



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Entwicklung und
Erprobung von
PSA-Methoden und
Werkzeugen.
Teilvorhaben:
Methoden

Vorhaben RS1166

Untersuchungen zu extremen
Wetterereignissen und Witte-
rungsbedingungen

Technischer Bericht

Technischer Bericht/ Technical Report

Reaktorsicherheitsforschung-
Vorhabens Nr.:/
Reactor Safety Research-Project No.:
RS1166

Vorhabensitel / Project Title:
Entwicklung und Erprobung
von PSA-Methoden und
Werkzeugen.
Teilvorhaben: Methoden

Development and testing of
PSA methods and tools, part 1:
Improvement of PSA methods

Berichtstitel:
Untersuchungen zu extremen
Wetterereignissen und Witte-
rungsbedingungen

Autor / Authors:
M. Krauß
G. Thuma

Berichtszeitraum / Publication Date:
Dezember 2008

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde lie-
gende F&E-Vorhaben wurde im
Auftrag des Bundesministeriums
für Wirtschaft und Technologie
(BMWi) unter dem Kennzeichen
RS1166 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt beim
Auftragnehmer.

Kurzfassung

Da es Anzeichen dafür gibt, dass durch den aktuellen Klimawandel Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen zunehmen könnten, stellt sich die Frage, ob solche Einwirkungen zukünftig im Rahmen der Probabilistischen Sicherheitsanalyse von Kernkraftwerken behandelt werden sollten.

Zur Beantwortung dieser Frage wurde zunächst überprüft, welche extremen Wetterereignisse und Witterungsbedingungen aus sicherheitstechnischer Sicht bei der Auslegung und Bewertung von Kernkraftwerken zu berücksichtigen sind. Anschließend wurde die nationale und internationale Betriebserfahrung ausgewertet, um zu ermitteln, welche sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen derartige Ereignisse auf Kernkraftwerke haben können. Parallel dazu wurden Informationen zum aktuellen wissenschaftlichen Stand hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf die meteorologischen Bedingungen in Mitteleuropa gesammelt.

Auf der Grundlage dieser Arbeiten ergeben sich für die heutige und zukünftige sicherheitstechnische Bedeutung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen die folgenden Erkenntnisse:

Extreme meteorologische Bedingungen führen immer wieder zu Folgeereignissen in Kernkraftwerken. Typische Einwirkungspfade sowohl bei kurzzeitigen Unwettern (insbesondere Sturm, Starkniederschläge, Hochwasser und Gewitter) als auch während länger anhaltender Temperaturextrema (Frost- oder Hitzeperioden) sind Störungen der Elektro- und Leittechnik sowie der Nebenkühlwasserversorgung.

Insgesamt lässt sich auf der Basis der ermittelten Informationen feststellen, dass extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen, grundsätzlich sicherheitstechnisch relevante Auswirkungen auf Kernkraftwerke haben können. Während im Ausland teilweise auch kritische Situationen auftraten, zeigt die nationale Betriebserfahrung, dass die Auslegung der deutschen Kernkraftwerke bisher ausreichte, um schwerwiegende Folgen zu verhindern.

Eine Veränderung der meteorologischen Randbedingungen in Folge des Klimawandels könnte grundsätzlich zu einer Verschlechterung der Situation führen.

Die Prognosen für Mitteleuropa zeigen jedoch, dass in den kommenden Jahrzehnten in Deutschland nur mit moderaten Klimaänderungen zu rechnen ist. Insbesondere ist im Winter mit einer Zunahme von Starkniederschlägen (mit Hochwasserereignissen als möglicher Folge) zu rechnen, während im Sommer verstärkt Hitze- und Trockenperioden auftreten werden.

Insgesamt ist mittelfristig keine nennenswerte Zunahme der Gefährdung der deutschen Kernkraftwerke durch extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen zu erwarten.

Ausgehend von dieser Bewertung der Gefährdungslage und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass bereits der erste grundlegende Schritt der probabilistischen Analyse extremer Wetterereignisse oder Witterungsbedingungen (Ermittlung der Eintrittswahrscheinlichkeiten) mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist, lässt sich die Ausgangsfrage, dahingehend beantworten, dass es derzeit aus sicherheitstechnischer Sicht nicht erforderlich ist, extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen umfassend in der PSA zu berücksichtigen.

Summary

Recent scientific findings indicate that there is a potential for an increase in frequency and intensity of harsh weather conditions due to climate change. Against this background we try to answer the question, whether such impacts should be treated in the framework of probabilistic safety assessments for nuclear power plants.

In a first step we identified the weather conditions to be considered in the design and safety assessment of nuclear power plants according to international standards. For these weather conditions we evaluated the national and international operating experience with respect to safety significant impacts on nuclear power plants. Furthermore, information on the scientific state of knowledge with respect to the future trend of the meteorological conditions in Central Europe has been collected.

Based on these studies the following conclusions can be drawn:

Harsh weather conditions have the potential to cause initiating events in nuclear power plants. Typical impacts due to thunderstorms (storms, heavy rains, floods, and lightning) and extreme temperatures, which are the main classes of potentially hazardous weather conditions, are disturbances of electrical and I&C equipment as well as adverse effects on the service water system. This implies that harsh weather conditions can actually impair the safety of nuclear power plants.

In general, the impact of global climate change on regional meteorological conditions could lead to more hazardous situations. Fortunately, regional-scale climate projections show only moderate changes within the next decades: Whereas during the winter months there is a trend to increased precipitation (including the risk of consequential flooding), less precipitation is expected in summer. Simultaneously heat waves will become more frequent. All in all, on a medium-term scale the hazard due to harsh weather conditions is not expected to increase significantly in Central Europe.

Taking into account the large uncertainties inherent to the assessment of exceedance probabilities for harsh weather conditions, these findings allow the conclusion, that a full scope probabilistic safety assessment for harsh weather conditions is not necessary at present.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	VIII
1 Einführung und Zielsetzung.....	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens.....	2
3 Vorgehensweise	5
4 Probabilistische Behandlung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen in anderen Ländern.....	6
5 Spektrum potentiell sicherheitstechnisch relevanter extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen	10
6 Auswirkungen extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen auf Kernkraftwerke	14
6.1 Vorgehen zur Ermittlung der möglichen Auswirkungen	14
6.2 Vereinfachte Kategorien zur sicherheitstechnischen Bewertung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen	15
6.3 Zusammenstellung der Betriebserfahrung	17
6.3.1 Sturm.....	17
6.3.2 Temperaturen.....	21
6.3.3 Hochwasser	27
6.3.4 Niedrigwasser	30
6.3.5 Niederschlag	31
6.3.6 Blitzschlag	33
6.3.7 Anlagenexterner Brand	36
6.4 Auswertung der Betriebserfahrung	38
7 Auswirkungen des Klimawandels auf Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen	43
7.1 Vorgehensweise zur Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels.....	43

7.2	Klimaentwicklung	44
7.2.1	Globale Klimaentwicklung	46
7.2.2	Regionale Klimaentwicklung in Mitteleuropa.....	49
7.2.3	Auswirkungen des Klimawandels auf die regionale Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen.....	56
7.3	Zusammenfassende Bewertung der Informationen zum Klimawandel und dessen Auswirkungen	60
8	Zusammenfassung und Bewertung	62
8.1	Derzeitige sicherheitstechnische Bedeutung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen für Kernkraftwerke	62
8.2	Zukünftige sicherheitstechnische Bedeutung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen für Kernkraftwerke in Deutschland	63
8.3	Notwendigkeit und Möglichkeit der Behandlung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen im Rahmen der PSA.....	65
9	Identifikation potentieller Kooperationspartner	67
10	Referenzen	70
11	Verteiler	81

Abbildungsverzeichnis

Abb. 6-1:	Anzahl der dokumentierten Ereignisse pro Jahr (Anmerkung: Das IRS wurde erst 1978 eingeführt, so dass der Zeitraum bis ca. 1980 nicht als repräsentativ angesehen werden kann.)	38
Abb. 6-2:	Verteilung der dokumentierten Ereignisse auf die unterschiedlichen Gruppen von Einwirkungen von außen	40
Abb. 6-3:	Verteilung der Ereignisse mit sicherheitstechnischer Bedeutung (Klassen B und C) auf die unterschiedlichen Einwirkungsgruppen.....	41
Abb. 7-1:	Graphische Veranschaulichung der verschiedenen Szenarien des IPCC. /SPE 07/, Anhang A S. IV	47

Tabellenverzeichnis

Tab. 5-1: Zusammenstellung wetter- bzw. witterungsbedingter Einwirkungen, die in extremer Ausprägung sicherheitsrelevante Auswirkungen auf Kernkraftwerke haben können	12
Tab. 6-1: Zur Auswertung der Betriebserfahrung verwendete Datenbanken	14
Tab. 6-2: Vereinfachte Klassifizierung zur Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung wetter- bzw. witterungsbedingter Ereignisse in Kernkraftwerken (Hinsichtlich der Bewertung einer RESA wird auf den Fließtext verwiesen.)	16
Tab. 6-3: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Sturm"	18
Tab. 6-4: Ereignisse der Kategorie "Sturm"	19
Tab. 6-5: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Temperaturen"	23
Tab. 6-6: Ereignisse der Kategorie "Temperaturen"	23
Tab. 6-7: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Hochwasser"	27
Tab. 6-8: Ereignisse der Kategorie "Hochwasser"	28
Tab. 6-9: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Niedrigwasser"	31
Tab. 6-10: Ereignisse der Kategorie "Niedrigwasser"	31
Tab. 6-11: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Niederschlag"	32
Tab. 6-12: Ereignisse der Kategorie "Niederschlag"	32
Tab. 6-13: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Blitzschlag"	34
Tab. 6-14: Ereignisse der Kategorie "Blitzschlag"	34
Tab. 6-15: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Anlagenexterner Brand"	37
Tab. 6-16: Ereignisse der Kategorie "Anlagenexterner Brand"	37

Tab. 6-17: Verteilung der Ereignisse innerhalb der Einwirkungskategorien auf die sicherheitstechnischen Klassen A bis C.....	42
Tab. 7-1: Erwartete Auswirkungen des Klimawandels innerhalb der kommenden drei Jahrzehnte. („Verlässlichkeit“ bezeichnet die derzeitige wissenschaftliche Absicherung der erwarteten Veränderung; Quelle: /DMG 07/).....	55
Tab. 9-1: Fachinstitutionen auf dem Gebiet der Meteorologie, Hydrologie und Klimatologie. Angegeben sind nur ausgewählte Themengebiete mit Relevanz für die Sicherheit von Kernkraftwerken	68

1 Einführung und Zielsetzung

Einwirkungen von außen (EVA) spielen bei der Sicherheitsbewertung von Kernkraftwerken eine besondere Rolle: Aufgrund des anlagenübergreifenden Charakters besteht die Möglichkeit, dass durch die selbe Einwirkung einerseits ein auslösendes Ereignis (Transiente oder Leckstörfall) verursacht wird und andererseits eine Beeinträchtigung der zur Beherrschung des Ereignisses benötigten Sicherheitsteilsysteme stattfindet. Daher wurden die deutschen Kernkraftwerke entsprechend dem zum Zeitpunkt ihrer Errichtung jeweils gültigen Stand des kerntechnischen Regelwerks gegen naturbedingte EVA ausgelegt /BMU 07/. Im Allgemeinen erfolgte diese Auslegung auf der Basis von deterministischen Bewertungskriterien.

Im Rahmen der (periodischen) Sicherheitsüberprüfungen (SÜ) /BMU 96/ ist der Schutz gegen Einwirkungen von außen für die bestehenden Kernkraftwerke erneut nachzuweisen. Gemäß dem aktuellen Leitfaden zur Probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) /BMU 05/ sind diese Nachweise entsprechend dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik /IAE 08/ nicht nur deterministisch sondern auch mittels probabilistischer Analysen durchzuführen. Allerdings beschränkt sich diese Anforderung gemäß dem PSA-Methodenband /FAK 05/ auf die Einwirkungen Flugzeugabsturz, Explosionsdruckwelle, Hochwasser und Erdbeben. Für extreme Wetterereignisse bzw. extreme Witterungsbedingungen (mit Ausnahme des Hochwassers) gibt es bisher keine derartige Anforderung.

Da es Anzeichen dafür gibt, dass durch den aktuellen Klimawandel Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen zunehmen könnten, stellt sich die Frage, ob zukünftig auch solche Einwirkungen im Rahmen der PSA behandelt werden sollten. Um diese Frage zu beantworten, sollte im Rahmen des Arbeitspaketes 3 des Vorhabens RS 1166 untersucht werden, ob sich die bereits aufgetretenen bzw. die in den kommenden Jahrzehnten zu erwartenden Klimaänderungen nennenswert auf Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen auswirken werden. Parallel dazu sollten die oben angeführten wetter- und witterungsbedingten Einwirkungen im Hinblick auf die physikalischen Wirkungspfade in Kernkraftwerken und ihre möglichen kernschadensrelevanten Auswirkungen untersucht und klassifiziert werden.

2 Stand von Wissenschaft und Technik zu Beginn des Vorhabens

Obwohl Deutschland in einer gemäßigten Klimazone liegt, treten immer wieder extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen auf. Eindrucksvolle Beispiele hierfür sind:

- Sturmtiefs, wie der Orkan Lothar, der 1999 schwere Waldschäden in Frankreich, Deutschland sowie der Schweiz verursachte und rund 80 Todesopfer forderte, oder der Orkan Kyrill im Jahr 2007 mit rund 50 Todesopfern,
- Hochwasser, wie im Sommer 2002 an Elbe und Oder, sowie
- Trocken- bzw. Hitzeperioden, wie die Hitzewelle im Sommer 2003, die an vielen Kraftwerksstandorten in Mitteleuropa zu erheblichen Betriebseinschränkungen führte.

Auch wenn derartige Extremereignisse zunächst nur singuläre Wetterereignisse darstellen und nicht als Zeichen des Klimawandels gewertet werden können, vermitteln sie einen Eindruck davon, welche Dimensionen extreme Wetterereignisse bzw. Witterungsbedingungen erreichen können.

Da sowohl für die ältere als auch für die jüngere Erdgeschichte gravierende Klimaänderungen bekannt sind /SCH 92/ kann auch für die Zukunft das vermehrte Auftreten von Naturkatastrophen und extremen Wetterereignissen bzw. Witterungsbedingungen nicht ausgeschlossen werden. Da derartige Ereignisse gerade in hoch entwickelten Industriegesellschaften mit hoher Bevölkerungsdichte zu erheblichen Schäden führen können, besteht auf breiter Ebene (Industrie, Versicherungen, mit dem Katastrophenschutz befasste Organisationen) ein wachsendes Interesse am Verständnis der zugrunde liegenden geophysikalischen, klimatologischen und meteorologischen Prozesse sowie an einem adäquaten Risikomanagement mit entsprechender Katastrophenvorsorge (z. B. /GFZ 04/, /MUE 07/, /PLA 01/).

Da mit Störfällen in Kernkraftwerken ein relativ hohes Gefährdungspotential verbunden ist, stellt sich die Frage, inwieweit extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen die Sicherheit dieser Anlagen beeinträchtigen können und wie sich der Einfluss solcher Ereignisse auf die Kernschadenshäufigkeit auswirkt. Für konventionelle Industrieanlagen finden sowohl auf nationaler Ebene als auch auf internationaler

Ebene Untersuchungen zur Gefährdung durch äußere - auch wetter- und witterungsbedingte - Einwirkungen statt (z. B. /WAR 07/).

Nach dem derzeitigen Stand der PSA-Methoden werden wetter- und witterungsbedingte Einwirkungen mit Ausnahme des Ereignisses Hochwasser in /FAK 05/ praktisch nicht behandelt. Für Hochwasser gibt es zwar erste Ansätze für eine Berücksichtigung in der PSA /FAK 05/, die aber ebenfalls einer methodischen Fortentwicklung bedürfen. Vereinzelt gibt es in ausländischen Analysen spezielle Betrachtungen (Relevanzabschätzungen) bei besonders exponierten Standortgegebenheiten (z. B. Einwirkungen durch Tornados oder Hurrikane in den USA) /ANS 03/. Es stehen derzeit jedoch keine ausreichend abgesicherten Methoden zur Verfügung, um solche Einwirkungen in einer PSA vollständig zu berücksichtigen /NEA 08/.

Sowohl in der Deutschen Risikostudie - Kernkraftwerke, Fachband 4 /GRS 80/ als auch in der SWR Sicherheitsanalyse /GRS 93/ wird die Bedeutung von Wetter- bzw. Witterungseinflüssen für die Sicherheit von Kernkraftwerken angesprochen. In diesen Arbeiten wird jedoch meist auf die (deterministische) Auslegung der jeweiligen Referenzanlage gegen solche Einflüsse Bezug genommen. Die sicherheitstechnische Bedeutung von Ereignissen, die im Hinblick auf ihre Intensität durch diese Auslegung abgedeckt sind, wird erwartungsgemäß als eher gering eingeschätzt. Als potentiell relevante Gefährdung verbleiben auslegungsüberschreitende Ereignisse bzw. das Versagen entsprechender Vorsorgemaßnahmen. Eine Untersuchung solcher Ereignisse bzw. eine quantitative probabilistische Behandlung wetter- und witterungsbedingter Risiken fand im Rahmen dieser Studien jedoch nicht statt.

Weitere (qualitative) Untersuchungen spezieller Wetter- bzw. Witterungssituationen im Hinblick auf ihre sicherheitstechnische Bedeutung fanden im Zuge der Auswertung von Länderumfragen des BMU zum "Hochwasserschutz deutscher Kernkraftwerke" /GRS 01/, /GRS 03/ und zum "Einfluss stark steigender Flusstemperaturen auf den Betrieb deutscher Atomkraftwerke" /GRS 03a/ statt. Die Behandlung der Problematik beschränkte sich hierbei im Wesentlichen auf eine erste qualitative Beurteilung des Einflusses. Eine vertiefte (probabilistische) Analyse war aufgrund der eng gesetzten Randbedingungen nicht möglich. Hinsichtlich des Ereignisses Hochwasser hat sich bei diesen Untersuchungen gezeigt, dass die Schutzmaßnahmen von Kraftwerk zu Kraftwerk deutliche Unterschiede aufweisen und eine anlagenspezifische Gefährdungsanalyse erfordern. Bei den Hochwasserereignissen der vergangenen Jahre wurde zwar an keinem Standort der Bemessungshochwasserstand, der der Auslegung zugrunde liegt,

erreicht, jedoch waren die verbleibenden Spielräume beim Elbehochwasser des Jahres 2002 teilweise gering. Die Auswertung der Umfrage zu den Flusswassertemperaturen /GRS 03a/ ergab, dass die Auslegungswerte im Sommer 2003 an einigen Standorten überschritten wurden. Auch wenn sich – u. a. aufgrund entsprechender Maßnahmen der Betreiber und Behörden – keine Gefährdung ergab, zeigte sich, dass hinsichtlich derartiger Einwirkungen weiterer Untersuchungsbedarf besteht.

3 Vorgehensweise

Bisher werden extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen international nur in sehr begrenztem Umfang im Rahmen Probabilistischer Sicherheitsanalysen behandelt (vgl. Abschnitt 4). Um die Frage zu klären, ob solche Einwirkungen zukünftig Bestandteil der PSA für deutsche Kernkraftwerke sein sollten, wurde in vier Schritten vorgegangen:

1. Zunächst wurde anhand des nationalen und internationalen Regelwerks geprüft, welche extremen Wetterereignisse und Witterungsbedingungen aus sicherheitstechnischer Sicht bei der Auslegung und Bewertung von Kernkraftwerken zu unterstellen sind (siehe Abschnitt 5).
2. Anschließend wurde die nationale deutsche wie auch die internationale Betriebserfahrung mit Kernkraftwerken ausgewertet, um zu ermitteln, welche sicherheitstechnisch relevanten Auswirkungen extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen haben können (siehe Abschnitt 6).
3. Um die in Zukunft zu erwartende Häufigkeit und Intensität derartiger Einwirkungen abschätzen zu können, wurden Informationen zum derzeitigen wissenschaftlichen Stand hinsichtlich der konkreten Auswirkungen des Klimawandels auf Extremereignisse im Raum Mitteleuropa gesammelt (siehe Abschnitt 1).
4. Unter Berücksichtigung der in Punkt 2 und 3 erlangten Erkenntnisse wurden das Gefährdungspotential extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen sowie die daraus resultierende Notwendigkeit einer detaillierten probabilistischen Untersuchung bewertet (siehe Abschnitt 1).

Neben diesen Arbeiten, die auf die Bewertung der zukünftigen sicherheitstechnischen Relevanz extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen abzielten, wurden, soweit möglich, Institutionen und Ansprechpartner identifiziert, die bei Bedarf als Quelle für fachspezifische Informationen zum Themenbereich Wetter und Klima genutzt werden können (siehe Abschnitt 0). Durch diese Liste soll die Beantwortung in Zukunft eventuell auftretender sicherheitstechnischer Fragen hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit von Kernkraftwerken gegen extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen erleichtert werden.

