle Rolle spielten. Diese sind in **Tab. 4-3** dokumentiert. Hierzulande können auftretende Belastungen durch aufgewirbelte Gegenstände für Gebäude, die gegen Flugzeugabsturz oder Explosionsdruckwelle ausgelegt sind, als abgedeckt betrachtet werden. Die frei auf dem Anlagengelände befindlichen elektrischen Schalteinrichtungen und Transformatoren können jedoch durch umherfliegende Gegenstände beschädigt werden. Als Folge von Schäden an diesen Anlagenteilen kann ein Notstromfall eintreten, wenn es beispielsweise bei einer Trennung vom Hauptnetz nicht gelingt, die Anlage auf Eigenbedarf abzufangen. Analoge Probleme können bei einem erhöhten Eintrag von Salzwasser, Regenwasser, Sand oder Staub auftreten.

Tab. 4-3: Meldepflichtige Ereignisse in Deutschland infolge großräumiger Windeinwirkung

Ereignis	Datum	Anlage	Kls.	Kurzbeschreibung
VERA-2007/006	18.01.2007	Emsland	A	Orkan Kyrill, RESA infolge eines Erdschlusses in der 380-kV-Ableitung

Ereignis	Datum	Anlage	Kls.	Kurzbeschreibung
VERA-2002/014	23.02.2002	Brokdorf	A	Gewitter, Sturm, Hagel, Schnee; Abschalten von Gleichrichtern durch Netzstörungen; Seiltanzen der Freileitungen im 400-kV-Netz
VERA-1999/116	26.12.1999	Gundremmingen	A	Orkan Lothar, Ausfall der Hauptkondensatpumpen und der Hauptkühlwasserpumpen infolge kraftwerksnahen Kurzschlusses und umherfliegender Teile
VERA-1995/012	23.01.1995	Rheinsberg	B	Orkanartiger Sturm, Startversagen eines Notstromdiesels bei Ausfall der 110-kV-Netzversorgung
VERA-1990/029	26.02.1990	Brunsbüttel	B	Nichtschliessen einer Durchdringungsabschluss-Armatur in einer Entwässerungsleitung des Frischdampfsystems bei RESA, ausgelöst durch vom Sturm geöffnete Dachklappen
VERA-1990/011	26.01.1990	Krümmel	A	Ausfall eines 110/11-kV-Fremdnetztrafos durch Kurzschluss
VERA-1984/002	13.01.1984	Stade	B	Starke Sturmböen, Erdschlüsse auf Freileitungen mit Trennung der Anlage vom Netz
VERA-1983/001	18.01.1983	Brunsbüttel	B	Starke Sturmböen, Ausfall des 380-kV-Netzanschlusses durch Erdschluss eines Stromwandlers
VERA-1982/100	15.08.1982	Isar, Block 1	B	Starke Sturmböen, Ausfall des 110-kV-Netzanschlusses durch herumfliegenden Ast
VERA-1981/001	01.01.1981	Brunsbüttel	B	RESA durch fehlerhaftes Öffnen einer Dachklappe des Maschinenhauses infolge von Orkanböen

International konnten zwischen 1980 und 2007 9 Ereignisse identifiziert werden, die in **Tab. 4-4** dokumentiert sind. Vorhandene INES-Klassifizierungen aus den Datenquellen werden in Klammern in der Spalte "Kls." mit angegeben.

Tab. 4-4: Internationale Ereignisse infolge großräumiger Windeinwirkung

Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
28.12.1999	Frankreich	C (2)	Teilweiser Verlust von Sicherheitssystemen aufgrund einer Überflutung weiter Teile der Anlage während eines Wintersturms
30.11.1999	Russische Föderation	B	Sturm, Kurzschluss durch herabfallende Teile eines Blitzableiters, Verlust der Eigenbedarfsversorgung in zwei Blöcken
18.08.1997	China	B	Reaktorschnellabschaltung aufgrund von Einwirkungen eines Taifuns
12.10.1991	UK	A	Sturm, Schnee; Störungen im Fremdnetz, RESA nach umschalten auf Eigenbedarf für beide Blöcke.
17.07.1987	Republik Korea	B	Reaktorschnellabschaltung während eines Taifuns mit nennenswertem Eintrag von Meeresgisch in die Anlage
28.08.1986	Republik Korea	C	Vollständiger Verlust der batterieunabhängigen Stromversorgung während eines Taifuns
13.01.1986	Kanada	A	Stürmische Winde landeinwärts, starke Gischt, großer Meersalzeintrag in die Schaltanlage, Verlust der betrieblichen Hauptspannungsversorgung
25.06.1985	USA	B	Orkanartiger Schneesturm, hohe Wellenbrecher und Gischt; Störungen im Fremdnetz, Eintrag von Salzwasser in das Pumpengebäude, Ausfall des Hauptkühlwassers, RESA
06.09.1984	USA	C	Schneefall und Sturm; Ausfall der Notstromversorgung.

Hinsichtlich eines Vergleichs der Anzahl von Ereignissen im In- und Ausland ist anzumerken, dass für deutsche Anlagen ein wesentlich besserer Zugang zu Daten zur Verfügung stand, so dass auch unbedeutendere Ereignisse in **Tab. 4-3** aufgelistet werden

konnten. Derartige internationale Ereignisse sind aufgrund ihrer geringen sicherheitstechnischen Bedeutung in den internationalen Datenbanken nicht erfasst, da sie unterhalb der Aufnahmeschwellen liegen.

Besonders nennenswert ist ein französisches Ereignis im Kernkraftwerk Le Blayais (4 Blöcke) der Klasse C bzw. INES 2, welches sowohl als windbedingtes Ereignis als auch als Überflutungsereignis gewertet werden kann. Hier kam es zum teilweisen Verlust von Sicherheitssystemen aufgrund einer Sturmflut während des Orkantiefs Lothar (vergl. 4.1.3) mit Überflutung weiter Teile der Anlage. In der Nacht vom 27. zum 28. Dezember 1999 erreichte das Orkantief mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten (ca. 200 km/h) gleichzeitig mit der Gezeitenflut die Mündung der Gironde. Diese Kombination führte zum Überschlagen großer Wellen über den Kraftwerksdeich und zur Flutung des Anlagengeländes (vergl. **Abb. 4-2**), sowie zu partiellen Überflutungen in sicherheitstechnisch wichtigen Gebäuden, von denen vorrangig die Blöcke 1 und 2 betroffen waren. Der Orkan führte außerdem zu Störungen der Stromversorgung (das 225-kV-Netz war ca. 24 h für alle Blöcke nicht verfügbar und das 400-kV-Hauptnetz der Blöcke 2 und 4 fiel für mehrere Stunden aus).



Abb. 4-2: Treibgutrückstände zeigen den Wasserstand am Zaun des Kernkraftwerkes Le Blayais /RIS 10/

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass großräumigen Windereignissen oft eine sicherheitstechnische Bedeutung (entsprechend Klasse B oder C) für Kernkraftwerke zugesprochen werden kann, was auch durch die durchgeführte Bewertung der Betriebserfahrung bestätigt wird. Von den in **Tab. 4-3** und **Tab. 4-4** dokumentierten 19

Ereignissen zwischen 1980 und 2010 fallen 3 Ereignisse in die Klasse C, 10 Ereignisse in die Klasse B und 6 Ereignisse in die Klasse A.

Die Auswirkungen dieser Ereignisse sind hauptsächlich durch folgende Einwirkungspfade gekennzeichnet:

- herabfallende oder umherfliegende Teile die zu Schäden führen,
- Netzschwankungen und daraus resultierender Abkopplung vom Fremdnetz, teilweise mit Notstromfall und vereinzelt sogar Station Blackout,
- erhöhter Eintrag von Salzwasser, Regenwasser, Staub oder Sand.

4.3 Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung

Die Ermittlung der Standortgefährdung bezüglich der Einwirkung Wind erfolgte im Rahmen der Genehmigung der Kernkraftwerke und im Rahmen von Nachuntersuchungen. Hierbei kam im Wesentlichen konventionelles Regelwerk zur Anwendung.

Für sicherheitstechnisch wichtige Bauwerke geht die Auslegung der in Deutschland noch im Betrieb befindlichen Kernkraftwerke im Allgemeinen weit über die aufgrund von Stürmen zu erwartenden Lasten hinaus, da diese Bauwerke zusätzlich gegen Einwirkungen aus Explosionsdruckwellen und gegen Flugzeugabsturz ausgelegt sind.

Die in Deutschland geltenden konventionellen Normen zur Ermittlung der Windlasten wurden im Laufe der Jahre aus viel Gründen geändert, nicht zuletzt durch die Schaffung eines einheitlichen europäischen Regelwerks. In der folgenden **Tab. 4-5** sind einige wichtige Normen chronologisch aufgelistet, die in Deutschland gültig sind bzw. waren.

Eine technisch wichtige Neuerung fand mit Einführung der DIN 1055-4 von 2005 statt. Hier wurde u. a. erstmals eine Unterteilung in von geografischen und klimatischen Bedingungen abhängige Windzonen vorgenommen, um die realen Verhältnisse besser abzubilden. Darüber hinaus wurde im Zuge der europäischen Normenharmonisierung das semi-probabilistische Sicherheitskonzept eingeführt. Hinsichtlich des technischen Inhaltes kann die DIN 1055-4 von 2005 /DIN 05a/ als weitestgehend gleiches Vorläuferregelwerk angesehen werden zur kürzlich eingeführte DIN EN 1991-1-4 /DIN 10/,

welche zusammen mit dem Nationalen Anhang DIN EN 1991-1-4/NA /DIN 10b/ die formale nationale Umsetzung des Eurocodes 1 für Windlasten darstellt.

Tab. 4-5: Geschichtliche Entwicklung der Deutschen Windnorm

Veröffent-licht	Norm	Referenz
12.2010	DIN EN 1991-1-4: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten + DIN EN 1991-1-4/NA: Nationaler Anhang; National festgelegte Parameter; Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten	/DIN 10/ + /DIN 10b/
03.2005	DIN 1055-4: Lastannahmen für Bauwerke, Teil 4: Windlasten	/DIN 05a/
08.1986	DIN 1055-4: Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken	/DIN 86/
05.1977	DIN 1055-4: Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten nicht schwingungsanfälliger Bauwerke	/DIN 77/

Abb. 4-3 zeigt die aktuell gültige Windzonenkarte für Deutschland gemäß dem Nationalen Anhang DIN EN 1991-1-4/NA /DIN 10b/, sowie die zugehörigen zonenabhängigen Grundwerte der Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0}^2$ und die Geschwindigkeitsdrücke $q_{b,0}$ (in früheren Normen als Staudruck bezeichnet). Im Übrigen stimmt diese Windgeschwindigkeit $v_{b,0}$ für ebenes, offenes Gelände (Geländekategorie II nach /DIN 10b/) mit der Definition der Grundwindgeschwindigkeit u_{10} (vergl. Kap. 4.4) in der Meteorologie überein /BÖL 84/.

Diese Windzonenkarte und zugehörigen Werte entsprechen den Festlegung, wie sie bereits für /DIN 05a/ getroffen wurden. Die Festlegung der jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit zu 0,02 ist willkürlich, jedoch durch eine „volkswirtschaftlich akzeptable“ Windschadenrate gerechtfertigt /KAS 00/. Diese Überschreitenswahrscheinlich-

² Die Basiswindgeschwindigkeit ist die mittlere 10-minütige Windgeschwindigkeit mit einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit von 0,02, entsprechend einer Wiederkehrperiode von 50 Jahren, unabhängig von der Windrichtung, bezogen auf eine Höhe von 10 m über flachem offenem Gelände unter Berücksichtigung der Meereshöhe.

keit bezieht sich allerdings auf den charakteristischen Wert. D. h. die Sicherheitszuschläge in Form von Teilsicherheitsbeiwerten des semi-probabilistischen Sicherheitskonzepts auf Einwirkungs- und Widerstandsseite sind hierin noch nicht berücksichtigt. Für den sich bei Berücksichtigung ergebenden sogenannten Designwert ergeben sich wesentlich geringer Überschreitenswahrscheinlichkeit, welche allerdings nicht in der Norm angegeben sind.