4 Probabilistische Behandlung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen in anderen Ländern

Da zum Thema der probabilistischen Behandlung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen in der Literatur nur wenige Informationen verfügbar sind, wurde zur Ermittlung des diesbezüglich üblichen Vorgehens in anderen Ländern der Schwerpunkt auf den persönlichen Erfahrungsaustausch mit internationalen Experten auf dem Gebiet der PSA, insbesondere der PSA für anlagenexterne Ereignisse, gelegt. Als geeignetes Forum für diesen Erfahrungsaustausch haben sich die Sitzungen der OECD/NEA/CSNI/WGRisk-Arbeitsgruppe zur External Events PSA (EE PSA) herausgestellt, da in dieser Arbeitsgruppe speziell über die Behandlung von Einwirkungen von außen im Rahmen der PSA diskutiert wird. Ziel der Arbeitsgruppe ist es, mit Hilfe eines Fragebogens /NEA 07/, der an die OECD-Mitgliedsländer verschickt wurde, den aktuellen internationalen Stand hinsichtlich der External Events PSA zu ermitteln. Die Ergebnisse der Auswertung des Fragebogens soll anschließend in einem Report /NEA 08/ zusammengefasst werden.

Die Auswertung der Fragebögen und die Diskussionen in der Arbeitsgruppe haben ergeben, dass die Behandlung von Einwirkungen von außen (mit der Ausnahme von Erdbeben), insbesondere der hier relevanten wetter- und witterungsbedingten Einwirkungen, im Rahmen der PSA international nicht besonders weit entwickelt ist. Eine Ausnahme stellen hierbei Länder dar, die aufgrund der regionalen klimatischen Verhältnisse regelmäßig mit extremen Wetterereignissen konfrontiert sind und dementsprechende Methoden zur Berücksichtigung dieser Einwirkungen entwickelt haben. Beispiele hierfür sind die USA und Kanada, wo die Einwirkung Tornado vertieft behandelt wird /ANS 03/, /PAR 95/, sowie Taiwan, wo die Gefährdung durch Taifune in der PSA quantifiziert wurde /NEA 08/.

Auch im Regelwerk der International Atomic Energy Agency (IAEA) /IAE 08/ und anderen zugänglichen internationalen Regeln und Richtlinien, wie z. B. dem relativ modernen finnischen Regelwerk /YVL 96/, /YVL 00/, /YVL 03/, finden sich nur in begrenztem Umfang einwirkungsspezifische Vorgaben zur probabilistischen Behandlung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen.

In /IAE 08/ werden extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen als Teilaspekt der Einwirkungen von außen behandelt. Konkret wird hierbei nur auf die Einwir-

kungen “high winds” (Sturm) und “external flooding” (Hochwasser) eingegangen, im Anhang 1 werden jedoch weitere Einwirkungen aufgelistet (vgl. Abschnitt 5).

Folgt man der in /IAE 08/ verwendeten Einteilung der Themengebiete (Parametrisierung der Einwirkung, Ermittlung der Eintrittshäufigkeiten, Versagensanalyse für Bauwerke und Komponenten und Einbindung in die PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse), so lassen sich die Anforderungen für die probabilistische Untersuchung von Sturm- und Hochwassereinwirkungen wie folgt zusammenfassen:

- Sturm
- Hinsichtlich der **Parametrisierung** des Gefährdungspotentials ist zwischen translatorischen Winden, bei denen die dynamische Einwirkung von Böen und die mittlere statische Windlast zu berücksichtigen sind, und Tornados, bei denen die Rotationsgeschwindigkeit, die Druckdifferenz und die Einwirkung von Trümmern im Vordergrund stehen, zu unterscheiden.
- Da bei Einwirkungen von außen der Ermittlung der **Eintrittshäufigkeit** eine besondere Bedeutung zukommt, wird darauf hingewiesen, dass für deren Ermittlung Methoden nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik sowie aussagekräftige Messdaten herangezogen werden sollen.
- Ähnlich dem Vorgehen bei einer Erdbeben-PSA soll im Vorfeld der **Versagensanalyse für Bauwerke und Komponenten** eine Anlagenbegehung durchgeführt werden, um relevante Bauwerke und Komponenten sowie potentielle Gefahrenquellen (z. B. lose Gegenstände, die durch Wind aufgewirbelt werden können) zu identifizieren. Für Bauwerke und Komponenten, deren windbedingtes Versagen zu auslösenden Ereignissen führen kann, sind anschließend Versagenswahrscheinlichkeiten zu berechnen.
- Die **Einbindung in die PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse** erfolgt, indem zusätzlich zu den anlageninternen auslösenden Ereignissen die durch die Sturmeinwirkung unmittelbar oder mittelbar verursachten Ereignisse betrachtet werden. Zusätzlich sind im Rahmen der Ereignisablaufanalyse alle sturmbedingten Auswirkungen auf die Verfügbarkeit von Bauwerken und Komponenten zu berücksichtigen.

- Hochwasser
- Zur **Parametrisierung** des Gefährdungspotentials von Hochwasserereignissen können die Abflussmenge, die Fließgeschwindigkeit, der Wasserstand, die Dauer des Hochwassers und der Beitrag von Wellen herangezogen werden. Hierbei sind auch ggf. gleichzeitig auftretende Windlasten zu berücksichtigen.
- Für die Ermittlung der **Eintrittshäufigkeit** sind standortspezifische Daten als Eingangsgrößen für die probabilistische Gefährdungsanalyse zu verwenden, wobei auch die Unsicherheiten dieser Daten vollständig berücksichtigt werden sollen (Fortpflanzung der Unsicherheiten durch die gesamte Analyse).
- Die **Versagensanalyse für Bauwerke und Komponenten** ist analog derjenigen für Sturmeinwirkungen durchzuführen, wobei im Rahmen der Anlagenbegehung insbesondere auf niedrig gelegene Anlagenteile geachtet werden sollte. In die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeiten sind auch dynamische Lasten durch Wellengang und die Möglichkeit eines Gründungsversagens mit einzubeziehen.
- Die **Einbindung in die PSA der Stufe 1 für anlageninterne Ereignisse** erfolgt prinzipiell genau so wie bei der Einwirkung "Sturm". Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit für Personalhandlungen entsprechend den ereignisspezifischen Randbedingungen zu modifizieren ist.

Auch im Regelwerk der U.S. NRC werden Anforderungen hinsichtlich der probabilistischen Untersuchung wetter- und witterungsbedingter Einwirkungen nur für die Einwirkung "Hochwasser" spezifiziert /NRC 83/. Für andere Einwirkungen, wie z. B. "Tornado" /NRC 07/, beschränkt sich das Regelwerk der U.S. NRC weitgehend auf deterministische Verfahren.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die durchgängige probabilistische Behandlung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen international keine etablierte Vorgehensweise darstellt. Allerdings gibt es einzelne Ausnahmen hinsichtlich als besonders relevant erachteter Einwirkungen, wie z. B. Hochwasser. Von den Ex-

perten der OECD/NEA/CSNI/WGRisk Arbeitsgruppe zur External Events PSA¹ wird diesbezüglich derzeit auch kein Handlungsbedarf gesehen, da der erwartete Beitrag zur Gesamtkernschadenshäufigkeit im Vergleich zu anderen Einwirkungen von außen und zu den Beiträgen anlageninterner Ereignisse als gering eingeschätzt wird. Diese Bewertung wird auch durch die von der Arbeitsgruppe bereits ausgewerteten Antworten zu dem an die Mitgliedsländer verschickten Fragebogen gestützt /NEA 08/. Es ist jedoch anzumerken, dass mögliche Auswirkungen des Klimawandels in diesem Rahmen nicht berücksichtigt wurden.

¹ J. Sandberg und R. Virolainen (STUK, Finnland), C.-C. Chao und C.-K. Lo (INER, Taiwan), T.-M. Kao und J.-D. Lin (Taiwan), M. Fukuda (JNES, Japan), G. Georgescu (IRSN, Frankreich), R. Gheorghe (CNSC, Kanada), N. Siu (NRC, USA), G. Thuma (GRS, Germany), J.-E. Yang (KAERI, Korea)

5 **Spektrum potentiell sicherheitstechnisch relevanter extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen**

Da extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen das Potential besitzen, anlagenübergreifende Schäden zu verursachen, werden sie bei der Auslegung von Kernkraftwerken im Allgemeinen entsprechend der standortspezifischen Gegebenheiten berücksichtigt. Da die Art der Einwirkung von den klimatischen Bedingungen abhängt, werden in verschiedenen Ländern unterschiedliche Einwirkungsspektren zugrunde gelegt.

Im deutschen kerntechnischen Regelwerk findet sich eine beispielhafte Liste zu berücksichtigender Einwirkungen von außen in den Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke /BMI 77/. Dort werden aus dem Bereich der wetter- und witterungsbedingten Einwirkungen Sturm, Hochwasser und Sturmflut explizit genannt. Im übergeordneten Modul 1 /GRS 06/ der Überarbeitung des kerntechnischen Regelwerks, welches in Zukunft die Sicherheitskriterien und die Leitlinien der Reaktorsicherheitskommission (RSK) /RSK 96/ ersetzen soll, werden Hochwasser, Sturm und Blitzschlag erwähnt. Zusätzlich werden in Modul 10 /GRS 06/ die folgenden extremen meteorologischen Bedingungen aufgezählt, die standortspezifisch zu untersuchen sind:

- hohe oder niedrige Temperaturen (Außenluft und Flusswasser),
- lang anhaltende Trockenheit,
- hohe oder niedrige Luftfeuchtigkeit,
- Schneefall,
- Vereisung,
- Hagel,
- Gewitter und
- Salzablagerung (auf Isolatoren).

In den kerntechnischen Regeln und Richtlinien anderer Länder finden sich ähnliche Listen, die jedoch regionale (klimatisch bedingte) Unterschiede aufweisen. Beispielsweise werden im finnischen Regelwerk /YVL 00/ aufgrund der regionalen Gegebenhei-

ten zusätzlich Schneelasten und Vereisung (insbesondere Frazil Eis²) genannt sowie im US-amerikanischen Regelwerk /NRC 83/, /NRC 98/ Tornados.

Auch im IAEA Regelwerk wird eine Reihe potentiell sicherheitstechnisch relevanter Einwirkungen aufgelistet /IAE 03/, /IAE 03a/, /IAE 03b/, IAE 08/. Insbesondere der Anhang zu /IAE 08/ enthält eine umfangreiche Liste, die auf einem Report der Swedish Radiation Safety Authority (SKI) /KNO 03/ basiert. In der entsprechenden Tabelle werden die Einwirkungen nach ihrer jeweiligen Quelle in vier Gruppen unterteilt: (1) "Air Based Natural Hazards", (2) "Ground Based Natural Hazards", (3) "Water Based Natural Hazards" und (4) "Off-Site Accidents". Insbesondere die Gruppen "Air Based Natural Hazards" und "Water Based Natural Hazards" beinhalten viele wetter- bzw. witterungsbedingte Einwirkungen.

Auf der Grundlage der genannten nationalen und internationalen Dokumente ergibt sich die in **Tab. 5-1** zusammengestellte Liste wetter- bzw. witterungsbedingter Einwirkungen, die aus sicherheitstechnischer Sicht für Kernkraftwerke relevant sein können. Indirekte biologische Einwirkungen, wie z. B. Algenbewuchs, Muschelbefall und Fischeschwärme, werden hierbei nicht berücksichtigt, da die zugrunde liegenden biologischen Wirkungsketten sehr komplex und somit schwer zu erfassen sind.

Diese Zusammenstellung berücksichtigt noch nicht die regionalen klimatischen Verhältnisse. Einwirkungen, die in Mitteleuropa auch in extremer Form in Zukunft nicht zu erwarten sind bzw. die zu keinen sicherheitstechnisch relevanten Ereignissen führen können, müssen vor der Bewertung der Notwendigkeit einer Einbindung wetter- und witterungsbedingter Einwirkungen in die PSA noch anhand der in Abschnitt 7.2.2.3 beschriebenen Erkenntnisse ausgefiltert werden.

² Frazil Eis ist eine Eisform, die sich aus kleinen Eiskristallen in unterkühltem, gut durchmischtem Wasser bildet. Die besondere Gefahr besteht darin, dass sich die Kristalle (unter dem Strömungsdruck oder dem Druck neu entstehender Kristalle) innerhalb kurzer Zeit zu einer zähen Eismasse zusammenlagern.

Tab. 5-1: Zusammenstellung wetter- bzw. witterungsbedingter Einwirkungen, die in extremer Ausprägung sicherheitsrelevante Auswirkungen auf Kernkraftwerke haben können

Einwirkungsgruppe	Einwirkung	Anmerkung
Wind	Sturm	Orkane oder tropische Wirbelstürme (Hurrikan, Zyklon, Taifun)
	Tornado	
	Sandsturm	mit Ausnahme abrasiver Effekte können die zusätzlichen Einwirkungen separat betrachtet werden
	Schneesturm	
	Salzsturm	
Luftdruck	Hoher Luftdruck	
	Niedriger Luftdruck	
	Schnelle Luftdruckänderung	
Luftfeuchtigkeit	Trockenheit	
	Hohe Luftfeuchtigkeit	
	Nebel	
Lufttemperatur	Hohe Lufttemperatur	
	Niedrige Lufttemperatur	
Wassertemperatur	hohe Wassertemperatur	
	niedrige Wassertemperatur	
Vereisung	Frost	
	Eisbildung an Komponenten	Ausfrieren der Luftfeuchtigkeit
	Vereisung des Vorfluters	oberflächliche Vereisung
	Frazil Eis	
	Eisstau	
Wasserstand	Hochwasser	Sturmflut, hoher Fluss- oder Seewasserstand, Windstau, Wellengang
	Wasserströmungen	verursacht z. B. durch Wind oder oberirdischen Ablauf von Niederschlägen
	Seiche	Eigenschwingung eines Sees, angeregt z. B. durch Wind oder Luftdruckänderungen
	Niedrigwasser	

Einwirkungsgruppe	Einwirkung	Anmerkung
Niederschlag	Starkregen	
	Schneefall	
	Hagel	
	Salzablagerung	nur küstennahe Standorte
Blitzschlag	Blitzschlag	
Anlagenexterner Brand	Wald- / Buschbrand	

Für die in Abschnitt 6 beschriebenen Untersuchungen wurden die Einwirkungen wie folgt zu Kategorien zusammengefasst:

- Sturm (Sturm und Tornado),
- Temperaturen (hohe und niedrige Luft- und Wassertemperaturen einschließlich Vereisung),
- Hochwasser (einschließlich Strömungseffekte),
- Niedrigwasser,
- Niederschlag,
- Blitzschlag und
- Anlagenexterner Brand (Flächen- u. Waldbrände).

6 Auswirkungen extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen auf Kernkraftwerke

6.1 Vorgehen zur Ermittlung der möglichen Auswirkungen

Um zu ermitteln, welche Auswirkungen extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen auf Kernkraftwerke haben können und welche sicherheitstechnische Bedeutung derartigen Ereignissen beizumessen ist, wurde die internationale Betriebserfahrung aus Kernkraftwerken ausgewertet. Dieses Vorgehen basiert auf der Annahme, dass zumindest sicherheitstechnisch relevante Auswirkungen in den entsprechenden Datenbanken zur nationalen und internationalen Betriebserfahrung dokumentiert sind und durch die Berücksichtigung der internationalen Betriebserfahrung Extremereignisse aus allen relevanten klimatischen Regionen erfasst werden.

Tab. 6-1: Zur Auswertung der Betriebserfahrung verwendete Datenbanken

Name	Beschreibung
INES (International Nuclear Event Scale)	Das INES-System /IAE 01/ (http://www-news.iaea.org/news/) wird von der IAEA betrieben und dient dazu, die Öffentlichkeit kurzfristig über Ereignisse in Kernkraftwerken und deren sicherheitstechnische Bedeutung zu informieren.
IRS (Incident Reporting System)	Das IRS (https://irs.iaea.org/) ist eine von der IAEA und der <u>N</u> uclear <u>E</u> nergy <u>A</u> gency (NEA) der <u>O</u> rganisation for <u>E</u> conomic <u>C</u> ooperation and <u>D</u> evelopment (OECD) gemeinschaftlich betriebene Datenbank. Ziel des Systems ist es, durch weltweiten Informationsaustausch zu bedeutsamen Ereignissen die Sicherheit von Kernkraftwerken zu verbessern.
BEVOR/ VERA (Vertiefte Ereignisauswertung / Besondere Vorkommnisse)	BEVOR/VERA ist eine proprietäre Datenbank der GRS zu meldepflichtigen Ereignissen /BMU 01/ in deutschen Kernkraftwerken. Sie dient der systematischen Auswertung der deutschen Betriebserfahrung.

Für die Auswertung der Betriebserfahrung wurden die der GRS zur Verfügung stehenden Informationssysteme und Datenbanken verwendet. Diese sind in **Tab. 6-1** zusammengestellt und kurz beschrieben. Einige Ereignisse wurden in mehreren Datenbanken erfasst. Für die Auswertung wurden in diesen Fällen die Informationen aller Quellen genutzt, in den Tabellen des Abschnitts 6.3 wird jedoch nur die Quelle mit der jeweils ausführlichsten Darstellung als Referenz genannt.

Um die Ereignisse hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Bedeutung einordnen zu können, wird auf der Grundlage der Auswirkungen auf betriebliche und sicherheitstechnisch relevante Systeme eine grobe Kategorisierung vorgeschlagen. Diese dient ausschließlich dazu, einen Eindruck von der Bedeutung des Ereignisses zu vermitteln, und ist nicht auf eine vertiefte sicherheitstechnische Bewertung gestützt (u. a. da speziell bei ausländischen Ereignissen die Datenlage dies oft nicht zulässt).

Eine statistische Auswertung der Informationen, z. B. zur Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten, wurde nicht vorgenommen, da die Datenbasis aufgrund ihres begrenzten Umfangs von insgesamt nur 125 Ereignissen, ihrer Inhomogenität (z. B. unterschiedlicher Detaillierungsgrad der Informationen in den verwendeten Datenbanken) und der Unsicherheiten hinsichtlich der sicherheitstechnischen Bewertung (z. B. unterschiedliche Reaktortypen und unvollständige Informationen über die jeweiligen Auslegungskonzepte) keine statistischen Aussagen zulässt.

6.2 Vereinfachte Kategorien zur sicherheitstechnischen Bewertung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen

Aufgrund der begrenzten Informationen, insbesondere zu vielen Ereignissen im Ausland sowie zur Auslegung ausländischer Reaktoren (teilweise keine Leichtwasserreaktoren), ist eine detaillierte sicherheitstechnische Bewertung der wetter- und witterungsbedingten Ereignisse nicht möglich. Alternativ wird daher eine grobe Einteilung in drei Sicherheitsklassen vorgeschlagen (vgl. **Tab. 6-2**).

Die Klasse A bezeichnet Ereignisse, deren Auswirkungen auf die betroffene Anlage rein betrieblicher Natur waren und die somit keine nennenswerte sicherheitstechnische Bedeutung aufweisen. Diese Ereignisse sind u. a. dadurch gekennzeichnet, dass keine Sicherheitsteilsysteme betroffen waren.

Die Ereignisse der Klasse A weisen typischerweise keine INES-Einstufung auf oder wurden als INES 0 Ereignisse bewertet.

Bei den Ereignissen der Klasse B liegt eine Beeinträchtigung sicherheitsrelevanter Systeme vor. Unter Beeinträchtigung ist hierbei der Ausfall von Sicherheitsteilsystemen (Redundanten) oder eine Fehlanregung des Reaktorschutzes zu verstehen. 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.

Ereignisse, die zu einem vollständigen Ausfall einer Sicherheitsfunktion (Ausfall aller Redundanten) geführt haben oder bei denen Reaktorschutzaktionen angefordert wurden, werden in der Klasse C zusammengefasst. Des Weiteren wurden dieser Klasse alle Ereignisse zugeordnet, die nach INES eine Einstufung größer als Stufe 0 aufweisen, da hier von einer nicht vernachlässigbaren sicherheitstechnischen Bedeutung ausgegangen werden kann.

Tab. 6-2: Vereinfachte Klassifizierung zur Bewertung der sicherheitstechnischen Bedeutung wetter- bzw. witterungsbedingter Ereignisse in Kernkraftwerken (Hinsichtlich der Bewertung einer RESA wird auf den Fließtext verwiesen.)

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 <oder> Fehlanregung des Reaktorschutzes	vollständiger Ausfall einer Sicherheitsfunktion (Ausfall aller Redundanten) <oder> Reaktorschutzaktionen angefordert
<und> INES-Einstufung ≤ 0	<und> INES-Einstufung ≤ 0	<oder> INES-Einstufung > 0

Da die Reaktorschnellabschaltungen (RESA) z. B. auch als Folge einer Turbinenschnellabschaltung (TUSA) oder anderer betrieblicher Transienten ausgelöst werden kann, wurden Ereignisse, bei denen es zu einer RESA kam, nicht automatisch der Klasse C zugeordnet, sondern finden sich in der Regel in Klasse B, sofern kein weiteres Kriterium der Klasse C zutrifft.

Vorhandene INES-Klassifizierungen aus den Datenquellen werden in den Tabellen des Abschnitts 6.3 in Klammern in der Spalte "Kls." (Klasse) mit angegeben.

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die vorgeschlagene Klassifizierung nur zur Systematisierung der Datensammlung im Rahmen dieses Vorhabens dient. Da bei der Auswertung internationaler Ereignisse unterschiedliche Reaktortypen und Auslegungsstandards zu berücksichtigen sind, ist die hier vorgenommene Klassifizierung mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Dementsprechend ist eine Nutzung der Ergebnisse, die über den genannten Zweck hinaus geht, nicht sinnvoll.

6.3 Zusammenstellung der Betriebserfahrung

In der Regel treten extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen in Kombinationen auf. Dies betrifft insbesondere unwetterartige Phänomene wie Niederschläge, Sturm, Blitzschlag und Temperaturstürze. Für die nachfolgende Auswertung der Betriebserfahrung wurden solche kombinierten Ereignisse in der Regel der Einwirkungskategorie zugeordnet, die die Ereignisabläufe in der Anlage maßgebend bestimmt hat. Doppelungen sollen so vermieden werden.

6.3.1 Sturm

Die Kategorie "Sturm" umfasst die Einwirkungen Orkan, Hurrikan, Zyklon, Taifun und Tornado (vgl. **Tab. 5-1**). Dabei sind die Auswirkungen dieser Ereignisse hauptsächlich durch drei Einwirkungspfade gekennzeichnet:

- starke Netzschwankungen mit daraus resultierender Abkopplung vom Fremdnetz, teilweise mit Notstromfall und vereinzelt sogar mit vollständigem Verlust der batterieunabhängigen Stromversorgung ("Station Blackout"),

- Gefährdung durch herabfallende oder herumfliegende Teile sowie
- erhöhter Eintrag von Regenwasser, Salzwasser, Sand oder Staub.

Tab. 6-3: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Sturm"

	Datenbanken	
	VERA / BEVOR	IRS, INES
Kategorie "Sturm"	<ul style="list-style-type: none"> • Wirbelsturm, • Tornado, • Wasserhose, • Taifun, • umherfliegende Teile, • losgerissene Teile 	<ul style="list-style-type: none"> • storm, • high winds, • hurricane, • typhoon, • tornado, • missile, • cyclone, • waterspouts

In Deutschland können auftretende Belastungen durch aufgewirbelte Gegenstände für diejenigen Gebäude, die gegen Flugzeugabsturz oder Explosionsdruckwelle ausgelegt sind, als abgedeckt gelten. Besonders empfindlich gegen herumfliegende Gegenstände sind jedoch die frei auf dem Anlagengelände angeordneten elektrischen Schalteinrichtungen und Transformatoren. Als Folgeereignis kann bei Schäden an diesen Anlagenteilen der Notstromfall eintreten. Dies gilt insbesondere dann, wenn es bei einer Trennung vom Hauptnetz nicht gelingt, die Anlage auf Eigenbedarf abzufangen. Analoge Situationen können bei einem erhöhten Eintrag von Regenwasser, Salzwasser, Sand oder Staub auftreten.

Hieraus ergibt sich, dass Ereignissen der Kategorie "Sturm", oft eine sicherheitstechnische Bedeutung (Klasse B oder C) zugesprochen werden kann. Dies wird auch durch die Betriebserfahrung bestätigt: Von den in **Tab. 6-4** dokumentierten 22 Ereignissen zwischen 1980 und 2007 fallen (bei konservativer Bewertung) zwei Ereignisse in die Klasse B (IRS-7377, IRS-602) und 15 Ereignisse in die Klasse C (IRS-7163, VERA-1995/012, IRS-6339, INES-279ff., IRS-6106, IRS-6060, IRS-417, IRS-315, VERA-1984/002, VERA-1983/001, VERA-1982/100, IRS-16).

Tab. 6-4: Ereignisse der Kategorie "Sturm"

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
VERA-2007/006	18.01.2007	Emsland, Deutschland	A	Orkan Kyrill, RESA infolge eines Erdschlusses in der 380-kV-Ableitung
VERA-2002/014	23.02.2002	Brokdorf, Deutschland	A	Gewitter, Sturm, Hagel, Schnee; Abschalten von Gleichrichtern durch Netzstörungen; Seiltanzen der Freileitungen im 400-kV-Netz
IRS-7377	30.11.1999	Leningrad, Block 3+4, Russische Föderation	B/C	Sturm, Kurzschluss durch herabfallende Teile eines Blitzableiters, Verlust der Eigenbedarfsversorgung in zwei Blöcken
INES-660	29.09.1999	H.B. Robinson, Block 2, USA	A (0)	Ein Tornado wird auf dem Anlagengelände gesichtet
IRS-7163	18.08.1997	Qinshan, Block 1, China	B/C	Reaktorschnellabschaltung aufgrund von Einwirkungen eines Taifuns
VERA-1995/012	23.01.1995	Rheinsberg, Deutschland	C	Orkanartiger Sturm, Startversagen eines Notstromdiesels bei Ausfall der 110-kV-Netzversorgung
IRS-6339	02.11.1993	Kola, Block 1-4, Russische Föderation	C	Vollständiger Verlust der batterieunabhängigen Stromversorgung während eines Tornados
INES-279, INES-318, INES-322, INES-323	02.02.1993	Kola, Block1-4, Russische Föderation	C	Ein Tornado verursacht Netzschwankungen, alle Blöcke werden abgeschaltet, vier Ereignisse.
IRS-1241	12.10.1991	Wylfa, Block 1, UK	A	Sturm, Schnee; Störungen im Fremdnetz, RESA nach umschalten auf Eigenbedarf für beide Blöcke.

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-6106	17.07.1987	Kori, Block 4, Republik Korea	B/C	Reaktorschnellabschaltung während eines Taifuns mit nennenswertem Eintrag von Meeresgisch in die Anlage
IRS-6060	28.08.1986	Kori, Block 4, Republik Korea	C	Vollständiger Verlust der batterieunabhängigen Stromversorgung während eines Taifuns
IRS-643	13.01.1986	Point Lepreau, Kanada	A	Stürmische Winde landeinwärts, starke Gisch, großer Meersalzeintrag in die Schaltanlage, Verlust der betrieblichen Hauptspannungsversorgung
IRS-315	25.06.1985	Hinkley Point, Block A1, USA	B/C	Orkanartiger Schneesturm, hohe Wellenbrecher und Gisch; Störungen im Fremdnetz, Eintrag von Salzwasser in das Pumpengebäude, Ausfall des Hauptkühlwassers, RESA
IRS-602	31.05.1985	Bruce, Block 1, Kanada	A/B	Auswirkungen eines Tornados auf die Anlage und das Hauptnetz
IRS-417	06.09.1984	Fort St. Vrain, USA	C	Schneefall und Sturm; Ausfall der Notstromversorgung.
VERA-1984/002	13.01.1984	Stade, Deutschland	C	Starke Sturmböen, Erdschlüsse auf Freileitungen mit Trennung der Anlage vom Netz
VERA-1983/001	18.01.1983	Brunsbüttel, Deutschland	C	Starke Sturmböen, Ausfall der 380-kV-Eigenbedarfsversorgung durch Erdschluss eines Stromwandlers
VERA-1982/100	15.08.1982	Isar, Block 1, Deutschland	C	Starke Sturmböen, Ausfall der 110-kV-Eigenbedarfsversorgung durch herumfliegenden Ast

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-16	07.04.1980	Arkansas Nuclear One, Block 1 und 2, USA	B	Reaktorschnellabschaltung beider Blöcke aufgrund von Einwirkungen eines Tornados

6.3.2 Temperaturen

In die Kategorie "Temperaturen" wurden die Ereignisse:

- hohe Lufttemperatur,
- niedrige Lufttemperatur,
- hohe Wassertemperatur,
- niedrige Wassertemperatur,
- Frost,
- Eisbildung an Komponenten,
- Vereisung des Vorfluters,
- Frazil Eis,
- Eisstau,
- hohe Luftfeuchtigkeit und
- Nebel

eingeorndet (vgl. **Tab. 5-1**). Grundsätzlich sind hierbei Sommer- und Winterereignisse zu unterscheiden. Die Haupteinwirkungspfade sind in beiden Fällen durch Transienten der Kühlwasser- und Umgebungstemperaturen gegeben. Wird z. B. bei längeren hochsommerlichen Perioden eine bestimmte Aufwärmspanne zwischen Einlauf- und Abgabtemperatur des Flusskühlwassers oder eine vorgegebene Abgabtemperatur überschritten, so sind aus wasserrechtlichen Gründen oder aufgrund einer Überschreitung der für die Sicherheitsnachweise verwendeten Nebenkühlwassertemperatur Gegenmaßnahmen, wie z. B. eine Leistungsreduzierung oder sogar die Abschaltung der Anlage, erforderlich. Weiterhin stellen sommerliche Außentemperaturen erhöhte Anforderungen an die Auslegungsreserven verschiedenster Systeme wie z. B. der

Kühlturmzellen, der Raumkühler und der Lüftungssysteme. Dabei kann es zu Nichtverfügbarkeiten sicherheitstechnisch relevanter Systeme, wie der batterieunabhängigen Energieversorgung kommen. Insgesamt wird die Wahrscheinlichkeit von Reaktorschnellabschaltungen erhöht. Weiterhin werden Ausfälle aus gemeinsamer Ursache (GVA) wahrscheinlicher.

Ein weiterer Einwirkungspfad besteht in der Möglichkeit eines ungewollten Aufbaus eines Überdrucks in Durchdringungsleitungen von innen nach außen bei plötzlichen und dauerhaften Lufttemperaturänderungen. Dies kann im Einzelfall zur Nichtverfügbarkeit der automatischen Öffnung der zugehörigen Absperrventile führen.

In Winterperioden ist die internationale Betriebserfahrung durch ein vermehrtes Auftreten von Vereisungen und Blockierungen der Einläufe des Haupt- und Nebenkühlwassers, durch Beeinträchtigungen der Mess- und Regeltechnik (Eisbildung in oder an Belüftungs-, Steuer-, Überwachungs- oder Messleitungen) sowie den Verlust der Netzanbindung geprägt. Dies kann sicherheitstechnisch relevante Ereignisse wie z. B. den Verlust des Haupt- und Nebenkühlwassers, fehlerhafte Anregungen von Reaktorschutzsignalen und Kurzschlüsse zur Folge haben.

Die internationale Betriebserfahrung dokumentiert insgesamt 47 Ereignisse (einige IRS-Meldungen enthalten mehrere Ereignisse) in den Jahren 1982 bis 2006 (vgl. **Tab. 6-6**). Davon fallen sieben Ereignisse in die Klasse B (IRS-7696, IRS-7547, IRS-7180, IRS-7180, IRS-7180, IRS-913, IRS-180) und 26 in die Klasse C (IRS-7864, IRS-7777, IRS-6302, IRS-898, IRS-6090).

Tab. 6-5: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Temperaturen"

	Datenbanken	
	VERA / BEVOR	IRS, INES
Kategorie "Temperaturen"	<ul style="list-style-type: none"> • extrem hohe und niedrige Lufttemperatur, • extrem hohe und niedrige Luftfeuchtigkeit, • verstärkter Eisgang, • Einfrieren von Kühlmittleitungen, • erhöhte Kondensation, • hohe und niedrige Kühlwasser- und Flusswassertemperaturen 	<ul style="list-style-type: none"> • extreme air / ambient temperature, • extreme air / ambient humidity, • refreezing cooling line, • moisture condensation, • high fluvial / river water temperature

Tab. 6-6: Ereignisse der Kategorie "Temperaturen"

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-7864	25.01.2006	Smolensk, Block 1, Russische Föderation	C	Eisbildung an der Innenseite eines Belüftungsrohres eines Kühlmittelbehälters im Kühlkreislauf der HKMP führte zu einer falschen Füllstandanzeige und zur Anregung eines Reaktorschutzsignals.
IRS-7824	30.12.2005	Paluel, Block 1, Frankreich	A	Verlust des 400-kV-Hauptnetzanschlusses aller vier Blöcke aufgrund starken Eisregens, niedriger Außentemperaturen und starker Winde

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-7696	28.01.2005	Volgodonsk, Block 1, Russische Föderation	A/B	Schlagartiger Abfall der Durchflussmenge des Kühlwassers für den Hauptkondensator aufgrund von Eisbildung im Kühlwasserzulauf sowie Blockierung der Pumpstation
IRS-7777	01.01.2005	NRC Information Notice 2006-06, USA	C	In den Sommern von 1997 und 2005 hat die Wahrscheinlichkeit von RESAs, Notstromfällen und Netzausfällen sowie Totalausfällen der batterieunabhängigen Energieversorgung nach Beobachtungen der NRC nachweislich zugenommen (NUREG/CR-6890), insgesamt 22 Ereignisse
IRS-7547	27.01.2003	Pickering, Block 5, Kanada	B	Niedrige Außentemperaturen, Einfrieren von Steuerleitungen des Notbelüftungssystems im Maschinenhaus
IRS-7180	21.01.1998	NRC Information Notice 98-02, USA	A	Vier nennenswerte Ereignisse in den Monaten Januar und Februar 1996 aufgrund eines außergewöhnlich strengen Winters
IRS-7180	08.02.1996	McGuire , Block 2, USA	B	Eingefrorene Impulsleitungen von verschiedenen Messgebern der Füllstandsmessung von zwei der drei Flutbehälter
IRS-7180	04.02.1996	LaSalle, Block 2, USA	A	Kriechströme in Steuerungsleitungen für die Überwachung der Öltemperatur des Haupttransformators führen zu einem unbeabsichtigten automatischen Abschalten der zugehörigen Ölkühlung.
IRS-7180	30.01.1996	Wolf Creek, USA	B	Vereisung der Einlaufgitter und Siebbänder des Kühlwassers für das Nebenkühlwassersystem

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-7180	08.01.1996	Millstone, Block 2, USA	B	Bildung eines Eis-Pfropfens in einer Entleerungsleitung des Spülwassers für die Siebe im Einlaufbereich des Nebenkühlwassers
VERA-1996/004	02.01.1996	Rheinsberg, Deutschland	A	Starker Dauerfrost, Ausfall von Grobrechen
IRS-6302	23.02.1991	Wolsong, Block 1, Korea	C	RESA bei extrem tiefen Außentemperaturen aufgrund des Einfrierens einer Messleitung des Kesselwasserfüllstandes (Anregung eines falschen Signals)
IRS-898	02.01.1988	Bruce, Block 6, Kanada	C	Verlust des Kühlwassers aufgrund von leichter Eisbildung in den Ansaugrohren
IRS-6090	25.01.1987	Novovoronezh, Block 5, Russische Föderation	C	Sehr niedrige Außentemperaturen, stark drückender Wind auf das Reaktorgebäude, Einfrieren von Messleitungen der Druckmessung im Dampferzeuger, RESA nach Fehlanregung der Drucküberwachung
IRS-958	12.01.1987	St. Laurent, Block A1, Frankreich	A	Eisgang auf der Loire verursacht aufgrund einer teilweisen Blockierung des Einlaufs des Hauptkühlwassers Reaktorschnellabschaltung
IRS-913	12.01.1987	Chinon, Block B-3, Frankreich	B	Mehrere Fehler aus gemeinsamer Ursache aufgrund niedriger Außentemperaturen führen zu einer Reaktorschnellabschaltung
IRS-6088	08.01.1987	Balakovo, Block 1, Russische Föderation	A	Verlust der Spannung für einen Lastverteiler aufgrund hoher Luftfeuchtigkeit in einem Anlagenraum und niedriger Außentemperaturen

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-7057	01.01.1987 bis 1995	vier Anlagen der Russischen Föderation	A	wiederholtes Einfrieren von verschiedenen Steuerleitungen im Turbinengebäude während der kalten Jahreszeit, insgesamt vier Ereignisse
IRS-519	08.07.1985	Pickering, Block 5, Kanada	A	Verlust des Hauptkühlwassers aufgrund von Eisbildung im Einlaufkanal
IRS-180	18.01.1982	Surry, Block 2, USA	A/B	Durch Eisbildung im Einlauf des Hauptkühlwassers entsteht Stauwasser an der Fischschleuse. Dieses läuft über, Salzwasser verursacht zusammen mit der Gischt einen Kurzschluss in der Anlage.

6.3.3 Hochwasser

Hochwasser-Ereignisse können verschiedene Ursachen haben. Dazu gehören u. a. hohe Wasserstände an Flüssen, Seen und Küsten, Dammbüche oder Erdbeben, Lawinen und andere natürliche Blockierungen von Wasserströmen, wie z. B. durch Eis, Treibgut, Geröll und Vulkanismus.

Grundsätzlich muss bei den Auswirkungen eines Hochwasserereignisses zwischen einer Überflutung des Kraftwerksgeländes und einem Wassereintrich in Gebäude unterschieden werden. Für den Fall einer Überflutung des Anlagengeländes muss mit einem Ausfall der Fremdnetzversorgung gerechnet werden. Kann die Energieversorgung durch die Notstromversorgung, z. B. aufgrund des Ausfalls der Dieselölversorgung, nicht sichergestellt werden, so ist die Verfügbarkeit der Nachwärmeabfuhr gefährdet.

Eine Überflutung bestimmter Raumbereiche, in denen sich auch sicherheitstechnisch relevante Hilfssysteme befinden können, ist abhängig von der konkreten Situation (Standortgegebenheiten, Hochwasserschutzkonzept) auch vor Erreichen des Auslegungswasserstandes denkbar.

Tab. 6-7: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Hochwasser"

	Datenbanken	
	VERA / BEVOR	IRS, INES
Kategorie "Hochwasser"	<ul style="list-style-type: none"> • Hochwasser, Flut, • hoher Wasserstand, hoher Gezeitenstand, • Starkregen, • Sturmfluten, Dammbuch, • aufgestautes Wasser, • Erdbeben, Lawinen, und andere natürliche Blockierung von Wasserströmen durch Eis, Treibgut, Geröll und Vulkanismus 	<ul style="list-style-type: none"> • flood, flooding, • high water level, • high tide, high watermark, • torrential rain, • storm tide, • obstructions created by jams (debris, log, ice), • avalanches, landslides

Hinsichtlich eines Wassereintruchs in Gebäude stellen das Maschinenhaus und das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk besonders sensitive Bereiche dar, da sie in der Regel weniger gut geschützt sind als z. B. das Reaktorgebäude. Während ein Wassereintruch in das Nebenkühlwasserpumpenbauwerk unter ungünstigen Umständen zu einem Ausfall des Not- und Nachkühlsystems führen kann, hängt die sicherheitstechnische Bedeutung eines Wassereintruchs ins Maschinenhaus, u. a. aufgrund der Möglichkeit einer Aktivitätsfreisetzung, erheblich von dem jeweils betroffenen Reaktortyp ab.

Für die Jahre 1981 bis 2006 wurden insgesamt 14 Ereignisse identifiziert (vgl. **Tab. 6-8**). In diesem Zeitraum sind fünf Ereignisse mit geringer sicherheitstechnischer Bedeutung der Kategorie B (VERA-2006/111, VERA-1990/200, VERA-1986/326, VERA-1986/321, IRS-286) und zwei Ereignisse mit sicherheitstechnischer Bedeutung der Kategorie C (IRS-7687 IRS-7342 IRS-50) aufgetreten. Die beobachteten Verschmutzungen und Verunreinigungen der Betriebswässer haben keine sicherheitstechnische Bedeutung. Weiterhin ist in der Kategorie A in einem Fall ein außergewöhnlich hoher Meereswasserpegel knapp unterhalb des Auslegungsmeereswasserspiegels zu verzeichnen (IRS-7751).

Tab. 6-8: Ereignisse der Kategorie "Hochwasser"

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
VERA-2006/111	01.11.2006	Unterweser, Deutschland	B	Sturmflut mit erhöhtem Flusswasserstand (4,5 m ü. NN), Wassereintruch über Kabeldurchführung, Ausfall einer Nebenkühlwasserpumpe
INES-815	18.07.2006	Virgil C. Summer, Block 1, USA	A (0)	Gefahr einer Überflutung aufgrund eines Fehlers in der Auslegung der Betriebswasserpumpen (GVA)
IRS-7838	12.12.2005	Chinon B-1, Block 1-4, Frankreich	A	Verschlammung aller vier Kühlwassereinläufe

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-7751	09.01.2005	Loviisa, Block 1, Finnland	A	Es ist ein außergewöhnlich hoher Meerwasserpegel knapp unterhalb des Ausleugungsmeerwasserspiegels aufgetreten.
IRS-7687	26.12.2004	Madras, Block 2, Indien	C	Seebeben (Tsunami), Eintrag von Seewasser in das Pumpengebäude, sicheres Abfahren der Anlage ³
IRS-7342	28.12.1999	Le Blayais, Block 1, Frankreich	C (2)	Teilweiser Verlust von Sicherheitssystemen aufgrund einer Überflutung weiter Teile der Anlage während eines Wintersturms
INES-397	16.06.1994	Kakrapar, Block 1, Indien	A (0)	Überflutung des gesamten Untergeschosses des Maschinenhauses nach Starkregen
VERA-1990/200	20.11.1990	Grohnde, Deutschland	B	Hochwasser des Flusses, hoher Laubeintrag, Öffnen der Überstauklappe an einer Siebbandmaschine, Eintrag von Schmutzwasser in einen Strang des nuklearen Nebenkühlwassersystems
VERA-1986/326	21.11.1986	Mülheim-Kärlich, Deutschland	B	Hochwasser des Flusses, hoher Schwebstoffgehalt, Ausfall der Schmierwasserversorgung für nukleare Nebenkühlwasserpumpe
VERA-1986/321	04.11.1986	Mülheim-Kärlich, Deutschland	B	Hochwasser des Flusses, hoher Schwebstoffgehalt, Ausfall der Schmierwasserversorgung für nukleare Nebenkühlwasserpumpe

³ Da es sich bei Tsunamis um durch geologische Prozesse (Hangrutschungen oder Erdbeben) ausgelöste Flutwellen handelt, ist das Ereignis IRS-7687 eigentlich nicht als wetter- oder witterungsbedingt zu bezeichnen. Da jedoch hinsichtlich der konkreten Einwirkung auf das Kraftwerk (Flutwelle) grundsätzlich eine Übertragbarkeit besteht, wurde es mit in die Auswertung einbezogen.