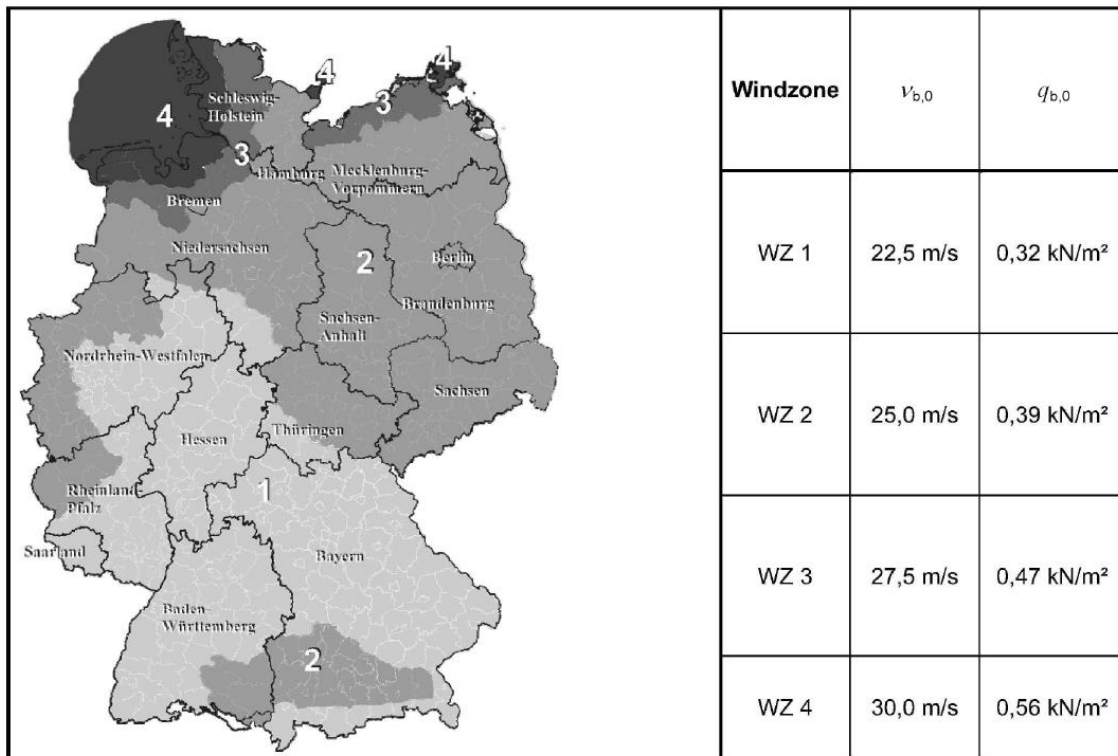


Abb. 4-3: Windzonenkarte für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, EC1 NA /DIN 10b/ (Werte gelten für Geländekategorie II)

Der Geschwindigkeitsdruck q (in kN/m²) wird aus der Bezugswindgeschwindigkeit v (in m/s) gemäß Gleichung 4.2 berechnet.

$$q = \frac{\rho}{2} v^2 \quad (4.2)$$

So nicht anders angegeben wird im Windingenieurwesen die Luftdichte ρ mit 1,25 kg/m³ angenommen, obgleich sie von der Meereshöhe des Standorts, der Lufttemperatur und dem Luftdruck abhängt. Dem genannten Standardwert liegen ein Luftdruck von 1013 hPa und eine mittlere Temperatur von 10 °C in Meereshöhe zugrunde. Daraus ergibt sich die vereinfachte Gleichung 4.3.

$$q = \frac{v^2}{1600} \quad (4.3)$$

Dem für die Bemessung maßgebenden Geschwindigkeitsdruck liegen entsprechend der Windzone für einen Standort extreme Böengeschwindigkeiten mit 2 bis 4 Sekunden Dauer zugrunde. Die Topographie und Beschaffenheit des umgebenden Geländes am Bauwerksstandort werden in den Normen /DIN 05a/, /DIN 10b/ durch vier Geländekategorien erfasst (vergl. **Abb. 4-4**). Die verschiedenen Geländerauhigkeiten finden so über Rauigkeitsfaktoren bzw. Rauigkeitsbeiwerte Berücksichtigung im vertikalen Profil des Geschwindigkeitsdrucks.

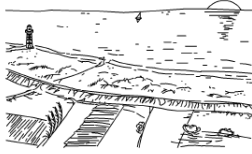

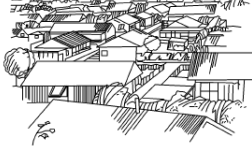

<p>Geländekategorie I</p> <p>Offene See; Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung; glattes, flaches Land ohne Hindernisse</p> <p>Rauigkeitslänge $z_0 = 0,01$ m Profilexponent $\alpha = 0,12$</p>	
<p>Geländekategorie II</p> <p>Gelände mit Hecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen, z. B. landwirtschaftliches Gebiet</p> <p>Rauigkeitslänge $z_0 = 0,05$ m Profilexponent $\alpha = 0,16$</p>	
<p>Geländekategorie III</p> <p>Vorstädte, Industrie- oder Gewerbegebiete; Wälder</p> <p>Rauigkeitslänge $z_0 = 0,30$ m Profilexponent $\alpha = 0,22$</p>	
<p>Geländekategorie IV</p> <p>Stadtgebiete, bei denen mindestens 15 % der Fläche mit Gebäuden bebaut sind, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet</p> <p>Rauigkeitslänge $z_0 = 1,05$ m Profilexponent $\alpha = 0,30$</p>	

Abb. 4-4: Geländekategorien nach /DIN 10b/

Die deutschen Windnormen DIN 1055-4 vor 2005 waren erstmalig so gestaltet, dass schwingungsanfällige Bauwerke wesentlich detailliert als zuvor betrachtet wurden. Der sich aus dem vorstehend Beschriebenen ergebende schematische Nachweisgang ist in **Abb. 4-5** dargestellt.

Über die vorstehend erläuterten Windnormen hinaus sind weitere konventionelle Windnormen für die Bemessung heranzuziehen wie beispielsweise Spezialnormen für

Schornsteine DIN 4133 /DIN 91/ oder Antennenträger DIN 4131 /DIN 69/. Hinsichtlich der Widerstandsseite der Bauwerke wurden für die Auslegung die jeweils gültigen DIN-Normen der verschiedenen Materialien zugrunde gelegt.

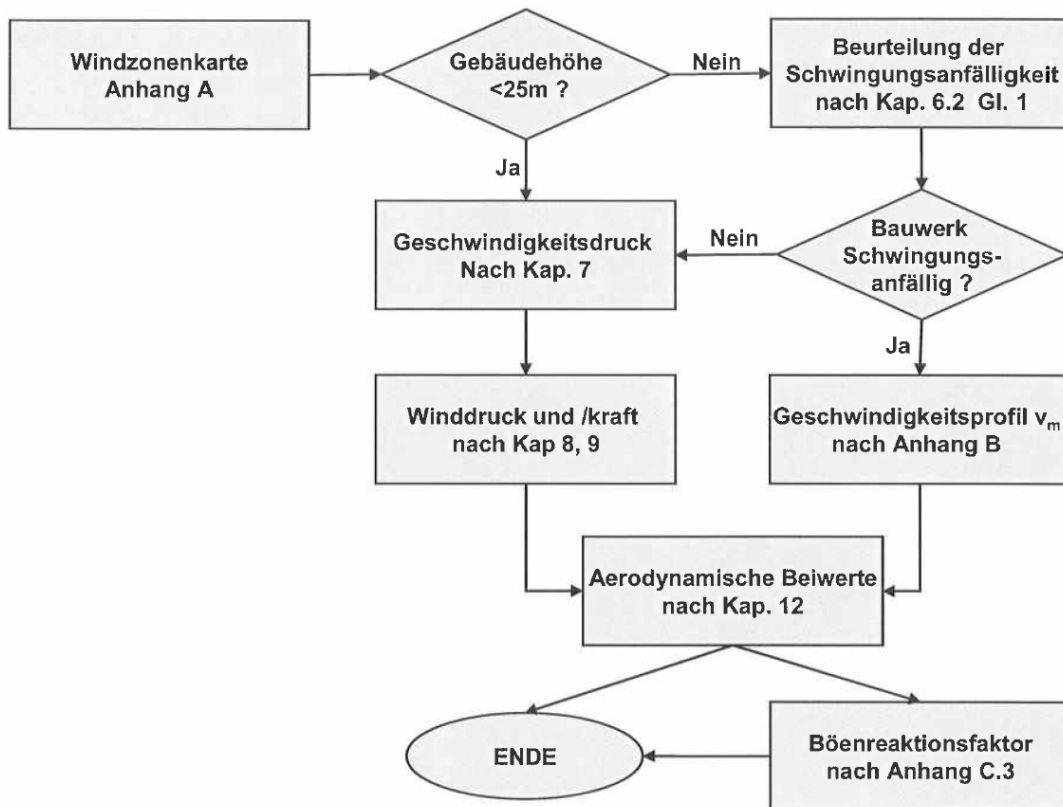


Abb. 4-5: Schematischer Nachweisgang nach DIN 1055-4 von 2005 /DIN 05a/

4.4 Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse

4.4.1 Einleitung

Die nachstehenden Aussagen zu neuen Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse für Windlasten stützen sich auf eine für die GRS erstellte Untersuchung des Deutschen Wetterdienstes /DWD 13a/, welche

- einen Überblick über die in Deutschland verfügbaren Ausgangsdaten für die standortbezogene Analyse von Windklimatologien gibt und

- die Nutzbarkeit der Windmessdaten für die Risikobewertung in Abhängigkeit von den verfügbaren Messzeiträumen, der Vollständigkeit, der Homogenität und der Stationarität von Windmesszeitreihen behandelt.

Darüber hinaus werden mögliche Methoden und Probleme bei der Ermittlung von Extremwindklimatologien zusammengefasst.

4.4.2 Meteorologische Grundlagen zur Bestimmung standortbezogener Windklimatologien

Wie bereits in Kap. 4.3 beschrieben, hängt die Windlast über den Windgeschwindigkeitsdruck der Luft von der Windgeschwindigkeit v ab. Die Auswertungen und Angaben in /DWD 13a/ beziehen sich lediglich auf die Bestimmung der standortspezifischen Windgeschwindigkeiten. Auswertungen von für ein Bauwerk resultierenden Windlasten waren nicht Bestandteil der Untersuchung.

Ausgangspunkt für Analysen zum Windgeschwindigkeitsdruck sind über 10-Minuten-Intervalle gemittelte Windgeschwindigkeiten mit einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit von 0,02 (/DIN 05a/ bzw. /DIN 10b/). In /DWD 13a/ wurden abweichend von den allgemein üblichen Analysen für Bauwerke auch Auswertungen für deutlich größere Wiederkehrintervalle von bis zu 10.000 Jahren durchgeführt.

Ausgangspunkt der Analysen zum „Geschwindigkeitsdruck, der bei nicht schwingungsanfälligen Konstruktionen angewendet wird“ ist eine Böengeschwindigkeit v_B , „die über eine Böendauer von 2 s bis 4 s gemittelt ist“ (/DIN 05a/). Gemäß /BÖL 84/ stimmt die Böengeschwindigkeit v_B näherungsweise mit der Definition der Nennböengeschwindigkeit u_{xx} in der Meteorologie überein. Direkte Messungen der Böengeschwindigkeit des DWD beziehen sich auf ein Mittelungsintervall von 3 s bis 5 s, und sind nur für kurze Zeiträume ab Mitte der 1990er Jahre windrichtungsabhängig verfügbar, so dass für die Analysen des DWD auf die Extremwertanalysen der mittleren Windgeschwindigkeiten (vergleichbar v_{ref} (/DIN 05a/) bzw. $v_{b,0}$ (/DIN 10b/)) zurückgegriffen wurde /DWD 13a/. Nach /DIN 05a/ und /DIN 10b/ lassen sich extreme Böengeschwindigkeiten durch Anwendung landnutzungsabhängiger Faktoren aus den Windgeschwindigkeiten v_{ref} (/DIN 05a/) bzw. $v_{b,0}$ (/DIN 10b/) ableiten.

Die bodennahe Windgeschwindigkeit und der vertikale Windgeschwindigkeitsgradient werden durch die Rauigkeit der Oberfläche, die thermische Schichtung, die Geländestructur (Relief) und das Vorhandensein von Hindernissen in der Standortumgebung wesentlich beeinflusst. /DWD 13a/

Hinsichtlich der thermischen Schichtung der bodennahen Atmosphäre sind drei verschiedene Zustände zu unterscheiden:

- Eine **stabile Schichtung** liegt vor, wenn die Temperatur mit der Höhe zu- oder geringfügig abnimmt. Eine solche Schichtung unterdrückt den vertikalen Austausch in der Atmosphäre und setzt die Windgeschwindigkeit in Bodennähe herab.
- Eine **labile Schichtung** liegt vor, wenn die Temperatur mit der Höhe stark abnimmt. Befindet sich die Atmosphäre in einem solchen Zustand, bilden sich kräftige vertikale Luftströme aus, die mit starken Böen verbunden sind.
- Eine **neutrale Schichtung** liegt vor, wenn der vertikale Temperaturgradient vertikale Luftbewegungen weder bremst noch beschleunigt.

Hohe Windgeschwindigkeiten, wie sie für die Fragen der Windlast von Bedeutung sind, sind häufig einer neutralen Schichtung der Atmosphäre verbunden. Das vertikale Windgeschwindigkeitsprofil kann dann mittels theoretischer Ansätze (logarithmisches Windprofil, Potenzprofil) mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden (vergl. z. B. /STU 88/; /CHR 89/ und /HUP 98/). In unmittelbarer Umgebung von Hindernissen sollte deren Einfluss auf das Windfeld jedoch durch geeignete Berechnungsverfahren berücksichtigt werden /DWD 13a/.

4.4.3 Ausgangsdaten für die Analyse standortbezogener Windklimatologien

Für die Bestimmung standortbezogener Windklimatologien werden die Messwerte der Windgeschwindigkeit und der Windrichtung an den Windmessstationen des DWD als Ausgangsdaten genutzt. Die Erfassung der Windgeschwindigkeit sollte entsprechend einer internationalen Vereinbarung /WMO 08/ in 10 m Höhe über Grund in ebenem und offenem Gelände erfolgen, was jedoch nicht an allen Messstationen eingehalten werden kann /DWD 13a/. Aktuell sind Winddatensätze von 170 Windmessstationen aus dem Messnetz des DWD verfügbar /SEB 12/, die eine ausführlich dokumentierte und einheitlich ausgewertete Datenbasis darstellen, welche für die Bestimmung standort-

bezogener Windklimatologien und dementsprechend auch für die Erarbeitung von Extremwindklimatologien genutzt werden können /DWD 13a/. Um Windmesszeitreihen hinsichtlich Extremwerten zu untersuchen, werden allerdings lange Messreihen benötigt, welche oft durch Änderungen der

- Messstandorte (räumliche Lage oder Messhöhe),
- der Messgeräte,
- der Umgebungsbedingungen und
- der Messmethodik

beeinflusst sind. Vor ihrer Verwendung müssen lange Zeitreihen daher auf Plausibilität und auf Homogenität überprüft werden. Auch sollten die Zeitreihen möglichst wenige Beobachtungslücken aufweisen.