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
VERA-1986/235	22.10.1986	Grohnde, Deutschland	A	Aufgedrückte Überstauklappe der Kühlwasser-Feinreinigungsanlage aufgrund unwetterartiger Regenfälle in den vorangegangenen Tagen
IRS-286	04.12.1982	Arkansas Nuclear One, Block 1+2, USA	A	Überschwemmung im Maschinenhaus und weiteren Hilfsgebäuden nach 24-stündigem Starkregen
IRS-286	03.12.1982	Dresden, Block 3, USA	B	Überflutung des Anlagen-geländes durch den Fluss Illinois River nach 24-stündigem Starkregen
IRS-50	14.11.1981	Garigliano, Italien	C	Überschwemmung einiger Untergeschosse durch dreitägigen Starkregen auf dem Anlagengelände, in denen die radioaktiven Abfälle der Anlage gelagert wurden

6.3.4 Niedrigwasser

Zu der Kategorie "Niedrigwasser" gehören Ereignisse wie geringe Flusswasserstände oder sehr niedrige Tiden. Sie treten entweder bei langen Trockenperioden oder bei stark ablandigen Winden an Küstenstandorten auf. In der Regel sind derartige Witterungsbedingungen über einen relativ langen Zeitraum vorhersehbar. Daraus lässt sich ableiten, dass solche Ereignisse im Allgemeinen keine nennenswerte sicherheitstechnische Bedeutung für Kernkraftwerke haben, da frühzeitige Gegenmaßnahmen, wie z. B. das Abfahren der Anlage und die Sicherstellung des Kühlwasserbedarfs, eingeleitet werden können. Dementsprechend enthält **Tab. 6-10** nur je ein Ereignis der Klasse A und der Klasse B.

Tab. 6-9: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Niedrigwasser"

	Datenbanken	
	VERA / BEVOR	IRS, INES
Kategorie "Niedrigwasser"	<ul style="list-style-type: none"> • Niedrigwasser, • niedriger Wasserstand, • hohe Kühlwasser- und Flusswassertemperaturen, • Trocken- / Hitzeperiode 	<ul style="list-style-type: none"> • low tide, • low watermark, • low water level, • high fluvial / river water temperature • heat wave, dry spell

Tab. 6-10: Ereignisse der Kategorie "Niedrigwasser"

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
VERA-1993/011	28.01.1993	Unterweser, Deutschland	A	Niedrigwasser nach Hochwasser und Sturm, erhöhter Schmutzanfall (Schilf, Schlick) führt zu gestörten Hauptkühlwasserzulaufbedingungen
IRS-364	22.01.1984	Borselle, Niederlande	B	Sehr niedrige Tide, starke ablandige Winde, Fischschwärme im Kühlwassereinfluss, Verlust der Wärmesenke der Reservenotkühlung

6.3.5 Niederschlag

Die Kategorie "Niederschlag" umfasst alle in der Anlage aufgetretenen Ereignisse, die durch die Wetterereignisse Starkregen, Schneefall oder Hagel ausgelöst wurden. Ereignisse, die mit starken Niederschlägen verbunden waren, deren Auswirkungen jedoch maßgeblich durch Blitzschlag oder Windeinwirkung bestimmt waren, wurden in den entsprechenden Kategorien erfasst.

Tab. 6-11 listet die verwendeten Ausdrücke und Stichworte für die Suche in den Datenbanken auf.

Tab. 6-11: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Niederschlag"

	Datenbanken	
	VERA / BEVOR	IRS, INES
Kategorie "Niederschlag"	<ul style="list-style-type: none"> • Schneefälle, Graupel, Hagel, • Regenfälle, Starkregen, • Schnee- und Eislasten, • Schneesturm 	<ul style="list-style-type: none"> • snowfall, snow, hail, sleet, soft hail, • ice, ice run, heavy rain, • blizzard, extreme snow or ice pack

In den Jahren 1984 bis 2005 wurden insgesamt 5 Ereignisse erfasst. In **Tab. 6-11** sind diese Ereignisse zusammengestellt. Der Betrieb der betroffenen Anlagen wurde vor allem durch Ausfall des Fremdnetzes und durch Kurzschlüsse in der Anlage aufgrund eindringender Feuchtigkeit beeinträchtigt. Dabei weist ein Ereignis geringe sicherheitstechnische Bedeutung auf (IRS-600) und zwei Ereignisse weisen eine eindeutige sicherheitstechnische Bedeutung (IRS-188, IRS-818) auf.

Tab. 6-12: Ereignisse der Kategorie "Niederschlag"

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-7824	30.12.2005	Paluel, Frankreich	A	gefrierender Regen, Verlust von vier Übertragungsleitungen
IRS-7810	27.08.2004	Leningrad, Block 4, Russische Föderation	A	Starkregen, Sturm; Dachundichtigkeit am Maschinenhaus, Kurzschluss im 20-kV-Generator, Reaktor im unterkritischen Zustand
IRS-1188	05.06.1990	Hinkley Point, Block B1, USA	C	Sturm, Regen; Ausfall einer 400-kV-Sammelschne, RESA
IRS-818	30.12.1987	Pilgrim, Block 1, USA	C	orkanartiger Sturm, nasser Schnee; Ausfall der Fremdnetzeinspeisung
IRS-600	28.01.1986	Fukushima-Daiichi, Block 1, Japan	B	Starkregen, orkanartiger Sturm; Kurzschluss bei Revision, Feuer im oberen Teil eines 6,9-kV-

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
				Schaltzschanks

6.3.6 Blitzschlag

Die Literatur (z. B. /NRC 06/) und unsere Auswertung der Betriebserfahrung belegen, dass es bei Kernkraftwerken immer wieder zu Blitzeinschlägen mit Folgeereignissen kommt. Typische Beispiele hierfür sind Fehlanregungen von (Reaktorschutz-) Signalen und Blitzschläge in Freileitungen, die durch Überspannungstransienten zur Abkopplung der Anlage vom Netz und in der Folge zu Turbinen- und Reaktorschnellabschaltungen führten.

Ein Haupteinwirkungspfad von Blitzschlägen in Kernkraftwerken sind Potentialanhebungen im Kabelnetz, die sich bei fehlenden Gegenmaßnahmen in die Systeme fortpflanzen können. Besonders empfindlich gegen induzierte Spannungstransienten sind z.B. sensitive Messsysteme, die gerade in sicherheitstechnisch bedeutsamen Anlagenteilen, wie dem Reaktorschutzsystem, in großer Zahl vorkommen, und der Aggregateschutz. Beachtenswert ist insbesondere auch die mögliche Beeinträchtigung mehrerer Redundanzen durch Eintrag von Fremd- bzw. Überspannung infolge Blitzschlags, die GVA-Ereignisse nach sich ziehen kann. Zur Verhinderung solcher Ausfälle sind in deutschen Kernkraftwerken Schutzeinrichtungen vorgesehen, die die Überspannung auf zulässige Werte begrenzen (Einbau von Spannungsbegrenzern) und/oder die elektrische Versorgung der Sicherheitssysteme bzw. die Sicherheitsleittechnik kurzzeitig von Überspannung führenden Anlagenteilen abtrennen. Weitere Maßnahmen sind die unterirdische Verlegung von Kabeln im Freien, Schirmung und Erdung von Kabeln, hochspannungsfeste Isolierung, räumliche Trennung, Vermeidung von Näherungen, Errichtung einer Blitzschutz- und Erdungsanlage bzw. Potentialausgleichssystems.

Tab. 6-13: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie "Blitzschlag"

	Datenbanken	
	VERA / BEVOR	IRS, INES
Kategorie "Blitzschlag"	<ul style="list-style-type: none"> • Blitzschlag, • Blitz 	<ul style="list-style-type: none"> • lightning strike, • flash of lightning

Insgesamt wurden zwischen 1967 und 2005 28 Ereignisse verzeichnet (vgl. **Tab. 6-14**). Von diesen Ereignissen fallen drei in die Kategorie B (IRS-7400, IRS-7312, IRS-1310) und neun Ereignisse in die Kategorie C (IRS-7314, IRS-7131, INES-334, VERA-1986/086, IRS-357, VERA-1983/059, VERA-1982/063, IRS-101, VERA-1967/002).

Tab. 6-14: Ereignisse der Kategorie "Blitzschlag"

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-7843	07.06.2005 30.06.2005	Summers, Vogtle, USA	A	Fehlanregung einzelner Sirenen des Frühwarnsystems, Verlust der Sirenensteuerung, insgesamt zwei Ereignisse
IRS-7652	15.09.2003	Peach-Bottom, Block 2, USA	A	Netzausfall zweier Blöcke aufgrund eines 50 km entfernten Blitzschlags
VERA-2001/055	03.08.2001	Lingen, Deutschland	A	Teilweiser Ausfall der Brandmeldeanlage infolge Überspannung
IRS-7400	18.08.2000	Rovno, Block 3, Ukraine	A/B	Blitzschlag in einen 24-kV-Leiter, Abkopplung vom Netz, RESA aufgrund eines Blitzschlags
IRS-7314	24.11.1998	Fukushima-Daiichi, Block 3, Japan	C	Zufällige und fehlerhafte Anregung eines Reaktorschutzsignals, RESA
VERA-1998/050	07.06.1998	Neckar, Block 1, Deutschland	A	Ausfall der 220-kV-Blockeinspeisung
IRS-7131	12.06.1997	Point Lepreau, Kanada	C	Zwei Blitzeinschläge in zwei verschiedene Hochspannungsleitungen der Netzeinspeisung, RESA

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-7312	07.11.1996	Kashiwazaki, Japan	B	Ansprechen von Schutzrelais der Netzeinspeiseleitungen, RESA
INES-334	09.08.1993	Yonggwang, Block 2, Republik Korea	B/C (0)	Überspannungsschutz, Verlust der Netzeinspeisung, RESA
IRS-1310	20.02.1992	Shimane, Block 1, Japan	B	Auswirkungen eines Blitz- schlags auf die Messung der Leistungsverteilungsdichte
VERA- 1986/086	04.05.1986	Biblis, Block B, Deutschland	C	Auslösung der 220 kV- Reservenetzeinspeisung und Notstromfall
IRS-595	13.07.1985	Byron, Block 1, USA	A	Blitzschlag in die Anlage
IRS-498	30.05.1985	Brunswick-1, USA	A	Blitzschlag in die Anlage
IRS-303	22.02.1985	Tokai, Block 2, Japan	A	Blitzschlag in die Anlage
IRS-482	08.04.1984	Krümmel, Deutschland	A	Blitzschlag in die Anlage
IRS-357	24.01.1984	Genkai, Block 1, Japan	C	Transiente "Neutronenfluss zu hoch" und Leck an zwei Ventilsitzen der Druckhalter
VERA- 1983/059	29.05.1983	Isar, Block 1, Deutschland	C	Auslösung einer RESA und weiterer Reaktorschutzmaß- nahmen
IRS-482	29.05.1983	Isar, Block 1, Deutschland	A	Blitzschlag in die Anlage
IRS-595	02.12.1982	Zion, Block 2, USA	A	Blitzschlag in die Anlage
IRS-278	26.09.1982	Chapellcross, Block 1, UK	A	Blitzschlag in die Anlage
VERA- 1982/063	06.06.1982	Neckarwest- heim, Block 1, Deutschland	C	Ausfall der Turbinen- Generator-Steuerung und weiterer elektronischer und elektrischer Systeme, kurz- fristiger Notstromfall
IRS-101	07.05.1982	Blayais, Block 1,	C	Blitzschlag in die Hilfsener-

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
		Frankreich		gieversorgung beim Anfahren der Anlage, Verlust der Fremdnetzversorgung, kein Notstrom verfügbar, Verlust der Nachwärmeabfuhr für ca. 15 Min.
VERA-1980/130	19.08.1980	Kahl, Deutschland	A	Auslösung des 20-kV-Schalters durch Überstrom
IRS-481	25.06.1980	Trawsfynydd, Block 1, UK	A (0)	Verlust des Fremdnetzes bei Unwetter (Blitz und Sturm)
IRS-595	08.06.1980	Salem, Block 1, USA	A	Blitzschlag in die Anlage
VERA-1977/062	07.08.1977	Stade, Deutschland	A	Ausfall des 220-kV-Netzes bei Vollast des Reaktors
VERA-1967/002	23.02.1967	Gundremmingen, Block-A, Deutschland	B/C	Blitzeinschlag im Netz, starker Spannungseinbruch, im weiteren Ereignisablauf Bruch einer Dampfleitung

6.3.7 Anlagenexterner Brand

Flächen- u. Waldbrände können naturbedingte oder menschliche Ursachen haben. Aus der Sicht der Anlage sind diese Ursachen nur schwer zu unterscheiden. Der Brandschutz auf dem Außengelände der Anlage zählt oft zu den erweiterten Aufgaben der Anlagensicherung und soll Brandstiftung ausschließen. In dieser Kategorie sind nur Brandereignisse erfasst, die auf Wetterereignisse und/oder extreme Witterungsbedingungen, wie z. B. lang andauernde Trockenperioden oder Blitzschlag, zurückzuführen sind.

Tab. 6-15: Verwendete Suchbegriffe zur Kategorie “Anlagenexterner Brand”

	Datenbanken	
	VERA / BEVOR	IRS, INES
Kategorie “Anlagenexterner Brand”	<ul style="list-style-type: none"> • Flächen- / Waldbrand, • extreme Trockenperiode • Blitzschlag 	<ul style="list-style-type: none"> • conflagration, external fire • large scale fire, forest / bush fire, • extreme dry spell

Ebenso wie bei Ereignissen mit Niedrigwasser steht dem Betreiber beim Auftreten eines Flächen- oder Waldbrandes in der Regel ein genügend großer zeitlicher Spielraum zur Verfügung, um den Reaktor in einen sicheren Zustand zu überführen oder abzufahren. Die mögliche Beeinträchtigung der Anlage bei einem solchen Ereignis ist vergleichbar mit den Auswirkungen eines anlageninternen Brandes auf dem Außengelände. Sie besteht, abgesehen vom Eintrag von Rauchgasen, in einem eventuellen Verlust der Fremdnetzversorgung. Dies kann zu einem Notstromfall führen. Dokumentiert sind derartige Ereignisse in den ausgewerteten Datenbanken nur für die Anlage Cofrentes in Spanien (siehe **Tab. 6-16**).

Dort traten Mitte der 90-er Jahre im Zusammenhang mit anlagenexternen Bränden sieben Ereignisse auf (IRS-1486). Die sicherheitstechnische Bedeutung dieser Ereignisse ist als gering einzustufen.

Tab. 6-16: Ereignisse der Kategorie “Anlagenexterner Brand”

Ereignis	Datum	Anlage, Land	Kls.	Kurzbeschreibung
IRS-1486	04.07.1994	Cofrentes, Spanien	B	Vorsorgliche Abkopplung der Hauptspannungsversorgung aufgrund von Waldbränden in der Region, sieben Ereignisse innerhalb von zwei Jahren

6.4 Auswertung der Betriebserfahrung

Aus den in Abschnitt 6.3 zusammengestellten Informationen zur internationalen Betriebserfahrung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

1. Für den Zeitraum von 1967 bis 2007 sind 125 wetter- bzw. witterungsbedingte Ereignisse in den ausgewerteten Datenbanken (vgl. **Tab. 6-1**) dokumentiert. Sieht man davon ab, dass zwischen 1967 und 1979 nur zwei Ereignisse den Suchkriterien entsprachen, was vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass das IRS erst 1978 eingeführt wurde und es noch einige Zeit dauerte, bis es voll etabliert war, ist keine nennenswerte Zunahme wetter- oder witterungsbedingter Ereignisse über die letzten ca. 30 Jahre zu erkennen (vgl. **Abb. 6-1**). Dieser Eindruck wird weiter verstärkt, wenn man berücksichtigt, dass die Anzahl der in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke in dieser Zeit zugenommen hat.

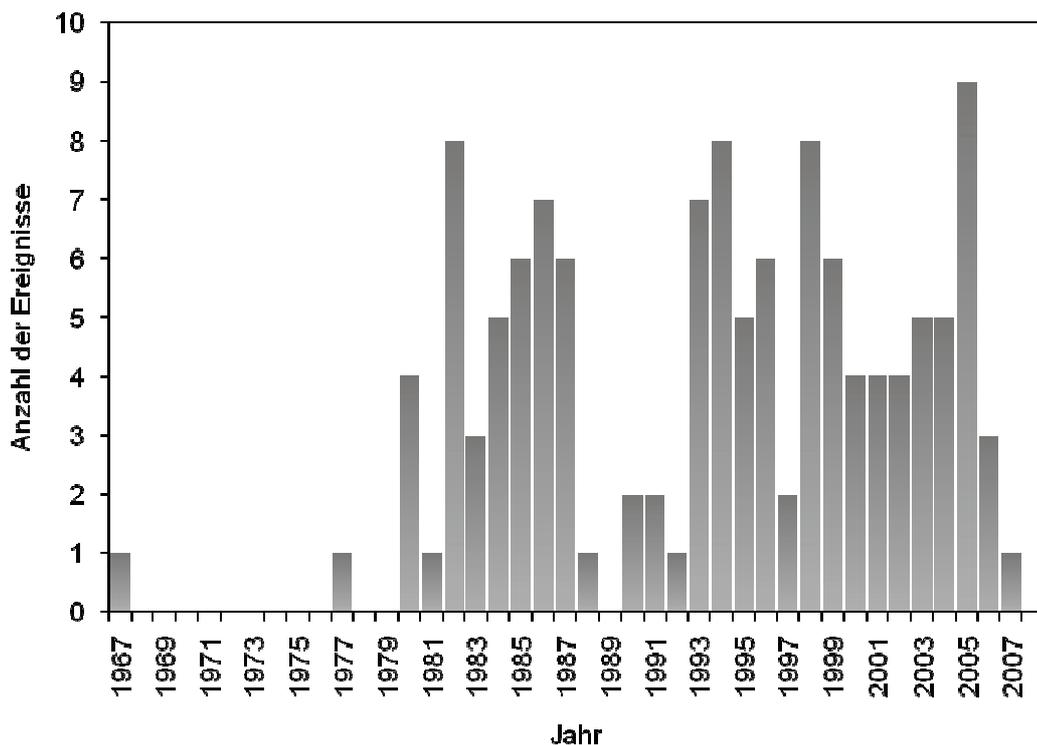


Abb. 6-1: Anzahl der dokumentierten Ereignisse pro Jahr (Anmerkung: Das IRS wurde erst 1978 eingeführt, so dass der Zeitraum bis ca. 1980 nicht als repräsentativ angesehen werden kann.)

2. 55 % aller Ereignisse stehen im Zusammenhang mit Unwettern. Hierbei entfallen auf die eindeutig lokalen Unwettereinwirkungen, Blitzschlag, Sturm und Niederschlag, 44 % und auf die Komponente Hochwasser, die sowohl lokalen als auch entfernteren Ursprungs sein kann, 11 % (vgl. **Abb. 6-2**). Der dominante Einwirkungspfad für lokale Unwetterereignisse ist die Beeinträchtigung der Elektro- und Leittechnik. Für Hochwasser kommt noch die Möglichkeit eines Ausfalls der Nebenkühlwasserversorgung hinzu.

Für die gesamte Gruppe der Unwettereinwirkungen hängt die Entwicklung des Gefährdungspotentials entscheidend von einer eventuellen zukünftigen Zunahme starker Unwetterereignisse ab (vgl. Abschnitt 7.2.3).

3. Die zweite große Einwirkungsgruppe stellen mit 45 % die Temperatureffekte dar. Hier ist wieder zwischen der unmittelbaren Temperatureinwirkung (einschließlich Eisbildung), die mit einem Anteil von 38 % den Hauptbeitrag liefert, und den mittel- bis langfristigen Folgen hoher Temperaturen, Niedrigwasser und Waldbrand, zu unterscheiden. Separat betrachtet spielen die letzten beiden Einwirkungen mit 2 % bzw. 5 % nur eine untergeordnete Rolle (vgl. **Abb. 6-2**).