Um stabile klimatologische Mittelwerte zu erhalten wurde international eine Referenzperiode von 30 Jahren für Klimadaten festgelegt /WMO 67/. Da es bedingt durch Veränderungen an den Messstationen bzw. deren Umfeld nur sehr wenige Windmessungen gibt, die über einen so langen Zeitraum homogene Daten liefern, müssen für windklimatologischen Untersuchungen häufig Daten aus kürzeren Zeitreihen herangezogen werden. /DWD 13a/

In /DWD 13a/ wird am Beispiel der Messstation Potsdam illustriert, dass in langen Windmesszeitreihen Datenausfälle, Inhomogenitäten (z. B. Änderungen der Messgeräte oder des Messortes) und Instationaritäten (z. B. Änderungen des Windklimas) auftreten, welche die Interpretation der Datenreihe erschweren und im ungünstigen Fall, wie z. B. bei Überlagerung verschiedener Einflüsse, sogar unmöglich machen. Daher sollte bei der Analyse von Windmessdaten immer der Einfluss externer Parameter, wie Umgebungsbedingungen, Messgeräte und Messstandort, geprüft werden.

Ursachen für Inhomogenitäten in Windmesszeitreihen sind gemäß /DWD 13a/:

- Instrumentierung
 - Gerätetyp
 - Messhöhe
 - Exposition (z. B. auf Gebäuden)

- Umgebung
 - Landnutzung
 - Hindernisse
- Beobachtungsbedingungen
 - Messort
 - Messzeitpunkt
 - Mittelungsintervalle
 - Mittelungsmethode
 - Beobachter/Auswertemethode (manuell, automatisch)

Metadaten aller DWD-Windmessstationen wurden beispielsweise für die Inhomogenitätsursachen „Gerätetyp“ und „Messhöhe“ analysiert. Die Auswertungen von Stationsmetadaten allein hinsichtlich dieser Änderungen zeigen, dass für die Analysen standortbezogener Windklimatologien nur etwa 30 % der Stationen lange Windzeitreihen zur Verfügung stellen können. An fast 50 % der DWD-Stationen mit Windmesszeitreihen wurde im Verlauf des jeweiligen Gesamtmesszeitraumes die Messhöhe geändert. An weniger als 10 % der Stationen wurden im Verlauf eines Messzeitraumes von 20 Jahren die Messhöhe oder der Gerätetyp nicht geändert. Über einen Zeitraum von 40 Jahren sind nur 2 % der Stationen unverändert geblieben. Für Zeiträume von mehr als 50 Jahren existieren keine solchen Stationen.

Lange Windmesszeitreihen sind somit nur an Standorten mit (mehreren) Gerätetypwechselln oder mit (mehreren) Messhöhenwechselln verfügbar /DWD 13a/. Änderungen hinsichtlich Landnutzung in der Umgebung von Windmessstationen sowie Stationsveränderungen (z. B. aufgrund von Masterneuerungen oder Stationsverlegungen aufgrund von Baumaßnahmen in der Umgebung) sind bei langen Zeitreihen unvermeidbar.

„Diese Feststellung führt unmittelbar auf eine Problematik bei der extremwertstatistischen Auswertung von Windmessdaten: Einerseits müssen die verwendeten Windmessdaten aus langjährigen, homogenen und stationären Windmessreihen gewonnen werden. Derartige Reihen sind jedoch kaum verfügbar. Verwendet man wiederum kürzere Windzeitreihen, dann werden die Resultate extremwertstatistischer Auswertungen

- insbesondere die Extrapolation auf Wiederkehrintervalle, die weit außerhalb der Länge des Beobachtungszeitraumes liegen - unsicher.“/DWD 13a/

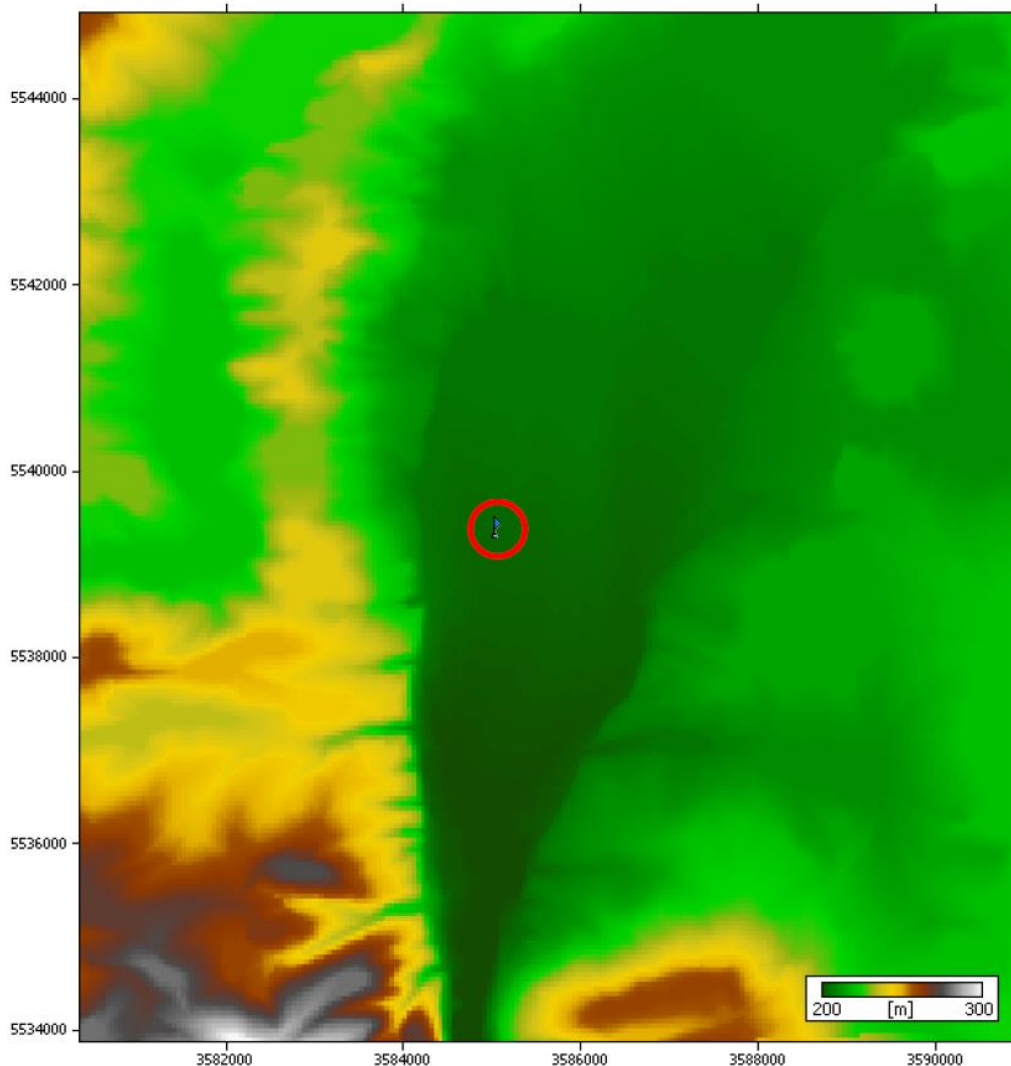


Abb. 4-6: Relief in der Umgebung des Referenzstandortes (roter Kreis) /DWD 13a/

In der Untersuchung des DWD für den Referenzstandort wurden für die Analysen zur standortbezogenen Windklimatologie Auswertungen von Windmessungen an vier DWD-Stationen, die sich in Entfernungen von ca. 24 km, 54 km, 23 km und 29 km vom Standort befinden herangezogen. Die nahe und weiter entfernte Umgebung des Referenzstandorts weist überwiegend Merkmale einer offenen bis teilweise geschlossenen Landschaft auf. Der betrachtete Referenzstandort hat aufgrund des Reliefverlaufs in der Standortumgebung weder eine exponierte noch eine geschützte Lage, d. h. dass das Windfeld durch den Reliefeinfluss vergleichsweise geringfügig modifiziert wird, wie in **Abb. 4-6** dargestellt.

Die Daten der verwendeten DWD-Stationen wurden unter Berücksichtigung (mittels Modellrechnungen) der Höhe über Grund, der Unterschiede im Reliefverlauf und der räumlichen Verteilung der Landnutzung (Rauhigkeit) auf den Referenzstandort übertragen. /DWD 13a/

4.4.4 Methode zur Analyse standortbezogener Windklimatologien

4.4.4.1 Allgemeines

Zur Ermittlung standortbezogener Extremwindklimatologien müssen die Windgeschwindigkeitsmesswerte vom Messstandort auf den jeweiligen Bauwerksstandort und in die betrachtete Bauwerkshöhe übertragen werden. Die Messdaten möglichst nahegelegener Windmessstationen werden aufbereitet, d. h. von Umgebungseinflüssen (Orographie, Landnutzung, Hindernisse) der Messstation bereinigt und mit Hilfe des „geostrophic mapping“ auf eine einheitliche Rauhigkeit und auf eine Höhe von 10 m über Boden umgerechnet. Mittels einer Extremwertanalyse auf Basis des Gumbel-Ansatzes (vergl. Gleichung 4.4) werden die Windgeschwindigkeiten sektorabhängig für das gewählte mittlere Wiederkehrintervall bestimmt.

$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left(-\frac{x-a}{b} \right) \right\} \quad (4.4)$$

Hierin sind a und b die Parameter der Fisher-Tippett Extremwertverteilung, Typ I (Verteilungsfunktion F(x), „Gumbel-Verteilung“).

Die Vorgehensweise zur Analyse der regionalen Extremwindklimatologie aus Winddaten ist in /DWD 13a/ detailliert beschrieben und beispielhaft für die Messstation Potsdam dargestellt. Heutzutage stehen dafür digitalen Karten der Orographie und der Rauhigkeit zur Verfügung, die für die Bereinigung der Messdaten und für ihre Umrechnung auf eine einheitliche Rauhigkeit („geostrophic mapping“) verwendet werden.

Die Untersuchungen des DWD zur regionalen Extremwindklimatologie nach dem Gumbel-Verfahren zeigen deutlich den Einfluss der Länge der verwendeten Zeitreihen. In /DWD 13a/ wird explizit darauf hingewiesen, dass für die Extremwertanalysen von Windzeitreihen aus kürzeren Bezugszeiträumen die Anwendung anderer Verfahren

geprüft werden sollte. Mittels eines Beispiel in /MAK 10/ werden die möglichen Unterschiede in den Ergebnissen von Extremwertanalysen bei Nutzung verschiedener Anpassungsmethoden und Häufigkeitsverteilungen illustriert. Die Annahme eines bestimmten Typs der zugrundeliegenden Extremwertverteilung kann inadäquat sein und zu falschen Schlussfolgerungen führen /DWD 13a/.

4.4.4.2 Methode zur Analyse der standortbezogenen Windklimatologie am Referenzstandort

Die Extremwindgeschwindigkeiten am Referenzstandort wurden auf Basis einer einheitlichen Methodik ermittelt, mit deren Hilfe die Windmessungen von DWD-Stationen an die andersartigen Umgebungsbedingungen (Rauhigkeits- und Reliefverhältnisse) des Standortes angepasst wurden. Die wesentlichen Teilschritte der Berechnungsmethode bestehen in

12. der Aufbereitung der Messdaten der ausgewählten DWD-Stationen /KRI 00/ und
13. der Übertragung der aufbereiteten Messdaten auf die Umgebungsbedingungen des Referenzstandorts mit Hilfe
 - eines Strömungsmodells (LINCOM, siehe z. B. /TRO 86/ und /AST 96/) und
 - eines Turbulenzmodells (/MAN 00/).

Beide Modelle sind Bestandteile der Software WA^SP-Engineering. Je nach Verfügbarkeit wurden 1-Stunden- bzw. 10-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit an den DWD-Stationen als Basis für die Modellrechnungen verwendet. Die Messwerte wurden zunächst hinsichtlich der Umgebungseinflüsse am Messstandort bereinigt, d. h. es wurden Korrekturfaktoren für den Einfluss der Rauhigkeit (Rauhigkeitswechsel in der Umgebung), des Relief und von Hindernissen angebracht („WA^SP-cleaning“). Danach erfolgte die Umrechnung der Messwerte auf eine vorgegebene, einheitliche Rauhigkeit („geostrophic mapping“). Anschließend wurden die Jahresmaxima der jeweiligen Geschwindigkeiten ermittelt. Die weitere extremwertstatistische Auswertung erfolgt mit Hilfe der Gumbel-Verteilung (vergl. Gleichung 4.4). Hieraus ergaben sich die Windgeschwindigkeiten für verschiedene mittlere Wiederkehrintervalle im Bereich zwischen 10^{-1} und 10^4 Jahren. /DWD 13a/

4.4.5 Ergebnisse der Analysen zur standortbezogenen Windklimatologie am Referenzstandort

In der Untersuchung des /DWD 13a/ wurden für die Analysen zur standortbezogenen Windklimatologie am Referenzstandort die sektorabhängigen Grundwindgeschwindigkeiten und die zugehörigen windrichtungsunabhängigen Extremwertklimatologien von vier Windmessstandorten die sich in Entfernungen von 23 km bis 54 km befinden, verwendet.

Mittels der in Abschnitt 4.4.4 dargestellten Methode wurden die von den Relief- und Rauigkeitseinflüssen (Umrechnung auf ebene Fläche mit Rauigkeitslänge 0,05 m) bereinigten sektorabhängigen Grundwindgeschwindigkeiten und die jeweils zugehörigen windrichtungsunabhängigen Extremwertklimatologien an vier Windmessstandorten abgeleitet. Anschließend wurden mittels Modellrechnungen (WA^SP-Engineering, Version 2.0) an die Standortbedingungen (Rauigkeit Relief, Hindernisse) angepasste Werte der Windgeschwindigkeit für mittlere Wiederkehrintervalle von 10^{-1} bis 10^4 Jahren ermittelt.

Aus diesen Berechnungen ergibt sich, dass am betrachteten Referenzstandort die höchsten Werte der Windgeschwindigkeit aus westlicher bis südwestlicher Richtung zu erwarten sind. In **Abb. 4-7** ist exemplarisch die räumliche Variabilität der Grundwindgeschwindigkeit am Referenzstandort für die Anströmrichtung mit den maximalen Grundwindgeschwindigkeiten in der betrachteten Höhe von 10 m über Boden dargestellt. Im lokalen Windfeld (weißer Kreis) sind nur mäßige Unterschiede vorhanden. Im Westen und Nordosten des Standorts ergeben sich, insbesondere durch den Einfluss der Landnutzung (Nähe zum Fluss), größere Grundwindgeschwindigkeiten. Südlich und in der unmittelbaren Umgebung des Referenzstandorts sind die Grundwindgeschwindigkeiten ähnlich denen am Standort oder etwas geringer. Dies ist ebenfalls durch den Einfluss der Landnutzung (Bebauung, Waldfläche im Süden) zu erklären. Hinsichtlich der Windrichtung ist festzustellen, dass sich diese in der Standortumgebung nicht erkennbar ändert. /DWD 13a/

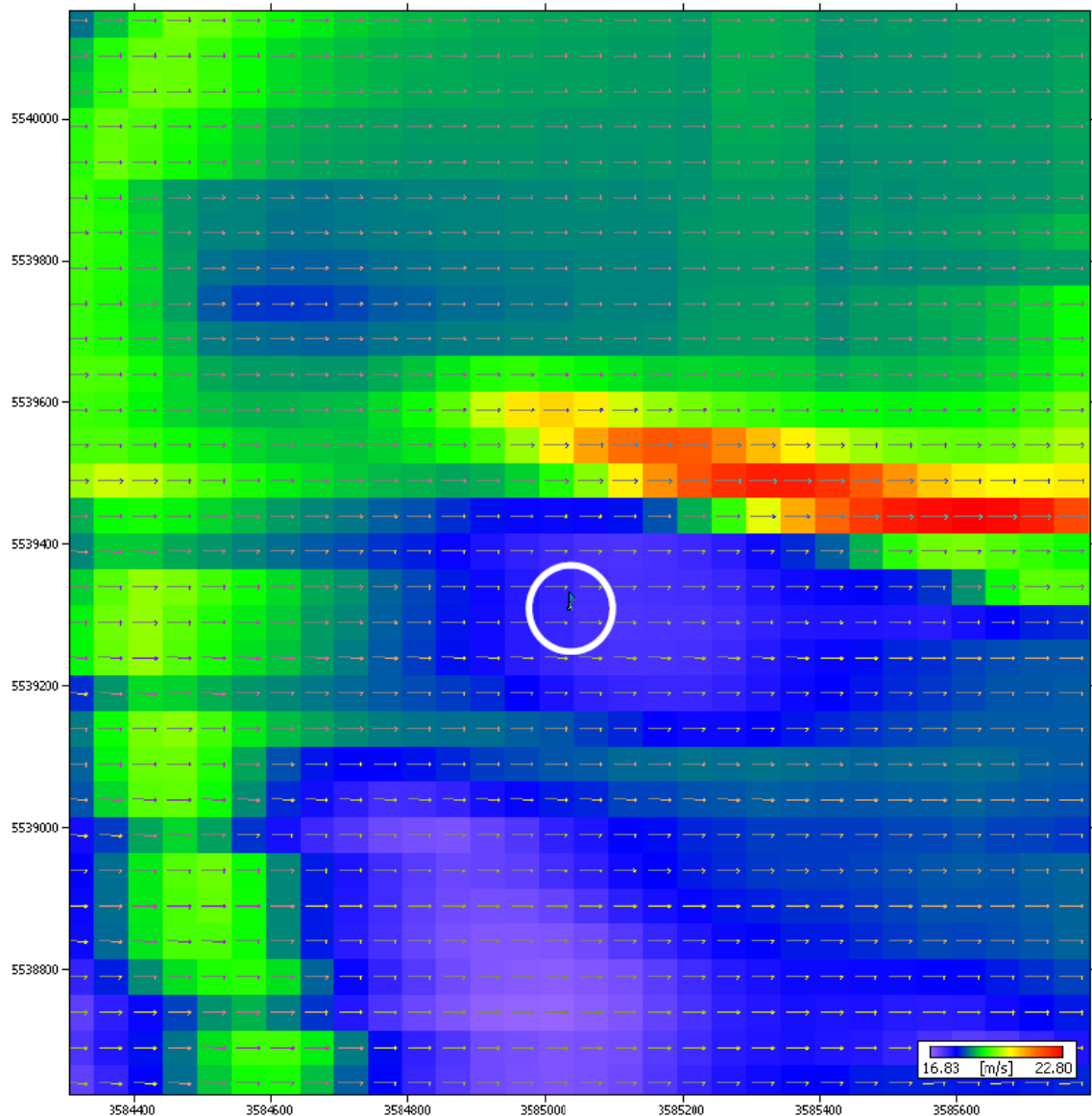


Abb. 4-7: Ergebnisse der Modellberechnungen zur räumlichen Verteilung des Betrags und der Richtung der Grundwindgeschwindigkeit in der Umgebung des Referenzstandortes, dargestellt für den Sektor der maximalen Windgeschwindigkeit (Anströmrichtung 270°, 10 m über Grund) /DWD 13a/

Die Einzelergebnisse der Extremwindklimatologien, berechnet für unterschiedliche mittlere Wiederkehrintervalle in einer Höhe von 10 m über Grund am Referenzstandort, jeweils auf Basis von Windmessdaten an den vier umliegenden DWD-Stationen finden sich in /DWD 13a/. Um die mit der Analyse verbundenen Unsicherheiten aufzuzeigen, wurden in **Abb. 4-8** die unterschiedlichen Ergebnisse zusammen dargestellt. Allein aufgrund der unterschiedlichen Windmesszeitreihen an den vier DWD-Stationen und

deren Übertragung auf den Referenzstandort mit einer einheitlich angewandten Methodik ergeben sich merkliche Unterschiede in den Extremwindgeschwindigkeiten /DWD 13a/.

Die Ergebnisse der Extremwindgeschwindigkeiten für das mittlere Wiederkehrintervall von 10.000 Jahren variieren zwischen 22,2 m/s und 27,5 m/s. Betrachtet man die zugehörigen Konfidenzintervalle, dann liegt die mögliche Variationsbreite der Resultate für die Extremwindgeschwindigkeiten am Referenzstandort zwischen 19,9 m/s (71,6 km/h) und 30,9 m/s (111,2 km/h). Nach Einschätzung des DWD liegen die Werte der vier umliegenden Wetterstationen in diesem Fall ungewöhnlich dicht beieinander; normalerweise treten größere Unterschiede und damit größere Unsicherheiten auf.

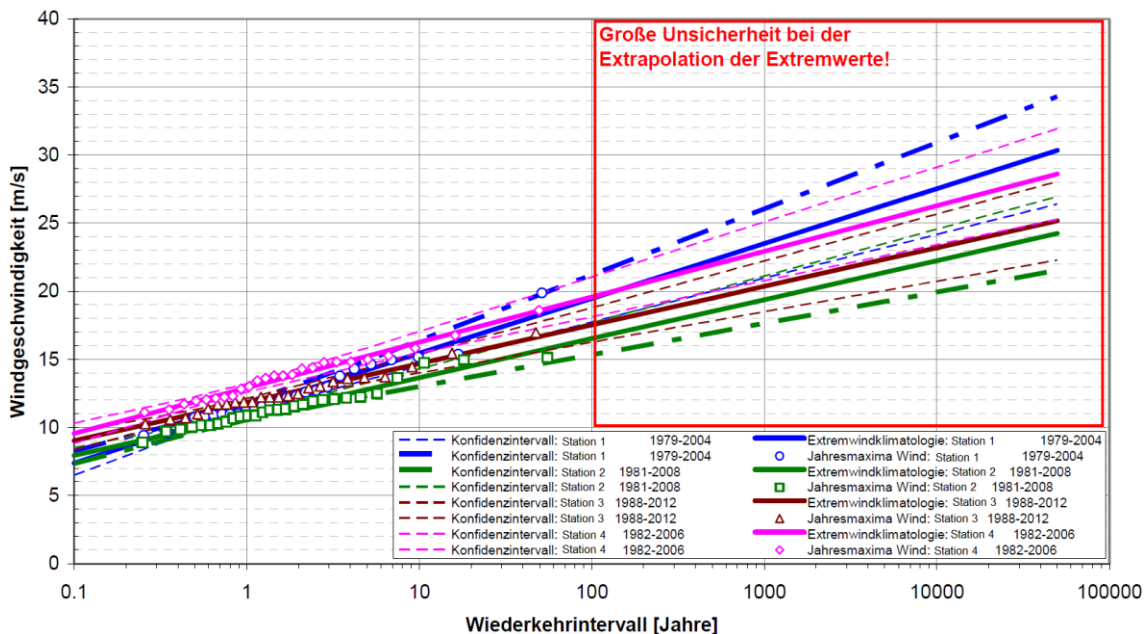


Abb. 4-8: Extremwindklimatologien für verschiedene mittlere Wiederkehrintervalle am Referenzstandort (10 m Höhe über Grund) ermittelt auf Basis der Windmessdaten von vier umliegenden DWD-Stationen /DWD 13a/

Zusätzlich zu den Unterschieden, die sich aus der Verwendung der Daten unterschiedlicher Messstationen ergeben, ist nach Erfahrung des DWD aufgrund der Unsicherheiten der Messdaten selbst und der angewandten Berechnungsmethoden weiterhin von einer Unsicherheit bei der Bestimmung der Extremwindgeschwindigkeiten in der Größenordnung von ± 10 bis 15 % auszugehen. In anderen Regionen, z. B. in der Nähe von Küsten oder an exponierten Mittelgebirgsstandorten können die Unsicherheiten aufgrund der besonderen Verhältnisse auch deutlich größer sein.

Auf Basis der Auswertungen für den Referenzstandort und aufgrund der genannten Unsicherheitsquellen schätzt der DWD die Unsicherheit der aus den Windklimatologien resultierenden mittleren Staudruckwerte für lange mittlere Wiederkehrzeiträume in der Größenordnung von 10.000 Jahren bei konservativer Herangehensweise auf ± 60 bis 75% /DWD 13a/.

4.5 Vergleich und Bewertung der Methoden

Das konventionelle Regelwerk basiert hinsichtlich der charakteristischen Werte der Windgeschwindigkeit auf Wiederkehrperioden von 50 Jahren. Wobei anzumerken ist, dass sich für die Designwerte, welche die Teilsicherheitsbeiwerte berücksichtigen, weitaus größere Wiederkehrperioden ergeben können. Die Ermittlung der Standortgefährdung ist sehr schnell und effizient durchführbar, da sie auf Gefährdungskarten zurückgreift. Auf dieser Basis kann auch das konventionelle bauliche Regelwerk passend angewendet werden, da es auf diese Art der Gefährdungsermittlung abgestimmt ist. Allerdings entspricht dieses Vorgehen nicht in vollem Umfang den sicherheitstechnischen Anforderungen in der Kerntechnik. Für Einwirkungen von außen, insbesondere für naturbedingte Einwirkungen, wird in der Kerntechnik im Allgemeinen eine standortspezifische Gefährdungsermittlung gefordert, da nur mit dieser lokale Effekte, die einen nennenswerten Einfluss auf die Standortgefährdung haben können, adäquat erfasst werden. Außerdem bewegen sich die mittleren Wiederkehrperioden, die der Bemessung von Kernkraftwerken gegen naturbedingte Einwirkungen von außen zugrunde gelegt werden in einer Größenordnung von 10.000 bis 100.000 Jahren.

Um Extremereignisse mit Wiederkehrperioden in der genannten Größenordnung zu ermitteln bedarf es aufwendiger standortspezifischer Gutachten. Für Windeinwirkungen ergibt sich bei der extremwertstatistischen Auswertung der Windmessdaten die Problematik, dass einerseits die verwendeten Windmessdaten aus langjährigen, homogenen und stationären Windmessreihen gewonnen werden müssen, welche jedoch kaum verfügbar sind, und andererseits die Verwendung kürzerer Zeitreihen zu erheblichen Unsicherheiten bei der Extrapolation auf große Wiederkehrperioden führt.

Aufgrund zahlreicher Fehlerquellen, wie z. B. der begrenzten Qualität der Ausgangsdaten, der Modellunsicherheiten und der konkreten Standortgegebenheiten, können die für den betrachteten Standort ermittelten Extremwindklimatologien Unsicherheiten von ± 60 bis 70% bezüglich des mittleren Geschwindigkeitsdrucks aufweisen. Aus Sicht

des DWD stellen derartige Unsicherheitsbereiche die Verwendbarkeit von Analysen standortbezogener Windklimatologien für die Risikobewertung kerntechnischer Anlagen grundsätzlich in Frage /DWD 13a/.

Angesichts der Alternative, die darin besteht, sich ausschließlich auf das konventionelle Regelwerk zu stützen, das auf 50-jährlichen Windgeschwindigkeitswerten (charakteristischer Wert) in Verbindung mit Teilsicherheitsbeiwerten basiert, die keine eindeutige Zuordnung zu einer resultierenden Überschreitenswahrscheinlichkeit erlauben, kann die GRS der Einschätzung des DWD nur bedingt folgen. Insbesondere im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Risikobeiträge unterschiedlicher naturbedingter Einwirkungen von außen (und damit zur Überprüfung der Angemessenheit der Auslegung gegen Windlasten) wäre eine Quantifizierung der mit einer mittleren Wiederkehrperiode von 10.000 Jahren verbundenen Windlasten durchaus wünschenswert. Die großen Unsicherheiten bei der Ermittlung dieser Windgeschwindigkeiten stehen dem nicht entgegen, sofern sie entsprechend ausgewiesen werden. Die Ermittlung der zu erwartenden Windlasten aufgrund eines 10.000-jährlichen Windereignisses stellt somit aus Sicht der GRS eine sinnvolle Ergänzung der Auslegung nach dem konventionellen Regelwerk dar.