Die wichtigsten Auswirkungen der temperaturbedingten Einwirkungen von außen sind eine Beeinträchtigung der Mess- und Regeltechnik sowie der Kühlwasserversorgung. Die Entwicklung des Gefährdungspotentials für diese Gruppe von Einwirkungen hängt davon ab, wie sich die mittleren Temperaturen und die zu erwartenden (über längere Zeiträume anhaltenden) Temperaturmaxima bzw. -minima aufgrund des Klimawandels in Zukunft verändern werden (vgl. Abschnitt 7.2.3).

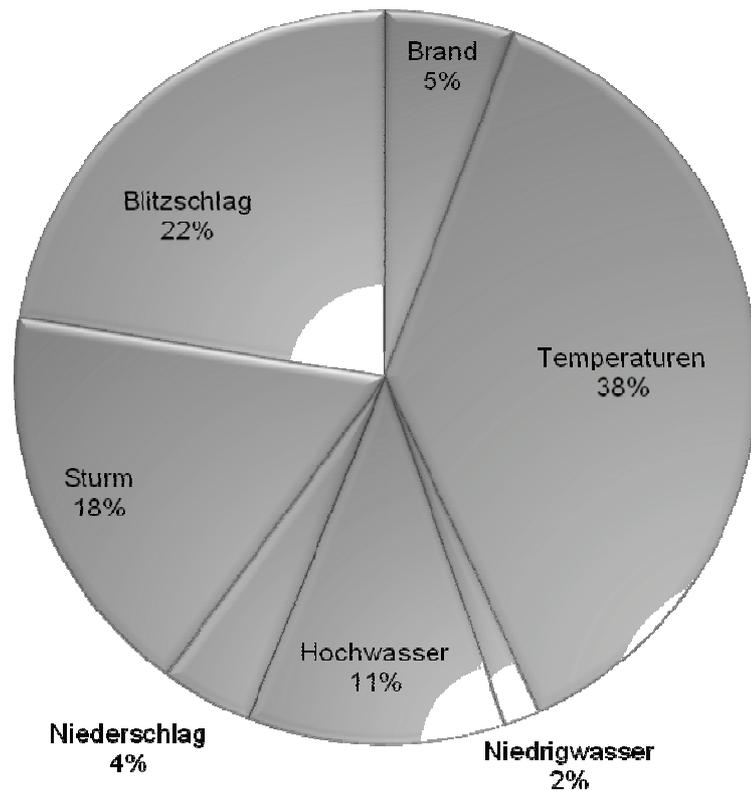


Abb. 6-2: Verteilung der dokumentierten Ereignisse auf die unterschiedlichen Gruppen von Einwirkungen von außen

4. Betrachtet man nur die Ereignisse mit sicherheitstechnischer Bedeutung (Klassen B und C), so ergibt sich die in **Abb. 6-3** dargestellte Verteilung auf die einzelnen Einwirkungskategorien. Relativ zu den Unwettereinwirkungen kommt den temperaturbedingten Einwirkungen (Temperatur, Niedrigwasser und Brand) unter dieser Einschränkung eine größere Bedeutung zu. Da die Einschätzung der sicherheitstechnischen Bedeutung der Ereignisse mit großen Unsicherheiten behaftet ist, sollte diese Verschiebung jedoch nicht überbewertet werden.

Insbesondere zeigt sich bei weiterer Einschränkung ausschließlich auf Ereignisse der Klasse C, dass sich dieser Trend wieder umkehrt. Insgesamt ist daher wohl davon auszugehen, dass unwetterbedingte und temperaturbedingte Einwirkungen einen vergleichbaren Beitrag zur Gesamtgefährdung liefern.

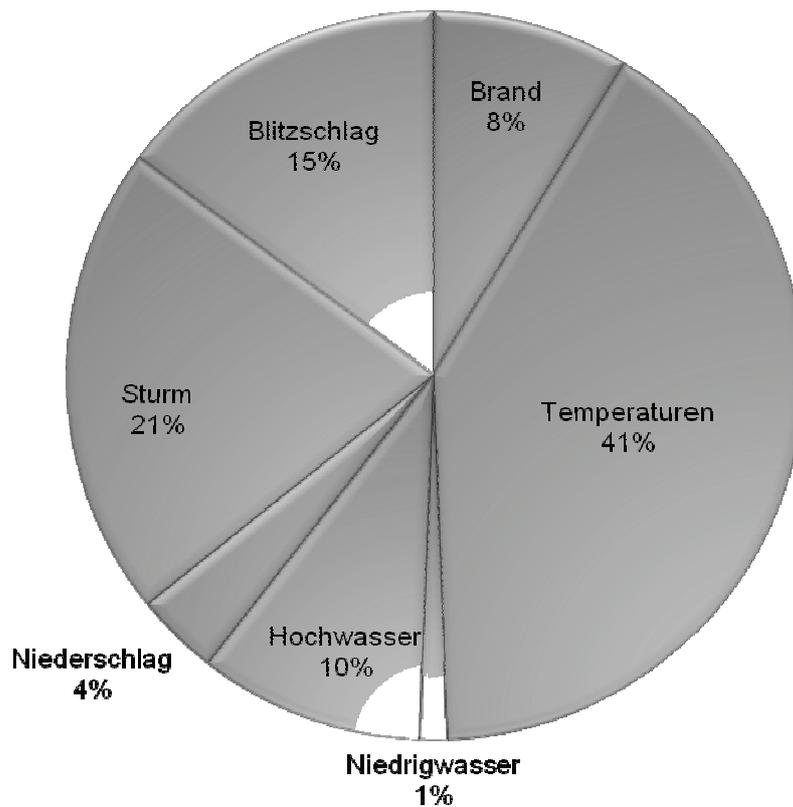


Abb. 6-3: Verteilung der Ereignisse mit sicherheitstechnischer Bedeutung (Klassen B und C) auf die unterschiedlichen Einwirkungsgruppen

Ein eindeutigeres Bild ergibt sich hinsichtlich der Einwirkung "Sturm". Hier ist mit zunehmender Einschränkung auf sicherheitstechnisch relevante Ereignisse ein stetig zunehmender Beitrag zu verzeichnen. Während bei Betrachtung aller Ereignisse Stürme nur einen Beitrag von 18 % liefern, steigt dieser über 21 % (nur Klasse B und C) auf 27 % bei Beschränkung auf Ereignisse der Klasse C.

5. Abschließend sei angemerkt, dass die Auswirkungen der in den Datenbanken dokumentierten wetter- bzw. witterungsbedingten Einwirkungen im Allgemeinen durch die Auslegung der betroffenen Anlagen abgedeckt waren. Nur in einzelnen Fällen wurde von Auslegungsreserven Kredit genommen.

In **Tab. 6-17** ist die Verteilung der Ereignisse auf die sicherheitstechnischen Klassen (A, B und C) innerhalb der definierten Einwirkungskategorien nochmals zusammenfassend dargestellt.

Tab. 6-17: Verteilung der Ereignisse innerhalb der Einwirkungskategorien auf die sicherheitstechnischen Klassen A bis C

Anzahl der Ereignisse pro Klasse	Einwirkungskategorie						
	Sturm	Temperatur	Hochwasser	Niedrigwasser	Niederschlag	Blitzschlag	Brand
A	5	14	6	1	2	16	0
B	2	7	5	1	1	3	7
C	15	26	3	0	2	9	0
gesamt	22	47	14	2	5	28	7

7 Auswirkungen des Klimawandels auf Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen

7.1 Vorgehensweise zur Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels

Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf das Leben der Menschen sind Themen, die seit einigen Jahren im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses stehen und auch von Seiten der Politik – aus den unterschiedlichsten Beweggründen – immer wieder aufgegriffen werden. Aufgrund dieser Popularität und der Politisierung des Themas ist es im Vergleich zu anderen naturwissenschaftlichen Fragestellungen besonders schwierig, diesbezüglich verlässliche und im wissenschaftlichen Sinn neutrale Informationen zu bekommen.

Um vor diesem Hintergrund zu einem verwertbaren Überblick über den tatsächlichen aktuellen Kenntnisstand zu gelangen, war die im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben RS 1166 durchgeführte Recherche nicht auf die verfügbare Literatur beschränkt. Diese stützte sich vielmehr in besonderem Maße auf die Teilnahme an Fachkonferenzen und das Gespräch mit Klimatologen, Meteorologen und Atmosphärenphysikern.

Während sich im Rahmen der Literaturrecherche eine Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft (DMG) /DMG 07/, ein Praktikumsbericht /MAY 07/, der im Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) erstellt wurde, und die Berichte der Arbeitsgruppe 1 (WG1, The Physical Science Basis) des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) /IPC 07/, /IPC 07a/, /SOL 07/ als besonders nützlich erwiesen, konnte hinsichtlich der Teilnahme an Fachkonferenzen insbesondere aus den folgenden Veranstaltungen Nutzen gezogen werden:

- International Disaster and Risk Conference (IDRC), Davos, Schweiz, 25. - 29. August 2006 /WSL 06/,
- Rapid Climate Change International Science Conference, Birmingham, U.K., 24. - 27. Oktober 2006 /NAT 06/ und
- 3. Europäischer Katastrophenschutzkongress, Bad Godesberg, Deutschland 30. - 31. Oktober 2007.

7.2 Klimaentwicklung

Das Klima unterliegt seit Entstehung der Erde (und damit der Atmosphäre und Hydrosphäre) einem ständigen Wandel, welcher jedoch hinsichtlich seiner Richtung und Geschwindigkeit im Laufe der Erdgeschichte äußerst variabel war. Der erste markante und für das Leben auf der Erde entscheidende Schritt war die Entwicklung der ursprünglichen Wasserstoff-Helium-Atmosphäre über eine wasserdampf- und kohlendioxiddominierte Atmosphäre zu einer sauerstoffhaltigen Stickstoff-Atmosphäre.

Weitere unübersehbare Zeichen des ständigen Klimawandels sind die Eiszeiten (Glaziale) und deren Auswirkung auf die Struktur der Erdoberfläche: Gletschertäler, Gletscherschliffe, Findlinge etc.. Hierbei sollte der Begriff Eiszeit (Glazial), als Bezeichnung einer Kaltphase innerhalb eines Eiszeitalters, nicht mit dem Begriff Eiszeitalter selbst verwechselt werden: Die Erde ist, betrachtet man ihre gesamte Geschichte, ein normalerweise weitgehend eis- und frostfreier Planet, auf dem es jedoch periodisch Kältephasen (Eiszeitalter) von etwa 15 bis 20 Millionen Jahren Dauer gibt. Seit etwa 1,5 Millionen Jahren befinden wir uns in einem solchen Eiszeitalter. Innerhalb eines solchen Eiszeitalters wechseln sich relativ warme Interglaziale (ca. 15.000 Jahre lang) und extrem kalte Glaziale (ca. 90.000 Jahre lang) ständig ab. Insbesondere seit etwa einer Million Jahren ist das Klima der Erde starken kurzfristigen Schwankungen zwischen Glazialen und Interglazialen unterworfen. Dabei beginnen die Warmzeiten häufig recht plötzlich, während die Abkühlung eher schleichend erfolgt. /SCH 92/

Vor diesem Hintergrund der erdgeschichtlichen, langfristigen Entwicklung des Klimas ist die derzeit in der Öffentlichkeit und in Fachkreisen intensiv geführte Debatte zum aktuellen Klimawandel, insbesondere zum anthropogenen Beitrag und der daraus resultierenden gesellschaftliche Verantwortung, zu sehen.

Hierzu ist anzumerken, dass die Erkenntnis, dass die Freisetzung von CO₂, u. a. durch die Nutzung fossiler Energieträger, eine Verstärkung der natürlichen Klimaänderung bewirken kann, nicht neu ist: Bereits vor etwa hundert Jahren hatte der schwedische Physiker und Chemiker S. A. Arrhenius darauf hingewiesen /ARR 96/. Dass dieses Thema mittlerweile auch in der Öffentlichkeit großes Interesse findet liegt, neben dem Engagement der Medien, vermutlich daran, dass die in letzter Zeit scheinbar gehäuft auftretenden Naturkatastrophen gerne mit dem in der Fachwelt diskutierten Klimawandel in Verbindung gebracht werden, obwohl ein Zusammenhang zwischen diesen beiden Effekten nicht nachgewiesen ist /BAS 06/. Allerdings wird die Frage, welchen Anteil der Mensch an der globalen Erwärmung hat, trotz des großen öffentlichen Interesses im Folgenden weitgehend ausgeblendet, da sie für die Folgen des Klimawandels von untergeordneter Bedeutung ist.

Um das Verständnis der folgenden Abschnitte zu erleichtern, sollen zunächst die zentralen Begriffe, Wetter, Klima und Klimaveränderung (Klimawandel) kurz erklärt werden:

- Der momentane Zustand der Atmosphäre an einem Ort wird als **Wetter** bezeichnet. In diesem Bericht wird das Wetter zusätzlich noch in Wetterereignisse und Witterung unterteilt. Für wenige Stunden oder Tage andauernde und in sich abgeschlossene Wetterbedingungen, wie z. B. Stürme oder Starkniederschläge, werden als **Wetterereignis** bezeichnet. **Witterung** dagegen ist das Wetter in einem längeren Zeitabschnitt (von mehreren Tagen bis zu mehreren Monaten). Typische Beispiele für Witterung sind z. B. lang anhaltende Frostperioden.
- Als **Klima** werden die langjährigen, zumeist mindestens 30-jährigen Mittelwerte des Wetters an einem bestimmten Ort bezeichnet. Das Klima ist somit das mittlere Wetter über einen längeren Zeitraum, also eine Statistik des Wetters. Wenn die einzelnen Klimavariablen (z. B. Temperatur, Niederschlagsmenge) mit konstanter Streuung um einen langjährigen Mittelwert schwanken, spricht man von stabilem Klima. Dementsprechend wird die Veränderung von Mittelwerten und Extrema des Klimas als Klimaänderung bezeichnet. Es spielt dabei keine Rolle, ob diese Änderungen auf Grund von natürlichen Schwankungen oder als Folge menschlicher Aktivitäten zu Stande kommen.
- Ein Klimamodell ist die mathematische Beschreibung des gesamten Klimasystems und seiner Wechselwirkungen. Viele Rückkopplungen in diesem System sind unbekannt und können größtenteils auch nicht aus der Geschichte des

Klimas reproduziert werden. Hieraus ergibt sich eine inhärente Unsicherheit der Modelle /CHA 06/. Je nach räumlicher Auflösung der Eingangsparameter und der Ergebnisse unterscheidet man zwischen globalen und regionalen Klimamodellen.

- Ein Klimaszenario bezeichnet eine zusammenhängende plausible Beschreibung eines möglichen Zustandes in der Zukunft auf der Basis bestimmter Annahmen. Es stellt damit eine unter verschiedenen möglichen Sichtweisen zukünftiger Gegebenheiten dar. Aus diesem Grund darf ein Klimaszenario auch nicht mit einer Klimavorhersage verwechselt werden.
- Für eine Klimaprognose werden viele verschiedene Szenarien erstellt und mehrere Simulationen mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen durchgeführt. Auf Grund der Spannweite der Szenarien können Klimaprognosen immer nur einen gewissen plausiblen Rahmen für die mögliche zukünftige Klimaentwicklung vorgeben.

7.2.1 Globale Klimaentwicklung

Da sich die meisten verfügbaren Studien auf den Bericht des IPCC beziehen, der mittlerweile in der vierten Revision vorliegt /IPC 07b/, stellt dieser auch eine der wesentlichen Grundlagen der nachfolgenden Ausführungen dar. Insbesondere die Ergebnisse der Arbeitsgruppe 1 (WG1, The Physical Science Basis) /IPC 07/, /Sol 07/ und der Arbeitsgruppe 2 (WG2, Impacts, Adaptation and Vulnerability) /IPC 07c/, /PAR 07/ sind für die Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels von Interesse. Da sich das IPCC jedoch vorzugsweise auf eine globale Betrachtungsweise beschränkt, wurden insbesondere für die regionale Bewertung (vgl. Abschnitte 7.2.2 und 7.2.3) zusätzliche Klimafolgestudien ausgewertet.

Die Arbeiten des IPCC gehen davon aus, dass der Klimawandel zu einem nennenswerten Teil auf anthropogene Einflüsse zurückgeht. Unter dieser Voraussetzung hängt die Entwicklung des Klimas wesentlich von den zukünftigen sozialen, ökonomischen und technologischen Randbedingungen ab.

Da diese Entwicklungen nicht vorhersagbar sind, basieren die Klimaszenarien des IPCC für den Zeitraum von 2000 bis 2100 auf unterschiedlichen Annahmen hinsichtlich dieser Randbedingungen. Hierbei wird zwischen zwei grundsätzlichen Tendenzen un-

terschieden: Während die A-Szenarien eine von ökonomischem Wachstum dominierte Entwicklung beschreiben, sind die B-Szenarien mehr ökologisch orientiert:

- Die A1-Szenarien beschreiben eine Entwicklung mit starkem wirtschaftlichen Wachstum und der raschen Einführung neuartiger Technologien. Die Weltbevölkerung wächst zunächst weiter, später stellt sich ein abnehmender Trend ein.
- Die A2-Szenarien beschreiben eine Welt mit stetigem Bevölkerungswachstum und regionalem Wachstum. Der technologische Fortschritt ist eher langsam.
- Die B1-Szenarien setzen die gleiche Bevölkerungsentwicklung voraus wie die Szenarienfamilie A1. Es wird jedoch von einer schnelleren Veränderung der wirtschaftlichen Strukturen hin zur Einführung emissionsarmer und ressourcenschonender Technologien ausgegangen. Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt auf der globalen Lösung von Umweltproblemen.
- Die B2-Szenarien sind im Gegensatz zur B1-Familie von lokalen Lösungen der Nachhaltigkeitsfrage dominiert. Das Bevölkerungswachstum ähnelt den A2-Szenarien, während der technologische Stand und die Wirtschaftsentwicklung sich auf mittlerem, regional unterschiedlichem Niveau bewegen.

Diese unterschiedlichen Annahmen der verschiedenen Szenarien sind in **Abb. 7-1** graphisch dargestellt.

Szenario	Bevölkerung	Wirtschaft	Umwelt	Gerechtigkeit	Technologie	Globalsierung
A1FI	↷	↗	↘	↗	↗	↗
A1B	↷	↗	↗	↗	↗	↗
A1T	↷	↗	↗	↗	↗	↗
B1	↷	↗	↗	↗	↗	↗
A2	↗	↗	↘	↘	↗	↘
B2	↗	↗	↗	↗	↗	↘

Abb. 7-1: Graphische Veranschaulichung der verschiedenen Szenarien des IPCC. /SPE 07/, Anhang A S. IV

Auf der Grundlage dieser Szenarien, wurde die zu erwartende globale Entwicklung verschiedener Klimavariablen, insbesondere der Temperaturen und der Niederschlagsmengen, ermittelt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind mit großen Unsicherheiten behaftet, da neben den bereits erläuterten Randbedingungen der jeweiligen Szenarien auch viele Annahmen hinsichtlich schlecht oder gar nicht bekannter physikalischer Prozesse in die Modelle eingehen /MAY 07/. Darüber hinaus fehlt den bisher verfügbaren Klimamodellen die Fähigkeit kurzzeitige, in der Vergangenheit beobachtete Phänomene, wie z. B. Dansgaard-Oeschger-Ereignisse⁴, zu simulieren und das Verhalten bestimmter klimarelevanter Subsysteme, wie z. B. der Meridional Overturning Circulation (MOC)⁵, auf einer Zeitskala von etwa einem Jahrzehnt vorauszusagen /MAR 06/. (Letzteres wäre wünschenswert, um die Realitätsnähe der Modelle einer experimentellen Überprüfung zugänglich zu machen.)

Des Weiteren gibt es Hinweise darauf, dass Rückrechnungen mit den vom IPCC verwendeten Modellen nicht mit den Beobachtungsdaten für den Zeitraum 1900 - 2000 verträglich sind /TET 07/.

Trotz aller angesprochenen Unsicherheiten und Probleme lassen sich für die wichtigen Klimavariablen Temperatur und Niederschlag einige generelle Prognosen ableiten:

Bemerkenswerterweise hängt die projizierte Erwärmung in den kommenden Jahrzehnten nur wenig von den Annahmen über zukünftige CO₂-Emissionen ab. Auch bei einem sofortigen globalen Emissionsstopp würde sich die Erde im Mittel um 0,6 °C erwärmen. Dieses Bild ändert sich jedoch in der letzten Dekade des 21. Jahrhundert. Von etwa 2090 an liegt der Mittelwert der globalen Erwärmung je nach Ausmaß der CO₂-Emission zwischen 1,0 - 2,7 °C (Szenario mit der geringsten Emission) und 2,4 - 6,4 °C (Szenario mit der höchsten Emission) /IPC 07/. Dieser erwartete Temperaturanstieg ist

⁴ Dansgaard-Oeschger-Ereignisse sind kurzzeitige Klimaschwankungen während der letzten Eiszeit. In der nördlichen Hemisphäre stellen sich diese Ereignisse als schnelle Erwärmung (z.B. 8 - 15 °C innerhalb von 40 Jahren) gefolgt von einer langsamen Abkühlung dar. Es gibt Anzeichen dafür, dass zeitgleich Temperaturänderungen mit entgegengesetztem Vorzeichen in der südlichen Hemisphäre stattfanden. /WOL 06/

⁵ Die MOC ist ein Teil der Thermohaline Circulation (THC), die als dichtegetriebene Zirkulation vier der fünf Ozeanbecken verbindet. Die Dichteunterschiede resultieren aus der unterschiedlichen Temperatur (thermo) und dem unterschiedlichen Salzgehalt (haline) der beteiligten Wassermassen. Der Golfstrom und der diesen in Richtung Europa fortsetzende Nordatlantikstrom sind wiederum Strömungen, die u. a. durch die MOC angetrieben werden.

konsistent mit dem bereits beobachteten Anstieg der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur in den letzten 100 Jahren von etwa 0,7 °C.