Bezüglich der baulichen Auslegung der noch in Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerke ist davon auszugehen, dass für sicherheitstechnisch wichtige Bauwerke aufgrund der Bemessung gegen andere Einwirkungen von außen, wie z. B. Explosionsdruckwelle, Flugzeugabsturz und Erdbeben, Windlasten keine nennenswerte Rolle spielen. Sollte sich aus standortspezifischen Untersuchungen eine Erhöhung der anzusetzenden Windlasten gegenüber den gemäß der konventionellen Windnorm /DIN 10/ und /DIN 10b/ ermittelten Werten ergeben, wären dies vermutlich nur für leichte und schwingungsanfällige Bauwerke bzw. Bauwerksteile vorrangig in Windzone 3 und 4 relevant.

Auch aus der Betriebserfahrung lässt sich schließen, dass die direkte Einwirkung von Windlasten auf Bauwerke kerntechnischer Anlagen gegenüber Sekundäreffekten, wie z. B. Schäden auf dem Anlagengelände und in Freiluftschaltanlagen durch umherfliegende Teile, dem Ausfall des Fremdnetzes und erhöhtem Eintrag von Regenwasser, Salzwasser, Sand oder Staub vermutlich zu vernachlässigen ist.

5 Tornado

5.1 Darstellung der Einwirkung Tornado

5.1.1 Grundlagen

Tornados gehören zu den naturbedingten Einwirkungen. Gekennzeichnet sind Tornados durch ihre im Vergleich mit sonstigen Stürmen geringe räumliche Ausdehnung, die zum Teil extremen Windgeschwindigkeiten sowie den Druckabfall in Richtung Zentrum des Wirbels. Als Folge der hohen Windgeschwindigkeiten kommt es zu einem Aufwirbeln von Gegenständen wie z.B. von Kieseln, Ästen, Autos und Anderem.

Die bis heute allgemein anerkannte Definition geht auf Alfred Wegener /WEG 17/ zurück.

Ein Tornado ist ein kleinräumiger Luftwirbel in der Erdatmosphäre, der eine annähernd senkrechte Drehachse aufweist und im Zusammenhang mit konvektiver Bewölkung (Cumulus und Cumulonimbus) steht. Der Wirbel erstreckt sich hierbei durchgehend vom Boden bis zur Wolkenuntergrenze.

Die Gestalt der Luftwirbel ist sehr vielfältig und reicht von dünnen schlauchartigen Formen bis zu einem mehr oder weniger breiten, sich nach oben erweiternden Trichter. Nicht selten treten - besonders bei großen Durchmessern - mehrere Wirbel auf, die um ein gemeinsames Zentrum kreisen, was als *Multivortex-Tornado* bezeichnet wird.

Charakteristisch ist der schnelle Druckabfall in Richtung Zentrum des Tornados wie in **Abb. 5-1** dargestellt.

Zur Einstufung der Tornadointensitäten sind verschiedene Skalen international in Gebrauch. In den USA wurde bis 2006 die Fujita-Skala (F) verwendet, in Europa ist die, im Vergleich zur Fujita-Skala, feinere Torro-Skala (T) eher gebräuchlich. Diese Skalen sind nur eingeschränkt miteinander vergleichbar. Seit 2007 wird in den USA die Enhanced-Fujita-Skala (EF) verwendet, die auf der Einstufung der Tornados nach Schadensbildern fußt, da die Windgeschwindigkeiten nur in den seltensten Fällen direkt gemessen werden. Abgesehen von den USA sind international nach wie vor eher Fujita- und Torro-Skala gebräuchlich, weswegen nicht näher auf die EF-Skala einge-

gangen wird. Auch für Einstufungen nach der Fujita- oder Torro-Skala werden, wegen meist fehlenden direkten Messungen der Windgeschwindigkeit, Schadensbilder herangezogen. Dadurch besteht ein gewisses Maß an Unsicherheiten in der Einstufung der Tornados.

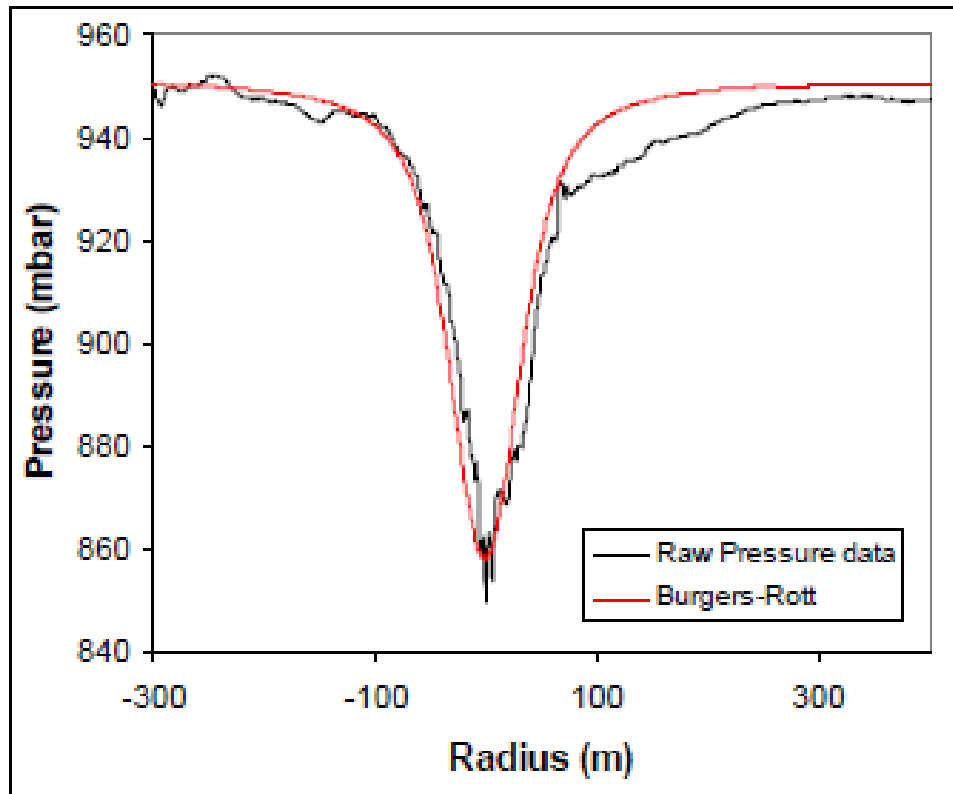


Abb. 5-1: Gemessener Druckabfall im Zentrum eines F4-Tornados /LEE 04/

Die Fujita-Skala wurde als mathematische Interpolation zwischen der Beaufort-Skala und Mach 1 (Schallgeschwindigkeit) eingeführt. Dabei wurde festgelegt, dass die Stufe 1 der Fujita-Skala (F1) Beaufort 12 entspricht und die Stufe F12 der Schallgeschwindigkeit Mach 1.

Die Torro-Skala ist eine Fortsetzung der Beaufort-Skala in dem Sinne, dass die Stufe 0 (T0) Beaufort 8 (B8) entspricht, T1 entspricht B10, T2 entspricht B12, usw. Dabei ist zu beachten, dass üblicherweise für Tornados verschiedener Stufen Windgeschwindigkeitsbereiche angegeben werden. Aus praktischen Gründen endet **Tab. 5-1** bei den Tornadointensitäten F5 bzw. T11 da noch nie stärkere Tornados beobachtet wurden, und sich diese hypothetischen stärkeren Tornados aus physikalischer Sicht so gut wie ausschließen lassen. Am 03.05.1999 wurde mit einem Dopplerradar die höchste je-

mals gemessene Windgeschwindigkeit von 484 ± 32 km/h bei einem Tornado in Oklahoma gemessen /CSW 13/ die damit am oberen Ende des Bereichs F5 einzuordnen ist.

Tab. 5-1: Vergleich der Fujita- und Torro-Skala. Die beschriebenen Schadensbilder sind /TOR 13/ entnommen und exemplarisch zu verstehen.

F	v [km/h]	T	v [km/h]	Schadensbild
F0	64-116	T0	62-88	Spiralförmige Aufwirbelung leichter Gegenstände (Plastiktüten, etc.), Beeinträchtigung von Zelten, Markisen etc., einige Dachziegel verschoben, Pfad in Feldern verfolgbar, Zweige abgebrochen, Körbe umgekippt und weggerollt, Gartenmöbel und Pflanztöpfe verschoben und beeinträchtigt.
		T1	88-117	Sonnenliegen, kleine Pflanzen, schwerer Müll wird aufgewirbelt, leichte Schäden an Hütten, verstärktes Verschieben von Ziegeln, Kaminsteine verschoben, Holzzäune umgeworfen, leichte Schäden an Hecken und Bäumen, bereits gekippte Fenster werden aufgerissen, Beschädigungen an den Angeln.
F1	117-180	T2	117-149	Schwere Wohnmobile werden verrückt, leichte Wohnanhänger umgekippt, Gartenhütten zerstört, Garagendächer losgerissen und Türen eingedrückt, große Schäden an Ziegeldächern und Kaminen, Firstziegel fehlen, schwerere Schäden an Bäumen, größere Äste verdreht oder abgerissen, kleine Bäume entwurzelt, Kühlerhauben an Autos aufgerissen, schwache oder alte Ziegelwände umgestürzt, aufgedrückte Fenster.
		T3	149-183	Wohnmobile umgekippt oder schwer beschädigt, leichte Wohnanhänger zerstört, Garagen und schwache Außengebäude zerstört, Dachstuhl wird sichtbar, einige größere Bäume entwurzelt oder abgebrochen, Aufwirbelung schwerer Gegenstände und Sekundärschäden durch diese, Gartenmauern umgestürzt, Gebäude werden merkbar erschüttert.
F2	181-253	T4	184-220	Autos werden angehoben, Wohnmobile zerstört, Gartenhütten aufgewirbelt und über größere Distanzen transportiert, komplette Dächer fehlen bei manchen Gebäuden, bei anderen ist der Dachstuhl komplett freigelegt, zahlreiche Bäume abgebrochen oder entwurzelt, Verkehrszeichen verdreht oder anderweitig beschädigt, große Bäume entwurzelt und einige Meter transportiert, Trümmer werden bis zu 2 km transportiert.
		T5	220-259	Schwere Autos und leichte LKW werden angehoben, schwere Dachstuhlschäden, Zwischenwände und Möbel werden aus Häusern gesaugt, schwä-

F	v [km/h]	T	v [km/h]	Schadensbild
				chere und ältere Gebäude brechen zusammen, Strommasten knicken um.
F3	254-332	T6	259-300	Stärkere Gebäude erleiden schwere Schäden oder fallen zusammen, Ziegel und Trümmerteile werden mitgerissen, Überlandleitungsmasten werden verdreht oder sonstig beschädigt, aufgewirbelte Gegenstände dringen in Mauern ein, kleinere Strukturen abgehoben, transportiert und wieder abgesetzt ohne sichtbare Schäden
		T7	300-343	Ziegel- und Fachwerkhäuser werden komplett zerstört, Stahlrahmenkonstruktionen wie Lagerhallen zerstört oder schwer beschädigt, Lokomotiven werden umgekippt, Entrindung von Bäumen durch fliegende Trümmerteile.
F4	333-418	T8	343-387	Autos werden größere Strecken transportiert, einige Industrie-Stahlrahmenkonstruktionen schwer beschädigt oder zerstört, schwere Trümmer werden weit transportiert, zahlreiche Schäden entlang der Randbereiche des Pfades.
		T9	387-434	Zahlreiche Stahlrahmenkonstruktionen zerstört, Lokomotiven oder Züge werden fortgewirbelt, komplette Entrindung von noch stehenden Baumstümpfen, Überleben der Einwohner abhängig von geschützten Räumen unter der Erde
F5	419-512	T10	434-482	Komplettes Abheben von Hausstrukturen, schwere Zerstörungen, Pfad weitgehend frei von Vegetation, Bäumen und menschlichen Konstruktionen.
		T11	482-531	Keine separate Schadensbeschreibung mehr.

5.1.2 Allgemeine Gefährdungssituation in Deutschland durch Tornadoeinwirkung

In Deutschland treten nach derzeitigem Kenntnisstand etwa 20 bis 30 Tornados pro Jahr auf. Eine Zunahme der Tornadohäufigkeit im Zuge des Klimawandels ist in Deutschland derzeit nicht zu beobachten /TDD 13/. Tornados werden aus allen Teilen Deutschlands gemeldet, eine regionale Häufung ergibt sich für die norddeutsche Tiefebene. Die im Vergleich mit den USA geringe Anzahl an Tornados (dort jährlich etwa 1000-2000) lässt dementsprechend die Gefährdung gering erscheinen.

5.1.3 Aufgetretene Extremereignisse in Deutschland

Tornados der Stufen F4 und F5 sind in Deutschland seltene Ereignisse jedoch nicht ausgeschlossen.

Besonders zu erwähnen sind die zwei bisher in Deutschland aufgetretenen F5-Tornados, die aus den Jahren 1764 (Woldegk) und 1800 (Hainichen) berichtet werden /SAE 13/. Diese sind auf Grund der Schadensbeschreibung im Nachhinein als F5-Tornados eingestuft worden.

In den Jahren 1968 (Pforzheim) und 1927 (Auen-Holthaus) kam es zu F4-Tornados /SAE 13/. Zahlreiche Tornados der Stufen F3, F2 und kleiner wurden berichtet.

5.2 Betriebserfahrung in Kernkraftwerken im In- und Ausland zu Tornado

Aus der internationalen Betriebserfahrung sind drei Fälle mit Bezug zu Tornadoereignissen bekannt. In allen Fällen handelte es sich um den Verlust des Fremdnetzes auf Grund von Tornadoereignissen. Die zugehörigen IRS-Meldungen sind aus Kanada, Russland und USA. Meldungen zu direkten Einwirkungen von Tornados auf Anlagen sind der GRS nicht bekannt.