Im Gegensatz zu diesem allgemeinen Erwärmungstrend ist die erwartete Niederschlagsverteilung global sehr heterogen. Insgesamt wird der globale Wasserdampfgehalt der Atmosphäre voraussichtlich ansteigen. Es wird erwartet, dass der Niederschlag in den höheren Breiten zunimmt, während es in den Tropen – aber auch im Mittelmeerraum – zu einer Verminderung der Niederschläge kommen wird /IPC 07/.

7.2.2 Regionale Klimaentwicklung in Mitteleuropa

7.2.2.1 Einfluss der Meridional Overturning Circulation auf das Klima im Nordatlantikraum

Im Gegensatz zur globalen Klimaentwicklung, bei deren Modellierung über große Skalen gemittelt werden kann, erfordert die Bewertung der regionalen Klimaentwicklung eine detaillierte Berücksichtigung lokaler, relativ kleinskaliger Einflussfaktoren. Für Mitteleuropa spielen dabei die MOC (siehe Fußnote Seite 48) und der damit verbundene Nordatlantikstrom eine besondere Rolle.

Ein wesentlicher Faktor, der die Stärke der thermohalin getriebenen MOC beeinflusst, ist der Eintrag von Süßwasser in den Nordatlantik. Die Auswirkungen hängen dabei insbesondere von der Art des Süßwassereintrags ab. Erfolgt dieser verteilt über den gesamten Bereich 50° - 70° nördlicher Breite, ist der dämpfende Einfluss auf die MOC deutlicher als bei einem lokal konzentrierten Eintrag nahe der Grönländischen Küste. Die beiden zugrunde liegenden Szenarien ergeben sich aus dem Wechselspiel zweier denkbarer Süßwasserquellen: Im ersten Fall würden vermehrte Niederschläge über dem Nordatlantik und den angrenzenden Festlandmassen dominieren, im zweiten Fall das Abschmelzen des Festlandeises auf Grönland aufgrund der globalen Erwärmung. In beiden Fällen wäre jedoch nach einer anfänglichen Reduktion der MOC mit einer langsamen Erholung der Zirkulation zu rechnen. /JUN 06/

Dieser Auffassung, die den Salzgehalt der beteiligten Wassermassen in den Vordergrund stellt, steht jedoch die Meinung gegenüber, dass der Einfluss des Süßwassereintrags auf die Stärke der MOC eher gering ist und potentielle Änderungen eher auf die zunehmende Erwärmung zurückzuführen sind /WOO 06/. Beide Auffassungen sind in

der Fachwelt akzeptiert, da die bisherigen Beobachtungsdaten keine Entscheidung für oder gegen eine der Positionen erlauben.

Welcher lokale Temperaturanstieg konkret erforderlich wäre, um ein vollständiges Abschmelzen der derzeit Grönland weitgehend bedeckenden Eisschicht zu bewirken wird unter den Experten ebenfalls kontrovers diskutiert. Die Meinungen der Experten reichen von 2 °C bis über 5 °C. Das Abschmelzen der Eisdecke würde dann innerhalb von ca. 3000 Jahren erfolgen, begleitet von einem Meeresspiegelanstieg von etwa 8 m. /FIC 06/ (und diesbezügliche Diskussionen)

Auch hinsichtlich der Auswirkungen einer Veränderung der Stärke der MOC auf die klimatischen Verhältnisse im Nordatlantikraum sind die Meinungen innerhalb der Fachwelt nicht einheitlich. Es besteht jedoch eine gewisse Einigkeit, dass das (regionale) Klima nicht durch die MOC dominiert wird, sondern diese die Effekte des globalen Klimawandels regional modifiziert. Insbesondere geht man davon aus, dass eine Abschwächung der MOC zwar zu einer Abkühlung über dem Nordatlantik führt, diese aber nicht ausreicht, den durch die globale Erwärmung induzierten Temperaturanstieg über den angrenzenden Festlandmassen zu kompensieren. /WOO 06/.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass alle Vorhersagen hinsichtlich des Verhaltens des Grönländischen Festlandeises, des arktischen Meereises und der MOC mit Vorsicht zu betrachten sind, da die Ergebnisse der Modellrechnungen stark von der jeweiligen räumlichen Auflösung und den Eingangsparametern (Annahmen) abhängen /FIC 06 /, /WOO 06/.

Zusätzlich gestaltet sich die Überprüfung mit Hilfe realer⁶ Experimente äußerst schwierig, da die relevanten Signale in den bisherigen Daten meist noch durch das Rauschen überdeckt werden /DRI 06/, /SCH 06/. Lloyd Keigwin, der Leiter der International Science Conference "Rapid Climate Change", hat dieses grundlegende Problem in dem prägnanten Satz zusammengefasst: „At the moment we are learning what's signal and what's noise.“

⁶ Leider wird im Bereich der Klimamodellierung auch von Experimenten gesprochen, wenn Simulationen mit bestimmten Eingangsdaten gerechnet wurden. Das in den Naturwissenschaften sonst so hoch angesiedelte Prinzip der Überprüfung theoretischer Vorhersagen durch die experimentelle Bestätigung in der Realität wird hier in gewisser Weise ad absurdum geführt, da die Simulation selbst als Pseudo-Realität zur Überprüfung dient. Aus diesem Grund der explizite Hinweis auf **reale** Experimente.

7.2.2.2 Bisher beobachtete Veränderungen der klimatischen Verhältnisse in Mitteleuropa

Der Literatur lassen sich für Deutschland insbesondere die folgenden Aussagen zu beobachteten meteorologischen Veränderungen in den letzten Jahrzehnten entnehmen:

- Die mittleren Temperaturen sind seit 1900 um 1,1 °C gestiegen, wobei sich die Erwärmungsrate im letzten Jahrzehnt auf 0,27 °C erhöht hat /DMG 07/.
- Gleichzeitig misst man in der Stratosphäre eine Abkühlung um etwa 0,5 °C pro Jahrzehnt /DMG 07/.
- Im Jahr 2003 lag die über drei Monate gemittelte Sommertemperatur in weiten Teilen Mitteleuropas mehr als 3 °C über den bisher bekannten Höchstwerten /DMG 07/. Auch wenn dieser Hitzesommer mit über 50.000 Toten zu einer der schwerwiegendsten Wetterereignisse der letzten Jahrzehnte wurde, ist ein großer Teil dieser Todesfälle nicht auf die hohen Temperaturen selbst zurück zu führen sondern auf die erhöhte Luftverschmutzung (Begleiterscheinung der vorherrschenden Wetterlage) /GRA 06/.
- Der Juli 2006 war der wärmste Juli seit Beginn der Wetteraufzeichnungen /DMG 07/.
- Im Zeitraum September 2006 bis Juni 2007 lagen die Temperaturen erneut um bis zu 4 °C über den langjährigen Mittelwerten /DMG 07/.
- Die Temperatur der Nordsee lag 2006 um 2,4 °C über dem Mittelwert /DMG 07/.
- Die Niederschläge haben in den letzten Jahrzehnten im Sommer deutlich abgenommen, während im Herbst und Winter deutliche Zunahmen zu verzeichnen waren. Außerdem findet man eine zunehmende Veränderlichkeit der Extrema, d. h. eine Tendenz zu sowohl extrem hohen als auch niedrigen Niederschlagsmengen und damit zu mehr Überschwemmungen und mehr Dürreperioden /DMG 07/.
- Das Pfingsthochwasser 1999 in Süddeutschland gilt als 300-jähriges Hochwasser, jedoch trat bereits im August 2005 eine ähnliche Situation auf /DMG 07/.

- Das Elbehochwasser 2002 gilt als 450-jähriges Ereignis. Gleichzeitig trat in Österreich ein 1000-jähriges Hochwasser auf /DMG 07/. Diese Ereignisse sind vermutlich jedoch nicht auf den Klimawandel zurückzuführen, da sie dem tatsächlichen Trend zuwider laufen /JON 05/.
- Der Orkan Kyrill verursachte im Januar 2007 Schäden von über 5 Mrd. Euro /DMG 07/.
- Hinsichtlich der Entwicklung der Gewittertätigkeit werden unterschiedliche Fachmeinungen vertreten: Während die Deutsche Meteorologische Gesellschaft (DMG) in /DMG 07/ von einer Intensivierung der Gewittertätigkeit spricht, weist G. Tetzlaff, Vorsitzender der FA Hydrometeorologie der DMG, darauf hin, dass die Zahl der Gewitter trotz steigender Temperatur relativ gesehen (Anzahl heißer Tage pro Jahr – Anzahl Gewittertage pro Jahr) abgenommen habe /TET 07/.
- Die Ozonschicht hat seit Beginn der Aufzeichnungen (1968) 10 % an Dicke verloren, verbunden mit einem Anstieg der UV-B Strahlung um mehr als 10 % im Sommerhalbjahr. /DMG 07/.
- Mit der beobachteten Klimaänderung ist auch eine Änderung der Intensität und Häufigkeit von Extremereignissen verbunden, wobei deutliche jahreszeitliche Unterschiede auftreten. Ein genereller Trend zu "extremerem" Klima ist daraus nicht ableitbar /JON 05/.

Schließt man andere Länder in die Betrachtung mit ein, sind weitere interessante Veränderungen zu verzeichnen:

- Vor der norwegischen Küste kann man einen deutlichen Temperaturanstieg bis in über 2000 m Tiefe nachweisen (daraus resultiert eine erhöhte Verdunstung). Die Meereserwärmung verläuft allerdings nicht überall gleich, was die Meeresströmungen beeinflussen kann. /DMG 07/
- Die Alpengletscher sind seit Mitte des 19. Jahrhunderts in der Fläche um die Hälfte, in der Masse sogar um zwei Drittel geschrumpft. /DMG 07/
- In der Schweiz wurde im Laufe des 20. Jahrhunderts eine allgemeine Temperaturerhöhung beobachtet, die zu einer Abnahme der Frosttage und einer Verschiebung des Beginns der Vegetationsperiode um 12 Tage führte. /OCC 03/

- Die Häufigkeit intensiver Niederschläge ist in der Schweiz seit Beginn des 20. Jahrhunderts um ca. 30 % gestiegen. /OCC 03/
- Während drei der fünf stärksten Sturmereignisse (in der Schweiz) der letzten 500 Jahre innerhalb der letzten 40 Jahre auftraten, hat die Anzahl der Tage mit hohen Windgeschwindigkeiten in der Nordschweiz deutlich abgenommen. Eine klare Entwicklung ist daher bei Stürmen nicht auszumachen. /OCC 03/

Beobachtungen aus anderen Regionen Mitteleuropas bestätigen die oben beispielhaft angeführten Entwicklungen.

7.2.2.3 Ergebnisse der Klimamodellierung für Mitteleuropa

Da der Fokus der Untersuchungen des IPCC auf der globalen Klimaentwicklung liegt, sind die entsprechenden Publikationen für die regionale Bewertung der Klimaentwicklung in Mitteleuropa nur bedingt nutzbar. Für diese Fragestellung wurden deshalb die Berichte /MAY 07/, /SPE 07/, /PIK 05/, /KLI 05/, /KLI 05a/ und /DMG 07/ bevorzugt genutzt.

Auch wenn nicht alle Prognosen in der Fachliteratur in Übereinstimmung zu bringen sind, zeichnen sich für viele meteorologische Parameter gewisse Trends ab. Dies gilt nicht nur für die Mittelwerte, sondern auch für die Extremwerte, wenngleich dafür die statistische Sicherheit geringer ist /DMG 07/.

Für die **Temperaturentwicklung** werden meist Mittelwerte angegeben. Dabei deutet sich an, dass es im Laufe des 21. Jahrhunderts mehr Tage mit hohen Temperaturen geben wird. Ebenso ist es wahrscheinlich, dass die Zahl der Eis- und Frosttage zurückgeht. Bei der Interpretation dieser Angaben ist jedoch zu beachten, dass die räumliche und zeitliche Variabilität sehr groß ist. Betrachtet man nur die Wintermonate, so ist der erwartete Temperaturanstieg mit 3,5 - 4,0 °C relativ groß, während die geringste Erwärmung im Frühjahr stattfindet. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung ist festzustellen, dass die stärkste Erhöhung der Temperaturen im Norden Deutschlands zu erwarten ist, die absolut höchsten Temperaturen jedoch in Südwestdeutschland erreicht werden. Demnach ist eine differenzierte Betrachtung der Auswirkungen auf die verschiedenen Regionen erforderlich. /SPE 07/

Insbesondere für Baden-Württemberg und Bayern liegen regionale Untersuchungen zur Klimaentwicklung vor /PIK 05/, /KLI 05/, /KLI 05a/. Aus diesen Arbeiten geht hervor, dass die Temperaturen in Süddeutschland weiter steigen werden, wobei der Anstieg im Winterhalbjahr mit 2 °C stärker ausfällt als im Sommerhalbjahr (1,4 °C). Aus dieser Entwicklung resultiert eine Zunahme der Sommertage (Tage mit Maximaltemperaturen > 25 °C), bei gleichzeitiger Abnahme der Anzahl der Frosttage. Dies wird, wie auch in der Schweiz beobachtet (vgl. Abschnitt 7.2.2.2), zu einer Verlängerung der frostfreien Vegetationsperiode führen.

Der **Niederschlag** ist eine in hohem Maße stochastische Größe, die in Klimamodellen nur mit sehr begrenzter Präzision simulierbar ist. Die alleinige Angabe von Mittelwerten ist daher noch weniger aussagekräftig als bei der Temperaturentwicklung. So wird sich beispielsweise die Gesamtniederschlagsmenge für Deutschland voraussichtlich nur wenig verändern, während eine Verschiebung von Maxima und Minima durchaus relevante Auswirkungen haben kann. Eine zeitlich und räumlich aufgelöste Betrachtung ist somit unbedingt notwendig /MAY 07/.

Die wichtigste Erkenntnis in Bezug auf die zukünftigen Niederschläge ist die gegenläufige Trendentwicklung in den Winter- und Sommermonaten /THO 07/.

Im Sommer wird der Niederschlag, je nach Szenario und Region, mehr oder weniger stark abnehmen. Dabei wird der stärkste lokale Rückgang im Nordosten Deutschlands erwartet. Allgemein ist eine Tendenz dahingehend auszumachen, dass die Sommer-niederschläge, insbesondere in den heute bereits niederschlagsarmen Regionen, zurückgehen. Dagegen ist für die Wintermonate von einer deutlichen Zunahme des Niederschlags, insbesondere in Westdeutschland, auszugehen /SPE 07/, /MAY 07/. Im Vorgriff auf Abschnitt 7.2.3 sei hier bereits erwähnt, dass nach /SPE 07/ weder mit einer Zu- noch einer Abnahme von Starkniederschlagsereignissen gerechnet wird.

Der geschilderte Trend bestätigt sich weitgehend bei Betrachtung der regionalen Modelle für Süddeutschland /PIK 05/, /KLI 05/, /KLI 05a/. Dort zeichnet sich für die Wintermonate eine Zunahme des Niederschlags ab, während für die Sommermonate keine Veränderung /KLI 05/, /KLI 05a/ bzw. eine leichte Abnahme /PIK 05/ prognostiziert wird. Dies ist konsistent mit den Vorhersagen für die Schweiz, die ebenfalls von einer Zunahme der winterlichen Niederschläge ausgehen /OCC 03/. Im Gegensatz zu /SPE 07/ kommen /KLI 05/, /KLI 05a/ jedoch zu dem Ergebnis, dass die Anzahl der Tage mit starken Niederschlägen zunimmt.

Die Simulation des zukünftigen Tagesmittels der **Windgeschwindigkeit** zeigt einen leichten Rückgang der mittleren Windgeschwindigkeiten /SPE 07/. Da das Tagesmittel dieser Geschwindigkeiten jedoch keine optimale Größe ist, um relevante Auswirkungen der Klimaentwicklung zu beurteilen, wären Prognosen zur Änderung von Spitzengeschwindigkeiten wünschenswert. Diese liegen derzeit jedoch nicht vor /MAY 07/. Auch die Auswertung der Messdaten verschiedener Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) lassen keine unmittelbaren Schlüsse auf die weitere Entwicklung zu, da sie ein uneinheitliches Bild zeigen (Zunahme der Böengeschwindigkeit an Flachlandstationen, keine Änderung an Bergstationen) /PIK 05/.

Eine systematische Zusammenstellung der zukünftigen klimatischen Veränderungen unter Angabe der wissenschaftlichen Aussagezuverlässigkeit und der zu erwartenden Auswirkungen findet sich in /DMG 07/. Diese Übersicht ist in **Tab. 7-1** wiedergegeben.

Tab. 7-1: Erwartete Auswirkungen des Klimawandels innerhalb der kommenden drei Jahrzehnte. („Verlässlichkeit“ bezeichnet die derzeitige wissenschaftliche Absicherung der erwarteten Veränderung; Quelle: /DMG 07/)

Wetterelement	Erwartete Änderung	Verlässlichkeit	Auswirkungen
Temperatur	1,7 °C Grad wärmer als 1900, vor allem Winter und Nächte wärmer	sehr gut	früherer Pflanzenaustrieb, vermehrter Hitzestress, Rückgang des Permafrosts in den Alpen (mehr Felsstürze)
Hitzeperioden	häufiger, stärker	sehr gut	hohe Gesundheitsbelastung und Stress für die Biosphäre, mehr Waldbrände
Alpengletscher	60 % Flächen- / 80 % Massenverlust gegenüber 1850	sehr gut	extreme Abflussschwankungen
Meeresspiegelanstieg	ca. 10 cm gegenüber heute	sehr gut	Gefährdung der Nord- und Ostseeküste
Niederschlag	Sommer trockener, Herbst und Winter nasser mit mehr Regen statt Schnee, Ergiebigkeit von Einzelereignissen deutlich höher als bekannt	gut	erhöhte Überschwemmungsgefahr (u. a. wegen unterdimensionierter Entwässerungssysteme)

Wetterelement	Erwartete Änderung	Verlässlichkeit	Auswirkungen
Trocken- bzw. Dürreperioden	häufiger	befriedigend	Land- und Energiewirtschaft und Binnenschifffahrt betroffen, erhöhtes Waldbrandrisiko
Gewitter	intensiver	befriedigend	erhöhte Risiken durch Starkregen, Hagel, Sturmböen
Blitze	viel häufiger	gut	erhöhte Schäden
Tornados	häufiger	gering	erhöhte Schäden
Sturmfluten	bis zu 20 cm höher auflaufend	gut	stärkere Gefährdung der Nordseeküste
Ozonschicht	größte Ausdünnung um ca. 2010, nur langsame Erholung	gut	langfristig erhöhte UV-Belastung, erhöhtes Risiko von Hauterkrankungen
Außertropische (Winter-) Stürme	Tendenz zu heftigeren, evtl. weniger Stürmen bei veränderten Zugbahnen	unsicher	erhebliches Schadensrisiko

7.2.3 Auswirkungen des Klimawandels auf die regionale Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen

Alle Aussagen über mögliche Klimafolgen basieren auf den Prognosen über den Klimawandel selbst. Ihre Zuverlässigkeit wird daher maßgeblich durch die Unsicherheiten der zugrundeliegenden komplexen Klimamodelle bestimmt. Zudem stellt die begrenzte räumliche Ausdehnung vieler Klimafolgen und die Tatsache, dass eine geringe Mittelwertverschiebung bereits große Auswirkungen für Extremereignisse bedingen kann, ein erhebliches Problem für die Modellierung von Extremereignissen dar /TET 07/.

Aus diesen Gründen lassen sich einzelne beobachtete Extremereignisse gegenwärtig nicht zweifelsfrei auf eine Änderung des Klimas zurückführen. Sie könnten theoretisch als sehr seltene Ereignisse auch bei gleich bleibenden Klimabedingungen auftreten /MAY 07/. Veränderungen bei Extremereignissen sind daher meist erst dann nachweisbar, wenn sie bereits ein beträchtliches Ausmaß erreicht und unter Umständen große Schäden verursacht haben. Im Gegensatz dazu sind statistische Aussagen über Trends bei den häufigeren, intensiven Ereignissen (die in der Regel keine Schäden

verursachen) besser möglich. Diese Resultate können Hinweise auf das Verhalten der Extremereignisse geben, jedoch nicht direkt auf diese übertragen werden /OCC 03/.

Andererseits führt das heutige Prozessverständnis, unabhängig von den Problemen der Modellierung, zu der Annahme, dass die Häufigkeit und Intensität gewisser Extremereignisse, wie z. B. von Hitzewellen, Starkniederschlägen und Hochwassern im Winterhalbjahr sowie Trockenperioden im Sommer, zunehmen werden. Parallel dazu wird die Häufigkeit von Frosttagen und Kältewellen abnehmen /OCC 03/, /DMG 07/.

Für Deutschland wurden die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen in /JON 05/ berechnet.

Diese Studie kommt zu dem Ergebnis, dass mit den beobachteten Klimaänderungen des Industriezeitalters auch Änderungen der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen verbunden sind. Insbesondere wird deutlich, dass große jahreszeitliche und regionale Unterschiede auftreten. Eine generelle Aussage, dass das Klima in Deutschland extremer wird, ist somit nicht zutreffend /MAY 07/.

Die folgende Darstellung der zukünftig zu erwartenden Entwicklung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen stützt sich, sofern keine andere Quelle angegeben ist, auf die Ausführungen in /MAY 07/, denen die oben angesprochenen Untersuchungen aus /JON 05/ zugrunde liegen.

- **Starkniederschlagsereignisse:**

Die Tatsache, dass steigende Lufttemperaturen mit einer Intensivierung des hydrologischen Kreislaufes (u. a. Erhöhung der Wasserdampfkapazitäten und stärkere Verdunstung) einhergehen, legt nahe, dass eine globale Temperaturzunahme zu höheren Niederschlägen führt: Der absolute Wasserdampfgehalt der Luft steigt bei gleich bleibender relativer Feuchtigkeit und die Niederschlagsintensität nimmt zu, da pro Ereignis mehr Wasser zur Verfügung steht. In Europa nehmen die maximale 5-Tages-Niederschlagsmenge und damit auch die Hochwassergefahr (siehe unten) vor allem in den Wintermonaten zu. Für Deutschland wird insbesondere im Westen, bezogen auf die Monatsdaten, ein Trend zu kürzeren Wiederkehrzeiten extrem hoher Niederschlagswerte beobachtet, während es sich im Osten umgekehrt verhält. Für die Tagesdaten des Niederschlages ist kein einheitlicher Trend feststellbar. Tendenziell nehmen die Tage mit extrem hohen Niederschlagssummen im Winter und im Herbst jedoch zu /JON 05/. Diese Prognose ist konsistent

mit der Auffassung des "Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung" (Organe consultatif sur les changements climatiques, OcCC) /OCC 03/, dass in Anbetracht der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse und der Modellrechnungen (hier für die Schweiz) eine Zunahme der Intensität von Starkniederschlägen und ein beschleunigter Abfluss im Winterhalbjahr zu erwarten sind. Sie steht jedoch im Widerspruch zu der bereits angesprochenen Arbeit /SPE 07/. In diesen Simulationen zeigen Starkregenereignisse keine wesentliche Veränderung. Auch bei den absoluten Tagesniederschlagsmaxima konnten keine sichtbaren Zu- oder Abnahmetendenzen im Verlauf des 21. Jahrhunderts beobachtet werden.

- **Hochwasser:**

Auch wenn die Änderungen von Hochwasserhäufigkeit und -intensität im Allgemeinen der Niederschlagsentwicklung innerhalb einer Region folgen, ergibt sich für Deutschland keine eindeutige Vorhersage. In den meisten Veröffentlichungen wird von einem steigenden Hochwasserrisiko ausgegangen. Orientiert man sich an der Niederschlagsentwicklung, so ist mit einer Abnahme der Hochwasserwahrscheinlichkeit im Sommer und einer Zunahme der Wahrscheinlichkeit von Winterhochwassern zu rechnen. Allerdings haben auch Faktoren wie Schnee- und Gletscherschmelze sowie die prognostizierten milderen und feuchteren Winter⁷ Auswirkungen auf das Hochwasserrisiko. Für den Rhein liegen einige Ergebnisse vor, die diesen Trend bestätigen.

Ein immer wieder diskutierter Aspekt ist die anscheinende Häufung von Sommerhochwassern (Elbe 2002, Oder 1997, 1999). Diese wird oft mit einer zunehmenden Häufigkeit von so genannten Vb-Wetterlagen⁸ begründet. Dass diese Wetterlagen tatsächlich häufiger geworden sind, lässt sich jedoch nicht nachweisen. Folgt man den Modellberechnungen, kommt es in einem wärmeren Klima eher zu einer Abnahme dieser Wetterlagen jedoch zu einer deutlichen Zunahme sehr starker Niederschlägen im Falle des Auftretens von Vb-Wetterlagen /MAY 07/, /JON 05/.

⁷ Der Niederschlag im Winter fällt häufiger als Regen anstatt als Schnee. Damit entfällt die Verzögerung des Abflusses durch die Schneeschmelze, so dass der gesamte Niederschlag direkt in die Vorfluter abfließt. Zudem ist der Boden im Winter meist weitgehend wassergesättigt, was ebenfalls zu einem direkten Abfluss des Wassers führt.

⁸ Eine Vb-Wetterlage ist durch die Zugbahn eines Tiefdruckgebietes von Genua, über die Po-Ebene hinweg, um die Alpen herum, nordostwärts über Österreich, Ungarn und Polen gekennzeichnet. Dabei werden die beteiligten Luftmassen über dem Mittelmeer mit Feuchtigkeit aufgeladen, was beim Aufgleiten der feuchten Luft auf bodennahe Kaltluftschichten in den Alpen und Mittelgebirgen zu heftigen, oft lange andauernden Niederschlägen führt.

- **Hitze- und Trockenperioden:**

Da zwar die Starkniederschläge im globalen Mittel zunehmen, andererseits jedoch die Abstände zwischen den Ereignissen wachsen, ist mit einem vermehrten Auftreten langer Hitze- und Trockenperioden zu rechnen. Insbesondere Hitzeperioden, die zwei bis fünf Tage andauern werden zwischen 2071 und 2100 zwei- bis dreimal häufiger sein als im Vergleichszeitraum von 1961 bis 1990. Treten dabei Tage mit Höchsttemperaturen über 30 °C auf, steigt zudem die Wahrscheinlichkeit, dass diese Temperaturen für längere Zeit erreicht werden. Es ist demnach nicht nur mit häufigeren Hitze- und Trockenperioden zu rechnen, sondern auch mit extremeren Bedingungen während dieser Ereignisse /SPE 07/. Wie sich in den heutigen Beobachtungen bereits andeutet, wird insbesondere Brandenburg zukünftig durch Hitze- und Trockenperioden gefährdet sein. Bis 2050 werden weite Teile des Einzugsgebietes der Elbe mit weiteren Niederschlagsabnahmen rechnen müssen. Aus dieser Entwicklung lässt sich auch ableiten, dass das Waldbrandrisiko für Brandenburg im Zeitraum von 2000 bis 2050 stark steigen wird. Insbesondere im Süden des Landes wird die Waldbrandgefahr deutlich zunehmen.

- **Frost:**

Aufgrund des allgemeinen Temperaturanstiegs ist mit einem deutlichen Rückgang der Häufigkeit von Eis- und Frosttagen zu rechnen /SPE 07/, /OCC 03/.

- **Stürme:**

Während /IPC 07/ für tropische Wirbelstürme zu dem klaren Ergebnis kommt, dass deren Intensität, bedingt durch den Anstieg der Meeresoberflächentemperatur und einen höheren Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, zunimmt, ihre Häufigkeit jedoch gleich bleiben wird, gibt es derzeit keine gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnisse über das zukünftige Verhalten von Stürmen außerhalb der Tropen. Gründe hierfür liegen im Fehlen langfristiger Beobachtungsdaten und der Tatsache, dass eine (bisher nur schwer einschätzbare) Veränderung der atmosphärischen Zirkulation maßgeblichen Einfluss haben könnte /OCC 03/.

- Während Spekat et al. /SPE 07/ in Übereinstimmung mit den Beobachtungen für die Nordschweiz /OCC 03/ Hinweise für eine Abnahme der mittleren Windgeschwindigkeit im Laufe des 21. Jahrhunderts gefunden haben, kommen Jonas et al. /JON 05/ zu dem Schluss, dass die Wahrscheinlichkeit für extrem hohe tagesbezogene Maximalwindgeschwindigkeiten im Winter zu- und im Sommer tendenziell abnimmt.

7.3 Zusammenfassende Bewertung der Informationen zum Klimawandel und dessen Auswirkungen

Zunächst ist festzustellen, dass die Modelle zur Klimaentwicklung bisher noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind. Dies gilt umso mehr, wenn man von globalen Mittelwerten zu räumlich oder zeitlich höher aufgelösten Prognosen übergeht.

Da genau dies aber bei Aussagen zu Extremereignissen der Fall ist, sind die abgeleiteten Schlussfolgerungen immer vor dem Hintergrund der stark eingeschränkten Aussageicherheit zu betrachten.

Bei konservativer Bewertung⁹ der in Abschnitt 7.2 zusammengestellten Informationen zum Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Häufigkeit und Intensität extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen kommt man zu folgenden Feststellungen für die diesbezügliche Entwicklung in Deutschland:

- In den Sommermonaten ist grundsätzlich mit höheren Temperaturen zu rechnen. Insbesondere werden vermehrt lange Trockenperioden mit durchgehend sehr hohen Temperaturen erwartet. Dementsprechend nimmt auch die Waldbrandgefahr zu.
- In den Wintermonaten werden Frostperioden abnehmen, gleichzeitig werden winterliche Niederschläge häufiger als Regen fallen, seltener als Schnee.
- Im Winter ist mit insgesamt mehr Niederschlag und mit häufigeren Starkniederschlagsereignissen zu rechnen.
- Aufgrund der Intensivierung der Niederschläge steigt im Winter (und durch die alpine Schnee- und Gletscherschmelze ggf. auch im Frühjahr) das Hochwasserrisiko.
- Die Häufigkeit von Stürmen wird voraussichtlich unverändert bleiben, während die Stärke der auftretenden Stürme zunimmt. Darüber hinaus ist eventuell mit einem vermehrten Auftreten von Tornados zu rechnen.

⁹ „Konservativ“ ist in diesem Zusammenhang so zu verstehen, dass jeweils die Prognose herangezogen wird, die zu den ungünstigsten Auswirkungen (insbesondere auf Industrieanlagen) führt. Dies stellt keine Wertung der einzelnen Untersuchungen dar, sondern soll lediglich sicher stellen, dass keine möglichen Gefahrenquellen vernachlässigt werden.

- Durch eine zunehmende Gewitteraktivität werden Blitzschläge häufiger.

Da diese Aussagen bereits hinsichtlich ihrer generellen Tendenz mit großen Unsicherheiten verbunden sind, erscheint es nicht sinnvoll, quantitative Angaben zu machen, zumal die Werte in der Literatur oft auf völlig unterschiedliche Prognose- und Referenzzeiträume Bezug nehmen.

8 Zusammenfassung und Bewertung

8.1 Derzeitige sicherheitstechnische Bedeutung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen für Kernkraftwerke

Aus der Zusammenstellung der internationalen Betriebserfahrung in Abschnitt 6.3 und deren Auswertung in Abschnitt 1.1 ist ersichtlich, dass extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen immer wieder zu Folgeereignissen in Kernkraftwerken führen. Typische Einwirkungspfade bei solchen Ereignissen sind die Beeinträchtigungen der Elektro- und Leittechnik sowie der (Neben-) Kühlwasserversorgung. In den meisten Fällen waren, im Sinne der in Abschnitt 6.2 eingeführten vereinfachten Klassifizierung, auch sicherheitstechnische Auswirkungen zu verzeichnen (Klassen B oder C). Allerdings kam es nur in sehr wenigen Fällen zu Ereignisabläufen, die nicht durch die Auslegung der Anlage abgedeckt waren.

Die identifizierten Ereignisse durch extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen sind sowohl hinsichtlich ihrer Anzahl als auch ihrer Auswirkungen zur Gesamtheit der in den verwendeten Datenbanken dokumentierten Ereignisse in Relation zu setzen: Einerseits machen sie zahlenmäßig nur etwa 1 % aller dokumentierten Ereignisse aus. Andererseits weist nur ein einziges Ereignis eine INES-Einstufung > 0 auf. Letztere Feststellung ist jedoch zu relativieren, da bei mindestens drei Ereignissen ein vorübergehender Totalausfall der batterie-unabhängigen Stromversorgung (Station Blackout), also eine sicherheitstechnisch durchaus bedenkliche Situation, auftrat.

Betrachtet man nur die Ereignisse in deutschen Kernkraftwerken, so lässt sich feststellen, dass insgesamt 12 meldepflichtige Ereignisse mit sicherheitstechnischer Bedeutung (Klassen B und C gemäß Abschnitt 6.2) als Folge der Einwirkungen Sturm, Hochwasser und Blitzschlag auftraten.

Während sämtliche sturmbedingte Ereignisse auf Störungen der Netzanbindung (Haupt- oder Reservenetz) zurückgehen und durch den mehr oder weniger auslegungsgemäßen Ablauf der Transiente „Notstromfall“ gekennzeichnet sind, dominiert bei den Hochwasserereignissen der Eintrag von Verunreinigungen und die daraus resultierende Beeinträchtigung des Nebenkühlwassersystems die Ereignisabläufe. Eine Ausnahme stellt hierbei das Ereignis „Ausfall einer Nebenkühlwasserpumpe durch

Überflutung“ (VERA-2006/111) dar, bei dem es durch einen Wassereinbruch (undichte Durchführung) unmittelbar zum Ausfall einer Nebenkühlwasserpumpe kam.

Das wiederholte Auftreten von Ereignissen aufgrund von Blitzschlägen führte Mitte der 80-er Jahre zu einer Überprüfung des Blitzschutzkonzepts und umfangreichen Nachrüstungen. Durch diese Maßnahmen konnte erreicht werden, dass Blitzschläge zunächst nicht mehr als kritisch anzusehen waren. Diese Einschätzung ist jedoch im Zuge der vermehrten Einführung softwarebasierter Leittechnik in den deutschen Kernkraftwerken zu hinterfragen, da diese Technik andere Anforderungen an den Blitzschutz stellt.

Insgesamt lässt sich auf der Basis der ermittelten Informationen die derzeitige Situation hinsichtlich extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen dahingehend bewerten, dass derartige Einwirkungen grundsätzlich sicherheitstechnisch relevante Auswirkungen haben können. Während im Ausland teilweise relativ kritische Situationen auftraten, zeigt die nationale Betriebserfahrung, dass die Auslegung der deutschen Kernkraftwerke bisher ausreichte, um schwerwiegende Folgen zu verhindern.¹⁰

8.2 Zukünftige sicherheitstechnische Bedeutung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen für Kernkraftwerke in Deutschland

In Abschnitt 7.2.3 wurde dargestellt, wie sich der Klimawandel auf extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen in Deutschland voraussichtlich auswirken wird. Insbesondere ist im Winter mit einer Zunahme von Starkniederschlägen (mit Hochwasserereignissen als möglicher Folge) und eventuell auch von Stürmen zu rechnen, während im Sommer verstärkt Hitze- und Trockenperioden auftreten dürften. Ebenso muss man bei konservativer Bewertung der verfügbaren Informationen von häufigeren Gewittern, also vermehrten Blitzschlagereignissen, ausgehen.

Dieser zu erwartenden Entwicklung der Einwirkungen stehen die in Abschnitt 1.1 identifizierten Auswirkungen solcher Ereignisse auf Kernkraftwerke gegenüber. Da die deutschen Kernkraftwerke hohen Sicherheitsstandards genügen /BMU 07/ und die kli-

¹⁰ Hieraus kann keine Bewertung der Auslegungskonzepte abgeleitet werden, da die Ereignisabläufe wesentlich von der Art und Intensität des Wetterereignisses bzw. der Witterungsbedingung, den Standortgegebenheiten und dem betroffenen Reaktortyp abhängen.

matischen Verhältnisse in Deutschland bisher eher als gemäßigt anzusehen sind, darf man davon ausgehen, dass zukünftige intensivere Wetterereignisse und Witterungsbedingungen in Deutschland keine größeren sicherheitstechnischen Auswirkungen auf Kernkraftwerke haben werden, als jene, die im Ausland, insbesondere in Ländern mit extremeren klimatischen Verhältnissen, bereits beobachtet wurden.

Den dominierenden Wirkungspfad bei unwetterbedingten Einwirkungen (Starkniederschlag, Hochwasser, Sturm und Blitzschlag) und bei der Einwirkung extremer Temperaturen stellen gemäß Abschnitt 1.1 Störungen der Elektro- und Leittechnik dar. Bei Hochwasser kommt ggf. noch eine Beeinträchtigung der Nebenkühlwasserversorgung hinzu.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass gemäß den Ergebnissen des Abschnitts 6.3 Störungen der Leittechnik insbesondere bei Blitzschlägen und bei niedrigen Temperaturen auftreten. Nun werden jedoch Tage mit (extrem) niedrigen Temperaturen zukünftig seltener auftreten, und aufgrund der in den deutschen Kernkraftwerken durchgeführten Nachrüstungen im Blitzschutz sind nach derzeitigem Kenntnisstand auch bei einer Zunahme der Blitzschlaghäufigkeit keine nennenswerten Beeinträchtigungen zu erwarten. Insofern dürften Störungen der konventionellen Leittechnik im Zusammenhang mit extremen Wetterereignissen und Witterungsbedingungen in Deutschland eher eine untergeordnete Rolle spielen. Hinsichtlich der möglichen Auswirkungen auf die immer häufiger eingesetzte softwarebasierte Leittechnik besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf, da die verfügbaren Daten bisher keine abschließende Bewertung erlauben. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Auswirkungen anlageninterner Ereignisse (z. B. Überspannungseintrag durch Fehler in benachbarten Systemen) gegenüber Blitzeinwirkungen deutlich dominieren, da das Blitzschutzkonzept nach KTA 2206 /KTA 00/ den Überspannungseintrag von außen weitgehend unterbindet.

Als zukünftig besonders relevante Einwirkungspfade verbleiben somit die Elektrotechnik, insbesondere die Eigenbedarfsversorgung der Anlagen, und die Nebenkühlwasserversorgung.

Für die betreffenden Systeme sollten vor dem Hintergrund der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels standortspezifisch (starke regionale Unterschiede hinsichtlich der Folgen des Klimawandels) überprüft werden, ob die Auslegungsreserven genügen, um unter den veränderten Randbedingungen einen sicheren Betrieb der An-

lagen zu gewährleisten. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 8.3 kann eine deterministische Analyse hierfür als ausreichend angesehen werden.

Da sich das Klima in Mitteleuropa im Laufe der kommenden Jahrzehnte nur moderat ändern wird (z .B. Temperaturanstieg bis Mitte des 21. Jahrhunderts in Baden-Württemberg im Sommerhalbjahr um ca. 1,4 °C, vgl. Abschnitte 7.2.2.3 und 7.2.3), ist auf diesem Zeithorizont keine nennenswerte Zunahme der Gefährdung der deutschen Kernkraftwerke durch extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen zu erwarten.

8.3 Notwendigkeit und Möglichkeit der Behandlung extremer Wetterereignisse und Witterungsbedingungen im Rahmen der PSA

Wie in Abschnitt 8.1 und 8.2 festgestellt, liefern extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen derzeit und voraussichtlich auch in den nächsten Jahrzehnten keinen dominanten Beitrag zur Gefährdung der Kernkraftwerke in Deutschland. Eine unmittelbare Notwendigkeit, die bisherigen Anforderungen hinsichtlich der probabilistischen Bewertung derartiger Einwirkungen zu verschärfen, ist daher aus sicherheitstechnischer Sicht nicht gegeben. Diese Einschätzung deckt sich auch mit der international üblichen Vorgehensweise, im Rahmen der PSA nur ausgewählte Einwirkungen von außen zu betrachten, die aufgrund der klimatischen Gegebenheiten der Region eine besondere Gefahr darstellen (vgl. Abschnitt 4).

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass die wichtigsten Einwirkungspfade, die sich aus den für Deutschland relevanten extremen Wetterereignissen und Witterungsbedingungen ergeben, ohnehin bereits in der PSA Berücksichtigung finden:

- Die Transiente „Notstromfall“, die sich in der Regel aus Störungen der Elektrotechnik ergibt, gehört zum Standardspektrum der analysierten anlageninternen Ereignisse.
- Für die Einwirkung „Hochwasser“ wird im aktuellen PSA-Leitfaden /BMU 05/ bzw. im zugehörigen Fachband zu PSA-Methoden /FAK 05/ eine probabilistische Analyse gefordert, so dass auch die damit verbundenen Aspekte (insbesondere Beeinträchtigung des Nebenkühlwassersystems) abgedeckt sind.