5.3 Bisheriges Vorgehen zur Ermittlung der Standortgefährdung

Eine Gefährdung auf Grund von Tornadoereignissen wurde bisher in Deutschland nicht unterstellt. Es gab und gibt hierzu keine nukleare oder konventionelle Vorschrift in Deutschland.

In der Deutschen Risikostudie (Phase A) /GRS 80/ werden die Belastungen auf bauliche Anlagen für einen Tornado und eine Explosionsdruckwelle verglichen. Der Druck-Zeit-Verlauf für den Tornado ergab sich aus der damals gültigen Version des US Regulatory Guide 1.76 für das Gebiet größter Tornado-Gefährdung wie folgt:

- Linearer Druckanstieg von 0 bar Überdruck auf 0,2 bar Überdruck in etwa 1,4 s,
- 0,2 bar Überdruck im Intervall von 1,4 bis 2,4 s und
- danach ein linearer Druckabfall bis auf 0 bar Überdruck in weiteren 1,4 s.

Verglichen mit der dynamischen Last einer Explosionsdruckwelle gemäß /BMI 76/ wird diese Last als quasistatisch angesehen und ist um einen Faktor 2 niedriger. Die Auswirkungen auf bauliche Anlagen sind somit geringer einzuschätzen.

Auftretende Belastungen durch aufgewirbelte Gegenstände können gemäß Risikostudie /GRS 80/ für Gebäude, die gegen Flugzeugabsturz ausgelegt sind, als vollständig abgedeckt gelten. Für die restlichen Bauwerke wird in der Risikostudie auf Grund der baulichen Gegebenheiten von keiner Gefährdung wegen aufgewirbelter Gegenstände ausgegangen.

Die Risikostudie /GRS 80/ stellt eine Gefährdung der auf dem Anlagengelände frei errichteten Schaltanlagen und Transformatoren (Netzanschluss und Eigenbedarfsversorgung) fest, die zum Notstromfall führen kann. Ferner können auch Störungen im Fremdnetz zum Notstromfall führen, wenn das Abfangen auf Eigenbedarf nicht gelingt.

5.4 Neue Entwicklungen hinsichtlich der Methodik der Gefährdungsanalyse

Eine neuere Entwicklung hinsichtlich der Standortgefährdung durch Tornados oder verwandte Phänomene ist die Erstellung einer ausreichenden Datenbasis durch das TorDACH-Netzwerk. Diese Datenbasis wurde in die „European Severe Weather Database“ überführt /TDD 13/.

Grundsätzlich ist die Gefährdung in Deutschland durch Tornados vergleichsweise gering. Eine detaillierte Abschätzung ergibt sich aus den regionalen Statistiken des TorDACH Netzwerkes für den Zeitraum 1950 - 2005. Diese regionale Statistik, dargestellt in **Abb. 5-2** ergibt ein differenzierteres Bild der Tornadohäufigkeiten in Deutschland. Als Maximalwert wird hier eine Tornadohäufigkeit von 0,9 Tornados pro Jahr und 10000 km² angegeben. Da die Zahl 0,9 einen gerundeten Wert darstellt, wird sie im Folgenden nach oben mit 1 abgeschätzt. Daraus ergibt sich eine Tornadohäufigkeit von 10⁻⁶ pro Jahr und Hektar für die Summe aller Kategorien von Tornados.

Eine Gefährdung eines Standortes kann sich nach ingenieurstechnischer Abschätzung nur für Tornados der oberen Kategorien (F3 - F5) ergeben. Diese Tornados treten gemäß **Abb. 5-3** mit etwa 10% der Gesamthäufigkeit auf, so dass die Wahrscheinlichkeit eines solchen Tornados bei etwa 10⁻⁷ pro Jahr und Hektar liegt.

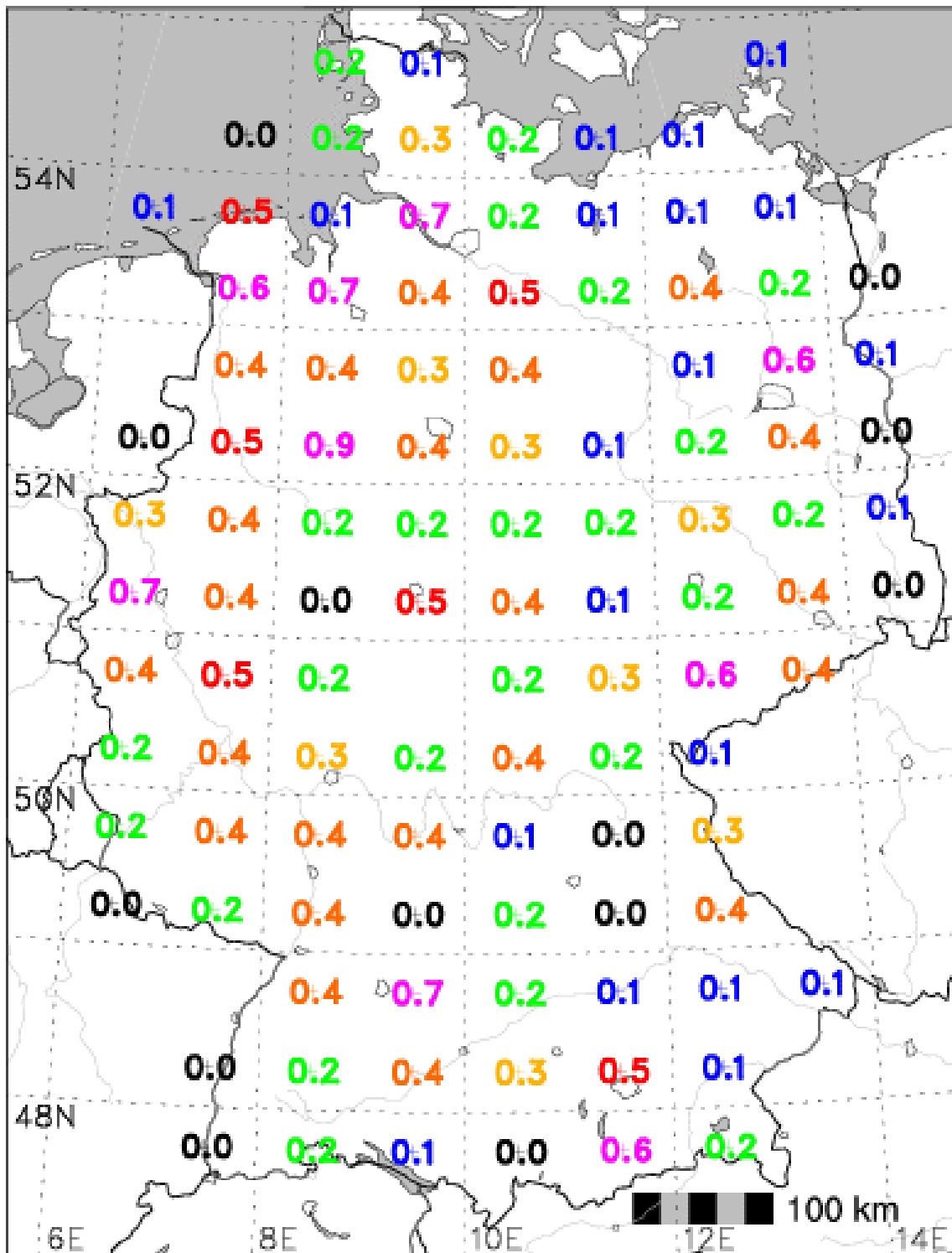


Abb. 5-2: Tornadohäufigkeit aller Kategorien pro Jahr und 10000 km² /TDD 13/

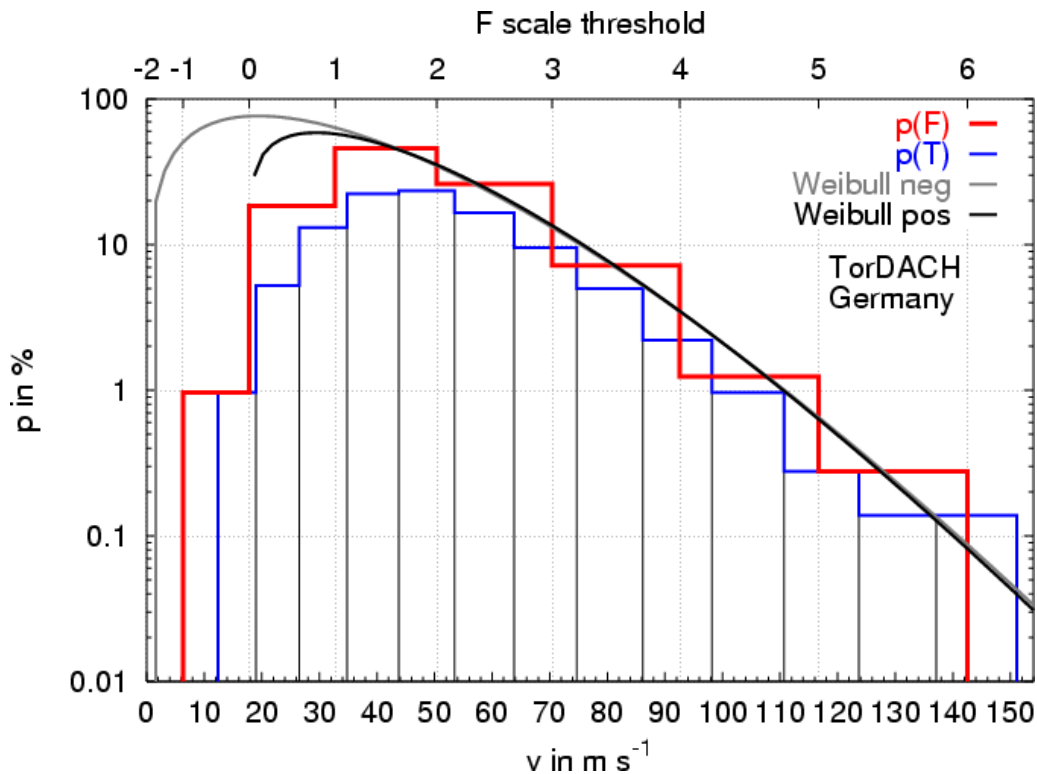


Abb. 5-3: Häufigkeitsverteilung einzelner Tornado-Kategorien /TDD 13/

5.5 Bewertung

Aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit, dass der sicherheitstechnisch relevante Bereich eines Kernkraftwerks von einem starken Tornado getroffen wird, ist die Bedeutung dieser Einwirkung als eher gering einzustufen. Zudem bietet die bei den noch in Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerken vorhandene Auslegung gegen die Einwirkungen Explosionsdruckwelle und Flugzeugabsturz auch in einem solch unwahrscheinlichen Fall einen weitgehenden Schutz im Hinblick auf bauliche Schäden durch Winddruck und Geschosse.

Aus Sicht der GRS gibt es jedoch über die Einwirkungen aus Winddruck und Geschossen hinaus noch weitere mögliche Folgen eines starken Tornados, die betrachtet werden können, angesichts der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit aber nicht zwingend weiterverfolgt werden müssen. Diese Szenarien umfassen im Wesentlichen den Einfluss eines Tornados auf die Notstromversorgung und die Kühlwasserversorgung.

Als Folge eines Tornados in der Umgebung eines Kernkraftwerks wird der Notstromfall angenommen. Dieser ergibt sich entweder durch eine Störung des Fremdnetzes durch

den Tornado oder bei direktem Überzug des Tornados über das Kraftwerk aus der Zerstörung der Freiluftschaltanlagen. Die möglichen Einflüsse eines starken Tornados auf die Notstromversorgung sind bei bereits laufenden Notstromgeneratoren:

- Beeinflussung der Luftzufuhr der Notstromdiesel durch den Unterdruck im Zentrum des Tornados und
- Beeinflussung der Luftzufuhr durch (partiell) Verstopfen der Zuluftklappen durch Trümmer.

Bei zunächst stehenden Notstromgeneratoren erscheint nur der zweite Punkt relevant.

Zudem kann ein Tornado über das Einlaufbauwerk (und ggf. die Ersatzwärmesenke) hinwegziehen. Im Bereich des Einlaufbauwerkes könnte es zu einem kurzfristigen Trockenfallen des Saugbereichs der Kühlwasserpumpen kommen.

6 Zusammenfassung

Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, festzustellen, ob die heute verfügbaren Methoden zur Ermittlung der Standortgefährdung im Hinblick auf naturbedingte Einwirkungen von außen gegenüber den bisher üblichen Verfahren zusätzliche aus sicherheitstechnischer Sicht relevante Erkenntnisse liefern und daher in die Praxis der Standortgefährdungsermittlung Eingang finden sollten oder ob die in der kerntechnischen Praxis etablierten Verfahren ausreichen, um den sicherheitstechnischen Erfordernissen auch nach heutigem Maßstab Rechnung zu tragen.

Insgesamt haben sich im Rahmen dieser Arbeiten keine Hinweise darauf ergeben, dass die bisherigen nach Regelwerk geforderten und in der Praxis angewandten Vorgehensweisen zur Ermittlung der Standortgefährdung im Hinblick auf die betrachteten Einwirkungen grundsätzliche Defizite aufweisen, die zu einer deutlichen Unterschätzung der Standortgefährdung führen könnten. Nichts desto trotz ist mit den heute verfügbaren Methoden in einigen Bereichen eine genauere (Reduzierung der Unsicherheiten) oder umfassendere (Berücksichtigung zusätzlicher Aspekte) Ermittlung der Standortgefährdung möglich. Daher erscheint einwirkungsabhängig eine Erweiterung der derzeit üblichen Standortgefährdungsanalysen um einzelne zusätzliche Untersuchungen empfehlenswert. Allerdings sind als Grundlage hierfür teilweise erst noch weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

Im Einzelnen stellen sich die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der betrachteten Einwirkungen wie folgt dar:

Durch die Ende 2011 abgeschlossene Überarbeitung der KTA 2201.1 /KTA 11/ existiert hinsichtlich der Einwirkung **Erdbeben** eine dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechende regulatorische Vorgabe für die Ermittlung der Standortgefährdung. Dementsprechend beziehen sich die Erkenntnisse der durchgeführten Untersuchungen weniger auf die grundsätzliche Methodik als auf die Quellen für Unsicherheiten, die mit der Ermittlung der seismischen Standortgefährdung verbunden sind. Diesbezüglich wurden vier Bereiche identifiziert, in denen weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wünschenswert wären, um die Unsicherheiten in der Gefährdungsermittlung zu reduzieren und damit bei seismologischen Standortgutachten eine höhere Aussagesicherheit zu ermöglichen:

- **Ground-Motion Prediction Equations (GMPE)**
Aufgrund der geringen Seismizität in Deutschland muss bei der Anwendung von GMPE auf Registrierungen anderer Regionen zurückgegriffen werden, wobei auf deren Übertragbarkeit (z. B. Scherwellengeschwindigkeit im Untergrund sowie Magnituden- und Entfernungsbereich) zu achten ist. Mögliche Anpassungen von GMPE auf deutsche Verhältnisse wurden bislang nicht vertieft untersucht. Daher sollten Kriterien entwickelt werden, anhand deren eine systematische und nachvollziehbare Auswahl geeigneter GMPS aus anderen Regionen erfolgen kann.
- **Zonierung**
Für Deutschland existieren mehrere verschiedene Zonierungsmodelle unterschiedlicher Autoren. Für die Festlegung der seismotektonischen Regionen finden sich oftmals keine oder nur wenige rudimentäre Begründungen. Um die hiermit verbundenen Modellunsicherheiten zu reduzieren, sollten unter Beteiligung erfahrener Seismologen und Geologen mehrerer Zonierungsvarianten - jeweils mit Begründung der Festlegungen - erarbeitet werden.
- **Magnitudenermittlung**
Der Erdbebenkatalog für Deutschland sollte einheitlich auf Moment-Magnituden umgerechnet werden. Hierzu sind sowohl für die Umrechnung aus anderen Magnituden als auch für die Ermittlung von Magnituden aus historischen Erdbebenaufzeichnungen geeignete Verfahren zu entwickeln bzw. die bereits existierenden Verfahren auf Ihre Anwendbarkeit zu prüfen.
- **Lokaler Untergrund**
Die Bandbreite der an den Standorten tatsächlich vorliegenden lokalen Untergründe wird durch die sehr grobe Einteilung in Bodenklassen für eine Standortanalyse nur unzureichend abgebildet. Um die Unsicherheiten bei der Ableitung eines standortspezifischen Antwortspektrums zu reduzieren, wäre die Erarbeitung eines „Leitfadens“ zur Berücksichtigung des lokalen Untergrundes (z. B. mittels bodendynamische Berechnungen) wünschenswert.

Bei der Behandlung der Einwirkung **Hochwasser** ist zwischen Standorten mit Tideeinfluss (Tidestandorte) und reinen Flusstandorten (Binnenstandorte) zu unterscheiden.

Während für letztere der Hochwasserabfluss im Fluss maßgebend ist, stellen für erstere Sturmfluten die maßgebende Hochwasserursache dar³.

- Tidestandorte

Gemäß KTA 2207 /KTA 04/ ist bei Hochwasserereignissen auch die Dauer des Hochwassers zu berücksichtigen. Das im Anhang zur KTA 2207 beschriebene Verfahren zur Ermittlung des Bemessungswasserstandes bei Sturmflutereignissen berücksichtigt diesen zeitlichen Aspekt jedoch nicht. Jensen et al. /JEN 11/ beschreiben zwei Verfahren, mit denen eine Berücksichtigung des Sturmflutzeitverlaufs möglich wird. Das erste Verfahren, welches in der Trennung des Beitrags der Tide und des Windstaus besteht, erlaubt es zwar, den zeitlichen Verlauf grob zu erfassen, unterliegt jedoch einer gewissen Willkür im Hinblick auf die Zerlegung in die einzelnen Komponenten. Der Vorteil besteht darin, dass mit diesem Verfahren auf verhältnismäßig einfache Weise eine Aussage zum zeitlichen Verlauf (wie in KTA 2207 gefordert) des Sturmflutereignisses gemacht werden kann. Das zweite Verfahren nutzt Monte-Carlo-Simulationen, um aus beobachteten Sturmfluten mittels statistischer Simulationen ein größeres Sturmflutkollektiv zu erzeugen. Dieses wird anschließend hinsichtlich der Parameter Sturmflutfülle und Scheitelwasserstand mittels Copula-Funktionen beschrieben. Dieses Verfahren würde es erlauben, ein Bemessungs-Sturmflutereignis mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr nicht nur auf Basis des Scheitelwasserstandes sondern als Schar von Kombinationen unterschiedlicher Sturmflutfüllen und Scheitelwasserstände zu ermitteln. Da gemäß KTA 2207 jedoch allein der Bemessungswasserstand mit der Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr verknüpft ist, wäre ein solches Verfahren im Geltungsbereich des kerntechnischen Regelwerks nur bedingt anwendbar. Eine Ermittlung des Bemessungswasserstandes im Einklang mit KTA 2207 ist mit dem Verfahren zwar grundsätzlich möglich, bringt dann allerdings keinen Vorteil gegenüber dem im Anhang zur KTA beschriebenen Vorgehen, so dass der zusätzliche Aufwand nicht zu rechtfertigen wäre.

Binnenstandorte

Im Anhang zu KTA 2207 /KTA 04/ wird ein Verfahren zur Ermittlung des Hochwasserabflusses angegeben. Zwei alternative Verfahren /JEN 11/, die direkte Extrapolation der Messdaten geeigneter Pegel auf das 10.000-jährliche Ereignis und eine

³ Hochwasserereignisse aufgrund von großen Abflussmengen im Fluss spielen an den Standorten der noch in Betrieb befindlichen deutschen Kernkraftwerke mit Tideeinfluss keine nennenswerte Rolle.

extremwertstatistische Auswertung mit dem ProGumbel-Verfahren⁴, liefern bei Anwendung auf den Referenzstandort niedrigere Werte für das Bemessungshochwasser als das Verfahren nach KTA 2207. Hinsichtlich des ersten Alternativverfahrens ist dies nicht verwunderlich, da es im Wesentlichen die nach dem KTA-Verfahren geforderte Maximierung der Schiefe der Extremwertverteilung umgeht. Bei der Anwendung des ProGumbel-Verfahrens ist nicht klar, ob die niedrigeren Werte aus der Wahl der Parameter resultieren oder sich nach diesem Verfahren generell ergeben würden. Insgesamt ist festzustellen, dass sich hinsichtlich der Ermittlung des dem Bemessungshochwasser zugrunde zu legenden Hochwasserabflusses aus den durchgeführten Untersuchungen keine neuen Erkenntnisse ergeben haben. Wichtig ist jedoch anzumerken, dass Eishochwasser (durch Eisstau verursachte Hochwasserereignisse) sich nach derzeitigem Kenntnisstand nicht statistisch erfassen lassen, und daher durch das im Anhang der KTA 2207 beschriebene Verfahren nicht abgedeckt werden. Die Berücksichtigung eines Eishochwassers müsste standortspezifisch erfolgen, wobei hierzu bisher keine etablierte Methodik existiert. Dementsprechend ist hinsichtlich der Gefährdung von Kernkraftwerkstandorten durch Eishochwasser ohne weiterführende Untersuchungen keine abschließende Bewertung möglich.

Die Standortgefährdung hinsichtlich **großräumiger Windeinwirkungen** wurde bisher auf der Grundlage des konventionellen Regelwerks /DIN 10/, /DIN 10b/, d. h. auf Basis der deutschen Windzonenkarte, ermittelt. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurde vom DWD eine vereinfachte standortspezifische Ermittlung der Windeinwirkungen am Referenzstandort durchgeführt /DWD 13a/. Hierbei hat sich gezeigt, dass die standortspezifische Ermittlung eines 10.000-jährlichen Windereignisses prinzipiell möglich ist. Allerdings sind die Ergebnisse der extremwertstatistischen Auswertungen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet (vom DWD generisch mit 60 bis 75 % abgeschätzt). Nichtsdestotrotz erscheint es sinnvoll Windlasten für solch seltene Ereignisse zu ermitteln, da nur diese Information eine Beurteilung der Ausgewogenheit der Auslegung der Anlage im Hinblick auch unterschiedliche naturbedingte Einwirkungen von außen⁵ erlaubt. Diese Ermittlung eines Ereignisses mit einer Überschreitens-

⁴ Das ProGumbel-Verfahren hat sich bei der extremwertstatistischen Auswertung von Erdbeben- und Winddaten in der Praxis bewährt.

⁵ Für die Einwirkungen Erdbeben und Hochwasser werden der Auslegung Bemessungsereignisse mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-5} (Median) 10^{-4} bzw. (Erwartungswert) pro Jahr zugrunde gelegt.

wahrscheinlichkeit von 10^{-4} pro Jahr ist jedoch nur als zusätzliche Untersuchung und nicht als Ersatz für die Auslegung nach /DIN 10/ und /DIN 10b/ anzusehen, da keine in sich konsistente Vorgehensweise zur Auslegung auf Grundlage einer so ermittelten Standortgefährdung existiert.

Tornados werden in Deutschland bei der Auslegung von Kernkraftwerken nicht explizit berücksichtigt. Die zu erwartenden Einwirkungen aus einem solchen Ereignis werden im Allgemeinen als durch die Auslegung gegen Explosionsdruckwelle und Flugzeugabsturz angesehen. Abschätzungen der Standortgefährdung auf Basis neuer Tornado-Daten für Deutschland bestätigen die Angemessenheit dieser bisherigen Vorgehensweise. Da Tornados relevanter Stärke sicherheitstechnisch wichtige Anlagenbereiche nur mit einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10^{-7} pro Jahr treffen, bietet die Auslegung gegen die angesprochenen Notstandsfälle nach derzeitigem Kenntnisstand einen ausreichenden Schutz.

7 Literaturverzeichnis

- /ABR 97/ Abrahamson, N. A., W. J. Silva
Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes, *Seism. Res. Lett.*, 68(1), 1997
- /AHO 92/ Ahorner, L.
Das Erdbeben bei Roermond am 13. April 1992 und die daraus zu ziehenden Lehren für das Erdbebengefährdungspotenzial im Rheinlan, *Mittlg. Deutsche Geophysik Gesellschaft*, Nr. 1-2/1992, Münster, 1992
- /AMB 05/ Ambraseys, N., J. Douglas, S. K. Sarma, P. M. Smit
Equations for the Estimation of Strong Ground Motions from Shallow Crustal Earthquakes Using Data from Europe and the Middle East: Horizontal Peak Ground Acceleration and Spectral Acceleration, *Earthquake Engineering* 3(1), 2005
- /AST 96/ Astrup, P. et al
Surface roughness model for LINCOM, Risø National Laboratory, Roskilde (Risø-R-900_EN), 1996
- /BER 03/ Berge-Thierry, C., et al.
New empirical response spectral attenuation laws for moderate European earthquakes, *J. Earthquake Eng.* 7(2), 2003
- /BGR 11/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefaehrdungsanalysen/Seismologie/Bilder/world_seis_g.png, letzter Zugriff: 08.02.2013
- /BMI 13/ Bundesministerium des Innern (BMI)
Bevölkerungsschutzportal - Naturkatastrophen - Die wesentlichsten Naturkatastrophen der letzten 10 Jahre in Deutschland,
http://www.bevoelkerungsschutzportal.de/SharedDocs/Standardartikel/BVS/DE/ohneMarginalspalte/Naturkatastrophen/wesentl_Naturkatastrophen.html, letzter Zugriff: 07.06.2013

- /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, August 1976
- /BMI 77/ Bundesministerium des Inneren (BMI)
Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, Oktober 1977
- /BMU 93/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
Übersicht über meldepflichtige Ereignisse in Kernkraftwerken der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1992, 1993
- /BMU 96/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Leitfaden Sicherheitsstatusanalyse, Dezember 1996
- /BMU 01/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Verordnung über den kerntechnischen Sicherheitsbeauftragten und über die Meldung von Störfällen und sonstigen Ereignissen (Atomrechtliche Sicherheitsbeauftragten- und Meldeverordnung - AtSMV) vom 14. Oktober 1992 (BGBl. I 1992, Nr. 48), zuletzt geändert VO vom 20. Juli 2001 (BGBl. I 2001, Nr. 38), Juli 2001
- /BMU 04/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Convention on Nuclear Safety (CNS), Report by the Government of the Federal Republic of Germany for the Third Review Meeting in April 2005, September 2004
- /BMU 05/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Sicherheitsüberprüfung für Kernkraftwerke gemäß §19a des Atomgesetzes - Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse, Januar 2005
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke, November 2012

- /BÖL 84/ Böllmann, G., G. Jurksch
Ein Beitrag zur Festlegung der Grundwind- und Nennböengeschwindigkeit
im Binnenland der Bundesrepublik Deutschland für die DIN-Norm 1055,
Teil 4, Meteorol. Rdsch. 37, 1984
- /CAM 03/ Campbell, K. W., Y. Bozorgnia
Updated Near-Source Ground-Motion (Attenuation) Relations for the Hori-
zontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration and Acceler-
ation Response Spectra, Seism. Soc. Am. 93(1), 2003
- /CED 13/ Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM)
Sturmgefährdungs- und Sturmrisikokarte Deutschland,
http://www.imk-tro.kit.edu/5195_739.php, letzter Zugriff: 08.02.2013
- /CHR 89/ Christoffer, J., M. Ulbricht-Eissing
Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland. Be-
richte des Deutschen Wetterdienstes 147, Offenbach, 1989
- /CSW 13/ Center for Severe Weather Research
Doppler On Wheels, <http://cswr.org/dow/DOW.htm>, letzter Zugriff:
09.03.2013
- /DGE 92/ Deutsche Gesellschaft für Erdbeningenieurwesen und Baudynamik
(DGEB)
Das Roermonder Erdbeben am 13. April 1992 in der Niederrheinischen
Bucht - Erste Untersuchungsergebnisse, Arbeitsgruppe ATka, 1992
- /DIN 69/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN 4131: Antennentragwerke aus Stahl, 1969
- /DIN 77/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN 1055-4: Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten; Windlasten nicht
schwingungsanfälliger Bauwerke; Mai 1977
- /DIN 81/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN 4149-1: Bauten in deutschen Erdbebengebieten; Lastannahmen, Be-
messung und Ausführung üblicher Hochbauten, April 1981