Ein besonderes Problem bei der probabilistischen Behandlung naturbedingter Einwirkungen von außen ergibt sich aus der Tatsache, dass die Ergebnisse der Analysen oft unmittelbar durch die Eintrittshäufigkeit des Ereignisses selbst bestimmt werden. Dies hat sich insbesondere im Rahmen von Erdbeben-PSA gezeigt¹¹. Die Konsequenz des dominanten Einflusses der Gefährdungsanalyse besteht darin, dass die Aussagekraft der gesamten probabilistischen Untersuchung von den Unsicherheiten in diesem ersten Arbeitsschritt abhängen. Andererseits ist bereits die Ermittlung eines 10⁻⁴-jährigen Hochwasserereignisses mit erheblichen Problemen verbunden /KLE 01/, /JEN 03/. Aussagen zu noch geringeren Überschreitenswahrscheinlichkeiten, wie sie für die PSA benötigt werden, sind dementsprechend mit sehr großen Unsicherheiten behaftet. Dieses Problem verschärft sich weiter, wenn man von der relativ gut handhabbaren Einwirkung „Hochwasser“ (Pegelstände sind historisch gut dokumentiert) zu anderen wetter- bzw. witterungsbedingten Einwirkungen übergeht, für die keine ähnlich aussagekräftige Datenbasis verfügbar ist.

Die grundlegende Frage, inwieweit extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen unter Berücksichtigung des Klimawandels in Zukunft im Rahmen der PSA analysiert werden sollten, lässt sich auf Basis der durchgeführten Untersuchungen somit wie folgt beantworten:

Derzeit ist es aus sicherheitstechnischer Sicht nicht erforderlich, extreme Wetterereignisse und Witterungsbedingungen umfassend in der PSA zu berücksichtigen. Die bisherige Praxis, Hochwasser als einzige derartige Einwirkung explizit zu behandeln, ist als angemessen zu betrachten.

¹¹ Dies hat sich aus den Diskussionen auf dem Workshop on Recent Findings and Developments in Probabilistic Seismic Hazards Analysis (PSHA) Methodologies and Applications (Lyon, Frankreich, 7. - 9. April 2008) ergeben.

9 Identifikation potentieller Kooperationspartner

Zusätzlich zu den fachlich-inhaltlichen Arbeiten sollten im Rahmen dieses Vorhabens auch mögliche Partner für eine zukünftige Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wetter- und witterungsbedingten Einwirkungen identifiziert werden. Hintergrund dieser Maßnahme sind (i) die begrenzten personellen Ressourcen der GRS, die es nicht erlauben, selbst entsprechende Fachleute zu beschäftigen, und (ii) die Notwendigkeit, dennoch kurzfristig Aussagen zu sicherheitstechnischen Fragestellungen im Zusammenhang mit wetter- und witterungsbedingten Einwirkungen machen zu können.

Im Rahmen der Teilnahme an den in Abschnitt 7.1 angesprochenen Fachtagungen und durch Recherchen im Internet war es, wie geplant, möglich, Institutionen zu identifizieren, die über die notwendige Fachkompetenz verfügen, und teilweise auch persönliche Kontakte zu potentiellen Ansprechpartnern zu knüpfen. Allerdings haben die Gespräche auch gezeigt, dass die ursprüngliche Idee, durch Rückfrage bei einer entsprechenden Institution kurzfristig fundierte Aussagen treffen zu können, in der Praxis nicht realisierbar sein wird. Hierfür gibt es mehrere Gründe:

- Aufgrund des allseits großen Interesses an meteorologischen und hydrologischen Fragestellungen (im Zusammenhang mit der Problematik des Klimawandels) sind die in Frage kommenden Institutionen mit Aufträgen soweit ausgelastet, dass die kurzfristige Bearbeitung zusätzlicher Aufgaben in den seltensten Fällen möglich sein wird.
- Da auch scheinbar einfache Nachfragen aufgrund der Komplexität der zugrunde liegenden Thematik mit einem gewissen Aufwand verbunden sind, können die Institutionen die Leistungen nicht kostenlos zur Verfügung stellen. Die Abwicklung der zur Vergabe der somit notwendigen Unteraufträge erforderlichen Formalitäten steht im Widerspruch zu der Anforderung, kurzfristig aussagefähig zu sein.
- Auch falls eine Kooperation prinzipiell möglich wäre, erlaubt die Komplexität der aufeinandertreffenden Fachgebiete (Reaktorsicherheit und Meteorologie / Hydrologie) keine kurzfristige Bearbeitung (gegenseitiger Erläuterungsbedarf), sofern nicht auf beiden Seiten bereits weitgehende Kenntnisse über das jeweils andere Gebiet vorhanden sind.

Insbesondere aus dem letztgenannten Argument lässt sich ableiten, dass die Anforderung der kurzfristigen Aussagefähigkeit bei neuen Fragestellungen nur mit eigenem

Personal erfüllt werden kann. Der Rückgriff auf externe Quellen bedingt fast immer eine deutliche Verzögerung.

Ungeachtet der erläuterten Probleme sind in **Tab. 9-1** einige Institutionen zusammengestellt, die auf dem Gebiet der wetter- und witterungsbedingten Einwirkungen fachspezifische Informationen liefern können. Soweit möglich sind auch konkrete Ansprechpartner benannt. Hinsichtlich dieser Ansprechpartner ist zu beachten, dass aufgrund der Schnelllebigkeit des heutigen Arbeitslebens nicht unbedingt damit zu rechnen ist, dass die betreffenden Personen zum Zeitpunkt der Anfrage noch verfügbar oder zuständig sind.

Tab. 9-1: Fachinstitutionen auf dem Gebiet der Meteorologie, Hydrologie und Klimatologie. Angegeben sind nur ausgewählte Themengebiete mit Relevanz für die Sicherheit von Kernkraftwerken

Themengebiet	Ansprechpartner
<u>Deutscher Wetterdienst (DWD)</u>	
Erfassung, Überwachung und Bewertung meteorologischer Prozesse sowie der Eigenschaften der Atmosphäre (einschließlich Überwachung auf radioaktive Spurenstoffe und Vorhersage deren Verfrachtung), Bereitstellung meteorologischer Daten	Dr. Wilfried Thommes; E-Mail: wilfried.thommes@dwd.de
<u>Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)</u>	
Untersuchung wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Fragestellungen zu Klimafolgen, Erforschung der Belastbarkeit des Erdsystems (System- und Szenarienanalyse, quantitative und qualitative Modellierung und Computersimulation)	
<u>Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M)</u>	
Ermittlung des Beitrags physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse sowie des menschlichen Verhaltens zur Dynamik des Erdsystems (insbesondere zu globalen und regionalen Klimaänderungen)	

Themengebiet	Ansprechpartner
<u>B</u>undesanstalt für <u>G</u>ewässerkunde (BfG)	
Untersuchung von Wasserständen und Abflüssen sowie der Geometrie und des morphologischen Zustands der Wasserstraßen	
<u>F</u>orschungsinstitut <u>W</u>asser und <u>U</u>mwelt (FWU), Universität Siegen	
Untersuchung der Wasserstandsentwicklung an der Deutschen Nord- und Ostseeküste, Hochwasserschutz im Binnen- und Küstenbereich, hydrologische und wasserbauliche Systemanalysen sowie Flussgebiets- und Küstenzonenmanagement	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Jensen; Tel.: 0271-740-2172; E-Mail: jensen@fb10.uni-siegen.de
<u>B</u>undesamt für <u>B</u>evölkerungsschutz und <u>K</u>atastrophenhilfe (BBK)	
Erarbeitung von Risikoanalysen für kritische Infrastrukturen, Entwicklung von Gefährdungskatastern, Erarbeitung von Krisen- und Gefahrenabwehrplänen für (Versorgungs-) Infrastruktur	Jürgen Strauß; Tel.: 0228-5554-3305; E-Mail: juer-gen.strauss@bbk.bund.de
<u>A</u>lfred-<u>W</u>egener-<u>I</u>nstitut (AWI)	
Untersuchung des gekoppelten Systems Ozean-Eis-Atmosphäre und dessen Einfluss auf das globale Klima	
<u>I</u>nstitut <u>n</u>ational de l'<u>e</u>nvironnement industriel et des <u>r</u>isques (INERIS)	
Risikobewertung und Risikomanagement für Industrieanlagen und kritische Infrastrukturen	Bastien Affeltranger; Tel.: +33-34455-6953; E-Mail: bastien.affeltranger@ineris.fr

10 Referenzen

- /ANS 03/ American Nuclear Society (ANS)
American national Standard on External-Events PRA Methodology,
ANSI/ANS-58.21-2003, March 2003
- /ARR 96/ Arrhenius, S. A.
On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the
ground, The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and
Journal of Science 5, pp. 237-276, 1896
- /ASN 02/ Autorité de sûreté nucléaire (ASN)
Développement et utilisation des études probabilistes de sûreté, Règles fon-
damentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base, Règle
fondamentale de sûreté n°2002-1, Décembre 2002
- /BAS 06/ Basher, R.
Environment, Climate, and Disaster Reduction, Beitrag zur Rapid Climate
Change International Science Conference, 24. - 27. Oktober 2006, Bir-
mingham, United Kingdom, Oktober 2006
- /BMI 77/ Bundesministerium des Inneren (BMI)
Sicherheitskriterien für Kernkraftwerke, Bonn, Oktober 1977
- /BMU 96/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Grundlagen zur periodischen Sicherheitsüberprüfung, 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 05/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Sicherheitsüberprüfung für Kernkraftwerke gemäß §19a des Atomgesetzes
- Leitfaden Probabilistische Sicherheitsanalyse, 31. Januar 2005,
Bekanntmachung vom 30. August 2005, Bundesanzeiger, Jahrgang 57,
Nummer 207a, ISSN 0720-6100, 3. November 2005
- /BMU 07/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)
Übereinkommen über nukleare Sicherheit, Bericht der Bundesrepublik
Deutschland für die Vierte Überprüfungstagung im April 2008, Oktober
2007
- /CHA 06/ Challenor, P. G., D. P. McNeall
The Probability of Rapid Climate Change in an Intermediate Complexity
Climate Model, Beitrag zur Rapid Climate Change International Science
Conference, 24. - 27. Oktober 2006, Birmingham, United Kingdom,
Oktober 2006
- /DMG 07/ Deutsche Meteorologische Gesellschaft (DMG)
Stellungnahme der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft zur Klima-
problematik, 09.10.2007, Oktober 2007
- /DRI 06/ Drijfhout, S. S., W. Hazeleger
Detecting Atlantic MOC changes in an ensemble of climate change simula-
tions, Beitrag zur Rapid Climate Change International Science Conference,
24. - 27. Oktober 2006, Birmingham, United Kingdom,
Oktober 2006
- /FAK 05/ Facharbeitskreis (FAK) Probabilistische Sicherheitsanalyse für
Kernkraftwerke
Methoden zur probabilistischen Sicherheitsanalyse für Kernkraftwerke,
Stand: August 2005, BfS-SCHR-37/05, Wirtschaftsverlag NW / Verlag für
neue Wissenschaft GmbH, Salzgitter ISSN 0937-4469,
ISBN 3-86509-414-7, Oktober 2005

- /FIC 06/ Fichet, T., et al.
Modeling the interactions between the Greenland ice, Beitrag zur Rapid Climate Change International Science Conference, 24. - 27. Oktober 2006, Birmingham, United Kingdom, Oktober 2006
- /GFZ 04/ GeoForschungsZentrum (GFZ) Potsdam
Risiken durch Naturgefahren in Deutschland - Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK), Scientific Technical Report, Herausgeber: Dr.-Ing. Bruno Merz, Dr. Heiko Apel, GeoForschungsZentrum Potsdam, Juni 2004
- /GRA 06/ Grabs, W.
Contribution to the Plenary Session on Environment and Disaster Management at the International Disaster Reduction Conference (IDRC), 27. August - 1. September 2006, Davos, Schweiz, Juni 2006
- /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
- /GRS 93/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
SWR-Sicherheitsanalyse, Juni 1993
- /GRS 01/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Auswertung einer Länderumfrage des BMU zum Hochwasserschutz deutscher Kernkraftwerke, 2001
- /GRS 03/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Ergänzungen zum GRS-Bericht „Auswertung einer Länderumfrage des BMU zum Hochwasserschutz deutscher Kernkraftwerke“, 2003
- /GRS 03a/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Auswertung einer Länderumfrage des BMU zum Einfluss stark steigender Flusstemperaturen auf den Betrieb deutscher Atomkraftwerke, 2003

- /GRS 06/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS)
Homepage des Projektes zur Aktualisierung des kerntechnischen Regelwerkes, <http://regelwerk.grs.de>, 2006
- /IAE 01/ International Atomic Energy Agency (IAEA) and OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
The International Nuclear Event Scale (INES) User's Manual, IAEA-INES-2001, Wien, Februar 2001
- /IAE 03/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Meteorological Events in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-3.4, Mai 2003
- /IAE 03a/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
External Events Excluding Earthquakes in the Design of Nuclear Power Plants, Safety Standards Series No. NS-G-1.5, November 2003
- /IAE 03b/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Flood Hazard for Nuclear Power Plants on Coastal and River Sites
Safety Standards Series No. NS-G-3.5, Dezember 2003
- /IAE 08/ International Atomic Energy Agency (IAEA)
Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants, Draft Safety Guide, DS 394, Stand: März 2008
- /IPC 07/ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2007

- /IPC 07a/ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
 Summary for Policymakers, in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, United Kingdom and New York, USA, 2007
- /IPC 07b/ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
 Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)], IPCC, Schweiz, 2007
- /IPC 07c/ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)
 Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2007
- /JEN 03/ Jensen, J., et al.
 Neue Verfahren zur Abschätzung von seltenen Sturmflutwasserständen, HANSA - International Maritime Journal, Sonderdruck aus HANSA 11/2003, Schiffahrts-Verlag Hansa C. Schroedter Co., Hamburg, 2003
- /JON 05/ Jonas, M., T. Staeger, C.-D. Schönwiese
 Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland, Forschungsbericht 201 41 254, UBA-FB 000845, August 2005
- /JUN 06/ Jungclaus, J. H., et al.
 Will Greenland melting halt the Thermohaline Circulation? Beitrag zur Rapid Climate Change International Science Conference, 24. - 27. Oktober 2006, Birmingham, United Kingdom, Oktober 2006

- /KLE 01/ Kleeberg, H.-B., A. H. Schumann
Ableitung von Bemessungsabflüssen kleiner Überschreitungswahrscheinlichkeiten, Wasserwirtschaft, 91. Jahrgang,
Heft 2, Februar 2001
- /KLI 05/ Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA)
Der Klimawandel in Baden-Württemberg, Kurzberichte Klimawandel 2005,
Kooperationsvorhaben "Klimaveränderung und Konsequenzen für die
Wasserwirtschaft" der Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie des
Deutschen Wetterdienstes, 2005
- /KLI 05a/ Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA)
Der Klimawandel in Bayern für den Zeitraum 2021-2050, Kurzberichte Kli-
mawandel 2005, Kooperationsvorhaben "Klimaveränderung und Conse-
quenzen für die Wasserwirtschaft" der Länder Baden-Württemberg und
Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes, 2005
- /KNO 03/ Knochenhauer, M., P. Louko
Guidance for External Events Analysis, SKI Report 02:27, Februar 2003
- /KTA 00/ Kerntechnischer Ausschuss (KTA)
Auslegung von Kernkraftwerken gegen Blitzeinwirkungen, KTA 2206,
Sicherheitstechnische Regel des KTA, Juni 2006
- /MAR 06/ Marotzke, J.
From MOC observations to climate predictions? Beitrag zur Rapid Climate
Change International Science Conference, 24. - 27. Oktober 2006, Bir-
mingham, United Kingdom, Oktober 2006
- /MAY 07/ Mayer, J.
Klimawandel – Mögliche Anforderungen an den Bevölkerungsschutz –
Grundlagen, Praktikumsbericht zu einem Praktikum (02.01.07 - 28.02.07)
beim Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Februar
2007

- /MUE 07/ Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft
Zwischen Hoch und Tief - Wetterrisiken in Mitteleuropa, Edition Wissen,
2007
- /NAT 06/ Natural Environment Research Council
Programme and Abstracts, Rapid Climate Change International Science
Conference, 24. - 27. Oktober 2006, Birmingham, United Kingdom, 2006
- /NEA 07/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
OECD/NEA CSNI WGRISK Task Group 2006-1, Probabilistic Safety Analy-
sis (PSA) of Other Off-Site External Events than Earthquake - Question-
naire, Juni 2007
- /NEA 08/ OECD Nuclear Energy Agency (NEA)
OECD/NEA CSNI WGRISK Task Group 2006-1, Probabilistic Safety Analy-
sis (PSA) of Other Off-Site External Events than Earthquake - Summary
Report (draft), März 2008
- /NRC 83/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
PRA Procedures Guide, A Guide to the Performance of Probabilistic Risk
Assessment for Nuclear Power Plants, NUREG/CR-2300, Vol. 2,
January 1983
- /NRC 98/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
General Site Suitability Criteria for Nuclear Power Stations, Regulatory
Guide 4.7, April 1998
- /NRC 06/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Technical Basis for Regulatory Guidance on Lightning Protection in Nuclear
Power Plants, Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2001/140,
NUREG/CR-6866, Januar 2006
- /NRC 07/ United States Nuclear Regulatory Commission (NRC)
Design Basis Tornado and Tornado Missiles for Nuclear Power Plants,
Regulatory Guide 1.76, März 2007

- /OCC 03/ Organe consultatif sur les changements climatiques / Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung
Extremereignisse und Klimaänderung, ISBN 3-907630-23-8, Bern, Schweiz, September 2003
- /PAR 95/ Park, Y. J., M. Reich
Probabilistic wind/tornado/missile analyses for hazard and fragility evaluations, in: Conference Proceedings of the 5. Department of Energy (DOE) natural phenomena hazards mitigation symposium, Denver, USA, Oktober 1995
- /PAR 07/ Parry, M. L., et al.
Technical Summary, Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2007
- /PIK 05/ Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung (KLARA), PIK Report No. 99, Manfred Stock (Hrsg.), Potsdam, Deutschland, Juli 2005
- /PLA 01/ Plate, E. J., B. Merz (Hrsg.)
Naturkatastrophen – Ursachen, Auswirkungen, Vorsorge, ISBN 3-510-65195-2, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 2001
- /RSK 96/ Reaktorsicherheitskommission (RSK)
RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren, November 1996
- /SCH 92/ Schönwiese, C.-D.
Klima im Wandel – Tatsachen, Irrtümer, Risiken, ISBN 3-421-02764-1, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1992
- /SCH 06/ Schott, F.
The Atlantic MOC during the past decade: a northern perspective, Beitrag zur Rapid Climate Change International Science Conference, 24. - 27. Oktober 2006, Birmingham, United Kingdom, Oktober 2006

- /SOL 07/ Solomon, S., et al.
Technical Summary, in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 2007
- /SPE 07/ Spekat, A., W. Enke, F. Kreienkamp
Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2, Endbericht zu einem Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes, Januar 2007
- /TET 07/ Tetzlaff, G.
Klimawandel – Prognosen und zu erwartende Anpassungs-Szenarien für den Katastrophenschutz, Beitrag zum 3. Europäischen Katastrophenschutzkongress, 30. - 31. Oktober 2007, Bonn Bad Godesberg, Deutschland, Oktober 2007
- /THO 07/ Thommes, W.
Mit Wissensmanagement und Wetterinformationsdiensten die Katastrophenprävention stärken, Beitrag zum 3. Europäischen Katastrophenschutzkongress, 30. - 31. Oktober 2007, Bonn Bad Godesberg, Deutschland, Oktober 2007
- /WAR 07/ Warm, H.-J., K.-E. Köppke
Schutz von neuen und bestehenden Anlagen und Betriebsbereichen gegen natürliche, umgebungsbedingte Gefahrenquellen, insbesondere Hochwasser (Untersuchung vor- und nachsorgender Maßnahmen), Forschungsbericht 203 48 362, UBA-FB 001047, Herausgeber: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Oktober 2007

- /WOL 06/ Wolff, E.
Rapid climate changes have occurred in the past: 8.2k and Dansgaard-Oeschger events in ice core and other palaeorecords, Beitrag zur Rapid Climate Change International Science Conference, 24. - 27. Oktober 2006, Birmingham, United Kingdom, Oktober 2006
- /WOO 06/ Wood, R.
Predicting the future of the MOC, Beitrag zur Rapid Climate Change International Science Conference, 24. - 27. Oktober 2006, Birmingham, United Kingdom, Oktober 2006
- /WSL 06/ Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)
Proceedings of the International Disaster Reduction Conference (IDRC), 27. August - 1. September 2006, Davos, Schweiz, Juni 2006
- /YVL 96/ Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety (STUK)
Safety criteria for design of nuclear power plants, YVL 1.0, March 1996
- /YVL 00/ Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety (STUK)
Safety criteria for siting a nuclear power plant, YVL 1.10, July 2000
- /YVL 03/ Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety (STUK)
Probabilistic safety analysis in safety management of nuclear power plants, YVL 2.8, May 2003

11 Verteiler

BMWi

Referat III B 4 1 x

GRS-PT/B

Internationale Verteilung 40 x

Projektbegleiter (bri) 3 x

GRS

Geschäftsführung (hah, stj) je 1 x

Bereichsleiter (erv, lim, prg, tes, rot, zir) je 1 x

Abteilungsleiter (gls, poi, paa, som, teh, mem, ver) je 1 x

Abteilung 5050 (row) 1 x

Projektleiter (thu) 1 x

Projektbetreuung (kgl) 1 x

Informationsverarbeitung (nit) 1 x

Autoren (thu, kra) je 1 x

Bibliothek (Garching, Köln) je 1 x

Gesamtauflage 67 Exemplare