- /DIN 86/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN 1055-4: Lastannahmen für Bauten - Verkehrslasten, Windlasten bei nicht schwingungsanfälligen Bauwerken; August 1986
- /DIN 91/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN 4133: Schornsteine aus Stahl; November 1991
- /DIN 04/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN 19700-10: Stauanlagen - Teil 10: Gemeinsame Festlegungen, 2004-07
- /DIN 05/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, April 2005
- /DIN 05a/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN 1055-4: Lastannahmen für Bauwerke; Teil 4: Windlasten; März 2005
- /DIN 06/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten; Deutsche Fassung EN 1998-1:2004, April 2006
- /DIN 10/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN EN 1991-1-4: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten, Dezember 2010
- /DIN 10a/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN EN 1998-1: Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, Dezember 2010
- /DIN 10b/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN EN 1991-1-4/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen - Windlasten, Dezember 2010

- /DIN 10c/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN EN 1998-5: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 5:
Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte; Deutsche Fas-
sung EN 1998-5:2004, Dezember 2010
- /DIN 11a/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN EN 1998-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter -
Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundla-
gen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau, Januar 2010
- /DIN 11b/ Deutsches Institut für Normung (DIN)
DIN EN 1998-5/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter -
Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 5: Grün-
dungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte, Juli 2011
- /DWD 00/ Deutscher Wetterdienst (DWD)
Klimastatusbericht 1999, ISBN 3-88148-359-4, Offenbach, März 2000
- /DWD 09/ Deutscher Wetterdienst (DWD)
Klimastatusbericht 2007, ISBN 978-3-88148-430-5, Offenbach, Juli 2009
- /DWD 10/ Deutscher Wetterdienst (DWD)
Klimastatusbericht 2010, ISSN 1616 - 5063 (Internet), Offenbach
- /DWD 13/ Deutscher Wetterdienst (DWD)
Wetterlexikon, Beaufort-Skala,
[http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&
_pageLabel=dwdwww_menu2_wetterlexikon](http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_menu2_wetterlexikon), letzter Zugriff: 31.07.2013
- /DWD 13a/ Deutscher Wetterdienst (DWD)
Analyse standortbezogener Windklimatologien als Eingangsgröße für die
Risikobewertung kerntechnischer Anlagen am Beispiel des Standortes
██████████, Amtliches Gutachten, Potsdam, Mai 2013

- /DWD 13b/ Deutscher Wetterdienst (DWD)
Wetterrekorde - Wind,
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_result_page&portletMasterPortlet_i1gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima_Umwelt%2FWetterrekorde%2Fwind_node.html%3F_nnn%3Dtrue, letzter Zugriff: 31.07.2013
- /DWD 13c/ Deutscher Wetterdienst (DWD)
Warnmanagement, Wenn Wetter zu Unwetter wir,
http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_spezielle_nutzer_medien_service&_state=maximized&_windowLabel=T24203826081159951660691, letzter Zugriff:
31.07.2013
- /FOR 13/ Forell, B., S. Einarsson
Einwirkungen aus gefährlichen Stoffen und chemischen Explosionen, GRS-A-3695, August 2013
- /GRS 80/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Deutsche Risikostudie Kernkraftwerke, Fachband 4, Einwirkungen von außen (einschließlich anlageninterner Brände), Verlag TÜV-Rheinland, Köln, ISBN 3-88585-015-X; 1980
- /GRU 98/ Grünthal, G. (ed.)
European Macroseismic Scale 1998, Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, Vol. 15, Conseil de l'Europe, ISBN 2-87977-008-4, Luxembourg, 1998
- /GRU 04/ Grünthal, G.
Erdbeben und Erdbebengefährdung in Deutschland sowie im europäischen Kontext. - Geographie und Schule, 151, 2004
- /HOS 87/ Hosser, D.
Realistische seismische Lastannahmen für Bauwerke. - Ergebnisse einer interdisziplinären Forschungsarbeit; Bauingenieur 62, Springer Verlag, 1987

- /HUP 98/ Hupfer, P., W. Kuttler
Witterung und Klima. B.G. Teubner, Stuttgart, Leipzig, 1998
- /HWW 12/ Hamburgisches WeltWirtschaftsinstitut gemeinnützige GmbH (HWWI)
Gutachten zu den ökonomischen Folgen des Klimawandels und Kosten der
Anpassung für Hamburg, Juli 2012
- /IAE 00/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
IRS-Report 7342: Partial Loss of Safeguard Systems as A Result of Exter-
nal Flooding, International Reporting System for Operating Experience
(IRS), Januar 2000
- /JEN 00/ Jensen, J.
Eintrittswahrscheinlichkeiten von Sturmfluten – Statistisch gesehen,
HANSA (12), 137. Jahrgang (2000 b), 2000
- /JEN 03/ Jensen, J., T. Frank
Zur Abschätzung von Sturmflutwasserständen mit sehr kleinen Überschrei-
tungswahrscheinlichkeiten, Die Küste, Sonderdruck, Heft 67, 2003
- /JEN 11/ Jensen, J., C. Mudersbach, S. Dangendorf
Untersuchung zur deterministischen und probabilistischen Bewertung von
Einwirkungen von außen, Unterauftrag: Untersuchungen an Referenzanla-
gen zu hydrologischen Einwirkungen, Februar 2011
- /KAS 00/ Kasperski, M.
Festlegung und Normung von Entwurfswindlasten. Habilitationsschrift, Fa-
kultät für Bauingenieurwesen, Ruhr-Universität Bochum, 2000
- /KIR 02/ von Kirchbach, H.-P. et al
Bericht der Unabhängigen Kommission der Sächsischen Staatsregierung -
Flutkatastrophe 2002, Dezember 2002
- /KRA 08/ Krauß, M., G. Thuma
Untersuchungen zu extremen Wetterereignissen und Witterungsbedingun-
gen, GRS-A-3426, Dezember 2008

- /KRI 00/ Kristesen, L. R. O., S. O. Hansen
Extreme winds in Denmark, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 87, 2000
- /KTA 90/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
KTA 2201.1 Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen -Teil 1 Grundsätze, Sicherheitstechnische Regel des KTA, Juni 1990
- /KTA 04/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
KTA 2207 Schutz von Kernkraftwerken gegen Hochwasser, Sicherheitstechnische Regel des KTA, November 2004
- /KTA 11/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
KTA 2201.1 Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen -Teil 1 Grundsätze, Sicherheitstechnische Regel des KTA, November 2011
- /KWU 80/ Kraftwerk Union (KWU)
Das Erdbeben in Deutschland Schwäbische Alb, 03.09.1979, Technischer Bericht, 1980
- /LEE 04/ Lee, J. J., T. M. Samaras, C. R. Young
Pressure Measurements at the Ground in an F-4 Tornado, Konferenzbeitrag zur 22nd Conference on Severe Local Storms,
<https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/81700.pdf> , Oktober 2004
- /LEY 08/ Leydecker, G., et al.
Seismo-engineering parameters for sites of interim storages for spent nuclear fuel at German nuclear power plants, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 28 (2008)
- /LFU 12/ Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Hydrologisches Handbuch, Gewässerkundliche Hauptwerte, Teil 3, November 2012

- /LMU 08/ Ludwig-Maximilians-Universität München
Was sind seismische Wellen?, <http://www.erdbeben-in-bayern.de/erdbebenkunde/seismische-wellen>, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, 2008, letzter Zugriff: 18.01.2012
- /MAK 10/ Makkonen, L., B. Wichura
Simulating wet snow loads on power line cables by a simple model, Cold Regions Science and Technology, 61(2-3), 2010
- /MAN 00/ Mann, J.
The spectral velocity tensor in moderately complex terrain, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 88, Dezember 2000
- /MES 03/ Meskouris, K.; K. G. Hinzen
Bauwerke und Erdbeben. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2003
- /MET 10/ METEO France
Rafales de vent enregistrées aux cours des samedi 27 et dimanche 28 février, La tempête Xynthia des 27-28 février 2010, 05/03/2010, http://france.meteofrance.com/france/actu/actu?portlet_id=50150&document_id=22089, letzter Zugriff: 31.07.2013
- /MGD 13/ MeteoGroup Deutschland GmbH
MeteoArchiv, Wetterlexikon, Beaufortskala, <http://de.meteoarchive.com/de/wetterlexikon/beaufortskala.html>, letzter Zugriff: 05.02.2013
- /MUR 12/ Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft (Munich RE)
TOPICS ONLINE, Naturgefahren, Wie entsteht ein Wintersturm?, <http://www.munichre.com/de/reinsurance/topics-online/2012/01/natural-hazards/default.aspx>, letzter Zugriff: 31.07.2013
- /NRC 11/ United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC)
Event Notification Report for June 7, 2011, Event Number: 46929, Juni 2011

- /NRC 11a/ United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC)
Event Notification Report for June 8, Event Number: 46932, Juni 2011
- /NRC 11b/ United States Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC)
Event Notification Report for June 27, Event Number: 46988, Juni 2011
- /PEI 03/ Peil, U. (ed.)
Tagungsband zum Praxis-Seminar 2003 - Windlasten auf Bauwerke, Institut für Stahlbau, TU Braunschweig, 2003
- /REI 90/ Reiter, L
Earthquake hazard analysis - Issues und insights. Columbia University Press, New York, 1990
- /RIS 10/ RISKAUDIT
Topical Operational Experience Report (TOER) on external hazards - Technical support for improvement of European NPP - Operating Experience Feedback, RISKAUDIT Technical Interim Report N° 1444 revision 1, Dezember 2010
- /SAB 96/ Sabetta, F., A. Pugliese
Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions, Seism. Soc. Am., 86(2), 1996
- /SAE 13/ Sävert, T.
Tornadoliste Deutschland, <http://www.tornadoliste.de/>, letzter Zugriff am 10.03.2013
- /SDA 11/ SDA-engineering GmbH
Zur Ermittlung der seismischen Gefährdung an Standorten deutscher Kernkraftwerke - Auftrag im Rahmen der Untersuchung zur deterministischen und Probabilistischen Bewertung von Einwirkungen von außen, März 2011
- /SEB 12/ Sebecker, J., T. Deutschländer, B. Wichura, U. Behrens
Winddaten für Windenergienutzer - Zweite Auflage, Version 6, Deutscher Wetterdienst, Regionales Klimabüro Potsdam, 2012

- /SPU 99/ Spudich, P., et al.
SEA99: A revised ground motion prediction relation for use in extensional tectonic regimes, Seismol. Soc. Am, 89(5), 1999
- /SSS 04/ Swiss Seismological Service
Seismic Hazard Assessment of Switzerland, Version 1.1, November 2004
- /STE 08/ Stewart, R. H.
Introduction to Physical Oceanography, Open Source Textbook:
http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/PDF_files/book_PDF_files.html, Department of Oceanography, Texas A&M University, September 2008
- /STU 88/ Stull, R. B..
An introduction to boundary layer meteorology. Kluwer Academic Publishers, ISBN: 978-90-277-2769-5, 1988
- /SWI 02/ Schweizerische Rückversicherungs-Gesellschaft (Swiss Re)
Natur- und Man-made-Katastrophen 2001: Man-made-Schäden einer neuen Dimension, Sigma 1/2002; 2002
- /TDD 13/ TorDACH Deutschland / Germany
<http://www.tordach.org/de/tornado.htm>, letzter Zugriff am 31.07.2013
- /TOM 13/ Tomachpolskaia, M., et al.
Exemplarische Anwendung eines integralen Vorgehens zur Behandlung des Ereignisablaufes eines unfallbedingten Absturzes eines Flugzeugs auf ein Kernkraftwerk im Leistungsbetrieb, GRS-A-3694 (VS - NFD), August 2013 (Entwurf)
- /TOR 13/ The Tornado & Storm Research Organisation (TORRO)
The International Tornado Intensity Scale,
<http://www.torro.org.uk/site/tscale.php>, letzter Zugriff am 13.03.2013

- /TRO 86/ Troen,I., A. de Bass
A spectral diagnostic model for wind flow simulation in complex terrain, in:
Proceedings of the European Wind Energy Association Conference & Exhibition, Rome, 1986
- /USG 13/ United States Geological Survey (USGS)
Earthquake Glossary,
<http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=earthquake>, letzter Zugriff:
18.01.2013
- /USG 99/ United States Geological Survey (USGS)
<http://pubs.usgs.gov/publications/text/Vigil.html>, last updated: 05.05.99,
letzter Zugriff: 20.03.2013
- /WEG 17/ Wegener, A. L.
Wind- und Wasserhosen in Europa, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1917,
digitalisiertes Buch abgerufen von:
<http://essl.org/pdf/Wegener1917/Kapitel01-02.pdf>
- /WMO 08/ World Meteorological Organisation (WMO)
Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 7. Ed.,
Vol. 8, Genf, 2008
- /WMO 67/ World Meteorological Organisation (WMO)
A Note on Climatological Normals. Technical Note 83, Genf, 1967
- /WNA 11/ World Nuclear Association (WNA)
Fort Calhoun defends against flood, World Nuclear News, 27.06.2011, Juni
2011
- /WUE 13/ Stadt Würzburg
Das Hochwasser von 1342,
http://wuerzburg.de/media/wuerzburg.de/org/med_878/1342_A3G.pdf, letz-
ter Zugriff: 20.03.2013

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
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